

**KATI YIĞINLARIN AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ VE SİLO TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kim. Müh. Serkan ÇAĞLI

(506021009)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Nisan 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Mayıs 2005

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nuran DEVECİ

Prof. Dr. Hasancan OKUTAN

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. A. Ayhan SİRKECİ (İ.T.Ü.)

Doç. Dr. F. Seniha GÜNER (İ.T.Ü.)

**Doç. Dr. Yıldırım TEOMAN (Türkiye Şişe ve
Cam Fab. A.Ş.)**

MAYIS 2005

ÖNSÖZ

Yığınlar halindeki katıların silolardan akışının genellikle sorunlu olduğu bilinmektedir. Düzensiz akışın yanı sıra akışta kısmi veya tamamıyla tıkanmalar meydana gelmektedir. Bu sorunlar katı yığınların silolardaki akış davranışının iyi analiz edilmesiyle giderilebilmektedir. Bunun için de öncelikle katıların birtakım akış özelliklerini kesme testleriyle belirlemek gerekir. Sonrasında da literatürde çok kabul gören Jenike tasarım yöntemini kullanarak silo boyutlarını belirlemek mümkündür.

Gerçekleştirilmiş olan bu çalışma, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş.' de cam üretiminde kullanılan hammaddelerden bazılarının akış özelliklerinin belirlenmesine ve elde edilen sonuçlara göre düzenli bir akışa izin verecek uygun siloların tasarlanmasına yöneliktir. Ayrıca, bu çalışmanın bundan sonra bu konuda yapılacak olan çalışmalara da ışık tutması amaçlanmıştır.

Çalışmamın her aşamasında desteklerini gördüğüm ve bana doğru yönlendirmelerde bulunan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Nuran DEVECİ' ye, Sayın Prof. Dr. Hasancan OKUTAN' a ve deneyimlerinden büyük ölçüde faydalandığım Sayın Doç. Dr. A. Ayhan SİRKECİ' ye sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması, Türkiye Şişe ve Cam Fab. A.Ş. ile İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi arasında imzalanan araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projeye destek veren Türkiye Şişe ve Cam Fab. A.Ş.' ye ve çalışmam sırasında değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Türkiye Şişe ve Cam Fab. A.Ş. Araştırma ve Teknoloji Genel Müdür Yardımcısı Sayın Doç. Dr. Yıldırım TEOMAN' a en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Her zaman yanımda olan arkadaşlarım Araş. Gör. Y. Kimya Mühendisi Didem OMAV' a, Araş. Gör. Y. Andelip ERDOĞAN' a, kader arkadaşım Y. Malzeme Mühendisi Taner BOSTANCI' ya, cihazla ilgili sorunlarımda yardımcı olan Sayın Ferhan TOPÇUOĞLU' na, sayın hocam Araş. Gör. Y. Kimya Mühendisi Halil DERTLİ' ye ve Teknisyen Şenel KARANCI' ya teşekkür ederim.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca sabırlı desteklerinden dolayı sevgili aileme de sonsuz teşekkürler...

Mayıs 2005

Serkan ÇAĞLI

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii

1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TANECİKLİ YAPIDAKİ KATI YIĞINLARIN ÖZELLİKLERİ	5
2.1 Katı Taneciklerin Karakterizasyonu	5
2.1.1 Tanecik Büyüklüğü, Şekli ve Yüzey Alanı	5
2.1.2 Tanecik Ortalama Büyüklüğü ve Büyüklük Dağılımı	8
2.1.3 Yoğunluk	11
2.2 Tanecik-Tanecik ve Tanecik-Sıvı Etkileşimleri	13
2.2.1 Elektrostatik Kuvvetler	13
2.2.2 Van der Waals Kuvvetleri	14
2.2.3 Kapiler Kuvvetler	15
2.3 Geldart Sınıflandırması	16
3. KATI YIĞINLARIN AKIŞ ÖZELLİKLERİ	18
3.1 Genel Özellikler	18
3.1.1 Hareketsiz Katı Yığındaki Basınç Dağılımı (Janssen denklemi)	19
3.1.2 Silolardaki Gerilme Alanları –Akışın Basınç Üzerindeki Etkisi	21
3.2 Genel Kavramlar	23
3.2.1 Esas Gerilme	23
3.2.2 Mohr Çemberi Analizi	24
3.3 Katı Yığınların Akabilirliği	26
3.3.1 Yığın Açısı	26
3.3.2 Akma Sınırı Hattı	27

3.3.2.1 İç Sürtünme Açısı	31
3.3.2.2 Kohezyon	31
3.3.2.3 Gerileme Kuvveti	31
3.3.3 Etkin Akma Sınırı Hattı	32
3.3.4 Duvar Akma Sınırı Hattı	34
3.3.4.1 Kinematik Duvar Sürtünme Açısı	34
3.3.5 Büyük Konsolidasyon Gerilmesi	35
3.3.6 Sınırlanmamış Akma Sınırı Gerilmesi	35
3.3.7 Zaman Etkili Akma Sınırı Hattı	36
3.3.8 Akış Fonksiyonu	38
3.3.9 Katıların Akabilirliğinin Genel Sınıflandırılması	40
3.3.10 Tanecik Boyutu	41
3.3.11 Akış Parametrelerinin Analitik Yöntemle Belirlenmesi	41
3.4 Katı Yığınların Akış Özelliklerinin Belirlenmesi	43
3.4.1 Kesme Testi	43
3.4.2 Kesme Test Cihazları	43
3.4.2.1 Doğrudan Kesme Test Cihazı	44
3.4.2.2 Halka Kesme Test Cihazı	45
3.4.2.3 Rotasyonel Kesme Test Cihazı	46
3.4.2.4 İki-eksenli Kesme Test Cihazı	47
3.4.2.5 Üç-eksenli Kesme Test Cihazı	48
4. SİLOLARDA DEPOLANMIŞ KATI YIĞINLARIN AKIŞI VE SİLO TASARIMI	50
4.1 Katı Yığın Akışındaki Sorunlar	50
4.1.1 Kemerlenme	50
4.1.2 Kanallanma	51
4.1.3 Düzensiz Akış	52
4.1.4 Taneciklerin Ayrışması (Segregasyon)	52
4.2 Silolardaki Akış Modelleri	53
4.2.1 Kütle Akış	53
4.2.2 Huni Akış	55
4.3 Silo Çıkışının Akabilirliği	57
4.3.1 Akış Faktörü	57
4.3.2 “Akış – Akış yok” Kriteri (Jenike)	58
4.3.3 Silo Çıkış Boyutunun Belirlenmesi	59
4.3.4 Akış Faktörlerinin Hesaplanması	62
4.3.5 Tasarım-Akış Faktörü Grafikleri	63
4.4 Silo Şekilleri	64
4.4.1 Kütle Akış Siloları	64

4.4.2 Huni Akış Siloları	66
4.5 Kütle Akış Siloları için Tasarım Yöntemleri	67
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	71
5.1 Materyal	71
5.1.1 Kullanılan Malzemeler	71
5.1.2 Kullanılan Cihazlar	71
5.1.2.1 Jenike Kesme Test Cihazı	72
5.1.2.2 Diğer Cihazlar	75
5.2 Yöntem	75
5.2.1 Anlık Akış İçin Kesme Testi	75
5.2.1.1 Numune Seçimi	75
5.2.1.2 Kesme Hücresi Seçimi	76
5.2.1.3 Ağırlıklar ve Gerilme Değerleri Arasındaki Bağntı-Standart Ağırlıkların Seçimi	77
5.2.1.4 Normal Gerilme Seviyelerinin Seçilmesi	78
5.2.1.5 Numunenin Hazırlanması	79
5.2.1.6 Optimizasyon	80
5.2.1.7 Kesme Testi	83
5.2.1.8 Kesme Gerilmesi Değerlerinin Düzeltilmesi	85
5.2.1.9 Kesme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	86
5.2.2 Duvar Sürtünmesi için Kesme Testi	87
5.2.2.1 Duvar Sürtünmesi Normal Gerilme Seviyelerinin Seçimi	87
5.2.2.2 Malzeme ve Duvar Numunesinin Hazırlanması	88
5.2.2.3 Duvar Sürtünme Testleri	89
5.2.2.4 Duvar Sürtünme Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	91
6. SONUÇLAR	92
6.1 Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	92
6.2 Malzemelerin Akış Parametreleri	93
6.2.1 Akma Sınırı Hattının Belirlenmesi	93
6.2.2 Duvar Akma Sınırı Hattının Belirlenmesi	100
6.2.3 Silo Tasarımında Kullanılacak Parametrelerin Belirlenmesi	102
6.2.3.1 Akış Fonksiyonu	105
6.2.3.2 Konsolidasyon Gerilmesine Göre Olan Diğer Değişimler	107
6.2.3.3 Malzemelerin Sınıflandırılması	109
6.3 Kütle Akış için Silo Parametrelerinin Belirlenmesi	110

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	117
KAYNAKLAR	123
EKLER	126
ÖZGEÇMİŞ	183

KISALTMALAR

YL	: Yield Locus
EYL	: Effective Yield Locus
TYL	: Time Yield Locus
LYL	: Linearasized Yield Locus
FF	: Flow Function
ff	: Flow Factor
ff_c	: Flow Index

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Katı yığın malzemelerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması 6
Tablo 2.2	Düzensiz taneciklerin eşdeğer çapları 7
Tablo 2.3	Büyüklük dağılımına sahip tanecikler için çeşitli ortalama çap tanımlamaları 10
Tablo 3.1	Katıların akabilirliğinin akış fonksiyonlarına göre sınıflandırılması 40
Tablo 4.1	Kütle ve huni akış silolarının avantaj ve dezavantajları 57
Tablo 5.1	Test malzemesinin yığın yoğunluğuna göre ilk ön-kesme normal gerilme değeri seçimi 78
Tablo 6.1a	Kullanılan malzemelerin bazı fiziksel özellikleri 92
Tablo 6.1b	Kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları 93
Tablo 6.2	Yalıköy kumu (%3.6 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları 95
Tablo 6.3	Bütün malzemeler için seçilen ön-kesme normal gerilme seviyelerindeki akma sınırı hatlarından bulunan akış parametreleri 98
Tablo 6.4	Yalıköy kumu (%3.6 nem) için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları 100
Tablo 6.5	Yalıköy kumu (%3.6 nem) için elde edilen akış parametreleri 103
Tablo 6.6	Yalıköy kumunun farklı nem içerikleri için elde edilen akış parametreleri 105
Tablo 6.7	Malzemelerin akış fonksiyonlarına göre sınıflandırılması 109
Tablo 6.8	Yalıköy kumunun (%3.6 nem) tasarım için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen iterasyon sonuçları 112
Tablo 6.9	Yalıköy kumu (%3.6 nem) için elde edilen tasarım sonuçları. 113
Tablo 6.10	Kullanılan malzemeler için tasarım sonucunda bulunan silo parametreleri 114
Tablo 6.11	Kullanılan malzemeler için silo tasarımında elde edilen iterasyon sonuçları 116
Tablo C.1	Yalıköy kumu (%1 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları 146
Tablo C.2	Yalıköy kumu (%14 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları 149
Tablo C.3	Kalker (%0.04 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları 152
Tablo C.4	Dolomit (%0.025 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları 155

Tablo C.5	Sarıkum (%7 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları	158
Tablo C.6	Safaalanı kumu (%4 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları	161
Tablo C.7	Soda (%0.25 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları	164
Tablo C.8	Kil (%0.24 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları	167
Tablo D.1	Kalker için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları	170
Tablo D.2	Dolomit için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları	171
Tablo D.3	Sarıkum için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları	172
Tablo D.4	Safaalanı kumu için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları	173
Tablo D.5	Soda için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları	174
Tablo D.6	Kil için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları	175
Tablo E.1	Kalker için elde edilen akış parametreleri	176
Tablo E.2	Dolomit için elde edilen akış parametreleri	177
Tablo E.3	Sarıkum için elde edilen akış parametreleri	178
Tablo E.4	Safaalanı kumu için elde edilen akış parametreleri	179
Tablo E.5	Soda için elde edilen akış parametreleri	180
Tablo E.6	Kil için elde edilen akış parametreleri	181

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Tanecik büyüklük dağılımının grafiksel olarak gösterilmesi	9
Şekil 2.2	Katı malzemeleri havadaki akışkanlaştırma davranışlarına göre sınıflandıran Geldart diyagramı	17
Şekil 3.1	Sıvılar ve katı yığınlardaki basınç dağılımları	19
Şekil 3.2	Silindirik bir kaptaki yığın malzemenin basıncının derinlikle değişimi	20
Şekil 3.3	Silolarda başlangıç (dolum) ve akış anındaki gerilme alanları ..	22
Şekil 3.4	Katı bir elemana etkiyen gerilmeler	24
Şekil 3.5	Mohr gerilme çemberi	25
Şekil 3.6	Bir katının yığın açısı	26
Şekil 3.7	Kusursuz, serbest akışlı katı için akma sınırı hattı	28
Şekil 3.8	Bir katıya etkiyen çeşitli gerilme durumlarının geometrik gösterimi	29
Şekil 3.9	Gerçek, kohesif bir katıya ait akma sınırı hattı (YL) ve ilgili parametreler	30
Şekil 3.10	Siloda akan katı elemana etkiyen basınç	32
Şekil 3.11	Duvar akma sınırı hattı (WYL)	35
Şekil 3.12	f_c değerinin ölçülmesi	36
Şekil 3.13	Bir katı yığının zaman etkisiyle oluşan akma sınırı hattı (TYL)	37
Şekil 3.14	Akış fonksiyonu (FF)	38
Şekil 3.15	Katı yığınlar için çeşitli akış fonksiyonları	39
Şekil 3.16	Islatıcı sıvı varlığına göre akış fonksiyonu eldesi	40
Şekil 3.17	Akış fonksiyonunun eğimine göre katı özelliği	41
Şekil 3.18	Bir katının akış parametrelerinin belirlenmesi amacıyla sonuçların uygun geometrik gösterimi	42
Şekil 3.19	Doğrudan kesme test cihazlarının şematik gösterimi	45
Şekil 3.20	Halka kesme test cihazına ait kesme hücresinin şematik gösterimi	46
Şekil 3.21	Rotasyonel kesme test cihazının şematik gösterimi	47
Şekil 3.22	İki-eksenli kesme test cihazının şematik görünümü	47
Şekil 3.23	Üç-eksenli hücrenin şematik gösterimi	48
Şekil 4.1	Silo çıkışında kemer oluşumu	51
Şekil 4.2	Siloda kanal (rathole) oluşumu	51
Şekil 4.3	Düzensiz akış (Taşma- Flooding)	52
Şekil 4.4	Katı taneciklerin ayrışması (Segregasyon)	53
Şekil 4.5	Silolardaki akış modelleri	54
Şekil 4.6	Silodaki kemerlenme durumunun şematik gösterimi	58
Şekil 4.7	Üniform kalınlıktaki bir kemere etkiyen kuvvetler	60
Şekil 4.8	$H(\alpha)$ fonksiyonu	61
Şekil 4.9	Akışın olup olmama durumunun grafiksel gösterimi	62
Şekil 4.10	Akış faktörü grafiklerine bir örnek	63

Şekil 4.11	Tipik kütle akış siloları	65
Şekil 4.12	Düzlem-akış silolarda düzgün geçiş	66
Şekil 4.13	Tipik huni akış siloları	67
Şekil 5.1	Testlerde kullanılan silo duvar malzemeleri	71
Şekil 5.2	Jenike kesme test cihazı ve yazıcı	73
Şekil 5.3	Jenike kesme hücresinin şematik gösterimi	73
Şekil 5.4	Jenike test hücresinin parçaları	74
Şekil 5.5	Düşey yük olarak kullanılan standart ağırlıklar	74
Şekil 5.6	Jenike test hücresinin a) Başlangıç ofset konumu b) Son ofset konumu	74
Şekil 5.7	Kritiğin üstünde (1), kritik (2) ve kritiğin altında (3) konsolide edilmiş numunelerin kesme mesafesi - kuvvet eğrileri	82
Şekil 5.8	Numunenin sıkıştırma derecesine bağlı olarak yazıcıdan alınmış bir kayıt	82
Şekil 5.9	Mesafe – gerilme eğrileri (Ön-kesme ve kesme)	84
Şekil 5.10	Ön-kesme ve kesme işlemindeki yazıcıdan alınmış bir kayıt	85
Şekil 5.11	Kesme testi sonuçlarının gösterilmesi	86
Şekil 5.12	Duvar testi için deney düzeneği	88
Şekil 5.13	Duvar sürtünme testi için kesme gerilmesi kaydı	90
Şekil 5.14	Duvar testi için yazıcıdan alınmış olan bir kayıt	90
Şekil 5.15	Duvar sürtünme test sonuçlarının gösterilmesi	91
Şekil 6.1	Yalılıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 4.12 kPa)	96
Şekil 6.2	Yalılıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 8.55 kPa)	96
Şekil 6.3	Yalılıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 17.96 kPa)	97
Şekil 6.4	Yalılıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 31.80 kPa)	97
Şekil 6.5	Yalılıköy kumunun (%3.6 nem) çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)	101
Şekil 6.6	Duvar akma sınırı hatlarının akma sınırı hattının olduğu grafik üzerinde gösterilmesi	103
Şekil 6.7	Kullanılan malzemelere ait akış fonksiyonları	105
Şekil 6.8	σ_1' in fonksiyonu olarak Yalılıköy kumunun (% 3.6 nem) özellikleri	108
Şekil 6.9	FF ve ff doğrularının aynı grafik üzerinde gösterilmesi	111
Şekil B.1	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=30^\circ$)	128
Şekil B.2	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=35^\circ$)	129
Şekil B.3	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=40^\circ$)	130
Şekil B.4	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=45^\circ$)	131
Şekil B.5	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=50^\circ$)	132
Şekil B.6	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=55^\circ$)	133
Şekil B.7	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=60^\circ$)	134
Şekil B.8	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=65^\circ$)	135
Şekil B.9	Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=70^\circ$)	136
Şekil B.10	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=30^\circ$)	137
Şekil B.11	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=35^\circ$)	138

Şekil B.12	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=40^\circ$)	139
Şekil B.13	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=45^\circ$)	140
Şekil B.14	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=50^\circ$)	141
Şekil B.15	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=55^\circ$)	142
Şekil B.16	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=60^\circ$)	143
Şekil B.17	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=65^\circ$)	144
Şekil B.18	Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=70^\circ$)	145
Şekil C.1	Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 4.11 kPa)	147
Şekil C.2	Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 8.54 kPa)	147
Şekil C.3	Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 17.96 kPa)	148
Şekil C.4	Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 31.79 kPa)	148
Şekil C.5	Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 4.12 kPa)	150
Şekil C.6	Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 8.55 kPa)	150
Şekil C.7	Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 17.96 kPa)	151
Şekil C.8	Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 31.80 kPa)	151
Şekil C.9	Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 3.00 kPa)	153
Şekil C.10	Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 6.66 kPa)	153
Şekil C.11	Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 12.07 kPa)	154
Şekil C.12	Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 23.69 kPa)	154
Şekil C.13	Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 3.01 kPa)	156
Şekil C.14	Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 6.69 kPa)	156
Şekil C.15	Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 12.08 kPa)	157
Şekil C.16	Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 23.71 kPa)	157
Şekil C.17	Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.92 kPa)	159
Şekil C.18	Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 5.62 kPa)	159

Şekil C.19	Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 10.76 kPa)	160
Şekil C.20	Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 20.87 kPa)	160
Şekil C.21	Safaalanı kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.91 kPa)	162
Şekil C.22	Safaalanı kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 5.62 kPa)	162
Şekil C.23	Safaalanı kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 10.75 kPa)	163
Şekil C.24	Safaalanı kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 20.85 kPa)	163
Şekil C.25	Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.92 kPa)	165
Şekil C.26	Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 6.59 kPa)	165
Şekil C.27	Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 11.98 kPa)	166
Şekil C.28	Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 23.71 kPa)	166
Şekil C.29	Kil (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.69 kPa)	168
Şekil C.30	Kil (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 5.19 kPa)	168
Şekil C.31	Kil (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 10.73 kPa)	169
Şekil C.32	Kil (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 20.84 kPa)	169
Şekil D.1	Kalkerin çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)	170
Şekil D.2	Dolomitin çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)	171
Şekil D.3	Sarıkumun çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)	172
Şekil D.4	Safaalanı kumunun çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)	173
Şekil D.5	Sodanın çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)	174
Şekil D.6	Kilin çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)	175
Şekil E.1	Yalıköy kumunun farklı nem içeriklerindeki akış fonksiyonları	176
Şekil E.2	σ_1' in fonksiyonu olarak kalkerin özellikleri	177
Şekil E.3	σ_1' in fonksiyonu olarak dolomitin özellikleri	178
Şekil E.4	σ_1' in fonksiyonu olarak sarıkumun özellikleri	179
Şekil E.5	σ_1' in fonksiyonu olarak Safaalanı kumunun özellikleri	180
Şekil E.6	σ_1' in fonksiyonu olarak sodanın özellikleri	181
Şekil E.7	σ_1' in fonksiyonu olarak kilin özellikleri	182

SEMBOL LİSTESİ

Φ_s	: Küresellik
d	: Eşdeğer çap
d_v	: Hacim eşdeğer çapı
d_s	: Yüzey eşdeğer çapı
A_{sp}	: Tanecik yüzey alanı
V	: Hacim
V_p	: Tanecik hacmi
R	: Rosin-Rammler dağılımı
$n, \bar{d}$	: Rosin-Rammler dağılım parametreleri
d_p	: Tanecik büyüklüğü
ε	: Boşluk oranı
ρ_b	: Yığın yoğunluğu
ρ_p	: Tanecik yoğunluğu
ρ_f	: Akışkan yoğunluğu
ρ_s	: Malzeme yoğunluğu
ρ_c	: Malzemenin en yüksek sıkıştırma (konsolidasyon) seviyesindeki yoğunluğu
F_{el}	: Elektrostatik kuvvet
Q_1, Q_2	: Tanecik yükleri
ξ	: Sıvının elektriksel geçirgenliği
Z	: Taneciklerin merkezleri arasındaki mesafe
$R_{1,2}$	: Tanecik çapları
F	: Kuvvet
F_{van}	: Van der Waals çekim kuvveti
h_ω	: Lifshitz-Van der Waals sabiti
F_{kap}	: Kapiler çekim kuvveti
φ	: Islatma açısı
η	: Yüzey gerilimi
P_r, P_z	: Silindirik bir kaptaki yanal ve düşey basınçlar
K	: Silindirik bir kaptaki yanal basıncın düşey basınca oranı
μ_w	: Duvardaki sürtünme katsayısı
g	: Yerçekimi ivmesi
z	: Derinlik
D	: Çap
σ_1	: Büyük (birincil) esas gerilme
σ_2	: Küçük (ikincil) esas gerilme
σ_3	: Orta esas gerilme
σ_θ	: Normali θ açısı yönünde olan keyfi bir düzlem üzerindeki normal gerilme
τ_θ	: Normali θ açısı yönünde olan keyfi bir düzlem üzerindeki kesme gerilmesi
β	: Yığın açısı
σ	: Normal gerilme

τ	: Kesme gerilmesi
ϕ	: İç sürtünme açısı
ϕ_t	: Statik iç sürtünme açısı
C	: Kohezyon
C_w	: Adezyon
T	: Gerileme kuvveti
T	: Silo çıkışında oluşan kemer kalınlığı
$\sigma_c (f_c)$	: Sınırlanmamış akma sınırı gerilmesi
σ_1, σ_2	: Büyük ve küçük konsolidasyon gerilmeleri (basınçları)
δ	: Etkin iç sürtünme açısı
ϕ'	: Kinematik duvar sürtünme açısı
ϕ'_t	: Statik duvar sürtünme açısı
$\sigma_{c,t}$	: Zaman etkili sınırlanmamış akma sınırı gerilmesi
p	: Mohr çemberi merkezi
σ_x, σ_y	: x ve y yönlerindeki gerilmeler
$\bar{\sigma}_1$	: Bir kemerde etkiyen gerilme (basınç)
B	: Silo çıkış çapı (genişliği)
L	: Silo uzunluğu (düzlem-akış)
γ	: Spesifik ağırlık
W	: Silo çıkışında oluşan kemerin ağırlığı
τ_w, σ_w	: Duvardaki kesme ve normal gerilmeler
$H(\alpha)$	: Silo çıkışına göre kemer kalınlığındaki değişimi hesaba katan fonksiyon
$\sigma_{c,kritik}$	: Kritik sınırlanmamış akma sınırı gerilmesi
α_c	: Silo duvar açısı (konik)
α_p	: Silo duvar açısı (düzlem-akış)
B_c, B_p	: Konik ve düzlem-akış silo için çıkış açıklıkları
B_{min}	: Minimum silo çıkış açıklığı
D_f, B_f	: Huni akış silolar için minimum çıkış boyutu
m	: Kütle
A	: Kesme hücresinin kesit alanı
F_s	: Kesme kuvveti
$\sigma_{p,1....4}$	: Ön-kesme normal gerilme seviyeleri
σ_p	: Ön-konsolidasyon işlemindeki normal gerilme
m_{wtw}	: Ön-konsolidasyon işleminde askının üzerindeki ağırlıkların toplamı
m_{wp}	: Ön-kesme işleminde askının üzerindeki ağırlıkların toplamı
m_{ws}	: Kesme işleminde askının üzerindeki ağırlıkların toplamı
τ_p	: Ön-kesme normal gerilme değerindeki (kararlı hal) kesme gerilmesi
τ_s	: Kesme normal gerilme değerindeki (kırılma anındaki) kesme gerilmesi
$\bar{\tau}_p$	: Ön-kesme kesme gerilmesi değerlerinin ortalaması
τ'_s	: Kesme normal gerilme değerindeki düzeltilmiş kesme gerilmesi
$\sigma_{1,2}$	: 2. ön-kesme normal gerilme değerindeki büyük konsolidasyon gerilmesi
$\sigma_{w1....6}$	: Duvar sürtünme testlerindeki normal gerilmeler
$\tau_{w1....6}$	: Duvar sürtünme testlerindeki kesme gerilmeleri

KATI YIĞINLARIN AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE SİLO TASARIMI

ÖZET

Yığın halindeki katı malzemelerle ilgilenen birçok endüstri dalı vardır. Bu malzemeler; kozmetik endüstrisindeki çok ince tanecikli tozlardan tarımcılık ve gıda endüstrisindeki ve tohum, un ve nişastaya, mineral ve maden endüstrisindeki cevher, çimento ve kömüre kadar çeşitlilik göstermektedir.

Bu malzemelerin yönetimi (depolanması, nakledilmesi ve boşaltımı) bu endüstrilerde önemli bir işlemdir. Katı yığınları depolama gereksinimindeki artışla beraber depolama silolarında sorunsuz bir akış elde etmek daha önce olduğundan daha önemli bir konu haline gelmiştir. Bu yüzden; büyüklük, bileşim ve nem içeriği gibi malzeme karakteristiklerinin silolarda katı malzemelerin statik ve dinamik koşullardaki davranışı üzerindeki etkisini anlamak gereklidir.

Bazı malzemeler diğerlerine kıyasla kolay bir şekilde akarlar. Nemli ve ince tanecikli katıların zor aktığı ve akışta tıkanmalara neden olduğu ise çok iyi bilinmektedir. Depolama esnasında genel olarak meydana gelen problemler katının topaklaşması, düzensiz besleme, taşma, kemerlenme, kanallanma ve silo duvarlarına yapışmasını içermektedir ve bu problemler silo kapasitesini belirlenen değerlerin altına düşürmektedirler.

Geçmiş yıllarda, katı yığınların yönetiminde, katı yığın malzemelerin çeşitli durumlardaki davranışlarını tanımlayan teoriler ve yöntemlerin geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Depolama siloları ve boşaltım ekipmanlarının tasarımı için geniş kapsamlı matematiksel modeller ve tasarım bilgileri yayınlanmıştır. Bu bilgiler, siloların yerçekimi etkisi altında sorunsuz ve tahmin edilebilir bir akış sağlayacak şekilde tasarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu akış modeli kütle akış olarak bilinmektedir. Jenike tarafından geliştirilen teori ve katı yığınların akış özelliklerinin belirlenmesiyle kütle akış sağlayacak siloların boyutlandırılması mümkün olmuştur.

Katı malzemelerin akış özelliklerini karakterize etmek için kullanılan standart yöntem kesme testidir ve bu testler sonucunda katıların akma sınırı hattı bilgisi elde edilir. Katıların diğer bütün akış özellikleri (iç sürtünme açısı, kohezyon, akış fonksiyonu, kinematik duvar sürtünme açısı, vs.) de bu akma sınırı hatlarından yola çıkılarak tespit edilirler.

Yapılan bu çalışmada ilk olarak, 7 farklı malzemenin akış özellikleri (kohezyon ve akma sınırı hattının eğimi) Jenike kesme test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, testlerde her malzeme için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki (konsolidasyon seviyesindeki) akma sınırı hatları belirlenmiştir. 3 çeşit kum örneği (sarıkum, Yalıköy ve Safaalanı kumu), soda, kalker, dolomit ve kilin akış özellikleri orijinal nem içeriklerinde belirlenmiştir. Ayrıca Yalıköy kumunun düşük ve yüksek nem içerikleri için de testler yapılmıştır. Yalıköy kumunun orijinal nem içeriğinde

farklı silo duvar malzemeleri (yüzey pürüzlülükleri farklı 2 çeşit beton, paslanmaz çelik ve normal sac) üzerindeki duvar akma sınırı hatları belirlenmiştir. Yalıköy kumu dışındaki malzemeler için duvar sürtünme testleri sadece daha pürüzlü beton yüzeyi ve paslanmaz çelikle yapılmıştır.

Akış fonksiyonu (veya akış indeksi) ile karakterize edilen katıların akabilirliği kullanılan malzemeler için tespit edilmiş ve malzemeler sınıflandırılmıştır. Her iki testin sonuçlarına göre bulunmuş olan parametreler siloda kütle akış sağlamak üzere tasarıma uygulanmıştır. Kütle akış için gerekli silo duvar açısı (eğimi) ve kemer oluşumunu engellemek için gerekli minimum çıkış boyutu ölçülen değerlerle hem konik (dairesel kesit) hem de düzlem akış (dikdörtgen kesit) silolar için Jenike tasarım yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Yapılan testlerin sonucunda, kohezyon değerlerinin artan normal gerilme değerleriyle birlikte arttığı ve yüksek nem oranı ve küçük tanecik boyutunun da kohezyon değerlerini artırdığı bulunmuştur. Çalışılmış olan her malzeme için farklı konsolidasyon seviyelerinde iç sürtünme açısı değerlerinde önemli bir farklılık yoktur.

Çalışılan malzemeler arasında akışı en zor olan malzemenin kil ve akışı en kolay olan malzemenin ise soda olduğu tespit edilmiştir. Kil ve soda kohesif ve serbest akışlı malzeme olarak sınıflandırılırken, bütün diğer malzemeler kolay akışlı malzeme sınıfında bulunmuşlardır. Yüksek nem oranı ve düşük tanecik boyutunun akış üzerinde ters bir etkisi olduğu söylenebilir. Yalıköy kumunun düşük nem içeriğindeki akışı orijinal nem içeriğindeki akışından daha kolayken, yüksek nem içeriğinde beklenildiği gibi daha zor bir akış elde edilmemiştir.

Duvar akma sınırı hatlarına göre, bütün malzemeler için en zor akış betonun daha pürüzlü yüzeyi üzerinde gerçekleşirken en kolay akış da paslanmaz çelik üzerinde gerçekleşir. Beton duvar malzemesiyle paslanmaz çelikten daha yüksek duvar sürtünme açısı değerleri elde edilmiştir. İstisnai bir durum olarak, sarıkum ve kalkerin paslanmaz çelikle elde edilen duvar sürtünme açısı değerleri diğer malzemelerin paslanmaz çelikle elde edilen değerlerinden daha büyüktür.

Beton silo duvar malzemesi üzerinde Safaalanı kumu, sarıkum, kalker ve kil için akış gerçekleşmez. Beton silolarda akış sadece Yalıköy kumu, dolomit ve soda için gerçekleşir, fakat yüksek duvar sürtünme açısı değerleri konik silolarda düşük silo duvar açılarının elde edilmesine neden olmuştur. Aynı depolama kapasitesini karşılamak üzere, silo duvar açısı ne kadar küçükse silolar o kadar dik ve uzun olurlar. Dikdörtgen şekilli düzlem akış silolar aynı malzeme özellikleriyle düşeyle 8-10° kadar daha büyük silo duvar açısına izin vermektedirler. Son olarak, silo duvar malzemesi olarak beton yerine paslanmaz çelik kullanmanın ya da düşük silo duvar açısı değerlerinin elde edildiği durumlarda konik yerine düzlem akış silolar tercih edilmesinin daha iyi olacağı sonucuna varılmıştır.

DETERMINATION OF FLOW PROPERTIES OF BULK SOLIDS AND SILO DESIGN

SUMMARY

There are many industry branches which deal with solid materials in bulk form. These materials include very fine powders in the pharmaceutical industry, seeds, flour and starches in the food and agricultural industry and ore, cement and coal in the mineral and mining industry.

The handling (storage, transportation and discharge) of these materials is an important operation in these industries. With the increase in the need to store bulk solids, reliable flow from storage devices has become more important than ever before. Therefore, it is essential to understand the effect of material characteristics such as size, composition and moisture content on the static and dynamic behavior of solid materials in silos (bunker, bin).

Some materials may flow in a better way compared to others. It is also well known that wet and fine solids flow poorly and cause obstructions in the flow. Problems that commonly occur in storage bin operation include solids aggregation, erratic feeding, flooding, arching, piping and adhesion to the bin walls, which reduce the bin capacity below the specified values.

In recent years, considerable advances have been made in the development of theories and procedures to describe the behavior of bulk solids under the variety of states in bulk solids handling operations. Comprehensive mathematical models and design information have been established for storage bins and discharge equipment design. These information enable bins to be designed to provide reliable and predictable flow under the influence of gravity. This flow model is known as mass flow. With the theory developed by Jenike and the determination of the flow properties of bulk solids, sizing silos providing mass flow has been possible.

The standard method to characterize flow properties of solid materials is the shear testing which provides the information for the yield locus of the solid in question. All of the other flow properties (angle of internal friction, cohesion, flow function, kinematic angle of wall friction, etc.) of solids are also determined from the yield loci.

In this study, first of all, flow properties (cohesion and slope of the yield locus) of 7 different materials were determined by using Jenike shear tester. For this purpose, in the tests, yield loci were determined at 4 different pre-shear normal stress values (consolidation levels) for each material. Flow properties of 3 different sand samples (Yalıköy, Safaalanı and yellow), soda, limestone, dolomite and clay were measured at intrinsic moisture contents. Additional tests were also carried out at low and high moisture contents for Yalıköy sand. Wall yield loci of Yalıköy sand on different silo liner materials such as 2 different types of concrete differing in surface roughness, stainless steel and normal sheet iron were determined at intrinsic moisture content.

For materials except Yalıköy sand, wall friction tests were performed only with rougher surface of concrete and stainless steel.

Flowability of solids which is characterized by flow function (or flow index) was investigated for used materials and materials were classified. The parameters, found according to the results of both tests, were applied to design to obtain mass flow in a silo. The hopper half angle (slope) required for mass flow and minimum outlet size to prevent arching were calculated for both conical (circular section) and plane flow (rectangular section) hoppers with the measured values using Jenike' s design procedure.

As a result of these tests, it has been found that cohesion values increase with increasing normal stress values and high moisture content and small particle size also increases cohesion values. There is not a significant difference between the angle of internal friction values at different consolidation levels for all studied materials.

It has been observed that the material which has the hardest flow is clay and soda has the easiest flow among the studied materials. While clay and soda has been classified as cohesive and free flowing material, all other materials have been found in easy flowing material class. It can be said that high moisture content and low particle size has an adverse effect on the flow. While the flow of Yalıköy sand at low moisture content has been easier than its intrinsic moisture content, a more difficult flow hasn't been obtained at high moisture content as expected.

According to the wall yield loci, the most difficult flow occurs on the rougher surface of concrete whereas the easiest flow occurs on the stainless steel for all materials. Higher wall friction angle values have been obtained with concrete wall material than stainless steel. As an exceptional case, wall friction angle values obtained for yellow sand and limestone with stainless steel are so higher than the values obtained for other materials with stainless steel.

The flow couldn't be attained for Safaalanı sand, yellow sand, limestone and clay on concrete silo wall material. The flow in concrete silos only occurs for Yalıköy sand, dolomite and soda, but high wall friction angle values have caused to obtain low hopper wall angles with conical hoppers. To satisfy the same storage capacity, the smaller silo wall angle, the steeper and taller the silo. The rectangular shaped (plane flow) hopper allows a 8-10° larger hopper wall angle against the vertical with the same material properties. Finally, it has been concluded that it is better to use stainless steel instead of concrete as silo wall material and to prefer plane flow hoppers instead of conical hoppers in the case of low hopper wall angle values.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Kimya ve proses endüstrilerinde işlenen ve üretilen malzemelerin büyük bir çoğunluğu katı haldedir, sadece kimya sanayinde toplam miktarın %30' undan daha fazladır. Bu malzemeler; ziraat kimyasallarından boya maddelerine, deterjanlardan gıda ürünlerine, plastiklerden ilaçlara kadar geniş bir yelpazede değişiklik göstermektedirler. Bunların yönetimi, kayıplar da göz önüne alındığında oldukça önemli bir konudur. Bunları üretmek için tasarlanmış olan işletmelerin performanslarının değerlendirilmesi sonucunda, sürekli olarak uygun olmayan tasarımlar söz konusudur ve bu tasarımların güvenilirliklerinin az olduğu gösterilmiştir. O yüzden katı boşaltma yöntemlerindeki gelişmeler birçok sanayi dalında önemli kazançlar sağlamaktadır [1, 2].

Gazların ve sıvıların boşaltılması, nakledilmesi ve depolanmasının nasıl olacağı hakkındaki bilgilerle kıyaslandığında, yığınlar halindeki katı tanecikler hakkındaki bilgilerimiz oldukça ilkel kalmıştır. Bu konu zor ve çok yönlüdür. Tanecikler arasındaki etkileşimler ve gaz veya akışkanın araya karışması katının genel davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı ve gazların özelliklerinin ve boşaltım karakteristiğinin anlaşılması birçok mühendislik uygulamasında esas bir gereksinimdir. Yıllar boyunca akışkanlar mekaniği, sıvı akışı, hidrolik ve bunlara benzer konularda çok sayıda kitabın düzenli olarak yayınlanması ve birçok çalışmanın yapılması hiç de şaşırtıcı değildir. Şaşırtıcı olan modern sanayide artan bir öneme sahip olmasına rağmen yığın katıların yönetimi ve depolanması ile ilgili paralel bir gelişmenin olmayışdır [1, 3].

Akışkanlar mekaniği bilimi Arşimet' e kadar gitmektedir, bu yüzden de akışkanların yönetimi bilimselliğe dayalı bir şekilde yapılabilmektedir. Diğer taraftan, yığın katılarla ilgili ilk önemli çalışmalar ancak 19. yüzyılın sonlarında gerçekleştirilebilmiştir. Bu çalışmalar büyük miktarlardaki katıların depolanma ihtiyacından hareketle yapılmıştır ve esasen siloların yapısal tasarımını etkileyen duvar basınçları ile ilgilidir. Janssen formülü ile başlayan çalışmaları diğerleri izlemiştir. Silolardaki yapısal problemler birçok çalışmanın konusu olmuştur. Silo

duvar yüklerini tahmin eden yöntemler basitleştirilmiş modeller ve statik analizlere dayanmaktadır. Katıların yönetimi ile ilgili çalışmalar ise ciddi anlamda 1950' lerde başlamıştır ve ne yazık ki günümüzde katı işlemede kullanılan ekipmanlar halen deneyimlere dayanarak tasarlanmaktadır [2, 4, 5].

Yığın katıların yönetiminde, malzemelerin hem depolanması hem de nakledilmesi etkin bir şekilde yapılmalıdır. Fakat silolardaki akışın çeşitli nedenlerden dolayı genellikle sorunlu olduğu çok iyi bilinmektedir ve sonuç olarak da üretimdeki kayıplara göre maliyetler önemli miktarlarda artmaktadır. En önemli sorunlardan bir tanesi bir katı yığın malzemenin mevcut bir silodan akıp akmayacağıdır. Depolama esnasında meydana gelen tıkanmalar katının topaklaşması ve ayrışması, düzensiz besleme, taşma, kemerlenme, kanallanma ve silo duvarlarına yapışması gibi nedenlerden ötürü olabilmektedir ve bunlar silo kapasitesini azaltmaktadırlar. Pratikte, akışta meydana gelen tıkanmalarda akışı sağlamaya yardımcı olan aygıtlar yaygın olarak kullanılmaktadırlar, fakat bunlar aynı zamanda kurulum maliyetlerini de arttırmaktadırlar. Birçok durumda karşılaşılan sorunlar malzemelerin ilgili olan akış özellikleri hakkında herhangi bir bilginin olmamasıyla birlikte uygunsuz tasarım analizlerinden kaynaklanmaktadır [4, 5].

Son zamanlarda, yukarıda sayılan problemlere çözümler bulmada birçok çaba sarf edilmiştir. Silolarda, çoğu durumda, akışa yardımcı aygıtlar (balyoz, vibratör, vs.) veya katkı malzemeleri (kimyasal maddeler) kullanılırlar veya düşük sürtünme direncine sahip malzemeler [6] silo duvar malzemesi olarak tercih edilirler. Katkı malzemeleri buğday nişastası veya kalsiyum stearat gibi ince tozlardan sıvı haldeki süper-absorban polimerlere kadar çeşitlilik göstermektedir. Akışı zor olan katı yığın malzemelerin akış problemlerine bir çözüm bulunmadan önce, genel olarak katı yığınların akış mekanizmasının anlaşılması ve bu katıların akış özelliklerini etkileyen önemli parametrelerin hangileri olduğunun belirlenmesi önemlidir [7].

Kohesif katı yığınların silolardan akışını analiz etmek karmaşık bir problemdir. Bu amaçla, katı yığınların akışı birçok matematiksel denklem ile ifade edilmiştir ve bu matematiksel denklemlerin bilgisayar yardımıyla sayısal çözümlemesi yapılabilmektedir. Bu alandaki modern gelişmelere Prof. Dr. A.W. Jenike' nin çalışması öncülük etmiştir. Jenike ve öğrencisi Dr. J.R. Johanson katı yığınların akışı ve silo tasarımı üzerinde birçok çalışma yapmışlardır ve sonucunda katı yığınların kuvvetini ve akış özelliklerini ölçmek için test yöntemleri ve silo tasarımı için de yöntemler

önermişlerdir. Jenike, zemin mekaniğinin bilinen yöntemlerini kullanmıştır ve kohesif katı yığınların yerçekimi etkisi altında akabilirliğini tanımlayan süreklilik mekaniği yardımıyla bir teori ileri sürmüştür. Jenike, katı yığınların akışı için bir teori öneren ilk araştırmacıdır ve onun bu çalışması katıların yerçekimi etkisiyle akışı için depolama silolarının tasarımında sıkça kullanılan bir yöntem ortaya çıkarmıştır. Bu yöntem literatürde “Jenike tasarım yöntemi” olarak bilinmektedir ve günümüzde de halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha sonraları birçok araştırmacı Jenike’ninkinden daha doğru olduğunu iddia ettikleri farklı teoriler de önermişlerdir. Fakat, yapılmış olan bütün çalışmaların temelinde Jenike’ nin yapmış olduğu çalışma yer almaktadır [4, 7, 8].

Şu anda kullanımda olan birçok silo, uygun akış koşullarını sağlamaktan ziyade yapının minimum maliyeti hedeflenerek sade ihtiyacı karşılamak amacıyla tasarlanmışlardır. Yerçekimi akışına uygun nitelikte olmayan katıların büyük çoğunluğu iyi tasarlanmış silolarda sorunsuz bir şekilde akacaklardır. Fakat sorunsuz akış sağlayacak olan silolar uzun ve daha pahalı olacaklardır. Düzgün bir silo tasarımı için ortaya çıkacak ilave masrafların, işletme sırasında elde edilecek tasarruflarla karşılanıp karşılanamayacağının kararını verecek olan mühendistir. Akışın düzgün olmadığı silolarda durağan ürünün taşlaşması, bozulması gibi nedenlerle kaybı veya proseste ihtiyaç duyulabilecek aksamaların maliyeti her zaman daha yüksek olacaktır. Katı yığınların depolanma ve yönetiminde kullanılan ekipmanın uygun tasarımı katı malzemenin statik ve dinamik şartlarda bazı özelliklerinin bilinmesini gerektirir [1, 8].

Tasarım işlemindeki ilk aşama katının ilgili kuvvet ve akış özelliklerinin belirlenmesidir. Katı yığınların akış özelliklerinin belirlenmesi ve tasarım yönteminin uygulanması normal kuvvete (gerilme) karşı kesme kuvveti değerlerinin bilgisine dayanır ve bu değerler hem katının kendi içinde hem de silo duvarı üzerinde kaydırılmasıyla elde edilirler. Bu standart deneysel yöntem kesme testleri (iç sürtünme ve duvar sürtünme testleri) olarak bilinir ve testlerin sonucunda katıya ait akma sınırı hatları elde edilir. Katı malzemenin diğer bütün akış özellikleri bu akma sınırı hatları kullanılarak bulunur. Malzemelerin bu özellikleri belirlendikten sonra istenilen bir akış modeli (kütle veya huni akış) sağlamak üzere akışta herhangi bir tıkanma meydana gelmeden bir depolama silosu tasarlamak mümkündür [5]. Bir silo için kesintisiz akışın gerçekleşeceği, kütle akış olarak bilinen akış modeli için

tasarım sonucunda elde edilecek iki önemli parametre mevcuttur; bunlardan bir tanesi silonun alt kısmının düşeyle yapmış olduğu açıdır (silo duvar açısı), diğeri ise silonun çıkış boyutudur.

Yapılan bu çalışmada, katı yığınların akış teorisinin anlaşılması ve kesintisiz akış sağlamak üzere depolama silolarının tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle farklı katı malzemelerin birtakım akış özellikleri kesme testleri yardımıyla belirlenmeye çalışılmış ve buradan elde edilen sonuçlar tasarım uygulamalarında kullanılmıştır. Testlerde 7 farklı malzemenin iç sürtünme özelliklerinin yanı sıra bu malzemelerin farklı silo duvar malzemeleri üzerindeki sürtünme özellikleri de belirlenmiştir. Elde edilen parametreler Jenike tasarım yönteminde kullanılarak kütle akış silolarının açısı değerleri ve çıkışında tıkanma olmaması için gerekli minimum silo açıklığı hem konik hem de düzlem-akış silolar için hesaplanmıştır. Son olarak, elde edilen tasarım sonuçlarına göre kullanılan malzemeler için hangi silo duvar malzemesinin ve silo geometrisinin tercih edilmesi gerektiğine karar verilmiştir.

2. TANECİKLİ YAPIDAKİ KATI YIĞINLARIN ÖZELLİKLERİ

2.1 Katı Taneciklerin Karakterizasyonu

Bir katı yığın, esasen değişik boyutlardaki ve düzgün olmayan birçok taneciğin (değişik kimyasal bileşim ve yoğunlukta da olabilir) gelişigüzel gruplanmasıyla meydana gelir. Böyle bir malzemenin tabiatı (görünüşü, değişik durumlardaki davranışı, vs.) birçok faktöre, özellikle de yığını meydana getiren taneciklerin büyüklüğüne, şekline ve yoğunluğuna dayanmaktadır.

Bir yığın malzemesinin uygun özelliklerle tanımlanmış tabiatının o malzemenin işlenmesi ve depolanması için ekipman tasarlarken veya seçerken göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Katı yığınların karakterizasyonunda kullanılabilecek çok miktarda betimsel terim ve sayısal parametre mevcuttur ve bunlar hem malzemenin görünümü hem de değişik durumlardaki davranışıyla ilişkili olabilmektedir. Her ne kadar betimsel terimler katılar için gerekli olsalar da yeterli değildir. Sayısal parametrelere katıyı nicel olarak karakterize etmek için gereksinim duyulur ve bu parametrelerle geçmiş deneyimlere dayanarak tasarımcının uygun tasarım yapabilmesi sağlanır [3]. Tanecik büyüklüğü ve dağılımı, tanecik şekli, tanecik yüzeyi karakteristiği ve taneciklerin kendi fiziksel özellikleri gibi birçok değişkeni etkileyen parametrelerin çokluğu nedeniyle katı malzemelerin yığınlar halinde tek başına veya akışkan-katı sistemleri içinde davranışlarını sayısal bağıntılara dayandırmak zordur [9].

2.1.1 Tanecik Büyüklüğü, Şekli ve Yüzey Alanı

Tanecik büyüklüğü, şekli ve yüzey alanı yığınları oluşturan katıların temel özellikleridir ve birçok temel işlemde başlıca öneme sahiptirler. Bu özellikler birbirleriyle yakın olarak ilişkilidir ve birlikte değerlendirilmelidir. Büyük ölçüde taneciklerin etrafındaki akışkanla ve birbirleriyle olan etkileşim derecesini belirlerler. Bu etkileşimler de kritik olarak yığın malzemenin akabilirliği, akışkanlaşabilirliği, sıkıştırılabilirliği gibi davranışlarını etkilerler. Ne yazık ki bu parametrelerle yığın malzemelerin pratikteki davranışları arasındaki ilişki tam olarak anlaşılamamıştır.

Taneciklerin silolardan akış hızları, reaktörlerdeki reaksiyon hızları, filtreler ve ayırıcılardaki ayırma etkinliği ve diğer birçok tanecik davranışı tanecik büyüklüğüne bağlıdır. Genelde, tanecikleri büyüklüklerine göre belirleyen ve sınıflandıran herkesçe kabul edilmiş bir yöntem yoktur. Shamlou [1], tanecik büyüklüğü ile ilgili bir sınıflandırmayı bazı ortak terimleri de içerecek şekilde Tablo 2.1’ de vermiştir.

Tablo 2.1: Katı yığın malzemelerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması [1]

Büyüklük aralığı (μm)	Standart Terim		Özellik
	Bileşen	Yığın	
30.000-3000 (1000 μm ’ye kadar da olabilir)	tane ve topak	kırılmış katı	Serbest-akışlı, fakat mekanik boşaltım sırasında kemerlenmeye neden olabilirler.
1000-100	granül (tanecik)	tanecikli katı	İnce taneciklerin yüzdesi fazlaysa kohesif etkilerden dolayı kolay-akışlı.
<100	tanecik	toz	
(i) 100-10	tanecik	tanecikli toz	Kohesif etkiler ve bazı akış problemleri gösterebilir.
(ii) 10-1	tanecik	çok ince toz	Yüksek derecede kohesif, yönetimi çok zor.
(iii) <1	tanecik	aşırı ince toz	Yönetimi son derece zor, imkânsız.

Küresel bir tanecik için büyüklük taneciğin çapı ile tanımlanırken, birçok endüstriyel taneciğin şekli düzensizdir ve bunlar için tanecik büyüklüğü tanımı yapılırken zorlukla karşılaşılır. Bunun üstesinden gelmek için de büyüklük, taneciğin bazı özelliklerine eşdeğer bir kürenin çapı ile ifade edilir ve bunlara eşdeğer çaplar denilir. Tablo 2.2’ de bazı ortak kullanılan eşdeğer çaplar ve tanımları verilmiştir. Bunların dışında da başka eşdeğer çap tanımlarına rastlamak mümkündür [1].

Tanecik ne kadar düzensizse, değişik eşdeğer çaplar arasındaki farklılık da o kadar fazladır. Bunun için taneciğin şekli önemlidir ve belirlemek gerekir. Tanecik şekli tanecik büyüklüğünden bağımsızdır ve çeşitli yollarla belirlenebilir. Küresel olmayan taneciklerin şeklini matematiksel ifadelerle belirlemek kolay değildir, bu yüzden bir yaklaşımda bu taneciklerin küresel olanlardan farkını göstermek üzere şekil faktörleri

kullanılmaktadır. Bu şekil faktörlerinin en çok ortak kullanılabildiği küresellik (Φ_s) ve taneciğin hacmiyle aynı hacme sahip kürenin yüzey alanının taneciğin yüzey alanına oranı olarak tanımlanır.

Tablo 2.2: Düzensiz taneciklerin eşdeğer çapları [1]

Eşdeğer çap	Tanım
Alan d _p	Taneciğin sabit pozisyonuna dik yönde bakıldığında alanı taneciğin alanıyla aynı olan çemberin çapı $d_p = \left(\frac{4A_{sp}}{\pi} \right)^{1/2}$
Hacim d _v	Hacmi, taneciğin hacmi ile aynı olan kürenin çapı $d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3}$
Yüzey d _s	Taneciğin yüzeyiyle aynı yüzeye sahip kürenin çapı $d_s = \left(\frac{S}{\pi} \right)^{1/2}$
Elek d _a	Taneciğin geçeceği kare açıklığın minimum boyutu
Spesifik yüzey d _{sv}	$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$
Serbest-düşüş çapı d _f	Aynı tanecik sınır hızı ve yoğunluğuna sahip kürenin çapı

$$\Phi_s = \frac{\pi d_v^2}{A_{sp}} = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2 \quad (2.1)$$

A_{sp} taneciğin yüzey alanıdır. Küresel olmayan bir tanecik için hacim eşdeğer çapı (d_v) yüzey eşdeğer çapından (d_s) her zaman daha küçük bir değerdedir. Tablo 2.2’deki bu iki eşdeğer çap değerleri için olan tanımlamalardan;

$$\Phi_s = 4.838 \frac{V_p^{2/3}}{A_{sp}} \quad (2.2)$$

eşitliği elde edilir. Küresel bir tanecik için, şekil faktörü 1’dir. Bütün koşullar aynıyken, Φ_s birim değerinden sapma gösteriyorsa, tanecikler daha az küresel ve akabilir (daha kohesif) olurlar. Endüstriyel katılar için, Φ_s mika gibi malzemelerde

0.29 gibi küçük değerlerde olabilirken, büyük bir çoğunluğu için değer 0.65-0.98 aralığında değişmektedir. Pratikte, Φ_s değerlerini belirlemek d_v eşdeğer çapının deneysel olarak belirlenmesindeki zorluklardan dolayı o kadar da kolay değildir. Bu yöntemin dışında küresellik için literatürde önerilmiş olan başka alternatif yöntemler de vardır [1, 3].

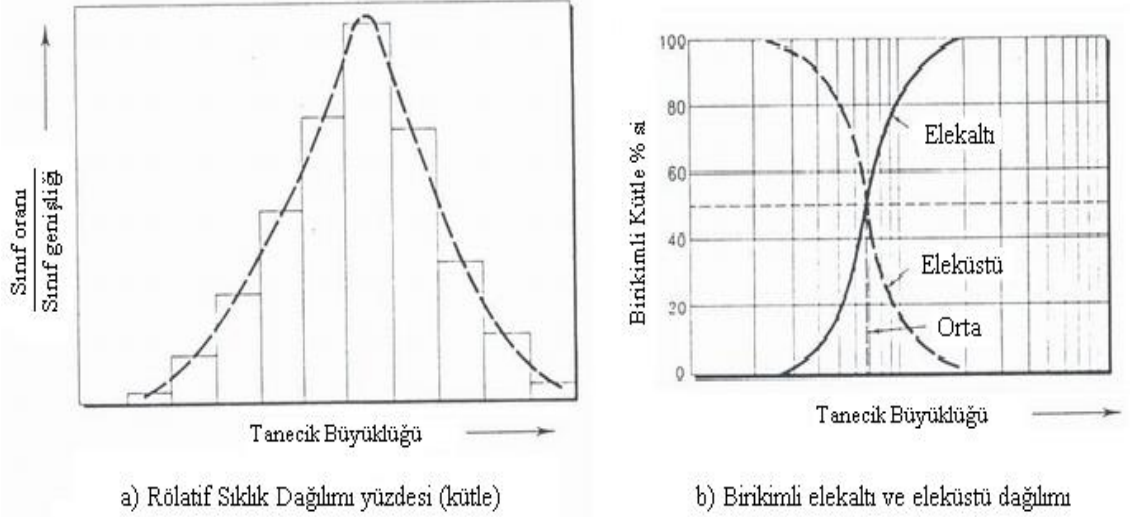
Küreselliğin belirlenmesi taneciklerin hacim ve yüzey alanının ölçülmesine gerek duyar. Bu ölçümler kolay olmamakla beraber bir grup tanecik için ortalama değerler verecek şekilde ayrı ayrı gerçekleştirilmelidir. Sonuç olarak, Φ_s değeri ortalama bir değer olmasına rağmen, şekil olarak geniş aralıkta tanecikleri içeren katı yığın hakkında az da olsa bir bilgi verecektir. Her ne kadar belirli kimyasal proseslerde bir yığını oluşturan taneciklerin şeklinin ne olduğu hakkında bir bilgi gerekli olabilse de, katıları işleyen ve depolayan sistemlerin büyük bir çoğunluğunda böyle detaylı bilgi gerekli değildir. Gerçekten de birçok depolama aygıtı katı malzemenin tanecik şekli göz önüne alınmadan tasarlanabilmektedir [3].

2.1.2 Tanecik Ortalama Büyüklüğü ve Büyüklük Dağılımı

Tek boyutlu, küresel taneciklerden oluşmuş katı bir kütle tek bir boyutla (tanecik çapı) tanımlanabilir. Değişen büyüklükteki küresel tanecikleri içeren malzemeler ise, ortalama tanecik çapı ile bu ortalama değer civarındaki büyüklük dağılımlarının bilgisini de içerecek şekilde tanımlanırlar. Tanecik büyüklük dağılımı bilgisi bir çizelge halinde verilebilir, fakat sonuçları sıklık histogramları ve çokgenleri, yüzde dağılımları ve kümülatif (birikimli) dağılımlar şeklinde vermek daha uygundur [1, 3].

Büyüklük dağılımı ölçüldükten sonra, uygun bir histogram her sınıf aralığında dikdörtgenler çizilerek oluşturulur, genişlikleri geometrik dizide seçilir. Her dikdörtgenin altında kalan alan o sınıftaki taneciklerin yüzdesiyle orantılıdır, böylelikle histogramdan geçirilen düzgün bir eğri sıklık dağılımını verecektir (Şekil 2.1a). Alternatif olarak ve daha faydalı bir yaklaşımda; tanecik büyüklüğünün yatay ekseninde, birikimli (toplam) elekaltı (veya eleküstü) yüzdelерinin (fraksiyonlarının) düşey ekseninde olduğu bir grafikte (Şekil 2.1b) sonuçlar verilebilir. Her fraksiyon genelde numunenin hacim, adet veya ağırlık yüzdesi olarak ifade edilir; sıklıkla kullanılan ağırlık yüzdesidir. Bu grafiğin esas avantajı deneysel olarak belirlenmeyen değerlerin gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesidir. Ortalama (median) büyüklük (kütle) de %50 büyüklük veya dağılımın orta noktasıdır ve direkt olarak grafikten

okunabilir [2, 3]. Tanecik büyüklüğü dağılımının alt ve üst uçlarındaki sıkışıklığı dağıtmak amacıyla, tanecik büyüklüğü doğrusal eksen yerine logaritmik eksen de gösterilebilir.



Şekil 2.1: Tanecik büyüklük dağılımının grafiksel olarak gösterilmesi [3]

Tanecik dağılımlarını matematiksel olarak bazı dağılım fonksiyonlarını deneysel verilere uydurarak tanımlama çalışmaları da yapılmıştır. Bu amaçla normal (Gauss), log-normal ve Rosin-Rammler fonksiyonlarını içeren çok sayıda ifade önerilmiştir. Tanecik dağılımının grafiksel olarak özel bir grafik kâğıdına ihtiyaç duyulan “log-normal probability” ve “normal probability” gösterimleri de mevcuttur. Eğer tanecik büyüklük dağılımı “log-normal probability” dağılımına uyuyorsa, tanecik büyüklüğünün logaritması normal dağılım (Gauss) gösterir ve toplamsal değerleri “log-probability” koordinat sisteminde bir doğru üzerine düşer [1, 9].

Kırma ve öğütme işlemleri görmüş taneciklerin boyut dağılımı Rosin-Rammler dağılımıyla tanımlanır. Dağılımda belli bir tanecik büyüklüğü (d_p) üzerindeki taneciklerin ağırlığının numunenin toplam ağırlığına oranı (R),

$$R = 100 \exp \left(- \frac{d_p}{\bar{d}} n \right) \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Burada, n ve $\bar{d}$ dağılım parametreleridir. Bu dağılıma uyan tanecikler için $\log d_p$ değerlerine karşı $\log \log(100/R)$ değerlerinin çizilmesiyle eğimi n olan düzgün bir doğru elde edilir. Teknik tozlar için n değeri 0.8-1.2 arasında değişir. Küçük değerdeki n geniş, büyük değerdeki n ise dar bir tanecik dağılımı

varlığını gösterir; özel olarak hazırlanmış grafik kâğıtlarından okunur. $\bar{d}$, Rosin-Rammler ortalama tane büyüklüğüdür ve $d_p = \bar{d}$ olduğu durumda $R=100/e = \%36.8$ değerine karşılık gelir [1, 9].

Malzemelerin büyük bir çoğunluğu için kütleli ortalama tanecik büyüklüğü bir yığıcı oluşturan taneciklerin ortalama büyüklüğü için en çok kullanılan gösterimdir. Bu parametrenin uygun olamayacağı durumlarda ortalama tanecik büyüklüğü ile ilgili birtakım alternatif tanımlamalar (yüzey ortalama çap, hacim ortalama çap, hacim-yüzey ortalama çap, vs.) durumla olan ilgisine göre seçilerek kullanılabilir [3]. Örneğin, kütle ve ısı aktarımını içeren işlemlerde taneciklerin yüzey alanı önemli bir parametre olmakla beraber bu gibi durumlarda kullanılan uygun çap tanımı yüzey ortalama çapı olacaktır. Tablo 2.3’ de bu amaçla kullanılan birtakım ortalama çaplar tanımlanmıştır.

Tablo 2.3: Büyüklük dağılımına sahip tanecikler için çeşitli ortalama çap tanımlamaları [1, 2, 9]

Ortalama Çap	Tanımlama
Ortalama yüzey	$d_{ps} = \left(\frac{\sum N_i d_i^2}{\sum N_i} \right)^{1/2}$
Aritmetik ortalama	$d_p = \frac{\sum N_i d_i}{\sum N_i}$
Geometrik ortalama	$d_g = \left(d_1^{N_1} d_2^{N_2} \dots d_N^{N_N} \right)^{1/N}$
Lineer ortalama	$d_l = \frac{\sum N_i d_i^2}{\sum N_i d_i}$
Ağırlık ortalama	$d_{pw} = \frac{\sum N_i d_i^4}{\sum N_i d_i^3}$ veya $\sum x_i d_i$
Hacim-Yüzey ortalama (Yüzey ortalama-Sauter ortalaması)	$d_{pvs} = \frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2}$ veya $\frac{1}{\sum x_i d_i}$

Tanecik büyüklük dağılımının belirlenmesinde birçok yöntem mevcuttur ve her bir yöntemin kendine göre kullanılabileceği tanecik büyüklüğü sınırları vardır. Bu yöntemlerdeki farklılıklar nedeniyle aynı numune için farklı yöntemler kullanılarak yapılan ölçümlerin sonuçları birbiriyle aynı olmayabilir, farklı dağılımlar elde

edilebilir. Elek analizi bu yöntemler arasında en çok tercih edileni olmakla beraber aynı zamanda ucuz ve basittir. Diğer yöntemler arasında santrifüjleme, taşıyarak ayırma (elutriation), sedimentasyon, elektrik iletkenliği, ışık saçınımı ve görüntü analizi sayılabilir.

Elek analizi, numunenin elek açıklığına göre en üstte en geniş aralıklı elek olacak şekilde belli bir standarda göre seçilmiş bir seri eleğin en üstüne konulup belli bir süre boyunca silkelmesi (elle veya mekanik olarak) ve sonucunda her bir eleğin üzerinden toplanan numune fraksiyonlarının tartılması ile yapılır. 5.6 mm ile 38 µm arası (3 ½ -400 mesh) tane büyüklüğündeki numuneler için kullanılabilir [9].

2.1.3 Yoğunluk

Katı yığınları oluşturan taneciklerin şekli düzenli veya düzensiz olsun rasgele bir araya geldiklerinde aralarında belirli miktarda bir boşluk oluşur. Böylelikle, yığın katıların gerçekte tanecikler ve boşluklardan ibaret oldukları söylenebilir ve tanecikler tarafından kaplanan hacmin dışındaki hacim “boşluk” veya “boşluk oranı” olarak adlandırılır. Böylece, boşluk oranı (ϵ) katıdaki boşlukların hacminin toplam hacme oranıdır.

$$\text{Boşluk oranı } (\epsilon) = \frac{V_{\text{boşluk}}}{V_{\text{katı}} + V_{\text{boşluk}}} \quad (2.4)$$

Buna göre; taneciklerin gerçek hacmi veya kesirli katı içeriği (1- ϵ)’ dir. Bazen gözeneklilik (porozite) terimi katıların içindeki boşluğu ifade etmek için kullanılır. Fakat bu terimin katıyı meydana getiren bireysel taneciklerin yapısının tanımlanmasında kullanılması tavsiye edilir. Böylece, tanecik gözenekliliği taneciğin içindeki gözeneklerin hacminin taneciğin hacmine oranı olarak tanımlanır.

Statik yığın malzemelerin boşluk oranının tipik değerleri 0.26’ dan (düzenli hekzagonal yapı) 0.48’ e (düzenli kübik yapı) kadar değişim gösterir. Küresel tanecikler içeren malzeme için değer 0.4 civarında olabilirken, düzensiz şekiller dolayısıyla boşluk oranı çok daha fazla olabilmektedir.

Katı veya tanecikli malzemelerin “yığın yoğunluğu (ρ_b)” olarak adlandırılan görünür bir yoğunluk değerleri vardır, bu da malzemenin kütlesinin hacmine (tanecikler ve boşluklar) oranı olarak tanımlanır [3].

$$\rho_b = \frac{m_{katı} + m_{bosluk}}{V_{katı} + V_{bosluk}} \quad (2.5)$$

Görüldüğü gibi ρ_b tanecikleri birbirinden ayıran boşluklar da dahil olmak üzere malzemenin genel yoğunluğudur. Basit olarak belirli ağırlıktaki bir miktar malzemenin dereceli bir silindire dökülerek hacminin ölçülmesi ile belirlenebilir. Dereceli silindirin sarsılıp (silindirin düşey olarak belli sayıda 1 veya 2cm' lik bir yükseklikten düşürülmesiyle) taneciklerin yerine oturtturulması sağlanabilir; bu durumda tanecikler arası boşluklar küçülür, toplam hacim düşer ve malzemenin yoğunluğu sıkıştırılmış yığın yoğunluğu olarak bilinen sınır bir değere ulaşmış olur. Bu sınır değer ilk andaki yoğunluk değerinin malzemenin cinsine göre 1.52 katına kadar çıkabilir. Bu sebeple, yığın yoğunluğunun gevşek veya sıkıştırılmış koşullarda belirlendiğinin mutlaka belirtilmesi gerekir [9]. Depolama aygıtlarının tasarımında bir malzemenin yığın yoğunluğunun bilinmesine ihtiyaç vardır.

Katı malzemeler için bir de “tanecik yoğunluğu (ρ_p)” tanımlanır ve katı malzemelerin gerçek yoğunluğu olarak bilinir. Boşluklardaki akışkanın yoğunluğunu (ρ_f) da hesaba katarak yığın yoğunluğu için;

$$\rho_b = (\rho_p - \rho_f)(1 - \varepsilon) + \rho_f \quad (2.6)$$

şeklinde bir ifade yazılır. Kuru yığın katılar için boşluklar genellikle hava içerir ve böylece akışkanın yoğunluğu (ρ_f) tanecik yoğunluğuna (ρ_p) kıyasla ihmal edilebilir. Sonuç olarak yığın yoğunluğu ile tanecik yoğunluğu arasındaki ilişki,

$$\rho_b = \rho_p(1 - \varepsilon) \quad (2.7)$$

şeklini alır. Boşluk oranı, numunenin toplam hacminin ve katı taneciklerin hacminin ayrı ayrı ölçülmesiyle belirlenir. Toplam hacim daha önce belirtildiği gibi dereceli silindirle, taneciklerin hacmi ise genellikle sıvı yer değiştirme tekniğiyle (standart yoğunluk şişesi veya hava-sıkıştırmalı yoğunluk-ölçer gibi karmaşık bir cihazla) ölçülür. Gözenekli veya iç boşluklara sahip malzemelerde tanecik hacminin ölçülmesinde zorluklar yaşanır, sonuçlar belirsizdir [3].

Bir yığın malzemesi için ortalama tanecik yoğunluğu, malzemenin kütlesinin tanecikleri tarafından kaplanan gerçek hacmine (boşlukları içermeyecek şekilde) bölünmesiyle belirlenebilir. Büyük tanecikli malzemelerin yoğunluğu basitçe, bir

sıvının katının bilinen ağırlıktaki tanecikleriyle yer değiştirdiği hacmi belirlenerek bulunabilir. İnce tanecikli malzemeler özgül ağırlık şişesine veya hava-sıkıştırmalı bir yoğunluk-ölçere ihtiyaç duyarlar. Kolay çözünen, kırılğan veya çok hafif malzemeler için hava-sıkıştırmalı yoğunluk-ölçer gereklidir. Bütün bu yöntemlerle elde edilecek değerler ortalama tanecik yoğunluğunu verir. Harman halindeki bir üründe bulunan farklı tanecik yoğunlukları harmanlamadan önce ayrı ayrı ölçülmelidir [3].

Malzeme yoğunluğu (ρ_s), taneciğin içerdiği tüm boşluklar hariç (tanecikler arası boşluklar ve tanecik gözeneği) yoğunluğudur. Gözenekli olmayan tanecikler için tanecik yoğunluğuna eşit, gözenekli malzemeler için ise tanecik yoğunluğundan büyüktür [9].

2.2 Tanecik-Tanecik ve Tanecik-Sıvı Etkileşimleri

Toz halindeki bir malzemenin yüzey alanı tanecik büyüklüğündeki azalmayla birlikte çok fazla artar. Tanecik büyüklüğündeki 1/8 oranındaki bir azalma, yüzey alanında %800 oranında bir artışa neden olur. Yüzey alanındaki artışla beraber tanecikler üzerindeki yüzey kuvvetleri de artış gösterir. Bu kuvvetler başlıca elektrostatik, van der Waals ve kapiler etkilerden kaynaklanır. Bunlar çoğu zaman birbirlerini etkilediklerinden dolayı baskın olanı ayırt etmek de zordur. Bu kuvvetlerin büyüklüğü ve dolayısıyla da önemi kritik olarak tanecik büyüklüğüne dayanır ve önemli ölçüde de nem içeriği, yüzey pürüzlülüğü ve safsızlığı ve tanecik şeklinden etkilenir.

Tanecikler arasında sonuçta oluşan kuvvetler yüzey kuvvetlerinin tabiatına bağlı olarak hem çekme hem de itme kuvvetleri olabilirler. Bireysel tanecikler arasında yüksek derecede çekme kuvvetleri (kohesif kuvvetler) mevcutsa, malzemenin akışı zorlaşacak ve dolayısıyla da depolanması ve nakledilmesi sorunlu hale gelecektir [1].

2.2.1 Elektrostatik Kuvvetler

Tanecik grupları veya taneciklerle yüzeyler arasında oluşan elektrostatik kuvvetler hem elektron fazlalığından hem de azlığından kaynaklanır. Katı işleme sırasında kasıtlı olarak veya boşaltma işlemleri sırasında kazayla elektrostatik yüklenmeye sebep olunmaktadır. Sürtünmeden kaynaklanan bu durum yüzeylerin birbirleri üzerindeki hareketleri-hem katının katıya karşı hem de katının duvara karşı- sonucu

oluşur. Böylelikle, potansiyel farkı yaratan elektrik yüklerinin oluşması sonucu tanecikler birbirlerine yapışırlar. Taneciklerin metal boya, plastik gibi yarı iletken özellikteki yüzeylerle temasındaki yüklenme metal yüzeylerle temasındakinden daha şiddetli olabilmektedir [1, 9].

Elektrostatik yüklerin büyüklüğü daha önce belirtilmiş olan parametrelerden güçlü bir biçimde etkilenir. İletken olmayan tanecikler için, taneciğin üzerindeki yüklerin dağılımı üniform değildir. Bu yüzden tanecik grupları ve taneciklerle yüzeyler arasında etki eden elektrostatik kuvvetlerin büyüklüğünü tahmin etmek genellikle kolay değildir. İki yüklü tanecik için, her tanecik tarafından uygulanan elektrostatik kuvveti belirlemek amacıyla,

$$F_{el} = -\frac{Q_1 Q_2}{\xi^{8.86 \times 10^{-12}} Z} \quad (2.8)$$

eşitliği kullanılabilir. Burada; F_{el} kuvvet (N), Z taneciklerin merkezleri arasındaki mesafe (m) ve ξ aradaki sıvının elektriksel geçirgenliğidir (Hava için; $\xi=8.86 \times 10^{-12}$ A s/V m). Q_1 ve Q_2 taneciklerin Coluomb cinsinden yükleridir.

Metalik küresel bir tanecik ile cilalanmış metal bir yüzey arasındaki elektrostatik çekim kuvveti,

$$F_{el} = \frac{Q^2}{16\pi\xi \left[0.5772 + \frac{1}{2} \ln \frac{2R}{Z} \right]^2 RZ} \quad (2.9)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Z , tanecik-yüzey boşluğu ve R tanecik çapıdır. Denklemlere göre elektrostatik kuvvetin büyüklüğü yüklerin karesiyle orantılıdır ve tanecik-yüzey boşluğu azaldıkça doğrusal olarak azalır. Yayınlanmış olan elektrostatik çekim kuvvetleri 10^4 - 10^7 N/m² değerleri arasında değişir [1].

2.2.2 Van der Waals Kuvvetleri

Van der Waals çekim kuvvetleri moleküler seviyede meydana gelir ve katı kütle içindeki yerel elektrik alanlarındaki değişimler sonucu oluşur. Bu elektrik alanları katı cismin içindeki atomların veya moleküllerin sürekli polarizasyonundan (kutuplaşma) kaynaklanır. Lifshitz, bir küre ile düz bir yüzey arasındaki van der Waals çekim kuvvetinin,

$$F_{van} = \frac{h\omega R}{8\pi Z^2} \quad (2.10)$$

eşitliğini kullanarak belirlenebileceğini bulmuştur. Buradaki $h\omega$ Lifshitz-Van der Waals sabiti olup tanecik özelliklerine bağlıdır. İki küresel tanecik arasındaki van der Waals çekim kuvveti,

$$F_{van} = \frac{h\omega}{8\pi Z^2} \left[\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right] \quad (2.11)$$

şeklinde hesaplanır. Teorik olarak birim alan başına van der Waals kuvveti 2×10^7 ile 3×10^8 N/m² arasında değişir. Van der Waals çekim kuvvetleri elektrostatik etkilerden kaynaklanan kuvvetlerden daha büyüktür [1]. Bu kuvvetler temas yüzeyinin parlatılması ve tanecik büyüklüğünün düşürülmesiyle azaltılabilirler.

2.2.3 Kapiler Kuvvetler

Nem içeriği arttıkça elektrostatik kuvvetler önemini yitirir, fiziksel olarak adsorplanmış sıvı filmleri ve sıvı köprüleri tarafından oluşan çekim kuvvetleri baskın duruma geçerler. Düşük rutubet içeriklerinde, çekim kuvvetleri başlıca yüzeylerle ona komşu tanecikler arasındaki adsorbe olmuş film tabakalarından kaynaklanır. Diğer taraftan, kritik değerin üzerindeki bir rutubette, bağlanma başlıca tanecikler arasındaki sıvı köprüler nedeniyle meydana gelir.

Bağıl nemin %100' e yakın olduğu durumlarda, bir yüzeyle temasta olan taneciğin yüzeyle arasındaki çekim kuvveti,

$$F_{kap} = 4\pi\eta R \cos \varphi \quad (2.12)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada, φ ıslatma açısı ve η ise yüzey gerilimidir. İki taneciğin arasındaki kapiler kuvvet için,

$$F_{kap} = \frac{\pi\eta d_p}{1 + \tan \frac{\delta}{2}} \quad (2.13)$$

eşitliği kullanılır. δ , meydana gelen köprünün büyüklüğünü belirleyen açıdır ve tanecikler arası boşluk azaldıkça sıfır değerine yaklaşır. Bu eşitliğin dışında topaklaşan katılar için de eşitlikler önerilmiştir.

Kapiler çekim kuvvetleri esasen elektrostatik ve van der Waals etkilerinden kaynaklanan kuvvetlerden daha büyüktürler [1]. Bu kuvvetleri temas yüzeyini hidrofobik (su sevmeyen) hale getirmekle azaltmak mümkündür. Ancak, çekim kuvvetlerini dolayısıyla da taneciklerin yapışmasını azaltacak ortak bir yöntem farklı kuvvetlerin birbirlerini etkilemesinden dolayı pek de mümkün değildir. Örneğin; temas yüzeyi uygulanacak bir kaplama ile hidrofobik hale getirildiğinde kapiler kuvvetler azalırken elektrostatik ve moleküler kuvvetler artar. Nem oranı da elektrostatik ve moleküler kuvvetleri azaltırken kapiler kuvvetlerin artmasına neden olur [9].

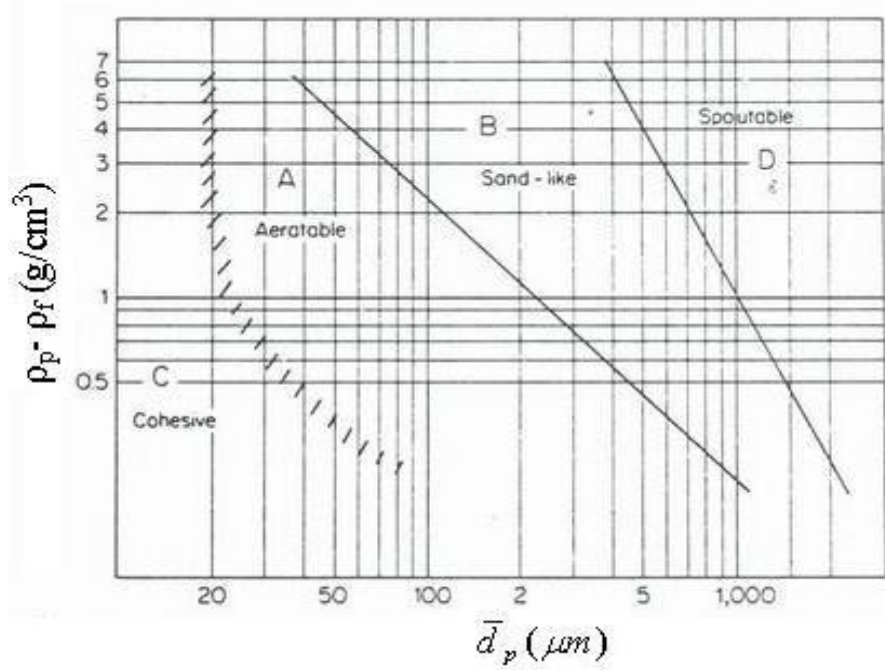
2.3 Geldart Sınıflandırması

Toz malzemeleri sınıflandıran deneysel bir yöntem Geldart (1973) tarafından önerilmiştir ve toz teknolojisinin her alanında büyük kabul görmüştür. Bu sınıflandırma, malzemenin bir gaz (genellikle hava) tarafından hangi şartlar altında akışkanlaştırılabileceğinin göstergesidir. Akışkanlaştırma davranışına göre malzemeler A, B, C ve D olmak üzere 4 gruba ayrılırlar ve bu grupların dahil olduğu sınırlar Şekil 2.2’ de gösterilmiştir. Daha sonraları, bu sınıflandırmaya dayanan diyagram başka araştırmacılar tarafından tanecikler arası kuvvetlerin etkisi de hesaba katılarak değiştirilmiştir [1].

B grubuna dahil olan malzemelerin ortalama tanecik büyüklükleri 40-500 μm arasında, yoğunlukları ise 1.4-4 g/cm^3 arasında değişir. Bu gruptaki malzemeler minimum akışkanlaştırma değerinin üzerindeki her gaz hızında kabarcıklar oluşturarak kolayca akışkanlaştırılırlar.

A grubu malzemeleri de ideal olarak kolayca akışkanlaştırılırlar, fakat herhangi bir kabarcık belirtisi göstermeden önce genişirler. Kabarcık oluşumu sınırlıdır, akışkan hızı arttıkça da genişmeyi kabarcıklı akışkanlaştırma izler. C grubundaki malzemeler yüksek derecede kohesiftirler ve akışkanlaştırılmaları son derece zor, hatta imkânsızdır. Kabarcıklar oluşmaz, gaz akışı malzeme boyunca kanallar oluşumuna neden olur ve malzeme yığınının yüzeyine yayılan gaz sadece bu kanallardan geçer. C grubu malzemelerinin davranışı sıklıkla tanecikler arası kuvvetlerin (van der Waals, elektrostatik ve kapiler) varlığına bağlıdır. Bu yüzey kuvvetlerinin büyüklüğü taneciklerin üzerine uygulanan akışkanlaştırıcı gazın sürüklemesine bağlıdır. Çoğu zaman sürükleme kuvveti bu kuvvetleri yenemez.

Tanecik büyüklüğü azaldıkça tanecikler arası kuvvetlerin rölatif büyüklüğü sürüklenme kuvvetine kıyasla azalır. A ve B grubuna dahil malzemelerde, sürüklenme kuvveti tanecikler arası çekimden kaynaklanan kuvvetlerden daha büyüktür ve sonuç olarak bu malzemeler kolay akışkanlaştırılırlar [1, 10].



Şekil 2.2: Katı malzemeleri havadaki akışkanlaştırma davranışlarına göre sınıflandıran Geldart diyagramı [11]

Bir malzemenin havadaki akışkanlaştırma özellikleri hangi grupta olduğu saptanarak tahmin edilebilir. Ortam şartlarının üzerindeki çalışma sıcaklığı ve basıncında bir malzemenin ortam şartlarında olduğundan farklı bir gruba dâhil olabileceğini bilmek önemlidir. Bu durum, gazın malzeme üzerindeki özelliklerinden kaynaklanır ve akışkan yatak işlemleri üzerinde ciddi etkileri vardır [10].

3. KATI YIĞINLARIN AKIŞ ÖZELLİKLERİ

3.1 Genel Özellikler

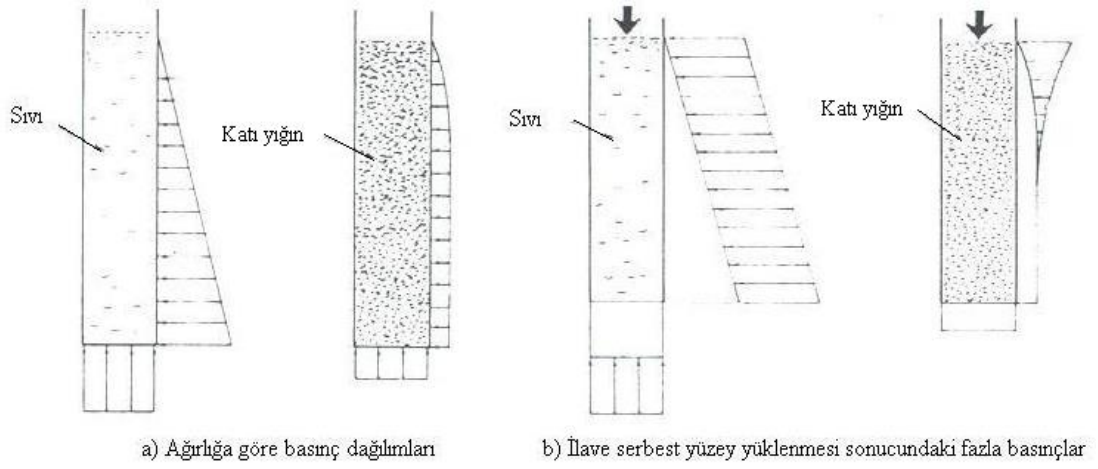
“Akış” kelimesi katılardan çok sıvılarla ilgili çağrışım yaptığından, “katı akışı” ndan söz edildiği zaman katıların da sıvılar gibi davranım gösterdiği sanılabilir. Fakat bu kabul geçerli değildir. Katı yığınların akışı göz önüne alındığında, bir katının akış sırasındaki davranışının bir sıvınıninkiyle aynı olmadığı, farklı akış mekanizmaları olduğu söylenebilir. Katılar ile sıvılar arasındaki başlıca farklılıklar şu şekilde özetlenebilir:

- (1) Katılar statik koşullar altında kesme gerilmesini aktarabilirlerken sıvılar bunu yapamazlar. Katıların sıfırdan büyük statik sürtünme açısı değerleri vardır. Bu farklılık, sıvıların düz yüzeyler oluştururken katıların neden yığınlar oluşturduğunu açıklar.
- (2) Birçok katı bir basınç uygulandığında kohesif bir kuvvete sahip olur ve yük altında şeklini muhafaza eder (sabit bir kubbe oluştururlar).
- (3) Yavaşça deforme olan (akan) bir katıda oluşan kesme gerilmesinin genellikle kesme hızından bağımsız olduğu, katıya etkiyen ortalama basınca bağlı olduğu söylenebilir. Sıvılarda durum bunun tam tersidir; kesme gerilmesi kesme hızına bağlı, basınçtan bağımsızdır [4, 12, 13].

Bu temel farklılıklar, katılar için olan akış kriterinin sıvı akışı için olan kavramlardan çıkarılmak istenmesinin anlamsız olduğunu göstermektedir. Mevcut farklılıklara göre katı yığınlar bir plastik ve visko-elastik olmayan malzeme gözüyle bakılabilir [4].

Sıvıları ve katı yığınları ayıran bu özellikler biri katı yığın ile diğeri ise aynı yoğunluktaki sıvıyla doldurulmuş iki aynı silindirik kabın iç yüzeylerindeki basınç dağılımları göz önünde bulundurularak gösterilebilir. Şekil 3.1a’ da katı ve sıvıya göre olan basınç dağılımları gösterilmiştir ve kabın altına yakın yerlerde sıvıda daha büyük gerilmelerin mevcut olduğu açıktır. Bu farklılığın nedeni sıvının olduğu kabın duvarlarında kesme gerilmesinin olmadığı gerçeğidir. Böylelikle, sıvının bütün ağırlığı tabana uygulanırken, diğer tarafta katı yığının ağırlığının önemli bir kısmı

düşey duvarlarda taşınır. Silonun düşey kısmındaki gerilmeler için hesaplama yöntemi Janssen tarafından önerilmiştir.



Şekil 3.1: Sıvılar ve katı yığınlardaki basınç dağılımları [3]

Katının ve sıvının serbest yüzeylerine uygulanan yük etkisiyle iç gerilmenin katı yığın ve sıvı boyunca iletildiği durum Şekil 3.1b' de gösterilmiştir. Sıvı durumunda, yük fazlası üniform olarak iletilir ve gerçekte tüm bu fazla yük kabın tabanına uygulanır. Katı yığının olduğu kaptaki ise serbest yüzeye olan ilave bir yükleme sonucu tabanda herhangi bir basınç değişimi olmaz [3].

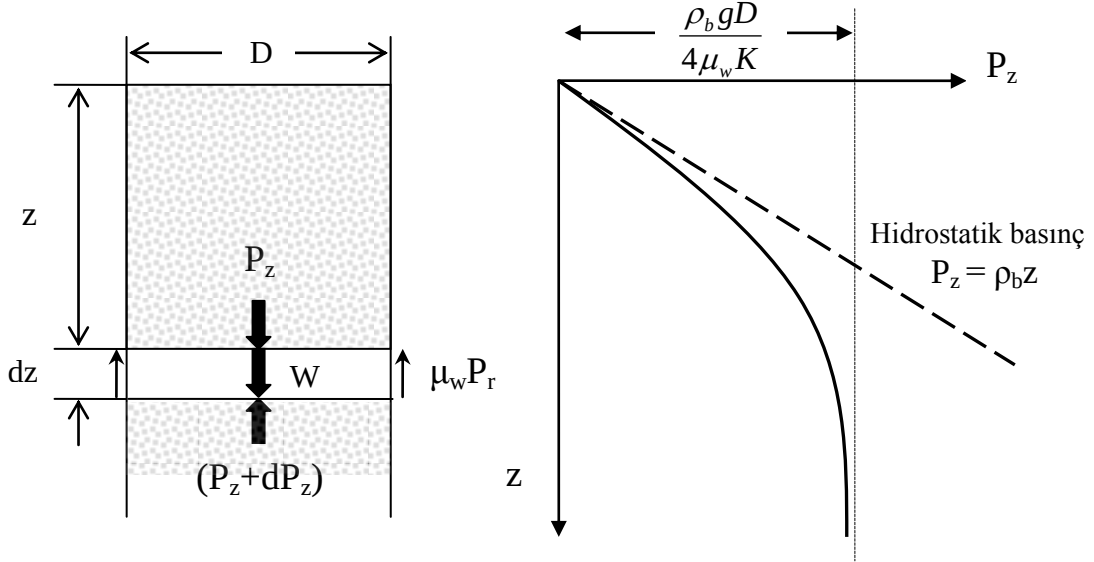
3.1.1 Hareketsiz Katı Yığındaki Basınç Dağılımı (Janssen denklemi)

Bir miktar katı yığının olduğu bir siloda meydana gelen basınç dağılımı silo tasarlanırken dayanıklılığı için önemlidir, fakat bunun akış modeli üzerinde direkt bir etkisi yoktur. Buna rağmen, silolarda depolama ve akış sırasındaki basınç dağılımının iyice anlaşılması akıştaki tıkanma ihtimallerini değerlendirirken önemli bir araçtır [3].

Katı yığınların ve sıvıların davranış farklılığından söz ederken Şekil 3.2' de gösterilmiş olan silindirik bir kaptaki depolanmış bir katı yığının meydana getireceği basınç dağılımı ele alınabilir. Sürtünme özellikleri nedeniyle malzemenin serbest yüzeyinden z-mesafesindeki duvarlara uygulanan yanal basınç (P_r) silodaki düşey basınçtan (P_z) daha azdır ve bu basınçların oranı,

$$K = \frac{P_r}{P_z} = \text{sabit} \quad (3.1)$$

şeklinde bir K faktörü ile ifade edilir ve yaklaşık olarak sabit olduğu bulunmuştur. K faktörü katının iç sürtünme özelliklerine bağlıdır, başka bir bilgi yokluğunda 0.4 olarak alınabilir. Analizi basitleştirmek için şu kabuller yapılabilir:



Şekil 3.2: Silindirik bir kaptaki yığın malzemenin basıncının derinlikle değişimi [3, 5]

- z derinliğindeki P_z basıncı tüm kesit alanı boyunca sabittir.
- Duvarlardaki sürtünme katsayısı (μ_w) duvarlar boyunca sabittir.
- Malzemenin yığın yoğunluğu (ρ_b) katının her yerinde aynıdır.
- K faktörü duvarlar boyunca sabittir.

Aslında yukarıda sayılan durumların hiçbiri doğru değildir. μ_w , ρ_b ve K değerleri konsolidasyon basıncına göre değişim gösterirler. Kabın duvarlarının sürtünme direncinin malzemeyi düşey doğrultuda desteklediği göz önünde bulundurularak, katının birim elemanında yazılacak olan kuvvet dengesinden,

$$\rho_b g \frac{\pi}{4} D^2 dz - \frac{\pi}{4} D^2 dP_z - \mu_w P_r \pi D dz = 0 \quad (3.2)$$

eşitliği yazılır. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra elde edilen diferansiyel denklem sınır şartı ($z=0$; $P_z=0$) da kullanılarak çözülürse,

$$P_z = \frac{\rho_b g D}{4\mu_w K} \left[1 - \exp\left(-\frac{4\mu_w K z}{D}\right) \right] \quad (3.3)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem, katı yığın içeren silindirik bir silodaki basıncın derinlikle olan değişimini gösterir ve Janssen denklemi olarak bilinir [3, 5].

Düşey basıncın (3.3) numaralı denklemden de görüleceği gibi gittikçe azalan üstel bir artışı vardır ve bir sınır değere ulaşır. Kıyaslama yapılırsa, bir sıvı olduğu durumda, duvarlar tarafından uygulanan düşey bir destek yoktur ve basınç derinlikle doğrusal olarak artan hidrostatik basınçtır. Herhangi bir z derinliğinde sıvı basıncı tüm yönlerde aynıdır. Şekil 3.2’ de karşılaştırma amacıyla hidrostatik basınç değişimi de gösterilmiştir.

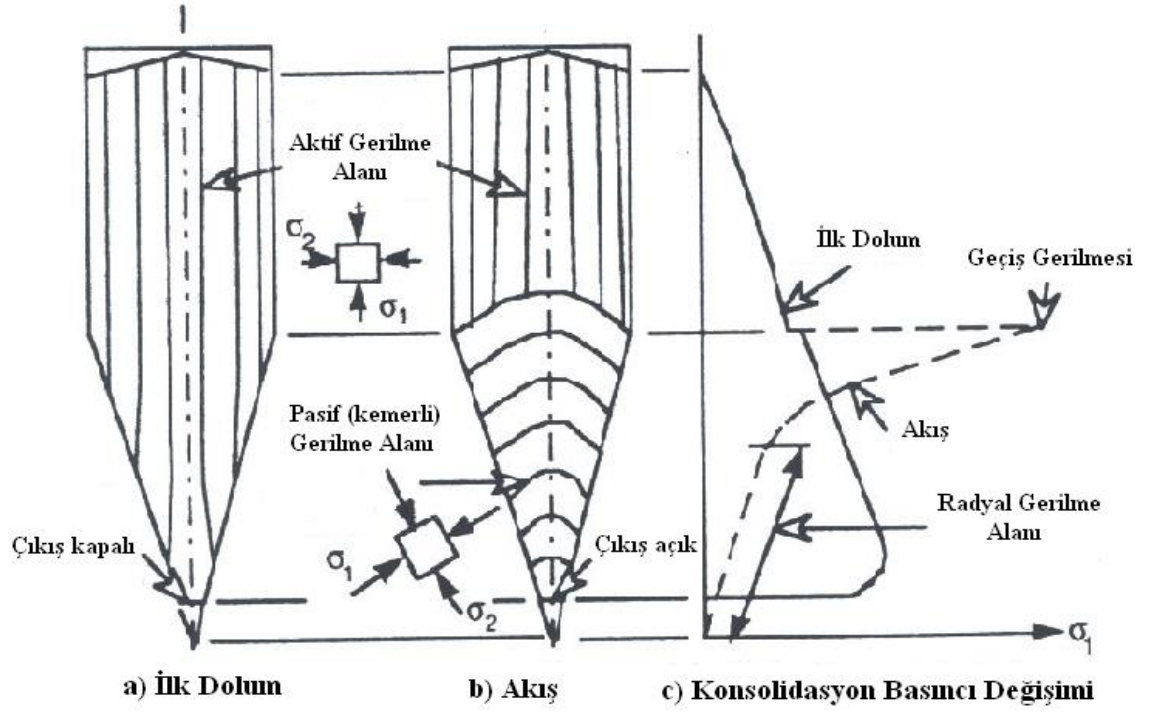
Katı yığınların sürtünme özellikleri depolama sırasında avantajlar sağlarken, özellikle silonun duvarları tarafından sağlanan destek göz önünde bulundurulduğunda bu özellikler katı yığınlar yukarı doğru kaldırılmak istendiğinde (zorlanmış akış) ters bir etkiye sahip olurlar. Bu durumda, malzemenin yukarı doğru hareketi sağlanmak istendiğinde sürtünme kuvveti buna ters yönde -aşağı doğru- etki edecektir. Yukarı doğru hareketi sağlayan kuvvet artan kolon veya silo yüksekliğiyle üstel olarak artacaktır. Kuvvetteki bu artış katı yığınların düşey doğrultudaki taşınmalarında kolon yüksekliğinin sınırlı olması gerektiğine işaret eder [12].

3.1.2 Silolardaki Gerilme Alanları –Akışın Basınç Üzerindeki Etkisi

Bugüne kadar katı yığınları depolayan ünitelerde düşey duvarların fiziksel zayıflığından kaynaklanan birçok ciddi mekanik hasar meydana gelmiştir. Problem genellikle tasarımcının hatasından kaynaklanır, çünkü malzemenin silodan boşaltımı sırasında oluşan yanal basınçlar malzemenin silodaki hareketsiz halindeki basıncından (Janssen formülüne göre hesaplanan) daha büyüktür. Bu dinamik ek basınçlar boşaltım anında silodaki gerilme alanında bir değişikliğe neden olurlar. Kenar duvarlardaki basınç statik basıncın 3 veya 4 katı kadardır. Akış sırasındaki mümkün olan maksimum yanal basınç silodaki malzemenin bir fonksiyonudur ve basitçe $P_{r,max} = \rho_b g h$ olarak hesaplanabilir. Silonun eğimli ve düşey kenarlarında boşaltım esnasında oluşan geçiş basınçları karışık bir durumdur, fakat bu konuda son zamanlarda ilerleme kaydedilmiştir. Katı yığının bir depolama aygıtından boşaltımı sırasındaki basınç dağılımları Jenike ve Johanson tarafından incelenmiştir [1, 3].

Basınç dağılımlarının (gerilme alanları) silo duvarlarına uygulanan basınçların büyüklüğü ve dağılımı, çıkış kapakları ve besleyicilere etkiyen yüklerin büyüklüğü üzerinde önemli bir etkisi vardır. Katıya akış sırasında uygulanan büyük-birincil (σ_1) ve küçük-ikincil (σ_2) esas gerilmelerin yönleri de gerilme alanı bilgisine göre belirlenebilir.

Simetrik kütle-akış silolarında meydana gelen gerilme alanları Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Boş bir siloyu doldurduktan sonra, malzeme yerleşirken ve böylece artan yük altında düşey olarak daralırken zayıflamış (peaked) veya aktif bir gerilme alanı Şekil 3.3a’ daki gibi oluşacaktır. Bu durumda, çıkıştaki kapak tarafından düşey bir destek sağlandığından dolayı esas gerilme (σ_1) düşey olarak etki eder. Bu yüzden gerilme çizgileri düşeydir ve σ_1 değişimi Şekil 3.3c’ de gösterilmiştir [3, 12].



Şekil 3.3: Silolarda başlangıç (dolum) ve akış anındaki gerilme alanları [12]

Çıkış kapağı açılarak akışa izin verildiğinde, kapak tarafından sağlanan düşey destek kaldırılır ve yük bunker duvarlarına iletilir. Bunkerde aşağıya doğru akan katı yığının yatay yönde sıkıştırılmasıyla bunkerin duvarları katının ağırlığının daha büyük bir kısmını taşımak durumunda kalır. Bunkerin üst kısmındaki düşey gerilme azalırken bunker çıkışına doğru bu azalma daha da fazla olur. Çıkıştaki basınçlar küçüktür, bu da çıkıştaki yüklerin ilk dolum sonrası yüklerden daha az olduğu anlamına gelir. Bir miktar katı yığın silodan boşalır boşalmaz, bunkerdeki gerilme alanı aktif bir gerilme alanından Şekil 3.3b’ de gösterildiği gibi kemerli veya pasif gerilme alanına değişir. Akış durumunda büyük esas gerilmenin oluşan kemerlere teğet yönde etki ettiği görülebilir [3, 12-14].

Aktif gerilme alanından pasif gerilme alanına geçiş akış başlar başlamaz çıkışta meydana gelir ve büyük bir basınç dalgasının varlığı sonucunda malzeme içerisinden

hızlı bir şekilde yukarılara doğru yayılır. Bu ek basınç, bunkerin alt seviyelerinde oluşan basınçların silonun dolumu sırasında oluşmuş basınçlardan daha az olması nedeniyle dengeyi sağlamak üzere gereklidir. Birçok kütle akış silosunda bu yayılma kararlı hal akışı sağlandığında silonun konik ve silindirik kısımlarının kesiştiği yerde son bulur (Şekil 3.3b). Serbest akan malzemelerde kohesif malzemelerde olduğundan daha yüksek seviyelere ulaşır. Değişikliğin geçiş bölgesinde sürekli olarak sabitlenmesiyle ek basınç akış devam ettikçe korunur ve silindirik kısımdaki aktif gerilme alanı etkilenmeden kalır. Yani Şekil 3.3b’ deki gerilme durumu akış olduğunda da sabittir ve hatta bir miktar boşaltımdan sonra akış durduğunda bile korunur. Bu durum Jenike tarafından deneysel olarak da doğrulanmıştır ve akış sırasında dolum basınçlarındaki herhangi bir artışın öncelikle duvarların yüzey kusurlarından (uygunsuz biçimde yapılmış kaynak bağlantıları, gerilme alanı değişiminin merkezi olabilecek yüzeydeki düzensizlikler) kaynaklandığı belirtilmiştir. Pratikte basınçtaki dalgalanmalar sabit değildir ve sonuç olarak bunları güvenli bir şekilde tahmin etmek de zordur. Şekil 3.3a’ daki gerilme durumunun tekrar sağlanabilmesi için tek yol siloyu tamamen boşaltmak ve yeniden doldurmaktır [1, 3, 12].

Kemerli gerilme alanının özelliği akış durumu için Şekil 3.3c’ de gösterilmiştir. Geçiş bölgesinde konsolidasyon basınçları büyüktür, fakat görüldüğü gibi çıkışa doğru azalır. Bunkerin alt kısımlarındaki düşey gerilmeler (konsolidasyon) hayali bunker ucuna olan radyal mesafeyle yaklaşık olarak orantılıdır, başka bir deyişle, gerilmeler yerel bunker çapıyla orantılıdır. Gerilmelerin bu doğal rotası radyal gerilme alanı olarak adlandırılır [12, 14].

3.2 Genel Kavramlar

3.2.1 Esas Gerilme

Malzemenin gerilmeye maruz kalan herhangi bir noktasında, kesme gerilmesinin olmadığı karşılıklı olarak birbirine dik 3 adet düzlem vardır. Bu düzlemler esas gerilme düzlemleri, esas gerilme düzlemlerine dik olan σ_1 , σ_2 ve σ_3 de esas gerilmeler olarak adlandırılırlar. σ_1 büyük (birincil) esas gerilme, σ_2 ise küçük (ikincil) esas gerilme değerleridir (Şekil 3.4). Orta esas gerilmenin (σ_3) katıların kuvvet özellikleri üzerindeki etkisinin belirsiz olmasından dolayı, bu değer ihmal edilerek iki boyutlu gerilme analizlerinde sadece σ_1 ve σ_2 göz önüne alınırlar.

Buradaki teori, basınç altındaki katı akışının gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini büyük ve küçük esas gerilmelerin orta esas gerilmeden bağımsız olarak belirleyeceği kabulüne dayanır [7].

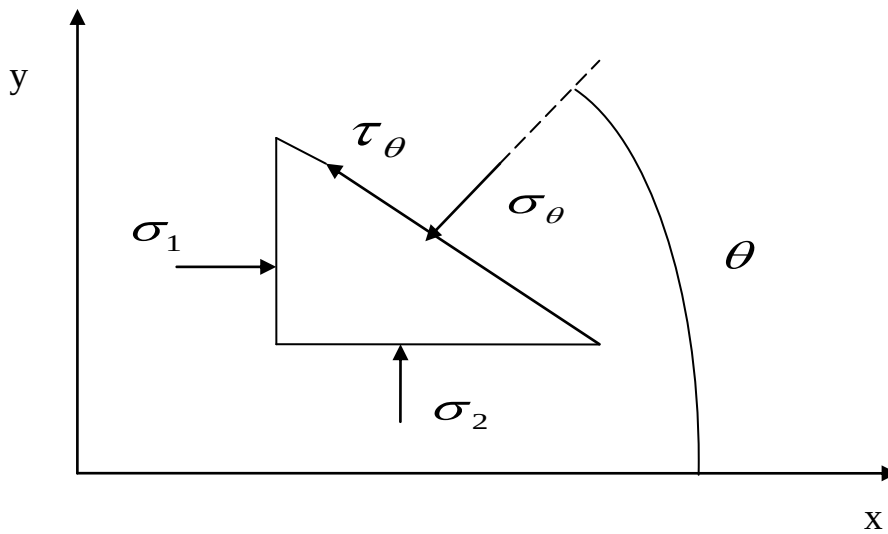
Birçok problemde iki boyutlu gerilme analizi yaklaşımı yeterlidir. Plastik deformasyona ait gerilmeler ve kesme düzlemlerinin konumu iki boyutlu diyagramlarda (Mohr diyagramı) gösterilebilir. Orta esas gerilmenin diğer iki gerilmeden birine eşit olduğu ($\sigma_3=\sigma_1$ veya $\sigma_3=\sigma_2$) kabul edilir. Örneğin; silo teorisinde, radyal gerilmenin teğet olan gerilmeye eşit olduğu kabul edilir [2, 15].

3.2.2 Mohr Çemberi Analizi

İki boyutlu problemlerde, çeşitli yönlerdeki düzlemler üzerindeki gerilme durumları basit bir şekilde kuvvet dengeleriyle ilişkilendirilir. Şekil 3.4’ de katı bir elemana etkiyen büyük ve küçük esas sıkıştırma gerilmeleri (σ_1, σ_2) gösterilmiştir. Burada σ_θ ve τ_θ sırasıyla normali θ açısı yönünde olan keyfi bir düzlem üzerindeki normal gerilme ve kesme gerilmesidir. Katı eleman üzerindeki kuvvet dengesi sonucunda şu eşitlikler elde edilir:

$$\sigma_1 \cos^2 \theta + \tau_\theta \sin \theta \cos \theta - \sigma_\theta \cos^2 \theta = 0 \quad (3.4)$$

$$\sigma_2 \sin^2 \theta - \tau_\theta \sin \theta \cos \theta - \sigma_\theta \sin^2 \theta = 0 \quad (3.5)$$



Şekil 3.4: Katı bir elemana etkiyen gerilmeler [7]

σ_θ ve τ_θ için çözüm yapılırsa;

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \quad (3.6)$$

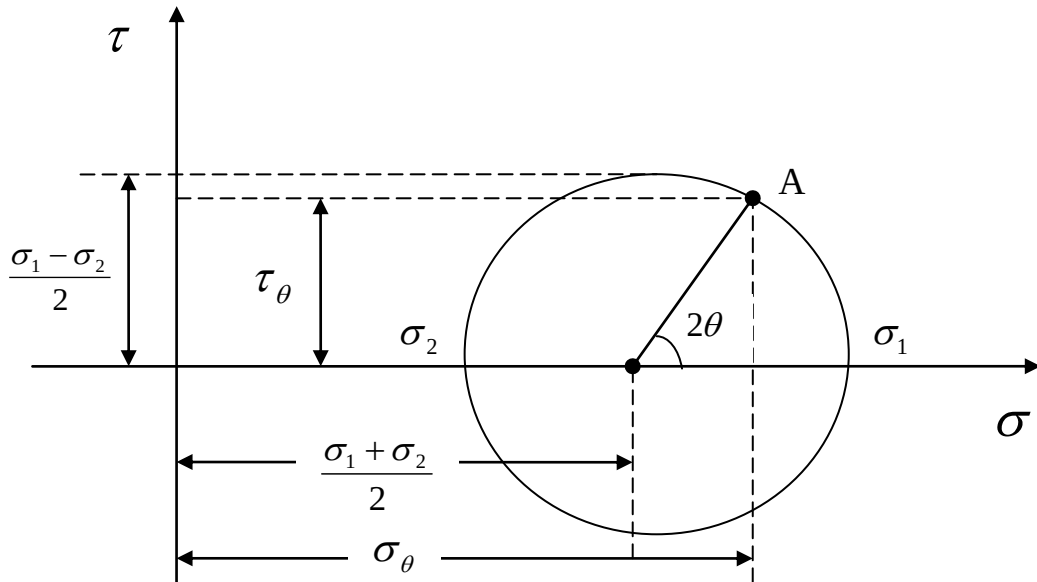
$$\tau_\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \quad (3.7)$$

Elde edilen bu bağıntılar gerilme durumunun 2 boyutlu tanımlanmasını sağlar ve aynı zamanda yarıçapı R ve merkezi p olan çember denklemleridir [7].

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

Şekil 3.5’ de gösterilmiş olan çember Mohr gerilme çemberi olarak adlandırılır ve bir katının bütün düzlemlerinde etki eden gerilme durumlarını gösterir. Mohr çemberi, katının her düzleminde etki eden bütün gerilmelerin yörüngesidir. Böylece, Mohr çemberi üzerindeki bir nokta tek bir düzlemde etki eden normal ve kesme gerilme değerlerini belirler. A noktası gibi herhangi bir nokta normali θ yönünde olan bir düzlemdeki gerilmeyi temsil eder. Normal gerilmenin sıkıştırıcı özelliği varsa pozitifdir. Saat yönü tersindeki kesme gerilmesi de pozitifdir.



Şekil 3.5: Mohr gerilme çemberi [7]

Mohr çemberi katı yığınlarının karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde (akma sınırı hattını kullanarak) çok önemli bir araçtır. Katı kütlesi içinde hareketi başlatmak için Mohr çemberindeki en az bir nokta bir kırılma düzlemine karşılık gelmelidir.

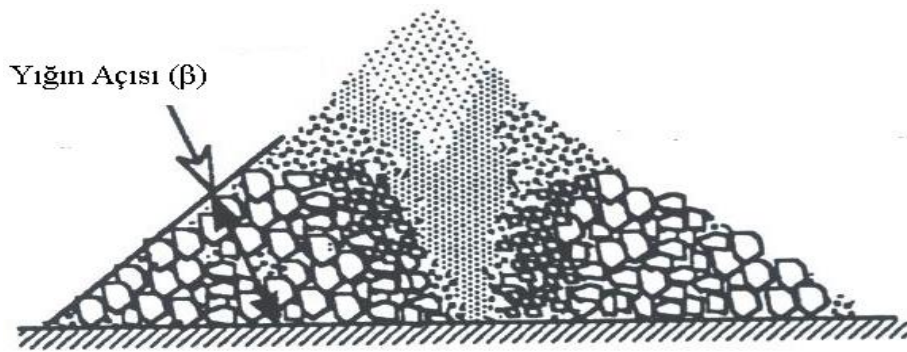
Mohr çemberi üzerindeki kırılma düzleminin konumu malzemenin akma sınırı hattının Mohr çemberine teğet olmasıyla elde edilir [2, 7].

3.3 Katı Yığınların Akabilirliği

Katı yığınların akış özelliklerini veya akabilirliğini tanımlamak için kullanılan birçok terim vardır. Peschl [15], birtakım malzeme özelliklerini tanımlamıştır; bunlardan birçoğu sadece nitel, betimsel ve deneysel yolla kullanılabilirler ve bunları kesin olarak belirlemek zordur. Özellikle de katı yığınların depolanması ve akışı ile ilgili olan bazı özellikler çoğu zaman yanlış kullanılırlar. Örneğin, katıların yığın açısı çoğunlukla iç sürtünme açısı ve katıların akabilirliğinin bir ölçüsü olarak yanlış kullanılmaktadır [12].

3.3.1 Yığın Açısı

Yığın açısı (β), gevşek ve konsolide olmamış bir katı yığının düz bir yüzey üzerine döküldüğü zaman eğimli yüzey tarafından oluşan açıdır. Eğer bir katı geniş bir aralıkta tanecik büyüklükleri içeriyorsa, iri tanecikler ince taneciklerden daha serbest akışlı olduklarından dolayı Şekil 3.6’ da görüldüğü gibi ayrışma eğilimindedirler. İnce tanecikler katı kümesinin yörüngesinde toplanırlarken iri tanecikler yığının çevresine doğru kayarlar. Katı malzemelerin bu şekilde yığınlar oluşturmalarının başlıca nedeni Coulomb sürtünme özellikleri ve kohezyondur ve katıların sıvılardan olan farklılığını gösterir. Yığın açısı katının nem içeriği, iç sürtünmesi, şekli, kohezyonu, büyüklük dağılımı ve sıkıştırılma derecesiyle değişebilir [4, 12].



Şekil 3.6: Bir katının yığın açısı [12]

Katıların yığın açısını ölçmek için birçok yöntem vardır [2, 3] ve bu yöntemler eğimli yüzeyin nasıl oluşturulduğuyla ilgilidir. Belirlenecek olan açı değeri sadece

malzemenin durumuna bağılı olmamakla beraber uygulanan yöntemle göre de değışir, fakat standartlaştırılmış bir test yöntemi birbirini tekrarlayan sonuçlar verebilir. En çok kullanılan bir yöntemde, yığın açısı (dökme) katının düzgün bir yüzeye bir huniden yavaşça dökölmesiyle ve oluşan yığın eğimli yüzeyinin yatayla yapmış olduğu açının ölçölmesiyle belirlenebilir [3]. Yığın açısı katının dököldeğü yüzeyin pürüzlölüğüne çok hassas olup pürüzsüz yüzeylerde daha küçüktür, aynı şekilde dökme yüzeyinin titreşimi ile küçölür [9].

Yığın açısı akabilirliğin bir ölçölü değıldir, ancak bir katı yığının bu açi değıerini akış davranışının ne olduğunun kabaca değıerlendirilmesinde kullanmak mümkündür. Yığın açısının düşmesi katıdaki taneciklerin daha akıcı olması anlamına gelir. Buna göre;

Yığın Açısı (β)	
25-30°	Çok rahat akan tanecikler
30-38°	Serbest akan tanecikler
38-45°	Orta derecede akıcı tanecikler
45-55°	Kohesif malzemeler
>55°	Çok kohesif malzemeler

Yığın açısı nitel olarak akış özelliğini göstermede faydalı bir araç olsa da, bunun için daha uygun testler (kesme testleri, vs.) olduğından bu yaklaşıma fazla güvenilmemelidir. Bu yüzden yığın açısını sadece malzemenin yığın sınırlarının göstergesi olarak değıerlendirmek ve kullanımını bununla sınırlandırmak genellikle daha güvenlidir. Örneğin, bir katının yığın açısı silolardaki boş kalan kısmın ve konveyörde taşınan malzemenin kesit alanının belirlenmesinde gereklidir [3].

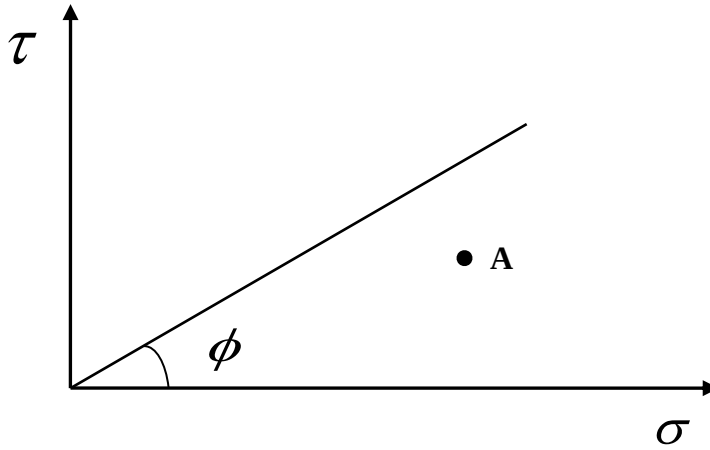
3.3.2 Akma Sınırı Hattı

Belirli bir düzlem boyunca oluşan kesme gerilmesi (τ), bu düzlemde etki eden normal basınca (σ) bağılıdır. Eğer bir malzeme kesme işlemine tabii tutulursa, her malzeme için normal ve kesme gerilmeleri arasında karakteristik bir ilişki elde edilir. Bu ilişki grafiksel olarak σ - τ koordinatlarında (Mohr diyagramı) gösterilir ve sonucunda elde edilen eğri-çoğunlukla da doğıru- katıya ait akma sınırı hattıdır (Yield Locus - YL). Katı yığınların bütün akış özellikleri bu akma sınırı hatlarından yola çıkılarak bulunurlar.

Akış özelliklerine göre genel olarak serbest akışlı ve kohesif olmak üzere iki tip yığın malzeme vardır. Akma sınırı hattının Mohr diyagramındaki yapısı ve konumundan malzemenin ne tip olduğu görülebilir. Akma sınırı hattı kusursuz, serbest akışlı katı yığınlar için düz bir doğrudur ve σ - eksenine ϕ açısını yaparak orijinden geçer (Şekil 3.7).

$$\tau = \tan \phi \sigma \quad (3.8)$$

Burada; τ kesme gerilmesi, σ normal gerilme ve ϕ malzemenin iç sürtünme açısıdır. Sıvılar kesme gerilmesini aktaramadıklarından dolayı bu değer sıvılarda sıfırdır [8, 15].



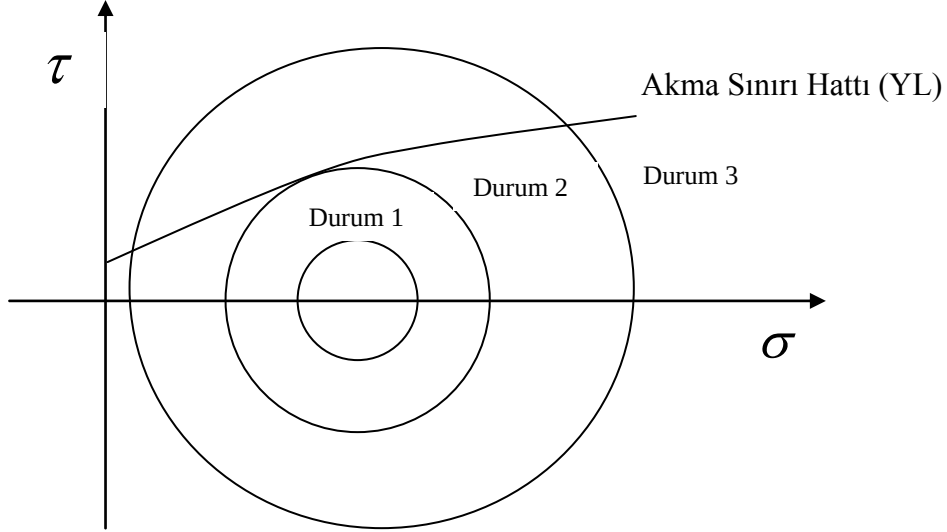
Şekil 3.7: Kusursuz, serbest akışlı katı için akma sınırı hattı [8]

Akma sınırı hattı altındaki katının bir düzleminde uygulanan bir gerilme durumunda (A noktası) katı, elastik (kalıcı olmayan) deformasyona uğrar. Bu durum, bir katının akma olmadan kesme gerilmesini transfer edebildiği gerçeğini gösterir [8]. Akma sınırı hattının fiziksel anlamı şu şekilde ifade edilir:

Durum 1: Mohr çemberinin akma sınırı hattının altında kalan gerilme durumu stabil olan sert bir katıya karşılık gelir, katıda elastik bir deformasyon söz konusudur.

Durum 2: Mohr çemberi akma sınırı hattına teğetse, katı, düzlem üzerinde tam mukavemet gösterir. Bu aşamadaki katı kırılmanın başlangıcı durumundadır, yani katıda plastik deformasyon (akış) meydana gelir.

Durum 3: Mohr çemberinin akma sınırı hattını kesen gerilme durumu akış başladıktan sonra imkânsızdır [7, 15]. Bu 3 duruma karşılık gelen Mohr çemberleri Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Bir katıya etkiyen çeşitli gerilme durumlarının geometrik gösterimi [7]

Gerçek hayattaki katı yığınlar az ya da çok miktarda kusursuz, serbest akan katılardan saparlar. Bu sapma 4 şekilde görülür (Şekil 3.9):

- (1) YL düz bir doğru değildir, fakat yukarı doğru konveks biçimdedir.
- (2) YL’ nin konumu katının konsolidasyon derecesinin bir fonksiyonudur, böylece bir katı sonsuz sayıda akma sınırı hattına sahiptir.
- (3) Her YL bir E noktasında son bulur.
- (4) Her YL kesme gerilmesi eksenini sıfırdan büyük bir değerde keser, bu değer kohezyon olarak adlandırılır [8].

Jenike [8], kohesif bir katı yığının yaklaşık olarak bir Coulomb katısı olarak değerlendirilebileceğini ifade etmiştir. Coulomb katısını rigid bir plastik katı olarak tanımlarlar, çünkü katıda sınırlı bir gerilme fonksiyonu (YL) mevcuttur. Fonksiyon tarafından belirlenenden düşük gerilmeler deformasyona yol açmaz, sınır gerilmeye eşit gerilme değerleri ise plastik akışa neden olur. Zemin mekaniğinde, bir Coulomb katısı lineer bir akma sınırı hattı ile ifade edilmektedir:

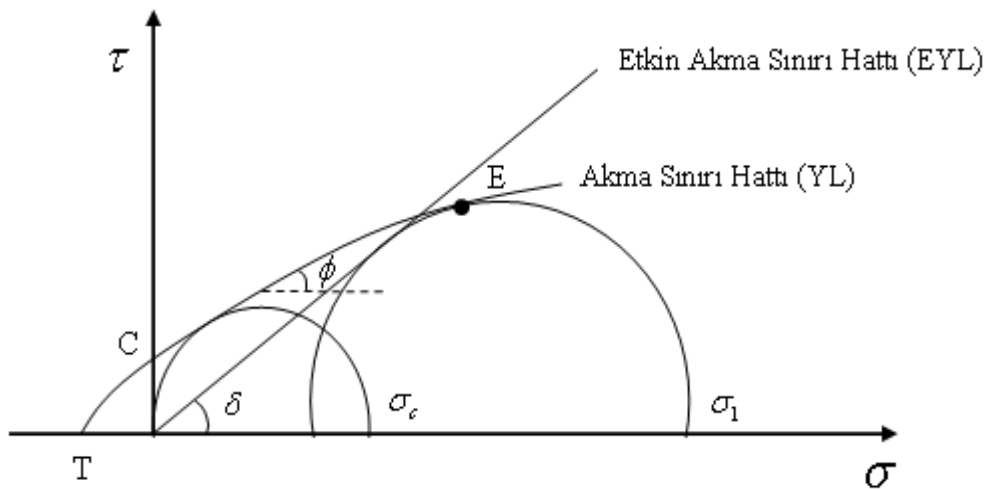
$$\tau = \tan \phi \sigma + C \quad (3.9)$$

C, kohezyon değeri olarak tanımlanır. Düşük normal gerilme değerlerinde, akma sınırı eğrisi düz bir doğrudan önemli bir oranda sapma gösterir (Şekil 3.9). Bununla birlikte, akma sınırı hattı katının konsolidasyon gerilmesine dayanır ve konsolidasyonun meydana geldiği bir noktada son bulur [7].

Bu model (Mohr-Coulomb), katıların plastik akışını tanımlamada en çok kullanılan teorik modeldir. Model, aslında iki boyutludur ve üç boyutlu eleman içinde orta esas gerilmenin etkisini hesaba katmaz. Eksenel olarak simetrik geometrilerde, orta esas gerilmenin diğer iki gerilmeden birine eşit olduğu kabulüne dayanarak Coulomb modeli uygulanır. Literatürde orta esas gerilmeyi hesaba katan daha karmaşık modeller de mevcuttur [2]. Deneysel olarak sabit yoğunlukta akma sınırı hattının üs kanununa uyduğu belirlenmiştir [16]:

$$\left(\frac{\tau}{C}\right)^n = \frac{\sigma + T}{T} \quad (3.10)$$

T, gerileme kuvveti, n ise değerleri 1–2 arasında değişen üs parametresidir. n=1 için, (3.10) numaralı denklem (3.9) numaralı denkleme indirgenir ve akma sınırı hattı düz bir doğru oluşturur. (3.10) denklemi her zaman için ölçülmesi mümkün olmayan gerileme kuvvetinin bilinmesine gerek duyar. Bu yüzden, katıların akış özelliklerinin hesaplanmasında daha pratik olan (3.9) denklemi kullanılır [24]. Jenike [8] bir de uygulanan konsolidasyon yönteminin akma sınırı hattının şeklini ve konumunu değiştirdiğini belirlemiştir.



Şekil 3.9: Gerçek, kohesif bir katıya ait akma sınırı hattı (YL) ve ilgili parametreler [7]

Serbest akışlı malzemeler sadece bir parametre - iç sürtünme açısı (ϕ)- ile karakterize edilirlerken, kohesif malzemeler ϕ , kohezyon (C), sınırlanmamış akma gerilmesi (σ_c) ve gerileme kuvveti (T) ile tanımlanırlar [15]. Bütün bu parametreler konsolidasyon gerilmesinin, zamanın, nem oranının ve sıcaklığın fonksiyonudurlar.

3.3.2.1 İç Sürtünme Açısı

Akma sınırı hattının yatay eksenle yapmış olduğu açı iç sürtünme açısı (ϕ) olarak adlandırılır ve yığın içerisindeki sürtünme katsayısının bir göstergesidir. Her ne kadar kavslu akma sınırı hattı durumunda düşük konsolidasyon gerilmelerinde değişiklik gösterse de, aslında sabit bir değerdedir ve genellikle 30-40° aralığındadır [7].

Serbest akan, kohesif olmayan malzemeler için iç sürtünme açısı yığın açısıyla aynı olabilir. Bu kabul ancak malzemenin kohesif kuvvetinin olmadığı ve ihmal edilebilir olduğu durumda geçerlidir. Kohesif malzemelerde durum farklıdır; iç sürtünme açısı yüzeyde gözlenemez, ancak bir kesme test cihazıyla ölçülebilir [2, 15].

Akma sınırı hattının kavsliliğinin düşük normal gerilme değerlerinde artış göstermesi sonucunda, eğrinin yatay eksenle kesiştiği noktada iç sürtünme açısının 90° 'ye kadar artabileceği gözlemlenebilir (Şekil 3.9). Bu yüzden, bu açı değerinin akış analizlerinde (tasarım hesaplamalarında) kullanılmaması sevindiricidir [4].

3.3.2.2 Kohezyon

Kohezyon, bir katı yığının taneciklerinin birbirine nasıl ve ne derecede yapıştığının bir ölçüsüdür. Akma sınırı hattının kesme gerilmesi eksenine (τ) kesiştiği yer kohezyon değerini verir, bu da normal gerilmenin sıfır değerindeki kesme gerilmesidir (Şekil 3.9). Kuru kum gibi serbest akışlı malzemelerin kohezyon değerleri sıfırdır ve bu malzemelerin akma sınırı hatları orijinden geçer. Kohezyon değerleri çeşitli katıların karşılaştırılmasında kullanılabilir ama meydana gelen bir akışın değerlendirilmesinde kullanılamaz [7].

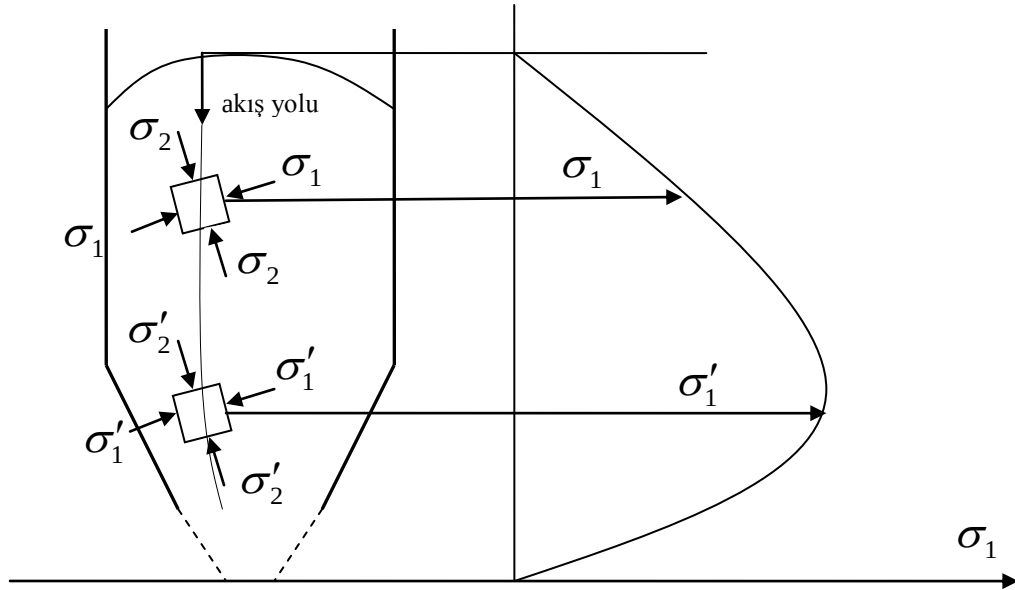
3.3.2.3 Gerileme Kuvveti

Akma sınırı hattı normal gerilme eksenini Şekil 3.9' da gösterildiği gibi negatif bir T değerinde keser. Bu değer gerileme kuvveti olarak adlandırılır ve bir katı yığın numunesinin normal kuvvetle aynı yönde olan bir düzlem üzerinde kırılması için

katı yığının birim kesit alanı başına gerekli maksimum gerileme kuvvetidir. Gerileme kuvveti farklı cihazlarla doğrudan ölçülebilir ya da literatürdeki uygun korelasyonlar kullanılarak hesaplanabilir [7]. Jenike kesme test cihazı katıların bu özelliğini belirlemede kullanılamaz [17].

3.3.3 Etkin Akma Sınırı Hattı

Bir katının bir kanaldan akışını göz önünde bulundurarak, katı elemanın kanal boyunca akış yolunu izleyin (Şekil 3.10). Bu elemanın katı kütlesi üzerinde çarpma etkisi olmadan tortu bıraktığını farz edin. Eleman yüzeyden aşağıya doğru akarken katının yeni katmanlarıyla kaplanır ve elemana etkiyen basınç başlangıçta artar, bir maksimumdan geçerek kanalın çıkışına doğru azalır. Aynı anda katı elemanın şekli değişir, bu da elemanın taneciklerinin birbirleri üzerinde kaymasına neden olur. Tanecikler ilk olarak basınç arttıkça birbirlerine yaklaşırlar, daha sonra basınç azaldıkça da birbirlerinden ayrılırlar.



Şekil 3.10: Siloda akan katı elemana etkiyen basınç [4]

Akış olarak adlandırılan bu işlem sırasında, katı eleman üzerindeki birincil ve ikincil basınçlar daha önce de belirtildiği gibi sırasıyla σ_1 , σ_2 olarak gösterilirler. Bu basınçlar, katının yoğunluğunda bir değişime neden olduğundan (akış sırasında yoğunluk basınçların bir fonksiyonudur), konsolidasyon basınçları olarak adlandırılacaklardır [4].

Yüzlerce katıyla yapılmış olan deneyler $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ oranının katının belirli nem içeriği ve sabit sıcaklığında az da olsa değiştiğini göstermiştir. Katı yığınların bu özelliği aşağıdaki bağıntıyla tanımlanır:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1 + \sin \delta}{1 - \sin \delta} \quad (3.11)$$

Bu bağıntı “etkin akma sınırı fonksiyonu” olarak bilinmektedir. δ , açısı etkin iç sürtünme açısı olarak adlandırılır ve kanalda oluşan basınç aralığında sadece birkaç derece değişir. δ açısı çeşitli katılar için 30 - 70° arasında ölçülmüştür. Bu açı değeri, malzeme akış durumundayken katının sürtünmesinin veya akışa karşı direncinin göstergesidir. İnce tanecikli ve kuru katılar genellikle düşük δ değerlerine sahip olurlarken, iri tanecikli ve nemli katılar büyük δ değerlerine sahip olurlar. Bu da, δ değerinin artmasıyla katının akabilirliğinin azalması anlamına gelir [4, 7].

$\sigma - \tau$ koordinatlarında, sabit bir δ değeri akış sırasında Mohr gerilme çemberlerinin orijinden geçen düz bir doğruya (zarf) sahip olduğu anlamına gelir. Bu doğru, “etkin akma sınırı hattı (Effective Yield Locus - EYL)” olarak adlandırılır ve Şekil 3.9’ da gösterildiği gibi σ -ekseniyle δ açısını yapar [4]. Akışın başlangıcındaki durumu temsil eden akma sınırı hattıyken, kararlı hal akışını temsil eden etkin akma sınırı hattıdır. Büyük Mohr çemberinin (kararlı hal Mohr çemberi) akma sınırı hattına teğet olduğu nokta etkin akma sınırı hattının bitiş noktasıdır [18].

Bir katı yığın için δ açısı genellikle ϕ açısından farklıdır. Bu iki açı değeri ancak kusursuz, serbest akan katılarda birbirine eşittir. Gerçek katılarda, akış sırasında δ her zaman için ϕ açı değerinden büyüktür [8].

Genellikle, azalan konsolidasyon gerilmesiyle birlikte δ artar. Bu durum şaşırtıcı olabilir, ama şu şekilde açıklanabilir: Granüler katıların davranışı sürtünmesiz haldeki durumdan sapma gösterir. Bunun nedeni, kaymaya karşı toplam dirence katılan konsolidasyon gerilmesinin taneciklerin birbirlerine bağlanması üzerindeki etkisidir. Konsolidasyon gerilmesini arttırmak, partiküllerin temas noktalarını yassılatarak ve keskin köşelerini ezerek birbirlerine bağlanmasını azaltır. Her ne kadar bu işlemle daha yoğun bir numune elde edilse de, kesme deformasyonu ve kaymanın gerçekleşmesi için kolaylık sağlanır [7].

3.3.4 Duvar Akma Sınırı Hattı

İç kesme düzlemi oluşumunun yanı sıra, katı malzeme silo duvarının yüzeyi boyunca da kayar. Akış sırasında duvar boyunca oluşan gerilmeler duvar akma sınırı hattı (Wall Yield Locus - WYL) üzerinde bulunurlar. Gerilmeler, deneysel olarak kesme testleriyle silo duvar malzemesinin yüzeyi üzerinde katı malzemeyi yatay olarak kaydırıp kesme kuvvetini ölçmek suretiyle belirlenir. İdeal bir Coulomb malzemesi için, duvar akma sınırı hattı lineerdir ve şu şekilde ifade edilir;

$$\tau_w = \mu_w \sigma_w + C_w \quad (3.12)$$

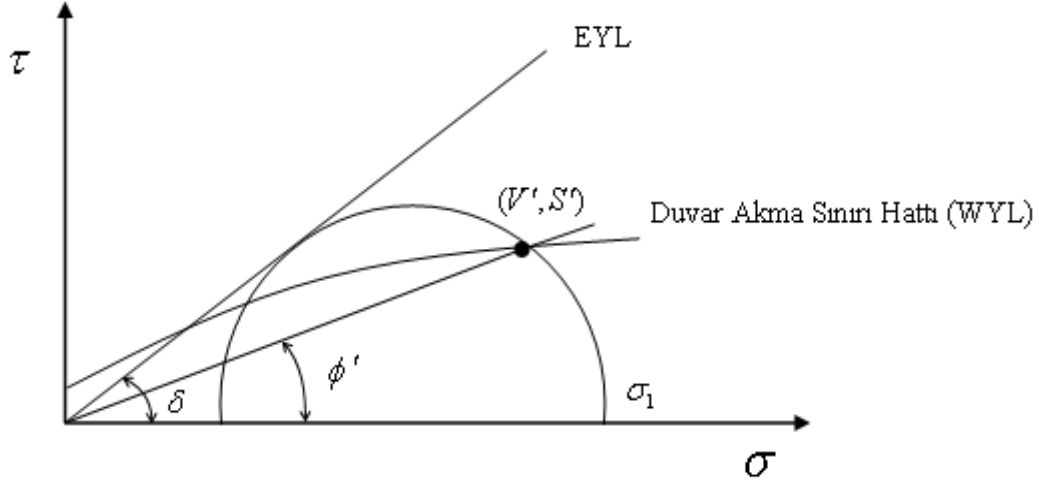
μ_w duvar sürtünme katsayısı, C_w de adezyon kuvveti olarak bilinir. Her ne kadar duvar akma sınırı hattında eğrilik bulunsada, birçok amaç için iyi şekilde uydurulmuş düz bir doğru yeterlidir [7].

3.3.4.1 Kinematik Duvar Sürtünme Açısı

WYL genellikle bir eğri ile gösterildiğinden katı malzeme ile silo duvarı arasındaki kinematik sürtünme açısı (ϕ') duvardaki basıncın bir fonksiyonudur ve değişim göstermektedir. Tasarım hesaplamaları sabit bir ϕ' değerine ihtiyaç duymaktadır. Güvenli bir tasarım için kritik bir ϕ' değeri seçilmesine gerek vardır. Pratikte en büyük ϕ' değeri genellikle kritik değerdir ve yukarı doğru konveks biçimdeki duvar akma sınırı hattı için silo çıkışında meydana gelir.

Tasarım yaparken öncelikle etkin iç sürtünme açısı (δ) ve çıkıştaki büyük konsolidasyon gerilmesi (σ_1) değerleri belirlenir. Böylelikle, σ_1 noktasından geçen ve etkin akma sınırı hattına teğet olan Mohr yarı-çemberi çizimi sağlanır (Şekil 3.11). WYL' nin Mohr çemberiyle kesiştiği (V' , S') noktası belirlenir ve ϕ' bu noktadan ve orijinden geçen düz bir doğru çizilerek bulunur [4] :

$$\frac{S'}{V'} = \tan \phi' \quad (3.13)$$



Şekil 3.11: Duvar akma sınırı hattı (WYL) [4]

Eksenel olarak simetrik (konik), düzlem-akış (dikdörtgen) kanallar için, her iki duvar tarafındaki σ_1 değerini aynı kabul etmek daha pratiktir. Eğer iki taraftaki duvar da aynı malzemeden yapılmışsa, ϕ' her ikisi için de aynıdır. İki farklı duvar malzemesi kullanılmışsa, iki ayrı testle iki adet duvar akma sınırı hattı çizilir ve iki farklı ϕ' değeri belirlenir [4].

3.3.5 Büyük Konsolidasyon Gerilmesi

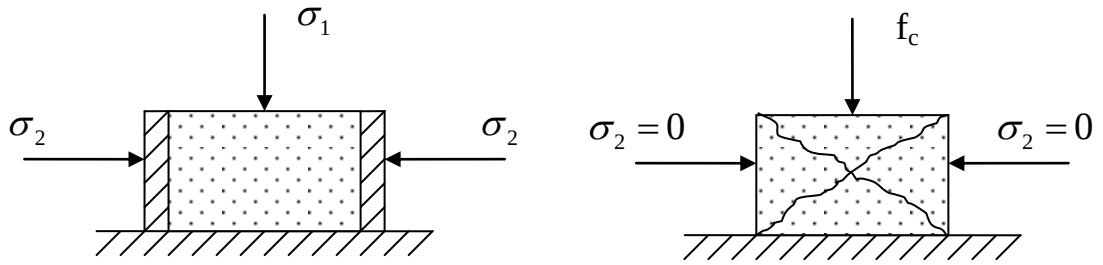
Kararlı hal akışındaki büyük esas gerilme büyük konsolidasyon gerilmesi (σ_1) olarak adlandırılır. Kritik konsolidasyon durumunda etkiyen büyük konsolidasyon gerilmesi, kesme testlerinde konsolidasyon durumlarını belirten (σ_c , τ_c) noktasından geçen Mohr çemberinin (kararlı hal Mohr çemberi) çizilmesiyle bulunur (Şekil 3.9). Çember, akma sınırı hattına teğettir ve çemberin normal gerilme eksenine kesişimi σ_1 değerini verir [7, 18].

3.3.6 Sınırlanmamış Akma Sınırı Gerilmesi

Sınırlanmamış akma sınırı gerilmesi (σ_c , f_c) bir kanal ağzındaki tıkanmayı (oluşan kemerin, kubbenin kuvvetini) belirler. Akıştaki bir tıkanma ortadan kalktığında, kırılma, tıkanmaya maruz kalan yüzeyden başlar ve yüzeyden katı kütlenin içerisine doğru yayılır. Bu yüzden, kırılma esnasında yüzeydeki gerilme durumlarının çok iyi bilinmesine gerek yoktur. Zaten bir katının serbest yüzeyine etkiyen küçük gerilme yüzeye diktir ve sıfıra eşittir. Bu yüzden, katının destekleyebileceği yüzeye teğet yöndeki en büyük gerilme bir esas gerilmedir. Bu gerilme, katının akmasına neden olduğunda, sınırlanmamış akma sınırı gerilmesi olarak anılır [4, 7].

Kırılma esnasında Mohr çemberi akma sınırı hattına teğettir. Bir katının akma sınırı hattı bilindiğinde; f_c , akma sınırı hattına teğet ve orijinden geçen ($\sigma=\tau=0$) bir Mohr çemberi (sınırlanmamış akma kuvveti Mohr çemberi) çizilerek bulunabilir (Şekil 3.9). Konsolidasyon gerilmesinin her bir değerine karşılık gelen bir f_c değeri vardır, konsolidasyon gerilmesi arttıkça f_c değeri de artar. Katı yığınların akışı konsolidasyon sırasında meydana gelen kuvvete bağlıdır ve f_c bu kuvvetin bir ölçüsü olduğundan yüksek bir f_c değeri akışın zor olacağına işaret eder (Malzemenin akış sırasında tıkanma olasılığı yüksektir). Kusursuz akan bir katının sınırlanmamış akma gerilmesi sıfıra eşit olacaktır [7].

Sınırlanmamış akma gerilmesi, en basit tanımıyla serbest ve gerilim altında olmayan bir yüzeye sahip katının akacağı veya deforme olacağı maksimum normal gerilme değeridir. Katının bu özelliğinin en basit ölçülme yöntemi Şekil 3.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: f_c değerinin ölçülmesi [19]

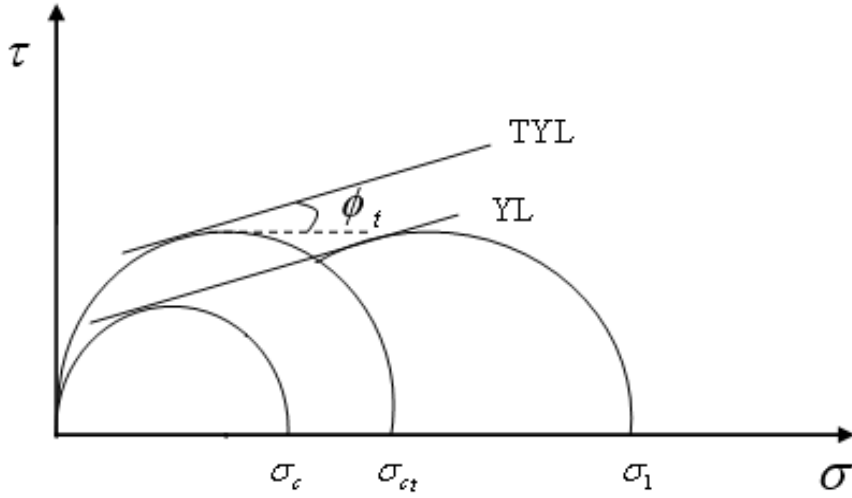
Bu yöntemde; numune, duvarları sürtünmesiz silindirik bir kabın içine doldurulur ve normal bir gerilme (σ_1) altında sıkıştırılır. Daha sonra, bu normal gerilme uygulanmaz ve kabın yan duvarları serbest malzeme yüzeyi sağlamak üzere kaldırılır. Numune, kırılma noktasına kadar artan normal gerilme değerleriyle tekrar sıkıştırılır. İşte bu kırılma anındaki gerilme sınırlanmamış akma gerilmesidir. Bu deney artan σ_1 değerleri için defalarca tekrarlanır ve her σ_1 değerindeki f_c değerleri ölçülür [19].

3.3.7 Zaman Etkili Akma Sınırı Hattı

Eğer bir katı yığının bir kanaldaki akışı belirli bir süre boyunca kesilirse, akış sırasında katıya etki eden σ_1 , σ_2 gerilmelerinin bu süre boyunca aynı kaldığı kabul edilir. Bu gerilmeler, daha büyük akma kuvveti sağlayarak katıyı konsolide etmek

eğilimindedirler. Kuvvetteki bu artış Jenike kesme hücresinde ölçülebilir ve bu etki zaman konsolidasyonu olarak adlandırılır [4, 17].

Zaman konsolidasyonu sonucunda kuvvet kazanan çoğunlukla kohesif özellikteki malzemelerle daha yüksek kesme kuvveti değerleri ölçülecektir. Bu durum, σ - τ diyagramında zaman etkisiyle oluşan akma sınırı hattının (TYL) anlık akıştaki akma sınırı hattının üzerinde olduğu Şekil 3.13’ de gösterilmiştir. Buna göre, konsolidasyon gerilmesinin (σ_1) belli bir süre uygulanması sınırlanmamış akma sınırı gerilmesini σ_c değerinden σ_{ct} değerine arttırır. Bir katı, hareketsiz haldeyken zaman etkisiyle kuvvet kazandıkça ve sınırlanmamış akma kuvveti arttıkça katı, akışa engel durumları daha fazla destekler ve böylece katının akışı daha zor olur. ϕ_t , zaman etkisi altındaki katının statik iç sürtünme açısıdır ve akma sınırı hattının σ_{ct} değerinden geçen Mohr çemberine teğet olduğu noktadaki eğimi ile belirlenir [4, 12, 17]. Bundan başka, zaman etkisini belirtmek amacıyla anlık akış için olan bütün akış parametreleri t-alt indisi ile beraber gösterilirler.



Şekil 3.13: Bir katı yığının zaman etkisiyle oluşan akma sınırı hattı (TYL) [4]

Zaman testleri, genel olarak kararlı hal akışı sağlanmış olan numunenin bu durumda belirli bir süre boyunca belirli bir yük altında (σ_1 gerilmesine karşılık gelecek şekilde) tutulması ve daha sonra gerçek kesme testinin alışılmış şekilde yapılmasıyla gerçekleştirilir. Zaman etkisi belirlenmek istendiğinde, bir test kesme hücresini uzun bir müddet meşgul edecektir. Bu yüzden, zaman testleri birçok kesme hücresinin birbirinden bağımsız olarak yüklendiği konsolidasyon tezgahlarında yürütülür. Numunenin buharlaşması ve nem almasının engellenmesi için de her hücrenin üzeri

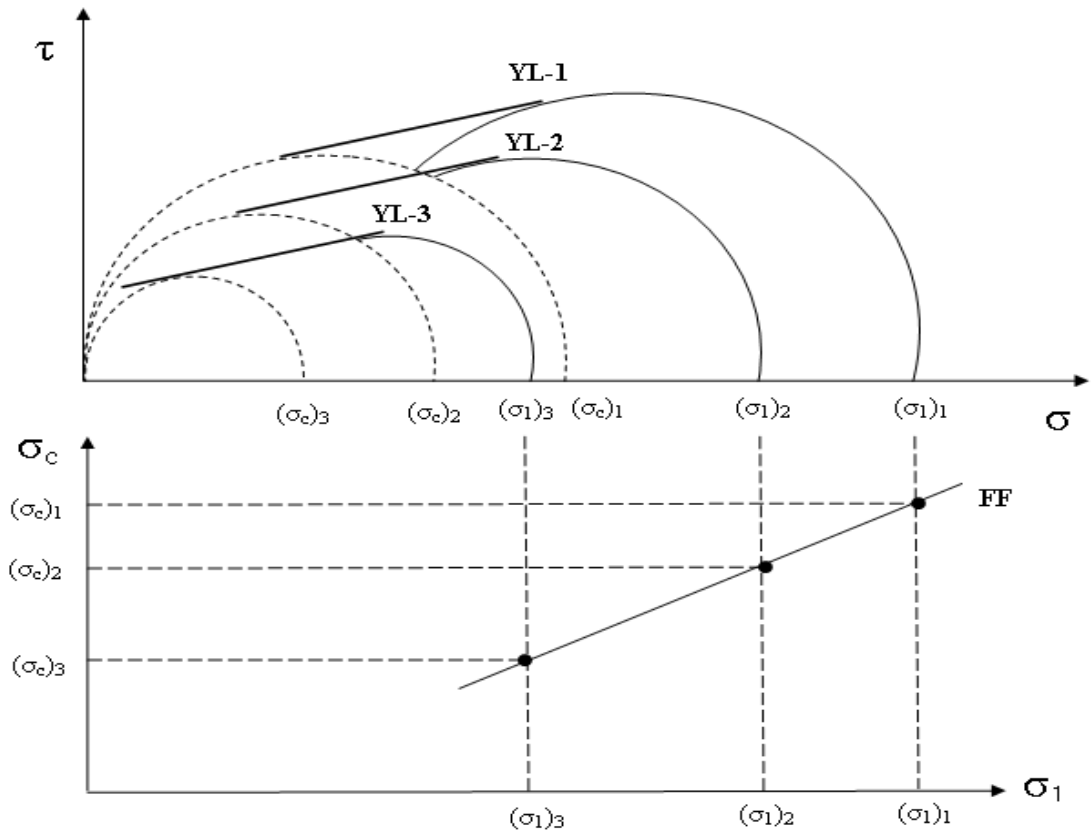
esnek bir kapak ile kapatılır ve hücreler daha sonra doğrudan doğruya veya bir yükleme çubuğu kullanılarak ağırlıklarla yüklenir [17].

3.3.8 Akış Fonksiyonu

Akış fonksiyonu (Flow Function-FF) bir katı yığının akış yeteneğini karakterize eder. Katının akış yeteneği konsolidasyon sonucu oluşan kuvvete bağlıdır. Sınırlanmamış akma gerilmesi, bu kuvvetin bir ölçüsüdür ve büyük konsolidasyon gerilmesinin bir fonksiyonudur.

$$\sigma_c = FF(\sigma_1) \quad (3.14)$$

Farklı konsolidasyon seviyelerine karşılık gelen her akma sınırı hattı için, σ_c ve σ_1 değerleri daha önce de anlatıldığı gibi Mohr çemberleri çizilerek elde edilir. Akış fonksiyonu daha sonra σ_1 değerlerine karşılık σ_c değerlerinin çizilmesiyle Şekil 3.14' de gösterildiği gibi elde edilir [12].

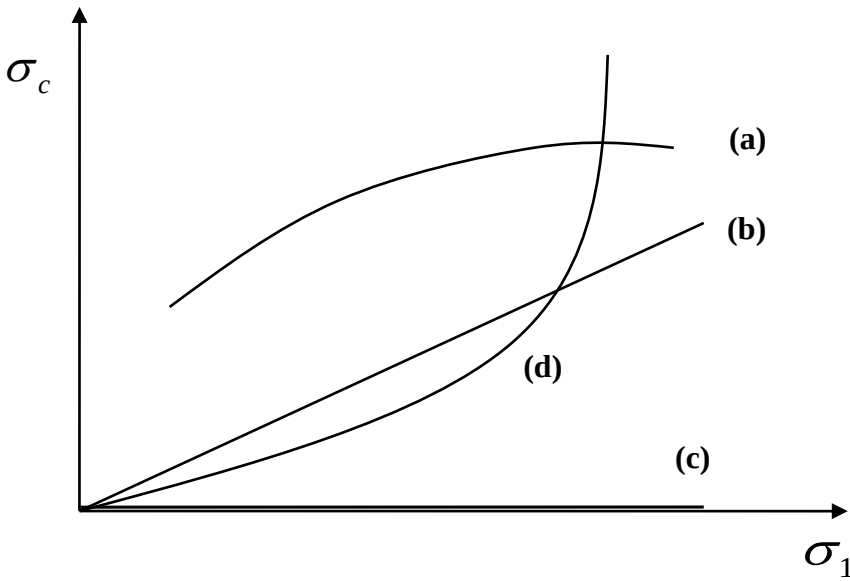


Şekil 3.14: Akış fonksiyonu (FF) [12]

Katı yığınlar için çeşitli şekillerdeki akış fonksiyonları Şekil 3.15' de gösterilmiştir. Birçok kohesif katı konsolidasyon basıncı arttıkça sınırlı bir kuvvete ulaşırlar, akış fonksiyonları şekilde gösterildiği gibi yukarı doğru dışbükeydir (a). Basit katı

yığınların farklı konsolidasyon basınçları boyunca lineer bir akış fonksiyonu vardır (b). Serbest akışlı katılar ise sıfır kuvvete sahiptirler ve akış fonksiyonları yatay eksenle çakışır (c). Bazen, kuvvetin konsolidasyon basıncıyla lineer olmayan bir biçimde arttığı katılarla da karşılaşılır (d). Bu tipteki katılar düşük konsolidasyon basınçları altında serbest akışlı olurlarken, basınç arttıkça kekleşme ve birbirlerine yapışma eğilimindedirler. Bu özellikleri gösteren tipik bir malzeme amonyum nitrat pirilidir, bu gibi katıları idare etmek çok zordur [12].

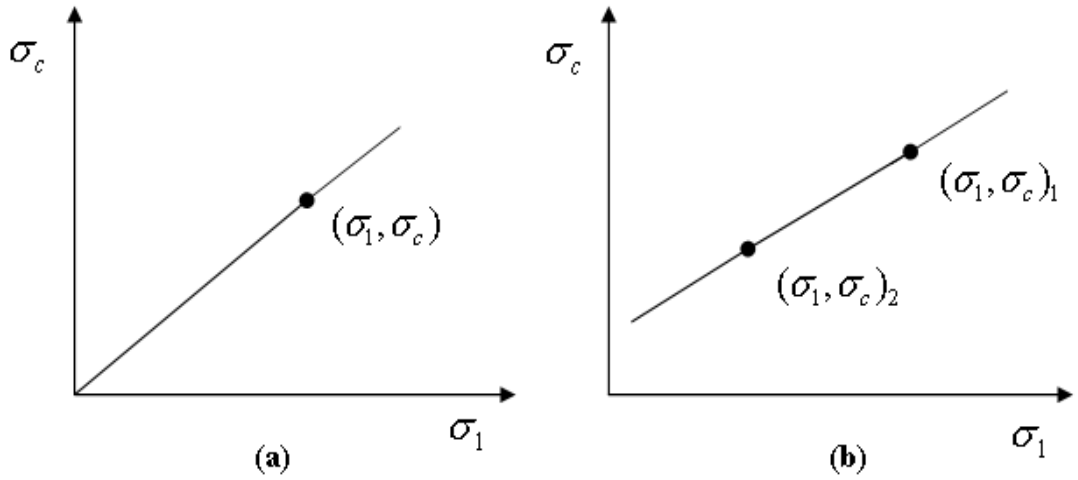
Birçok katı malzemenin akış fonksiyonu için düz bir doğru yaklaşımı yapılabilmektedir [20, 21].



Şekil 3.15: Katı yığınlar için çeşitli akış fonksiyonları [12]

Bir adet σ_1 - σ_c çifti akış fonksiyonu çizimi üzerinde bir noktayı belirler. Islatıcı bir sıvının yokluğunda, konsolide olmamış durumda katının kuvveti yoktur ve akış fonksiyonu orijinden geçer ($\sigma_1 = \sigma_c = 0$). Bu durumda akış fonksiyonu sadece tek bir nokta (σ_1, σ_c) yardımıyla düz bir doğru yaklaşımı yapılarak çizilebilir (Şekil 3.16a).

Islatıcı bir sıvı varlığında ise, testler farklı bir değer için tekrarlanır ve elde edilen yeni $(\sigma_1, \sigma_c)_2$ noktası da kullanılarak iki noktadan düz bir doğru geçirmek suretiyle akış fonksiyonu belirlenir (Şekil 3.16b). Bu şekilde sadece iki nokta yardımıyla elde edilen doğrular serbest akışlı olmayan katıların belirlenmesinde genellikle yeterlidir. Bununla birlikte, akış fonksiyonlarını daha büyük bir doğrulukla belirlemek isteniyorsa da, ilave noktalar aynı şekilde elde edilirler [4].



Şekil 3.16: Islatıcı sıvı varlığına göre akış fonksiyonu eldesi [4]

3.3.9 Katıların Akabilirliğinin Genel Sınıflandırılması

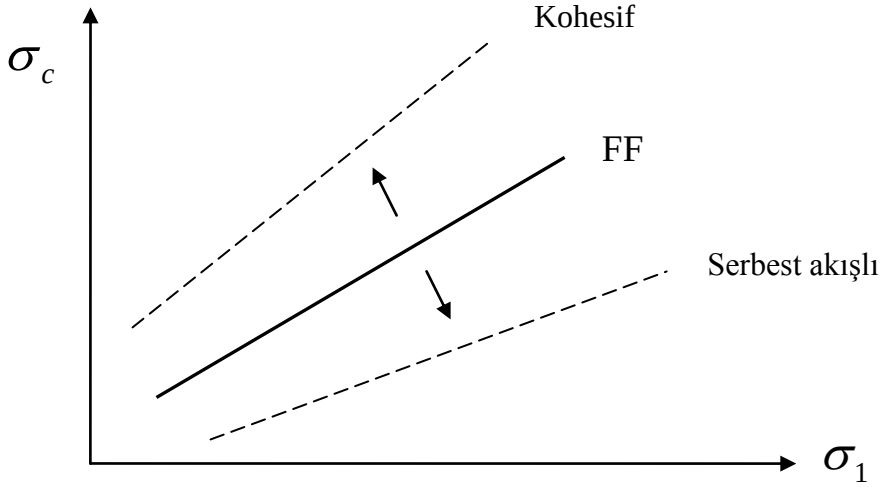
Katıların akabilirliği akış fonksiyonlarının eğim değerlerine (σ_c/σ_1 oranı = FF) bakılarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma Tablo 3.1’ de verilmiştir. Bu sınıflandırmanın yanı sıra Fitzpatrick ve ç.a. [21] yapmış oldukları çalışmada katı gıda ürünlerinin akabilirliklerine göre sınıflandırılmasını akış indeksine göre de yapılabileceğini göstermişlerdir. Akış indeksi (ff_c), akış fonksiyonunun tersi olup ($1/FF$), yüksek değerleri (>10) katının serbest akışlı olduğuna işarettir. Akış indeksine göre olan sınıflandırma da Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1: Katıların akabilirliğinin akış fonksiyonlarına göre sınıflandırılması [8, 21]

Değer Aralığı	Akış İndeksi (ff_c)	Sınıflandırma
$\frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 0.1$	> 10	Serbest akışlı
$0.1 < \frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 0.25$	< 10	Kolay akışlı
$0.25 < \frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 0.625$	< 4	Kohesif
$\frac{\sigma_c}{\sigma_1} > 0.625$	< 2	Çok kohesif ve akmayan

Çizilmiş olan akış fonksiyonu grafiğine göre katı malzemenin kohesifliği artan eğim değerleriyle artış gösterirken, eğim değerlerinin azalması katının daha rahat akacağına işarettir (Şekil 3.17). En üstteki doğru katı malzemenin en yüksek kuvvete sahip olduğunu ve akışa engel durumları daha fazla desteklediğini gösterir, malzemenin akışı zordur. Şekil 3.17’ deki farklı eğimlerdeki akış fonksiyonları farklı

malzemelere ait olabilirlerken farklı nem oranlarındaki aynı katıyı da temsil edebilirler.



Şekil 3.17: Akış fonksiyonunun eğimine göre katı özelliği

3.3.10 Tanecik Boyutu

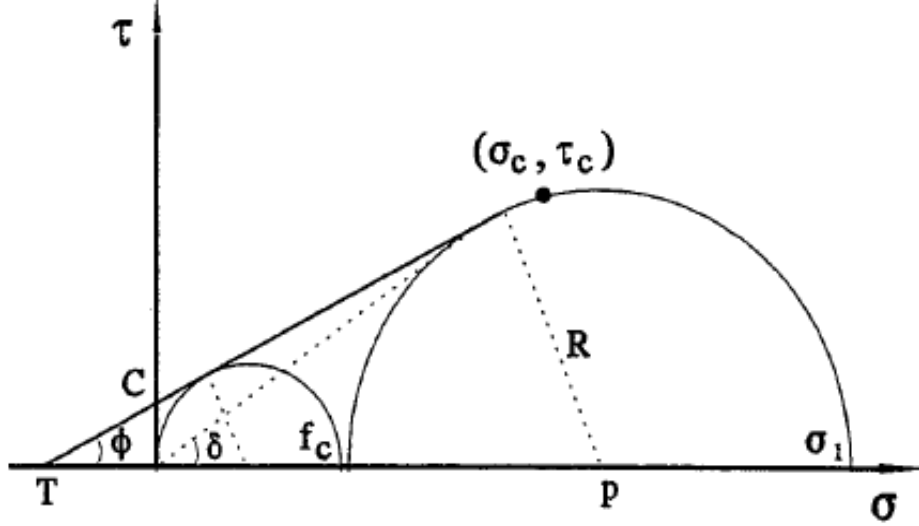
Genel bir kural olarak, 0.254 mm’ den küçük tanecik içermeyen katılar serbest akışlıdırlar. Bu kurala uymayan katılar da mevcuttur. Mesela, tahıl mayaları ters rutubet ve atmosferik koşullarında serbest akış özelliklerini kaybedecek derecede kuvvet kazanırlar. Soya unu yüksek rutubet ve sıcaklıkta yağ içerir ve tanecikleri birbirine yapışarak akmayan bir kütle oluşturur. Tahta talaşı, mika, asbest gibi ince ve lifli malzemeler birbirine bağlanarak akışta tıkanmalar oluştururlar. Birçok maden filizi, kömür, vs. genel kurala uyarlar.

Katılar değişik elek boyutlarında hem ince hem de iri tanecikleri içerebilirler, fakat katıların akabilirliğinde her zaman katının içindeki ince fraksiyonun akış özellikleri etkilidir. Bu durum, akış sırasında kesmenin ince tanecikler üzerinden meydana geldiği gerçeğiyle açıklanabilir. Bu işlemde iri parçacıklar pasif bir etkendirler. Bununla birlikte, iri parçacıkların boyutu kanalın çıkışında akışın tıkanma eğilimini etkileyecektir. Siloya doldurulan ağır ve iri parçacıklar aşağıya hareket eden akım boyunca katının sıkıca bir araya gelmesine neden olabilirler [4].

3.3.11 Akış Parametrelerinin Analitik Yöntemle Belirlenmesi

Eğer akma sınırı hattı için düz bir doğru yaklaşımı ($\tau = \tan\phi\sigma + C$) yapılırsa, iç sürtünme açısı (ϕ) bu doğrunun yatay eksenle yapmış olduğu açıya eşdeğerdir. Akış

parametrelerinin bulunması için Mohr çemberlerinin çizilmesi gereklidir. Bu Mohr çemberleri Şekil 3.18’ deki geometriden analitik bir yöntem kullanılarak belirlenebilirler.



Şekil 3.18: Bir katının akış parametrelerinin belirlenmesi amacıyla sonuçların uygun geometrik gösterimi [7]

Bazı cebirsel işlemlerden sonra (EK-A) büyük Mohr çemberinin merkezi (p) için ikinci dereceden bir denklem elde edilir:

$$p^2 \cos^2 \phi - (2\sigma_c + 2C \sin \phi \cos \phi)p - C^2 \cos^2 \phi + \sigma_c^2 + \tau_c^2 = 0 \quad (3.15)$$

Bu denklem, p için çözülüp küçük kök değeri alınırsa, R (büyük çemberin yarıçapı) ve σ_1 şu eşitliklerden hesaplanır:

$$R = p \sin \phi + C \cos \phi \quad (3.16)$$

$$\sigma_1 = p + R \quad (3.17)$$

Şekil 3.18’ den, etkin iç sürtünme açısı;

$$\delta = \sin^{-1}(R/p) \quad (3.18)$$

Son olarak, sınırlandırılmamış akma sınırı gerilmesi;

$$f_c(\sigma_c) = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.19)$$

olarak verilir. Çözümün geçerli olabilmesi için (σ_c, τ_c) noktasının çizilmiş olan regresyon çizgisinin altında kalması gerekmektedir. Diğer durumda, Mohr çemberi belirsizdir ve (3.15) numaralı denklemin çözümü karmaşıktır [7].

3.4 Katı Yığınların Akış Özelliklerinin Belirlenmesi

3.4.1 Kesme Testi

Bir malzeme kütlesi üzerindeki birleşik kesme ve normal gerilmeleri malzemenin akma sınırı limitini aştığında kırılma meydana gelir. Bu kırılma, katı kütlesi içindeki bir kırılma düzlemi boyunca kesme halinde meydana geldiğinden dolayı katılardaki bu kesme kırılmasını belirlemek önemlidir. Bu durum deneysel olarak farklı yükler altında tespit edilebilir ve bu deneysel yöntem kesme testleri olarak adlandırılır. Bu testlerden elde edilen sonuçlara göre katı malzemelerin bazı akış özelliklerine geçilir [22].

Katı yığınların bütün akış özellikleri kesme testleri sonucu elde edilen çeşitli akma sınırı hatlarına dayanır. Bu testler genel olarak test edilecek numunenin kritik bir duruma getirildiği konsolidasyon ve sonrasında da kesme aşamalarını içerir. Kesme testleri sonucunda bir katı yığının akma sınırı hattıyla beraber iç sürtünme açısı ve kohezyonu, etkin akma sınırı hattı ve etkin iç sürtünme açısı, büyük konsolidasyon gerilmesi, sınırlanmamış akma gerilmesi, akış fonksiyonu, bir duvar malzemesi üzerindeki duvar akma sınırı hattı ve kinematik veya statik duvar sürtünme açıları belirlenebilmektedir [8, 12, 23].

3.4.2 Kesme Test Cihazları

Katı yığınları depolamak ve nakletmek için emniyetli aygıtlar tasarlanırken, katıların akış özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Katı yığınların yukarıda sayılan özelliklerinin belirlenmesi kesme testlerinin uygulandığı kesme test cihazlarıyla mümkün olabilmektedir [18].

Akış özelliklerini ölçmede kullanılan çok çeşitli kesme test cihazları vardır. Akış özellikleri doğrudan doğruya lineer veya rotasyonel tipteki kesme test cihazlarıyla veya dolaylı olarak da 2 veya 3-eksenli hücreleri kullanarak elde edilebilir. Doğrudan kesme test cihazlarında tek bir yönde gerilim uygulanır, esas gerilmenin yönü sabittir ve test sırasında değişmez. Jenike test cihazı bu test cihazlarına bir örnektir [12, 23].

Bu test cihazları üzerindeki araştırmalar ve gelişmeler iki şey göz önünde bulundurularak yapılır. Bir taraftan, katı yığınların davranışının ne olduğu hakkındaki mevcut bilgiyi arttırmak amacıyla 2 ve 3-eksenli kesme test cihazları gibi çok özel cihazlar denenmiştir. Diğer taraftan ise, silo tasarımı gibi pratik

uygulamalarda kullanılan akış özelliklerinin basitçe ölçümünü sağlayan daha basit test cihazları (Jenike, halka kesme test cihazı, vs.) geliştirilmiştir [23].

Bütün test cihazlarının çalışma prensibi aynıdır. Sabit düşey bir yük numune üzerine uygulanırken yatay bir kuvvet de numuneyi bu yük altında kesme işlemine tabii tutmak için uygulanır. Test cihazları esasen yüklerin nasıl uygulandığına göre değişiklik gösterirler. Bir malzeme için farklı test cihazlarıyla yapılan ölçümlerin farklı olduğu söylenebilir. Ayrıca, bir kesme testinden elde edilen sonuçların kesme test cihazıyla birlikte kesme test yöntemine de bağlı olduğu gösterilmiştir [22, 23].

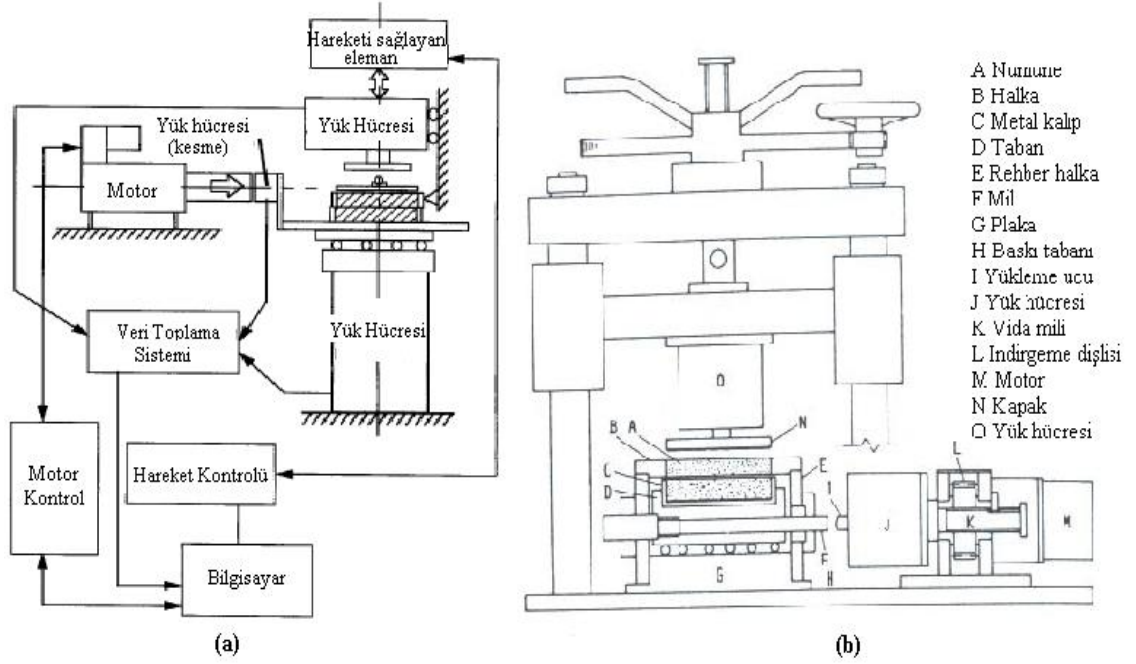
3.4.2.1 Doğrudan Kesme Test Cihazı

Bu tip kesme test cihazlarının en önemlisi ve yaygın olarak kullanılanı Jenike' nin [4, 8] geliştirmiş olduğu kesme testi cihazıdır. Bu cihaz başlıca; numunenin içerisine konulduğu bir kesme hücresinden, bu hücreye düşeyde ve yatayda kuvvet uygulayan bölümlerden meydana gelmiştir. Düşeydeki kuvvet statik olup ağırlıklarla uygulanırken yataydaki kuvvet (kesme kuvveti) bir motor yardımıyla uygulanır ve bu kuvveti ölçmek için sistemde uygun bir yük hücresi mevcuttur.

Jenike test cihazının tercih edilme nedenleri; endüstride yaygın olarak kullanılması ve test sonuçlarına göre bir malzemenin akabilirliğini tahmin etmede önemli bir parametre olan akış fonksiyonunun elde edilebilmesidir. Bunun yanı sıra dezavantajları; kesme hücresinin hareket mesafesinin sınırlı olması ve numune hazırlama ve numune için optimum bir konsolidasyon derecesi sağlamada belli seviyede bir uzmanlık gerektirmesidir. Bu seviyeye ulaşmak için de bayağı bir zamana ihtiyaç vardır. Sonuç olarak, bu cihaz zamanın kritik bir faktör olmadığı durumda ve malzemenin akış fonksiyonu gerektiğinde kullanılmalıdır [22].

Düşeyde ölü bir yükün uygulandığı Jenike test cihazına alternatif olarak Puri ve Ladipo [24, 25] düşeydeki yükün sürekli olarak azaldığı bilgisayar kontrollü bir test cihazı önermişlerdir (Şekil 3.19a). Düşeydeki kapağın hareketi otomatiktir ve herhangi bir müdahale söz konusu değildir. Üstteki halka sabitlenmiştir ve taban yatay olarak bilyeler üzerinde ileri-geri kaydırılmaktadır. Bu cihazda sabit yük tekniğinin uygulandığı Jenike test cihazından farklı olarak sabit hacim testi uygulanır ve bu tip test cihazları sabit hacimli test cihazları olarak da bilinirler. Bu cihazın avantajı dinamik akma sınırı hattının sadece bir test sonucunda elde edilebilmesidir. Başka yararları; ön-kesme işlemi sırasında kritik olarak konsolide edilmiş numuneyi

belirlerken uygulanan deneme-yanılma kademesinin elimine edilmesidir. Böylelikle, akış parametrelerini belirlemek için gerekli numune miktarı ve zaman azaltılmış olur [26].

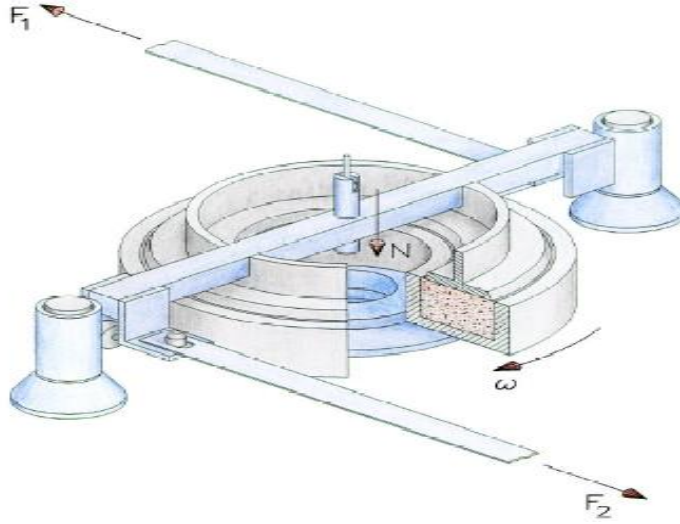


Şekil 3.19: Doğrudan kesme test cihazlarının şematik gösterimi [16, 24, 25]

Benzer şekilde Tsunakawa ve Aoki [17] sıkıştırılmalı yükleme yapan doğrudan bir kesme hücresi geliştirmişlerdir (Şekil 3.19b). Bu cihazla beraber malzemenin akma sınırı hattı yine bir kesme testi sonucunda sürekli bir çizgi olarak elde edilir.

3.4.2.2 Halka Kesme Test Cihazı

Katı yığınların yüksek kesme hızlarındaki kesme davranışları araştırılmıştır ve bunun için halka kesme test cihazları kullanılmıştır. Bu cihazlar katı numune ile doldurulmuş bir halka (Şekil 3.20) kullanırlar. Bu halka pürüzlü yüzeye sahip bir kapak ile örtülmüştür ve üzerine belli bir kuvvet (N) uygulanmaktadır. Kapak sabit açısal bir hızla (ω) döndürülmekte ve böylece numune kesmeye tabii tutulmaktadır. Jenike tipi kesme test cihazına ait hücrenin yataydaki hareketinin halka kalınlığıyla sınırlı olmasına karşılık burada hücre sınırsız harekete sahiptir (kesme mesafesi sınırlı değildir). Bu cihazda kapağı döndürmek için gerekli tork (dönme) kuvveti (F_1 - F_2) ölçülür. Jenike test cihazı gibi bu cihaz da doğrudan bir kesme test cihazıdır [12, 23, 27].



Şekil 3.20: Halka kesme test cihazına ait kesme hücresinin şematik gösterimi [27]

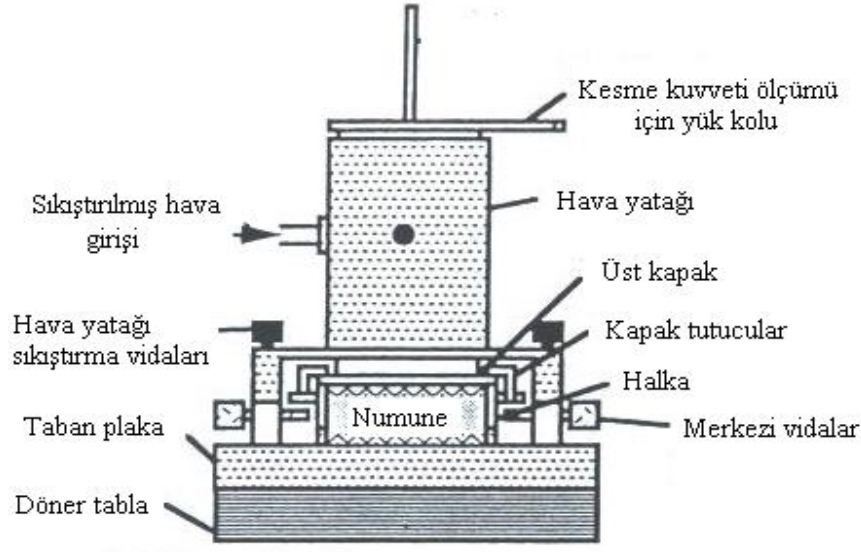
Halka kesme test cihazında, kesme hücresinin alt ve üst yarıları arasındaki boşlukta sıkışan taneciklerden dolayı hatalı ölçümler olabilmektedir. Rotasyonel hareketten dolayı kesme gerilmesi çapın bir fonksiyonudur, bu yüzden katı numunenin tüm bölgelerinde üniform değildir. Bu cihazlarla zaman testlerini gerçekleştirmek zordur [12].

3.4.2.3 Rotasyonel Kesme Test Cihazı

Bu cihaz, numunenin içine yerleştirildiği bir halkadan oluşmuştur. Halkanın tabanı belli bir devirde döndürülen tabla üzerine tutturulmuştur. Numuneyi örten kapak normal gerilmeyi uygulayan ve oluşan kesme gerilmesini yatay bir kol yardımıyla dağıtan silindirik bir mile bağlanmıştır. Kesme düzlemi tabanla halka arasında sınırlandırılmıştır. Kesme gerilmesi kapağın üzerindeki yatay koldan bir yük hücresine iletilir ve burada ölçülür. Cihaz, şematik olarak Şekil 3.21’ de gösterilmiştir [15, 22, 28].

Rotasyonel kesme hücresi, katı yığınların akış özelliklerinin ölçülmesini kolaylaştırma çabası içinde tasarlanmıştır. Piyasada olmalarına rağmen bu cihazlar henüz yaygın kullanıma sahip değildir. Test sonuçları şeker gibi sadece iri, serbest akışlı malzemeler için elde edilmiştir. Bu cihazın avantajları; akma sınırı hattının çok çabuk elde edilmesi, testlerin kolay ve sonuçların tekrarlanabilirliğinin olması, her test numunesinin akma sınırı hattı üzerinde birçok noktayı elde etmede kullanılabilmesi ve akış fonksiyonunun elde edilebilmesidir. Sonuç olarak, bu

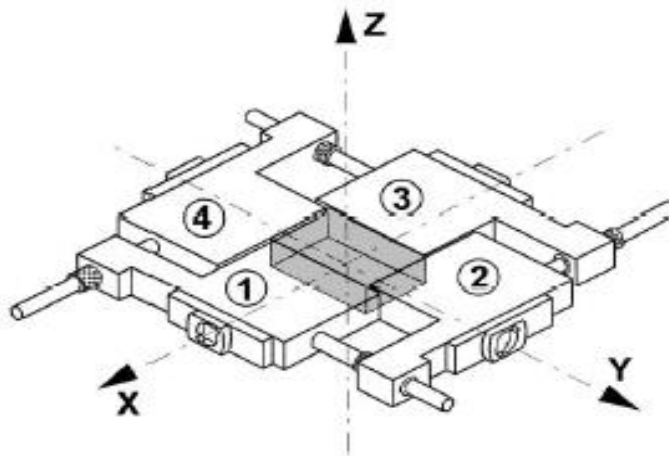
cihazlar sonuçlar çabuk bir biçimde gerektiğinde ve akış fonksiyonu elde edilmek istendiğinde kullanılırlar [22].



Şekil 3.21: Rotasyonel kesme test cihazının şematik gösterimi [22]

3.4.2.4 İki-eksenli Kesme Test Cihazı

İki-eksenli kesme test cihazına ait hücre şematik olarak Şekil 3.22’ de gösterilmiştir. Numuneye yanal x ve y yönlerinde 4 adet çelik plaka tarafından baskı yapılır. Numunenin düşey deformasyonu alttaki ve üstteki plakalarla sınırlandırılır. Numune deforme olurken, x ve y yönlerindeki gerilmeler (σ_x , σ_y) birbirlerinden bağımsız olarak uygulanabilirler. Plakalar ve numune arasındaki sürtünmeyi önlemek için plakalar ince lastik bir membranla kaplanırlar. Numunenin sınır yüzeylerinde kesme gerilmeleri olmadığından dolayı σ_x ve σ_y esas gerilmelerdir [23].



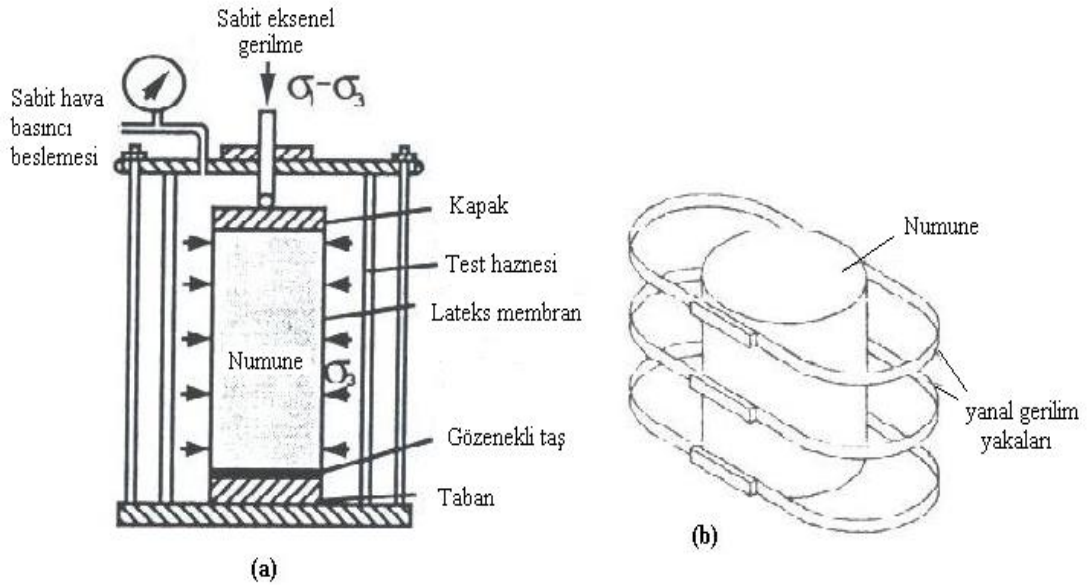
Şekil 3.22: İki-eksenli kesme test cihazına ait hücrenin şematik görünümü [29]

Bu cihaz mevcut test cihazlarıyla elde edilemeyen malzemenin gerilme/gerginlik (“stres/strain”) bilgisini sağlamaya yardım eder, her ikisinin de ölçümü mümkündür. Bu aşamada iki-eksenli test cihazı, katı yığınları için ekipman tasarımı uygulamalarında temel teşkil eden akış özelliklerinin belirlenmesine yarayan cihazlardan daha karmaşık bir araştırma konusu olarak ortaya çıkar [12, 23].

3.4.2.5 Üç-eksenli Kesme Test Cihazı

Bu test cihazı ilk olarak toprak gibi büyük tanecikler içeren numuneleri yüksek gerilme değerlerinde test etmek için kullanılmıştır. Daha sonraları üç-eksenli hücreler tozlarla düşük gerilme değerlerinde de ölçüm yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu hücreler ayrıca tarımsal ürünlerin özelliklerinin belirlenmesinde de kullanılırlar [12, 22, 23].

Üç-eksenli test cihazı prensip olarak çok basit bir cihazdır ve şematik olarak Şekil 3.23a’ da gösterilmiştir. Eksenel bir gerilme, malzemenin etrafı ince elastik bir membranla çevrilmiş silindirik bir numunesine uygulanır. Numune düşey yönde alt ve üst plakalar tarafından tutulur. Yanal yöndeki basınç, sıkıştırılmış bir hava kaynağından basınç haznesinde sınırlı bir şekilde uygulanır. Eksenel yük, üstteki plakaya tutturulmuş pistonun belirli bir hızdaki hareketiyle sağlanır ve numunenin kırılma anına kadar uygulanır. Bu yük, basınç haznesinin dışındaki bir yük hücresiyle ölçülür [22, 23].



Şekil 3.23: Üç-eksenli hücrenin şematik gösterimi [22, 23]

Numunenin yanal gerilimi numunenin alt, orta ve üst kısımlarıyla temasta olan 3 adet yanal gerilim yakalarıyla (collar) ölçülür (Şekil 3.23b). 3 yaka, yanal gerilimin farklı yüksekliklerde ölçülmesine olanak sağlar ve böylece gerilim durumları için daha doğru bir bilgi elde edilebilir [23].

Bu cihazın avantajları; test sonuçlarının tekrarlanabilirliğinin olması ve birçok malzemenin test edilmesinde kullanıldığı için yayınlanmış sonuçların olmasıdır. Dezavantajları; numune hazırlama ve test süresinin uzun ve zahmetli olması, her test yeni bir membrana gereksinim duyduğundan maliyetinin fazla olması, numunenin üniform olarak doldurulmasının zor olması ve malzemenin akış fonksiyonunun elde edilememesidir. Sonuç olarak bu cihazlar zamanın ve maliyetin kritik faktörler olmadığı zaman ve malzemenin gerilme-gerginlik davranışını araştırılmak istendiğinde kullanılırlar [22].

4. SİLOLARDA DEPOLANMIŞ KATI YIĞINLARIN AKIŞI VE SİLO TASARIMI

4.1 Katı Yığın Akışındaki Sorunlar

Aşağıda sıralanan genel akış problemleri ürün kalitesini (ürün kaybı, bozulması, vs.) olumsuz etkilediği gibi yapısal zararlara, kişisel sakatlanmalara ve zaman ve para kaybına da neden olmaktadır. Örneğin; gıda sanayinde, katı bir malzeme böcek istilasına sebebiyet verecek şekilde bozulacaktır. Kömür işleme sanayinde, kazanları besleyen silolarda hareket etmeyen kömür orada kaldığı müddetçe kendiliğinden yanmaya oldukça yatkındır. Bu yüzden, birçok firma patlamalara neden olabilecek yangın problemlerinden endişe duymaktadır [6].

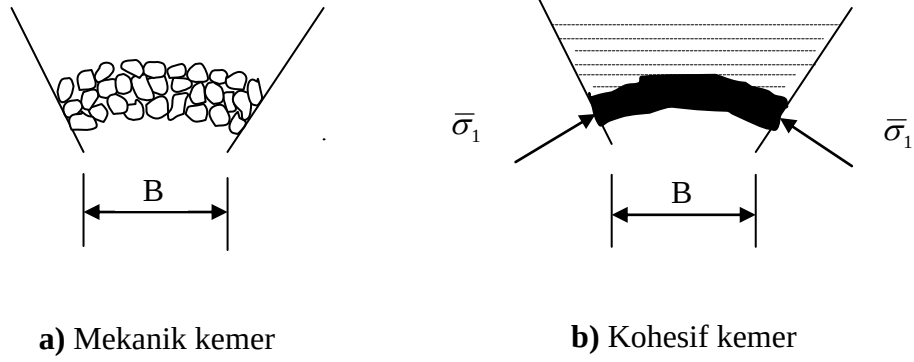
4.1.1 Kemerlenme

Bir silonun çıkışında sabit bir kemer oluşuyorsa, oluşan kemer, üzerindeki malzemenin ağırlığını destekleyecek yeterli kuvvete sahip demektir ve bu durumda akış yoktur. Akışın yeniden gerçekleşmesi için kemer uygun bir yöntemle kırılmalıdır. Genellikle vibratör, balyoz, vs. gibi ekipmanlar kemeri kırmak için kullanılırlar. Vibratörler kemeri daha da güçlendirme eğilimindedirler, çünkü birçok durumda kemerin sıkışmasına yardım ederler [4, 6].

Bir katı yığının bir çıkış açıklığı boyunca sabit bir kemer oluşturma eğiliminin ana nedenleri; katıda çok ince taneciklerin bulunması ve katının nem miktarıdır. Her ikisi de katı taneciklerinin birbirlerine yapışma eğilimini arttırırlar. Depolama esnasındaki sıkışma da katının kuvvetini arttırır ve sonucunda akış durumu kötüleşir [3].

Bir açıklıkta iki tip sabit kemer oluşumu söz konusudur. Bunlardan bir tanesi çıkış açıklığına göre büyük boyuttaki taneciklerin kenetlenmesi sonucunda oluşan “mekanik kemer” dir (Şekil 4.1a). Mekanik bir kemerin oluşumunu engellemek için çıkış boyutu maksimum tanecik boyutunun en az 10 katı olmalıdır. “Kohesif kemer” (Şekil 4.1b) oluşumu ise çok ince tanecik boyutuna sahip malzemelerde gözlenir ve malzemenin konsolidasyonu sonucu meydana geldiğinden tahmin etmek daha zordur. Serbest akışlı malzemelerin (kuru kum, vb.) sınırlanmamış akma gerilmesi

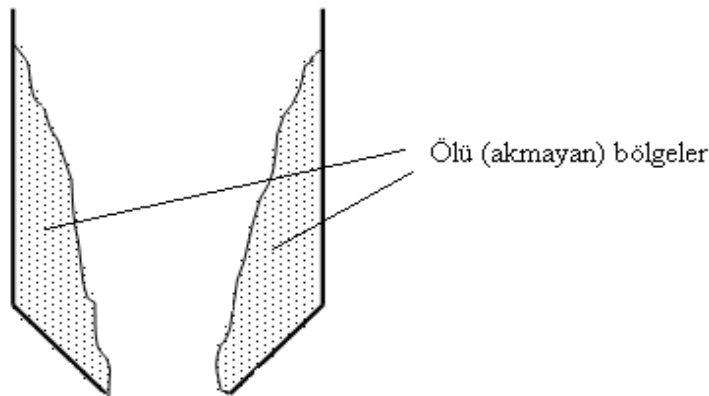
sıfırdır, o yüzden bu malzemelerle kohesif bir kemer oluşmaz. Kohesif kemer oluşumu da kütle akış silolarında çıkış boyutunun yeterince büyük olması sağlanarak engellenebilir [3].



Şekil 4.1: Silo çıkışında kemer oluşumu [3]

4.1.2 Kanallanma

Silodaki malzemenin bir kısmı merkezde akarken, geri kalan malzeme silo duvarları boyunca hareketsiz kalır ve ölü bölgeler oluşur. Huni akışta gözlenen bu durum kanallanma (ratholing) diye adlandırılır ve siloda kanal oluşumu Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Buna neden, katı yığının sınırlanmamış akma sınırı kuvvetidir. Eğer katı, artan depolama sürelerinde konsolidasyona maruz kalıyorsa, kanallanma riski de artar. Eğer huni akışlı bir silo düzenli zaman aralıklarında tamamıyla boşaltılmazsa, silodaki bekleme süresi çok uzun olur ve bu da konsolidasyon etkisini fazlalaştırır [6, 14].



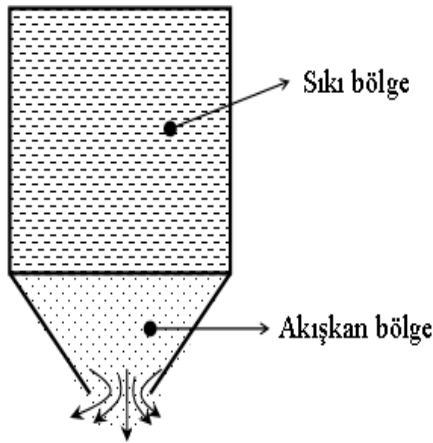
Şekil 4.2: Siloda kanal (rathole) oluşumu [6]

Siloya daha sonra doldurulan malzeme, silonun ölü bölgelerinde bulunan malzemeden daha önce boşalacağı için alıkonma sürelerinde farklılıklar olacaktır ve

ürünlerin zamanla özellikleri değişecektir; bu da birçok durumda bir dezavantaj teşkil edecektir [6].

4.1.3 Düzensiz Akış

Kemerlerin ve kanalların sıra ile oluşumu ve çökmeleriyle düzenli olmayan bir akış meydana gelir. Bu durum, silonun bütünlüğünü bozacak şekilde sarsılmalara ve hasarlara sebebiyet verir, yapısal hatalara ve muhtemel sakatlanma ve ölümlere yol açar.



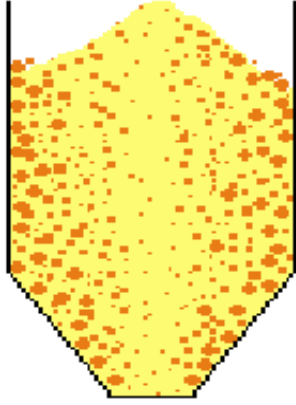
Şekil 4.3: Düzensiz akış (Taşma- Flooding) [6]

İnce taneli katı yığınlar silo çıkışına doğru akarlarken bir sıvı gibi davranabilirler (taşma). Şekil 4.3’ de silonun yakınsayan kısmında oluşan akışkan bölge ve silonun çıkışındaki düzensiz akış gösterilmiştir. Bu durum, bir kanalın çökmesi ile birlikte malzemenin basınç altında açık kanala doğru hareketiyle meydana gelir. Böylece yüksek miktarda toz çıkışı olur ve sürekli bir akış olanaksızdır [6, 14].

4.1.4 Taneciklerin Ayırışması (Segregasyon)

Katı taneciklerin siloya doldurulması sırasında tanecik boyutu ve yoğunluğuna göre ayrışma eğilimleri vardır. Büyük tanecikler silo duvarlarına yakın yerlerde birikirlerken, ince ve küçük tanecikler silonun merkezinde toplanırlar. Silodaki bu durum Şekil 4.4’ de gösterilmiştir. Huni akış durumunda, ilk olarak merkeze yakın olan ince tanecikler silodan boşalırlarken, büyük tanecikler en son boşalırlar. Böyle bir silo kullanılması durumunda tutarlılığın gerekli olduğu bir proseste, örneğin bir paketleme işleminde, farklı tanecik boyut dağılımları gözlenecektir. Bu da kalite kontrolünü neredeyse imkânsız kılmaktadır. Kütle akışında ise; katı başlangıçta aynı

şekilde ayrışacaktır, ancak siloda yukarıdan aşağıya doğru aktıkça tekrar karışacaktır. Bu yüzden, kütle akışta ayrışmanın etkisi belirtildiği gibi önemli bir ölçüde azaltılmış olur [14].



Şekil 4.4: Katı taneciklerin ayrışması (Segregasyon) [14]

Huni akışlı bir siloda, belirtilen bütün bu problemler genellikle meydana gelirken, iyi tasarlanmış kütle akışa sahip bir siloda sadece kemerlenme problemi göz önünde bulundurulur [14].

4.2 Silolardaki Akış Modelleri

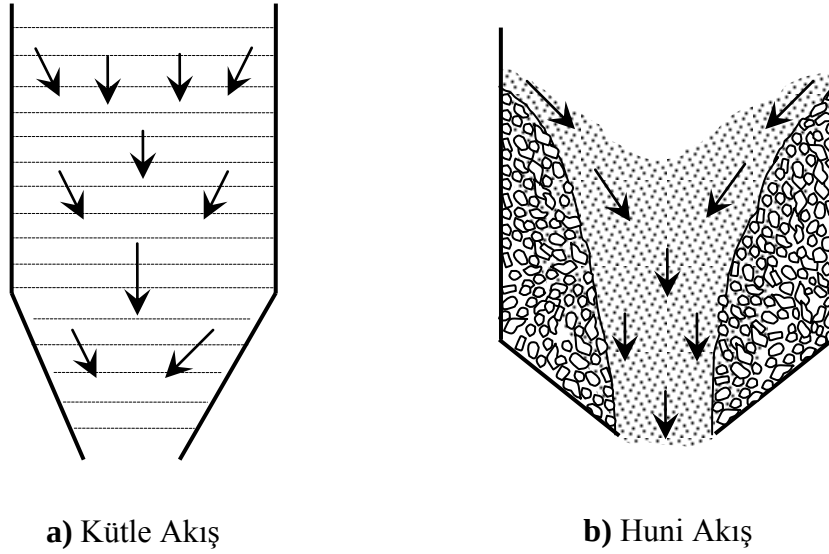
Yığınlar halindeki malzemelerin yerçekimi etkisiyle bir kanaldan akmaları sırasında gözlenen akış modelleri birçok araştırmacı tarafından farklı deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Çok bilinen bir yaklaşımda; siloyu tabakalar halinde farklı renkteki katı malzemelerle doldurup akış sırasında katmanlardaki değişimi gözlemlemek mümkündür. Böyle bir çalışma, serbest akışlı ve kohesif malzemelerin yerçekimi etkisiyle nasıl akacağının anlaşılmasına yardımcı olur. Bunun yanı sıra, silo duvar açısının akışa etkisi ve silo çıkış boyutunun belirlenmesi hakkında bir fikir verir.

Silolarda genel olarak kütle akış ve huni akış olmak üzere iki temel akış modeli meydana gelmektedir [3, 5].

4.2.1 Kütle Akış

Kütle akışta (Şekil 4.5a), silodaki malzemenin tamamı boşaltım sırasında hareket halindedir. Bu akış modeli silonun konik kısmı yeterince dik ve düzgün olduğunda

sağlanır. Siloda keskin geçiş bölgeleri yoktur; konik kısımda akmayan bölge yoktur ve çıkış boyunca tüm alan aktif durumdadır [3, 5, 6, 14].



Şekil 4.5: Silolardaki akış modelleri [3, 6]

Kütle akış, birçok amaç için ideal - en azından daha tercih edilebilir- bir akış modeli olarak nitelendirilir ve mümkün oldukça elde edilmeye çalışılmalıdır. Kütle akışın özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Kanallanma, tıkanmalar, dalgalanmalar ve taşmalar yoktur.
- Akış, her yerde aynı ve kontrollüdür; silonun baş kısmındaki malzemeden bağımsız olarak kararlı akış yaklaşımı yapılabilir. Sonuç olarak, kararlı akışa dayanan analizler yüksek derecede bir güvenilirlikle tasarıma uygulanabilir.
- Akan katının yığın yoğunluğu sabittir ve pratik olarak baş kısmındaki malzemeden bağımsızdır. Bu özellik, kontrollü bir akış hızının istendiği durumda çok avantajlıdır ve akış hızı volumetrik olarak kontrol edildiğinde gereklidir.
- Basınçlar silonun yatay kesit alanı boyunca üniormdur, bu da üniorm bir konsolidasyon ve geçirgenlik sağlar.
- Siloda ölü bölgeler mevcut değildir, bu da katının hareketsiz olduğunda minimum derecede konsolidasyona (aynı zamanda minimum degradasyon ve bozulmaya) maruz kalacağını gösterir.

- Katı kütlesi boyunca ve duvarlarda basınçlar düşüktür, böylece katının düşük konsolidasyonu ve duvarların az miktarda aşınması söz konusudur.
- “İlk-giren ilk-çıkır” akış modeli sağlanır. Zamanla bozulmaya elverişli katı malzemeler için faydalı bir durumdur.
- Katı malzemenin siloya doldurulmasının ardından taneciklerinin ayrışması bu akış modeli kullanılarak minimuma indirilmiş olur. Ayrışma, dolum esnasında bu akış modeliyle engellenemese de, akış başladıktan sonra silo boyunca malzemenin küçük ve büyük boyuttaki taneciklerinin tekrar karışması sağlanır [3-5, 8].

Kütle akışın sağlandığı siloların bazı dezavantajları da vardır. Belirli bir kapasite için uzundurlar, düzgün bir kanal sağlamak üzere geniş ölçüde şekil vermeye ihtiyaç duyarlar ve katı malzeme sürekli olarak duvarlarda akacağından silo duvarları çabuk aşınırlar. Bütün bunlar silo maliyetini artırırlar [8].

4.2.2 Huni Akış

Silonun çıkışına doğru hareket eden bir katı, depolanmış kütle içerisinde merkezde bir kanal oluşturur ve bu kanal boyunca etrafındaki kütle hareketsiz (ölü bölgeler silo duvarları boyunca oluşur) kalacak şekilde akar (Şekil 4.5b). Bu akış modeli huni akış olarak bilinir. Katı malzeme silodan boşalıp seviyesi azaldıkça, dışarıdaki hareketsiz (ölü) bölgenin üzerine dökülür ve kanala doğru akar. Bu kanal, silo çıkışından yukarıya doğru genişler.

Huni akış siloları, kütle akış silolarına göre nispeten daha kısa ve yassıdırlar (duvar açısı değerleri büyüktür). Ölü bölgeler siloda katı yığının yüzeyine kadar ulaşırlar; o yüzden yüzeyi gözlemleyerek huni akış açık bir şekilde belirlenebilir. Ölü bölgeler ancak silo tamamıyla boşaltıldığı zaman giderilirler.

Bu akış modeli serbest akışlı ve ayrışmanın olmadığı yığın malzemeler için idealdir, kohesif malzemeler için ise önerilmezler [3-6, 14]. Huni akışın temel özellikleri genel olarak istenmeyen özelliklerdir ve aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- “İlk-giren son-çıkır” akış sırası sağlanır.
- Katı yığın zamanla bozulmaya, kekleşmeye veya degradasyona bir eğilimi varsa, bu akmayan bölgede gerçekleşecektir.

- Dolum esnasında ayrılan malzemeler için siloda daha sonra tekrar bir karışma olmayacaktır.
- Akış hızı düzensizdir; beslemenin yoğunluğu geniş bir aralıkta değişmektedir.
- Düzensiz akış hızı, ince taneciklere sahip katıların havalanmasına, akışkanlaşmasına ve taşmasına neden olur.
- Eğer akmayan katı akış kanalı boşaltıldıktan sonra yeterince konsolide olursa, kanallanma oluşur [3, 5].

Huni akış, ayrışmanın önemsiz olduğu durumlarda önerilebilir. Ayrışma, katının üniform tanecik boyutu ve yoğunluğu durumunda anlamsızdır veya küçük silo varlığında önemsiz ve tolere edilebilir. Ayrıca, malzemenin depolama süresi boyunca bozulmayacağı ve çıkış açıklığının herhangi bir akışa yardımcı ekipmana gereksinim olmadan yeterince büyük olacağı durumlarda da kabul edilebilir.

Huni akış siloları ağır, aşındırıcı özelliği olan, topaklı katılar için faydalıdır, çünkü huni akışta silodaki malzeme hareketsiz malzeme üzerinden akacağından dolayı silo duvarlarında nispeten daha az bir aşınma meydana gelir. Günümüzde, bu tip siloların yaygın olarak kullanılmasının nedenleri; kütle akış silolarının varlığı ve avantajları hakkındaki genel bilgi eksikliği ve huni akış silolarının birim hacim başına daha ucuz olduğu fikridir. Huni akış siloları; aşırı hareket süresi, bozulmuş üretim programları, ilave çalışma süreleri, düşük ürün kalitesi, gerçekdışı depolama, tekrarlanan tasarımlar, modifikasyonlar, akışa yardımcı ekipmanlar, işletmede harcanan zaman ve danışmanlık gerektiren durumlar göz önüne alındığında oldukça masraflıdır [4, 12].

Silolarda tercih edilecek iki akış modeline göre sağlanacak olan avantaj ve dezavantajlar ayrıca Tablo 4.1’ de özet olarak verilmiştir. Tablodan, kütle akışı için olan avantajların ve huni akış için olan dezavantajların aynı zamanda bu iki modelin genel özellikleri olduğu görülebilir.

Tablo 4.1: Kütle ve huni akış silolarının avantaj ve dezavantajları [1, 2]

Kütle Akış	Huni Akış
Avantajları 1. Üniform ve kontrollü akış 2. Hareketsiz bölgeler oluşmaz 3. “İlk-giren ilk-çıkır” akış modeli 4. Silonun tüm kesit alanını kullanır. 5. Malzemenin depolanması ve boşaltımı sırasında ayrışma ve topaklaşmayı minimize eder.	1. Uygun depolama alanını karşılamak için kullanılabilir. 2. Ucuzdur; duvarlarda aşınma fazla olmadığından uzun kullanım ömrü vardır (Ölü bölgelerin tampon etkisinden dolayı duvarlarda küçük gerilmeler oluşur). 3. Duvarlara yakın yerlerdeki düşük tanecik hızları taneciklerin yıpranmasını ve duvar aşınmasını azaltır. 4. Kullanım ömrü boyunca birden fazla ürünü depolamak için kullanılabilir, ekonomiktir.
Dezavantajları 1. Akış sırasında duvarlarda büyük gerilmeler oluşur. 2. Uzunudur; küçük depolama hacimleri sağlar. 3. Malzemenin duvarlardan kaymasından ötürü ömrü kısadır. 4. Yüksek tanecik hızları yüzünden taneciklerin yıpranması ve duvar yüzeyinin aşınması söz konusudur. 5. Bir malzemeye veya aynı grup malzemelere özgü olduğundan pahalıdır.	1. Düzensiz ve tahmin edilemeyen akış 2. Hareketsiz bölgeler oluşur. 3. Akış, silonun belirli bir kısmındadır. 4. “İlk-giren son-çıkır” akış modeli 5. Akış esnasında ayrışma ve topaklaşma oluşur. 6. Kemerlenme, kanallanma ve taşma problemleri mevcuttur.

4.3 Silo Çıkışının Akabilirliği

4.3.1 Akış Faktörü

Akış sırasında sınırsız sayıda tıkanma nedeni mümkün olabilirken, geniş kapsamlı araştırmalar kanal boyunca bir kubbe oluşmadığı takdirde katının akacağını göstermektedir. Bir kanalda bir tıkanmanın oluşması için, katının tıkanmanın ağırlığını destekleyecek derecede yeterli kuvvete konsolidasyon sonucu ulaşması gerekmektedir. Böylece, bir kanaldaki konsolidasyon basıncı (σ_1) ne kadar büyükse

ve bir tıkanmada etkiyen basınç ($\bar{\sigma}_1$) ne kadar küçükse, kanalın akabilirliği o kadar düşüktür. Bu durum, akış faktörü (ff) ile tanımlanır [4],

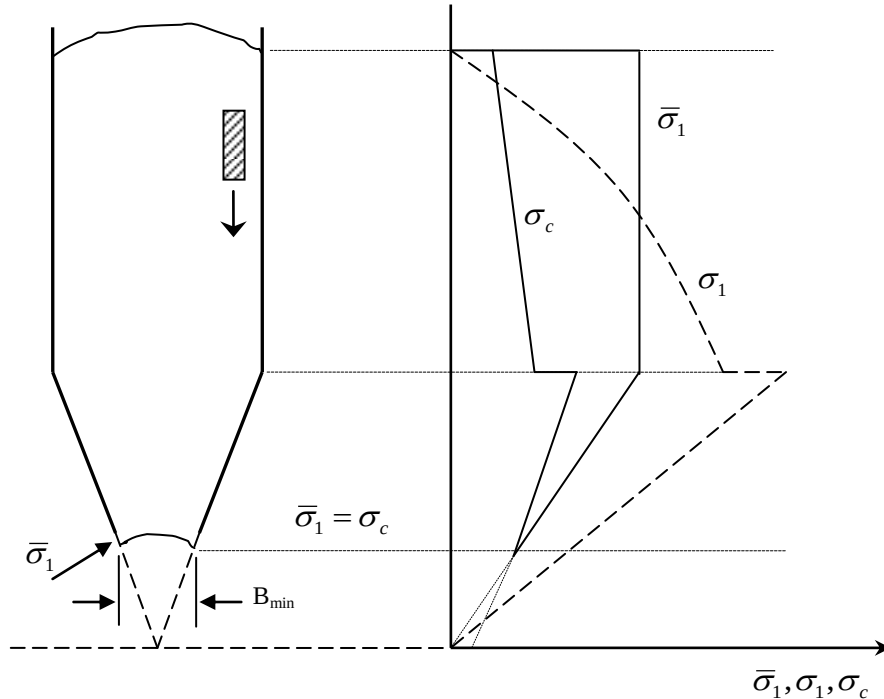
$$ff = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \quad (4.1)$$

Akış faktörü bir kanalın akabilirliğini göstermek için kullanılır. Akış faktörünün küçük değerleri, kanalın akabilirliğinin iyi olduğunu gösterir [5].

Akış faktörü; duvar sürtünme açısı (ϕ'), etkin iç sürtünme açısı (δ), silo duvar açısı (α) ve silo çıkış açıklığının (dairesele veya dikdörtgen) bir fonksiyonudur. Akış faktörünün belirlenmesi tasarım yönteminin bir aşamasını oluşturur. Eğer ϕ' ve δ , σ_1 ile değişim gösteriyorsa, σ_1 kritik değere yakınsayana kadar iteratif bir yöntem uygulanmalıdır [30].

4.3.2 “Akış – Akış yok” Kriteri (Jenike)

Şekil 4.6’ da gösterilen siloda akan katı yığın ilk yığıldığı anda herhangi bir konsolidasyona uğramamışsa da aşağıya doğru aktıkça siloda etkiyen büyük konsolidasyon basıncı (σ_1) altında konsolidasyona maruz kalır. σ_1 değerinin derinlikle olan değişimi şekilde gösterilmiştir. Jenike, silonun alt tarafında bu değişimin lineer olduğunu kabul eder.



Şekil 4.6: Silodaki kemerlenme durumunun şematik gösterimi [3, 5]

Akışın gerçekleşmesi için, katının konsolidasyon basıncı etkisiyle kazanmış olacağı kuvvetin (f_c) tıkanmada meydana gelen basınçtan ($\bar{\sigma}_1$) az olması gerekmektedir. Bu akış kriteri şu şekilde ifade edilir [4, 5, 7, 30] :

$$\bar{\sigma}_1 > f_c \quad (4.2)$$

4.3.3 Silo Çıkış Boyutunun Belirlenmesi

Kütle akış siloların tasarımında, akıştaki esas muhtemel tıkanmaların stabil kohesif kemerlerin oluşumu sonucunda meydana geldiği tahmin edilir. Şekil 4.7’ de gösterilen üniform T kalınlığındaki bir kemerdeki düşey yöndeki kuvvet dengesi (dikdörtgen kesit için);

$$2\bar{\sigma}_1 LT \sin \beta \cos \beta = W = \gamma TBL \quad (4.3)$$

B: genişlik

L: uzunluk

$\gamma = \rho_b g$ (ρ_b : yığın yoğunluğu, g: yerçekimi ivmesi)

$$B = \frac{\bar{\sigma}_1}{\rho_b g} \sin 2\beta \quad (4.4)$$

Dairesel kesit için (çap:B) kuvvet dengesi yazılırsa;

$$\bar{\sigma}_1 \pi B T \sin \beta \cos \beta = \gamma T \frac{\pi B^2}{4} \quad (4.5)$$

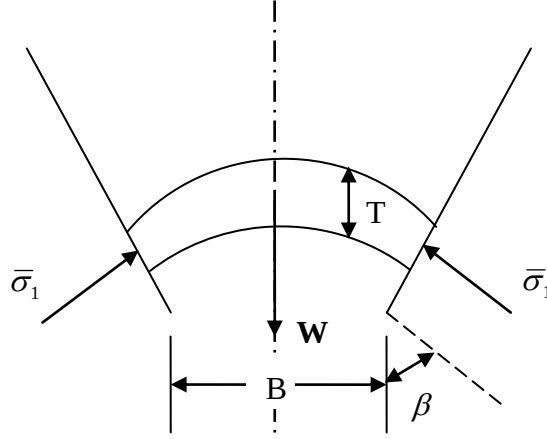
$$B = \frac{2\bar{\sigma}_1}{\rho_b g} \sin 2\beta \quad (4.6)$$

İki kesit için (4.4) ve (4.6) numaralı denklemler kullanılarak bir genelleme yapılırsa;

$$B = \frac{\bar{\sigma}_1}{\rho_b g} (1 + m) \sin 2\beta \quad (4.7)$$

m = 0, dikdörtgen kesit için

m = 1, dairesel kesit için



Şekil 4.7: Üniform kalınlıktaki bir kemere etkiyen kuvvetler [5, 7]

(4.7) denkleminde “sin2β” terimi oluşabilecek en güçlü kemer durumu göz önünde bulundurularak 1 olarak alınırsa (β=45°), (4.2) numaralı denklemde verilmiş olan akış kriteri de kullanılarak çıkıştaki kemer oluşumunu engellemek için olacak çıkış büyüklüğü,

$$B \geq \frac{\bar{\sigma}_1}{\rho_b g} (1 + m) \quad (4.8)$$

şeklinde ifade edilir. Daha sonraları, Jenike ve Leser [31] kemerin kalınlığındaki değişimi de göz önünde bulundurarak,

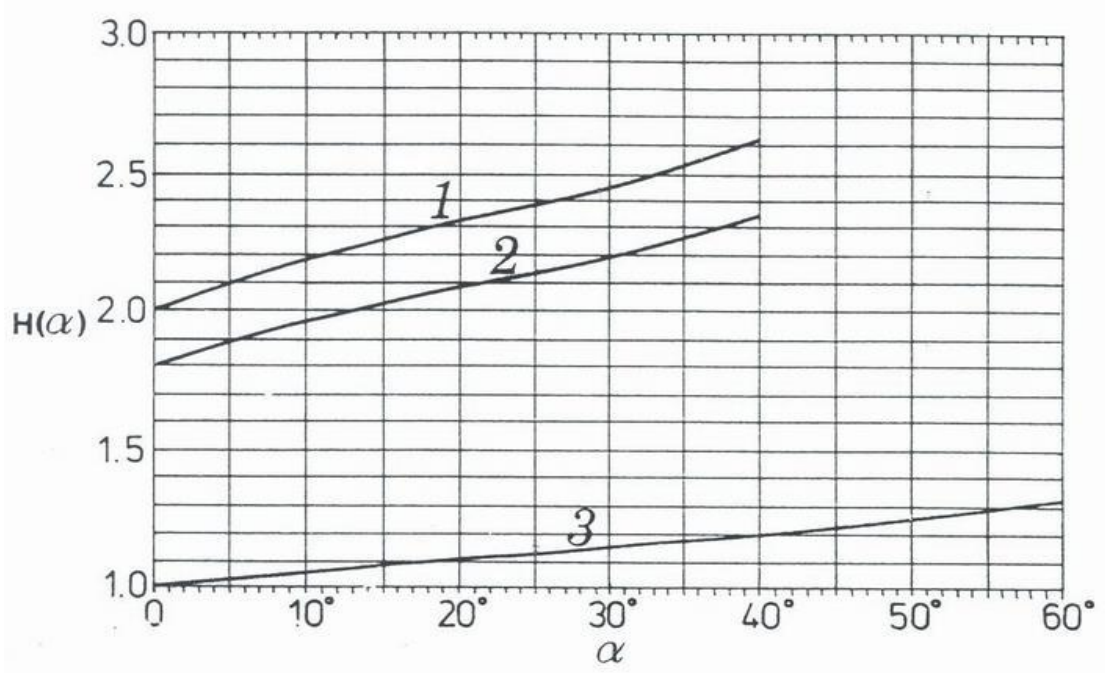
$$B \geq \frac{\bar{\sigma}_1 H(\alpha)}{\rho_b g} \quad (4.9)$$

eşitliğini önermişlerdir [5, 7, 32]. Buradaki α, silo duvarının düşeyle yapmış olduğu açıdır ve H(α) fonksiyonu da Jenike tarafından grafiksel olarak ifade edilmiştir (Şekil 4.8). H(α) fonksiyonu silonun şekline ve açı değerine bağlıdır. L<3B değerine sahip dikdörtgen çıkışlı silolar için H(α) değeri, kare ve dikdörtgen eğrileri arasında interpolasyonla elde edilebilir [3].

H(α) fonksiyonu kesin olarak bilinmemesine rağmen Arnold ve ç.a. [5] grafik çözümüne dayanarak bir eşitlik önermişlerdir:

$$H(\alpha) = \left[\frac{130 + \alpha}{65} \right]^m \left[\frac{200 + \alpha}{200} \right]^{1-m} \quad (4.10)$$

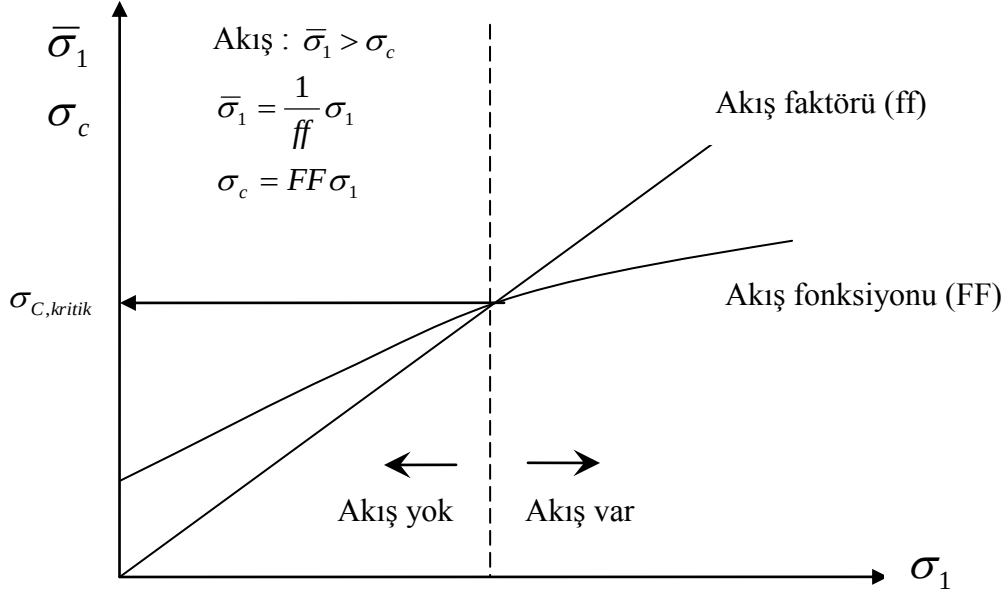
Burada; m konik çıkışlar için 1'e, dikdörtgen çıkışlar için ise 0' a eşittir. Kare çıkış için, konik çıkışa göre hesaplanan değer 0,9 ile çarpılır.



Şekil 4.8: $H(\alpha)$ fonksiyonu (eğri-1: dairesel, eğri-2: kare, eğri-3: dikdörtgen ($L \geq 3B$)) [5]

Eğer akış fonksiyonu (FF) ve akış faktörü (ff) aynı grafik üzerinde Şekil 4.9' daki gibi çizilirlerse, akışın olup olmama durumu açık bir şekilde görülebilir. Burada 3 durum söz konusudur. İlk durumda, çizimin sol tarafında, akış faktörü akış fonksiyonunun altında yer alır ve kemerde etkiyen gerilmenin ($\bar{\sigma}_1$) katının kuvvetine (σ_c) göre yetersiz olması söz konusudur. Onun için oluşan kemer stabil olacak ve akışta tıkanmaya sebebiyet verecektir. İkinci durumda, çizimin sağ tarafında, akış faktörünü temsil eden düz doğru akış fonksiyonunun üzerindedir. Bu da, kemerde etkiyen gerilmenin katının kuvvetinin üstesinden geldiğini ve sonucunda akışın meydana geleceğini gösterir. Yani akış kriteri; FF doğrusunun ff doğrusunun altında kaldığı her durumda sağlanmış olur. Son olarak; kritik durum ise, FF ve ff doğrularının kesiştiği noktada meydana gelir. Bu iki doğrunun kesişme noktasındaki σ_c değeri ($\sigma_{c,kritik}$) olması gereken minimum silo çıkış açıklığının hesaplanmasında kullanılabilir [3, 7].

$$B_{\min} = \frac{\bar{\sigma}_1 H(\alpha)}{\rho_b g} = \frac{\sigma_{c,kritik} H(\alpha)}{\rho_b g} \quad (4.11)$$



Şekil 4.9: Akışın olup olmama durumunun grafiksel gösterimi [3, 7]

4.3.4 Akış Faktörlerinin Hesaplanması

Arnold ve ç.a. [5], silo çıkışı çevresinde Jenike' nin gerilme alanının radyal olduğu yönündeki kabulüne dayanarak,

$$\frac{\sigma_1}{\rho_b g B} = \frac{Y(1 + \sin \delta)}{2(X - 1) \sin \alpha} \quad (4.12)$$

şeklinde boyutsuz bir gerilme fonksiyonunu tanımlamışlardır. (4.1), (4.11) ve (4.12) numaralı eşitlikler yardımıyla akış faktörü için,

$$ff = \frac{Y(1 + \sin \delta)H(\alpha)}{2(X - 1) \sin \alpha} \quad (4.13)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemden X ve Y ile tanımlanan fonksiyonlar,

$$X = \frac{2^m \sin \delta}{1 - \sin \delta} \left[\frac{\sin(2\beta + \alpha)}{\sin \alpha} + 1 \right] \quad (4.14)$$

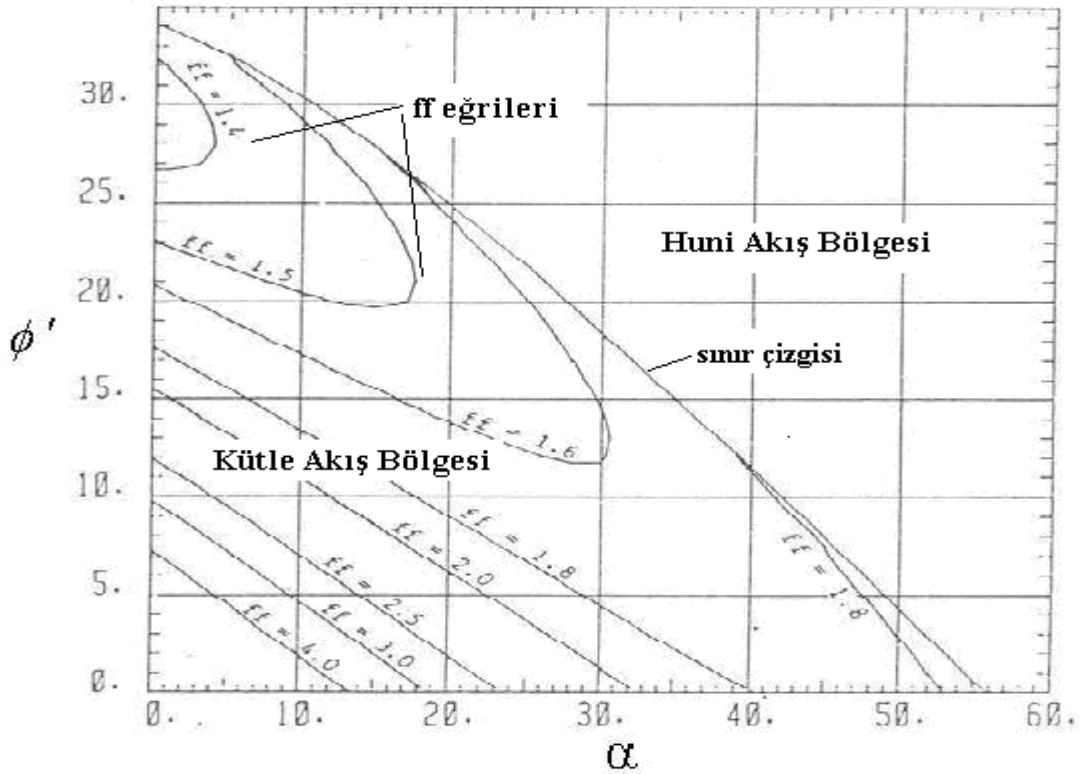
$$\beta = \frac{1}{2} \left[\phi' + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi'}{\sin \delta} \right) \right] \quad (4.14a)$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos(\beta + \alpha))]^m (\beta + \alpha)^{1-m} \sin \alpha + \sin \beta \sin^{1+m}(\beta + \alpha)}{(1 - \sin \delta) \sin^{2+m}(\beta + \alpha)} \quad (4.15)$$

şeklinde ifade edilirler. β , duvardaki normal gerilmeyle (σ_w) büyük esas gerilme (σ_1) arasındaki açıdır [1, 12].

4.3.5 Tasarım-Akış Faktörü Grafikleri

Jenike'nin akış faktörleri için olan çözümleri akış faktörlerinin farklı δ, ϕ' ve α değerleri için hesaplanmış olan değerlerine dayanmaktadır. Bunlar konik (dairesel kesitli) ve düzlem-akış (dikdörtgen kesitli) silolar için hesaplanmıştır ve grafiklerde gösterilmiştir (Ek-B). Bu grafikler akış faktörü grafikleri ya da tasarım grafikleri olarak bilinirler. Akış faktörü grafiklerine bir örnek Şekil 4.10' da verilmiştir. Grafiklerdeki yatay eksen silo duvarının düşeyle yapmış olduğu açı (α) değerleri, y-ekseninde ise ϕ' değerleri vardır. Seçilen α ve bilinen ϕ' ve δ değerleri, akış faktörü değerini verir.



Şekil 4.10: Akış faktörü grafiklerine bir örnek (Konik şekilli silo, $\delta=30^\circ$) [5]

Seçilecek olan akış modeline (kütle veya huni akış) göre çözümün mümkün olduğu bölgeler sınırlarla ifade edilmiştir (Şekil 4.10). Bölgenin dışında bir (α, ϕ') ikilisi seçildiğinde duvar boyunca akış gerçekleşmez. Belirli bir ϕ' değeri için maksimum duvar eğim açısı grafiklerde görülmektedir. Şekil B.1' den Şekil B.9' a kadar olan grafikler konik silolar, Şekil B.10' dan Şekil B.18' e kadarkiler de düzlem-akış

silolar için verilmiştir. Her grafik sabit bir δ değeri (30° , 35° 65° , 70°) için çizilmiştir. δ' nın gerçek değeri çoğu zaman bu değerlerin arasında kalacağından, maksimum α değeri uygun grafiklerden elde edilen değerler arasında interpolasyon yapılarak belirlenir [5, 8].

Kütle akış bölgelerinde, ff değerleri siloların akabilirliğini gösterir; düşük ff değerleri kanalın iyi olduğuna işarettir. Çizilmiş olan grafikler her durum için (farklı silo şekilleri ve her δ değeri için) düşük ff değerleri olduğunu gösterir. Belirli bir ϕ' değerine karşılık optimum bir silo açısı mevcuttur. Bu açı değeri azaldıkça yani silo dikleştikçe, ff değerleri artış gösterir ve kanalın akabilirliği azalır [4, 5].

Kütle ve huni akış arasındaki sınırlar ayrıca teorik olarak denklemlerle de ifade edilmiştir. Jenike [4], yakınsayan kanallarda bu sınırların konik kanallar için,

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[\frac{1 - \sin \delta}{2 \sin \delta} \right] - \beta \quad (4.16)$$

ve düzlem-akış kanallar için de,

$$\alpha = \frac{1}{0.725(\tan \delta)^{0.2}} \left[\exp[3.75(1.01)^{(0.1\delta-3)}] - \phi' \right] \quad (4.17)$$

[$\phi' < \delta - 3$ için]

denklemleriyle verildiğini göstermiştir [1, 12].

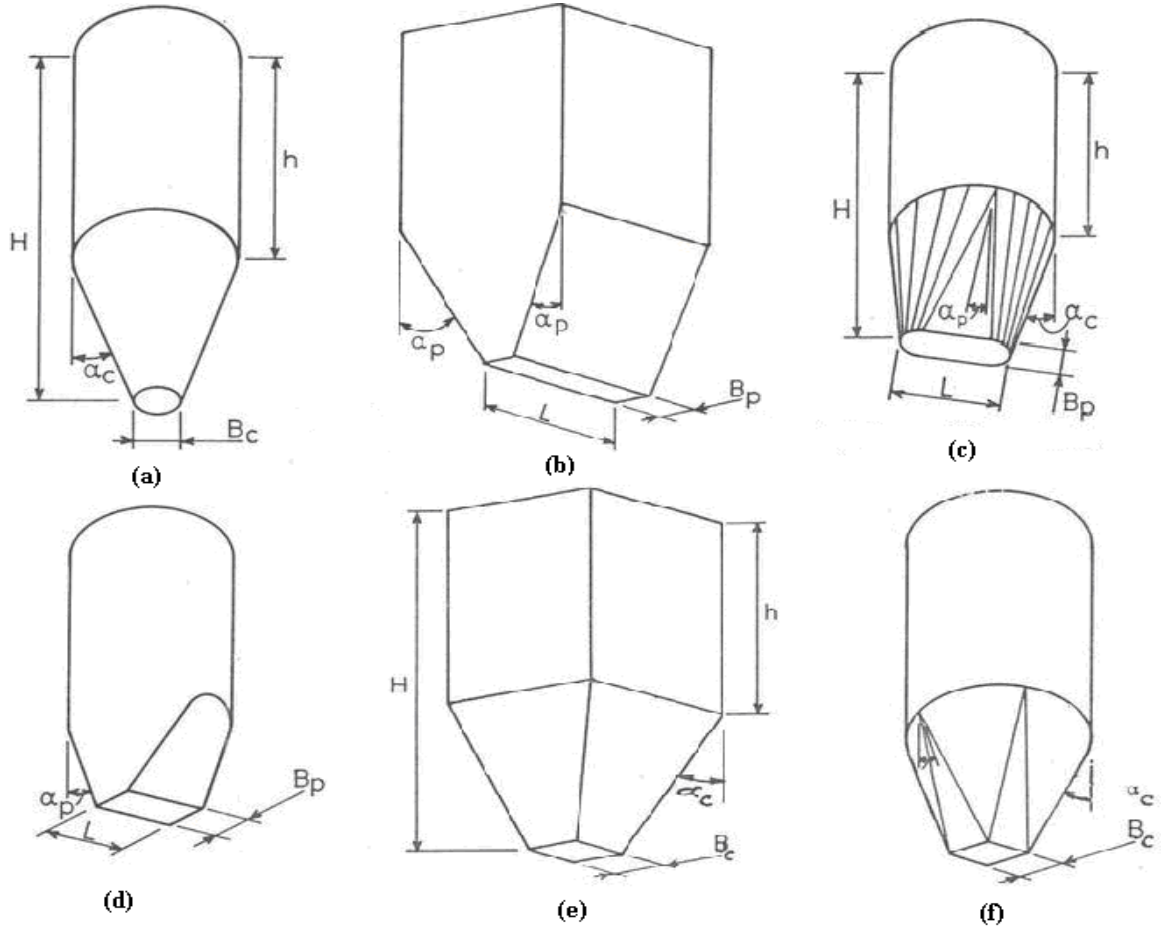
4.4 Silo Şekilleri

4.4.1 Kütle Akış Siloları

Tipik kütle akış siloları Şekil 4.11' de gösterilmiştir. Bunlar genel olarak silonun yakınsayan kısmının şekline göre konik ve düzlem-akış silolar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Belirli bir katı için konik silo için olan açı (α_c) düzlem-akış silosu için olan açıdan (α_p) daha küçük olacaktır. Bunun yanında, konik silo için çıkış boyutu veya çapı (B_c) dikdörtgen kesitin genişliğinden (B_p) daha büyüktür [5].

Konik çıkışlı siloların (Şekil 4.11a) avantajları vardır. Kabukları hafiftir ve herhangi bir yanıl desteğe ihtiyaç duymazlar. Herhangi bir bükme gerilmesini aktaramadıklarından şekilleri düzgündür, tasarımları ve üretimleri kolaydır. Bu tip

siloların ciddi bir dezavantajı ise, belirli bir kapasite için boylarının uzun olmasıdır. Bu durum yüksek bir yapı gerektirdiğinden dolayı da siloların maliyeti fazladır. Silonun yüksekliğini dairesel bir çıkış yerine dikdörtgen bir çıkış tercih edildiğinde azaltmak mümkündür [8].



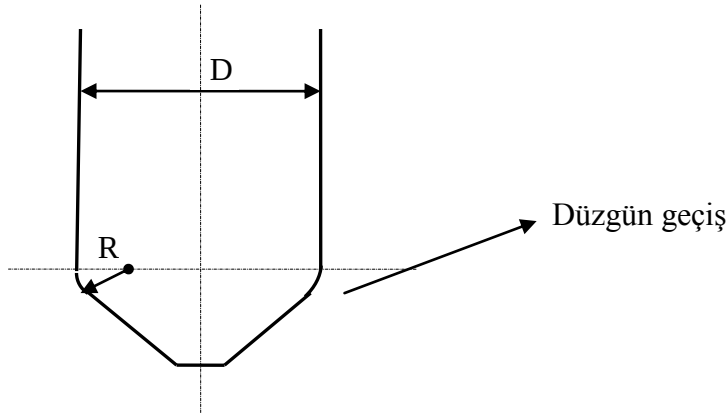
Şekil 4.11: Tipik kütle akış siloları **a)** Konik akış **b)** Dikdörtgen, düzlem-akış **c)** Geçiş **d)** Keski, düzlem-akış **e)** Piramit **f)** Kare [3, 5]

Düzlem-akış silolar (Şekil 4.11b) belli bir miktardaki malzemeyi depolamak üzere konik silolardan daha etkindirler. Düzlem-akış siloların dezavantajı, çıkış uzunluğunun silo genişliğine eşit olma gereksinimidir. Bu durumda, uzun ve dar bir çıkış sağlanmış olur. Düzlem-akış sağlamak için minimum bir değer vardır, bu değer pratikte silo genişliğinden oldukça düşüktür. Teorik olarak düzlem-akış yoktur; yaklaşık olarak dikdörtgen bir çıkışın kenarlarında çıkış boyunun genişliğin 3 katından fazla olduğu durumlarda ($L \geq 3B$) elde edilir [5].

Kütle akış için silo duvar açıları, katının etkin iç sürtünme açısı (δ) ve katı ile silo duvarı arasındaki sürtünme açısı (ϕ') değerlerine göre seçilir. Konik (dairese) ve düzlem-akış (dikdörtgen kesitli) siloları için seçimler akış faktörü grafiklerine

dayanır (EK-B). Konik silolarda, kütle akıştan huni akışa olan geçiş belirtilmiştir ve kritik bir çizgiyle gösterilmiştir. Konik bir silo tasarlarırken, kütle akış için silo duvar (eğim) açısı için sınır çizgisinin 3° - 5° kadar içinde kalmakta fayda vardır. Böylelikle, ϕ' açısının laboratuvarda elde edilen değerleriyle silodaki gerçek değeri arasında olabilecek sapmalar göz önünde bulundurulmuş olunur. Bulunan α_c değerinin 3° - 5° azaltılmasıyla, kütle akışının kanalda pratik olarak katının bütün seviyelerinde yüksek bir güvenilirlikle gerçekleşeceği söylenebilir [4, 8].

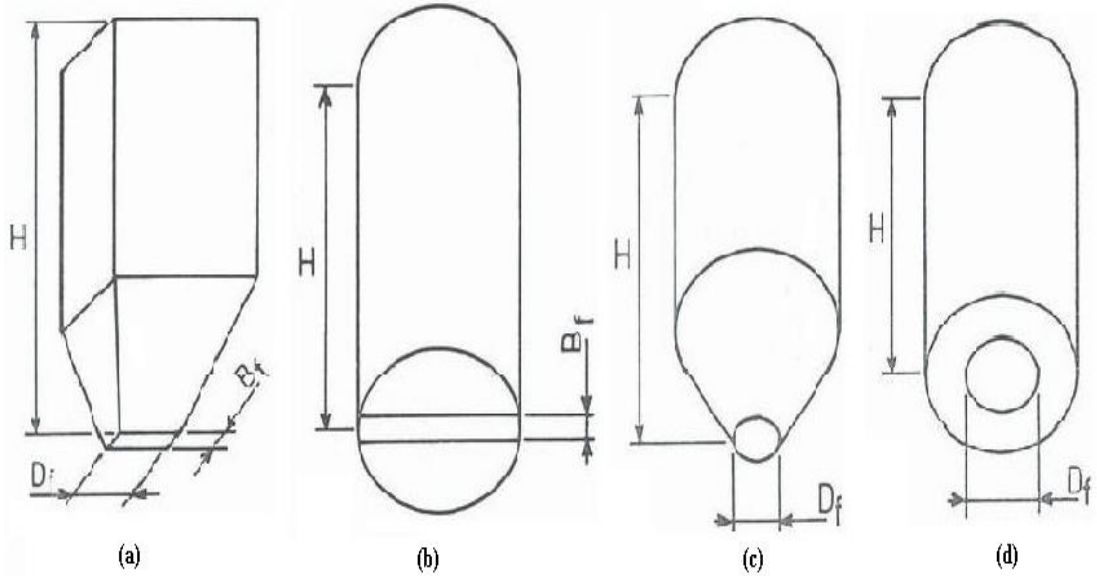
Düzlem-akış siloların tasarımında kullanılacak grafiklerde, kütle akışı olan bölgelerin konik silolar için olan bölgelerden daha geniş olduğu görülür. Bu yüzden, α_p açısı değerini kesikli çizgiye yakın (veya üzerinde) seçmek tavsiye edilir. Bu seçimle silonun kenarlarında ve üst tarafında akmayan bölgelerin oluşumunu önlemek amaçlanmıştır. Bu akmayan bölgeler silonun düşey kısmındaki katı az olduğunda ve silonun düşey kısmından konik kısma geçişin keskin olduğu durumda oluşurlar ve katının yüzeyine doğru genişlerler. α_p 'nin sınırları katı olmadığından, konik kanallarda olduğu gibi kesikli çizginin 3° - 5° kadar sol tarafında kalmak gerekli değildir. Eğer silodaki geçiş düzgünse (Şekil 4.12), α_p 5° 'ye kadar arttırılabilir ($R \geq D/3$) [5].



Şekil 4.12: Düzlem-akış silolarda düğüün geçiş [5]

4.4.2 Huni Akış Siloları

Tipik huni akış siloları Şekil 4.13' de gösterilmiştir. Bu silolar ya düz-tabanlı ya da konik tabanlıdır. Konik tabanlı olan huni akış siloların açısı değerleri kütle akış silolarından büyüktür. Bir tıkanma meydana geldiğinde, genellikle vibratörler gibi akışı sağlayan yardımcı ekipmanlara gereksinim duyarlar.



Şekil 4.13: Tipik huni akış siloları **a)** Piramit, kare çıkışlı **b)** Silindirik, düz-tabanlı, dikdörtgen çıkışlı **c)** Konik **d)** Silindirik, düz-tabanlı, dairesel çıkışlı [3, 5]

Sabit bir kanal oluşmadan akışı sağlamak üzere çıkış boyutunun (D_f) kritik değerden fazla olması gerekir. Birçok kere D_f kritik değerinin pratik amaçlar için oldukça büyük olduğu durumlar gözlenir. Dikdörtgen çıkışlı bir silo durumunda (Şekil 4.13b) B_f değerinin çıkışta sabit bir kemer oluşumunu engelleyecek kadar yeterince büyük olması gerekmektedir [5].

Huni akış siloları için minimum çıkış boyutu hesaplamada kullanılan yöntem kütle akış için olan yöntemden farklıdır [4, 8].

4.5 Kütle Akış Siloları için Tasarım Yöntemleri

Silo şeklinin ve açısının uygun olarak seçilmesiyle siloda kütle akışı sağlanır. Kütle akış silolarında sadece çıkışın bir boyutu belirlenir. Bu boyut, B , dikdörtgen bir çıkışın genişliği, kare bir çıkışın kenarı veya dairesel bir çıkışın ise çapıdır. Çıkış boyutunun belirlenmesi için genellikle iteratif bir yöntem uygulanır, bunun yanı sıra önerilmiş olan başka yöntemler de mevcuttur.

Yöntem-1 [4]

1. Kesme testlerinden δ , ϕ' ve ρ_b değerleri elde edilir.
2. Dairesel çıkışlar için konik akış grafiklerini, dikdörtgen çıkışlar için de düzlem-akış grafiklerini kullanarak bir α açısı seçilir.
3. Akış faktörü (ff) uygun grafikten elde edilir.

4. δ , FF ve ff değerlerinin σ_1 ile olan değişimi grafiğe geçirilir. FF-ff doğruları arasında 3 ihtimal vardır.

- a. Bu doğrular kesişmezler ve FF doğrusu ff doğrusunun altında kalır. Bu durumda minimum bir B boyutu belirlenemez. B değeri; akış hızı, taneciklerin kenetlenmesini engellemek üzere olan tanecik boyutundan ve standart tasarımdan hareketle seçilir ve $\bar{\sigma}_1$ hesaplanır;

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{B\rho_b g}{H(\alpha)} \quad (4.18)$$

$\bar{\sigma}_1$ noktasını kullanarak σ_1 değeri belirlenir.

- b. Doğruların kesiştiği bir nokta vardır ($\sigma_1, \bar{\sigma}_1 = \sigma_c$). Bu durumda çıkış boyutu (4.11) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.
- c. Bir kesişim yoktur ve FF doğrusu ff doğrusunun üzerinde kalır. Bu durumda katı malzeme akmayacaktır. Eğer daha düşük ff değerleri mevcutsa veya ff değerini azaltmak için daha düzgün duvar malzemesi (düşük ϕ') kullanmak mümkünse 1. adımdan iterasyona tekrar başlanır.

5. ϕ' değeri şu şekilde kontrol edilir:

- WYL çizilir, seçilen σ_1 değeri için δ değeri okunur ve EYL çizilir.
- $(\sigma_1, 0)$ noktası işaretlenir, bu noktadan geçip EYL doğrusuna teğet olan Mohr çemberi çizimi sağlanır.
- Mohr çemberiyle WYL doğrusunun kesiştiği noktayla orijinden geçen düz bir doğru çizilir ve bu doğrunun yatay eksenle arasındaki açı ϕ' açısıdır.

Yöntem-2 [4]

1. Bir ff değeri tahmin edilir.
2. ff ve FF doğruları aynı grafikte çizilir. Kesiştikleri nokta σ_1 değerini verir.
3. σ_1 değerindeki δ açısı belirlenir ve EYL çizilir. Daha sonra $(\sigma_1, 0)$ noktasından geçip EYL doğrusuna teğet olan Mohr çemberi çizilir. WYL doğrusunun bu çemberi kestiği noktayla orijinden geçen bir doğru çizilir. Bu doğrunun yatayla yaptığı açı ϕ' açı değerini verir.
4. Belirlenen δ ve ϕ' açı değerleri için tasarım grafiklerinden silo açısı seçilir ve buna karşı gelen ff değeri belirlenir.

5. Yeni ff değeri tahmin değerinden farklıysa 1. kademedan itibaren aynı işlemler tekrarlanır.
6. ff değeri bir önceki değere yakınsa, (4.11) numaralı eşitliğe göre minimum çıkış boyutu (B_{min}) hesaplanır.

Yöntem-3 [5]

1. Duvar malzemesi için bilinen ϕ' değeriyle birlikte bir δ değeri alınır (ϕ' sabit olmadığı durumda bunun için de bir tahmin değeri alınır).
2. δ ve ϕ' için tasarım grafiklerinden bir silo açısı değeri (α) seçilir; buna karşılık bir ff değeri bulunur.
3. ff doğrusu FF ile aynı grafikte çizilir, kesiştikleri noktadaki (σ_1) δ değeri belirlenir.
4. Yeni δ değeri bir önceki değere yakınsa iterasyona son verilir.
 - a. δ değeri bir önceki değerden farklıysa, yeni δ değeriyle ϕ' değeri kullanılarak uygun grafikten ff değeri okunur; 3. kademeye dönülür.
 - b. ϕ' değerinin sabit olmadığı durum için yeni bir ϕ' değeri daha önce anlatıldığı gibi belirlenir. δ ve yeni ϕ' değerlerine göre α ve ff değerleri grafiklerden bulunur. ff değerine bakılır; bir önceki değere yakınsa devam edilir, değilse 1. kademeye dönülür.
5. Doğruların kesiştiği noktaya karşılık gelen $\bar{\sigma}_1(\sigma_{c,kritik})$ değeri (4.11) numaralı eşitlikte kullanılarak minimum çıkış boyutu hesaplanır.

Yöntem-4 [13]

1. δ ve ϕ' için ortalama bir değer hesaplanır.
2. δ ve ϕ' değerleri kullanılarak uygun tasarım grafiklerinden α ve ff değerleri okunur.
3. ff ve FF doğruları aynı grafik üzerinde çizilir, kesişimlerinden kritik bir σ_c değeri elde edilir.
4. ff değeri $\sigma_1/\sigma_{c,kritik}$ oranından tekrar hesaplanır. Yeni ff değerinin bir önceki değere olan yakınlığına göre 3. kademeye dönerek devam edilir.
5. Kritik çıkış açıklığı (4.11) numaralı eşitlikten hesaplanır.

Yöntem-5 [1]

1. Bulunan 4 adet akma sınırı hatlarının son noktaları orijinden geçen düz bir doğru ile birleştirilir ve bu doğrunun yatayla yapmış olduğu açı sabit bir δ açı değeri verir.
2. Orijinden geçen ve düz bir doğru olan duvar akma sınırı hattının (WYL) yatayla yaptığı açı sabit bir ϕ' değeri verir.
3. Belirli δ ve ϕ' değerleri için (4.16) ve (4.17) numaralı eşitlikler kullanılarak konik ve düzlem-akış silolar için silo açısı (α) hesaplanır.
4. Akış faktörü (ff) (4.13) numaralı eşitlikten hesaplanır.
5. FF ile ff aynı grafik üzerinde çizilir, bu iki doğrunun kesiştiği nokta $\sigma_{c,kritik}$ değerini verir.
6. $H(\alpha)$ (4.10) numaralı eşitlikten hesaplanır. Kütle akış için gerekli minimum çıkış açıklığı (4.11) numaralı eşitlik yardımıyla bulunur.

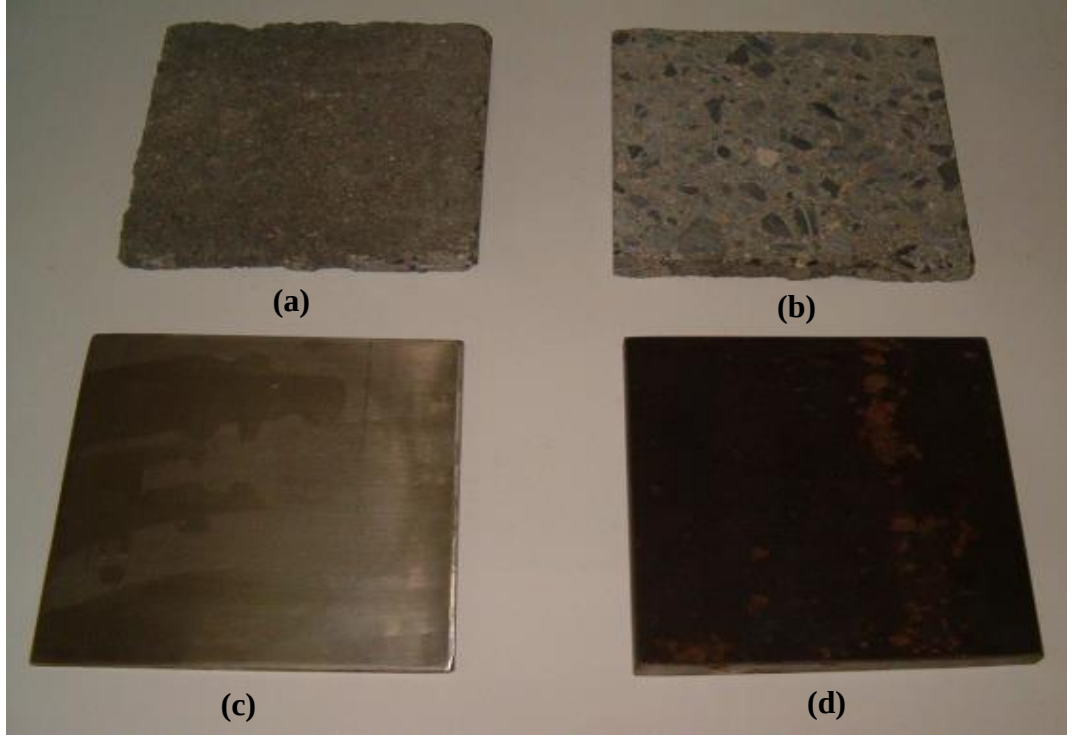
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Materyal

5.1.1 Kullanılan Malzemeler

Akış özellikleri test edilmek üzere 3 çeşit kum (sarıkum, Yalıköy ve Safaalanı kumu), kalker, soda, dolomit ve kil kullanılmıştır.

Silo duvar malzemesi olarak da paslanmaz çelik, iki çeşit beton ve normal sac kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Testlerde kullanılan silo duvar malzemeleri [**a**- Beton-2 (pürüzlü yüzey), **b**-Beton-1 (desenli yüzey), **c**- Paslanmaz çelik, **d**- Normal sac)]

5.1.2 Kullanılan Cihazlar

Malzemelerin akış özelliklerini belirlemek için testlerde Jenike tipi kesme test cihazı kullanılmıştır. Bahsi geçen cihaz, Avustralya Newcastle Üniversitesi' ne bağlı olarak çalışan "Tunra Bulk Solids" adlı araştırma grubundan temin edilmiştir.

5.1.2.1 Jenike Kesme Test Cihazı

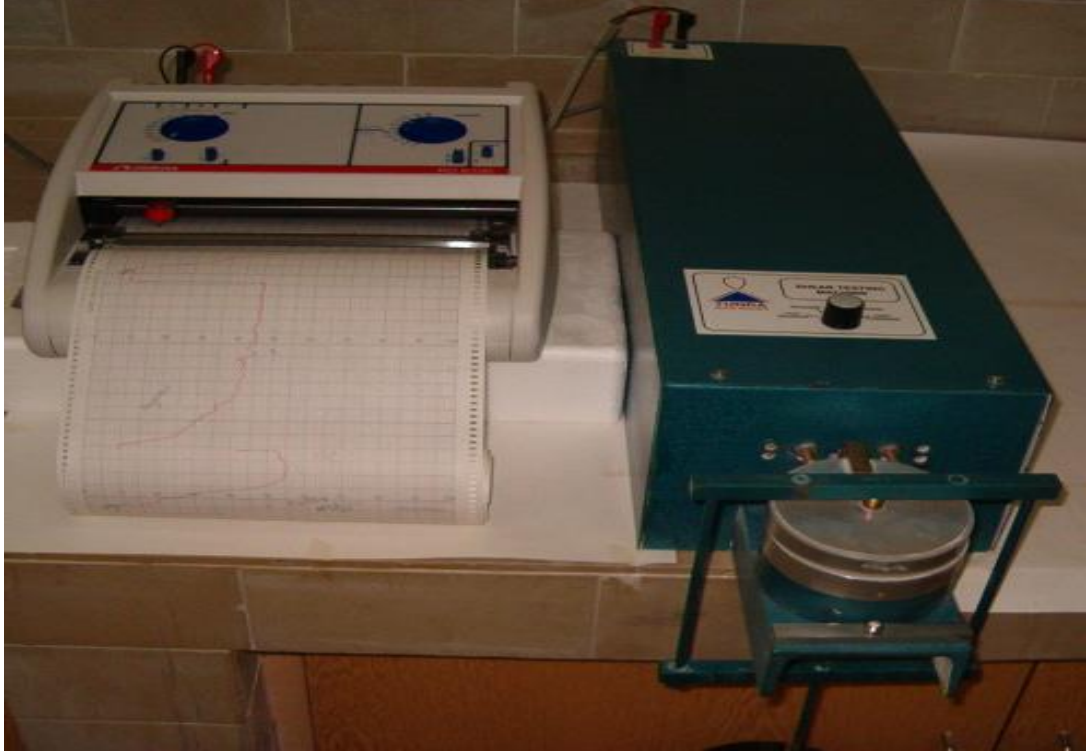
Jenike kesme test cihazı (Şekil 5.2), genel olarak cihazın ön tarafında bulunan dairesel kesit alanlı bir kesme hücresiyle normal ve kesme yüklerinin uygulandığı parçalardan meydana gelmiştir. Normal yük hücreye bir düşey yükleme sistemiyle (yük askısı) uygulanmaktadır. Kesme işlemi de elektro-mekanik olarak çalışan bir sistem yardımıyla sağlanmaktadır. Bu sistem, yatayda hareketi sağlayan sapı 2.5 mm/dak'lık sabit bir hızla hareket ettirmektedir. Kesme kuvveti, bir gerilimölçer (strain gauge) yük hücresi ile ölçülmektedir. Bu yük hücresinin çıkış uçları şeritli veya düz yüzeyli gerilim yazıcısına bağlantı için uygundur. Çıkış gerilimi 100 Newton' a 1 Volt karşılık gelecek şekilde kalibre edilmiştir [33].

Kesme hücresi Şekil 5.2' de (cihazın ön tarafında) ve şematik olarak da Şekil 5.3'de gösterilmiştir ve bir tabandan (1), tabanın üzerindeki kesme halkasından (2) ve kesme kapağından (3) oluşmuştur. Jenike kesme test hücresine ait parçalar ayrıca Şekil 5.4' de gösterilmiştir. Kesme kapağına bir dirsek (4) ve bir mil (5) bağlıdır. Düşey yük, kapağa bir ağırlık askısı (6) yardımıyla standart ağırlıklar (7) askıya yüklenerek uygulanır (Şekil 5.3a). Standart ağırlıklar Şekil 5.5' de gösterilmiştir. Yataydaki kuvvet de kapağa tutturulmuş dirseğe mekanik olarak hareket eden ölçüm ucu (8) ile uygulanır. Kesme kuvveti ölçüm ucu dirseğe kesme düzleminde (taban ile kesme halkası arasındaki düzlem) etki eder. Bu uç da hareketi sağlayan sisteme kesme kuvvetini ölçen bir kuvvet ölçüm elemanı ile bağlanmıştır. Kesme işlemi sırasında kesme halkası ilk ofset konumundan (Şekil 5.6a) son ofset konumuna (Şekil 5.6b) hareket eder. Bu durumda kesme halkasının maksimum hareket mesafesi taban ile kesme halkasının duvar kalınlıklarının toplamı kadardır [17].

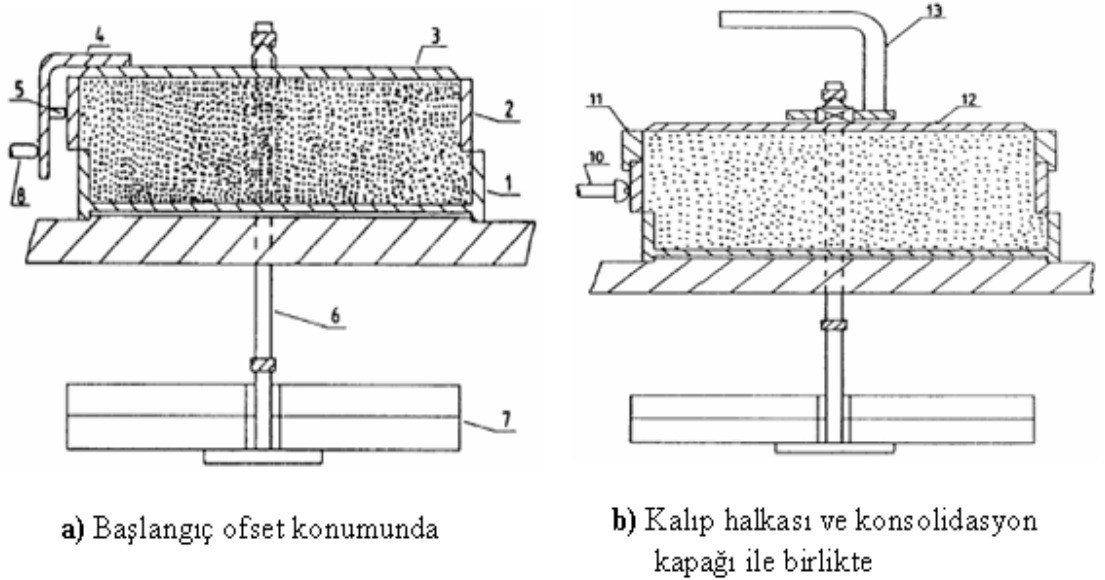
Kapağın altı ve tabanın iç tarafı test edilecek malzemenin adhezyonunu (yapışkanlığını) arttırmak amacıyla pürüzlendirilmiştir (kabartılmıştır) [8].

Kesme hücresinin iç çapı 95mm (yaklaşık 1/141 m² kesit alanına karşılık gelir) değerindedir, diğer boyutları da standart kesme hücresinin boyutları ile aynıdır. Tabanın yüksekliği 13mm, kesme halkasının yüksekliği 16mm ve kalıp halkasının yüksekliği de 10mm' dir. Bu parçaların yapımında kullanılan malzeme ya paslanmaz çelik ya da alüminyumdur [17].

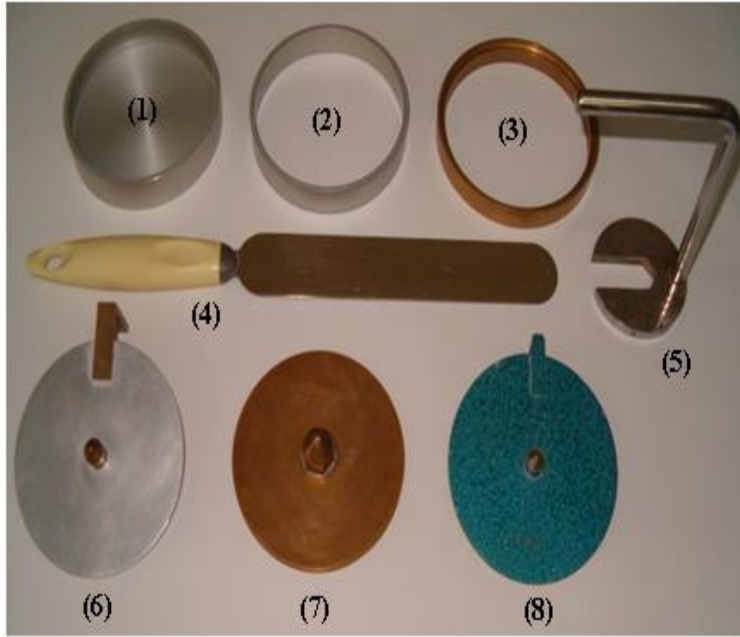
Cihazın çalışma modları; ileri, hızlı ileri, dur, geri, hızlı geri şeklindedir. Cihaz, 240 V' luk (AC) bir güç kaynağına 50-60 Hz aralığında bağlı olduğunda çalışır durumdadır [33].



Şekil 5.2: Jenike kesme test cihazı ve yazıcı

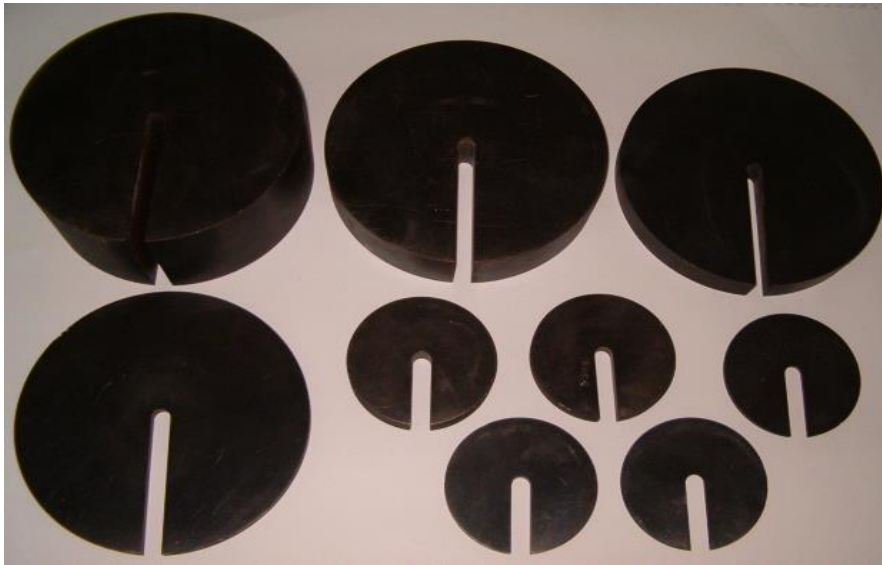


Şekil 5.3: Jenike kesme hücresinin şematik gösterimi [17]

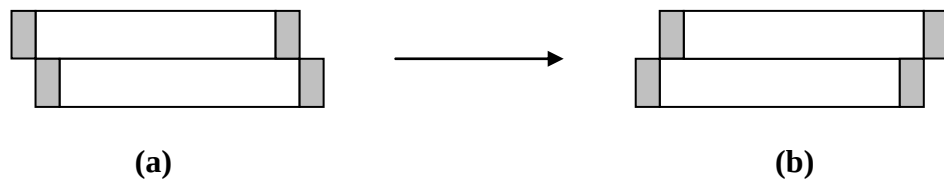


- 1- Taban
- 2- Kesme Halkası
- 3- Kalıp Halkası
- 4- Spatula
- 5- Sıkıştırma Kolu
- 6- Kesme Kapağı
- 7- Konsolidasyon Kapağı
- 8- Kesme Kapağı (Duvar Testleri)

Şekil 5.4: Jenike test hücresinin parçaları



Şekil 5.5: Düşey yük olarak kullanılan standart ağırlıklar



Şekil 5.6: Jenike test hücresinin **a)** Başlangıç ofset konumu **b)** Son ofset konumu

5.1.2.2 Diğer Cihazlar

Yazıcı : OMEGA RD6102 Serisi Düz Yataklı Yazıcı (Şekil 5.2)

Etüv : BINDER APT. Line Serie BD/ED/FD (E2)

Terazi : SARTORIUS BL 1500S

Elekler : ASTM E:11 standardına uygun 63-1400 mikron aralığında elek takımı (Retsch)

5.2 Yöntem

Bu çalışmada uygulanan yöntem, [17] ve [34] numaralı kaynaklarda tanımlanmış olan Jenike kesme hücresi için olan test yöntemidir. Deneysel test yöntemi katıların şu özelliklerinin ölçülebilmesini sağlar:

- İç sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (C)
- Etkin iç sürtünme açısı (δ)
- Büyük konsolidasyon gerilmesi (σ_1) ve sınırlanmamış akma sınırı gerilmesi (σ_c)
- Akış fonksiyonu (FF)
- Yığın yoğunluğu (ρ_b)
- Duvar malzemesi ile katı arasındaki kinematik sürtünme açısı (ϕ') – kütle akış silolar için
- Statik iç sürtünme açısı (ϕ'_t) – huni akış silolar için

5.2.1 Anlık Akış İçin Kesme Testi

5.2.1.1 Numune Seçimi

Nem içeriği, tanecik boyut dağılımı ve sıcaklığa göre katı malzemeyi temsil edecek numunenin seçimi testlerin anlamlı sonuçlar vermesi bakımından önemlidir. Testler için yaklaşık olarak 10 litre malzeme hazır bulundurulmalı ve her test için yeni numune kullanılmalıdır. Eğer miktar yeterli değilse ve kesme testleri aynı numune üzerinde tekrarlanmak durumundaysa, her testten önce yapışan malzemenin iyice birbirinden ayrılması sağlanmalıdır.

Katı malzemelerin akabilirliği önemli ölçüde nem içeriğine bağlıdır. Bu bakımdan, testlerde kullanılacak malzemenin nem miktarı depolama akış anındaki beklenen

değere yakın olarak elde edilmelidir. Buharlaşma ve adsorpsiyonu engellemek üzere test numunesi ağzı kapalı bir kapta saklanmalı ve numunenin testler arasında hava alması engellenmelidir. Numunenin su içeriğindeki farklılıklar kabın düzenli olarak karıştırılmasıyla ve test sırasında işlemlerin hızlı olarak yapılmasıyla önlenabilir. İdeal ölçümler klimalı ve nem kontrollü bir odada yapılmalıdır.

Tanecik boyut dağılımının etkisi ilk bakışta görüleceği gibi şaşırtıcı değildir. Karışık tanecik boyutuna sahip bir kütlenin akışı sırasında, katı malzeme başlıca ince tanecikler tarafından kesmeye uğrarken büyük tanecikler hep beraber hareket ederler. Büyük tanecikler katının kohezyonuna çok az katkıda bulunurlar. Bu yüzden katının akabilirliği ince taneciklerin özelliklerine bağlıdır. Standart boyuttaki kesme test cihazı, parçacık boyutu kesme hücresi çapının %5' ine kadar olan katıların test edilebilmesine olanak verir. İri tanecikler testleri yaparken numune içerisinden alınabilirler; ancak yapılan testlerde üretimden gelen numunelerin yapısının değişmesi istenmediğinden numunelerin orijinal içerikleriyle çalışılmıştır.

Numunenin içerisindeki büyük ve ince taneciklerin testler sırasında ayrıışmamasına büyük bir özen göstermek gerekir. Mesela, taşınma esnasında iri tanecikler kapta malzemenin yüzeyine doğru hareket ederler ve eğer kesme testleri için yüzeydeki bu malzeme alınırsa da malzeme için düşük kesme kuvvet değerleri elde edilir. Eğer testler aynı numune üzerinde tekrar edilecekse ince taneciklerin yok olmasına izin verilmemelidir.

Sıcaklığın bazı katıların akabilirliği üzerindeki etkisi önemli olabilir. Bu tip katıların testlerini yaparken sıcaklığı ayarlayan ve kontrol edebilen özel olarak tasarlanmış düzeneklere veya sıcaklık kontrolü sağlanabilen odalara gereksinim vardır.

Titreşim katının kesme kuvveti değerini etkilediği için, testler sırasında cihazın hem ortamdaki hem de kuvvet ölçüm ucunu hareket ettiren mekanizmadan kaynaklanacak titreşimlerden etkilenmemesini sağlamak gerekir.

5.2.1.2 Kesme Hücresi Seçimi

Yığın yoğunlukları 300 ile yaklaşık 2400 kg/m³ arasında olan belli katıların kesme kuvveti ölçülmek istendiğinde standart boyutlu kesme hücresi kullanılmalıdır. Yığın yoğunluğu 300 kg/m³ değerinden az olan katılar için veya kesme testleri çok düşük normal gerilme seviyelerinde gerçekleştirildiğinde hafif metal bir kesme hücresi önerilir. Daha yüksek normal gerilme seviyelerinde ve yığın yoğunlukları 2400

kg/m³’ ten yukarı olan katılar için ise daha küçük çaplı kesme hücresi mevcut kuvvet ölçüm elemanı uygun olmayan aralıktaysa kullanılabilir.

5.2.1.3 Ağırlıklar ve Gerilme Değerleri Arasındaki Bağntı - Standart Ağırlıkların Seçimi

Kesme testlerinde farklı çaplarda kesme hücreleri kullanıldığından, kesme testlerinin sonuçlarını kuvvet yerine genellikle gerilme değerleriyle (kesme düzleminde normal gerilme ve kesme gerilmesi) ifade etmekte fayda vardır. Hücreler ağırlıklarla yüklendiklerinden dolayı da, bu ağırlıkların karşılığı olan gerilme değerleri cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Buna göre; ilgili eşitlikler,

$$\sigma = \frac{F_V}{A} = \frac{(m_B + m_R + m_L + m_H + m_W)g}{A} \quad (5.1)$$

$$\tau = \frac{F_S}{A} \quad (5.2)$$

şeklinde verilir. Bu eşitliklerde;

σ : Normal gerilme (Pa)

τ : Kesme gerilmesi (Pa)

m_B : Kesme düzlemi üzerindeki (kesme halkası içindeki) malzemenin kütlesi (kg)

m_R : Halkanın kütlesi (kg)

m_L : Kesme kapağının kütlesi (kg)

m_H : Ağırlık askısının kütlesi (kg)

m_W : Ağırlıkların kütlesi (kg)

g : Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²)

A : Hücrenin kesit alanı (m²)

F_S : Kesme kuvveti (Newton)

Kesme testlerini yaparken ağırlıklar askısız direkt olarak kapağa uygulanırsa (5.1) numaralı eşitlikten m_H terimi çıkartılır. Eşitlikteki kesme kuvveti (F_S) kalibre edilmiş yazıcıdan okunur. Belirli bir gerilme değerini karşılamak üzere askıya yerleştirilmesi gereken standart ağırlıkların miktarı ilgili eşitlikten bulunabilir.

Normal gerilme değerlerini hesaplarken kesme düzlemi üzerindeki katının kütlesini saptamak gerekir. Bu değer de yaklaşık olarak (5.1) eşitliğinde halka içerisindeki katı miktarına (m_B) eşittir. Bu değeri ölçmek için; kesme hücresindeki toplam katı kütlesi

(m_M) kesme testinden sonra tabanın, kesme halkasının, kapağın ve hücredeki malzemenin birlikte tartılmasıyla belirlenir. Daha sonra halkanın ve tabanın bilinen hacim değerlerinden kesme düzlemi üzerindeki katının kütlesi (m_B) hesaplanır. Bu hesaplama, hücre içeriğinin yoğunluk bakımından homojen olduğu varsayımına dayanır. Kohesif malzemeler için, kesme düzlemi üzerindeki malzeme miktarı yapılan testten sonra kesme halkası ve içindeki katının tartılmasıyla direkt olarak belirlenebilir. Tabanın düzensiz bir iç şeklinin olmasından dolayı hacmi en iyi şekilde boşken ve tamamı su ile doluyken tartılarak belirlenir. Halkanın hacmi ise boyutlarından hesaplanır.

Her testten sonra m_B değerleri belirlenir; normal gerilme değerinin hesaplanmasında kullanılacak olan m_B değeri ise bu değerlerin ortalaması alınarak bulunur.

5.2.1.4 Normal Gerilme Seviyelerinin Seçilmesi

İlk ön-kesme normal gerilme değeri ($\sigma_{p,1}$) test malzemesinin yığın yoğunluğu (ρ_b) temel alınarak Tablo 5.1’ deki sınırlara göre seçilmelidir.

Tablo 5.1: Test malzemesinin yığın yoğunluğuna göre ilk ön-kesme normal gerilme değeri seçimi [17]

ρ_b (kg/m ³)	$\sigma_{p,1}$ (kPa)
<300	~ 1.5
300-800	~ 2.0
800-1600	~ 2.5
1600-2400	~ 3.0
>2400	~ 4.0

Yığın yoğunluğu için bir başlangıç tahmini şu şekilde yapılabilir. Kesme halkası düz bir yüzeye yerleştirilir. Yoğunluğu belirlenmek istenen malzeme halkaya doldurulur ve malzeme halka üzerinden sıyrılır. Doldurulan malzeme tartılarak bilinen ağırlık ve hacim değerlerinden yığın yoğunluğu hesaplanabilir. Daha yüksek ön-kesme normal gerilme seviyeleri;

$$\sigma_{p,2} = 2\sigma_{p,1}$$

$$\sigma_{p,3} = 4\sigma_{p,1}$$

$$\sigma_{p,4} = 8\sigma_{p,1}$$

değerlerine yaklaşık olarak seçilir. Testler ilk olarak $\sigma_{p,1}$ seviyesinde, daha sonra da artan ön-kesme normal gerilme seviyelerinde ($\sigma_{p,2}, \sigma_{p,3}, \sigma_{p,4}$) gerçekleştirilir. Her ön-kesme normal gerilme seviyesinde de o değerin %25 ile %80 'i arasında kalacak şekilde 4 adet kesme normal gerilme seviyeleri seçilir. Her ölçüm iki defa tekrarlanır ve ölçümlerin ortalaması sonuç olarak alınır.

5.2.1.5 Numunenin Hazırlanması

Kesme testi için numune hazırlamada özel bir yöntem uygulanır. Kesme halkası Şekil 5.3a' da gösterildiği gibi taban üzerinde ofset pozisyonunda yerleştirilir. Konumlandırma vidaları (10) da taban ile kesme halkası arasında üst üste geldiklerinde 3mm' lik bir fark oluşturacak şekilde ve hücre ekseninin kuvvet ölçümü sapıyla aynı hizada olmasını sağlamak üzere ayarlanırlar. Daha sonra da kalıp halkası (11) Şekil 5.3b' deki gibi kesme halkasının üzerine yerleştirilir.

Hücrenin Doldurulması :

Monte edilmiş hücre hep aynı şekilde küçük yatay tabakalar halinde malzemenin yüzeyine herhangi bir kuvvet uygulamadan kalıp hücresinin üstüne kadar doldurulur. Doldurma işlemi tabanla halkanın üst üste geldiği yerde boşluk kalmayacak şekilde olmalıdır. Malzemenin fazlası kalıp hücresinin üzerinden küçük miktarlarla bir bıçak (spatula) yardımıyla halkanın taban üzerindeki konumunu bozmayacak şekilde sıyrılır.

Ön-Konsolidasyon :

Konsolidasyon (veya sıkıştırma) kapağı (12) malzemenin düzeltilmiş olan yüzeyi üzerine yerleştirilir, ağırlık askısı da üzerinde ağırlıklarla (m_{wtw}) birlikte sıkıştırma kapağı üzerine asılır. Kapak, askı ve ağırlıklar havalanan malzemenin hücreden dışarı çıkışını önlemek için çok dikkatli bir şekilde yerleştirilmelidirler. Bu işlem sırasında malzeme sıkıştırılmış olur ve ince tanecikli malzemelerde kısa bir süre havanın çıkması için beklemekte fayda vardır. Daha sonra ağırlıklar, askı ve kapak kaldırılır ve sıkışmış olan malzeme üzerinde meydana gelen boşluk doldurularak malzeme aynı seviyeye getirilir. Bu tekrar doldurma işlemi test edilen malzemenin sıkıştırılabilirliğine bağlı olarak her zaman için gerekmeyebilir veya birçok defa da tekrarlanabilir (Eğer hücre içindeki malzemenin yüzeyi istenilen seviyede değilse, doldurma işleminin yeniden tekrarlanması gerekmektedir).

Sıkıştırma / Çevirme :

Sıkıştırma kapağı yüzeyi düzeltilmiş malzeme üzerine, ağırlık askısı da ağırlıklarla (m_{wtw}) beraber kapağın üzerine yerleştirilir (Askı üzerindeki ağırlıklar yaklaşık σ_p basıncına karşılık gelmelidir).

Hücrenin doldurulmasından sonra sıkıştırma kapağı uygun bir sıkıştırma kolu (13) yardımıyla 20 defa çevrilir. Her çevirme kapağın 90° 'lik dönüşünden ibarettir (Kapak daha sonra ters yönde çevirilir). Burada düşey kuvvetlerin kapağa uygulanmamasına dikkat edilmelidir. Çevirme işlemini yaparken kesme halkası ofset pozisyonundan kaymasını engellemek için konumlandırma vidalarına doğru parmakla bastırılmalıdır. Kalıp ve kesme halkalarının serbestçe ve birbirlerinden bağımsızca dönmeleri sağlanmalıdır. Çevirme işlemi ani hareketler olmadan, düzgün, sürekli ve saniyede bir çevirme/dönme hızında olmalıdır. Çevirmeden sonra, ağırlıklar ve askı dikkatlice kaldırılır. Kapak yerinde tutularak kalıp halkası kaldırılır. Kapak daha sonra kuvvet ölçümünün olduğu yöne doğru kaydırılarak alınır, böylece kesme hücresi konumlandırma vidaları yönünde bastırılmış olur (Eğer doldurma işlemi başarılı olmuşsa, sıkıştırılmış malzemenin düzenli olarak dağıldığı söylenebilir. Çevirmeden sonra belirgin bir aç meydana gelmişse, doldurma işlemi başarısızdır ve tekrarlanmalıdır. Sıkıştırmanın ardından halkanın üzerindeki malzemenin kalınlığı 1 ile 3mm arasında olmalıdır; malzeme yüzeyi halka seviyesinin aşağısındaysa, hücrenin doldurulma sayısı arttırılarak yeni bir numune hazırlanmalıdır).

Halkanın üzerindeki fazla malzeme küçük miktarlarla seviye halkanın üstüne gelene kadar sıyrılır. Sıyırma esnasında da malzeme yüzeyine herhangi bir kuvvet uygulanmamalıdır. Eğer malzemenin içinde iri parçacıklar mevcutsa, sıyırmayla birlikte yüzeyden alınırlar ve yapıyı değiştirirler. Bu gibi durumlarda hücreyi doldurmak malzeme yüzeyinin aynı hizada olması bakımından iyi olur.

5.2.1.6 Optimizasyon

Kesme kapağı, dirseğin ucu halkaya dokunacak şekilde malzeme yüzeyinin üzerine merkezi olarak yerleştirilir. Kesme kapağının dirseği kuvvet ölçme ucuyla aynı hizada olmalıdır. σ_p değerine karşı gelen ağırlıklar (m_{wtw}) askı yardımıyla yavaşça kapağın üzerine konulur (Ağırlık askısı herhangi bir salınım hareketini engellemek için sabitlenmelidir). Kuvvet ölçmeye yarayan ucu harekete geçiren motor açılarak

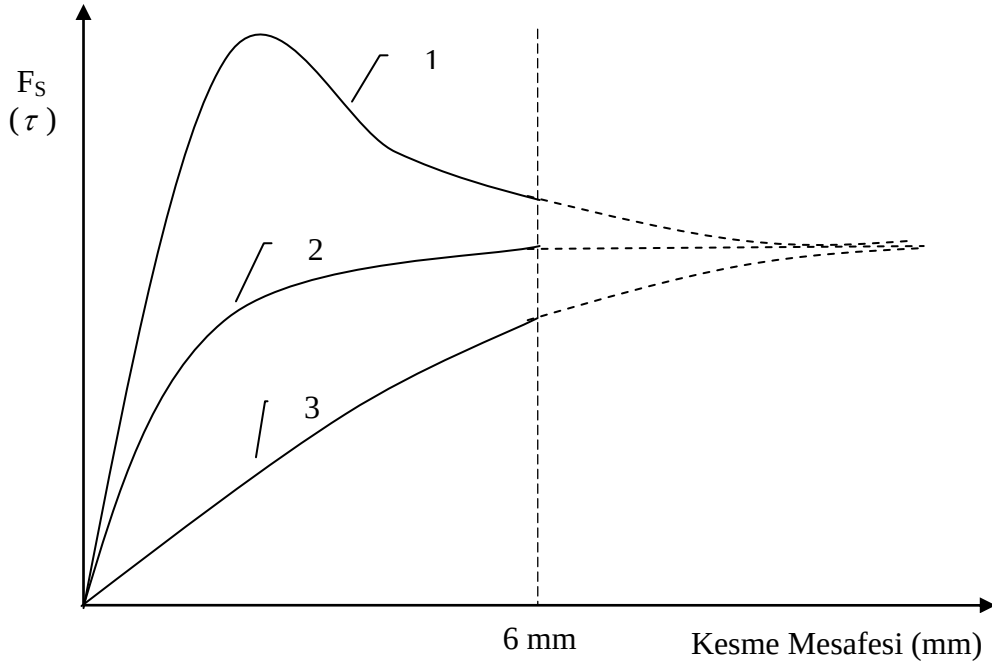
kesme testi tüm kesme mesafesi boyunca (ilk ofset konumundan son ofset konumuna kadar yaklaşık 6 mm) gerçekleştirilir (Şekil 5.6).

Testin sonunda kesme kuvveti-zaman kaydı incelenir. Bu kayıt, aynı zamanda kesme gerilmesi-kesme mesafesi kaydı ile eşdeğerdir. Motor, sabit bir hızla (2.5 mm/dak) ucu hareket ettirdiğinden dolayı zamanın (yazıcı kâğıdı hızına göre) bir kesme mesafesi karşılığı vardır.

Testin sonucunda genellikle sıkıştırmanın derecesine bağlı olarak Şekil 5.7’ de verildiği gibi 3 farklı eğri elde edilir. Eğer test edilen malzeme için uygulanmış olan sıkıştırma yetersizse, kesme işlemi sırasında kesme kuvveti sürekli olarak artış gösterir. Bu durumdaki malzeme kritiğin altında konsolide edilmiştir (eğri 3) ve kesme bölgesindeki yığın yoğunluğu kesme işlemi boyunca artar. Eğer sıkıştırma derecesi malzeme için fazlaysa kesme kuvveti ilk olarak artar, bir maksimumdan geçer ve daha sonra da azalır (eğri 1). Bu malzemenin kritiğin üzerinde konsolide olduğu söylenebilir ve yığın yoğunluğunun maksimumdan geçtikten sonra azaldığı düşünülür. Bunların dışında; kesme kuvvetinin başlangıçta arttığı, daha sonra belirgin bir değerde sabitlendiği bir sıkıştırma seviyesi vardır (eğri 2). Malzemenin bu durumda kritik olarak konsolide edildiği söylenebilir, testin kesme kuvvetinin sabitlendiği kısmı da kararlı hal akışı olarak adlandırılır. Böyle bir numunede kesme işlemi süresince yığın yoğunluğu ve kesme bölgesindeki kesme gerilmesi sabit kalır. Şekilden de görüleceği gibi test hücresinin kesme mesafesi sınırsız olduğunda tüm eğriler aynı kararlı hal değerine geleceklerdir. Şekil 5.8’ de ayrıca bir malzeme için testlerde elde edilmiş sıkıştırma derecesinin 3 farklı durumundaki yazıcı kaydı gösterilmiştir.

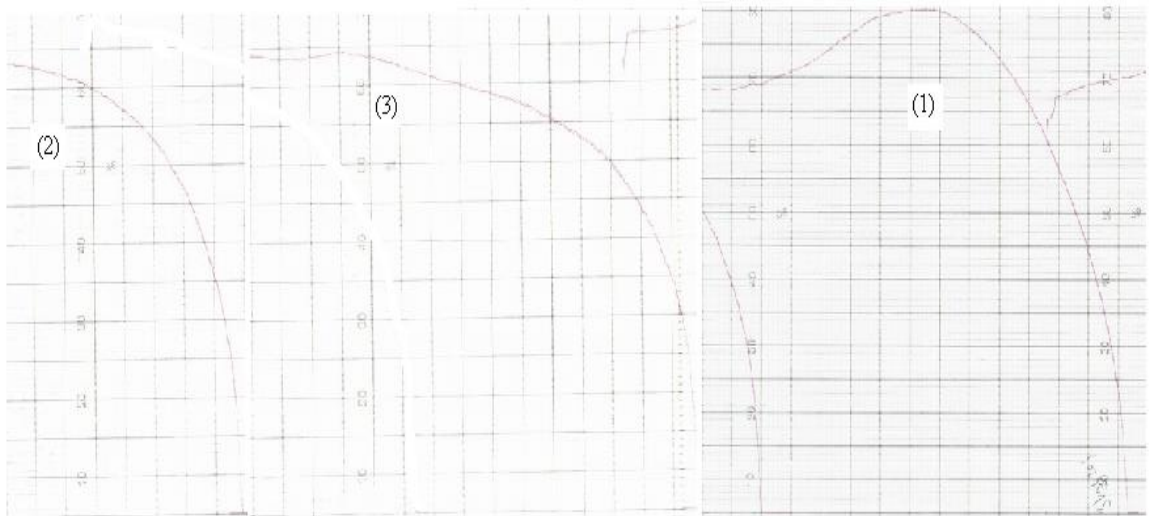
Eğer numune kritiğin altında konsolide edilmişse (sıkıştırılmışsa), bundan başka numuneler çevirme sayısı maksimum 50 değerine kadar kademeli arttırılarak hazırlanır. Seçilen her çevirme sayısı için bir kesme testi gerçekleştirilir kesme gerilmesi-kesme yolu kaydı kritik konsolidasyonun meydana geldiği durum bulunana kadar araştırılır. 50 çevirme sonrasında da numune hala kritiğin altındaysa, sıkıştırma esnasında uygulanan konsolidasyon normal gerilmesi yaklaşık 0.5 σ_p ’lik artırımlarla arttırılır. Numuneler yine 50 defaya kadar yine kademeli olarak kesme testine tabii tutulurlar. Bulunan bir normal gerilme değerinde, numune kritik değer üzerinde konsolidasyona uğramışsa, konsolidasyon normal gerilmesi ve çevirme sayısı değerlerinde kritik konsolide edilmiş bir numune sağlamak üzere bir düzeltme

yapılır. Eğer yapılmış olan ilk test sonucunda numune kritiğin üzerinde konsolide edilmişse, çevirme sayısı minimum 5'e kadar kademeli olarak azaltılır. Son olarak yine konsolidasyon gerilmesi ve çevirme sayısında kritik durumu sağlamak için bir düzeltme yapılır.



Şekil 5.7: Kiriğin üstünde (1), kritik (2) ve kiriğin altında (3) konsolide edilmiş numunelerin kesme mesafesi - kuvvet eğrileri [17]

Amacı; deneme-yanılma yoluyla kritik olarak konsolide edilmiş numune elde etmek olan bu deneme testleri optimizasyon olarak adlandırılır. Optimizasyon, her ön-kesme normal gerilme seviyesi için tekrarlanmalıdır.



Şekil 5.8: Numunenin sıkıştırma derecesine bağlı olarak yazıcıdan alınmış bir kayıt (Malzeme: Kalker, nem: %0.04, ön-kesme normal gerilmesi: 23.69 kPa)

Yazıcıdan alınan çıktının (mesafe-kuvvet) düzgün bir eğri olması gerekmez, kesme düzlemlerinin oluşumu nedeniyle çeşitli düzensizlikler içerebilir. Kritik konsolidasyon durumlarını tanımlamak için gerilme-yol kayıtlarını açıklamakta biraz deneyim gereklidir. Bunun için kritik konsolidasyonun altında ve üstünde birer numune belirgin olarak elde etmek ve sonra kritik konsolidasyon için arada bir durum seçmekte fayda vardır (Kritik durumun üstünde olan durumdan ziyade altında olana yakın bir durum seçme eğilimde olmak gerekir). Bazı malzemelerle kritiğin üstünde numuneler elde etmek zordur. Bu durumda o malzeme için elde edilen eğrileri sadece kritik ve altındaki durumlar için muhakeme etmek gerekir.

5.2.1.7 Kesme Testi

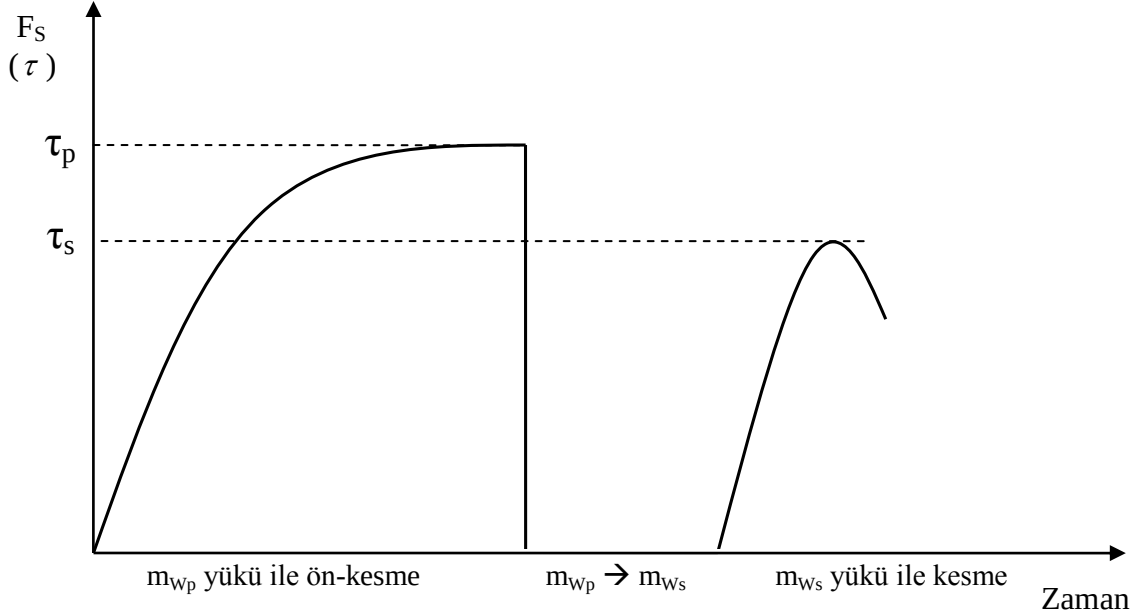
Optimizasyon testleri, her ön-kesme normal gerilme seviyesindeki kritik olarak konsolide olabilen numunelerden hareketle sıkıştırma için gerekli normal gerilme değerini ve çevirme sayılarını verir (uygun konsolidasyon yükü&çevirme sayısı ikilisi). Bunun sonucunda gerçekleştirilecek olan her kesme testiyle akma sınırı hattı üzerinde bir nokta elde edilir. Kesme testi iki kademedен oluşur. Bunlardan ilki, optimizasyonla kritik olarak konsolide edilmiş numunenin hazırlandığı ve kesme hücresinde kararlı hal akışının sağlandığı “ön-kesme” kademesidir. İkinci kademede (kesme), seçilen bir normal gerilme değeri için ($m_{ws} < m_{wp}$) kesme gerilmesi (malzemenin akması için gerekli gerilme) değeri belirlenir.

Ön-kesme :

Seçilmiş olan ön-kesme normal gerilmesinde yaklaşık olarak kritik konsolide edilmiş numune hazırlandıktan sonra test başlatılır. Zamanla kesme gerilmesi artar ve kararlı hal değerine (τ_p) ulaşır (Şekil 5.9). Bu kesme gerilmesi kesme hücresinde nispeten kısa bir kesme mesafesi boyunca ($\sim 0.5\text{mm}$) devam ettirilir ve sabitlenen bu değer belirlenir. Daha sonra kuvvet ölçüm ucunun ileri hareketi durdurulur ve ucun dirsek ile bağlantısı kopana kadar geri hareket ettirilir (Kesme kuvveti sıfıra düşer).

Kararlı hal kesme gerilmesi (τ_p) kısa bir kesme mesafesinden sonra hatta kesme halkası ile taban tamamıyla üst üste gelmeden önce elde edilebilir. Bazı malzemelerle kararlı hal eldesi için daha büyük bir kesme mesafesi gerekebilir. Bununla birlikte, kararlı hal kesme gerilmesine mevcut toplam kesme mesafesinin maksimum $\frac{3}{4}$ ' ünden daha az bir mesafede ulaşılmalıdır. Çünkü daha sonraki mesafe kesme işlemi için olacaktır. Ön-kesmeden sonra elde edilen τ_p değerlerinin

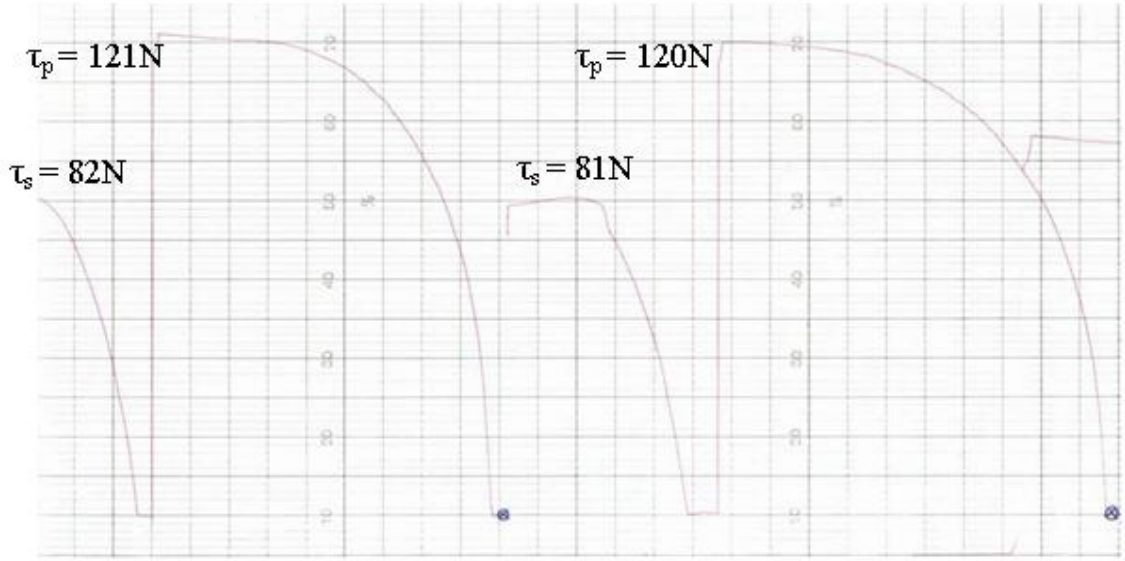
birbirine yakınlığı konsolidasyon işleminin tekrarlanabilirliğinin bir göstergesidir. Doğru olarak konsolide edilmiş numunelerle ayrı ayrı bulunan kararlı hal kesme gerilmesi değerleri (seçilmiş olan ön-kesme normal gerilmesi için) ortalama kararlı hal değerinden $\pm 5\%$ ’ ten fazla sapmamalıdır. Bazı özel malzemelerde bu tolerans sağlanamayabilir.



Şekil 5.9: Mesafe - gerilme eğrileri (Ön-kesme ve kesme) [17]

Kesme :

Ön-kesme işleminden sonra ağırlık(lar) seçilen kesme normal gerilme değerini karşılayacak şekilde askının üzerinden alınır(lar) ($m_{wp} \rightarrow m_{ws}$). Kesme işlemi motorun açılarak kuvvet ölçüm ucunun ileri doğru hareketiyle tekrar başlatılır. Kesme gerilmesi artarak bir maksimumdan (τ_s) geçer, daha sonra da azalır (Şekil 5.9). Kesme işlemi, belirgin bir kesme düzlemi oluşturmak için hücrenin kat edeceği tüm mesafe boyunca devam ettirilebilir. τ_s değeri, seçilen ön-kesme normal gerilmesinde belli bir kesme normal gerilmesi için kırılma anındaki (malzemenin akması için gerekli) kesme gerilmesidir (akma sınırı hattı üzerinde kesme noktası). Kesme işleminden önce normal gerilmeyi azaltırken, askıdan ağırlıkların gerekli ağırlık kalana kadar çıkarılması önerilir. Eğer test düşük normal gerilme seviyelerinde gerçekleştirilirse, askı olmadan ağırlıkların kapak üzerine direkt olarak yerleştirilmesi gerekebilir. Her durumda ağırlıklar nazık bir biçimde çıkarılıp yerleştirilmelidirler. Ön-kesme ve kesme işlemlerinde yazıcıdan alınmış olan bir kayıt Şekil 5.10’ daki gibi olacaktır.



Şekil 5.10: Ön-kesme ve kesme işlemindeki yazıcıdan alınmış bir kayıt (Malzeme: Kalker, nem: %0.04, ön-kesme normal gerilmesi: 23.69 kPa, kesme normal gerilmesi: 14.42 kPa, yazıcı çıkışı: 2V)

Her kesme testinden sonra numunenin tüm yığın yoğunluğu numunenin taban, kesme halkası ve kesme kapağı ile birlikte tartılmasıyla belirlenebilir. Tabanın, halkanın ve kapağın ağırlıkları bilindiğinden, numunenin tüm yığın yoğunluğu (ρ_b) hesaplanabilir. Kesme testinden sonra belirlenen yığın yoğunluğu değeri, numune hazırlamanın tekrarlanabilirliğinin bir göstergesidir.

5.2.1.8 Kesme Gerilmesi Değerlerinin Düzeltilmesi

Bütün ön-kesme kesme gerilmesi (τ_p) değerleri verilen bir ön-kesme normal gerilmesi değeri için ideal olarak aynı olabilir. Bu durum eğer numune tamamen homojen ve numune hazırlama işlemi de tamamıyla tekrarlanabilir olsaydı gerçekleşirdi. Bununla birlikte, deneysel sonuçlardaki farklılık kaçınılmaz olduğundan dolayı τ_p değerleri birbirinden farklı olacaktır ve bu farklılık da kesme gerilmesi (τ_s) değerlerini etkileyecektir.

Farklılığı minimize etmek için, bütün ölçülmüş olan kesme gerilmesi (τ_s) değerleri, τ_p değerlerindeki farklılıklar hesaba katılarak düzeltilebilir. Bu empirik yöntemde, ölçülmüş olan τ_s değerlerinin düzeltilecek olan değerleri (τ_s') aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenir:

$$\tau_s' = \tau_s \frac{\bar{\tau}_p}{\tau_p} \quad (5.3)$$

τ_s' : Kesme normal gerilme değeriindeki düzeltilmiş kesme gerilmesi

τ_s : Kesme normal gerilme değeriindeki kesme gerilmesi

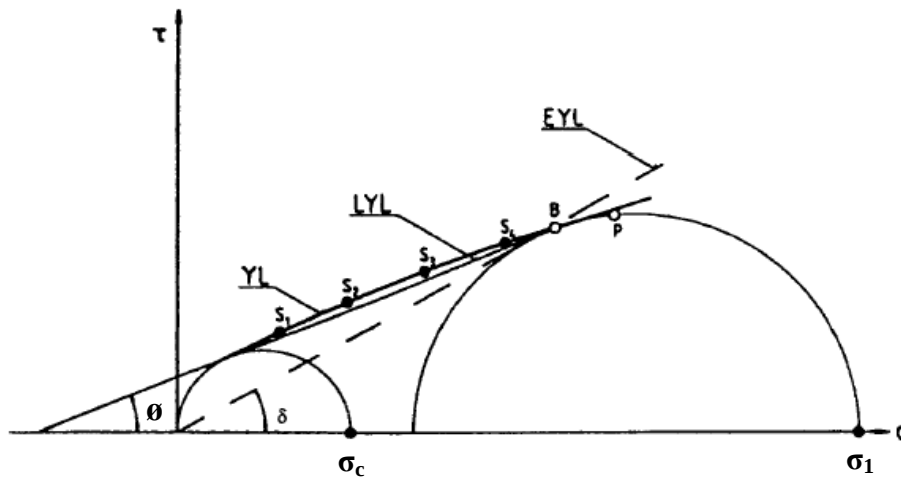
$\bar{\tau}_p$: Ön-kesme kesme gerilmesi değerlerinin ortalaması

τ_p : Ön-kesme normal gerilme değeriindeki kesme gerilmesi

Yapılan bu düzeltme işleminde, konsolidasyon yöntemindeki farklılıkların kesme gerilmesi değerlerinde (τ_s) farklılıklar oluşturduğu ve bunun da ona karşılık gelen ön-kesme kesme gerilmesindeki (τ_p) farklılıkla orantılı olduğu varsayımı yapılır.

5.2.1.9 Kesme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kesme testlerinin sonuçları Şekil 5.11' de verildiği gibi σ - τ koordinatlarında gösterilirler. İçi boş noktayla gösterilen P noktası (σ_p , τ_p) ön-kesme noktasıdır, diğer noktalar (S_1 , S_2 , S_3 , S_4) ise o ön-kesme noktası için mevcut kesme noktalarıdır (σ_s , τ_s). Bir ön-kesme noktasına ait olan kesme noktaları düzgün bir çizgi (veya bazı durumlarda doğru) ile birleştirilirler ve bu doğru akma sınırı hattını (YL) verir. Bu doğru P noktasına kadar uzatılırsa, P noktasının doğrunun üzerinde olduğu veya altında kaldığı görülür. Bu durumda, elde edilen kesme noktalarının geçerli olduğu söylenebilir ve elde edilen doğru sonraki hesaplamalarda kullanılabilir. Eğer doğru P noktasının altında kalıyorsa, P noktasından geçecek şekilde yeni bir doğru elde etmek gerekir.



Şekil 5.11: Kesme testi sonuçlarının gösterilmesi [34]

Orijinden geçen ve doğruya teğet olan bir Mohr çemberi çizilir. Bu çemberin σ -eksenini kestiği nokta sınırlanmamış akma gerilmesini (σ_c) verir (YL için doğru

yaklaşımı yapıldığında daha yüksek σ_c değerlerinin elde edileceği açıktır). İkinci bir Mohr çemberi ise, P noktasından geçip doğruya teğet olacak şekilde çizilir. Bu çemberin σ -eksenini kestiği üstteki nokta büyük konsolidasyon gerilmesine (σ_1) karşılık gelir. Böylelikle, bir akma sınırı hattından bir çift σ_1 - σ_c değeri elde edinilmiş olunur.

Akma sınırı hattı normal olarak az da olsa yukarı doğru konveks şekilde bir kavislilik gösterebilir. Ancak, birçok katı malzeme için düz bir doğru yaklaşımı yapmak yeterlidir.

Akma sınırı hattıyla σ -ekseni arasındaki açı malzemenin σ_1 değerindeki iç sürtünme açısıdır (ϕ). Lineer bir yaklaşım yapılmadığı durumda, bu açı değeri lineerleştirilmiş akma sınırı hattından (LYL) bulunur. Bu akma sınırı hattı da yine her iki Mohr çemberine teğettir.

Orijinden geçip büyük Mohr çemberine teğet olan düz bir doğru etkin akma sınırı hattını (EYL) verir. Bu doğrunun eksenle yapmış olduğu açı da etkin iç sürtünme açısıdır (δ). Belirli bir ön-kesme gerilme değerindeki σ_1 değeri için ortalama bir yığın yoğunluğu (ρ_b) da belirlenebilir.

Sonuç olarak; belirlenen σ_1 değerlerine karşılık σ_c , ϕ , δ , ρ_b değerleri elde edilir. Çeşitli gerilme seviyelerinde ölçümleri yaparak bu değerlerin σ_1 ' e olan bağımlılığı bulunabilir. σ_c ' nin σ_1 ' e olan bağımlılığı akış fonksiyonu (FF) olarak adlandırılır.

5.2.2 Duvar Sürtünmesi için Kesme Testi

5.2.2.1 Duvar Sürtünmesi Normal Gerilme Seviyelerinin Seçimi

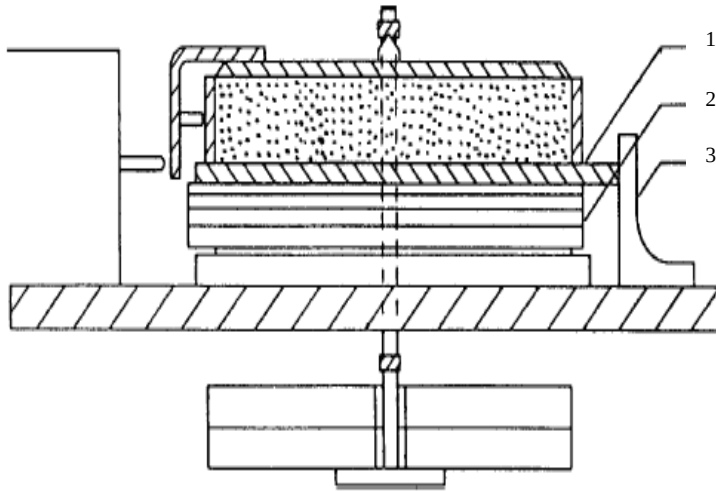
σ_{w1} ' den σ_{w6} ' ya kadar 6 adet duvar sürtünme normal gerilme seviyeleri seçilir, σ_{w1} en küçük normal gerilme değeridir. En yüksek normal gerilme olan σ_{w6} yaklaşık olarak ikinci ön-kesme normal gerilme ($\sigma_{p,2}$) değerindeki büyük konsolidasyon gerilmesine ($\sigma_{1,2}$) eşittir. En küçük normal gerilme σ_{w1} normal olarak ağırlıklar olmadan sadece ağırlık askısını içerir.

Yukarıda belirtilen normal gerilme seviyelerine göre uygun ağırlıklar daha önce de anlatıldığı gibi seçilecektir.

5.2.2.2 Malzeme ve Duvar Numunesinin Hazırlanması

Duvar malzemesi standart kesme hücresindeki kullanım için yaklaşık 120×120 mm boyutlarında olmalıdır. Duvar malzemesi numunesi testten önce yıkanmalı ve kurulanmalıdır. Yıkamadan sonra yüzeyine çıplak ellerle dokunulmamalıdır. Duvar malzemesinin yüzeyi teste başlamadan önce test edilecek malzeme ile ovuşturulmalıdır.

Duvar malzemesinin (1) üst yüzeyinin Şekil 5.12' de gösterildiği gibi kuvvet ölçüm ucuyla aynı düzleme gelmesi sağlanır. Bunun için, bir önceki düzendeki çıkarılan parçaların (alt kısım ve hücre tabanı) yerine uygun seviyeyi sağlayacak şekilde diğer duvar malzemeleri (çalışılan duvar malzemesi en üstte olacak şekilde) yerleştirilir (2). Halka, duvar numunesi üzerine konumlandırma vidalarına karşı ayarlanarak yerleştirilir. Duvar numunesinin konumu, ölçüm ucu tarafında kesme halkasının içini tam örtecek şekilde ayarlanmalıdır. Bu durum, halkanın duvar üzerinde maksimum mesafede yol alabilmesine olanak verir. Duvar numunesinin konumu da ayrıca sabitlenmelidir (3).



Şekil 5.12: Duvar testi için deney düzeneği [34]

Kalıp halkası, kesme halkası üzerine yerleştirilir ve meydana gelen hücre katı malzemeye doldurulur. Malzemenin fazlası kalıp halkasının üst tarafından sıyrılarak alınır. Sıkıştırma kapağı malzemenin üzerine, ağırlık askısı da ağırlıklarla beraber (σ_{w6} normal gerilme değerine karşılık gelecek şekilde) kapağın üzerine konulur. Numuneyi homojenize etmek için sıkıştırma kolunu kullanarak kapak sıkıştırmaya tabii tutulur. Çevirme sırasında kalıp ve kesme halkalarının serbestçe dönmesine izin

verilmelidir. Konsolidasyondan sonra ağırlıklar askıyla beraber dikkatlice kapağın üstünden alınırlar. Kapak hafifçe tutularak kalıp halkası çıkartılır. Kapak da daha sonra vidaların yönünde kaydırılarak hücrenin üzerinden alınır ve kekleşmiş malzeme hücrenin üst tarafından sıyrılır. Kesme testindeki numune hazırlamak için olan aynı yöntem ve önlemler burada da geçerlidir.

Konsolidasyondan sonra, sıkıştırılmış olan malzemenin seviyesi kesme halkasının üst kısmının altında kalıyorsa, daha önce de bahsedildiği gibi hücrenin yeniden doldurulması gerekecektir.

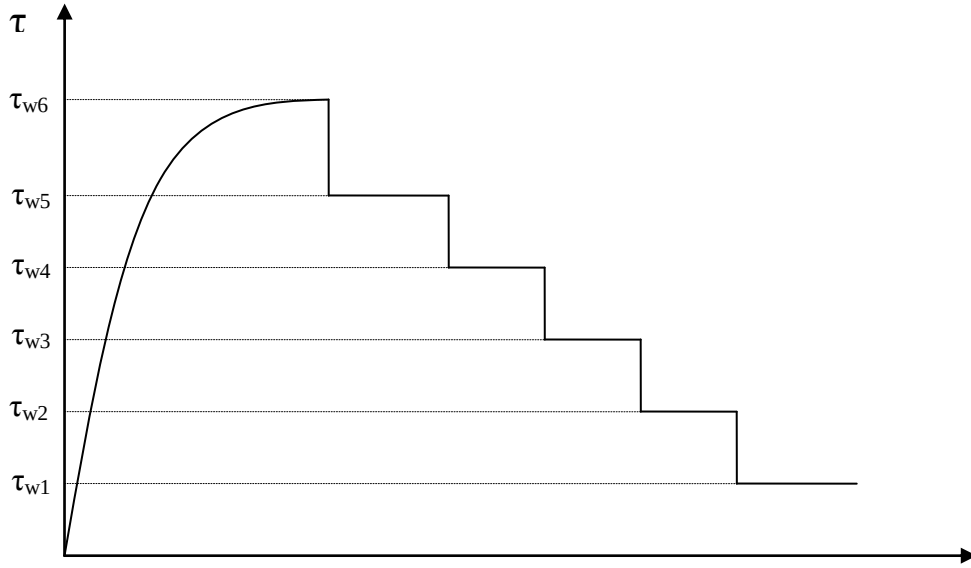
5.2.2.3 Duvar Sürtünme Testleri

Malzemenin üzerine duvar testleri için olan kapak yerleştirilir ve σ_{w6} normal gerilmesine karşılık gelen ağırlıklar askıyla beraber kapağın üzerine konulur (σ_{w6} değerinin hesaplanmasında askının ağırlığı da dâhil edilir). Ağırlıklar öyle seçilir ki bir ağırlığın (veya ağırlıkların) çıkarılmasıyla normal gerilme değeri kademeli olarak $\sigma_{w(i+1)}$ ' den σ_{wi} ' e azaltılmış olur. Halka çevrilir ve duvar malzemesi üzerinde sürünmesini (duvar malzemesine temasını) önlemek için hafifçe yukarı kaldırılır. Daha sonra kuvvet ölçüm ucunu harekete geçiren motor ileri konuma getirilerek test başlatılır.

Kesme işlemi başlatıldığında kesme gerilmesi artmaya başlar. Kararlı hal değerine ya direkt olarak ya da bir maksimum değerden geçerek ulaşır. Maksimum kesme gerilmesi statik duvar sürtünmesinin karşılığı olurken, kararlı hal değeri ise kinematik duvar sürtünmesiyle ilgilidir. Kesme gerilmesi τ_{w6} sabit bir değere ulaşınca, ağırlık(lar) normal gerilme σ_{w5} değerine azaltılınca kadar askıdan çıkartılırlar. Ağırlıkların çıkartılması sırasında ucun ileriye doğru hareketi devam ettirilir (τ_{w6} kesme gerilmesi değeri kaydedilmez). Kesme gerilmesi tekrar sabit bir değere ulaşınca bu andaki τ_{w5} kaydedilir ve normal gerilmeyi σ_{w4} ' e indirmek için ağırlıklar yine çıkartılır. Kesme gerilmesi tekrar sabitlendiğinde τ_{w4} kaydedilir. Bu yöntem, seçilen diğer normal gerilme değerleri için σ_{w1} ' e kadar devam ettirilir (Şekil 5.13). Duvar testi için yazıcıdan alınmış olan bir kayıt da ayrıca Şekil 5.14' de gösterilmiştir.

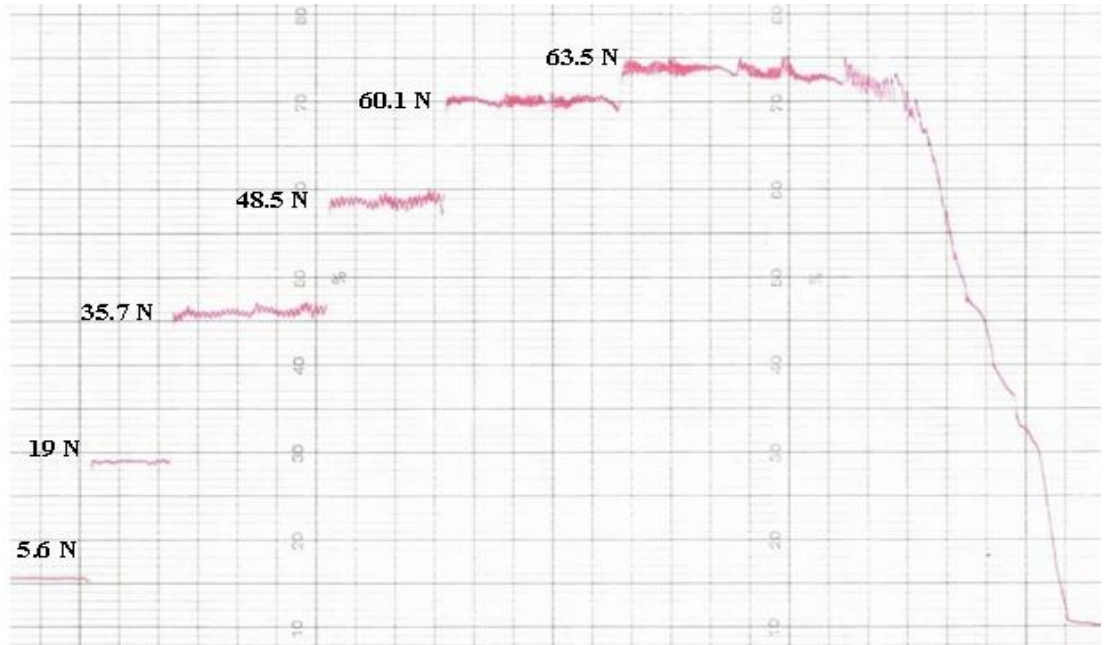
Eğer motorun ittirdiği uc bütün normal gerilme değerleri test edilmeden önce hareket mesafesinin sonuna ulaşırsa (σ_{wi} değerinde), uc geriye çekilir. Halka, konumlandırma vidalarına doğru dikkatlice geriye itilerek ilk konumuna getirilir. Normal gerilme

$\sigma_{w(i+1)}$ değerine yükseltilerek teste devam edilir ve tekrarlanan ilk okuma ($\tau_{w(i+1)}$) ihmal edilir.



Şekil 5.13: Duvar sürtünme testi için kesme gerilmesi kaydı

Testlerin bitiminde halkanın içindeki numune tartılarak m_B değerleri belirlenir. Duvar sürtünme testleri katı malzemenin yeni numuneleriyle kullanılan her duvar malzemesi için 4 defa tekrarlanır ve elde edilen kesme gerilmelerinin ortalamaları alınır.



Şekil 5.14: Duvar testi için yazıcıdan alınmış olan bir kayıt (Malzeme: Soda, duvar malzemesi: Paslanmaz çelik, yazıcı çıkışı: 1 V)

6. SONUÇLAR

Bu bölümde; kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri, akış parametreleri ve son olarak da bu parametrelerin tasarıma uygulanması sonucunda elde edilen silo parametreleri (boyutları) belirlenmiştir.

6.1 Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Testlerde kullanılmış olan malzemelerin bazı fiziksel özellikleri Tablo 6.1a' da verilmiştir. Deney numunelerinin nem ölçümleri numunelerin başlangıç ağırlığından kuru ağırlığını çıkararak yapılmıştır. Kuru ağırlık, belirli bir miktardaki katının etüvde 105 °C' de 24 saat bekletildikten sonraki ağırlığıdır [26].

Tablo 6.1a: Kullanılan malzemelerin bazı fiziksel özellikleri

Malzeme	Nem oranı (%)	Ortalama tanecik büyüklüğü (μm)	ρ_b (g/cm ³)	ρ_c (g/cm ³)
Yalılıköy kumu	3.6	131	1.1083	1.4879
Safaalanı kumu	4	132	1.1104	1.3050
Sarıkum	7	133	1.1533	1.4046
Kalker	0.04	413	1.6596	1.9012
Dolomit	0.025	335	1.7951	2.0097
Soda	0.25	365	1.1542	1.2697
Kil	0.24	43	0.8131	1.2560

Malzemelerin ortalama tanecik büyüklükleri elek analizi sonucunda elde edilen dağılımın aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Elek analizleri elek sisteminde malzemelerin 20 dakika boyunca sabit bir devirde sarsılmasıyla yapılmıştır. Yığın yoğunluğu (ρ_b) değerleri ise malzemelerin dereceli bir mezürde tartılması (mezürün içindeki malzemeyle birlikte 2-3 cm yükseklikten 3-4 defa düşürülmesiyle) ile belirlenmiştir. Yapılmış olan testlerin sonucunda malzemelerin en yüksek konsolidasyon/sıkıştırma seviyesinde elde edilen sonuçlara göre bir yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Bu yoğunluk değeri (ρ_c) malzemelerin yığın

yoğunluğu ile tanecik yoğunluğu değerleri arasında bir değerdedir ve malzemelerin sıkıştırılabilirliğini göstermektedir.

Kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri Türkiye Şişe ve Cam Fab. A.Ş. laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları % bileşim olarak Tablo 6.1b’ de verilmiştir. Malzemelerin kimyasal içeriklerinin belirlenmesinde analiz yöntemi olarak XRF (X-Ray Fluorescence Spectroscopy) kullanılmıştır.

Tablo 6.1b: Kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları

Malzeme	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ CO ₃
Yalıköy kumu	99.23	0.20	0.05	0.18	0.01	0.04	0.06	-
Safaalanı kumu	92.45	4.03	0.06	0.04	0.04	0.02	2.35	-
Sarıkum	99.00	0.25	0.11	0.24	0.05	0.04	0.08	-
Kalker*	0.20	0.08	0.03	-	54.54	1.22	-	-
Dolomit*	0.28	0.13	0.05	-	31.96	20.50	-	-
Soda	-	-	-	-	-	-	-	99.69
Kil	78.21	14.76	0.33	0.38	0.16	-	0.08	-

* Bu malzemeler için analiz sonuçları sadece oksitler cinsinden verilmiştir, kalan kısım ise kızdırma kayıplarıdır.

Kullanılan malzemelerin yığın yoğunlukları 300 ile 2400 kg/m³ aralığında olduğundan testlerde standart boyutlu kesme hücresi (D=95 mm) kullanılmıştır.

6.2 Malzemelerin Akış Parametreleri

6.2.1 Akma Sınırı Hattının Belirlenmesi

Her malzeme için seçilen 4 farklı konsolidasyon gerilmesindeki (ön-kesme normal gerilmesi) 4’ er adet akma sınırı hattı (YL) belirlemek amaçlanmıştır. Sonuçlar açıklamalı olarak Yalıköy kumu (nem oranı: %3.6) üzerinden verilecektir.

Malzemenin yığın yoğunluğu değeri 1100 kg/m³ civarındadır. Seçilen ilk ön-kesme normal gerilme değeri 4.12 kPa’ dır. Buna göre; seçilmiş olan diğer ön-kesme normal gerilme değerleri 8.55 kPa, 17.96 kPa ve 31.8 kPa’ dır (Diğer malzemeler için seçilmiş olan ön-kesme normal gerilme seviyeleri kesme normal gerilme değerleriyle birlikte eklerde verilmiştir). Tablo 6.2’ de öncelikle 4 adet ön-kesme normal gerilme seviyeleri için daha önceden belirlenmiş olan kesme normal gerilme

değerlerindeki yazıcıdan okunan kesme yükü sonuçları verilmiştir. İlk değerler ön-kesme normal gerilme değerindeki kararlı hal kesme gerilmesi (τ_p) değerleriyken ikinci değerler kesme normal gerilme değerlerindeki kesme gerilmeleridir (τ_s). Testler 2 defa tekrarlanmış ve sonuç olarak bunların ortalaması alınmıştır. Bu değerlere karşılık gelen kesme gerilmesi değerleriyle (5.3) numaralı eşitliğe göre hesaplanan düzeltilmiş kesme gerilmesi değerleri de ayrıca verilmiştir. Bulunmuş olan kesme gerilmesi değerlerinin diğer kararlı hal kesme gerilmesi sonuçlarına göre nasıl düzeltildiğine bir örnek verilmek istenirse, 8.55 kPa ön-kesme normal gerilme değerinde elde edilen kararlı hal kesme gerilmelerinin ortalaması:

$$\bar{\tau}_p = \frac{(6.28 + 6.25 + 5.95 + 6.35)}{4} = 6.21 \text{ kPa} \quad (6.1)$$

Buna göre; 3.02 kPa normal gerilme değerinde kesme testi sonucu elde edilen 3.23 kPa kesme gerilmesinin düzeltilmiş değeri;

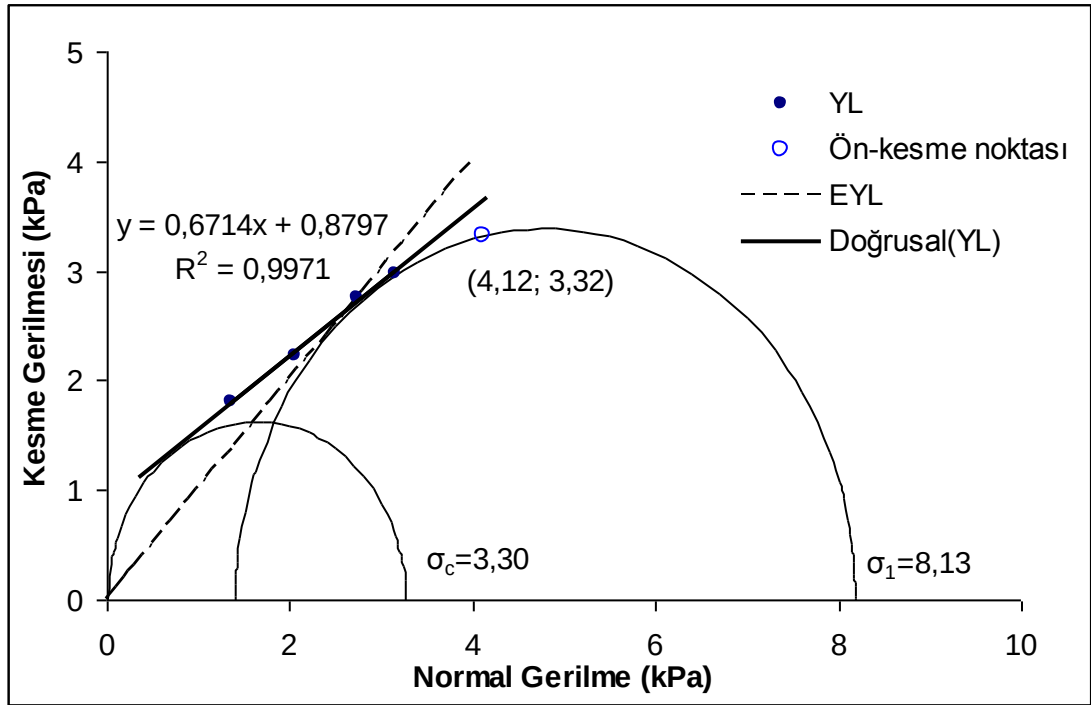
$$\tau'_s = 3.23 \times \frac{6.21}{5.95} = 3.37 \text{ kPa} \quad (6.2)$$

olacaktır (Tablo 6.2).

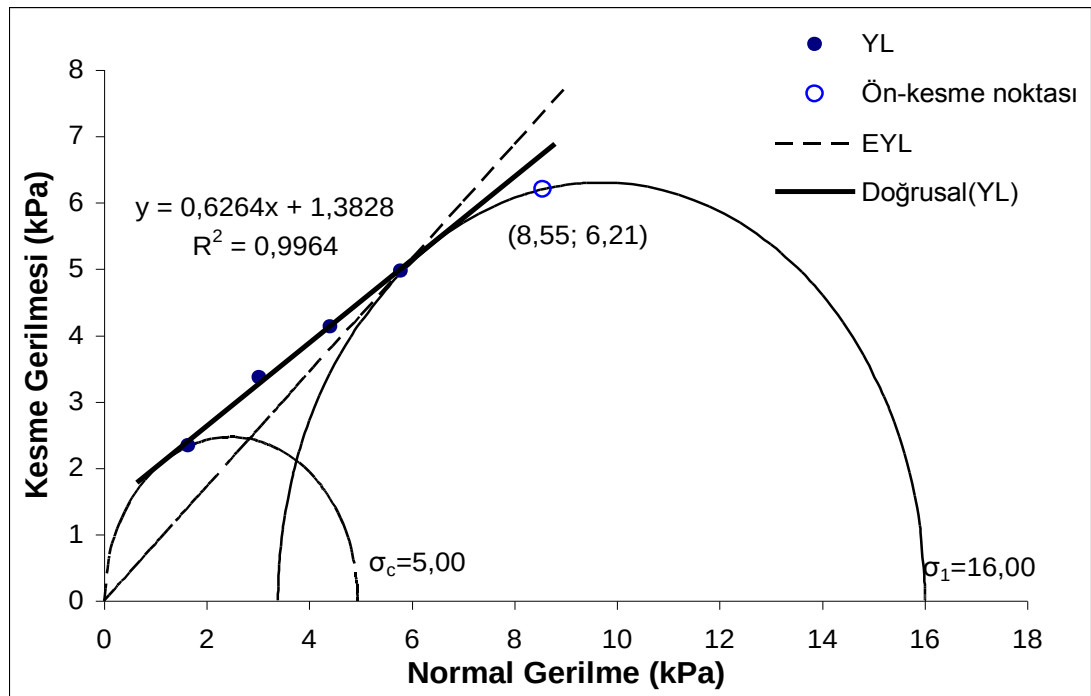
Tablo 6.2' deki sonuçlara göre, her bir ön-kesme normal gerilme seviyesi için normal gerilme değerlerine karşılık düzeltilmiş kesme gerilmesi değerleri grafiğe geçirilirse Yalıköy kumu için akma sınırı hatları (YL) Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4' deki gibi elde edilir. İçi boş noktayla gösterilen ön-kesme noktası (σ_p , τ_p) olurken diğer 4 nokta kesme noktaları (σ_s , τ_s) olup akma sınırı hatlarının çiziminde kullanılırlar. Bu grafiklerde akma sınırı hattının yanı sıra etkin akma sınırı hattı (EYL) da gösterilmiştir. Başka parametrelerin bulunmasını sağlayacak olan büyük ve küçük Mohr çemberleri de tanımlarına göre uygun biçimde çizilmişlerdir.

Tablo 6.2: Yalıköy kumu (%3.6 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

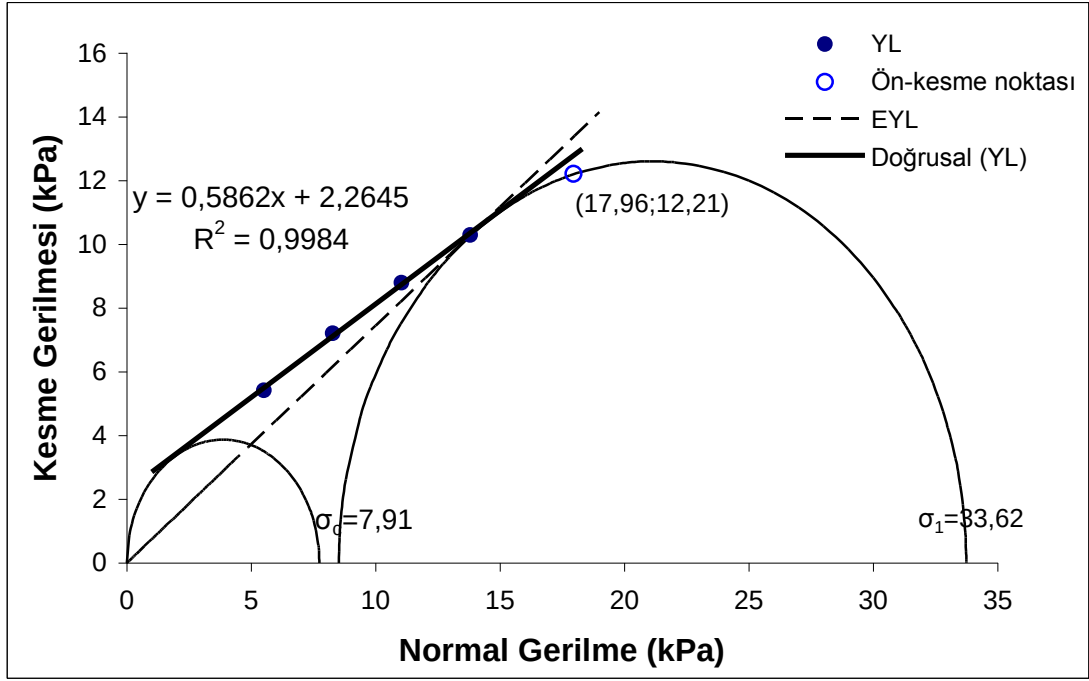
4.12 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	29.24	23.65	4.12	3.34	3.32
	22.37	21.25	3.16	3.00	2.98
2	29.24	23.50	4.12	3.31	3.32
	19.43	19.50	2.74	2.75	2.75
3	29.24	23.50	4.12	3.31	3.32
	14.53	15.75	2.05	2.22	2.22
4	29.24	23.50	4.12	3.31	3.32
	9.62	12.75	1.36	1.80	1.80
8.55 kPa					
1	60.63	44.50	8.55	6.28	6.21
	41.01	35.70	5.78	5.04	4.98
2	60.63	44.30	8.55	6.25	6.21
	31.20	29.50	4.40	4.16	4.13
3	60.63	42.20	8.55	5.95	6.21
	21.39	22.90	3.02	3.23	3.37
4	60.63	45.00	8.55	6.35	6.21
	11.58	17.00	1.63	2.40	2.34
17.96 kPa					
1	127.34	86.00	17.96	12.13	12.21
	97.91	72.50	13.81	10.23	10.29
2	127.34	85.75	17.96	12.09	12.21
	78.29	61.75	11.04	8.71	8.79
3	127.34	86.00	17.96	12.13	12.21
	58.67	50.75	8.28	7.16	7.20
4	127.34	88.50	17.96	12.48	12.21
	39.05	39.25	5.51	5.54	5.41
31.80 kPa					
1	225.44	140.00	31.80	19.75	19.98
	176.39	123.00	24.88	17.35	17.55
2	225.44	143.50	31.80	20.24	19.98
	137.15	101.00	19.34	14.25	14.06
3	225.44	143.00	31.80	20.17	19.98
	97.91	78.30	13.81	11.04	10.94
4	225.44	140.00	31.80	19.75	19.98
	68.48	59.50	9.66	8.39	8.49



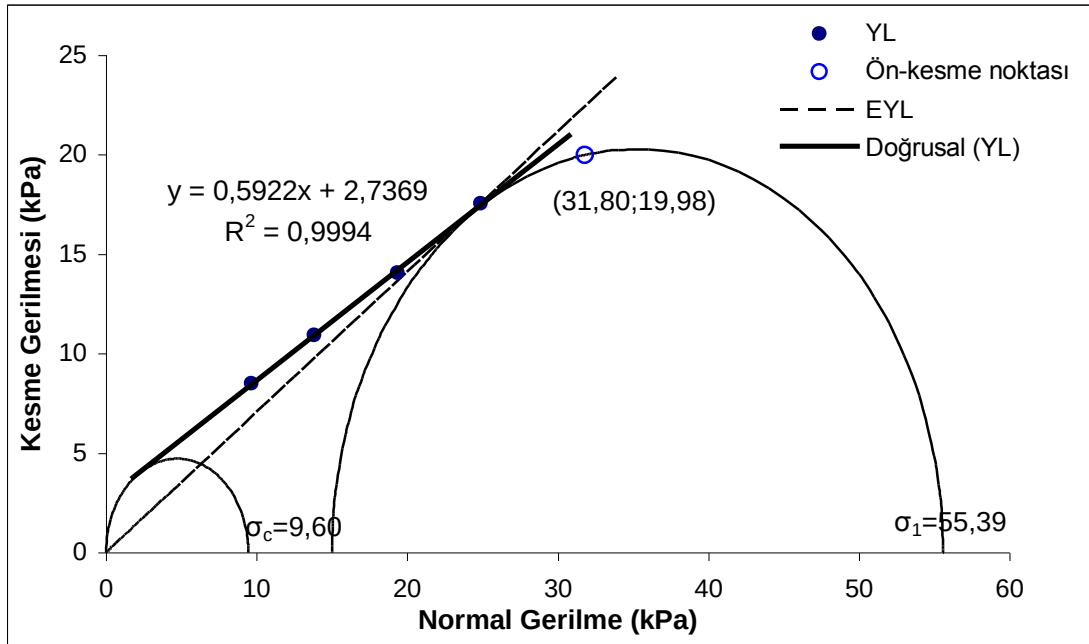
Şekil 6.1: Yalılıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 4.12 kPa)



Şekil 6.2: Yalılıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 8.55 kPa)



Şekil 6.3: Yalıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 17.96 kPa)



Şekil 6.4: Yalıköy kumu (%3.6 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 31.80 kPa)

Elde edilen kesme noktaları bir doğru ile birleştirildikten sonra ön-kesme noktasına kadar uzatıldığında, bu doğru noktanın üzerinde kalıyorsa testler sonucu elde edilen kesme noktalarının geçerli olduğu söylenebilir.

Çizilmiş olan akma sınırı hatlarından lineer regresyon modeli kullanılarak doğru denklemleri bulunmuştur ve grafiklerde gösterilmiştir. (3.9) numaralı eşitliğe göre bu

denklemlerden malzemeye ait kohezyon (C) ve iç sürtünme açısı (ϕ) değerleri seçilen normal gerilme seviyeleri için hesaplanmıştır ve diğer malzemelerle elde edilen sonuçlarla birlikte Tablo 6.3’ de verilmiştir. Diğer malzemelere ait sonuçların detayları Ek-C’ de verilmiştir.

Tablo 6.3: Bütün malzemeler için seçilen ön-kesme normal gerilme seviyelerindeki akma sınırı hatlarından bulunan akış parametreleri

Malzeme	Nem Oranı (%)	Ön-kesme Normal Gerilmesi (kPa)	C (kPa)	$\tan \phi$	İç Sürtünme Açısı, ϕ (°)
Yalıköy kumu	3.6	4.12	0.8797	0.6714	33.9
		8.55	1.3828	0.6264	32.1
		17.96	2.2645	0.5862	30.4
		31.80	2.7369	0.5922	30.6
Yalıköy kumu	1	4.11	0.8192	0.6074	31.3
		8.54	1.0619	0.605	31.2
		17.96	1.6739	0.651	33.1
		31.79	2.5279	0.6	31.0
Yalıköy kumu	14	4.12	1.1372	0.6206	31.8
		8.55	1.4473	0.6246	32.0
		17.96	2.1708	0.59	30.5
		31.80	2.7968	0.6021	31.1
Kalker	0.04	3.00	0.2121	0.7703	37.6
		6.66	0.4388	0.7527	37.0
		12.07	0.6937	0.7458	36.7
		23.69	0.9304	0.7424	36.6
Dolomit	0.025	3.01	0.3436	0.7138	35.5
		6.69	0.6461	0.7057	35.2
		12.08	0.9015	0.7116	35.4
		23.71	1.1408	0.7119	35.5
Sarıkum	7	2.92	0.6631	0.6308	32.2
		5.62	1.1753	0.4986	26.5
		10.76	1.5427	0.5572	29.1
		20.87	2.3209	0.5752	29.9
Safaalanı kumu	4	2.91	0.6272	0.5462	28.6
		5.62	0.8791	0.5633	29.4
		10.75	1.2078	0.6042	31.1
		20.85	1.6042	0.6194	31.8
Soda	0.25	2.92	0.1881	0.7483	36.8
		6.59	0.3435	0.7638	37.4
		11.98	0.5318	0.7499	36.9
		23.61	1.0659	0.7535	37.0
Kil	0.24	2.69	0.8357	0.5747	29.9
		5.19	1.4238	0.5504	28.8
		10.73	2.4255	0.5474	28.7
		20.84	3.8582	0.6085	31.3

Tablo 6.3' den görülebileceği gibi bir malzeme için iç sürtünme açısı değerleri farklı gerilme seviyelerinde fazla bir değişim göstermemektedir, daha önce de belirtildiği gibi yaklaşık olarak 30-40° aralığındadır. Sadece sarıkum için 2. gerilme seviyesindeki değer diğer 3 değerden farklı olarak bulunmuştur. Kalker, dolomit ve soda için iç sürtünme açısı değerleri diğer malzemelerden farklı olarak daha yüksek değerlerdedir. Bu değerler malzemelerin akabilirliği hakkında herhangi bir fikir veremese de, nem oranı düşük olan ve akışı kolay gibi görünen malzemelerde bu açı değerlerinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

Tablo 6.3' de malzemelerin elde edilen kohezyon değerleri artan normal gerilme değerleriyle beraber artış göstermektedir. Bunun nedeni; malzeme taneciklerinin artan yük altında sıkışması ve birbirlerine daha fazla yapışmasıdır. Aynı yük altındaki iki malzemenin kohezyon değeri daha yüksek olan malzemenin ya nem oranının diğerine göre daha fazla olduğu ya da ortalama tanecik büyüklüğünün daha az olduğu söylenebilir. Nem oranı arttıkça veya tanecik büyüklüğü azaldıkça taneciklerin birbirlerine yapışması daha kolay olacağından dolayı kohezyon değeri artış gösterir.

Katı malzeme, içerisindeki ince tanecikler tarafından kesmeye uğrar. Bu yüzden, katı içerisinde ince tanecik oranı ne kadar fazlaysa, bir başka deyişle de katının ortalama tanecik büyüklüğü ne kadar düşükse bu katılarla aynı yükler altında daha yüksek kesme kuvvetleri elde edilecektir. Bu da malzemenin akışının zor olacağı anlamına gelir. Katının kohezyonuna da ince tanecikler iri taneciklerden çok daha fazla katkıda bulunurlar. O yüzden de katıdaki ince tanecik fraksiyonu ne kadar fazlaysa kohezyon değeri de o kadar yüksektir. Nem oranı, bir malzemeyi kohesif yapabilmektedir ve sonucunda da malzemenin akışı zorlaşabilmektedir. Nem oranı arttıkça, tanecikler arasındaki kapiler kuvvetlerin artmasıyla beraber malzemenin kohezyon değeri de artar. Bu kohesif davranış, silolarda kemerlerin oluşumunu açıklamaktadır.

Hemen hemen aynı ortalama tanecik büyüklüğüne sahip sarıkum ve Safaalanı kumundan nem oranı daha yüksek olan sarıkum için aynı yükler altında daha yüksek kohezyon değerleri elde edilmiştir. Yalıköy kumu için de artan nem oranıyla birlikte kohezyon değerlerindeki artıştan söz edilebilir. Kalker ve dolomit kıyaslandığında, tanecik büyüklüğü daha düşük olan dolomit için elde edilen kohezyon değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. En düşük tanecik büyüklüğüne sahip malzeme olan kil için çok yüksek kohezyon değerleri bulunmuştur. Kohezyon değerlerine

bakılarak sadece bir malzemenin akışının diğer bir malzemeye göre daha kolay veya daha zor olacağı tahmin edilebilir.

6.2.2 Duvar Akma Sınırı Hattının Belirlenmesi

Yalıköy kumu için ikinci ön-kesme normal gerilme değerindeki ($\sigma_{p,2} = 8.55$ kPa) $\sigma_1 \cong 16$ kPa' dır. Bu yüzden duvar testlerinde başlangıç normal gerilmesi (σ_{w6}) yaklaşık olarak bu değere eşit olmalıdır. Buna göre; seçilecek olan ağırlık değeri,

$$\frac{16kN/m^2 \times 0.00709m^2}{9.81m/s^2} \cong 11.6kg \quad (6.3)$$

olarak bulunabilir. Tablo 6.4' de Yalıköy kumu (%3.6 nem) için ilk normal gerilme değerinden başlayarak seçilen 6 adet normal gerilme değerinde elde edilen kesme gerilmesi değerleri (4 testin ortalaması olarak) verilmiştir. Testlerde ilk normal gerilmeye karşı gelen kesme gerilmesi değerleri duvar akma sınırı hatlarının çiziminde kullanılmadığından dolayı kaydedilmemiştir, o yüzden bu değerler tabloda gösterilmemiştir.

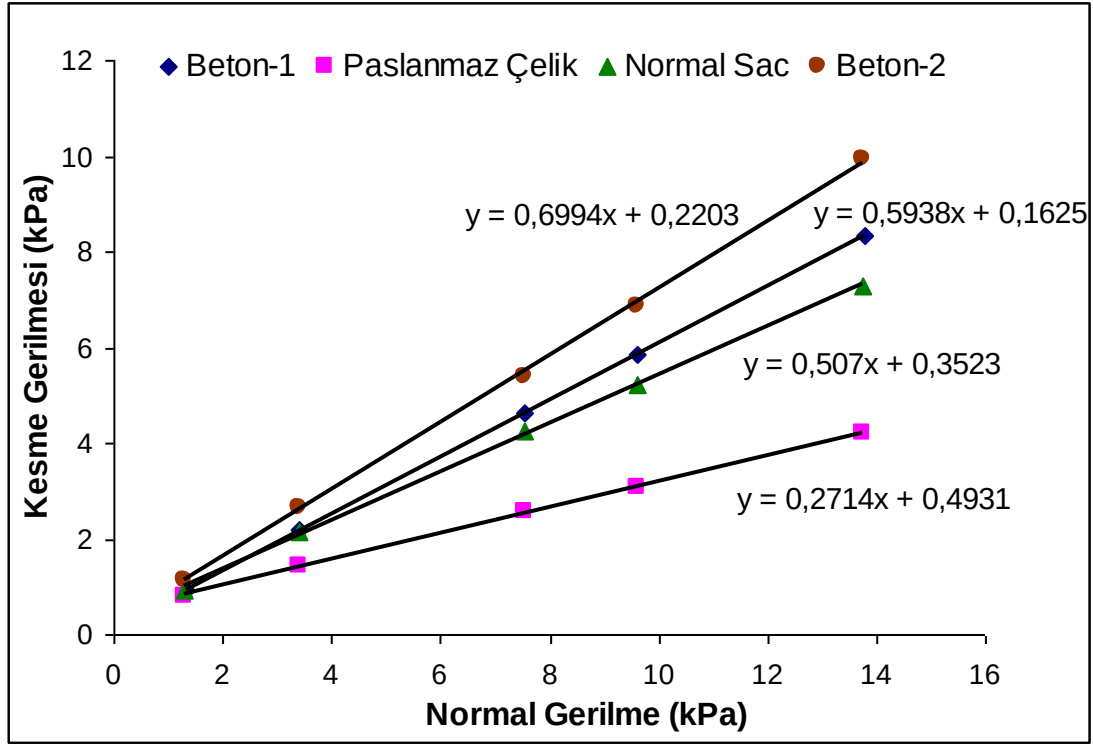
Tablo 6.4: Yalıköy kumu (%3.6 nem) için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları

Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)			
16.53 (σ_{w6})	Beton-1	Paslanmaz Çelik	Normal Sac	Beton-2
13.77	8.34	4.21	7.28	9.93
9.61	5.87	3.09	5.24	6.88
7.54	4.63	2.58	4.23	5.41
3.39	2.17	1.43	2.14	2.64
1.31	0.94	0.82	0.92	1.16

Tablo 6.4' de elde edilen değerlere göre, normal gerilme değerlerine karşılık kesme gerilmesi değerleri grafiğe geçirilirse 4 farklı duvar malzemesi üzerindeki duvar akma sınırı hatları Şekil 6.5' deki gibi elde edilir. Diğer malzemelerin farklı duvar malzemeleriyle elde edilen duvar akma sınırı hatları Ek-D' de verilmiştir.

Şekil 6.5' de Yalıköy kumuna ait farklı duvar malzemeleriyle elde edilmiş duvar akma sınırı hatları doğrular şeklinde ifade edilmiştir. Bir duvar malzemesi için testler sonucu bulunmuş olan kesme gerilmesi değerleri ne kadar büyükse duvar akma sınırı

hattının eğim değeri de o kadar fazladır; bu da akışın o duvar malzemesi üzerinden daha zor olacağına işaret etmektedir. Buna göre; Yalıköy kumu için en zor akış beton-2 duvar malzemesi üzerinde gerçekleşirken akışın en kolay olduğu duvar malzemesi de paslanmaz çeliktir. Bu sebeple; Yalıköy kumu dışındaki malzemeler için duvar sürtünme testleri akışın en zor ve en kolay durumunu temsil etmek amacıyla sadece bu iki duvar malzemesiyle yapılmıştır.



Şekil 6.5: Yalıköy kumunun (%3.6 nem) çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)

Testlerde kullanılmış olan beton duvar malzemelerinden beton-1' in yüzeyi diğerine göre daha az pürüzlü olduğundan duvar akma sınırı hattının eğimi daha düşüktür. Ayrıca, normal sac üzerindeki akışın beton-1 üzerindeki akıştan daha rahat, paslanmaz çelik üzerindeki akıştan ise daha zor gerçekleşeceği de söylenebilir. Sonuç olarak, bir duvar malzemesi üzerinde gerçekleşecek olan akışın kesin olarak nasıl olacağını belirlemek için kullanılan duvar malzemelerinin yüzey özelliklerinin bilgisine ihtiyaç duyulabilir. Ama yine de duvar malzemelerinin sadece yüzey pürüzlülüğünün kabaca gözlenmesiyle bir malzeme üzerinden akışın diğerine göre kolay veya zor olacağı tahmin edilebilir. Kullanılan duvar malzemelerinden yüzeyi en pürüzlü olan beton-2' dir ve bunu sırasıyla beton-1, normal sac ve paslanmaz çelik izlemektedir. Bu yüzden de akışın zorluk sırası yine bu şekilde olacaktır.

6.2.3 Silo Tasarımında Kullanılacak Parametrelerin Belirlenmesi

Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’ deki akma sınırı hatlarından yola çıkarak uygun Mohr çemberleri çizilmek suretiyle $\sigma_1, \sigma_c, \delta$ ve ϕ' değerleri belirlenebilir. Fakat bu değerleri belirlemek üzere 3.3.11 bölümünde bahsedilen analitik yöntemle göre bulunan formüller kullanılmıştır. σ_1, σ_c ve δ değerleri (3.15)’ den (3.19)’ a kadar olan eşitlikler kullanılarak her konsolidasyon gerilmesi için hesaplanmıştır ve Tablo 6.5’ de verilmiştir.

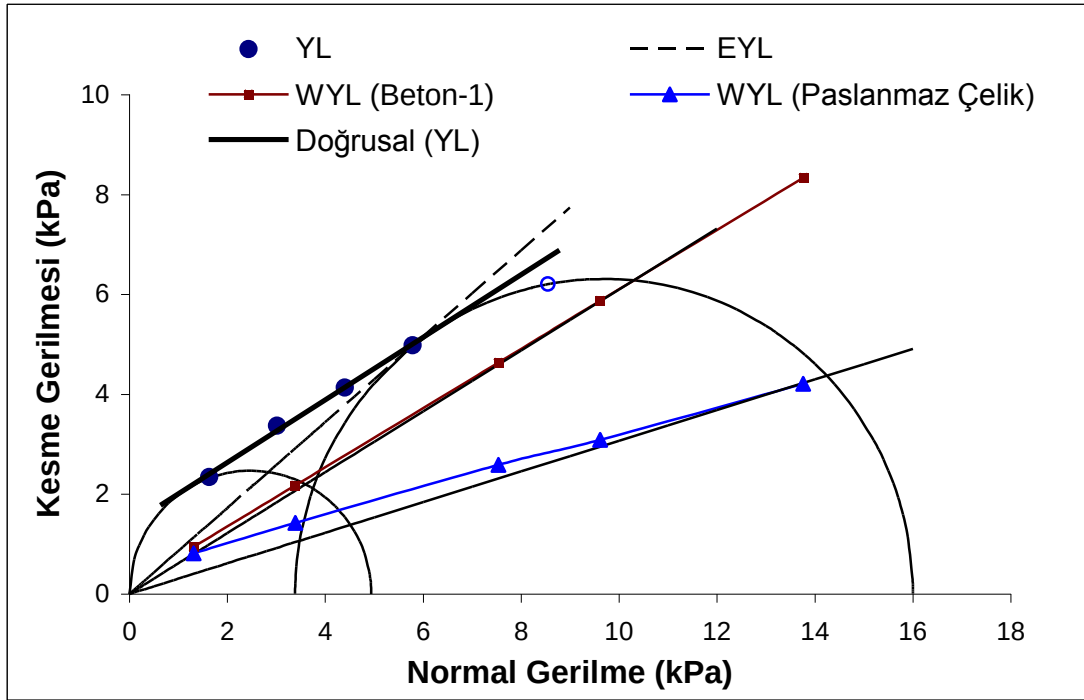
Elde edilen duvar akma sınırı hatlarının her bir akma sınırı hattı grafiğinin üzerinde gösterilmesiyle duvar sürtünme açısı değerleri elde edilir. Bu durum, örnek verilmesi bakımından Yalıköy kumu için sadece bir tane ön-kesme normal seviyesi ve iki duvar malzemesi için Şekil 6.6’ da gösterilmiştir. Diğer ön-kesme normal gerilme değerleri için de aynı çizimler yapılarak duvar sürtünme açısı değerleri bulunur. Örneğin; paslanmaz çeliğe ait duvar akma sınırı hattının (8.55 kPa) Mohr çemberini kestiği noktayla orijinden geçen doğru denklemi $y=0.3076x$ şeklindedir. Bu durumda duvar sürtünme açısı;

$$\phi' = \tan^{-1} 0.3076 = 17.1^\circ \quad (6.4)$$

olacaktır. Buna göre; Yalıköy kumu için 4 duvar malzemesiyle her ön-kesme normal gerilme seviyesindeki hesaplanmış olan bütün duvar sürtünme açısı değerleri Tablo 6.5’ de sunulmuştur. Yüksek konsolidasyon seviyelerinde, duvar akma sınırı hatlarının Mohr çemberleriyle olan kesişimini bulmak üzere elde edilen doğrular kesişim noktasına kadar uygun bir biçimde extrapole edilmek durumundadırlar. Tablo 6.5’ de ayrıca her gerilme seviyesinde testler sonucu belirlenen yığın yoğunluğu değerleri de verilmiştir.

Duvar malzemeleriyle olan kesme testlerinden elde edilen noktalardan doğru yerine ikinci dereceden bir eğri geçirildiği durumda, düşük konsolidasyon seviyelerinde (4.12 kPa, 8.55 kPa) yine aynı duvar sürtünme açısı değerleri elde edilirken yüksek konsolidasyon seviyelerinde (17.96 kPa, 31.8 kPa) daha düşük açısı değerleri bulunur. Ancak, tasarım hesaplamalarında büyük olan açısı değerlerini kullanmak (WYL’ nin doğru olduğu durum) tasarım grafiklerinde devamlı olarak kütle akış bölgesi sınırları içerisinde kalınmasını sağlayacak; bu da tasarım açısından bir güvenlik faktörü

sağlayacaktır. Bu yüzden, bütün duvar akma sınırı hatları için elde edilen noktalardan doğrular geçirilmiştir.



Şekil 6.6: Duvar akma sınırı hatlarının akma sınırı hattının olduğu grafik üzerinde gösterilmesi (Malzeme: Yalıköy kumu, nem oranı: %3.6, Ön-kesme normal gerilmesi: 8.55 kPa, Duvar malzemesi: Beton-1, paslanmaz çelik)

Tablo 6.5: Yalıköy kumu (%3.6 nem) için elde edilen akış parametreleri

σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	δ (°)	ρ_b (g/cm ³)	Duvar Sürtünme Açısı, ϕ' (°)			
				Beton-1	Paslanmaz Çelik	Beton-2	Normal Sac
8.13	3.30	45.3	1.2967	32	19	36.8	30.1
16.00	5.00	40.7	1.4055	31.4	17.1	35.6	28.2
33.62	7.91	36.8	1.4284	31	16.1	35.3	27.5
55.39	9.60	35.2	1.4879	30.9	15.8	35.1	27.3

Tablo 6.5’ de görüldüğü gibi her σ_1 değerine karşı gelen bir σ_c değeri mevcuttur ve artan σ_1 değerleriyle beraber σ_c de artış gösterir. Diğer taraftan, etkin iç sürtünme açısı değerleri artan σ_1 değerleriyle beraber azalmaktadır. Buna neden; daha önce de belirtildiği gibi, artan gerilmenin katı taneciklerinin keskin köşelerini ezerek birbirlerine bağlanmasını azaltması ve sonucunda taneciklerin birbirleri üzerinde kaymasının yani akışın kolay gerçekleşmesidir. Yığın yoğunluğu değerlerindeki

artışın nedeni de yükteki artışın etkisiyle katı tanecikleri arasındaki boşlukların azalması ve taneciklerin daha çok bir araya gelmesidir.

Duvar sürtünme açısı değerleri de görüldüğü gibi artan σ_1 değerleriyle birlikte bir azalma göstermektedir. Bunun için bir genelleme yapmak mümkün değildir. Açısı değerlerindeki farklılık duvar akma sınırı hatlarının-doğrularının kayım değerleriyle (adezyon değeri) ilişkilidir. Kayım değeri en az olan beton-1 duvar malzemesinin (Şekil 6.5) sonuçları fazla bir değişim göstermezken kayım değeri yüksek olan paslanmaz çeliğe ait sonuçların daha fazla değiştiği görülebilir. Kayım değeri sıfır değerine ne kadar yakınsa da doğrunun eğim değeri direkt olarak duvar sürtünme açısının hesaplanmasında kullanılabilir (örn: soda&beton-2), bu durumda ϕ' sabit bir değerdedir.

Tablo 6.5' deki çıkan sonuçlara göre üzerinde akışı zor olacak beton-2 duvar malzemesinin açısı değerlerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, siloda akış kolaylığı sağlayacak olan paslanmaz çeliğe ait açısı değerleri düşük çıkmıştır. Bu da pürüzlü yüzeylerle birlikte daha büyük duvar sürtünme açısı değerleri elde edilirken pürüzlülüğü az olan yüzeylerle daha düşük değerlerin elde edileceğine işaret eder. Yüksek duvar sürtünme açısı değerleriyle bir siloda kütle akış sağlamak üzere daha küçük silo duvar açıları elde edilecektir. Bunun sonucunda daha dik silolar kullanma ihtiyacı ortaya çıkacaktır. Bu yüzden, kullanılan bir malzeme için düşük duvar sürtünme açısı değerleri sağlayacak olan silo duvar malzemelerinin tercih edilmesinde fayda vardır.

Yalıköy kumunun düşük (%1) ve yüksek (%14) nem içeriklerinde elde edilmiş olan sonuçları ayrıca Tablo 6.6' da gösterilmiştir. Yalıköy kumunun sadece bu nem içeriklerindeki akışının nasıl olacağı tespit edilmek istendiğinden, bunlar için duvar kesme testleri yapılmamıştır. O yüzden de Yalıköy kumunun farklı nem içeriklerine ait duvar sürtünme açısı değerleri yoktur. Ayrıca, konsolidasyon seviyelerine göre değişen yığın yoğunluğu değerleri de tabloda verilmemiştir.

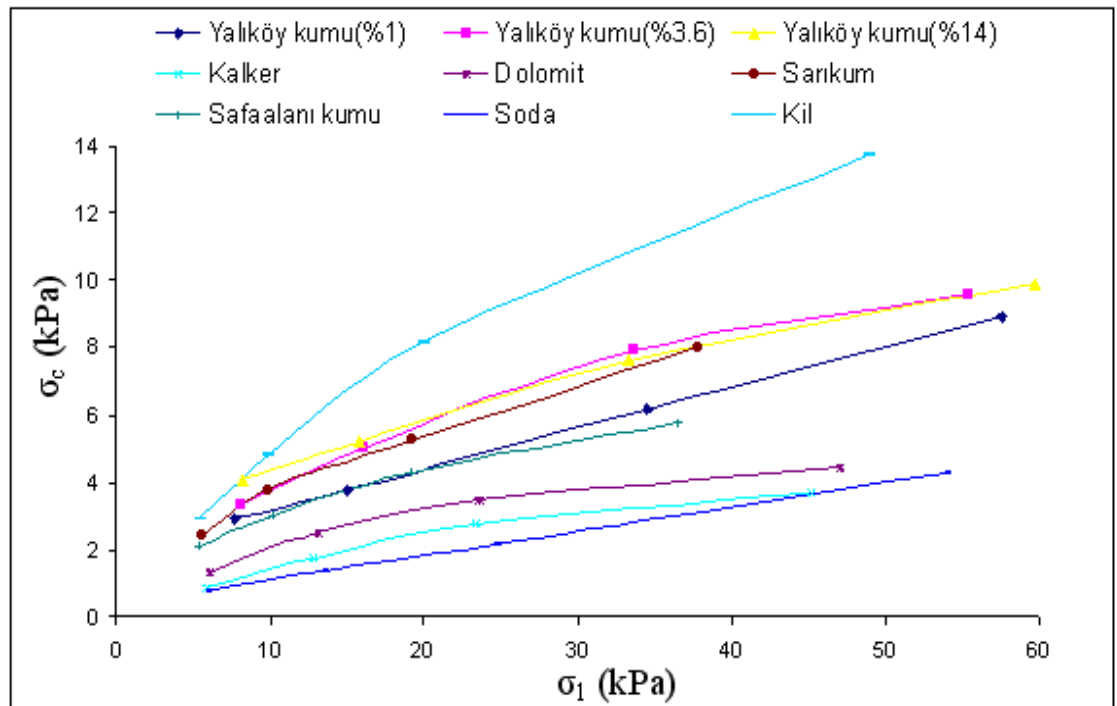
Tablo 6.6: Yalıköy kumunun farklı nem içerikleri için elde edilen akış parametreleri

σ_1 (kPa)		σ_c (kPa)		δ (°)	
%1 nem	%14 nem	%1 nem	%14 nem	%1 nem	%14 nem
7.6929	8.2510	2.9118	4.0880	42.2	46.9
15.0559	15.7690	3.7668	5.2209	38.0	41.2
34.4961	33.2895	6.1736	7.6024	37.7	36.7
57.5558	59.6654	8.9288	9.8967	35.0	35.4

Tablo 6.6’ daki sonuçlara göre nem oranındaki artışla beraber sınırlanmamış akma gerilmesindeki bir artıştan bahsedilebilir. Ancak, Yalıköy kumunun orijinal nem içeriğindeki sonuçlarına (Tablo 6.5) bakıldığında, yüksek nem oranındaki bazı değerler orijinal nemdeki sonuçlara göre düşük çıkmıştır. Etkin iç sürtünme açısı değerlerine bakıldığında da, artan nem oranının bu açı değerlerini az da olsa arttırdığı görülebilir. Kuru olan malzemeler için bu değerler daha da düşük çıkabilmektedir.

6.2.3.1 Akış Fonksiyonu

Tablo 6.5 ve 6.6’ daki sonuçlara göre σ_1 ile σ_c arasındaki ilişki o malzemeye ait akış fonksiyonunu verecektir. Kullanılan bütün malzemeler için elde edilen akış fonksiyonları Şekil 6.7’ de verilmiştir. Yalıköy kumu dışındaki diğer malzemelere ait akış fonksiyonlarının çiziminde kullanılan değerler Ek-E’ de verilmiştir.



Şekil 6.7: Kullanılan malzemelere ait akış fonksiyonları

Şekil 6.7' deki sonuçlara göre eğim değeri yüksek olan veya diğerlerine göre akış fonksiyonu daha yukarıda olan malzemenin akışı en zor olacaktır. Yukarıdan aşağıya doğru gittikçe de malzemelerin akışı kolay gerçekleşecektir. Bu nedenle, test edilen malzemeler arasında akışı en zor olan malzeme kil, en kolay olan ise sodadır. Kilin akışının en zor olması tanecik boyutunun diğer malzemelere göre oldukça küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda, küçük tanecik boyutunun akış üzerinde olumsuz bir etkisi olduğundan bahsedilebilir. Bu sonucu destekleyecek şekilde, hemen hemen aynı nem içeriğine sahip kalker ve dolomitten tanecik boyutu daha küçük olan dolomitin akışının kalkerden daha zor olacağı görülmektedir. Diğer taraftan, bu sonuca göre sodanın akışının-nem oranı da fazla olduğu halde- kalkerden daha zor olması beklenebilir. Ancak, sodanın diğerlerine göre tanecik şeklinin daha düzgün (küresel) olmasından dolayı taneciklerin birbirleri üzerinde kayması kolaylaşmış ve soda akışı en rahat malzeme olarak bulunmuştur.

Yalıköy kumunun farklı nem içeriklerinde elde edilmiş olan akış fonksiyonlarına bakıldığında, düşük nem içeriği (%1 nem) için bulunan akış fonksiyonunun orijinal nem içeriğine ait akış fonksiyonunun altında kaldığı görülür. Bu da düşük nem içeriğinde akışın daha kolay gerçekleşeceğini gösterir. Varılan bu sonuca göre yüksek nem oranlarında akışın daha da zorlaşacağı beklenebilir. Ancak, testler sonucunda yüksek nem içeriği için aynı yükler altında daha yüksek kesme gerilmeleri elde edilmesine rağmen akış fonksiyonları göz önüne alındığında yüksek konsolidasyon seviyeleri için %14 nem oranına ait akış fonksiyonunun %3.6 nem oranına ait akış fonksiyonunun altında kaldığı görülmektedir. Düşük konsolidasyon seviyelerinde durum bunun tam tersidir; yüksek nem oranındaki değerler dolayısıyla da akış fonksiyonu daha yukarıdadır. %14 nem içerikli Yalıköy kumu için yüksek gerilme seviyelerinde daha düşük σ_c değerlerinin (%3.6 nemdeki kuma göre) elde edilmiş olmasının nedeni katı tanecikleri arasına su moleküllerinin fazlasıyla girmiş olması ve bunun taneciklerin birbirleri üzerindeki kaymasını-akışını kolaylaştırması olabilir. Aynı şekilde, aynı tanecik büyüklüğüne sahip kumlardan nem oranı daha yüksek olan sarıkumun akış fonksiyonunun daha yukarıda olması beklenirken, akış fonksiyonu Yalıköy kumunun altında kalmıştır. Sonuç olarak, nem oranı arttıkça akışın zorlaşacağı ve yüksek nem oranlarının (belli bir değerin üzerindeki) da akışı kolaylaştırabileceği söylenebilir.

Şekil 6.7' deki malzemelerin akış fonksiyonlarını tasarım hesaplamalarında kullanabilmek üzere uygun bir şekilde denklemlerle ifade etmek gerekir. Akış fonksiyonları genel olarak ikinci dereceden bir eğri ile ifade edildiklerinde bunun doğru bir yaklaşım olabileceği grafikten görülür. Çünkü, birçok malzemenin sınırlı bir gerilme fonksiyonuna sahip olduğu açıktır, yani artan konsolidasyon gerilmesiyle birlikte σ_c artmakta ve sonuçta sınırlı bir değere ulaşmaktadır. Ancak, akış fonksiyonlarını bu şekilde ifade etmek tasarlanacak olan siloların minimum çıkış boyutu (B_{min}) için düşük değerler elde edilmesine sebebiyet verecektir. Buna neden, akış fonksiyonunun akış faktörüyle olan kesişiminin elde edilen değerler arasında değil de akış fonksiyonunun extrapole edilen bölgesinde olmasıdır. Bu durumda, ikinci dereceden bir akış fonksiyonuyla meydana gelecek kesişimle çok küçük σ_1 ($\sigma_{c,kritik}$) değerleri sağlanacaktır; sonucunda da oldukça düşük B_{min} değerleri hesaplanacaktır.

Akış fonksiyonu için elde edilmiş olan noktalardan doğru geçirilmesi durumunda ise, daha büyük çıkış boyutu değerleri elde edilebilecektir. Fakat, bu durumda çoğu malzeme için bulunan doğruların regresyon katsayısı değerleri (R^2) oldukça düşük çıkar. Şekil 6.7' ye bakıldığında bazı akış fonksiyonlarının son noktalarının buna neden olduğu görülebilir. Bu noktada, son noktaların akış fonksiyonlarından çıkartılması düşünülebilir. Böyle yapılmasının bir nedeni de doğruların kesişiminin alt tarafta olması ve akış fonksiyonu için elde edilen ilk üç noktayı extrapolasyon için kullanmanın daha güvenilir olmasıdır. Sonuç olarak, akış fonksiyonlarına ait noktalara bakarak bazı malzemeler için (sarıkum, soda) bütün noktalar kullanılarak bunlardan doğrular geçirilecek, çoğu malzeme için de son noktayı kullanmadan ilk üç noktadan doğrular geçirilerek akış fonksiyonları için denklemler belirlenecektir.

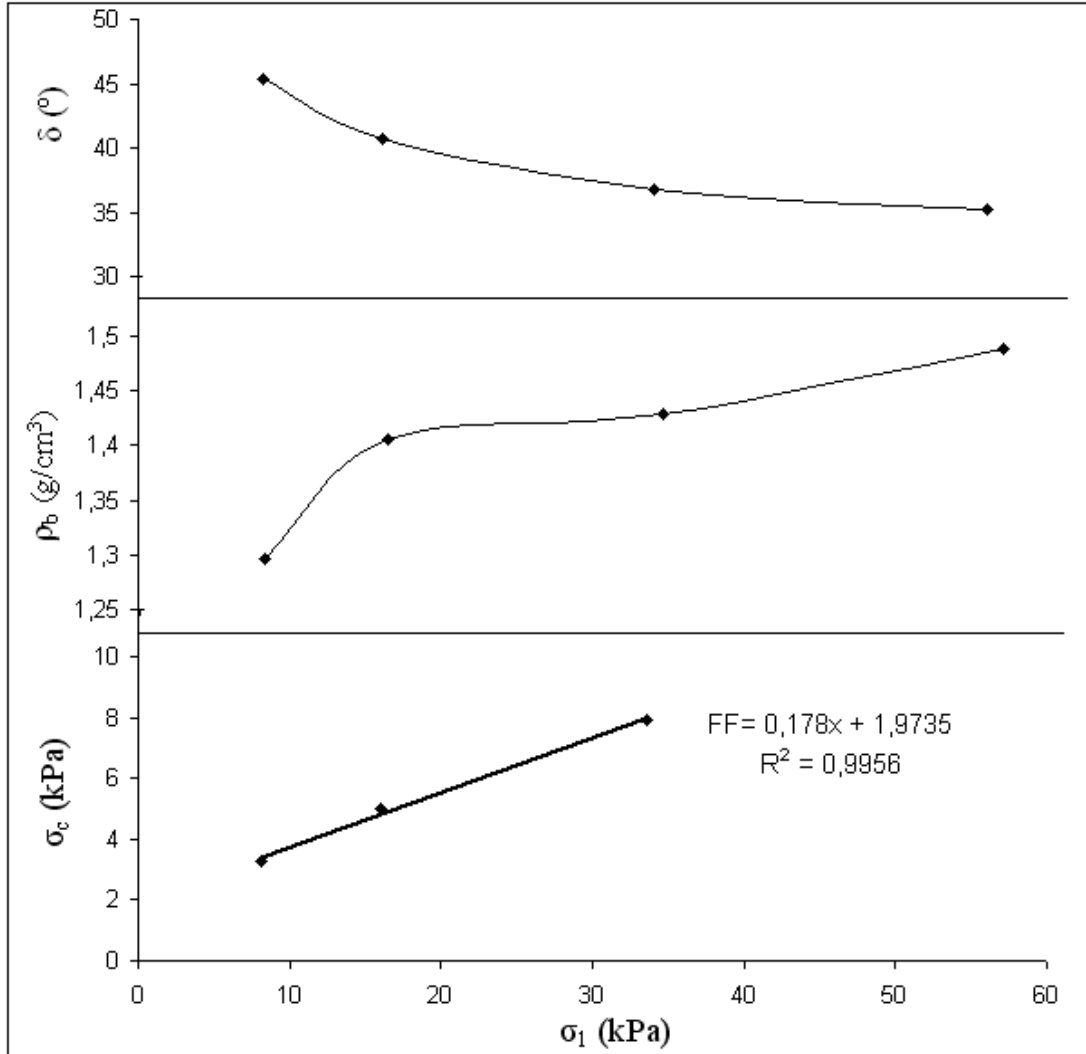
Yukarıda bahsedilen olumsuz durum için çözüm, kesme testlerini daha düşük konsolidasyon seviyelerinde gerçekleştirmek ve ona göre fazladan elde edilen noktalarla extrapolasyona gerek kalmadan akış fonksiyonunu alt bölgelerde güvenli bir şekilde kullanmaktır. Fakat kullanılan Jenike test cihazı düşük gerilmelerde testleri gerçekleştirmek için pek de uygun değildir.

6.2.3.2 Konsolidasyon Gerilmesine Göre Olan Diğer Değişimler

σ_c , δ , ϕ' ve ρ_b silo tasarımında önemli parametrelerdir. Bütün bu parametreler gerilme seviyesine bağlıdır, bu gerilme seviyesi de büyük konsolidasyon gerilmesidir

(σ_1). Akış fonksiyonunun yanı sıra, δ açısı değerinin de σ_1 ile olan değişimi tasarım hesaplamalarında önemlidir. σ_1 değerlerine göre olan bu değişimler Yalıköy kumu için Şekil 6.8’ de gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi akış fonksiyonu için testler sonucu elde edilmiş ilk 3 değer kullanılmış ve ona göre bir denklem bulunmuştur. Bu şekilde ayrıca malzemenin yığın yoğunluğu değişimi de verilmiştir.

ϕ' değerlerinin σ_1 ile olan değişimi fazla olmadığından dolayı tasarım hesaplamalarında sabit bir ϕ' değeri için bulunan 4 değer ortalama olarak kullanılacaktır. Diğer malzemeler için elde edilen akış parametreleriyle birlikte bu parametrelerin σ_1 ile olan değişimleri Ek-E’ de verilmiştir. Ek-E’ de Yalıköy kumunun farklı nem içeriklerindeki sadece akış fonksiyonları mevcuttur.



Şekil 6.8: σ_1 ' in fonksiyonu olarak Yalıköy kumunun (% 3.6 nem) özellikleri

Akış fonksiyonları için daha önce belirtildiği gibi noktalardan doğrular geçirilirken, $\delta(\sigma_1)$ ve $\rho_b(\sigma_1)$ fonksiyonları için tasarımda kullanılmak üzere uygun fonksiyonlar

belirlenmelidir. $\delta(\sigma_1)$ fonksiyonu için genellikle bütün noktalardan geçen 3. dereceden fonksiyonlar kullanılırken, yoğunluk için de son noktayı almadan 2. dereceden fonksiyonlar kullanılmıştır.

6.2.3.3 Malzemelerin Sınıflandırılması

Kullanılan malzemelerin akış fonksiyonları için bulunan denklemlerin eğim değerlerine göre (Ek-E) malzemelerin akışlarının nasıl olduğunu göstermek üzere Bölüm 3.3.9’ daki gibi bir sınıflandırma yapılırsa Tablo 6.7’ deki sonuçlar elde edilir.

Tablo 6.7’ deki sonuçlara bakıldığında azalan akış indeksi (ff_c) değerleriyle birlikte malzemelerin akışının zorlaştığı görülür. Mevcut sınıflandırmaya göre kullanılan birçok malzeme “kolay akışlı” malzeme sınıfındayken soda ve kil diğerlerinden farklı olarak “serbest akışlı” ve “kohesif” olarak bulunmuşlardır. Kullanılan kumlar kohesif malzeme sınıfına daha yakınlarken, kalker ve dolomit serbest akışlı malzeme grubuna daha yakındırlar.

Tablo 6.7: Malzemelerin akış fonksiyonlarına göre sınıflandırılması

Malzeme	Nem Oranı (%)	FF	ff_c	Sınıflandırma
Yalıköy kumu	3.6	0.178	5.6	Kolay akışlı
	1	0.1211	8.3	Kolay akışlı
	14	0.1123	8.9	Kolay akışlı
Sarıkum	7	0.1665	6.0	Kolay akışlı
Safaalanı kumu	4	0.1546	6.5	Kolay akışlı
Kalker	0.04	0.1078	9.3	Kolay akışlı
Dolomit	0.025	0.1218	8.2	Kolay akışlı
Soda	0.25	0.0726	13.8	Serbest akışlı
Kil	0.24	0.3598	2.8	Kohesif

Yalıköy kumunun nem içeriği değiştirildiği halde bile kolay akışlı malzeme grubundan çıkmamıştır. Düşük nem içeriğindeki Yalıköy kumunun akışının daha rahat olacağı serbest akışlı malzeme grubuna daha yakın olduğu görülmektedir ve hatta daha düşük nem oranlarında bu durum daha da belirginleşebilir. Yüksek nem oranında akış indeksi için 5.6 değerinden daha düşük bir değer beklenirken daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Yüksek nem oranındaki bu değer ($ff_c=8.9$) düşük

nem içeriğindeki değerden bile büyüktür (Ancak, akış fonksiyonu grafiğine (Şekil 6.7) bakıldığında yüksek nem oranındaki akış fonksiyonunun düşük nem oranındaki akış fonksiyonunun üzerinde olduğu görülmektedir). Bunun nedeni, daha önce de açıklandığı gibi nem artışının belirli bir optimum değere kadar akışa olumsuz yönde etkiyeceği ve bu değerden sonra da akışı kolaylaştıracaktır.

6.3 Kütle Akış için Silo Parametrelerinin Belirlenmesi

Yalıköy kumunun (%3.6 nem) belirlenen akış parametrelerine göre beton-1 duvar malzemesinin kullanıldığı hem konik hem de düzlem-akış silolar için tasarım sonuçları detaylı olarak verilecektir. Yalıköy kumunun diğer duvar malzemeleriyle elde edilen sonuçları tablo halinde sunulacaktır. Tasarım yöntemi olarak Bölüm 4.5’ teki 3. yöntem kullanılacaktır. Buna göre, *konik bir silo tasarlamak için*;

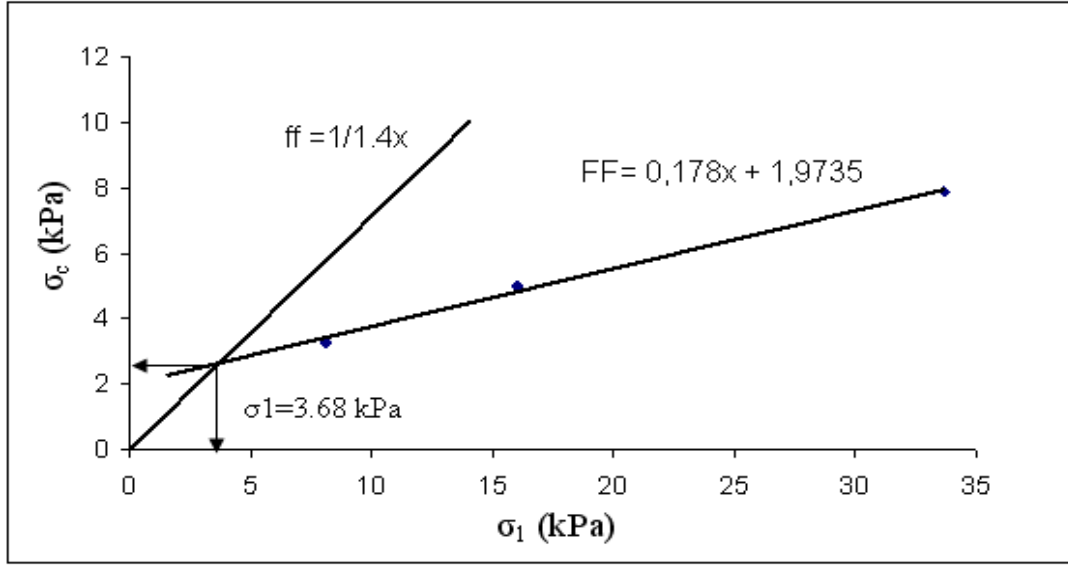
1. ϕ' değeri için tasarım hesaplamalarında Tablo 6.5’ teki sonuçların ortalaması olan 31.3° değeri alınmıştır. $\delta=40^\circ$ şeklinde bir tahmin değeri alınır.
2. $\delta=40^\circ$ ve $\phi'=31.3^\circ$ için Şekil B.3’ den $\alpha=10^\circ$ ve $ff=1.4$ değerleri okunur.
3. 1. iterasyon: Bilinen akış fonksiyonuyla elde edilen ff değeri sonucunda bu doğruların Şekil 6.9’ daki gibi aynı grafik üzerinde çizilmesiyle bir kesişim noktası elde edilir. Kesişim noktasındaki $\sigma_1= 3.68$ kPa olarak bulunur. Bu değere karşılık gelen δ değeri Şekil 6.8’den extrapolasyonla 49.1° olarak elde edilir. Bu değer, $\delta=45^\circ$ ve $\delta=50^\circ$ değerleri arasında kaldığından dolayı tasarım grafiklerinden interpolasyonla yeni bir ff değeri belirlenir:

$$\left. \begin{array}{l} \delta = 45^\circ, \phi' = 31.3^\circ \rightarrow \alpha = 10^\circ, ff = 1.3 \text{ (Şekil B.4)} \\ \delta = 50^\circ, \phi' = 31.3^\circ \rightarrow \alpha = 10^\circ, ff = 1.22 \text{ (Şekil B.5)} \end{array} \right\} \delta = 49.1^\circ \rightarrow ff = 1.2344$$

2. iterasyon: Yeni bulunan ff doğrusu ($ff=1/1.2344x$) ile FF doğrusunun tekrar kesiştirilmesiyle $\sigma_1= 3.122$ kPa olarak bulunur. Bu değerdeki δ , 49.7° olacaktır.

$$\delta = 49.7^\circ \rightarrow ff = 1.2248$$

3. iterasyon: Yeni bulunan ff doğrusu ile FF doğrusunun tekrar kesiştirilmesiyle $\sigma_1= 3.09$ kPa olarak bulunur. Bu değerdeki δ , 49.7° ’ dir.



Şekil 6.9: FF ve ff doğrularının aynı grafik üzerinde gösterilmesi

4. Bu değer, bir önceki δ değeriyle aynı olduğundan iterasyona son verilir. Son σ_1 değerine karşılık gelen $\sigma_{c,kritik} = 2.5235$ kPa olarak belirlenir. Aynı şekilde, σ_1 değerindeki $\rho_b = 1.195$ g/cm³ 'tür.

5. Güvenli bir tasarım için $\alpha = 10^\circ - 3^\circ = 7^\circ$ olarak seçilir. Bu açı değerindeki $H(\alpha)$ değeri Şekil 4.8' den veya (4.10) numaralı eşitlik kullanılarak bulunur.

$$H(\alpha)|_{\alpha=7^\circ} = 2.108$$

Buna göre; minimum silo çıkış boyutu (4.11) numaralı denklem yardımıyla ($\rho_b \cong 1195 \text{ kg/m}^3$);

$$B_{\min} = \frac{2523.5 \text{ N/m}^2 \times 2.108}{1195 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.454 \text{ m} = 45.4 \text{ cm}$$

olarak bulunur.

Düzlem-akış bir silo tasarlamak için;

1. $\phi' = 31.3^\circ$ alınır ve $\delta = 40^\circ$ olarak tahmin edilir.

2. $\delta = 40^\circ$ ve $\phi' = 31.3^\circ$ için Şekil B.12' den $\alpha = 18^\circ$ ve $ff = 1.4$ değerleri okunur.

3. 1. iterasyon: $1/1.4 x = FF = 0.178 x + 1.9735 \rightarrow \sigma_1 = 3.68 \text{ kPa}$
 $\delta(3.68) = 49.1^\circ$

$$\left. \begin{array}{l} \delta = 45^\circ, \phi' = 31.3^\circ \rightarrow \alpha = 18^\circ, ff = 1.28 \text{ (Şekil B.13)} \\ \delta = 50^\circ, \phi' = 31.3^\circ \rightarrow \alpha = 18^\circ, ff = 1.2 \text{ (Şekil B.14)} \end{array} \right\} \delta = 49.1^\circ \rightarrow ff = 1.2144$$

2. iterasyon: $1/1.2144 \times = FF = 0.178 \times + 1.9735 \rightarrow \sigma_1 = 3.06 \text{ kPa}$
 $\delta(3.06) = 49.7^\circ$

$\delta = 49.7^\circ \rightarrow ff = 1.2048$

3. iterasyon: $1/1.2048 \times = FF = 0.178 \times + 1.9735 \rightarrow \sigma_1 = 3.03 \text{ kPa}$
 $\delta(3.03) = 49.8^\circ$

4. Son σ_1 değerine karşılık gelen $\sigma_{c,kritik} = 2.5128 \text{ kPa}$ olarak belirlenir. Aynı şekilde $\rho_b = 1.1936 \text{ g/cm}^3$ tür.

5. $\alpha = 18^\circ \rightarrow H(\alpha) = 1.09$

$$B_{\min} = \frac{2512.8 \text{ N/m}^2 \times 1.09}{1193.6 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.234 \text{ m} = 23.4 \text{ cm}$$

Yalıköy kumunun diğer duvar malzemeleriyle tasarımı sonucu elde edilen iterasyon sonuçları Tablo 6.8’ de verilmiştir. Yalıköy kumunun tasarım sonuçları (silo parametreleri-boyutları) da Tablo 6.9’ da verilmiştir.

Tablo 6.8: Yalıköy kumunun (%3.6 nem) tasarım için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen iterasyon sonuçları

Silo Şekli	Duvar Malzemesi	$\phi' (^\circ)$	$\delta (^\circ)$	$\sigma_{c,kritik} \text{ (kPa)}$	$\rho_b \text{ (g/cm}^3\text{)}$	ff	$\alpha (^\circ)$	H(α)
Konik Silo	Beton-1	31.3	49.7	2.5235	1.195	1.2248	7	2.108
	Beton-2	35.7	49.8	2.495	1.1913	1.1744	3	2.046
	Normal Sac	28.3	49.5	2.5574	1.1992	1.282	12	2.1846
	Pasl. Çelik	17	49.1	2.6357	1.209	1.4108	28	2.431
Düzlem-akış Silo	Beton-1	31.3	49.7	2.5128	1.1936	1.2048	18	1.09
	Beton-2	35.7	49.8	2.506	1.1927	1.1936	12	1.06
	Normal Sac	28.3	49.7	2.5182	1.1942	1.2148	23	1.115
	Pasl. Çelik	17	49.6	2.5413	1.197	1.254	38	1.19

Yalıköy kumu için üzerinde akışın en zor olduğu (duvar sürtünme açısının en büyük olduğu) silo duvar malzemesi beton-2’ dir. O yüzden de konik silo için kütle akışı sağlamak üzere gerekli silo duvar açısı Tablo 6.9’ daki sonuçlara göre en küçüktür. Bu durumda, silonun yakınsayan (alt) kısmı çok diktir ve böyle bir silo belirli bir kapasiteyi karşılamak üzere diğerlerinden çok daha uzun olacaktır. Silonun uzun olması kapalı yerlerde depolama yapıldığında istenmeyen bir durumdur. Böylelikle, Yalıköy kumu için beton-2 duvar malzemesinin silo malzemesi olarak

kullanılmaması tavsiye edilebilir. Yüzeyi daha az pürüzlü olan betonun diğer tarafının (beton-1) silonun iç yüzeyinde tercih edilmesi durumunda da α_c değeri yine düşük çıkmıştır. Duvar malzemelerinin yüzeyi iyileştikçe yani ϕ' değerleri azaldıkça α_c değerlerinde bir artış görülmektedir. Silo duvar açısı değeri, üzerinde akışın en rahat gerçekleşeceği paslanmaz çelik için en yüksektir, bu nedenle de Yalıköy kumu için tasarlanacak olan dairesel kesitli bir siloda duvar malzemesi olarak paslanmaz çeliğin kullanılması önerilir.

Tablo 6.9: Yalıköy kumu (%3.6 nem) için elde edilen tasarım sonuçları

Duvar malzemesi	Konik Silo		Düzlem-akış Silo		
	α_c (°)	B_{min} (cm)	α_p (°)	B_{min} (cm)	$L_{min} (\geq 3B_{min})$ (cm)
Beton-1	7	45.4	18	23.4	70.2
Beton-2	3	43.7	12	22.7	68.1
Normal Sac	12	47.5	23	24	72
Paslanmaz Çelik	28	54	38	25.8	77.4

Silo çıkışında kemer oluşumunu engellemek için gerekli minimum çıkış boyutu da Tablo 6.9' da verilmiştir. Buna göre; silo duvar açısı arttıkça (silo yassılaştıkça) B_{min} değerlerinin az da olsa arttığı görülür. Bulunan bu değerler çıkış boyutu için minimum değerler olduğundan bu değerlerden daha büyük değerler de operasyon şartlarına göre kullanılabilir.

Düzlem-akış silolarının tasarım sonuçlarına bakıldığında ise, açısı değerlerinin (α_p) dairesel kesit için elde edilen değerlerden daha büyük oldukları görülür. Duvar malzemesine göre açısı değerindeki artış konik silo durumundaki sırayla aynıdır. Yine, açısı değerindeki artış B_{min} değerlerini artırmıştır. Bu tip siloların tercih edilmesi durumunda silo duvar açılarında 8-10°' lik bir artış sağlanabilir. Yalıköy kumu için dikdörtgen kesitli silo tasarımında kullanılan bütün duvar malzemelerinin uygun olduğu, özellikle de normal sac veya paslanmaz çeliğin tercih edilmesi gerektiği söylenebilir.

Yalıköy kumu dışındaki kullanılan malzemeler için de iki farklı duvar malzemesiyle aynı tasarım yöntemi uygulanmış ve bunlara ait tasarım sonuçları (silo parametreleri) hem dairesel hem de dikdörtgen kesit için Tablo 6.10' da toplu halde verilmiştir. Bu

sonuçların elde edilmesinde kullanılmış olan değerler (iterasyon sonucunda bulunmuş olan değerler) ayrıca Tablo 6.11’ de tasarım sonucu elde edilebilen malzeme çiftleri (siloda kullanılan malzeme&silod duvar malzemesi) için verilmiştir.

Tablo 6.10: Kullanılan malzemeler için tasarım sonucunda bulunan silo parametreleri

Malzeme	Duvar Malzemesi	Konik Silo		Düzlem-akış Silo		
		$\alpha_c(^{\circ})$	B_{min} (cm)	$\alpha_p(^{\circ})$	B_{min} (cm)	L_{min} (cm)
Kalker	Beton-2*	-	-	-	-	-
	Paslanmaz çelik	5	4.1	15	2.1	6.3
Dolomit	Beton-2	4	10	11	5.1	15.3
	Paslanmaz çelik	20	11.3	30	5.6	16.8
Sarıkum	Beton-2**	-	-	-	-	-
	Paslanmaz çelik	9	43	18	21.5	64.5
Safaalanı kumu	Beton-2**	-	-	-	-	-
	Paslanmaz çelik	23	38	32	18.3	54.9
Soda	Beton-2	5	7	12	3.6	10.8
	Paslanmaz çelik	18	7.8	28	3.9	11.7
Kil	Beton-2**	-	-	-	-	-
	Paslanmaz çelik	20	47.8	31	21.7	65.1
* Kalkerin kullanılan duvar malzemesiyle kütle akışının gerçekleşmediği tasarım grafiğinden görülebilir ($\delta=40^{\circ}$, $\phi'=39^{\circ}$ için). ** Malzemenin beton-2 duvar akma sınırı hattı Mohr çemberini herhangi bir noktada kesmediği için duvar sürtünme açısı değerleri elde edilememiştir. Bu durumda, duvar sürtünme açısı değerleri oldukça büyük değerlerdedir ve bu duvar malzemesi üzerinde akışın gerçekleşmeyeceği söylenebilir.						

Tablo 6.10’ daki sonuçlara göre Safaalanı kumu, sarıkum ve kilin duvar malzemesi olarak beton kullanıldığı silolarda akışının gerçekleşmeyeceği görülmektedir. Bu malzemeler için betona ait duvar akma sınırı hatlarının eğim değerleri çok yüksektir, bu da malzemelerin beton üzerindeki akışlarının oldukça zor olduğu anlamına gelmektedir. Böyle olunca da duvar sürtünme açısı değerleri elde edilememiştir. Farklı bir durumda ise, kalkerin beton üzerindeki duvar sürtünme açısı değerleri elde edilebilmesine rağmen bu değerler ($\phi'_{ort}=39^{\circ}$) yüksek olduğundan tasarım grafiğinde kütle akış bölgesi sınırları içerisinde kalmak zordur (Şekil B.3 ve Şekil B.12). Amaç, kütle akış siloları tasarlamak olduğu için de herhangi bir sonuç verilmemiştir.

Duvar malzemesi olarak beton kullanılan siloda yüksek duvar sürtünme açısı değerlerine rağmen akış sadece dolomit ve soda için gerçekleşir. Kullanılan malzemeler arasında akışı en kolay olan bu iki malzeme için böyle bir sonucun çıkması doğaldır. Ancak, her iki malzeme için de bulunan açısı değerleri konik bir silo için oldukça düşük çıkmıştır. Bu açısı değerleri konik yerine düzlem-akış siloların tercih edilmesiyle artırılabilir.

Kullanılan malzemelerin paslanmaz çelikle olan tasarım sonuçlarına bakıldığında, kalker ve sarıkum için yine yüksek ϕ' değerleri elde edildiği için konik silo durumunda silo açısı değerleri düşük çıkmıştır. Bu durum, yine her iki malzeme için de düzlem-akış silolar tercih edildiğinde sorun olmayabilir. Dolomit, Safaalanı kumu, soda ve kil için Yalıköy kumunda olduğu gibi düşük ϕ' değerlerinden dolayı α değerleri istenildiği gibi çıkmıştır. B_{min} değerleri soda, dolomit ve kalker için küçük çıkmışken Safaalanı kumu, sarıkum ve kil için bu değerler Yalıköy kumuna ait sonuç gibi nispeten daha büyük çıkmıştır. Burada, nem miktarının ve küçük tanecik boyutunun silo çıkışındaki bir kemer oluşumunu daha çok desteklediği ve bu yüzden de oluşacak kemeri engellemek üzere daha büyük çıkış boyutlarına gerek olduğu sonucuna varılabilir.

Sonuç olarak, silo duvar malzemesi olarak beton kullanıldığı zaman akışın zor olacağı veya hiç gerçekleşmeyeceği malzemeler için beton yerine paslanmaz çeliğin kullanılması tavsiye edilebilir. Beton kullanmak durumunda kalındığında ise, konik bir silodan ziyade düzlem-akış bir silo kullanmakta fayda vardır. Paslanmaz çelik kullanmanın (konik silo) da pek bir yarar sağlamayacağı malzemeler (sarıkum, kalker) için bu malzemelerin üzerlerinde akışın daha da kolay olduğu, daha düşük duvar sürtünme açısı değerlerine sahip başka silo duvar malzemeleri denenebilir.

Tablo 6.11: Kullanılan malzemeler için silo tasarımında elde edilen iterasyon sonuçları

Silo Şekli	Malzeme	Duvar Malzemesi	ϕ' (°)	δ (°)	$\sigma_{c, \text{ kritik}}$ (kPa)	ρ_b (g/cm ³)	ff	α (°)	H(α)
Konik Silo	Safaalanı kumu	Paslanmaz çelik	21	43.3	1.7552	1.1104	1.4812	23	2.354
	Soda	Beton-2	34.4	40	0.4	1.2108	1.4	5	2.077
	Soda	Paslanmaz çelik	24.5	40	0.4037	1.211	1.5	18	2.277
	Sarıkum	Paslanmaz çelik	31.5	51.5	2.3547	1.1951	1.274	9	2.1385
	Dolomit	Beton-2	35.2	41.7	0.8411	1.775	1.36	4	2.0615
	Dolomit	Paslanmaz çelik	23	41.7	0.8548	1.7764	1.4694	20	2.3077
	Kalker	Paslanmaz çelik	33	41.7	0.3312	1.7313	1.36	5	2.077
	Kil	Paslanmaz çelik	22.5	48.9	2.148	1.0567	1.4022	20	2.3077
Düzlem-akış Silo	Safaalanı kumu	Paslanmaz çelik	21	43.8	1.7	1.1012	1.3164	32	1.16
	Soda	Beton-2	34.4	40	0.4	1.2108	1.4	12	1.06
	Soda	Paslanmaz çelik	24.5	40	0.4	1.2108	1.4	28	1.14
	Sarıkum	Paslanmaz çelik	31.5	52.4	2.3048	1.1935	1.168	18	1.09
	Dolomit	Beton-2	35.2	41.7	0.8407	1.775	1.356	11	1.055
	Dolomit	Paslanmaz çelik	23	41.7	0.8415	1.7751	1.3626	30	1.15
	Kalker	Paslanmaz çelik	33	41.7	0.3311	1.7313	1.356	15	1.075
	Kil	Paslanmaz çelik	22.5	49.5	1.9167	1.042	1.236	31	1.155

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı katı malzemelerin (Yalıköy kumu, Safaalanı kumu, sarıkum, kalker, dolomit, soda ve kil) akış parametrelerini belirleme ve bulunan sonuçları silo tasarımına uygulama amacı taşıyan kesme testlerini gerçekleştirmek üzere Jenike kesme test cihazı standart boyutlu kesme hücresiyle birlikte kullanılmıştır. Testler ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve katı numunelere herhangi bir ön işlem (nem ve tanecik boyutu düzenleme) uygulanmamıştır. Nem oranının bir malzemenin akışı üzerindeki etkisini anlayabilmek için sadece Yalıköy kumunun bir düşük ve bir de yüksek nem içeriklerindeki akış parametreleri belirlenmiştir.

Malzemelerin bazı fiziksel özellikleri de belirlenmiştir. Nem miktarları belli bir miktardaki katının etüvde 105 °C’ de 24 saat süreyle bekletildikten sonraki ağırlığı belirlenerek hesaplanmıştır. En yüksek nem içeriğine sahip malzeme sarıkum (%7) iken kalker, dolomit, soda ve kilin nem miktarları kumların nem miktarlarına göre nispeten daha düşüktür. Ortalama tanecik büyüklükleri elek analizi sonucu elde edilen dağılımın aritmetik ortalamasıdır. Ortamla tanecik büyüklüğü en düşük olan malzeme kildir (43 mikron) ve bunu sırasıyla kumlar, dolomit, soda ve kalker izlemektedir. Yığın yoğunluğu değerleri de basitçe dereceli bir mezür yardımıyla bulunmuştur.

Kullanılan her malzeme için kesme testleri sonucunda normal gerilme değerlerine karşılık kesme gerilmesi değerlerinin bilgisini içeren 4 adet akma sınırı hattı (YL) farklı gerilme seviyelerinde belirlenmiştir. Akma sınırı hatları 4’ er nokta kullanılarak ve bu noktalardan doğrular geçirilerek σ - τ koordinatlarında çizilmişlerdir. Akma sınırı hatlarına ait denklemlerden Mohr-Coulomb modeline göre malzemelere ait her gerilme seviyesindeki kohezyon (C) ve iç sürtünme açısı (ϕ) değerleri bulunmuştur. ϕ değerleri 30-40° aralığında değişirken nem oranı düşük olan malzemelerin bu açı değerleri daha yüksek çıkmıştır. Kohezyon değerleri ise artan normal gerilme değerleriyle birlikte artış göstermektedir. Yüksek nem oranı ve düşük tanecik büyüklüğü de kohezyon değerlerinin artmasına ve dolayısıyla da malzemenin akışının zorlaşmasına neden olmaktadır.

Kesme testleri, malzemelerin iç sürtünme özelliklerinin yanı sıra silo duvarı üzerindeki sürtünme özelliklerini belirlemek amacıyla bir de farklı silo duvar malzemeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden bulunan duvar akma sınırı hatları (WYL) doğrular şeklinde ifade edilmiş ve bunların her biri için doğru denklemleri bulunmuştur. Yalıköy kumu için 4 farklı duvar malzemesi (pürüzlü ve daha az pürüzlü beton yüzeyi, normal sac, paslanmaz çelik) üzerindeki duvar akma sınırı hatlarından elde edilen sonuca göre üzerinde akışın en zor gerçekleşeceği duvar malzemesi beton-2 olurken akışın en kolay olduğu malzeme ise paslanmaz çelik olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre diğer malzemelerin duvar sürtünme testleri akışın en zor ve en kolay durumunu göstermesi bakımından sadece bu iki duvar malzemesiyle gerçekleştirilmiştir.

Silolarda meydana gelecek akışın zorluk derecesi öncelikli olarak kullanılan duvar malzemesine bağlıdır; bunda da yüzey pürüzlülüğü önemli bir rol oynamaktadır. Yüzeyi pürüzlü olan duvar malzemesi üzerinde akış zor gerçekleşirken pürüzsüz olan malzeme üzerinde akış kolay gerçekleşecektir. Bütün katı malzemelerin beton ve paslanmaz çelik üzerindeki duvar akma sınırı hatlarından elde edilen sonuca göre silo malzemesi olarak paslanmaz çeliğin betondan daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Malzemeler için bulunmuş olan akma sınırı hatları yardımıyla silo tasarımında kullanılacak olan parametreler (σ_1 , σ_c , δ) belirlenmiştir. Bu parametreler, doğrusal akma sınırı hatları için Mohr çemberleri tanımları kullanılarak uygulanmış olan analitik yöntemle göre hesaplanmışlardır. Ayrıca, duvar akma sınırı hatlarından da duvar sürtünme açısı (ϕ') değerleri tanımına uygun biçimde elde edilmişlerdir.

Duvar akma sınırı hatları için doğru yaklaşımı yapılarak tasarım açısından bir güvenlik faktörü sağlanmış olunur. Duvar akma sınırı hattının kayım değerinin (adezyon) büyük olduğu durumlarda ϕ' değerleri farklı gerilme seviyeleri için birbirlerinden farklı olarak bulunmuştur. Kayım değeri sıfıra yaklaştıkça da ϕ' değerleri birbirlerine yakın olarak elde edilmiştir. Akışın zor olacağı duvar malzemeleriyle yüksek ϕ' değerleri elde edilmişken, kolay akış sağlayacak malzemelerle düşük ϕ' değerleri bulunmuştur. Test sonuçları genel olarak paslanmaz çelik kullanıldığı durumdaki ϕ' değerlerinin betona ait değerlerden daha düşük olduklarını göstermektedir. Ancak, kalker ve sarıkumun paslanmaz çelikte elde edilen ϕ' değerleri yine yüksek bulunmuştur.

σ_1 ile σ_c arasındaki ilişki sonucu elde edilen malzemelere ait akış fonksiyonlarına (FF) (veya akış indeksi- ff_c) göre akışı en zor olan malzeme kil olurken akışı en kolay olan malzeme de soda olarak tespit edilmiştir. Genel anlamda düşük tanecik büyüklüğünün ve yüksek nem oranının akışı zorlaştırdığı sonucuna varılmıştır. Yalıköy kumunun farklı nem içerikleri için yapılan testlerin sonucuna göre de nem oranının arttıkça akışın zorlaşacağı, belirli bir değerden sonra da artan nem oranının akışı kolaylaştırabileceği görülmüştür.

Malzemelerin akış fonksiyonlarını tasarım hesaplamalarında kullanabilmek için denklemlerle ifade etme gereği vardır. Akış fonksiyonları ikinci dereceden denklemler yerine doğrularla ifade edilmiştir. Bazı malzemelerin akış fonksiyonları için testler sonucu elde edilmiş bütün noktalar kullanılırken çoğu malzeme için de sadece ilk üç nokta yardımıyla akış fonksiyonları belirlenmiştir. Bulunan denklemlerin eğim değerlerine göre de malzemeler için bir sınıflandırma yapılmıştır. Yapılan bu sınıflandırma sonucunda malzemelerin çoğu (Yalıköy kumu, Safaalanı kumu, sarıkum, kalker ve dolomit) kolay akışlı malzeme grubuna girerken diğerlerinden farklı olarak soda serbest akışlı, kil de kohesif malzeme grubunda yer almışlardır. Yalıköy kumunun düşük ve yüksek nem içeriklerinde yine kolay akışlı malzeme grubunda kaldığı görülmüştür.

σ_1' e göre olan başka parametrelerin değişimleri (δ , ρ_b , ϕ') de ayrıca gösterilmiştir. Tasarım hesaplamalarında, elde edilen 4 değer in ortalaması olarak sabit bir ϕ' değeri kullanılmıştır.

Son olarak, malzemelerin elde edilmiş olan akış parametreleri tasarıma uygulanmış ve hem konik hem de düzlem-akış silolar için kütle akış sağlayacak olan silo duvar açıları (α) ve siloda kemer oluşumunu engellemek üzere olabilecek minimum çıkış boyutları (B_{min}) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, Jenike' nin ileri sürmüş olduğu tasarım yöntemi ilgili tasarım (akış faktörü) grafikleri kullanılarak uygulanmıştır. Sonuçlar açıkça paslanmaz çelik kullanımı ile oluşacak düşük duvar sürtünme açısı değerlerinin avantajlarını göstermektedir. Çünkü akışın zor gerçekleşeceği beton duvar malzemesi üzerindeki yüksek ϕ' açıları silo duvar açılarının oldukça düşük çıkmasına neden olmuştur. Aynı kapasiteyi karşılamak üzere, silo duvar açısı daha düşük olan silolar daha dik ve uzun olacakları için pratikte tercih edilmezler. Düzlem-akış siloların tercih edilmesi durumunda ise aynı malzeme özellikleriyle açısı

değerlerinde 8-10⁰’ lik bir artış sağlanabilmektedir. Böylelikle, konik silolarda uygun olmayan beton duvar malzemesinin düzlem-akış silolarla birlikte kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Duvar malzemesi olarak betonun kullanılabileceği konik silolar sadece Yalıköy kumu, soda ve dolomitin depolandığı silolardır. Bu siloların duvar açıları düşük olduğundan yine de kullanılmaları pek tavsiye edilmezler. Bunun için; ya paslanmaz çelik kullanmak ya da konik yerine düzlem-akış siloları önerilebilir.

Bazı malzemelerin (Safaalanı kumu, sarıkum ve kil) beton duvar malzemesiyle olan ϕ' değerleri elde edilememiştir. Bu da bu malzemelerin betonun pürüzlü yüzeyi üzerinde akışlarının gerçekleşmeyeceğini göstermektedir. Diğer taraftan, kalkerin beton duvar malzemesi ile bulunan sonuçlarına göre de tasarım grafiğinden kütle akışının gerçekleşmeyeceği görülebilir.

Sarıkum ve kalker için paslanmaz çelikte olan ϕ' değerleri yine yüksek olduğundan, paslanmaz çelik kullanılan konik silolarda bu malzemelerin kütle akışlarının gerçekleşmesi için dik silolar gerekmektedir. O yüzden bu malzemeler için konik silo kullanmak istendiğinde sürtünme açısı paslanmaz çelikten daha düşük duvar malzemeleri denemekte yarar vardır.

Nemli ve tanecik boyutu küçük malzemeler silo çıkışında bir kemer oluşumuna daha çok sebebiyet verdikleri için B_{min} değerleri bu malzemeler için daha yüksek çıkmaktadır. Bu çalışmada, hesaplanmış olan B_{min} değerleri için iki açıdan tasarımda bir güvenlik faktörü sağlanmıştır. İlk durumda, akma sınırı hatlarının düşük gerilme bölgeleri için düz bir doğru yaklaşımı yapılmıştır. Böylelikle, akma sınırı hatlarından elde edilecek sınırlanmamış akma sınırı gerilmesi değerleri non-lineer akma sınırı hattı yaklaşımı yapıldığı durumdaki değerlerden daha büyük olacaktır. İkinci durumda, elde edilen akış fonksiyonları için doğru yaklaşımı yapılmıştır. Böyle yapılarak da akış fonksiyonlarının, FF-ff grafiğinde daha düşük değerler için extrapolate edilmesi halinde daha yukarda olması sağlanır. Bahsedilen her iki durum sonucunda da daha yüksek B_{min} değerleri elde edilmiştir. Bu değerler minimum çıkış boyutu değerleri olduğu için ne kadar büyük olurlarsa tasarım açısından kemer oluşumunu engellemek üzere o kadar güvenli olurlar.

B_{min} için güvenli değerlerin elde edilmesinin yanı sıra, siloda kütle akışını her durumda sağlamak üzere de bir güvenlik faktörü iki durumda sağlanmıştır. Bunların

ilkinde, ϕ' değerleri hesaplanırken duvar akma sınırı hatları doğru olarak alınmışlardır. Bu yüzden daha büyük ϕ' değerleri bulunmuştur. Tasarım grafiklerinde her durumda kütle akış bölgesi içerisinde kalınması büyük ϕ' değerlerinin kullanılmasıyla sağlanmıştır (Böylelikle, silo duvar malzemesinin zamanla aşınması sonucunda normalden daha yüksek ϕ' değerlerinin elde edilebileceği de göz önünde bulundurulmuş olunur). İkinci olarak, konik bir silo tasarlariken kütle akış için olan sınır çizgisinin 3° kadar içinde kalınmasına özen gösterilmiştir, yani elde edilen silo aç değerleri 3° azaltılmıştır. Düzlem-akış siloları için, aç değerlerinde herhangi bir azaltma yapılmamıştır.

Tasarım hesaplamalarında, akış fonksiyonlarının akış faktörü doğrularıyla olan kesişimleri elde edilmiş olan noktaların dışındaki bölgelerde gerçekleştiği için akış fonksiyonlarının uygun bir biçimde extrapole edilmeleri gerekmektedir. Bu işleme gerek kalmadan akış fonksiyonları için düşük gerilme seviyelerinde noktaların elde edilebilmesi sağlanırsa sonuçlar daha güvenilir olarak bulunur. Testlerde kullanılmış olan Jenike kesme test cihazı düşük gerilme seviyelerinde çalışmak için pek de uygun değildir. Bu bakımdan, akış fonksiyonlarının alt bölgesi için düşük gerilme seviyelerinde çalışılabilecek başka tip kesme test cihazlarının kullanılması önerilebilir.

Yapılmış olan testlerde, malzemelerin silolarda fazla bekletilmedikleri düşünülerek anlık akıştaki akış özellikleri belirlenmiştir. Malzemeler silolarda, üretimdeki çeşitli nedenlerden ötürü belirli veya belirsiz süreler boyunca bekletilebilmektedirler. Bunun sonucunda da malzemelerin anlık akış için olan özelliklerinin çoğu durumda değişeceği bilinmektedir. Bu sebeple, test edilmiş olan malzemelerin silolardaki depolanma süreleri göz önünde bulundurularak farklı depolanma sürelerindeki akış özelliklerini belirlemek gerekebilir. Bundan sonra bu konu üzerinde yapılması planlanan çalışmalarda malzemelerin zaman testlerini gerçekleştirip ona göre uygun tasarım sonuçlarının elde edilmesi önerilebilir. Bu durumda, söz konusu testler için mevcut test sistemine ilave olarak numunelerin içerisinde bekletildiği konsolidasyon tezgahlarına ihtiyaç duyulacaktır.

Bazı malzemelerin nem miktarları üretimde ortam koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, kesme testlerini karşılaşılabilecek en kötü durum için gerçekleştirmekte fayda vardır. Kullanılan malzemelerin üretimde

çıkabilecekleri maksimum nem miktarlarını iyi tespit edip testleri ayrıca bu nem miktarlarına getirdikten sonra yapmak veya özel olarak tasarlanmış sıcaklık kontrolü sağlanabilen test cihazlarını kullanmak uygun olacaktır.

Silo parametrelerinin bulunması için uygulanan Jenike tasarım yönteminde tasarım grafiklerinden akış faktörü değerlerinin okunmasında zorlukla karşılaşılabilir ve sonucunda da sağlıklı değerler elde edilmeyebilir. Etkin iç sürtünme açısının (δ) ara değerleri için interpolasyon yapılması da söz konusudur. Bu bakımdan akış faktörü hesaplamalarında grafiklerin yerine bunlar için bulunmuş olan korelasyonların kullanılması tercih edilebilir. Hatta bu korelasyonların bilgisayar ortamına aktarılmasıyla uygulanan iteratif tasarım yöntemi için bir bilgisayar programının yazılması ya da analitik bir yöntem geliştirilmesi bundan sonra yapılması düşünülen çalışmaların içinde yer almalıdır. Böylelikle, hem tasarım hesaplamalarında bir kolaylık sağlanır hem de değer okumalardan ve ara değerlerin bulunmasından kaynaklanan hataların minimuma indirilmesi sağlanır.

Katı yığınları içeren herhangi bir işletmede bunların başarılı bir şekilde depolanması, düzenli akışlarının sağlanması ve yönetiminin tüm tesisin tasarımında çok önemli ve gerekli bir konu olduğu açıktır. Bunları sağlayacak olan kesme testleri ve silo tasarımı için ortaya çıkacak olan harcamalar, üretimdeki kayıplar ve kalite problemlerindeki maliyetlere kıyasla oldukça düşüktür. Bu yüzden, bu konuya mümkün olduğunca ağırlık verilmesi gereklidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Shamlou, P.A.**, 1988. Handling of Bulk Solids, Butterworth&Co. (Publishers) Ltd., England.
- [2] **Sevile, J., Tüzün, U. and Clift, R.**, 1997. Processing of Particulate Solids, Chapman&Hall, London.
- [3] **Woodcock, C.R. and Mason, J.S.**, 1987. Bulk Solids Handling, Chapman&Hall, London.
- [4] **Jenike, A.W.**, November 1964. Storage and Flow of Solids, Bulletin No. 123, Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City-Utah.
- [5] **Arnold, P.C., McLean, A.G. and Roberts, A.W.**, December 1989. Bulk Solids: Storage, Flow and Handling, Turna Bulk Solids Handling Research Associates, Second Edition, The University of Newcastle Research Associates Ltd. Inc., NSW Australia.
- [6] <http://www.polyhisolidur.com/PHS2003/T88casebkPDFs03/T88casebook2002.pdf>
- [7] **Pierrat, P.**, 1994. The Flow Properties of Wet Granular Materials, *phD thesis*, Lehigh University, Bethlehem, USA.
- [8] **Jenike, A.W.**, October 1961. Gravity Flow of Bulk Solids, Bulletin No. 108, Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City-Utah.
- [9] **Teoman, Y.**, 2002. Tanecik Formunda Malzemeler ve Özellikleri, *ŞİŞECAM Teknik Bülten*, Cilt 31, **Sayı 4**, 4-13.
- [10] <http://www.erpt.org/012Q/rhod-04.html>
- [11] **Geldart, G. (ed.)**, 1986. Gas Fluidization Technology, John Wiley&Sons, Chichester, England.
- [12] **Roberts, A.W.**, September 1992. Basic Principles of Bulk Solids Storage, Flow and Handling, The Institute For Bulk Materials Handling Research, Callaghan NSW Australia.
- [13] **Best, W. P.**, 2000. Design of a Nucleating Granulator Combined with a Drop on Demand Binder Distribution System, *phD thesis*, The University of Queensland, Australia.
- [14] <http://www.dietmar-schulze.de/storage.html>
- [15] **Peschl, I.A.S.Z.**, 1998. Mechanical Properties of Powders, *Bulk Solids Handling*, Volume 8, **Number 5**, 615-624.

- [16] **Tsunakawa, H. and Aoki, R.**, 1982. Measurements of Failure Properties of Granular Materials and Cohesive Powders, *Powder Technology*, **33**, 249-256.
- [17] **Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell**, 1989. The Institution of Chemical Engineers (European Federation of Chemical Engineering), Rugby UK, England.
- [18] **Vogt, C.(supervisor)**, Measurement of Flow Properties of Bulk Solids by Using the Jenike Shear Tester, Practical Exercises of Particle Technology, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- [19] <http://www.erpt.org/992Q/tard-06.htm>
- [20] **Kamath, S., Puri, V.M. and Manbeck, H.B.**, 1994. Flow property measurement using the Jenike Cell for wheat flour at various moisture contents and consolidation times, *Powder Technology*, **81**, 293-297.
- [21] **Fitzpatrick, J.J., Barringer, S.A. and Iqbal, T.**, 2004. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values, *Journal of Food Engineering*, **61**, 399-405.
- [22] **Kamath, S., Puri, V.M., Manbeck, H.B. and Hogg, R.**, 1993. Flow Properties of Powders using four testers- measurement, comparison and assessment, *Powder Technology*, **76**, 277-289.
- [23] **Schwedes, J. and Schulze, D.**, 1990. Measurement of Flow Properties of Bulk Solids, *Powder Technology*, **61**, 59-68.
- [24] **Puri, V. M. and Lapido D.D.**, 1999. Computer Controlled Shear Cell Tester, *United States Patent*, Patent number: 6,003,382, Date of Patent: Dec. 21, 1999.
- [25] **Lapido, D.D. and Puri, V.M.**, 1997. Computer controlled shear cell for measurement of flow properties of particulate materials, *Powder Technology*, **92**, 135-146.
- [26] **Duffy, S.P. and Puri, V.M.**, 1999. Evaluation of the computer controlled dynamic yield locus tester, *Powder Technology*, **101**, 257-265.
- [27] **D6773-02**, 2002. Standart Shear Test Method for Bulk Solids Using the Schulze Ring Shear Tester, *ASTM International*, West Conshohocken, USA.
- [28] **D6682-01**, 2001. Standart Test Method for Measuring the Shear Stresses of Powders Using the Peschl Rotational Split Level Shear Tester, *ASTM International*, West Conshohocken, USA.
- [29] **Schwedes, J.**, 2002. Consolidation and Flow of Cohesive Bulk Solids, *Chemical Engineering Science*, **57**, 287-294.
- [30] **Moore, B.A. and Arnold, P.C.**, 1985. An Alternative Presentation of the Design Parameters for Mass Flow Hoppers, *Powder Technology*, **42**, 79-89.
- [31] **Jenike, A.W. and Leser, T.**, 1963. A Flow-No Flow Criterion in the Gravity Flow of Powders in Converging Channels, *Proc. 4th International Congress on Rheology*, p.125.

- [32] **Johanson, J.R. and Colijn, H.**, 1964. New Design Criteria for Hoppers and Bins, *Iron and Steel Engineer*, **41**, 85-104.
- [33] **Shear Testing Machine Operating Instructions**, Tunra Bulk Solids Handling Research Associates, University of Newcastle, Australia.
- [34] **D6128-00**, 2000. Standart Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell, *ASTM International*, West Conshohocken, USA.

EKLER

EK-A. AKIŞ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN ANALİTİK YÖNTEM

Akma sınırı hattının (YL) denklemi;

$$\tau = \tan \phi \sigma + C \quad (\text{A.1})$$

şeklindedir. Bu denklem, doğru denklemi ($ax + by + c = 0$) şeklinde ifade edilmek istenirse;

$$\tan \phi \sigma - \tau + C = 0 \quad (\text{A.2})$$

Küçük olan Mohr çemberinin merkez noktasının $(\frac{f_c}{2}, 0)$ akma sınırı hattı doğrusuna olan uzaklığı;

$$L_1 = \frac{\left| \tan \phi \frac{f_c}{2} + 0 + C \right|}{\sqrt{\tan^2 \phi + (-1)^2}} = \frac{\tan \phi \frac{f_c}{2} + C}{\sqrt{\frac{\sin^2 \phi}{\cos^2 \phi} + 1}} = \sin \phi \frac{f_c}{2} + C \cos \phi \quad (\text{A.3})$$

Bu uzaklık aynı zamanda Şekil 3.18' den de görülebileceği gibi doğru, çembere teğet olduğundan çemberin yarıçap değerine $(\frac{f_c}{2})$ eşittir:

$$\sin \phi \frac{f_c}{2} + C \cos \phi = \frac{f_c}{2} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{f_c}{2} (1 - \sin \phi) = C \cos \phi \quad (\text{A.5})$$

$$f_c = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (\text{A.6})$$

İkinci (büyük) Mohr çemberinin merkezinin $(p, 0)$ akma sınırı hattı doğrusuna olan uzaklığı;

$$L_2(R) = \frac{|\tan \phi p + 0 + C|}{\sqrt{\tan^2 \phi + (-1)^2}} = \frac{\tan \phi p + C}{\sqrt{\frac{\sin^2 \phi}{\cos^2 \phi} + 1}} = p \sin \phi + C \cos \phi \quad (\text{A.7})$$

Çember merkezi $(p, 0)$ ile (σ_c, τ_c) noktası arasındaki uzaklık;

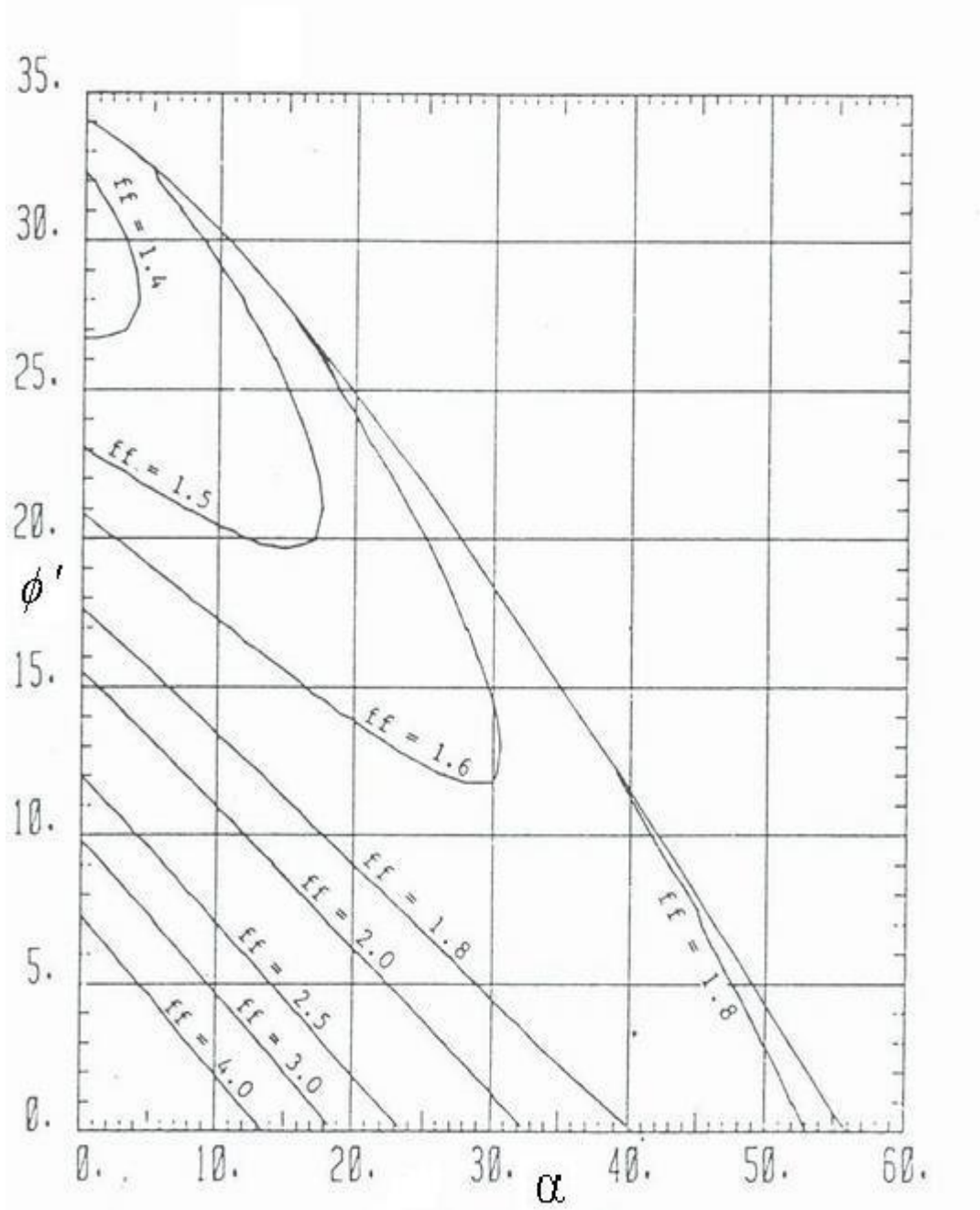
$$L_3 = \sqrt{(\sigma_c - p)^2 + (\tau_c - 0)^2} \quad (\text{A.8})$$

(A.7) ve (A.8) numaralı denklemler aynı zamanda büyük Mohr çemberinin yarıçapına eşit olduklarından birbirlerine de eşittirler:

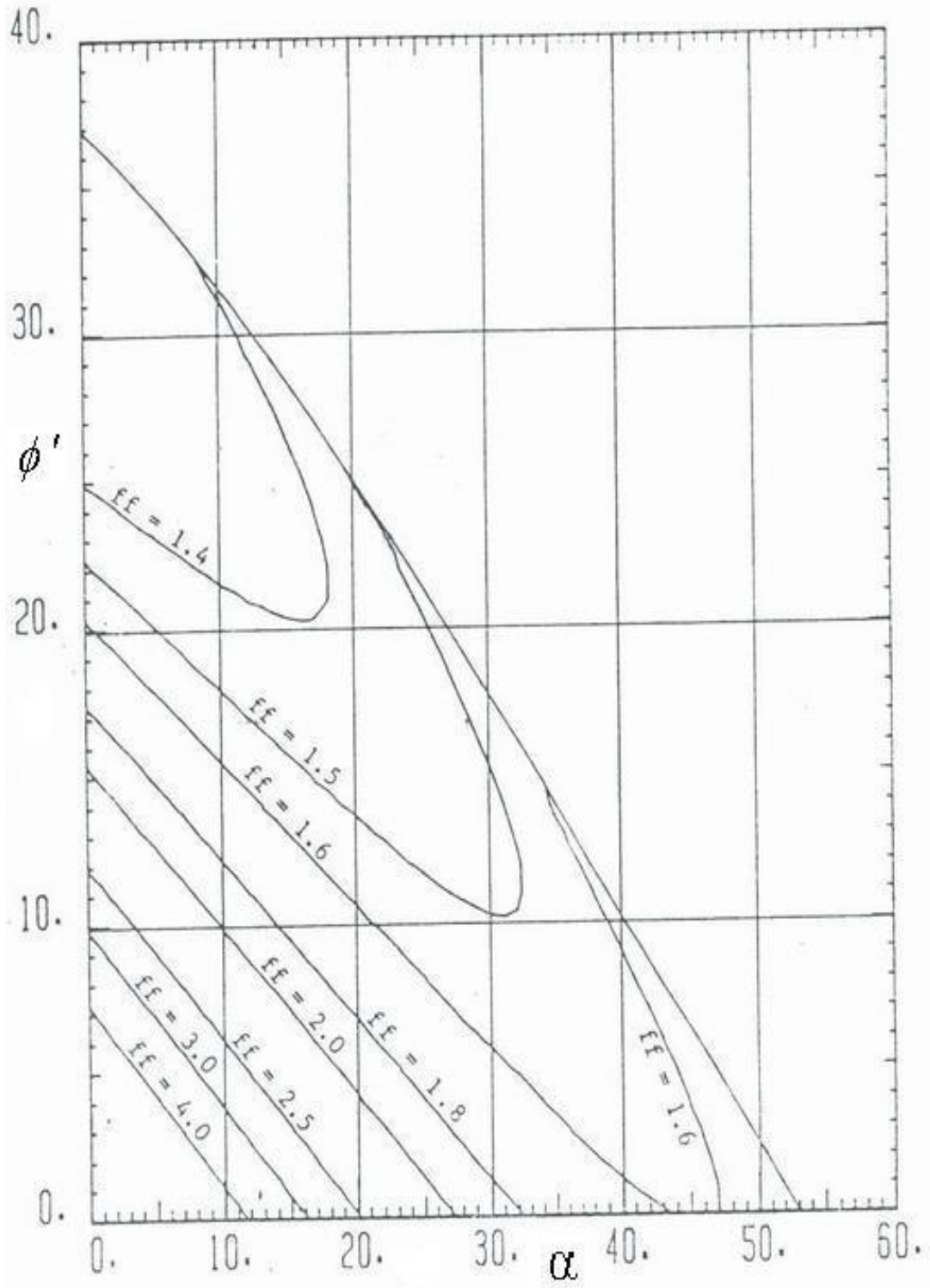
$$p \sin \phi + C \cos \phi = \sqrt{(\sigma_c - p)^2 + (\tau_c - 0)^2} \quad (\text{A.9})$$

Bu denklemde gerekli açılımlar yapıldıktan sonra p için ikinci dereceden denklem (3.15) elde edilmiş olunur.

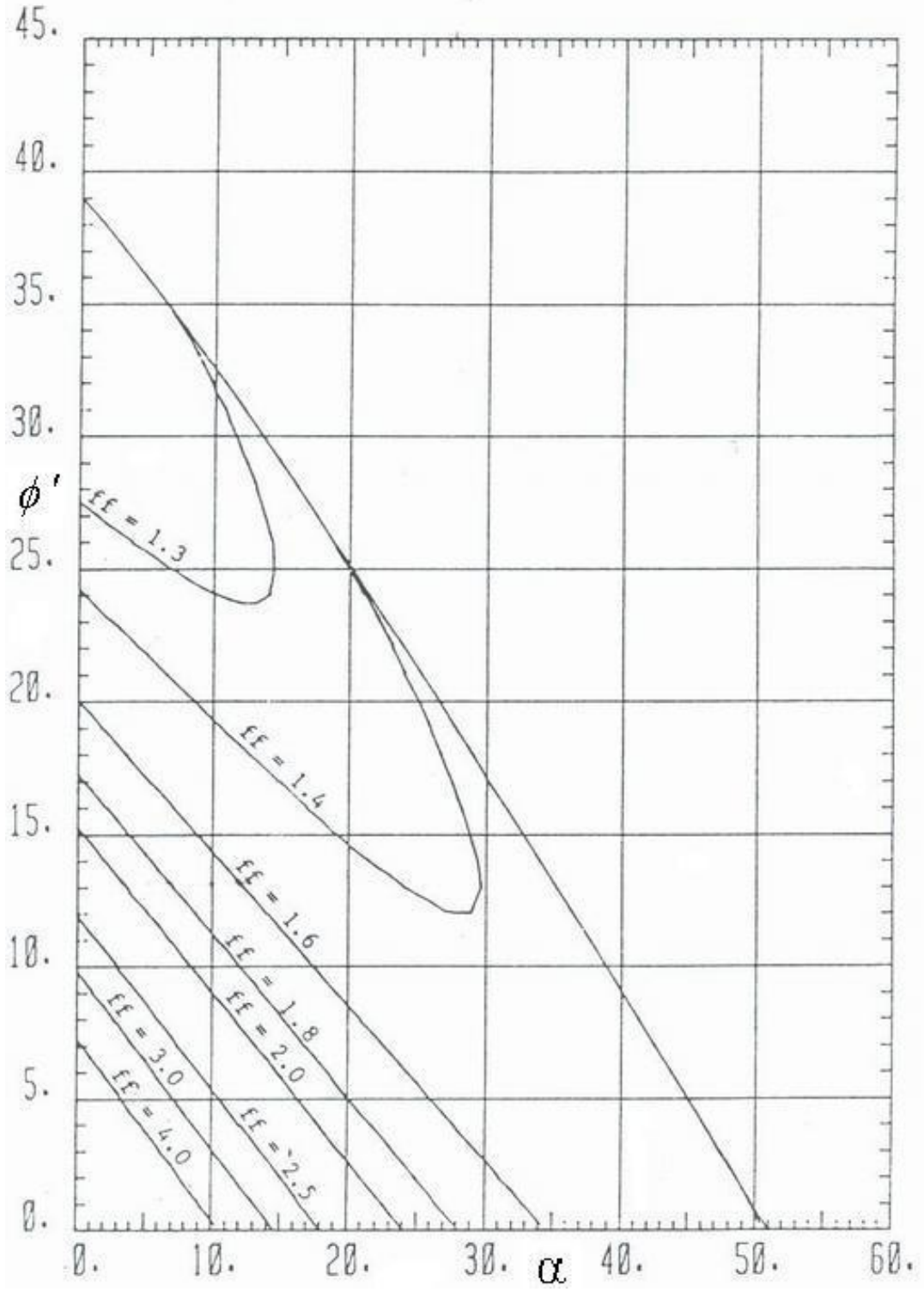
EK-B. KONİK VE DİKDÖRTGEN ŞEKLİ (DÜZLEM-AKIŞ) SİLOLAR İÇİN TASARIM (AKIŞ FAKTÖRÜ) GRAFİKLERİ [5]



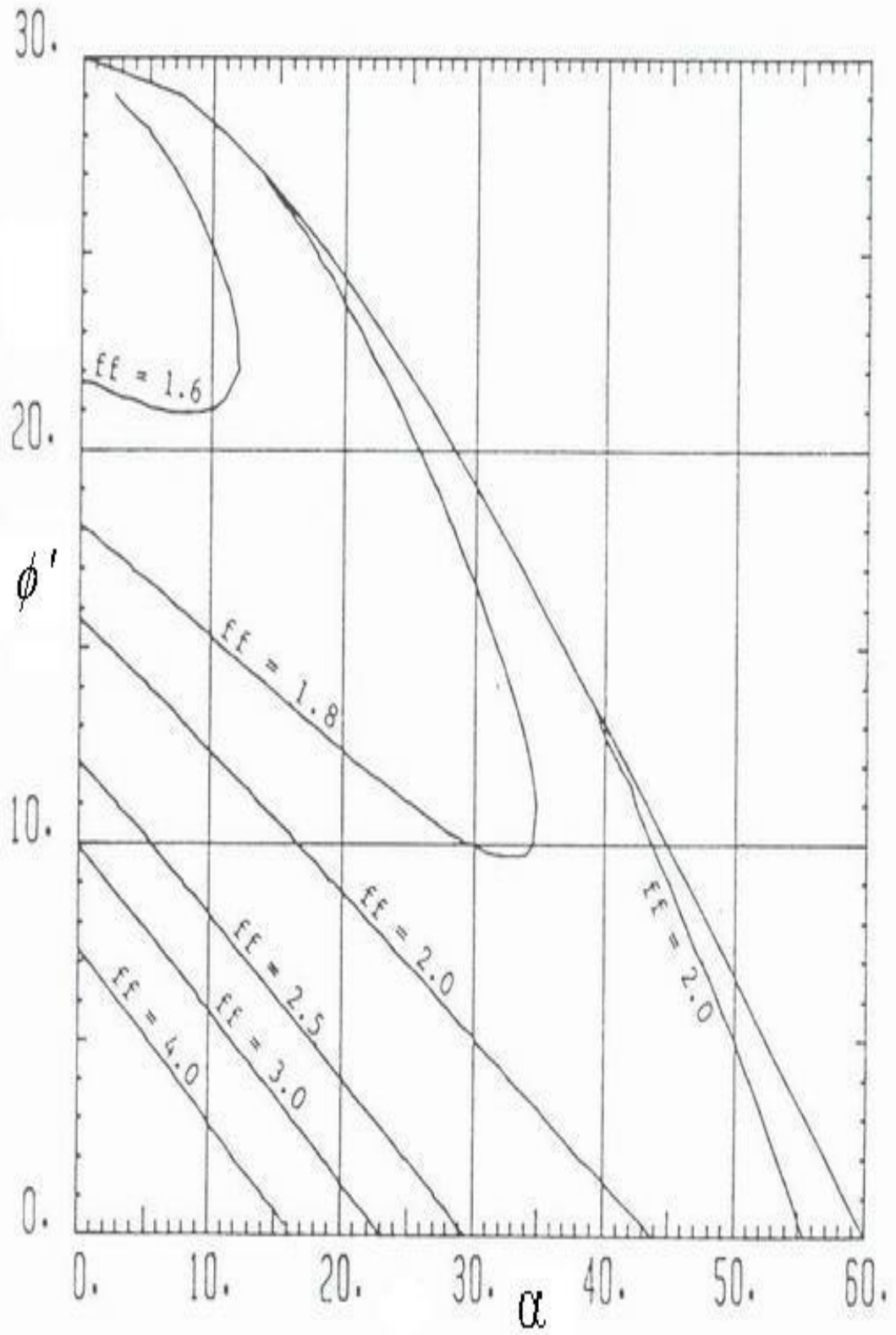
Şekil B.1: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=30^\circ$)



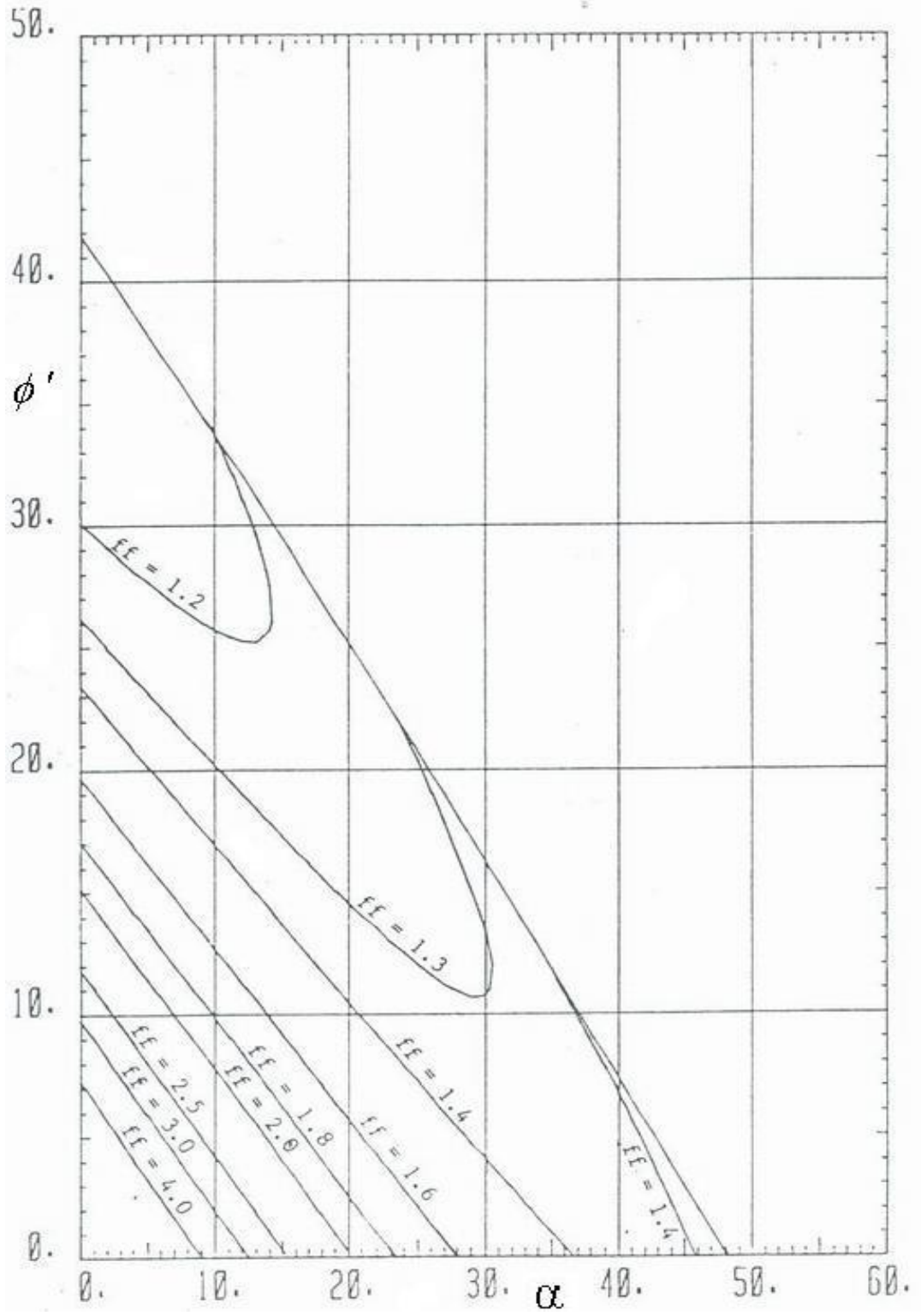
Şekil B.2: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=35^\circ$)



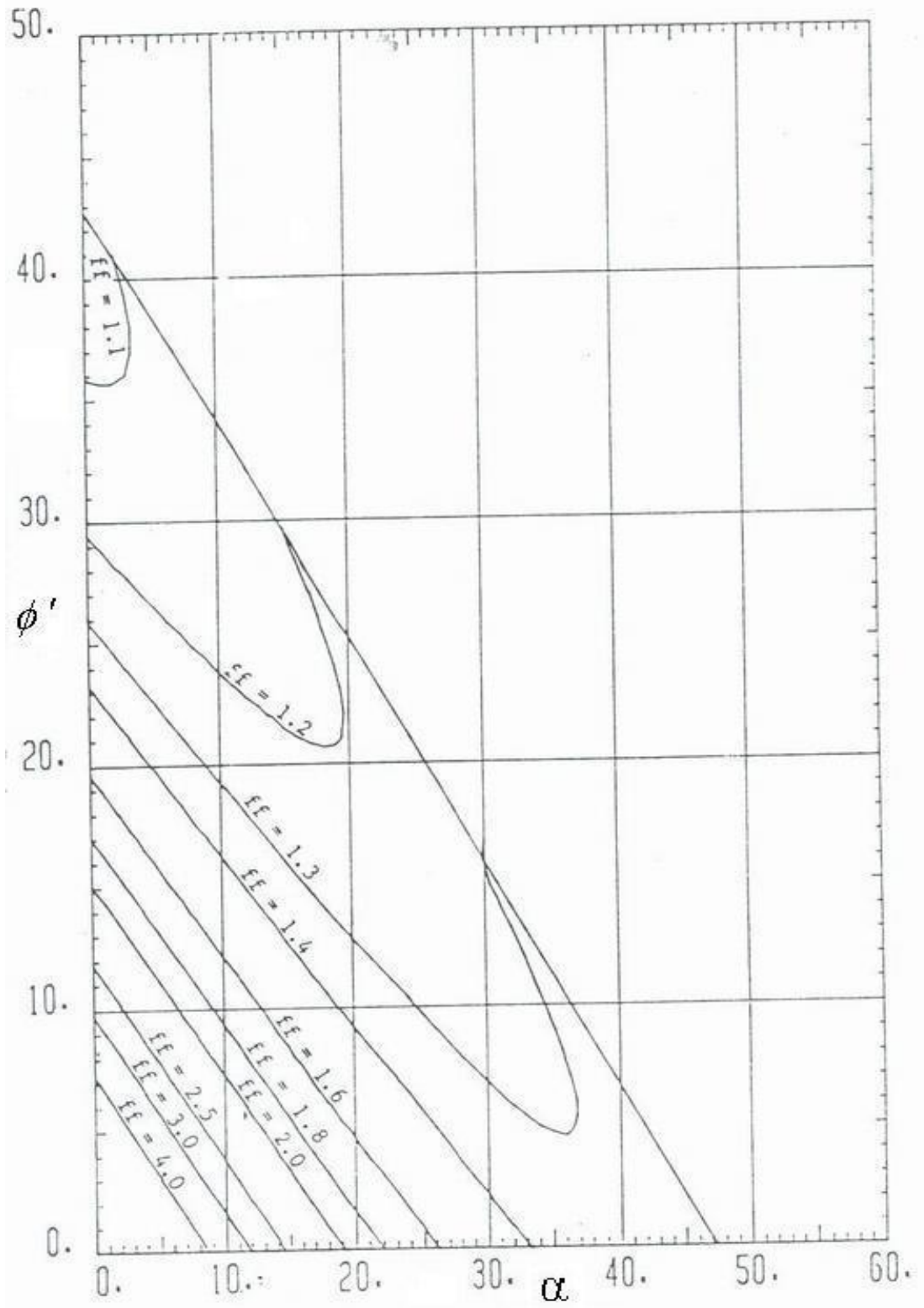
Şekil B.3: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=40^\circ$)



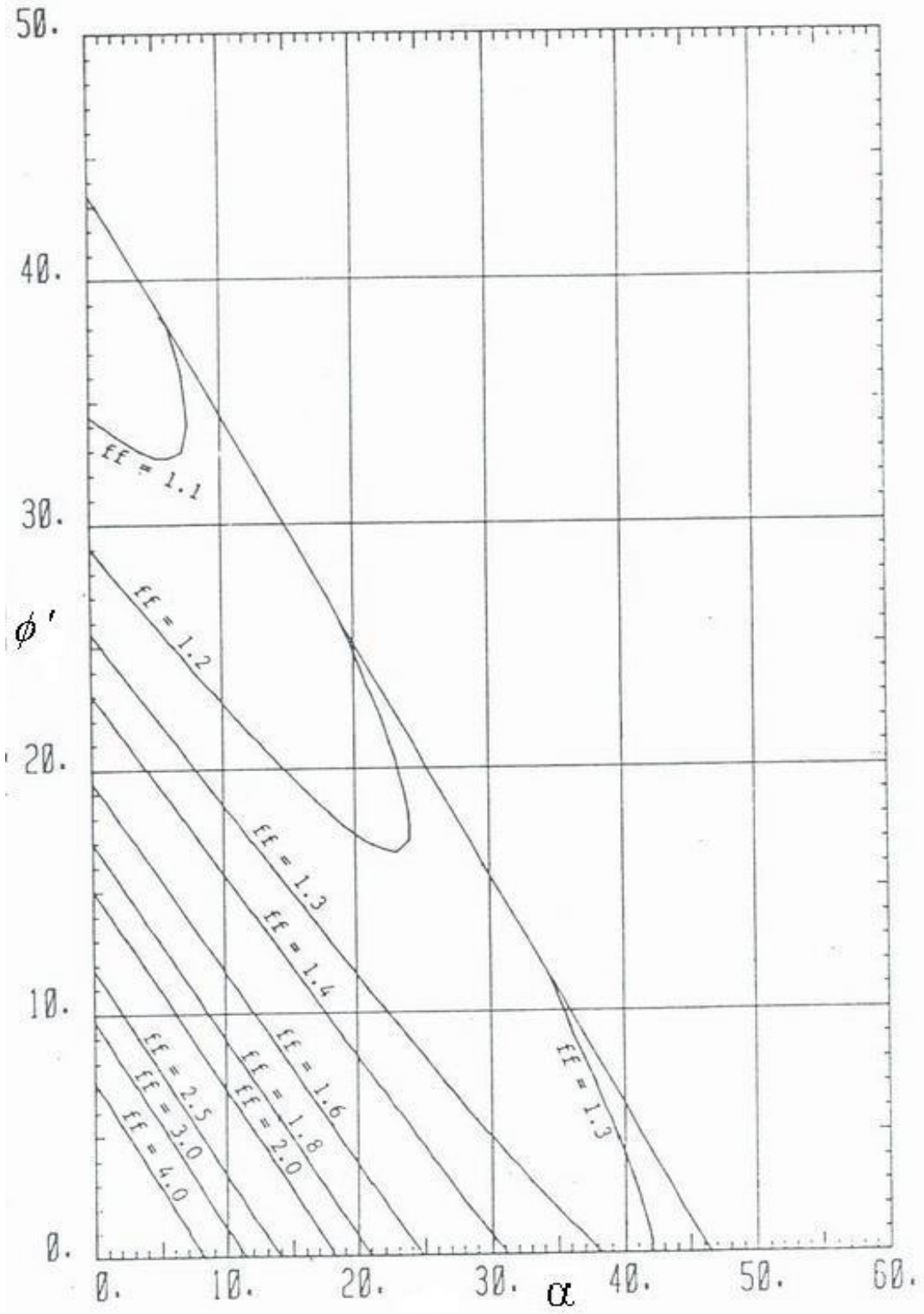
Şekil B.4: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=45^\circ$)



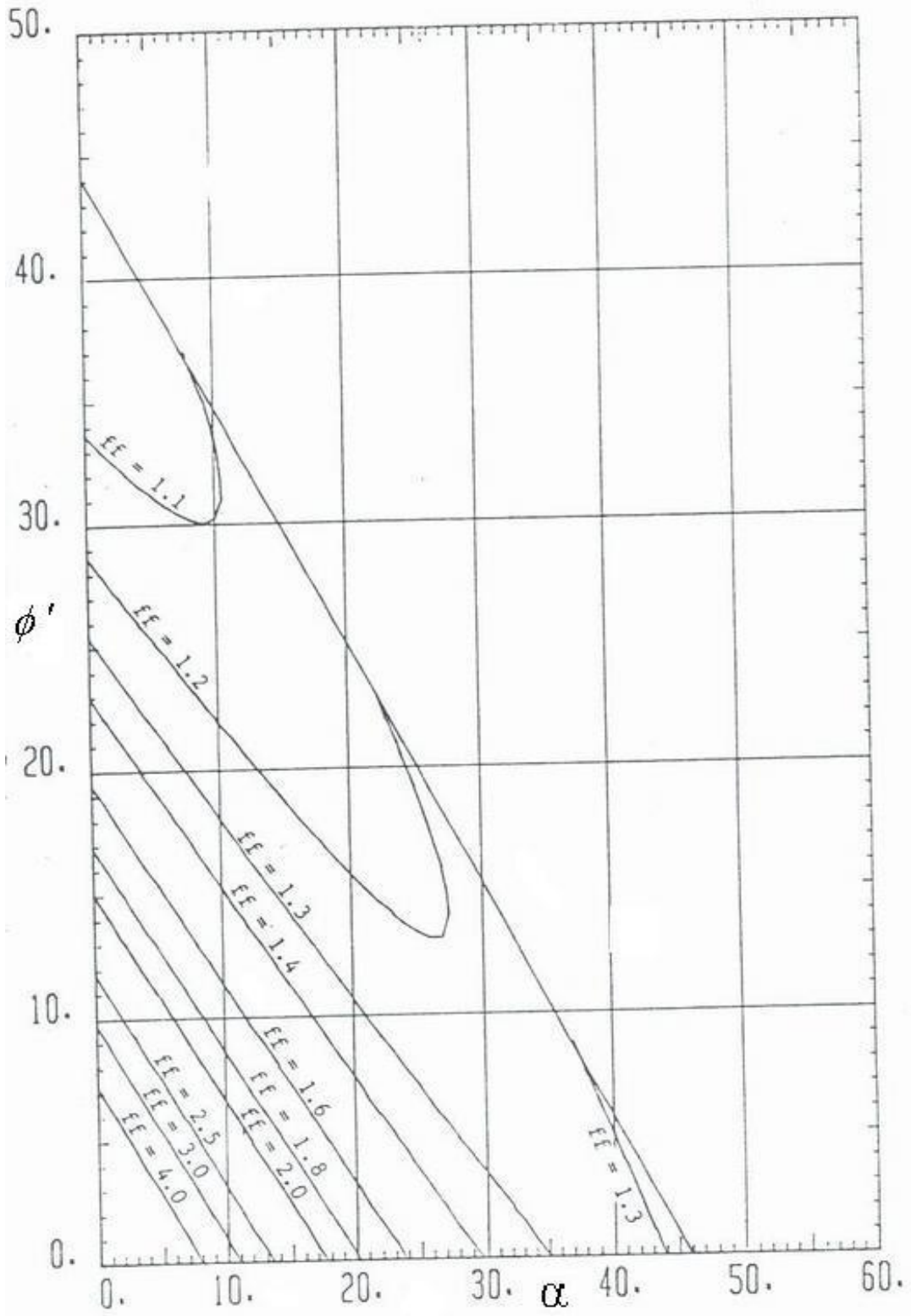
Şekil B.5: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=50^\circ$)



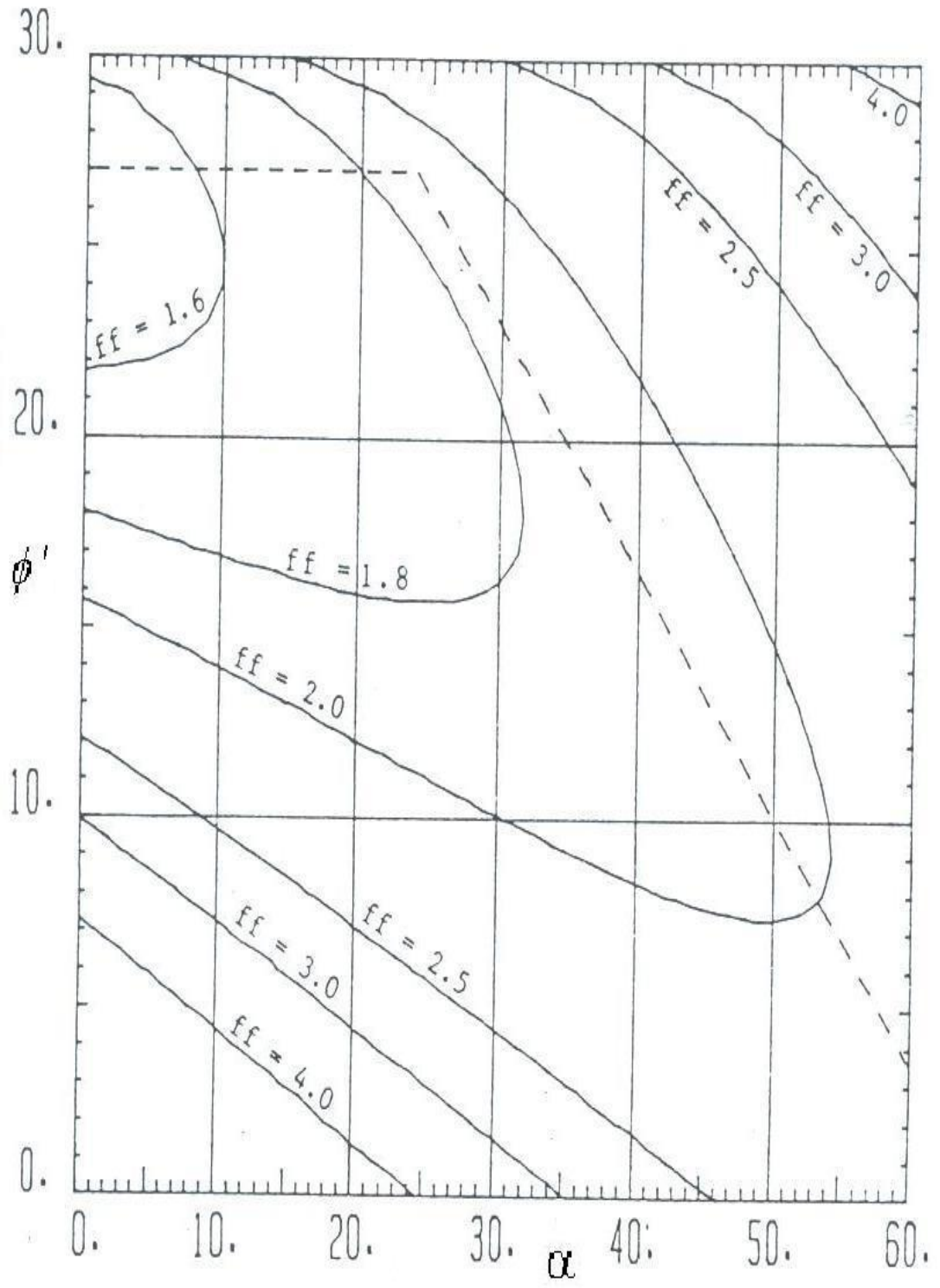
Şekil B.6: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=55^\circ$)



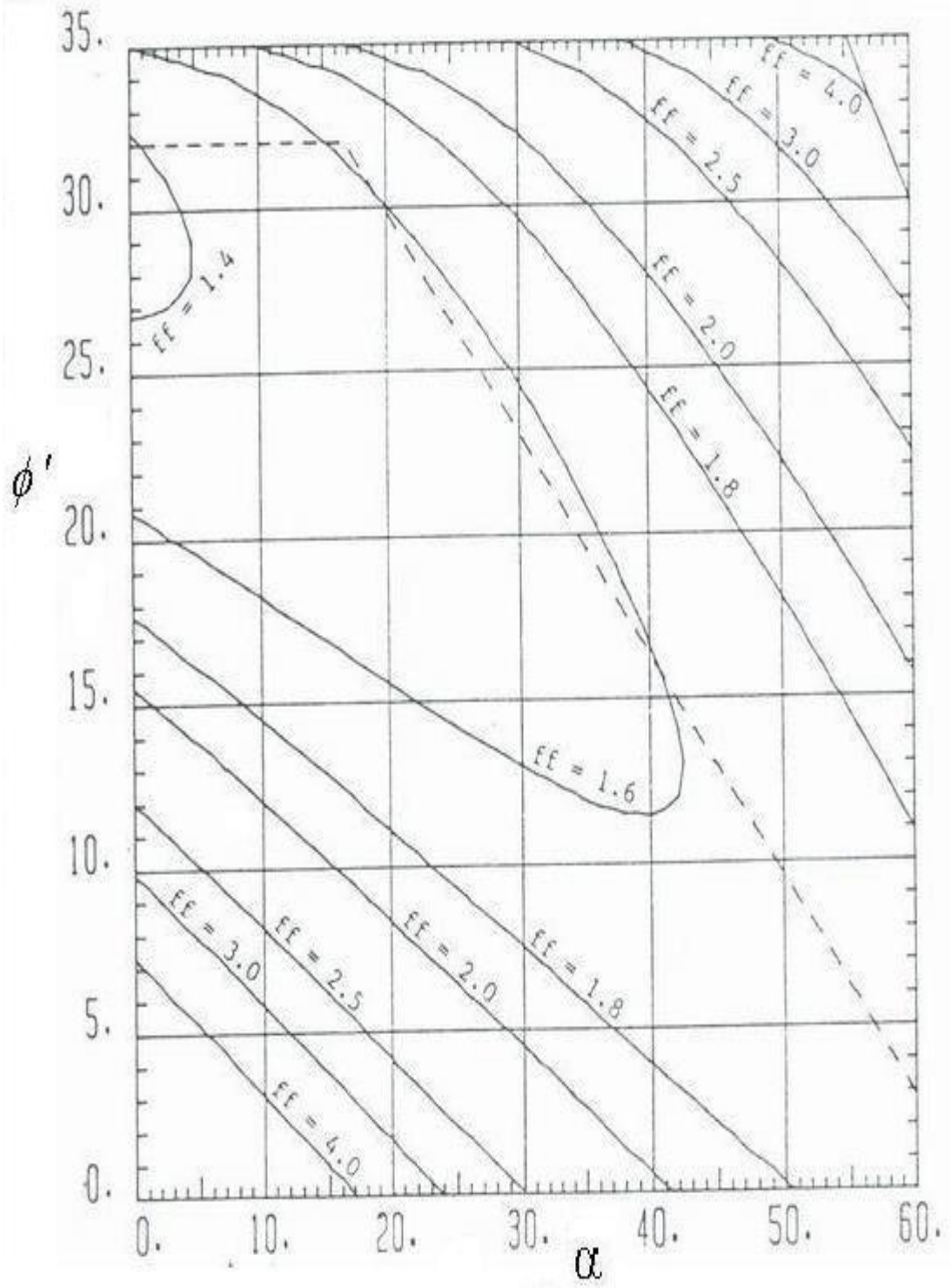
Şekil B.7: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=60^\circ$)



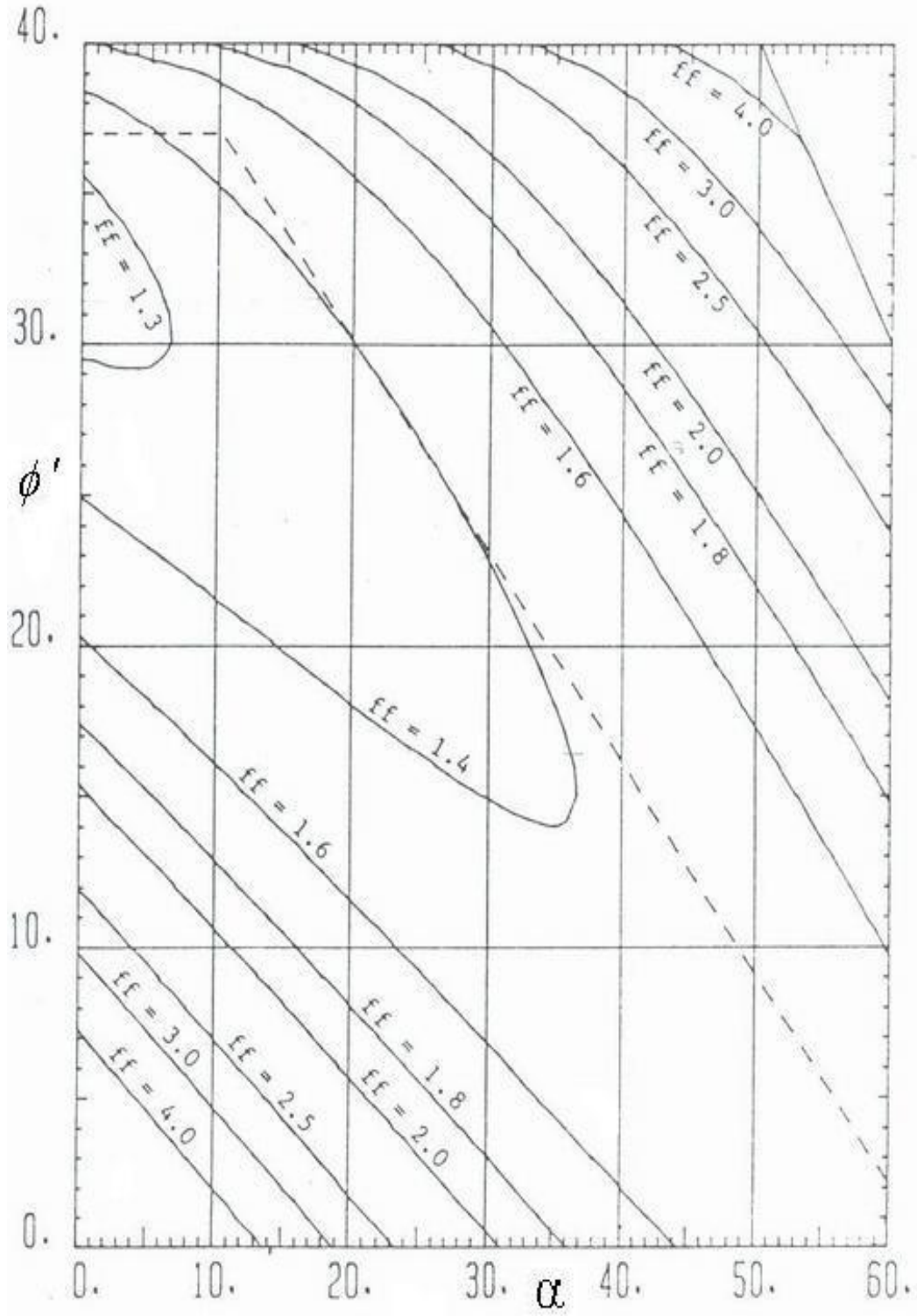
Şekil B.8: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=65^\circ$)



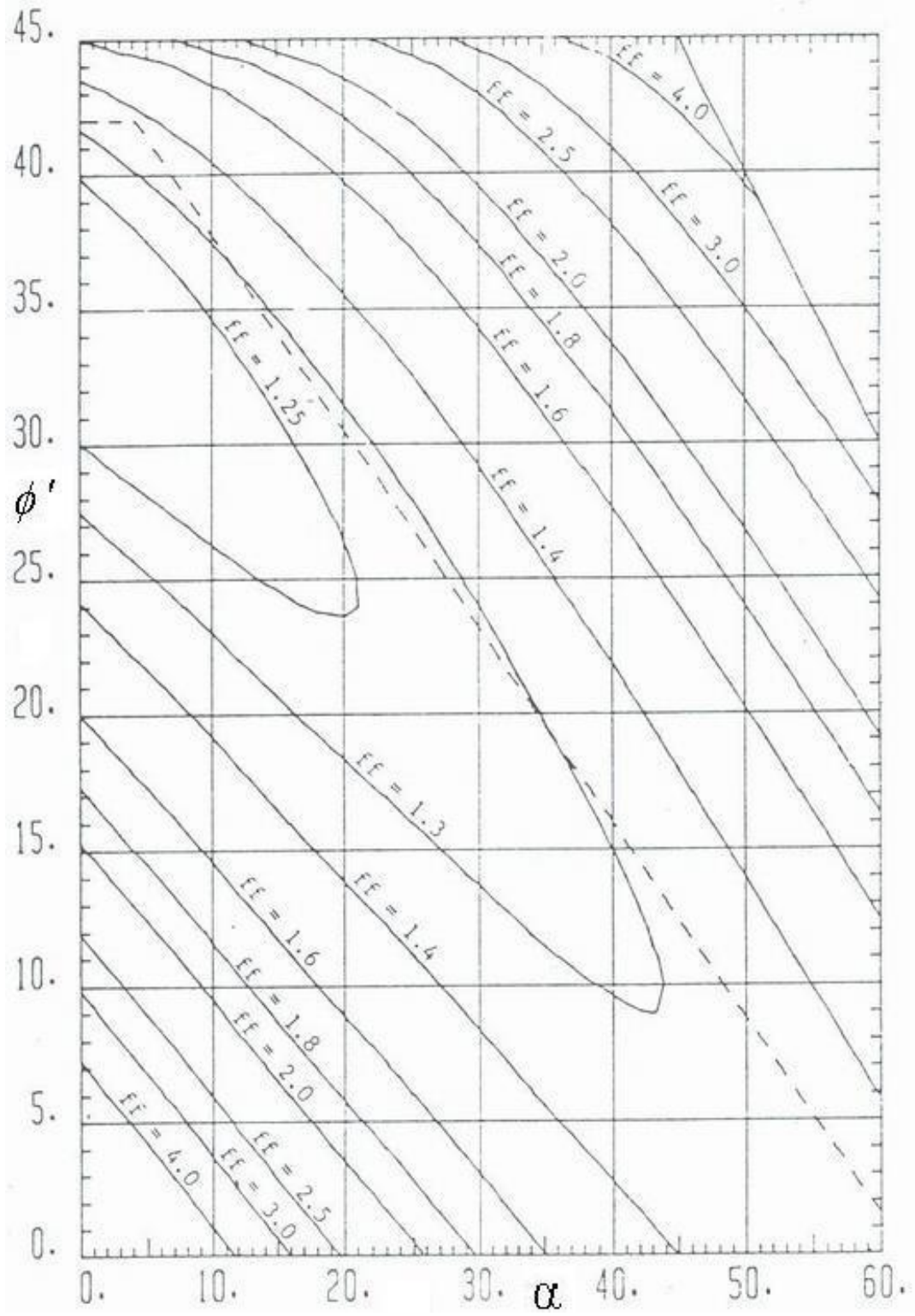
Şekil B.9: Konik şekilli silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=70^\circ$)



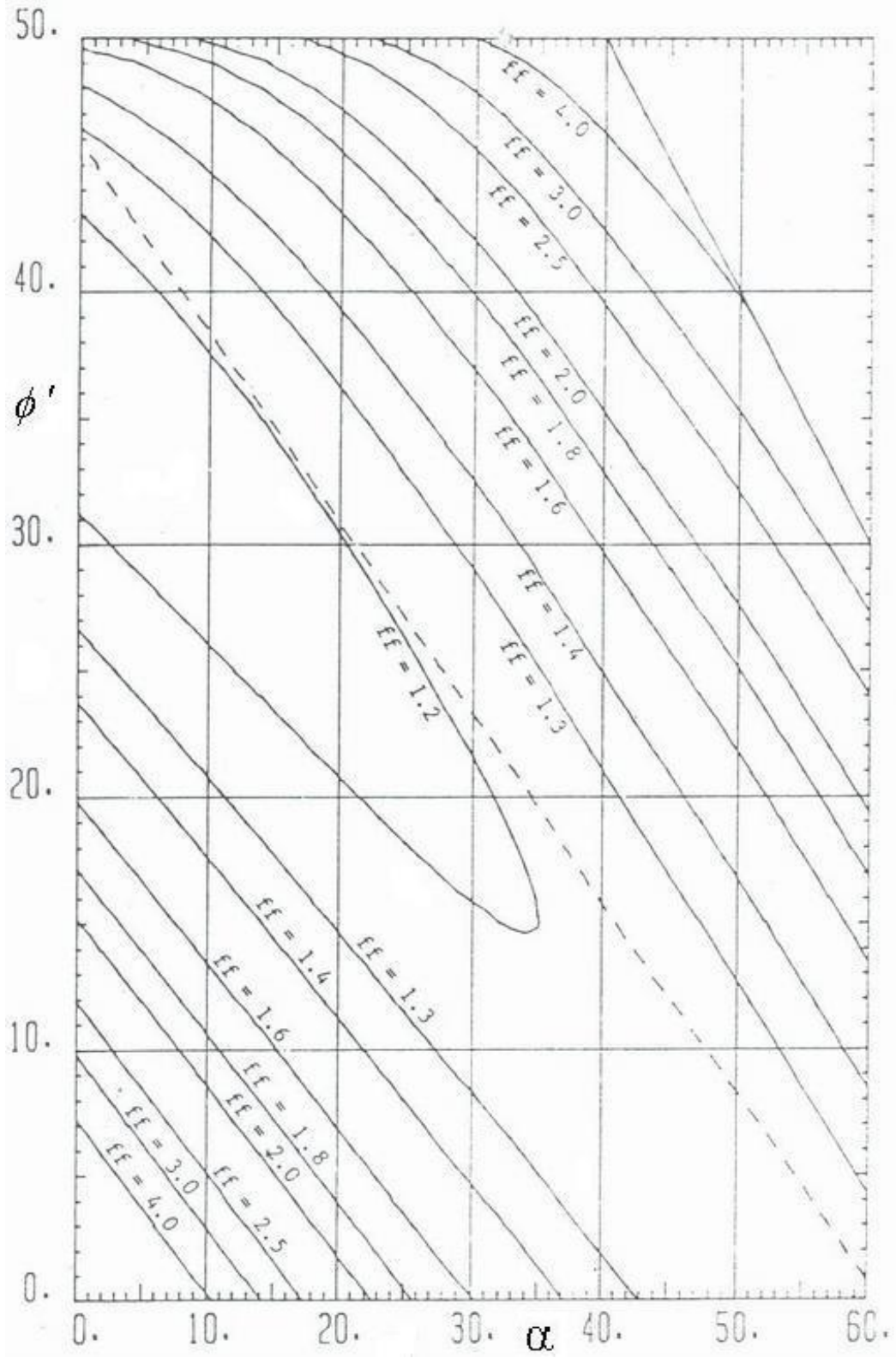
Şekil B.10: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=30^\circ$)



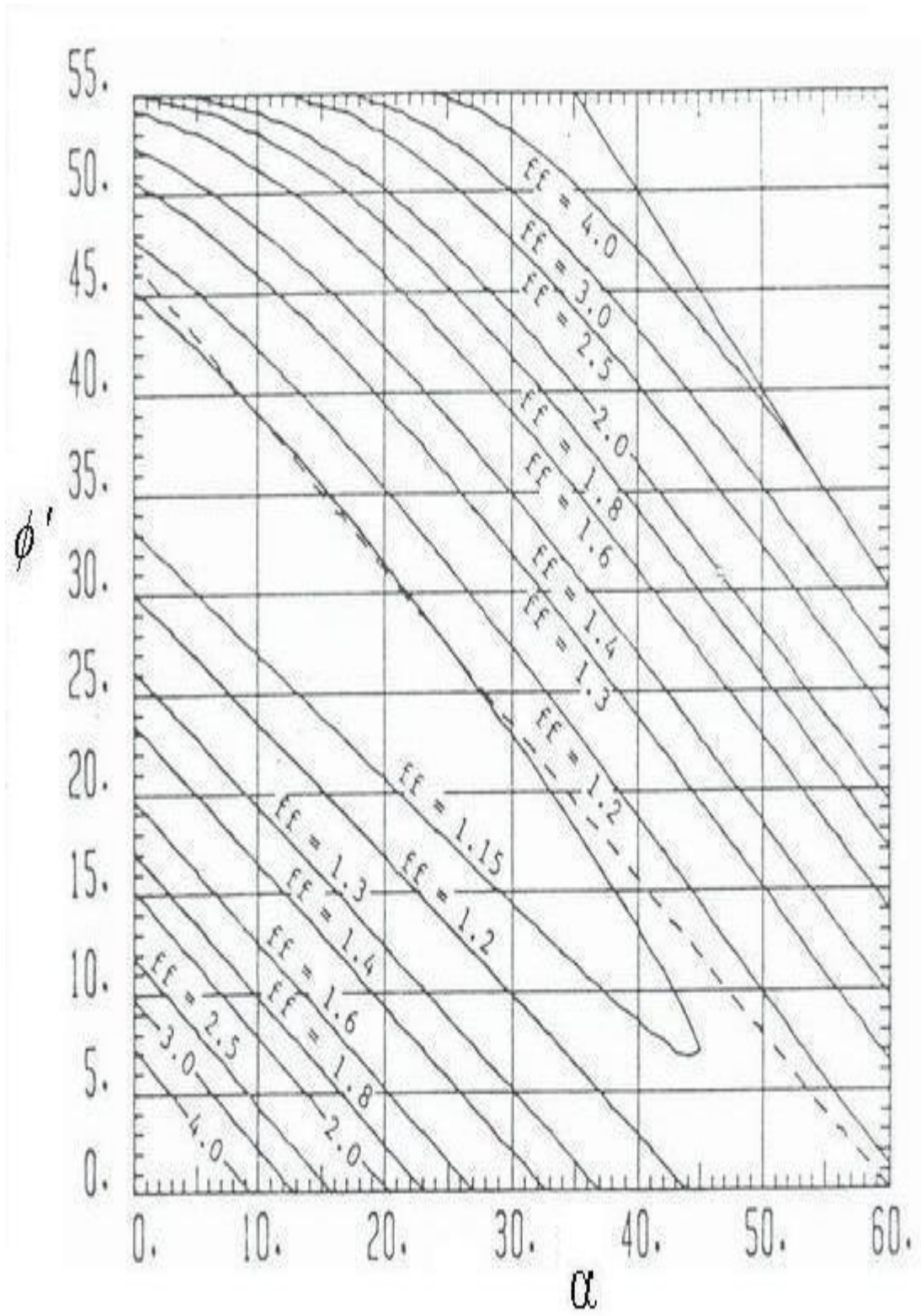
Şekil B.11: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=35^\circ$)



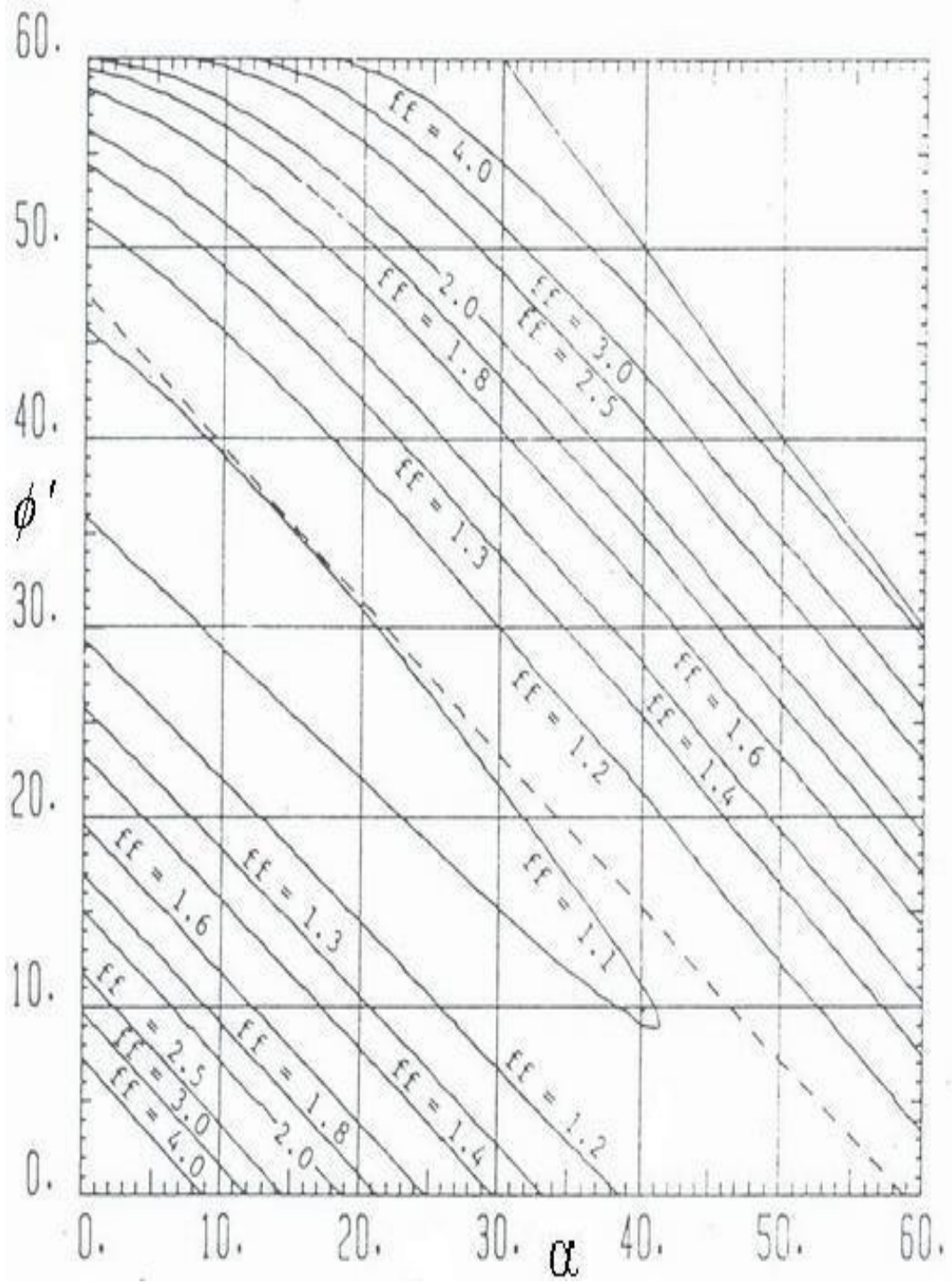
Şekil B.12: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=40^\circ$)



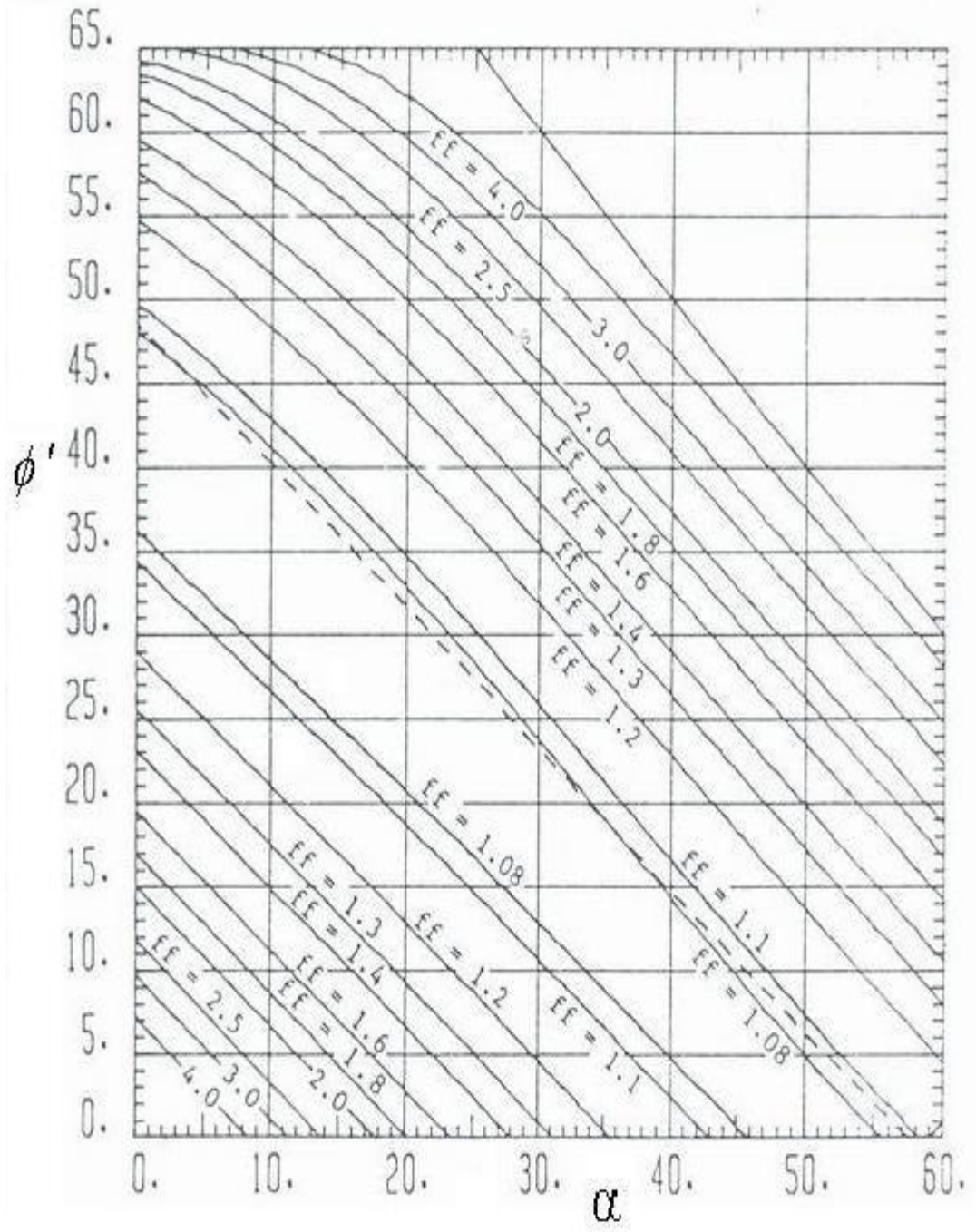
Şekil B.13: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=45^\circ$)



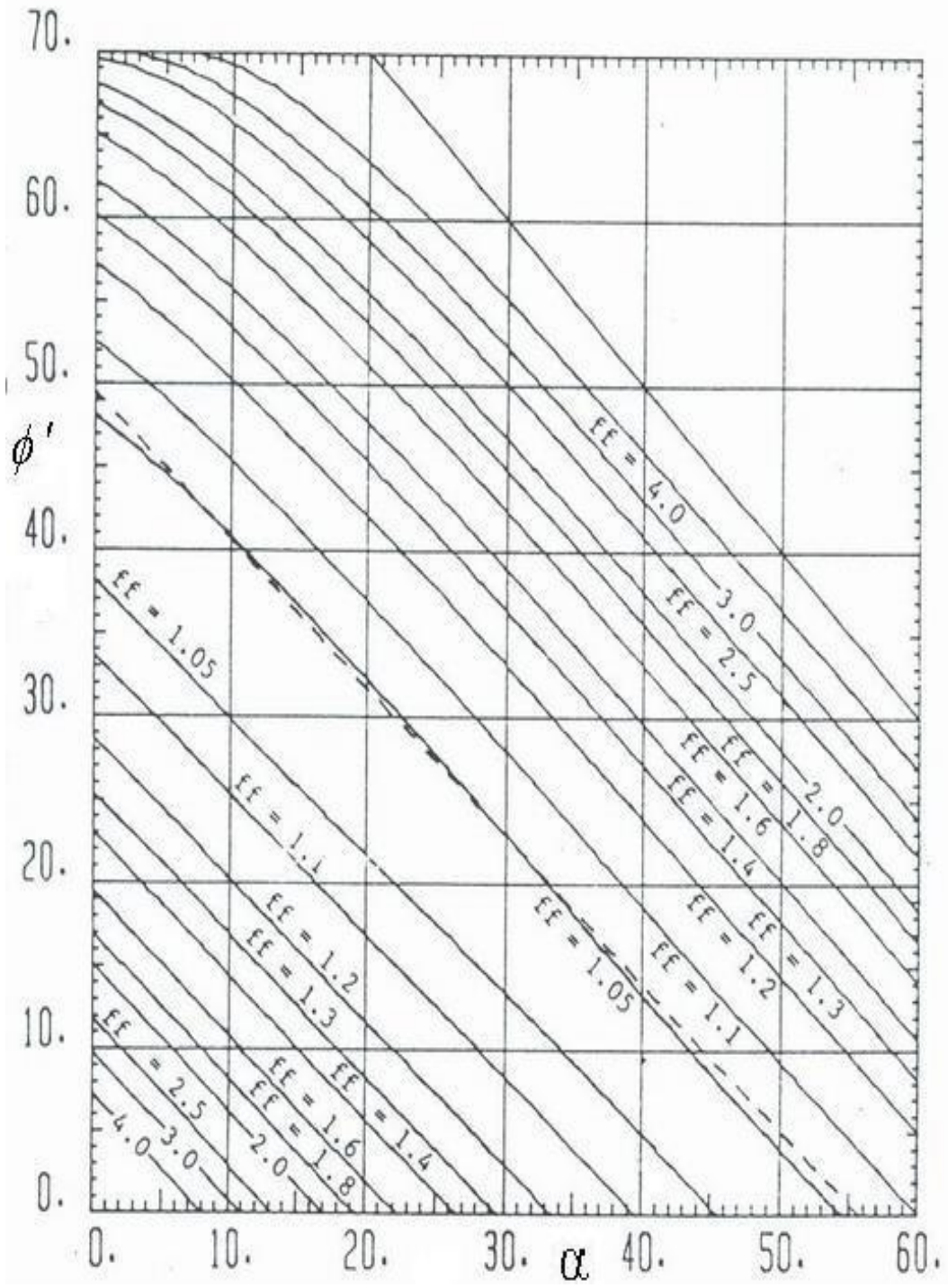
Şekil B.14: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=50^\circ$)



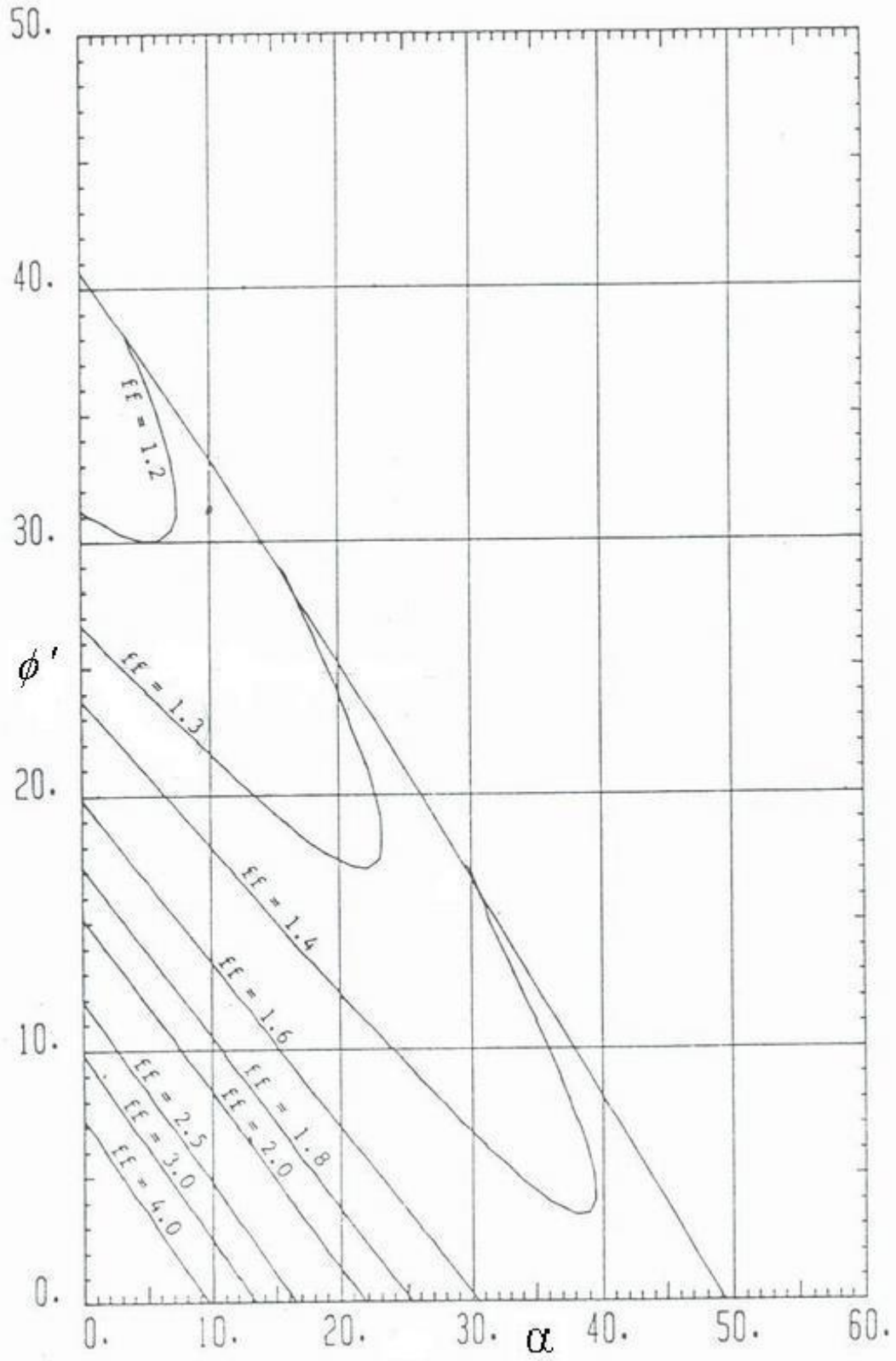
Şekil B.15: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=55^\circ$)



Şekil B.16: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=60^\circ$)



Şekil B.17: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=65^\circ$)

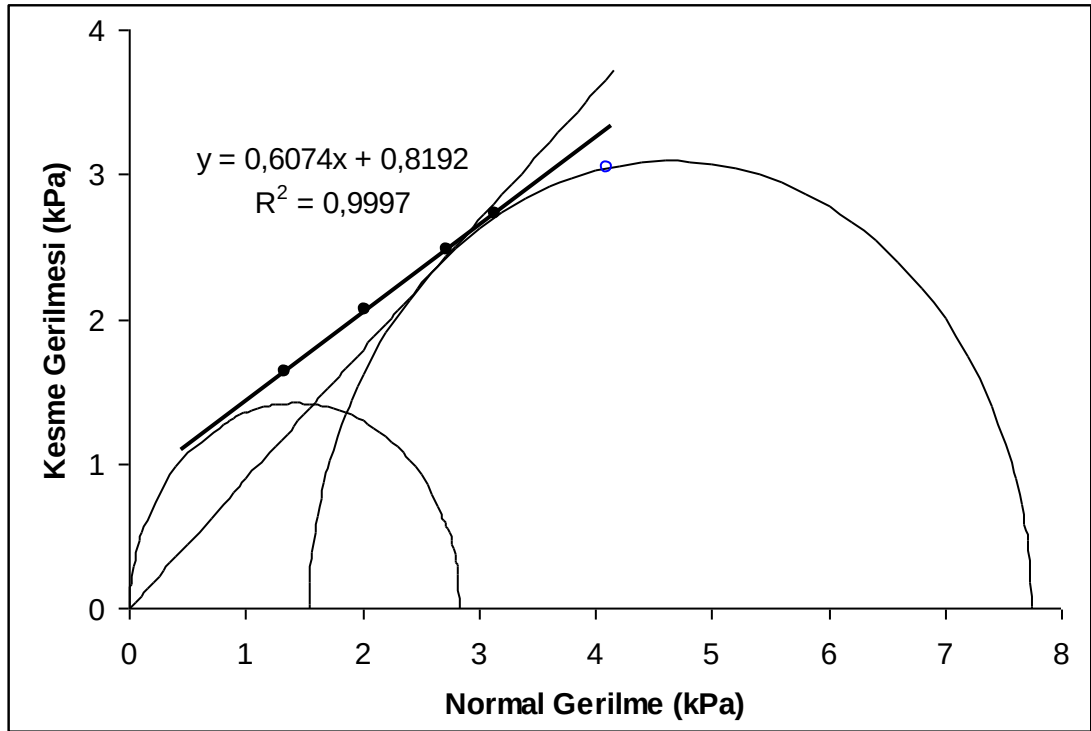


Şekil B.18: Dikdörtgen şekilli (düzlem-akış) silolar için akış faktörü grafiği ($\delta=70^\circ$)

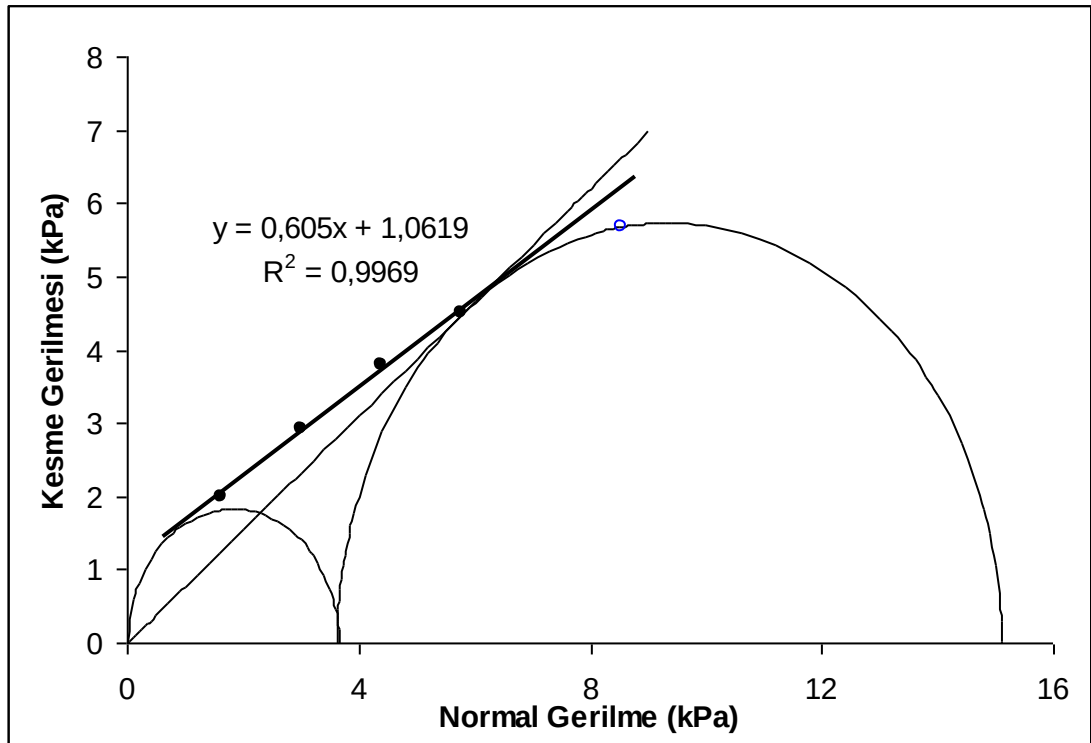
**EK-C. FARKLI MALZEMELER İÇİN ELDE EDİLMİŞ TEST SONUÇLARI
VE AKMA SINIRI HATLARI**

Tablo C.1: Yalıköy kumu (%1 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

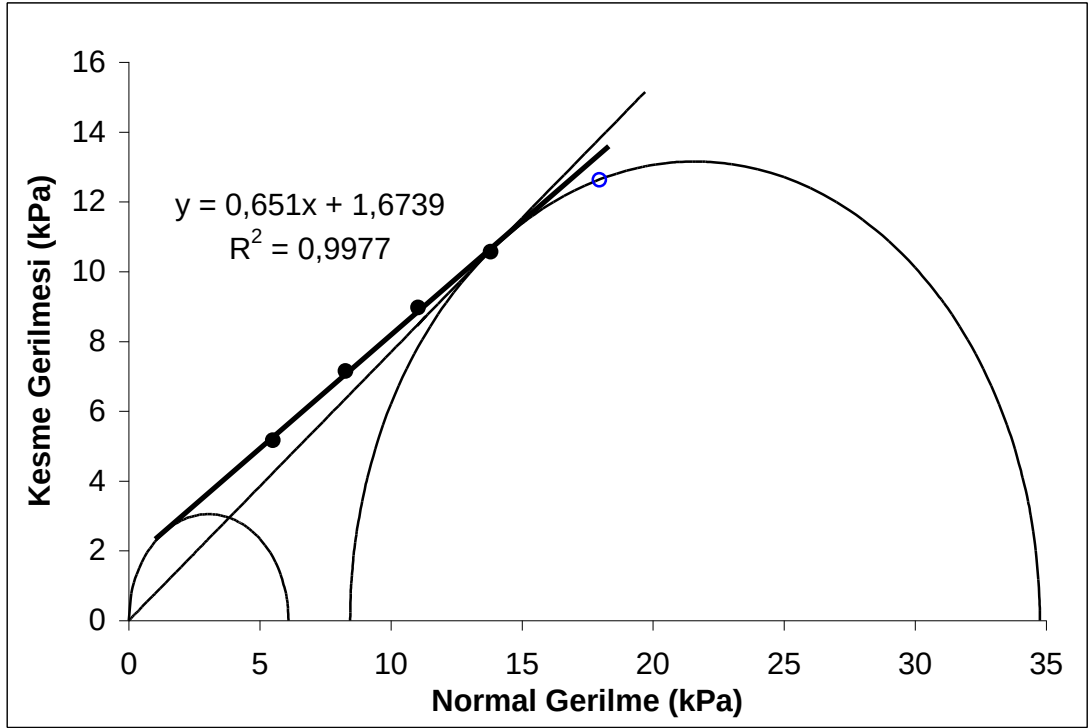
4.11 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	29.13	21.25	4.11	3.00	3.05
	22.26	19.00	3.14	2.68	2.72
2	29.13	21.75	4.11	3.07	3.05
	19.32	17.65	2.72	2.49	2.47
3	29.13	21.38	4.11	3.02	3.05
	14.41	14.50	2.03	2.05	2.07
4	29.13	22.00	4.11	3.10	3.05
	9.51	11.75	1.34	1.66	1.63
8.54 kPa					
1	60.56	40.38	8.54	5.70	5.68
	40.94	32.00	5.77	4.51	4.50
2	60.56	40.13	8.54	5.66	5.68
	31.13	26.75	4.39	3.77	3.78
3	60.56	40.50	8.54	5.71	5.68
	21.32	20.80	3.01	2.93	2.92
4	60.56	40.00	8.54	5.64	5.68
	11.51	14.08	1.62	1.99	2.00
17.96 kPa					
1	127.34	92.00	17.96	12.98	12.62
	97.91	77.00	13.81	10.86	10.57
2	127.34	88.00	17.96	12.41	12.62
	78.29	62.50	11.04	8.82	8.97
3	127.34	90.00	17.96	12.69	12.62
	58.67	51.00	8.28	7.19	7.15
4	127.34	88.00	17.96	12.41	12.62
	39.05	36.00	5.51	5.08	5.16
31.79 kPa					
1	225.41	147.00	31.79	20.73	20.43
	176.36	125.00	24.88	17.63	17.38
2	225.41	145.50	31.79	20.52	20.43
	137.12	101.00	19.34	14.25	14.18
3	225.41	143.00	31.79	20.17	20.43
	97.88	76.75	13.81	10.83	10.97
4	225.41	144.00	31.79	20.31	20.43
	68.45	57.70	9.66	8.14	8.19



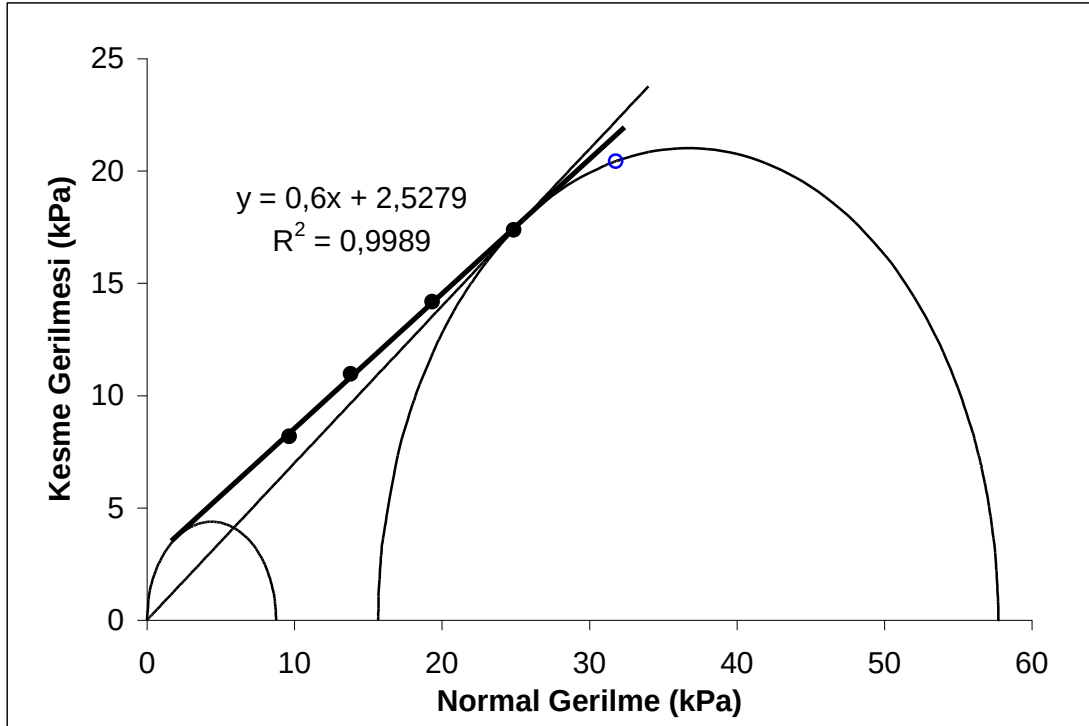
Şekil C.1: Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 4.11 kPa)



Şekil C.2: Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 8.54 kPa)



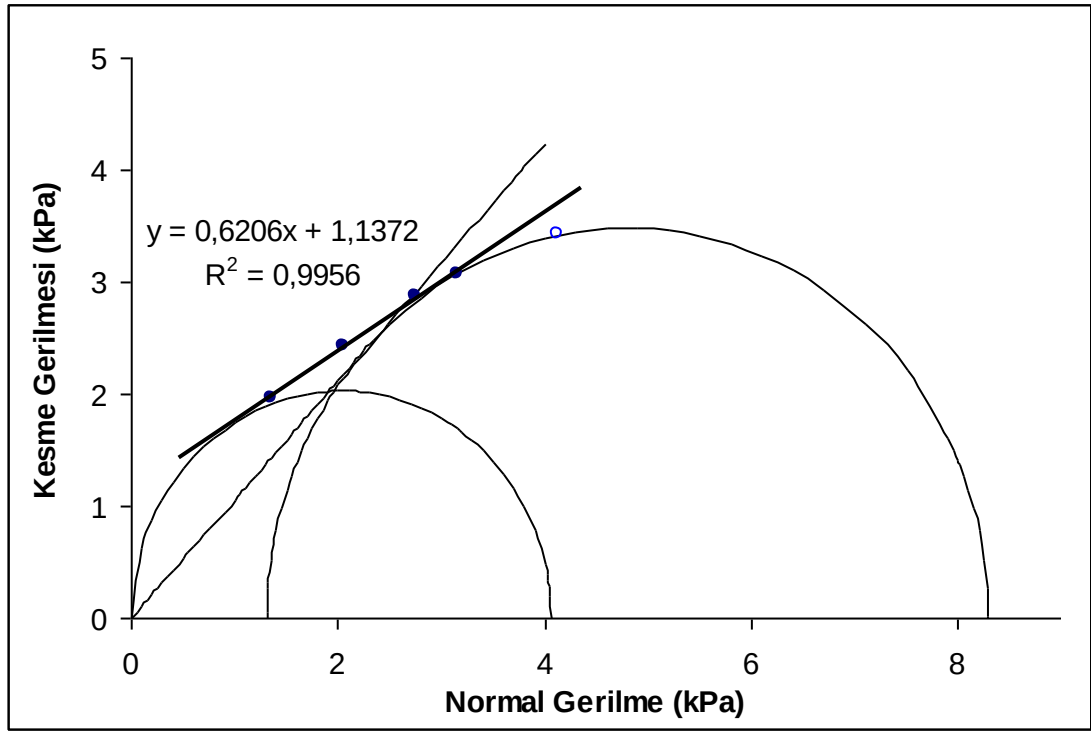
Şekil C.3: Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 17.96 kPa)



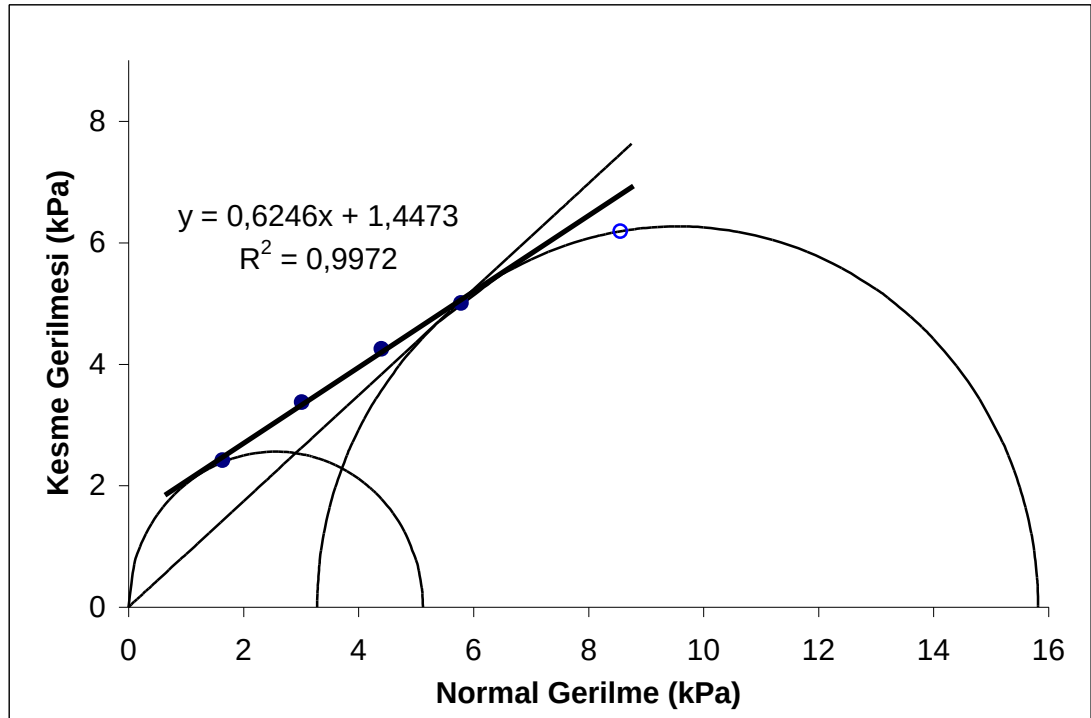
Şekil C.4: Yalıköy kumu (%1 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 31.79 kPa)

Tablo C.2: Yalıköy kumu (%14 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

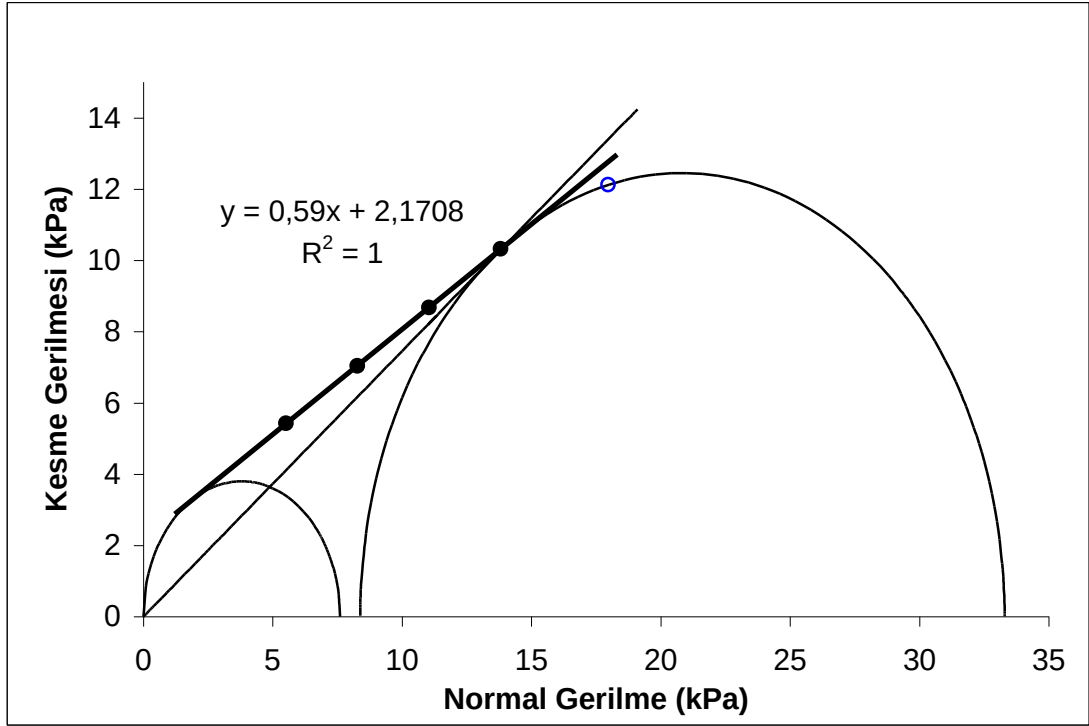
4.12 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	29.24	23.75	4.12	3.35	3.42
	22.37	21.25	3.16	3.00	3.06
2	29.24	23.88	4.12	3.37	3.42
	19.43	20.00	2.74	2.82	2.87
3	29.24	24.95	4.12	3.52	3.42
	14.53	17.75	2.05	2.50	2.44
4	29.24	24.50	4.12	3.46	3.42
	9.62	14.00	1.36	1.97	1.96
8.55 kPa					
1	60.63	44.50	8.55	6.28	6.19
	41.01	36.00	5.78	5.08	5.01
2	60.63	43.50	8.55	6.14	6.19
	31.20	29.90	4.40	4.22	4.25
3	60.63	44.00	8.55	6.21	6.19
	21.39	24.00	3.02	3.39	3.38
4	60.63	43.50	8.55	6.14	6.19
	11.58	17.00	1.63	2.40	2.42
17.96 kPa					
1	127.34	85.83	17.96	12.11	12.12
	97.91	73.10	13.81	10.31	10.33
2	127.34	86.30	17.96	12.17	12.12
	78.29	61.80	11.04	8.72	8.68
3	127.34	86.20	17.96	12.16	12.12
	58.67	50.05	8.28	7.06	7.04
4	127.34	85.50	17.96	12.06	12.12
	39.05	38.30	5.51	5.40	5.43
31.80 kPa					
1	225.44	151.00	31.80	21.30	21.05
	176.39	128.00	24.88	18.05	17.84
2	225.44	150.00	31.80	21.16	21.05
	137.15	102.00	19.34	14.39	14.31
3	225.44	147.00	31.80	20.73	21.05
	97.91	78.00	13.81	11.00	11.17
4	225.44	149.00	31.80	21.02	21.05
	68.48	61.00	9.66	8.60	8.62



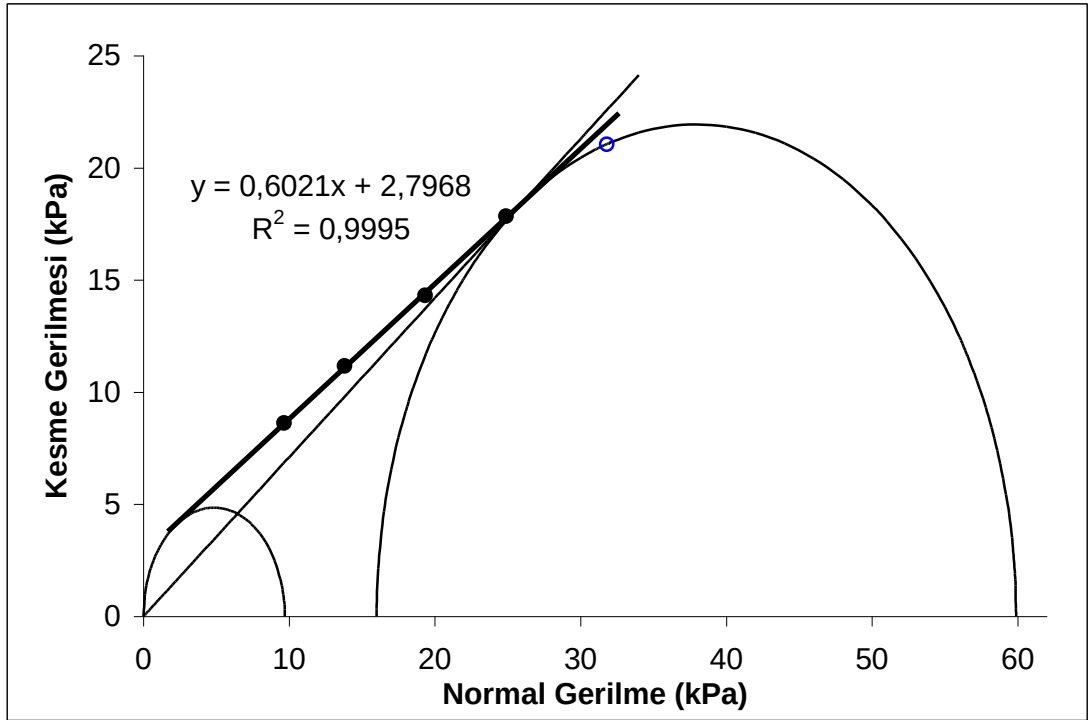
Şekil C.5: Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 4.12 kPa)



Şekil C.6: Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 8.55 kPa)



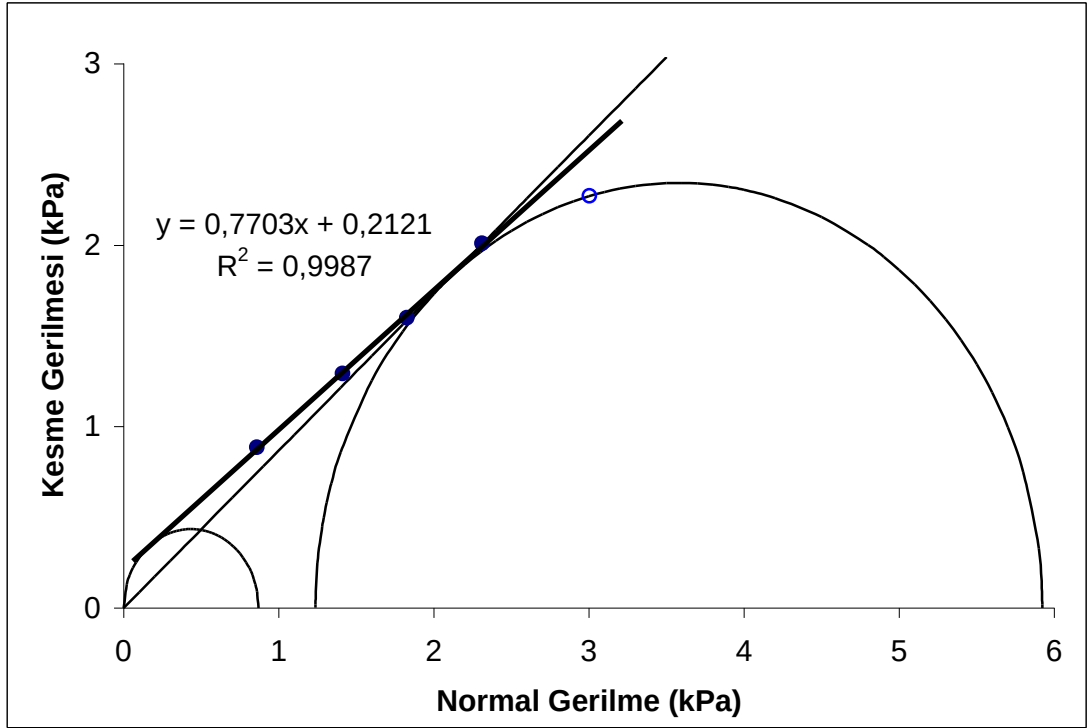
Şekil C.7: Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 17.96 kPa)



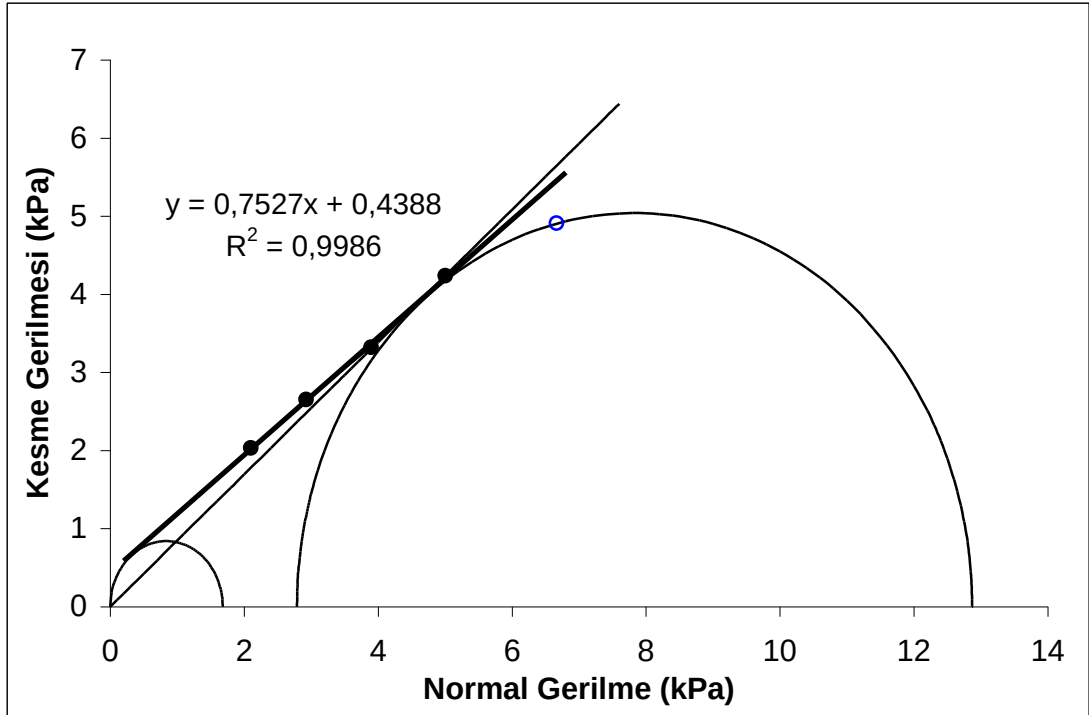
Şekil C.8: Yalıköy kumu (%14 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 31.80 kPa)

Tablo C.3: Kalker (%0.04 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

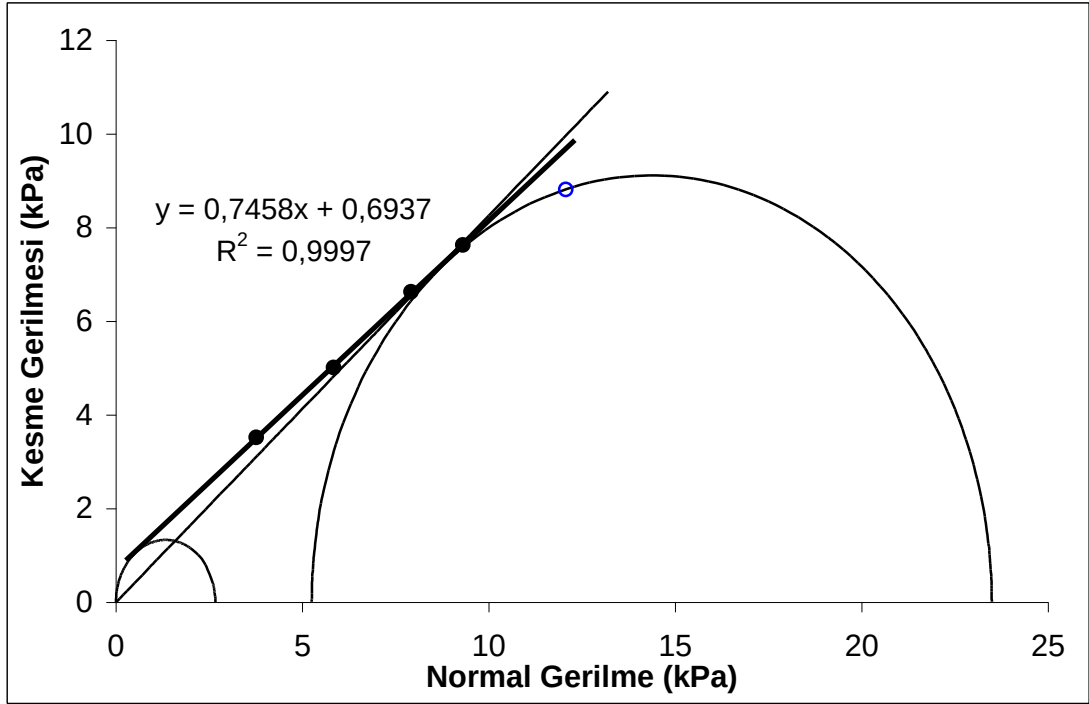
3.00 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	21.30	16.50	3.00	2.33	2.27
	16.39	14.60	2.31	2.06	2.01
2	21.30	15.75	3.00	2.22	2.27
	12.96	11.10	1.83	1.57	1.60
3	21.30	16.00	3.00	2.26	2.27
	10.02	9.10	1.41	1.28	1.29
4	21.30	16.15	3.00	2.28	2.27
	6.09	6.30	0.86	0.89	0.89
6.66 kPa					
1	47.25	35.00	6.66	4.94	4.91
	35.48	30.20	5.00	4.26	4.24
2	47.25	34.87	6.66	4.92	4.91
	27.63	23.60	3.90	3.33	3.32
3	47.25	34.58	6.66	4.88	4.91
	20.77	18.68	2.93	2.63	2.65
4	47.25	34.75	6.66	4.90	4.91
	14.88	14.39	2.10	2.03	2.03
12.07 kPa					
1	85.58	62.30	12.07	8.79	8.82
	65.96	53.90	9.30	7.60	7.63
2	85.58	62.60	12.07	8.83	8.82
	56.15	47.05	7.92	6.64	6.63
3	85.58	62.90	12.07	8.87	8.82
	41.44	35.75	5.84	5.04	5.01
4	85.58	62.25	12.07	8.78	8.82
	26.72	24.88	3.77	3.51	3.52
23.69 kPa					
1	167.99	120.00	23.69	16.93	16.83
	130.71	104.10	18.44	14.68	14.60
2	167.99	118.80	23.69	16.76	16.83
	102.26	82.30	14.42	11.61	11.66
3	167.99	118.50	23.69	16.71	16.83
	73.81	61.05	10.41	8.61	8.67
4	167.99	120.00	23.69	16.93	16.83
	45.36	40.40	6.40	5.70	5.67



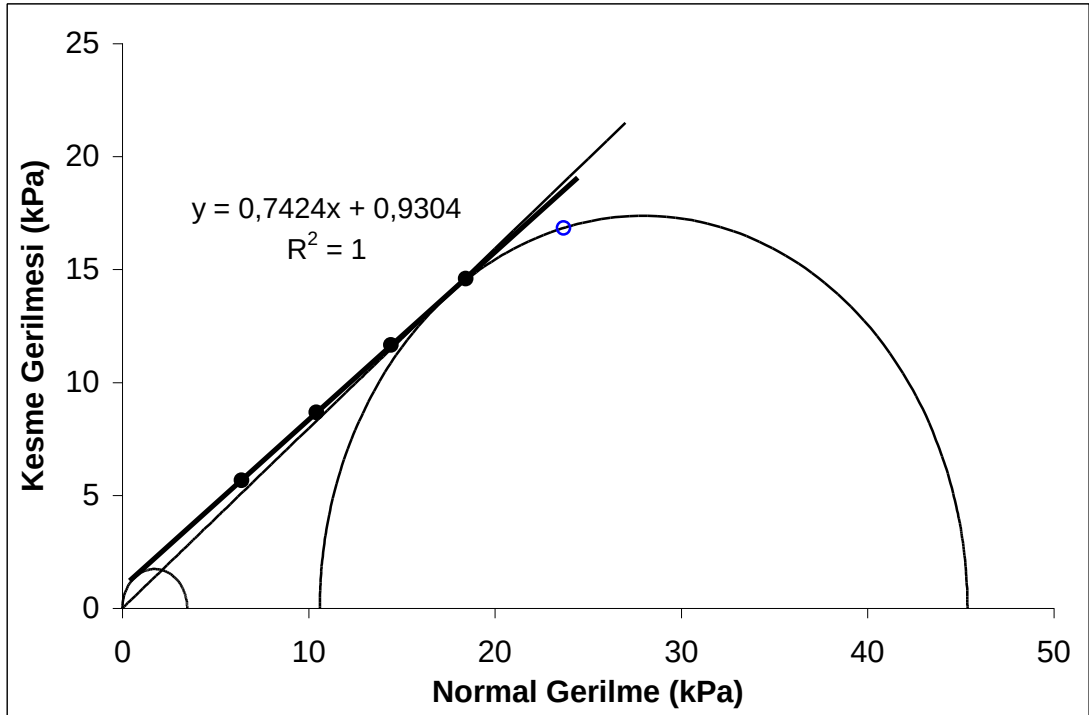
Şekil C.9: Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 3.00 kPa)



Şekil C.10: Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 6.66 kPa)



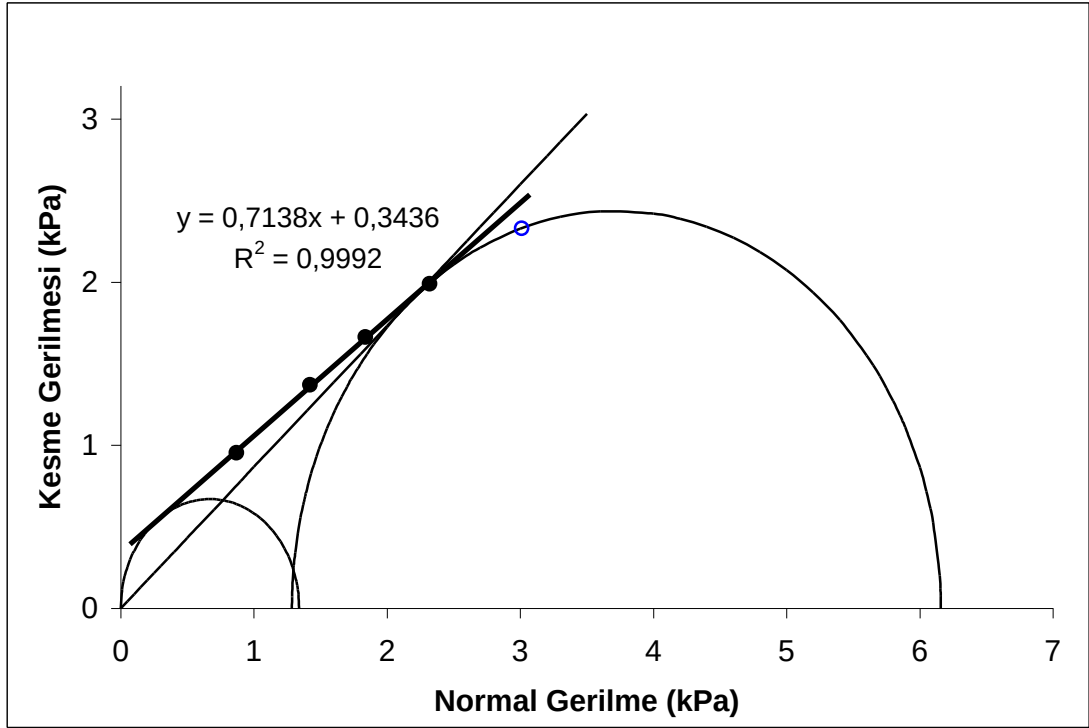
Şekil C.11: Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 12.07 kPa)



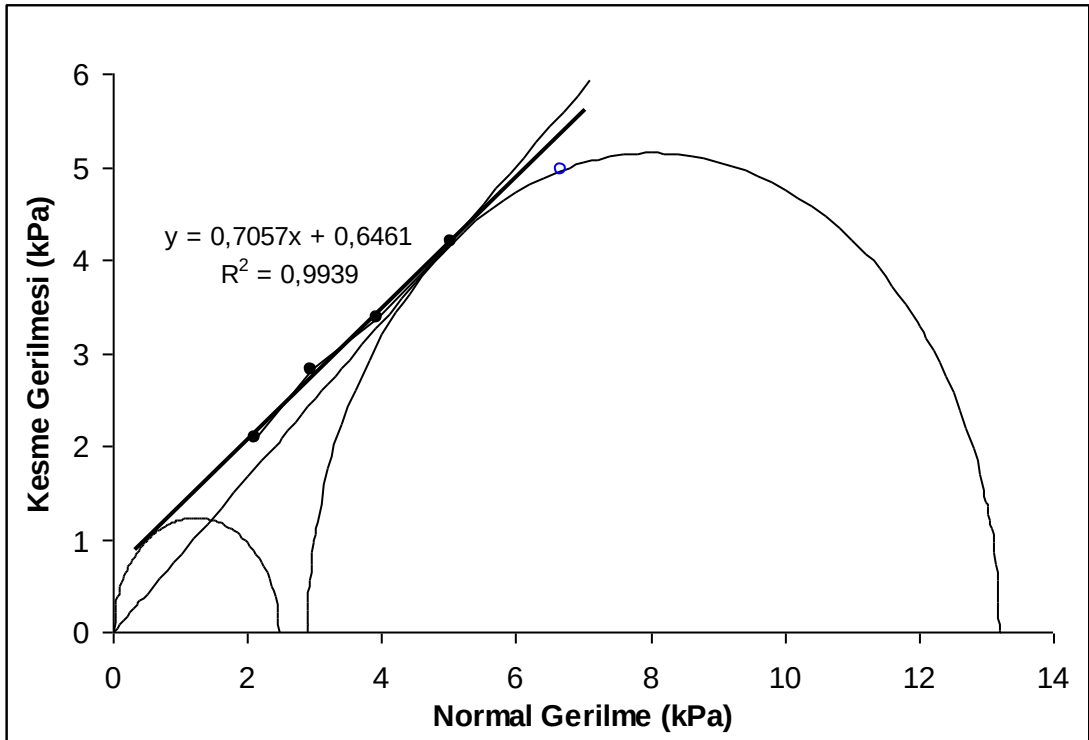
Şekil C.12: Kalker (%0.04 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 23.69 kPa)

Tablo C.4: Dolomit (%0.025 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

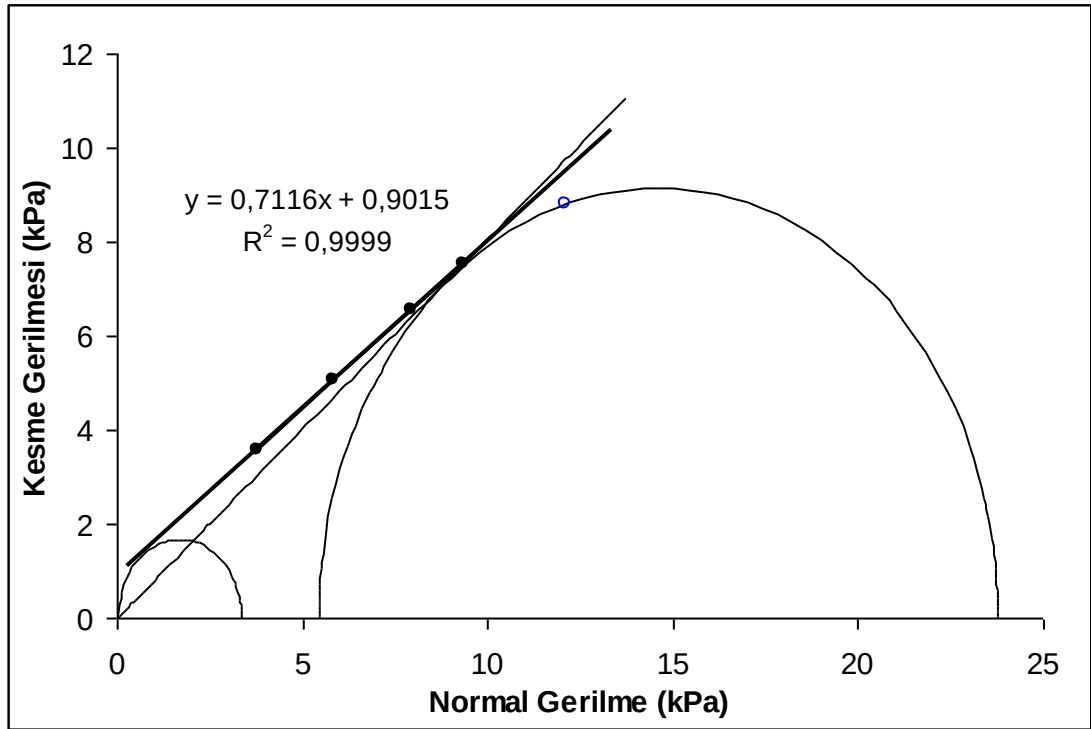
3.01 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	21.36	16.63	3.01	2.35	2.33
	16.45	14.20	2.32	2.00	1.99
2	21.36	16.10	3.01	2.27	2.33
	13.02	11.50	1.84	1.62	1.66
3	21.36	17.00	3.01	2.40	2.33
	10.07	10.00	1.42	1.41	1.37
4	21.36	16.33	3.01	2.30	2.33
	6.16	6.68	0.87	0.94	0.95
6.69 kPa					
1	47.40	35.40	6.69	4.99	4.97
	35.63	29.85	5.03	4.21	4.19
2	47.40	35.00	6.69	4.94	4.97
	27.78	23.75	3.92	3.35	3.37
3	47.40	35.50	6.69	5.01	4.97
	20.91	20.20	2.95	2.85	2.83
4	47.40	35.00	6.69	4.94	4.97
	15.03	14.70	2.12	2.07	2.09
12.08 kPa					
1	85.67	61.00	12.08	8.60	8.80
	66.05	52.10	9.32	7.35	7.51
2	85.67	62.00	12.08	8.74	8.80
	56.24	46.30	7.93	6.53	6.57
3	85.67	62.50	12.08	8.82	8.80
	41.53	36.00	5.86	5.08	5.07
4	85.67	64.00	12.08	9.03	8.80
	26.81	26.10	3.78	3.68	3.59
23.71 kPa					
1	168.09	121.00	23.71	17.07	17.01
	130.82	102.00	18.45	14.39	14.34
2	168.09	120.00	23.71	16.93	17.01
	102.37	80.00	14.44	11.28	11.34
3	168.09	121.50	23.71	17.14	17.01
	73.92	60.85	10.43	8.58	8.52
4	168.09	120.00	23.71	16.93	17.01
	45.47	40.63	6.41	5.73	5.76



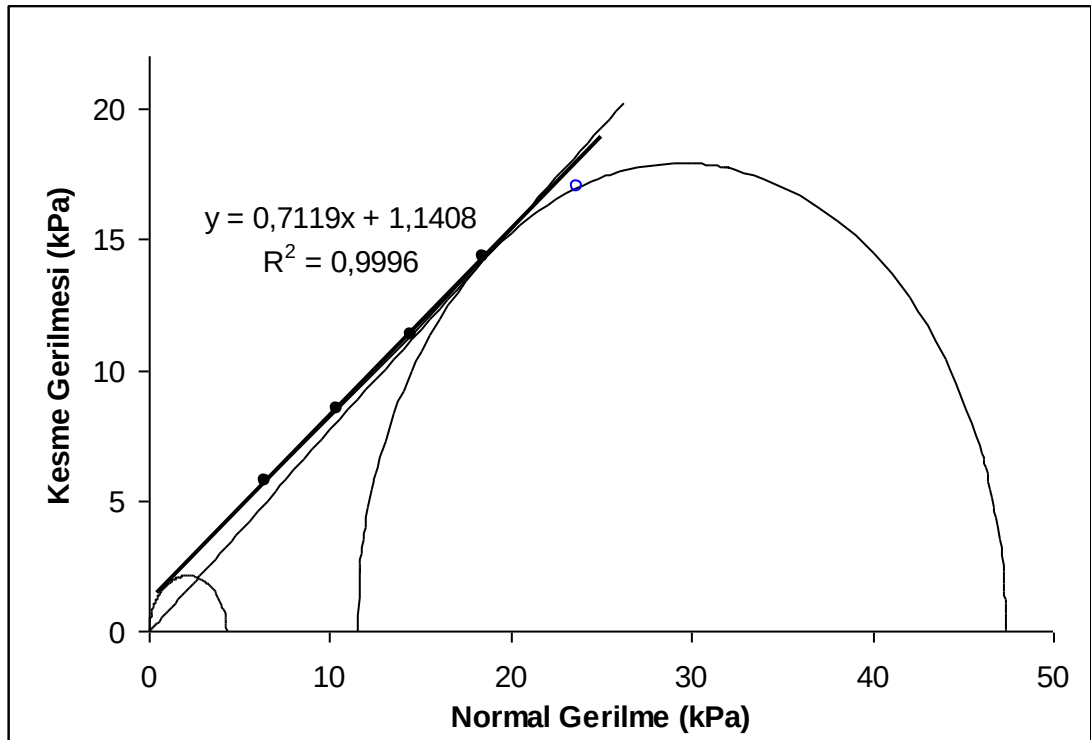
Şekil C.13: Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 3.01 kPa)



Şekil C.14: Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 6.69 kPa)



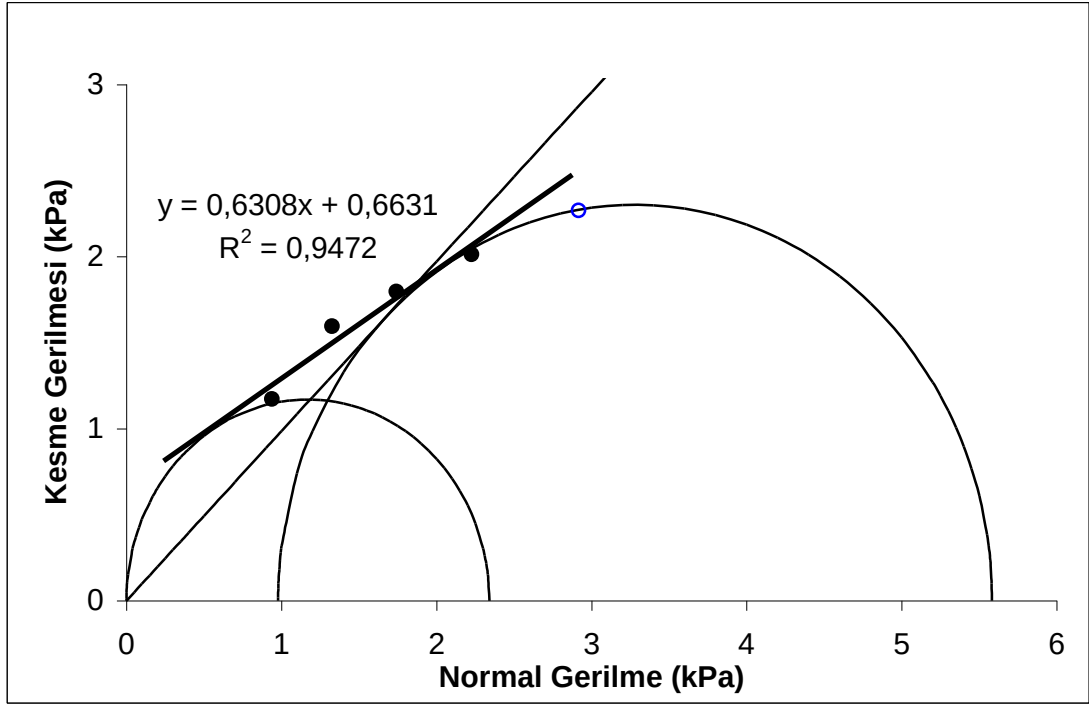
Şekil C.15: Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 12.08 kPa)



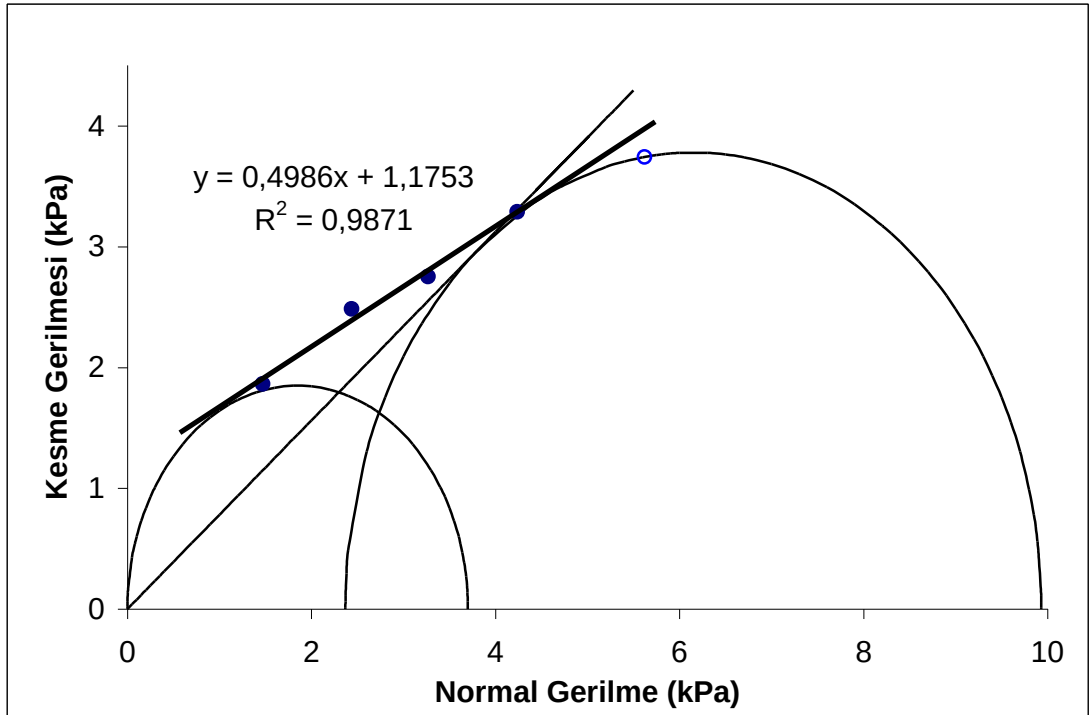
Şekil C.16: Dolomit (%0.025 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 23.71 kPa)

Tablo C.5: Sarıkum (%7 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

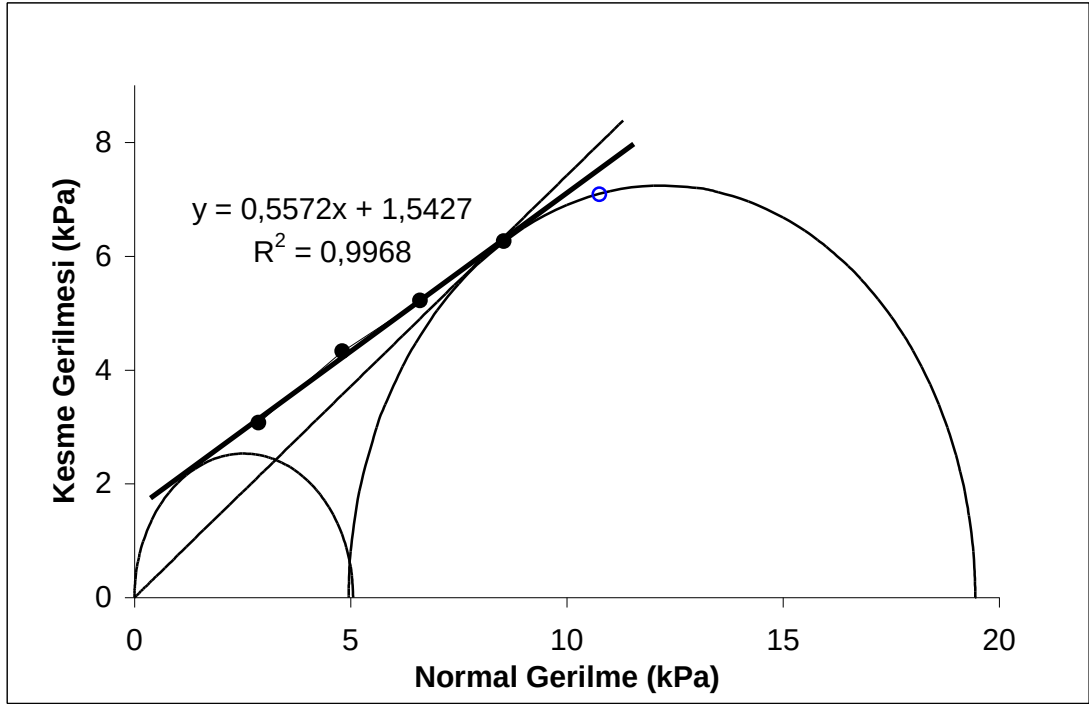
2.92 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	20.68	16.00	2.92	2.26	2.27
	15.77	14.20	2.22	2.00	2.01
2	20.68	16.20	2.92	2.28	2.27
	12.34	12.83	1.74	1.81	1.80
3	20.68	15.92	2.92	2.25	2.27
	9.40	11.20	1.33	1.58	1.60
4	20.68	16.25	2.92	2.29	2.27
	6.66	8.40	0.94	1.18	1.17
5.62 kPa					
1	39.85	26.75	5.62	3.77	3.74
	30.04	23.50	4.24	3.31	3.29
2	39.85	26.40	5.62	3.72	3.74
	23.17	19.42	3.27	2.74	2.75
3	39.85	26.50	5.62	3.74	3.74
	17.29	17.60	2.44	2.48	2.49
4	39.85	26.50	5.62	3.74	3.74
	10.42	13.20	1.47	1.86	1.86
10.76 kPa					
1	76.27	50.40	10.76	7.11	7.09
	60.58	44.55	8.54	6.28	6.27
2	76.27	50.75	10.76	7.16	7.09
	46.84	37.40	6.61	5.28	5.22
3	76.27	49.70	10.76	7.01	7.09
	34.09	30.35	4.81	4.28	4.33
4	76.27	50.20	10.76	7.08	7.09
	20.36	21.75	2.87	3.07	3.07
20.87 kPa					
1	147.93	95.80	20.87	13.51	13.59
	117.52	82.75	16.58	11.67	11.74
2	147.93	96.50	20.87	13.61	13.59
	91.04	70.00	12.84	9.87	9.86
3	147.93	96.80	20.87	13.65	13.59
	65.53	54.75	9.24	7.72	7.69
4	147.93	96.30	20.87	13.58	13.59
	39.04	38.30	5.51	5.40	5.40



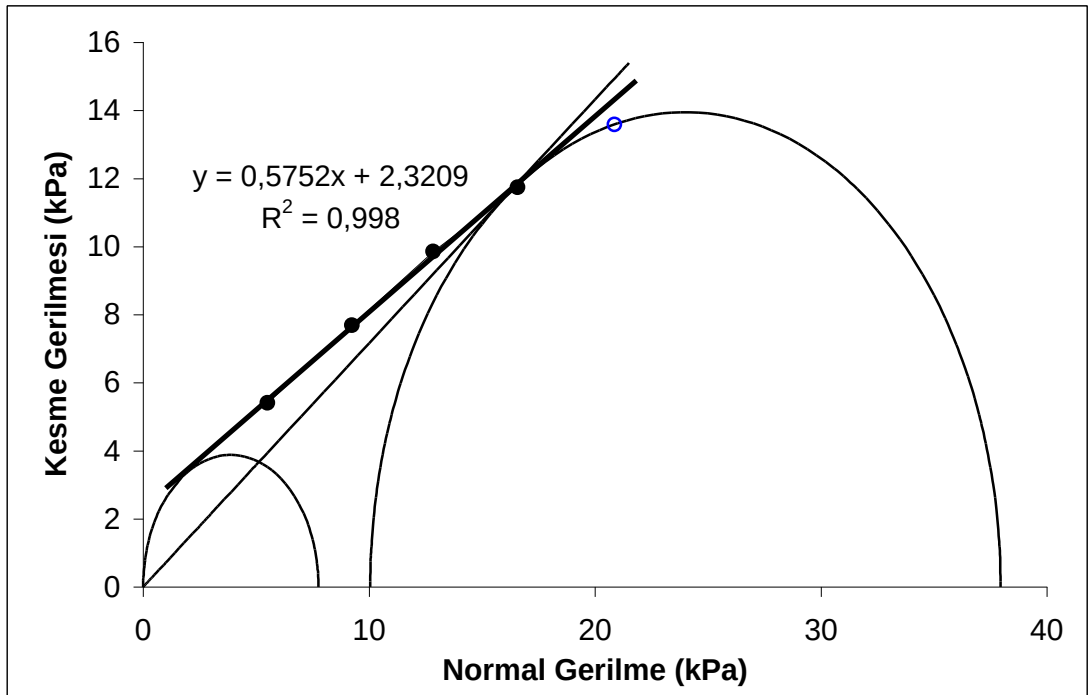
Şekil C.17: Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.92 kPa)



Şekil C.18: Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 5.62 kPa)



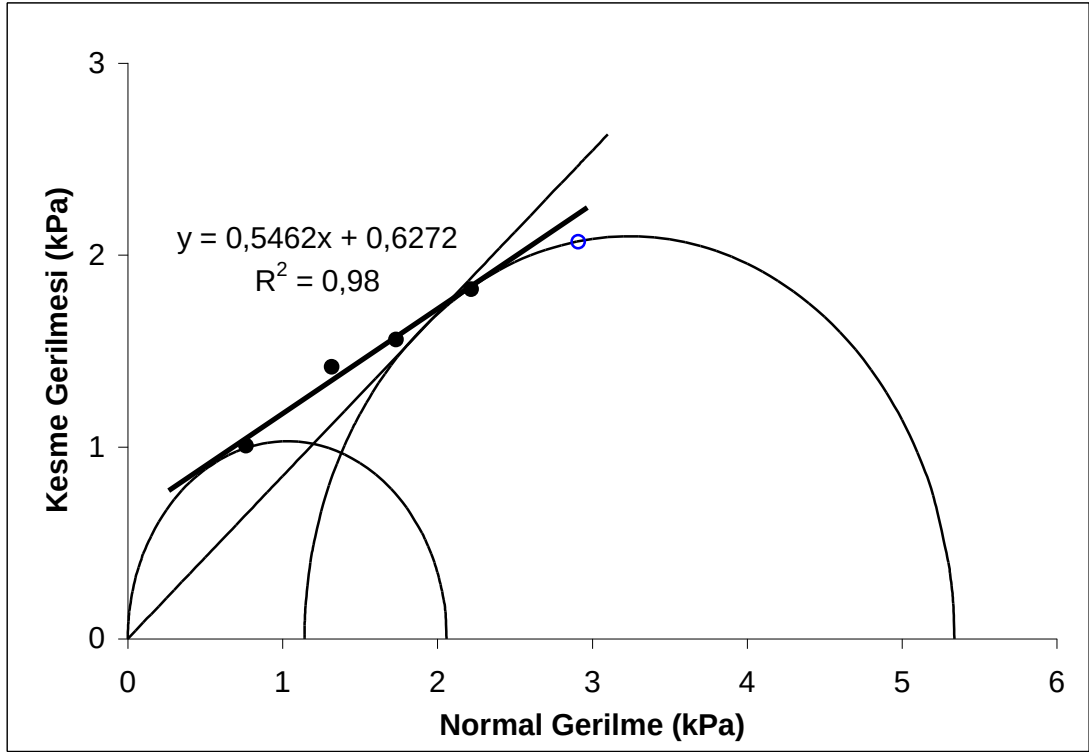
Şekil C.19: Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 10.76 kPa)



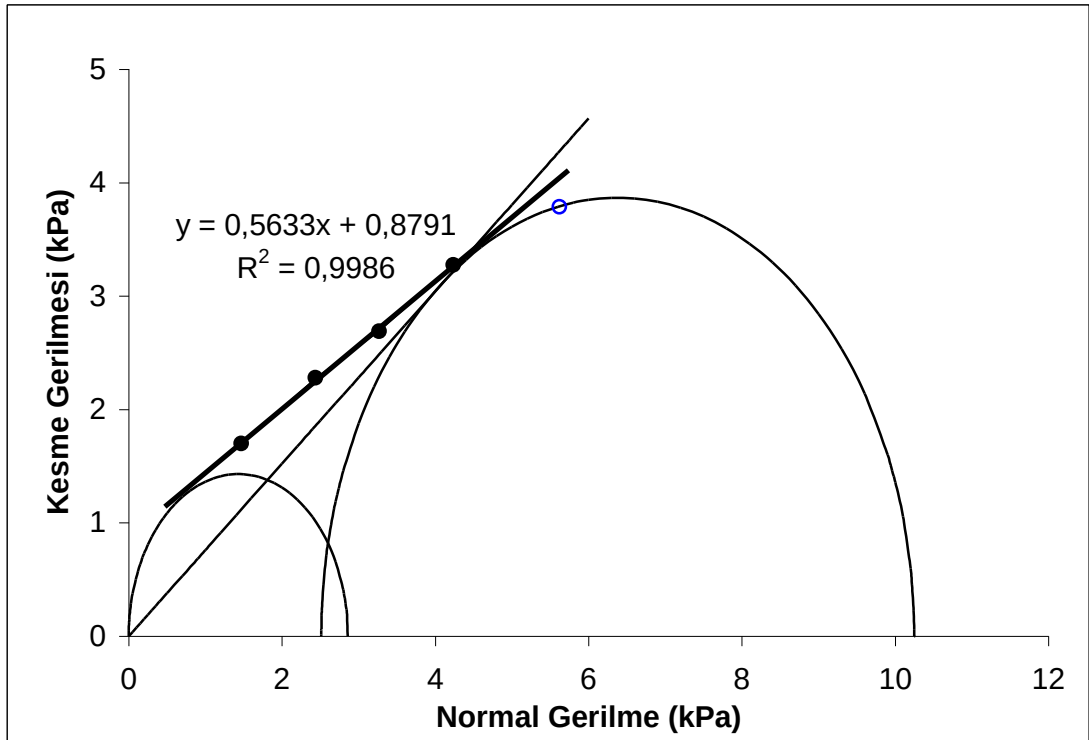
Şekil C.20: Sarıkum (%7 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 20.87 kPa)

Tablo C.6: Safaalanı kumu (%4 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

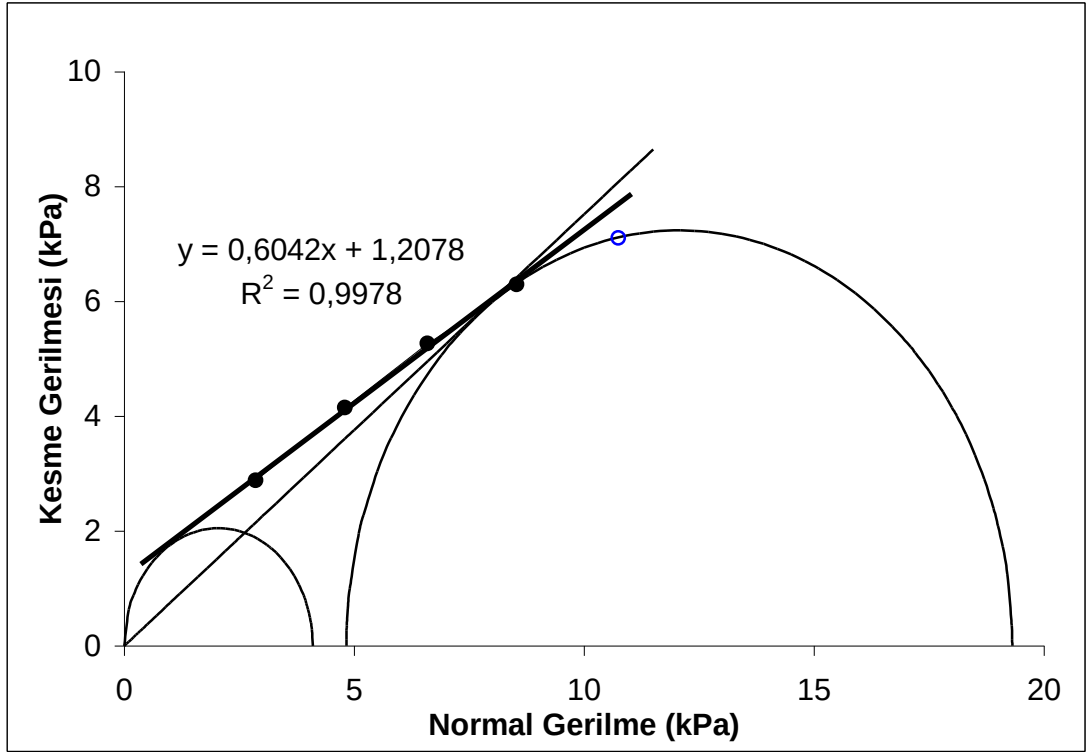
2.91 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	20.63	15.00	2.91	2.12	2.07
	15.73	13.20	2.22	1.86	1.82
2	20.63	14.60	2.91	2.06	2.07
	12.29	11.00	1.73	1.55	1.56
3	20.63	14.60	2.91	2.06	2.07
	9.35	10.00	1.32	1.41	1.42
4	20.63	14.50	2.91	2.05	2.07
	5.42	7.05	0.77	0.99	1.01
5.62 kPa					
1	39.85	27.00	5.62	3.81	3.79
	30.04	23.35	4.24	3.29	3.28
2	39.85	26.75	5.62	3.77	3.79
	23.17	19.00	3.27	2.68	2.69
3	39.85	26.90	5.62	3.79	3.79
	17.29	16.20	2.44	2.28	2.28
4	39.85	26.75	5.62	3.77	3.79
	10.42	12.00	1.47	1.69	1.70
10.75 kPa					
1	76.18	49.50	10.75	6.98	7.11
	60.49	43.88	8.53	6.19	6.30
2	76.18	50.25	10.75	7.09	7.11
	46.75	37.25	6.59	5.25	5.27
3	76.18	50.75	10.75	7.16	7.11
	34.00	29.63	4.80	4.18	4.15
4	76.18	51.00	10.75	7.19	7.11
	20.27	20.68	2.86	2.92	2.88
20.85 kPa					
1	147.82	94.50	20.85	13.33	13.32
	117.41	84.00	16.56	11.85	11.84
2	147.82	94.50	20.85	13.33	13.32
	90.92	68.00	12.82	9.59	9.59
3	147.82	94.30	20.85	13.30	13.32
	65.41	51.67	9.23	7.29	7.30
4	147.82	94.50	20.85	13.33	13.32
	38.93	35.50	5.49	5.01	5.00



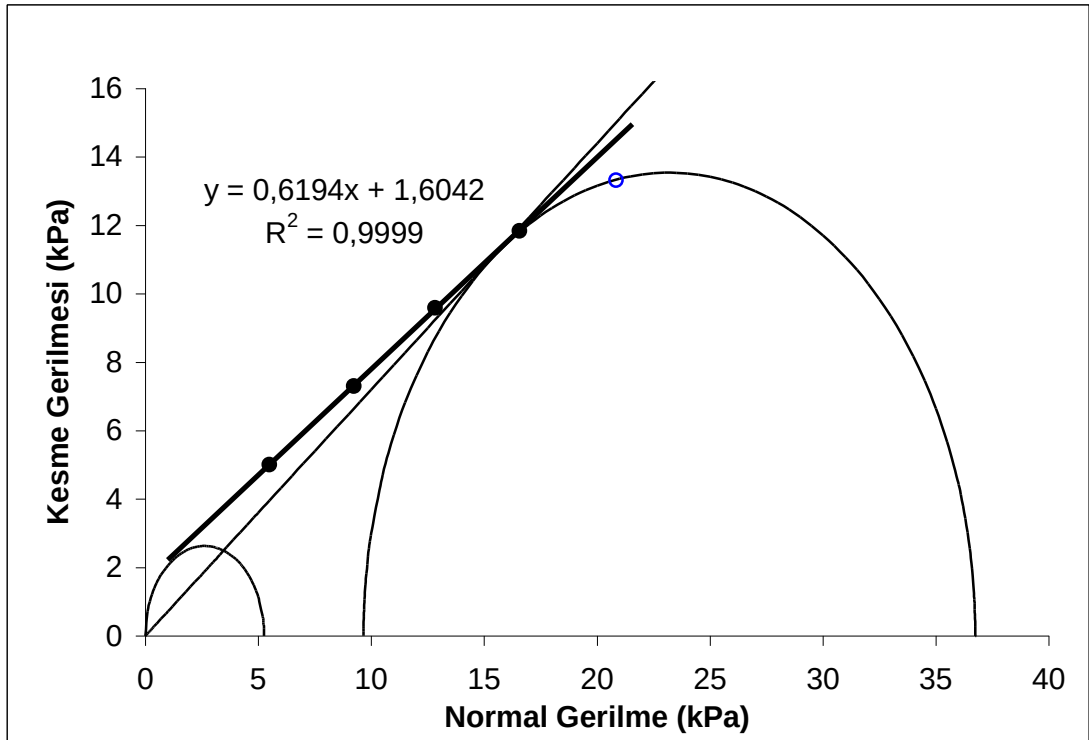
Şekil C.21: Sıfalanı kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.91 kPa)



Şekil C.22: Sıfalanı kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 5.62 kPa)



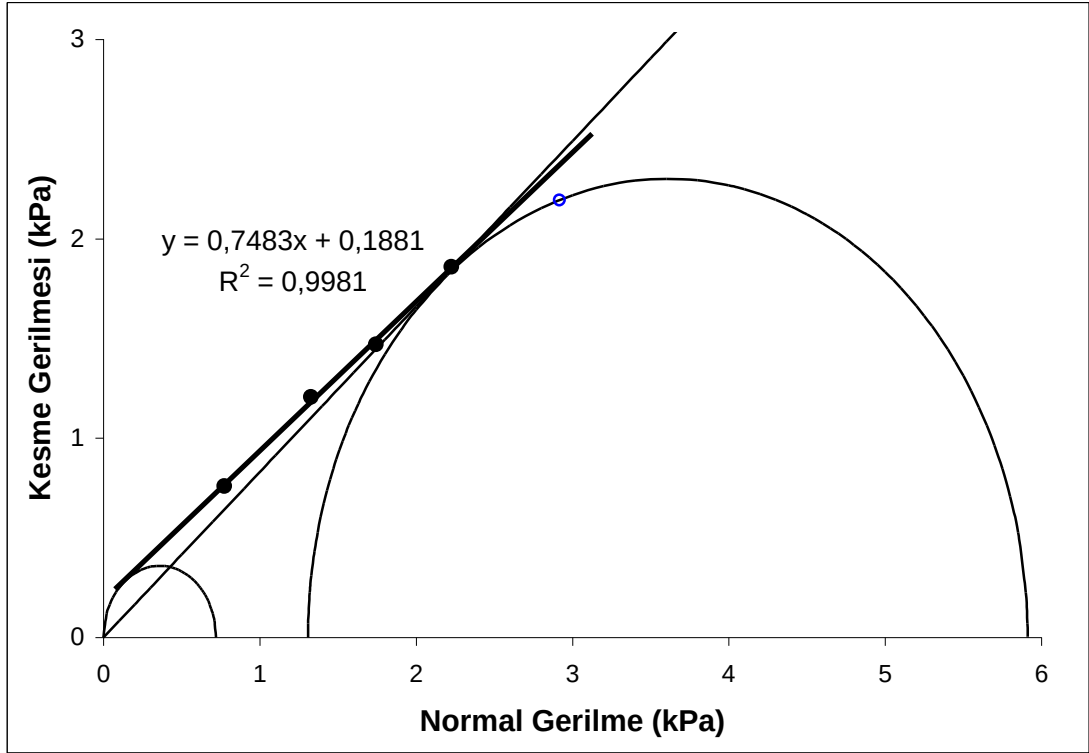
Şekil C.23: Sığirci kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 10.75 kPa)



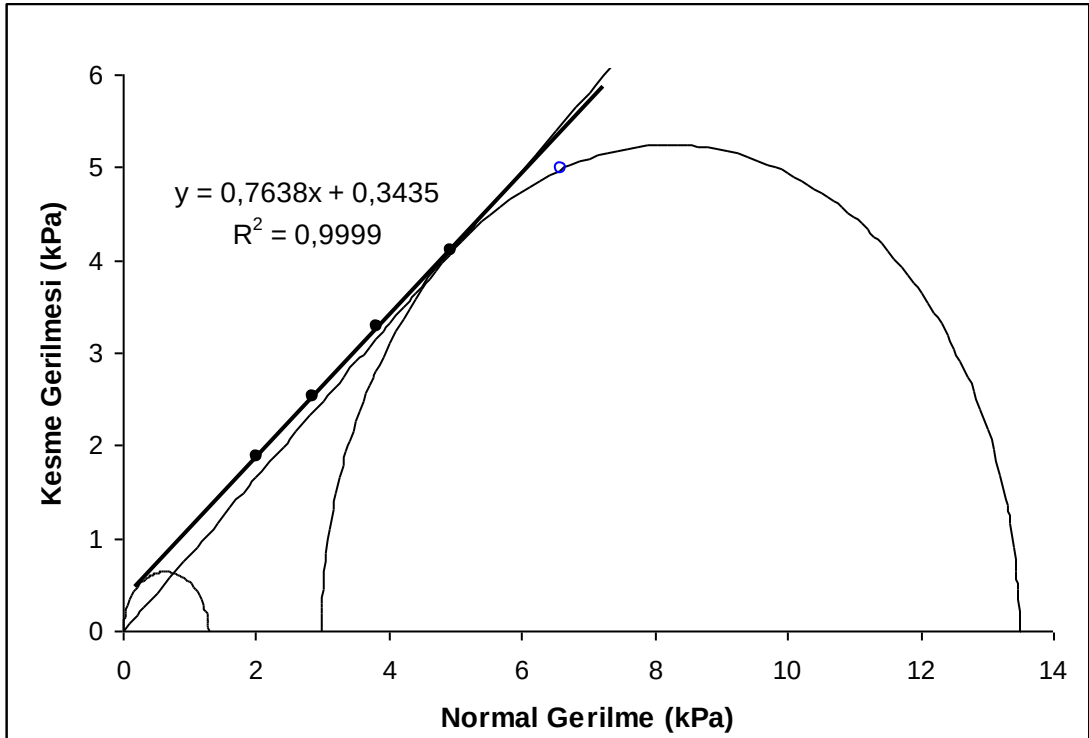
Şekil C.24: Sığirci kumu (%4 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 20.85 kPa)

Tablo C.7: Soda (%0.25 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

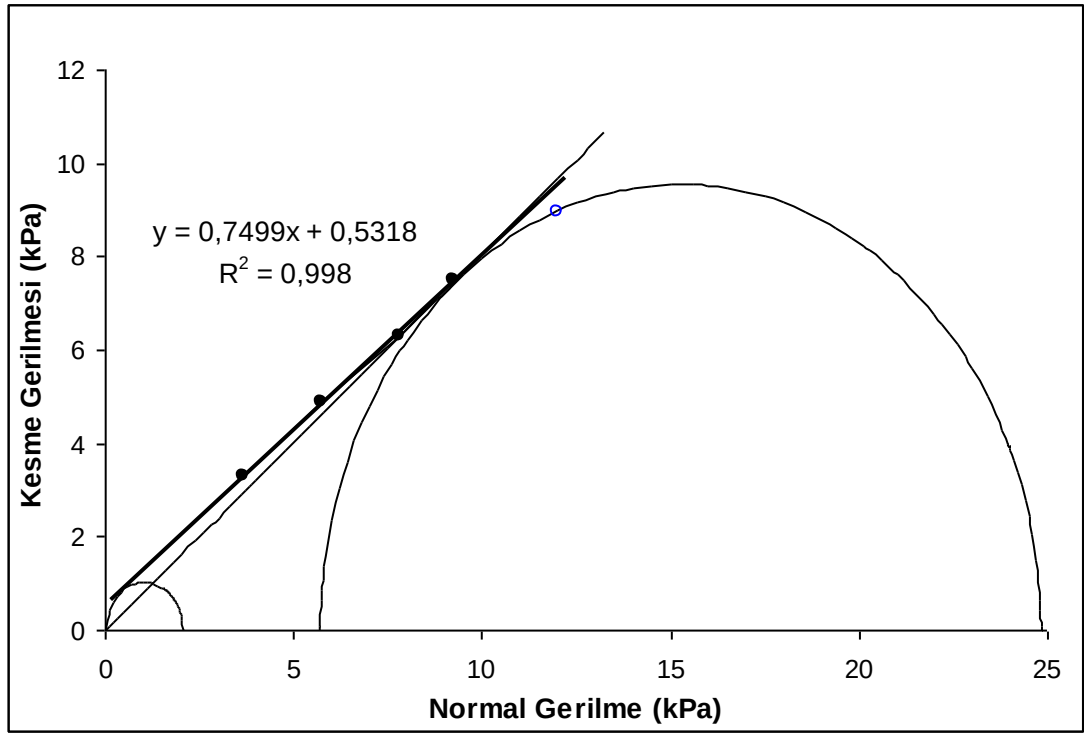
2.92 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	20.69	15.75	2.92	2.22	2.19
	15.78	13.34	2.23	1.88	1.86
2	20.69	15.38	2.92	2.17	2.19
	12.35	10.30	1.74	1.45	1.47
3	20.69	15.63	2.92	2.20	2.19
	9.41	8.59	1.33	1.21	1.21
4	20.69	15.48	2.92	2.18	2.19
	5.48	5.35	0.77	0.75	0.76
6.59 kPa					
1	46.71	35.40	6.59	4.99	4.99
	34.93	29.08	4.93	4.10	4.10
2	46.71	35.38	6.59	4.99	4.99
	27.09	23.20	3.82	3.27	3.27
3	46.71	35.50	6.59	5.01	4.99
	20.22	18.00	2.85	2.54	2.53
4	46.71	35.20	6.59	4.96	4.99
	14.33	13.25	2.02	1.87	1.88
11.98 kPa					
1	84.93	63.60	11.98	8.97	8.97
	65.31	53.25	9.21	7.51	7.51
2	84.93	63.25	11.98	8.92	8.97
	55.50	44.30	7.83	6.25	6.29
3	84.93	64.00	11.98	9.03	8.97
	40.78	34.80	5.75	4.91	4.88
4	84.93	63.65	11.98	8.98	8.97
	26.07	23.38	3.68	3.30	3.30
23.61 kPa					
1	167.40	129.00	23.61	18.19	18.48
	130.12	104.50	18.35	14.74	14.97
2	167.40	130.00	23.61	18.34	18.48
	101.67	83.00	14.34	11.71	11.80
3	167.40	131.00	23.61	18.48	18.48
	73.22	62.25	10.33	8.78	8.78
4	167.40	134.00	23.61	18.90	18.48
	44.77	42.75	6.31	6.03	5.89



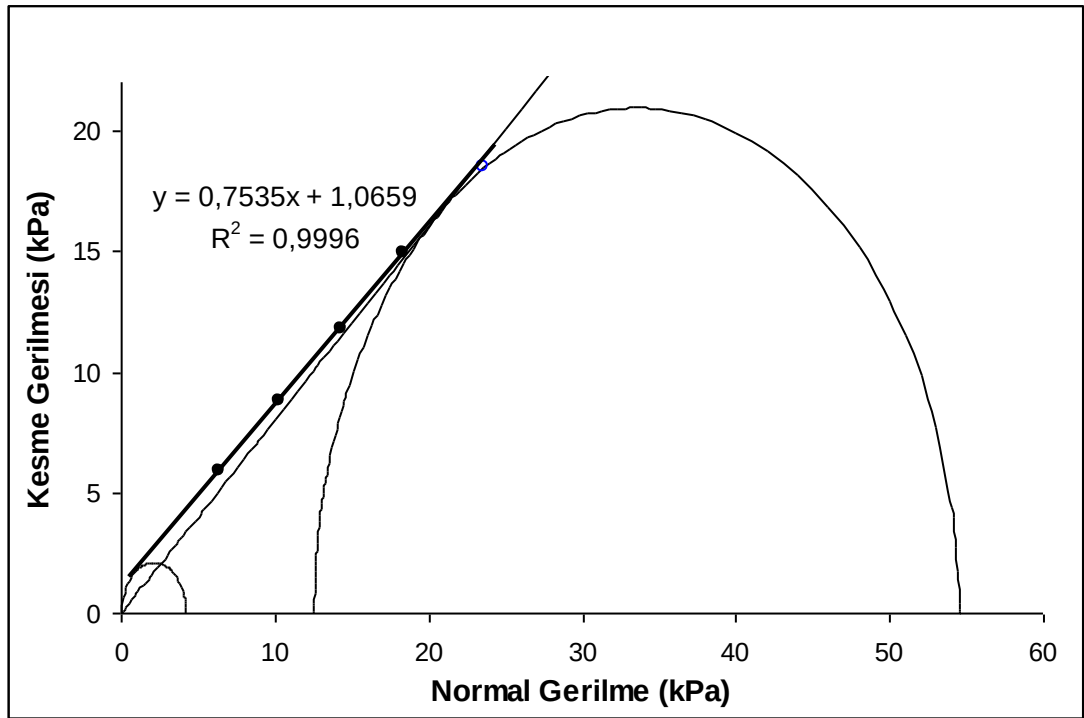
Şekil C.25: Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.92 kPa)



Şekil C.26: Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 6.59 kPa)



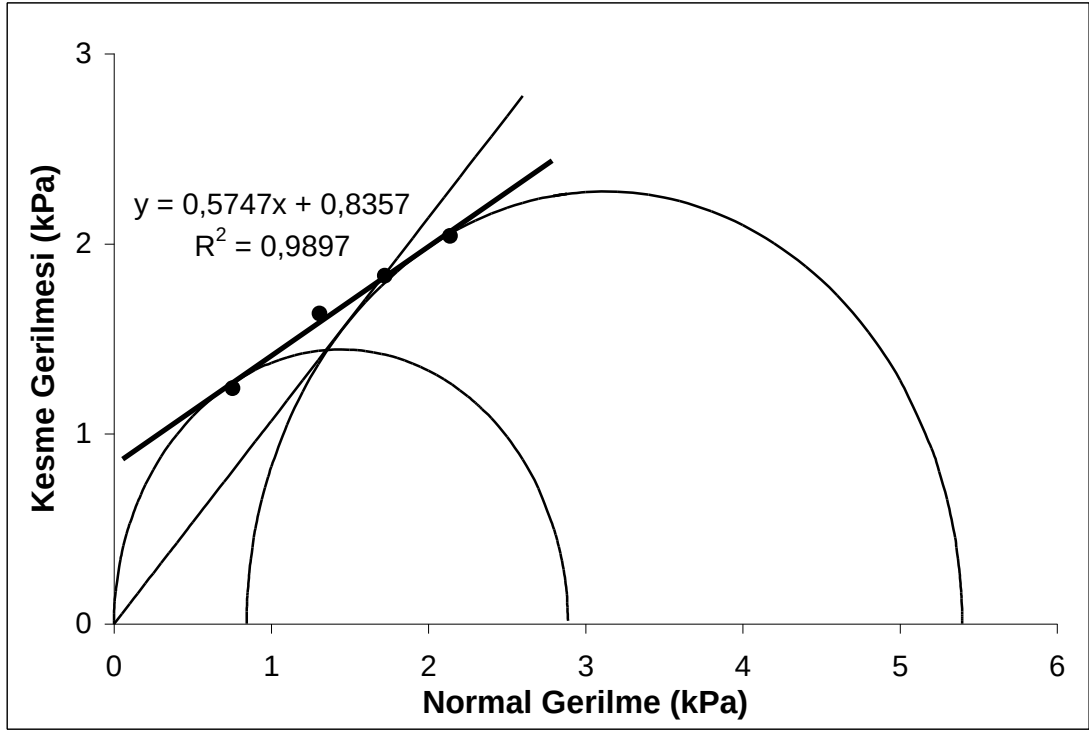
Şekil C.27: Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 11.98 kPa)



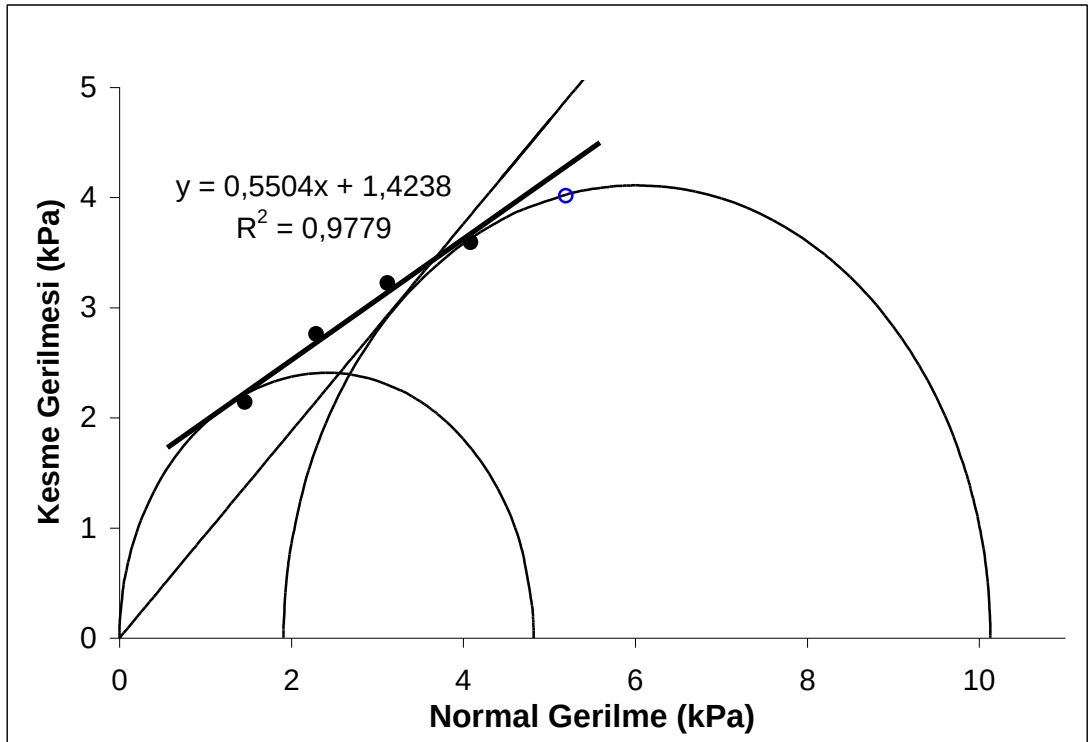
Şekil C.28: Soda (%0.25 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 23.71 kPa)

Tablo C.8: Kil (%0.24 nem) için 4 farklı ön-kesme normal gerilme değerindeki kesme testi sonuçları

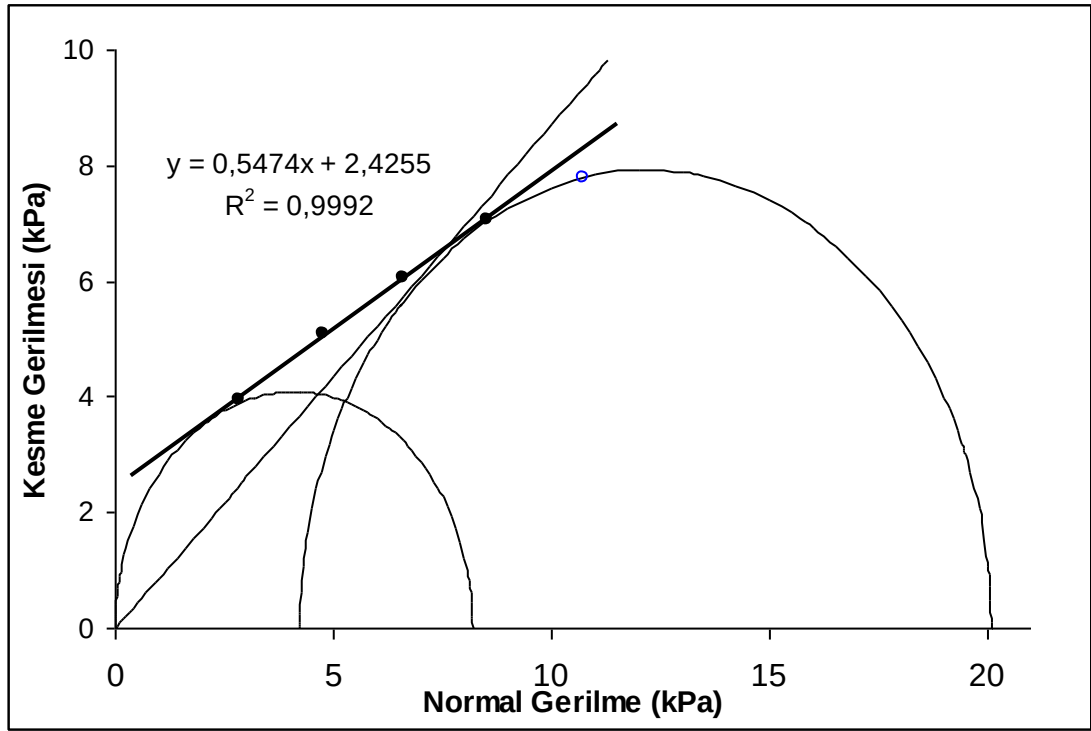
2.69 kPa					
	Normal Yük (N)	Kesme Yükü (N)	Normal Gerilme (kPa)	Kesme Gerilmesi (kPa)	Düzeltilmiş Kesme Gerilmesi (kPa)
1	19.08	16.00	2.69	2.26	2.24
	15.16	14.60	2.14	2.06	2.04
2	19.08	15.80	2.69	2.23	2.24
	12.21	12.95	1.72	1.83	1.83
3	19.08	15.75	2.69	2.22	2.24
	9.27	11.50	1.31	1.62	1.63
4	19.08	15.88	2.69	2.24	2.24
	5.35	8.80	0.75	1.24	1.24
5.69 kPa					
1	36.82	28.40	5.19	4.01	4.02
	28.97	25.42	4.09	3.59	3.59
2	36.82	28.50	5.19	4.02	4.02
	22.10	22.88	3.12	3.23	3.22
3	36.82	28.50	5.19	4.02	4.02
	16.22	19.58	2.29	2.76	2.76
4	36.82	28.50	5.19	4.02	4.02
	10.33	15.20	1.46	2.14	2.14
10.73 kPa					
1	76.10	55.25	10.73	7.79	7.80
	60.40	50.00	8.52	7.05	7.06
2	76.10	55.10	10.73	7.77	7.80
	46.67	42.85	6.58	6.04	6.06
3	76.10	55.50	10.73	7.83	7.80
	33.91	36.13	4.78	5.10	5.08
4	76.10	55.25	10.73	7.79	7.80
	20.18	28.00	2.85	3.95	3.95
20.84 kPa					
1	147.76	117.00	20.84	16.50	16.52
	118.33	98.55	16.69	13.90	13.92
2	147.76	118.00	20.84	16.64	16.52
	91.84	84.25	12.95	11.88	11.80
3	147.76	117.00	20.84	16.50	16.52
	64.37	67.70	9.08	9.55	9.56
4	147.76	116.60	20.84	16.45	16.52
	37.89	49.20	5.34	6.94	6.97



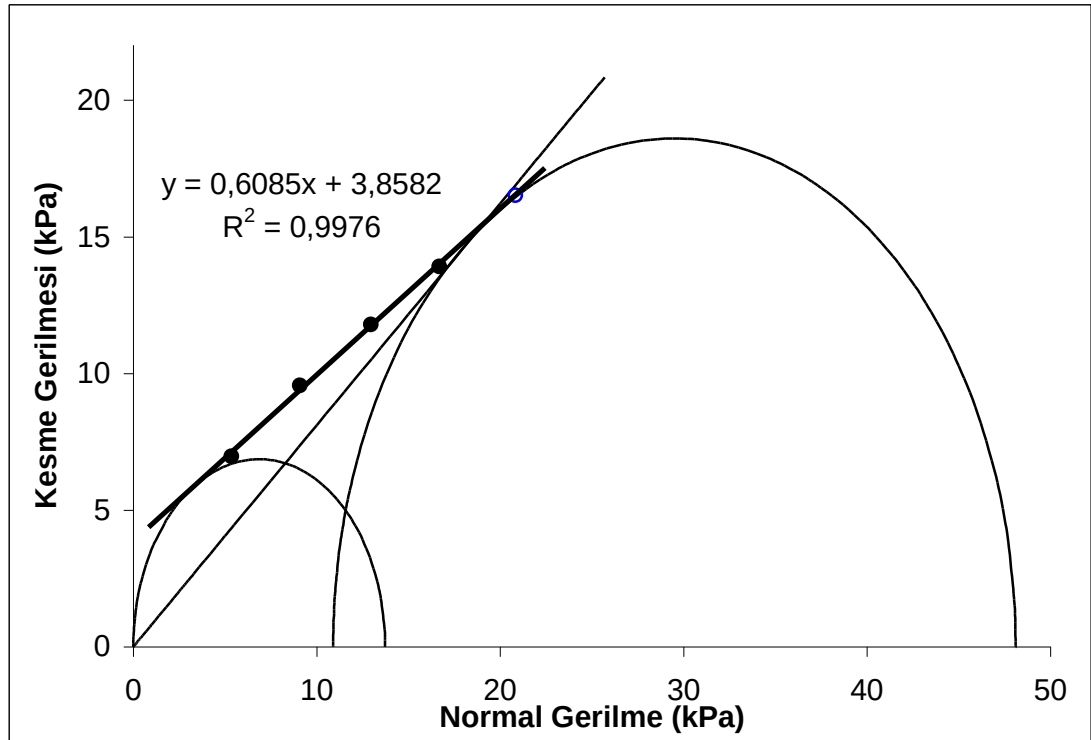
Şekil C.29: Kıl (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 2.69 kPa)



Şekil C.30: Kıl (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 5.19 kPa)



Şekil C.31: Kil (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 10.73 kPa)

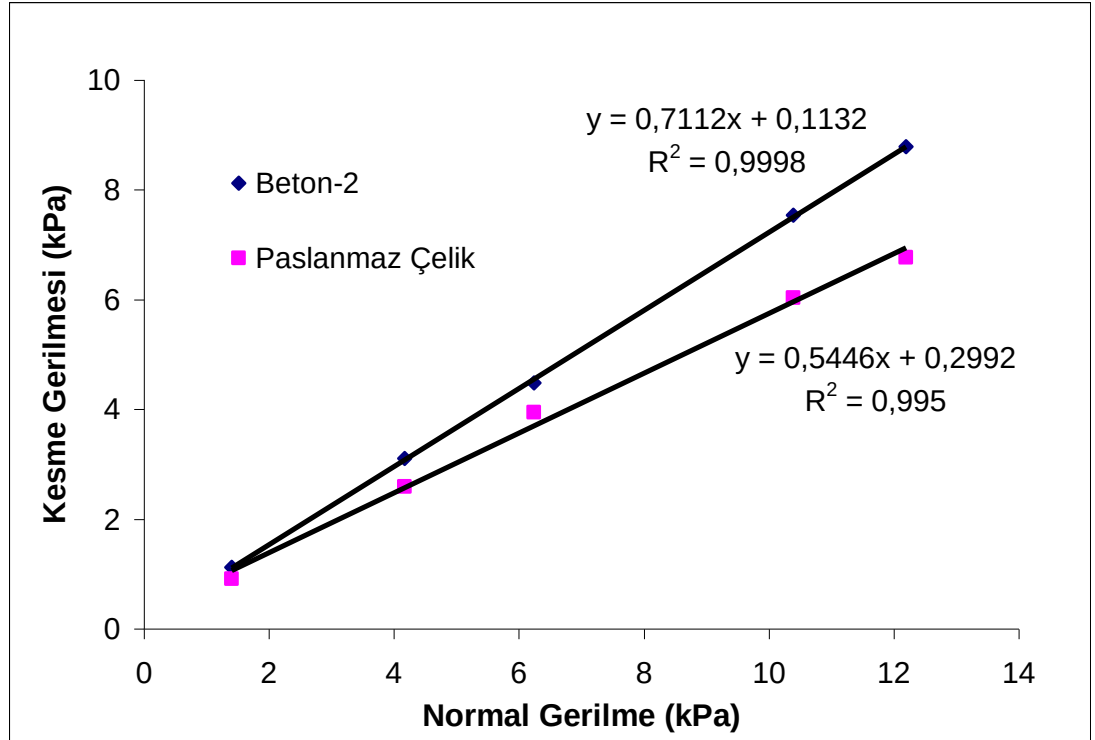


Şekil C.32: Kil (%0.24 nem) için akma sınırı hattı-YL (Ön-kesme normal gerilmesi: 20.84 kPa)

EK-D. DUVAR MALZEMELERİYLE ELDE EDİLEN KESME TEST SONUÇLARI VE DUVAR AKMA SINIRI HATLARI

Tablo D.1: Kalker için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları

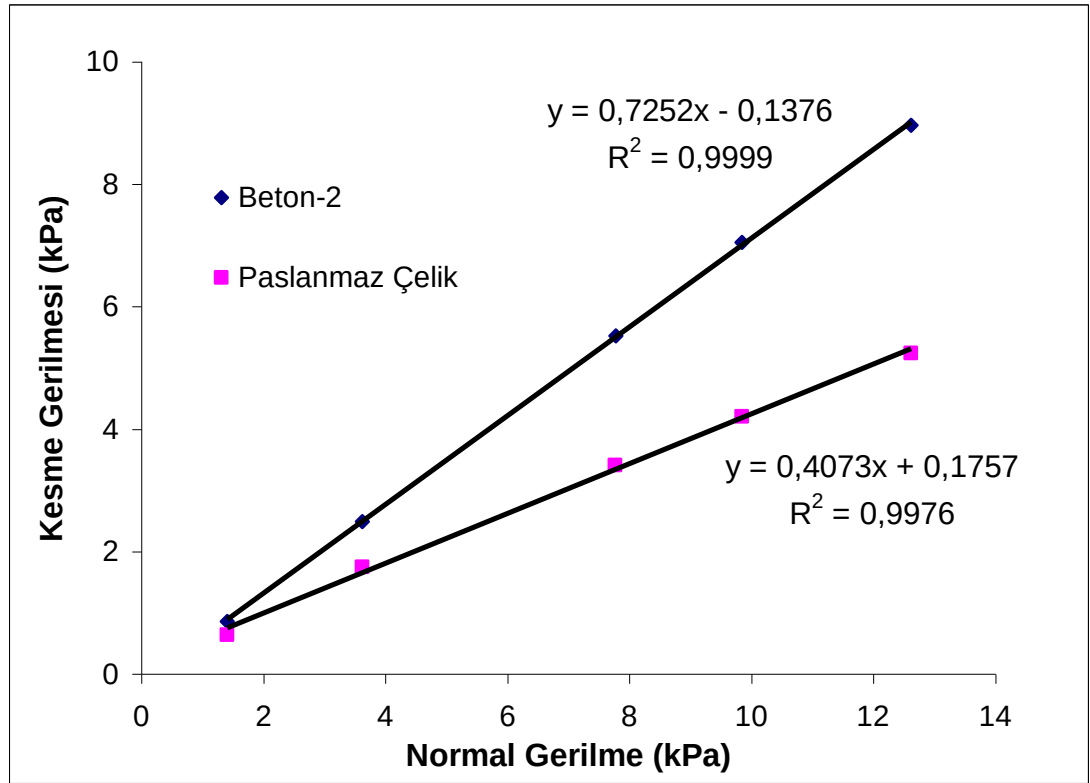
Normal Gerime (kPa)	Kesme Yüğü (N)		Kesme Gerilmesi (kPa)	
13.76	Beton-2	Paslanmaz Çelik	Beton-2	Paslanmaz Çelik
12.19	62.28	48.00	8.78	6.77
10.39	53.45	42.77	7.54	6.03
6.24	31.75	27.93	4.48	3.94
4.17	22.00	18.33	3.10	2.59
1.40	7.98	6.43	1.12	0.91



Şekil D.1: Kalkerin çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)

Tablo D.2: Dolomit için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları

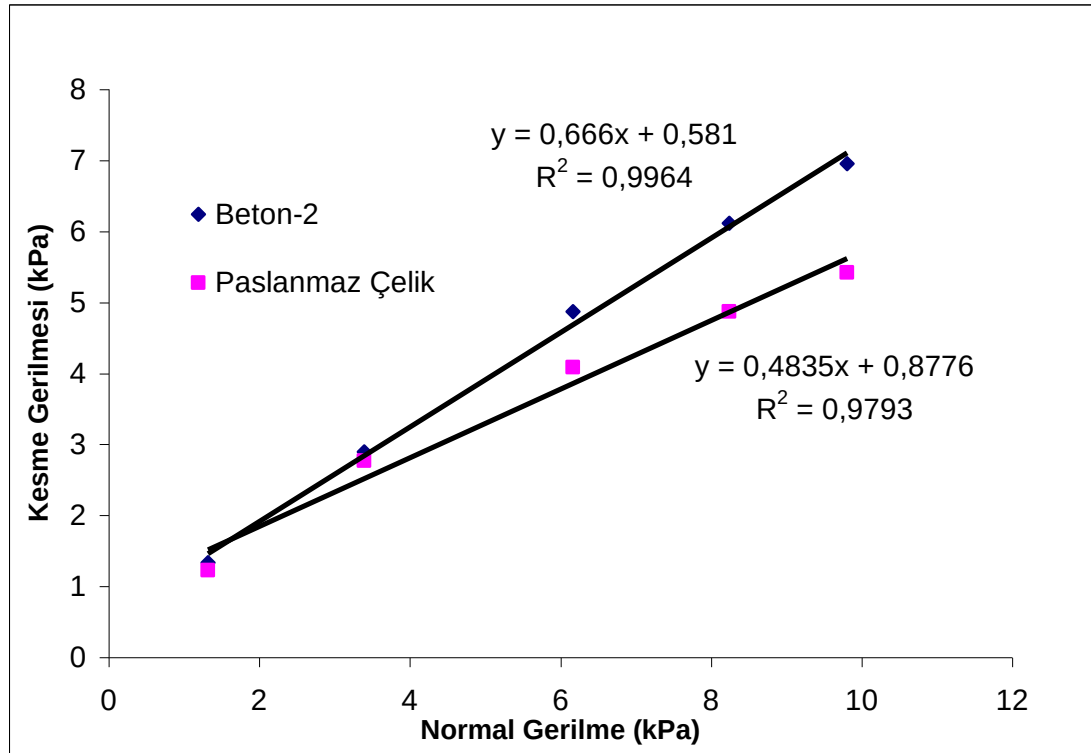
Normal Gerime (kPa)	Kesme Yüğü (N)		Kesme Gerilmesi (kPa)	
13.35	Beton-2	Paslanmaz Çelik	Beton-2	Paslanmaz Çelik
12.62	63.58	37.13	8.97	5.24
9.85	49.95	29.83	7.05	4.21
7.77	39.18	24.20	5.53	3.41
3.62	17.68	12.38	2.49	1.75
1.41	6.10	4.50	0.86	0.63



Şekil D.2: Dolomitin çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)

Tablo D.3: Sarıkum için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları

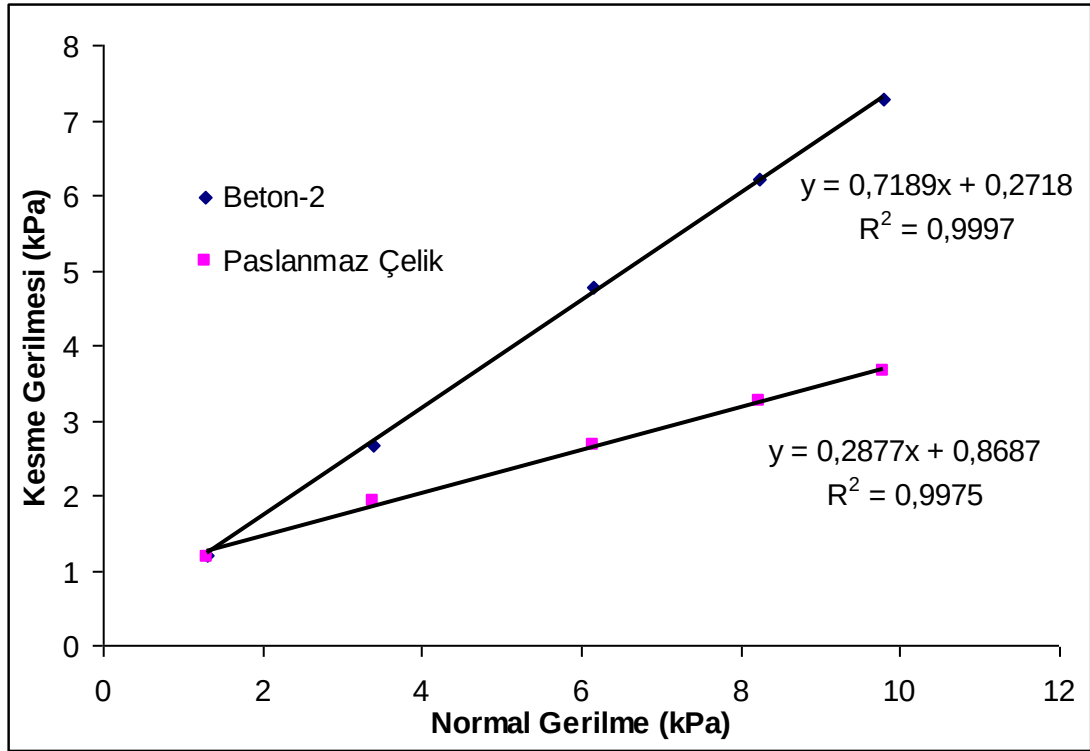
Normal Gerime (kPa)	Kesme Yüğü (N)		Kesme Gerilmesi (kPa)	
10.44	Beton-2	Paslanmaz Çelik	Beton-2	Paslanmaz Çelik
9.80	49.33	38.40	6.96	5.42
8.24	43.35	34.56	6.11	4.87
6.16	34.50	28.98	4.87	4.09
3.40	20.53	19.63	2.89	2.77
1.32	9.48	8.71	1.34	1.23



Şekil D.3: Sarıkumun çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)

Tablo D.4: Savaş alanı kumu için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları

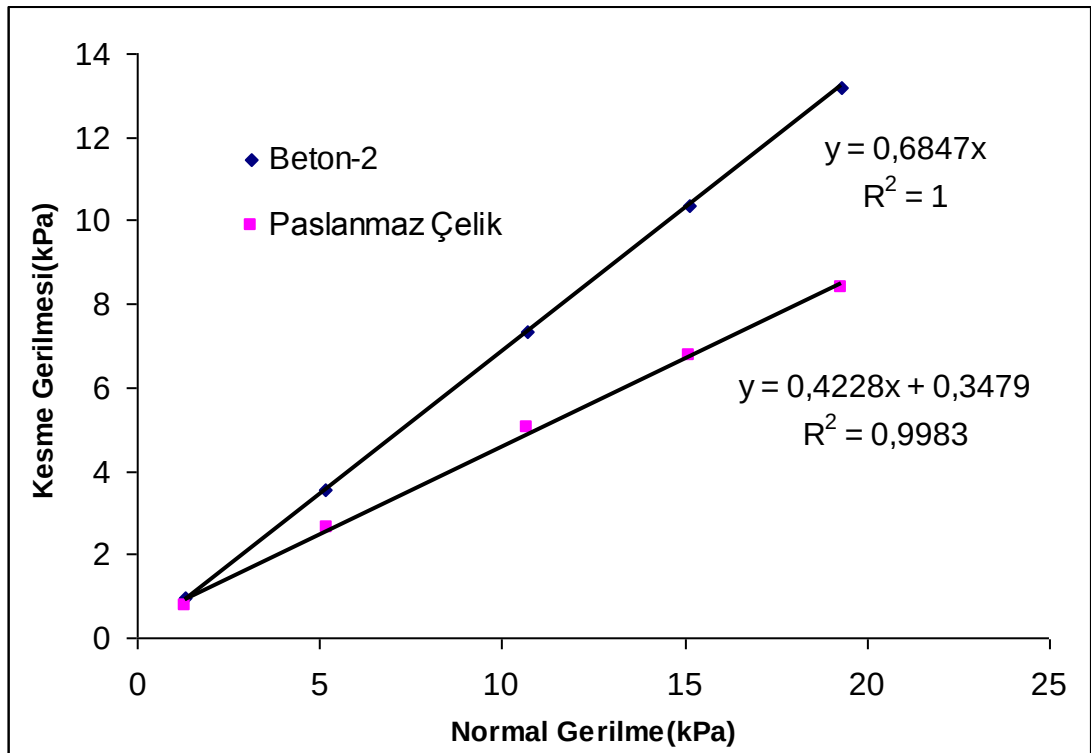
Normal Gerilme (kPa)	Kesme Yüğü (N)		Kesme Gerilmesi (kPa)	
	Beton-2	Paslanmaz Çelik	Beton-2	Paslanmaz Çelik
10.43	51.53	25.89	7.27	3.65
9.79	43.98	22.98	6.20	3.24
8.23	33.75	18.93	4.76	2.67
6.15	19.00	13.53	2.68	1.91
3.39	8.53	8.40	1.20	1.18



Şekil D.4: Savaş alanı kumun çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)

Tablo D.5: Soda için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları

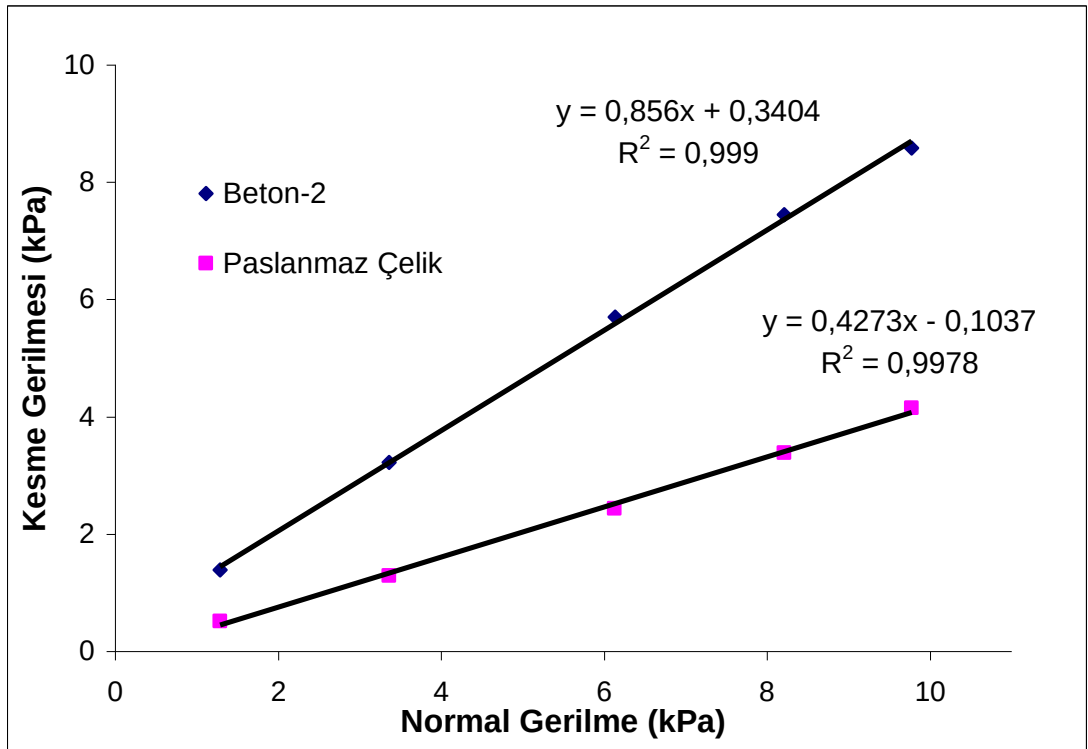
Normal Gerime (kPa)	Kesme Yüğü (N)		Kesme Gerilmesi (kPa)	
	Beton-2	Paslanmaz Çelik	Beton-2	Paslanmaz Çelik
20.68				
19.29	93.65	59.50	13.21	8.39
15.14	73.40	48.00	10.35	6.77
10.71	52.15	35.68	7.36	5.03
5.18	25.10	18.63	3.54	2.63
1.31	6.70	5.35	0.94	0.75



Şekil D.5: Soda'nın çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)

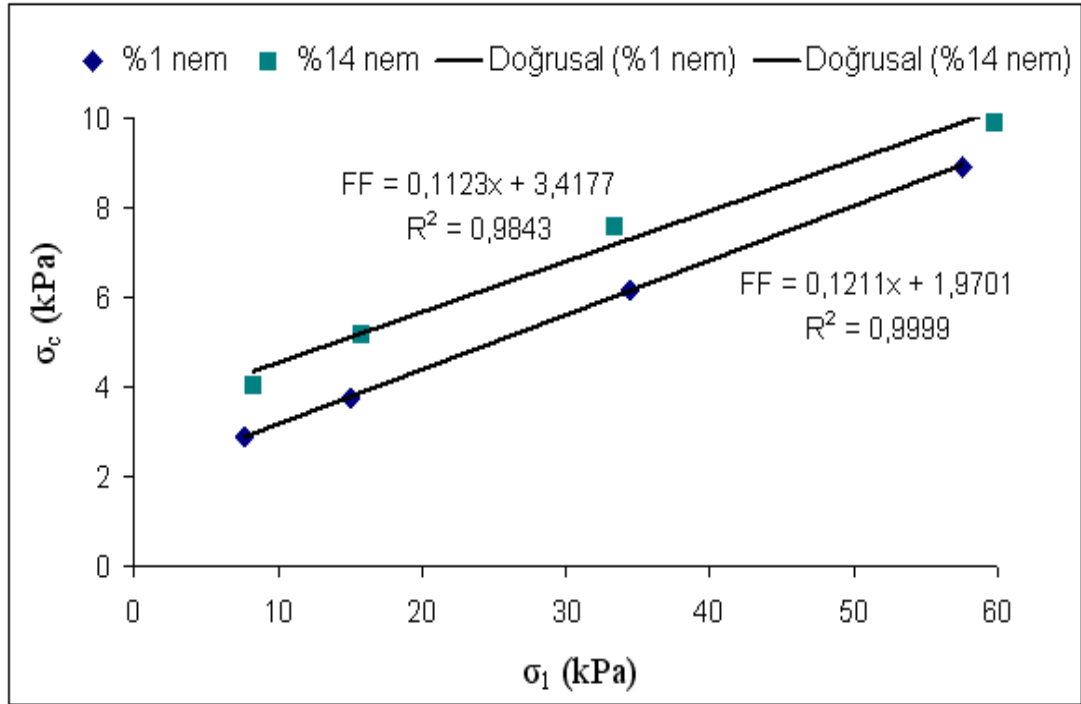
Tablo D.6: Kil için farklı duvar malzemeleriyle elde edilen test sonuçları

Normal Gerime (kPa)	Kesme Yüğü (N)		Kesme Gerilmesi (kPa)	
	Beton-2	Paslanmaz Çelik	Beton-2	Paslanmaz Çelik
10.41				
9.77	60.88	29.39	8.59	4.14
8.21	52.78	23.98	7.44	3.38
6.13	40.38	17.28	5.69	2.44
3.37	22.83	9.15	3.22	1.29
1.29	9.85	3.68	1.39	0.52



Şekil D.6: Kilin çeşitli duvar malzemeleri üzerindeki duvar akma sınırı hatları (WYL)

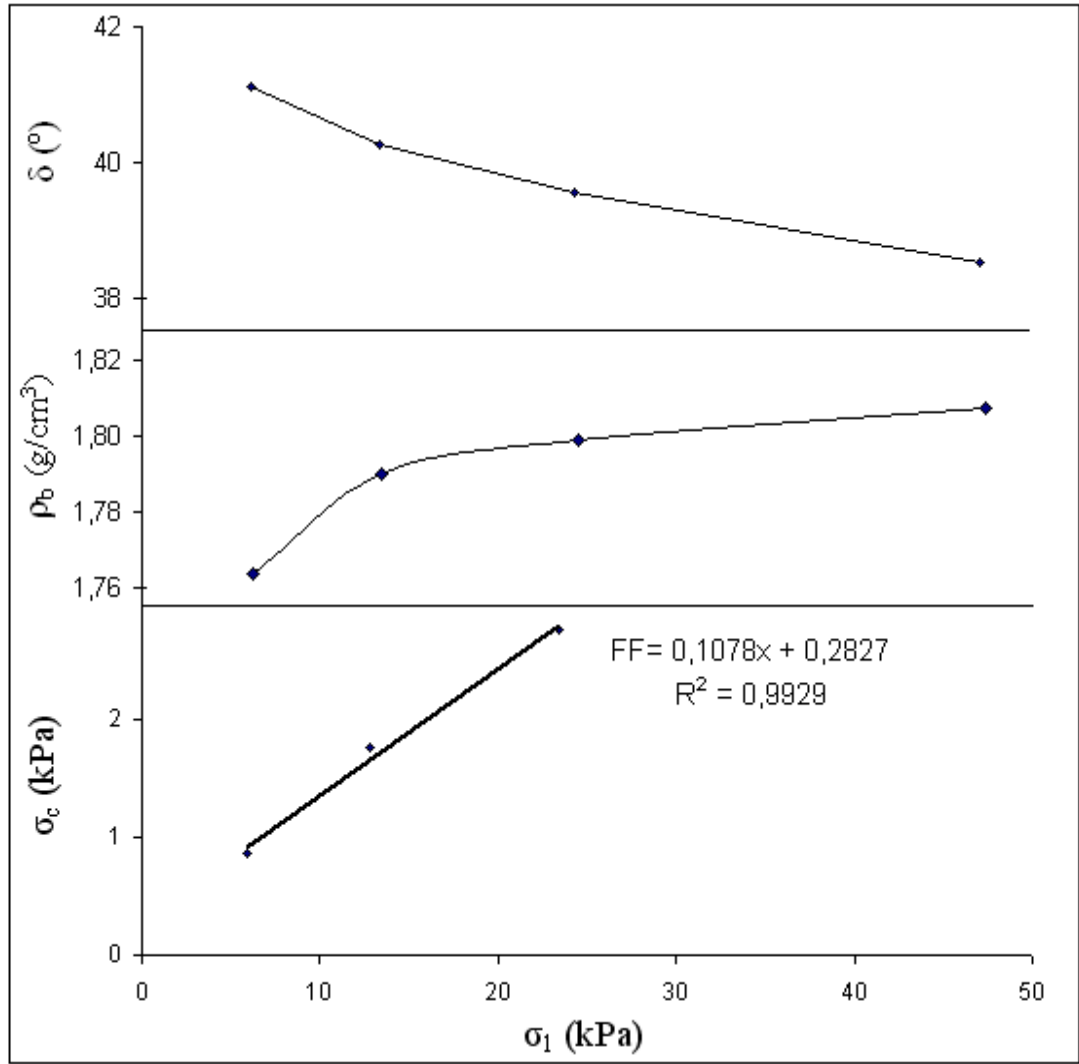
EK-E. KULLANILAN MALZEMELER İÇİN ELDE EDİLEN AKIŞ PARAMETRELERİ



Şekil E.1: Yalıköy kumunun farklı nem içeriklerindeki akış fonksiyonları

Tablo E.1: Kalker için elde edilen akış parametreleri

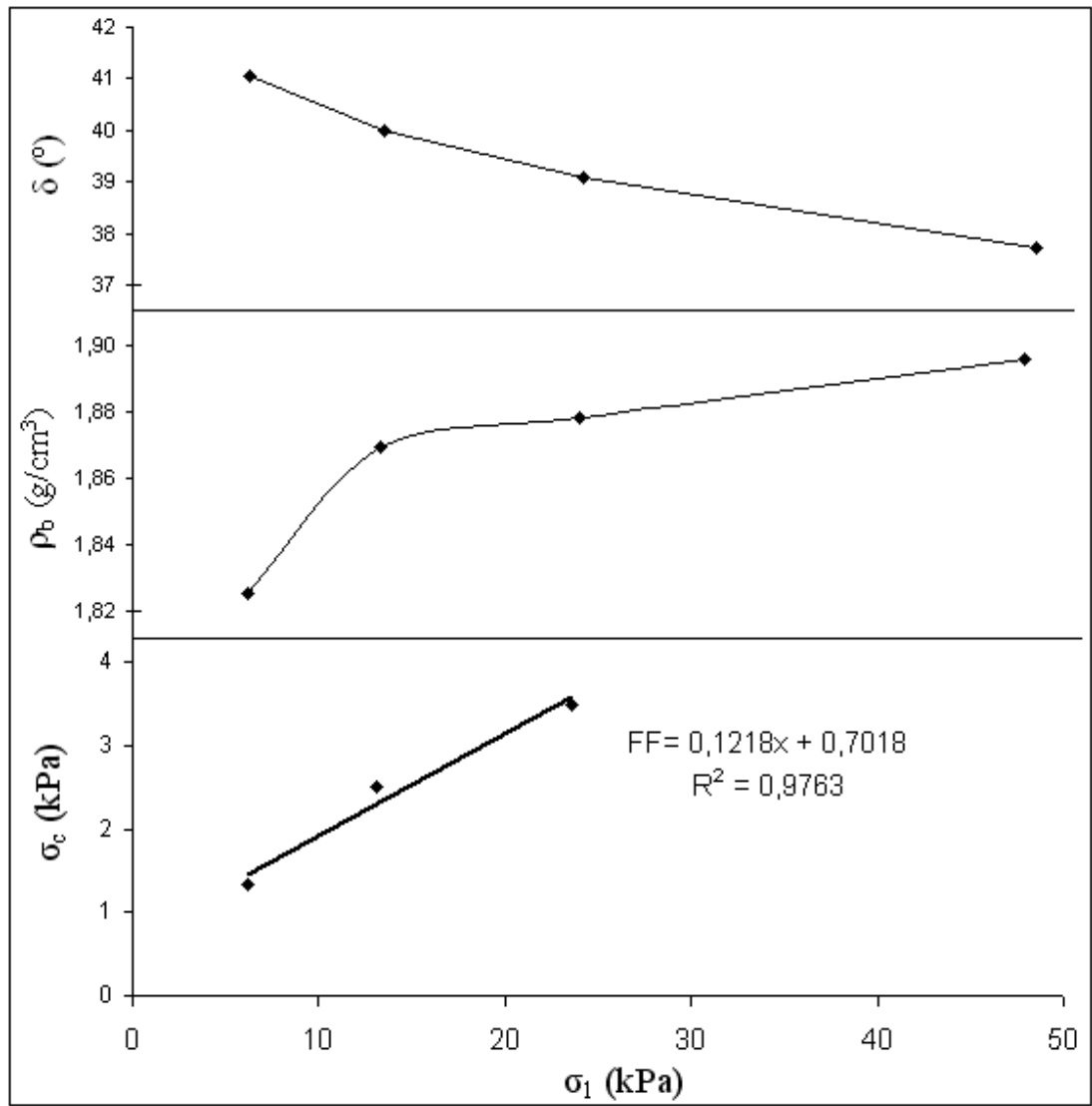
σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	δ (°)	ρ_b (g/cm ³)	ϕ' (°)	
				Beton-2	Paslanmaz Çelik
5.8895	0.8623	41.12	1.7635	36.9	31.4
12.8378	1.7590	40.27	1.7900	35.9	30.3
23.3675	2.7657	39.56	1.7988	40.9	34.3
45.1466	3.6990	38.53	1.8076	41.7	34.7



Şekil E.2: σ_1 ' in fonksiyonu olarak kalkerin özellikleri

Tablo E.2: Dolomit için elde edilen akış parametreleri

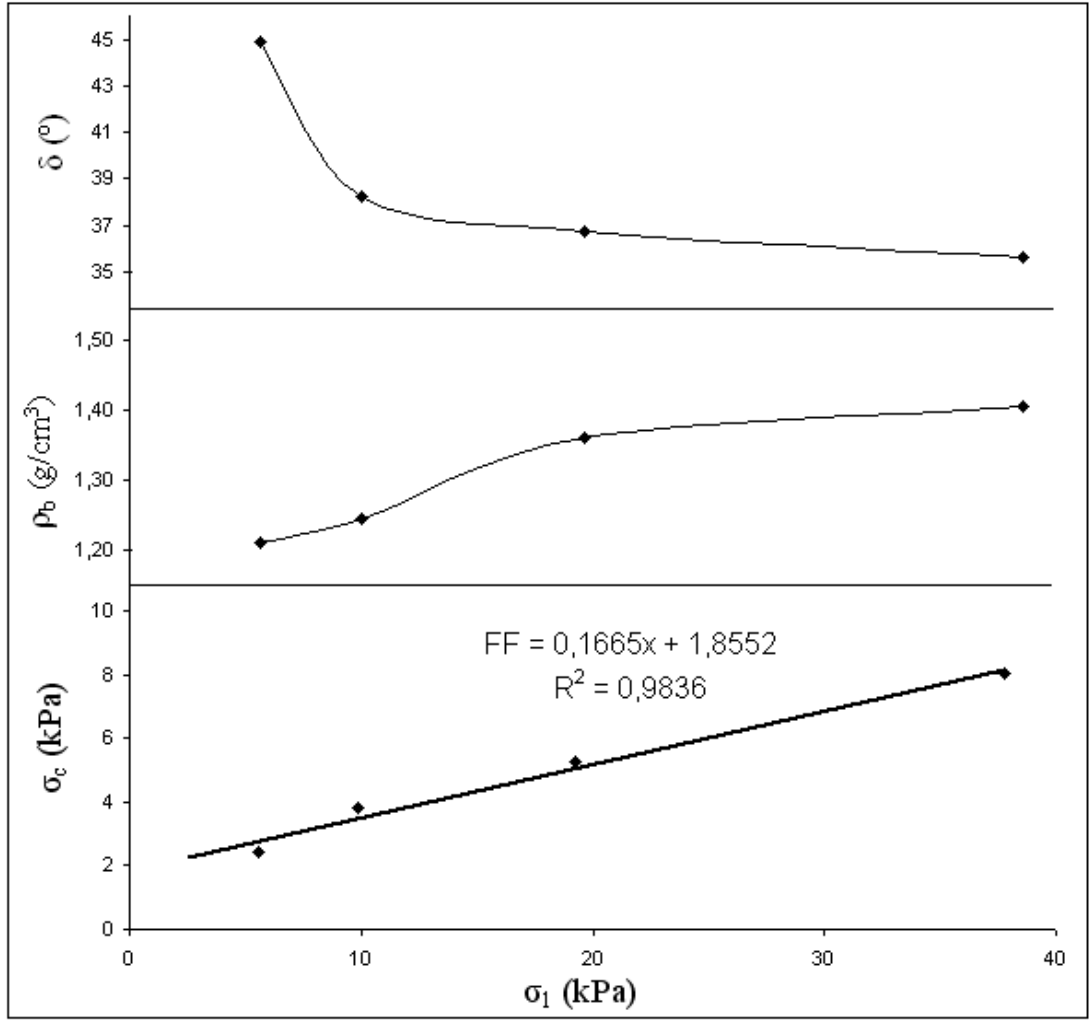
σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	δ (°)	ρ_b (g/cm³)	ϕ' (°)	
				Beton-2	Paslanmaz Çelik
6.1331	1.3348	41.04	1.8252	34.6	23.8
13.1368	2.4934	39.98	1.8693	35.2	23
23.5645	3.4962	39.1	1.8781	35.4	22.5
47.1169	4.4253	37.72	1.8958	35.6	22.3



Şekil E.3: σ_1 ' in fonksiyonu olarak dolomitin özellikleri

Tablo E.3: Sarıkum için elde edilen akış parametreleri

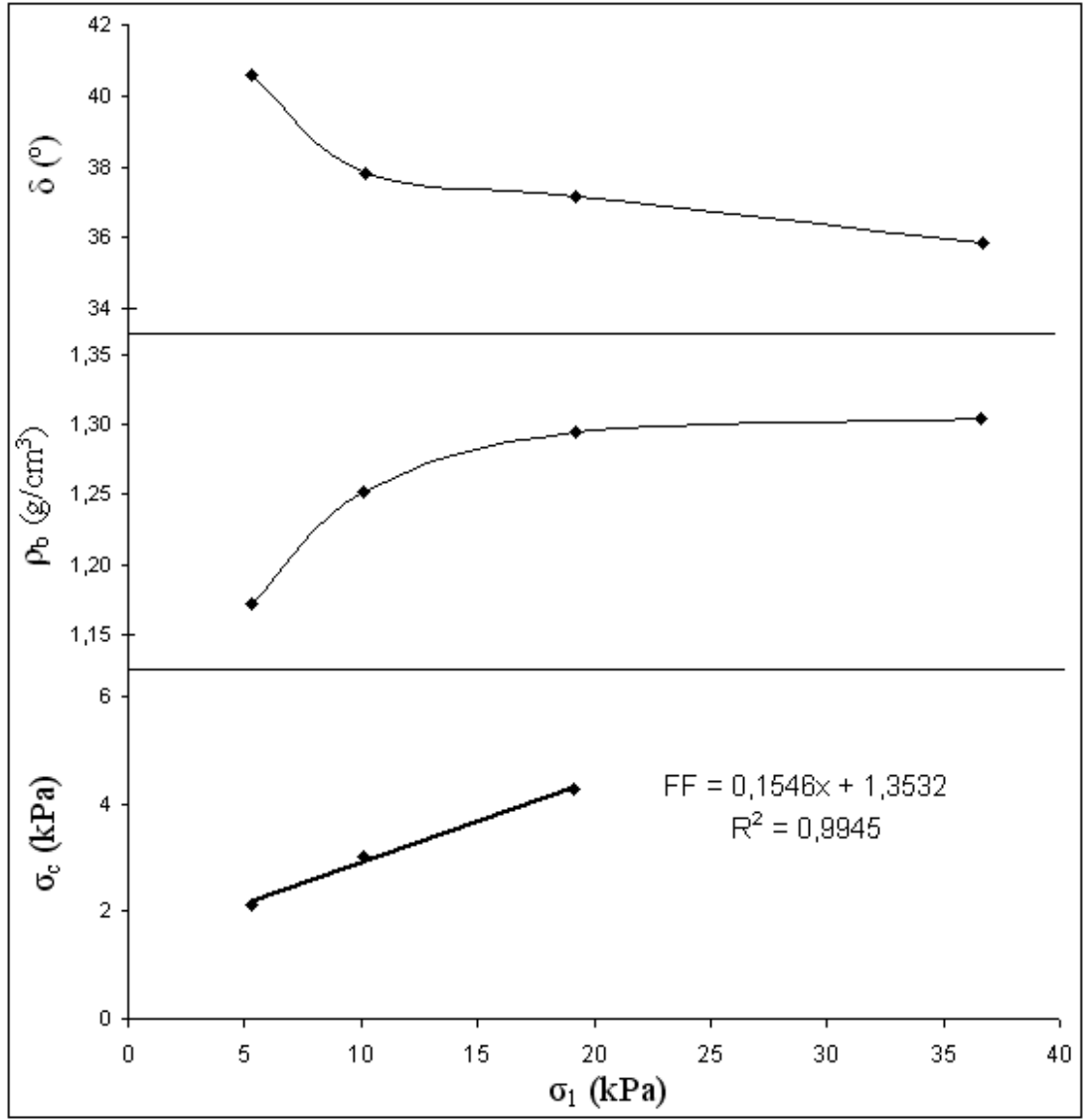
σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	δ (°)	ρ_b (g/cm³)	ϕ' (°)	
				Beton-2	Paslanmaz Çelik
5.5416	2.4044	44.92	1.2107	-	38
9.8603	3.7985	38.23	1.2459	-	32
19.2296	5.2516	36.78	1.3606	-	28.8
37.7996	8.0253	35.65	1.4046	-	27.3



Şekil E.4: σ_1 ' in fonksiyonu olarak sarıkumun özellikleri

Tablo E.4: Safaalanı kumu için elde edilen akış parametreleri

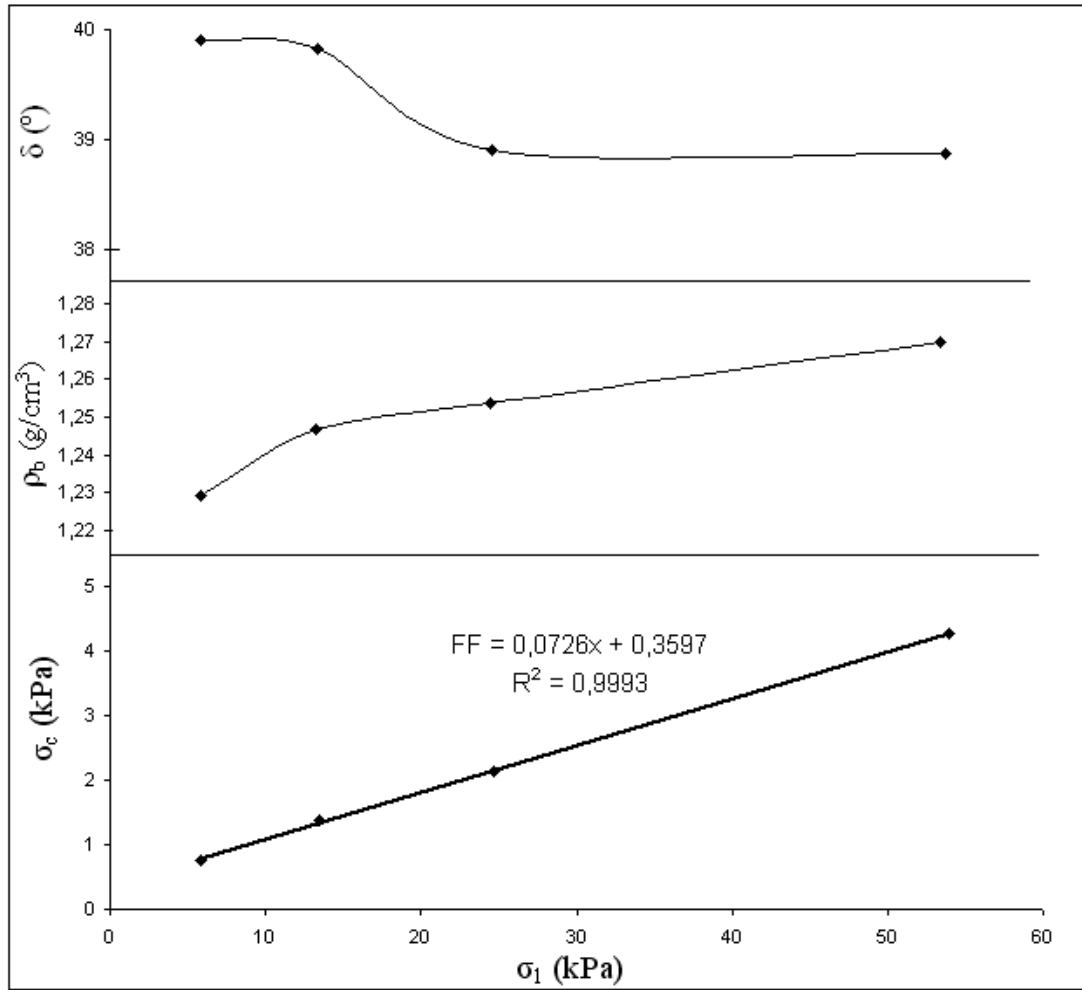
σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	δ (°)	ρ_b (g/cm³)	ϕ' (°)	
				Beton-2	Paslanmaz Çelik
5.3105	2.1140	40.6	1.1727	-	27
10.1207	3.01	37.8	1.2521	-	21.3
19.1508	4.2817	37.14	1.2944	-	18.8
36.5522	5.7608	35.85	1.3050	-	17.5



Şekil E.5: σ_1 ' in fonksiyonu olarak Safaalanı kumunun özellikleri

Tablo E.5: Soda için elde edilen akış parametreleri

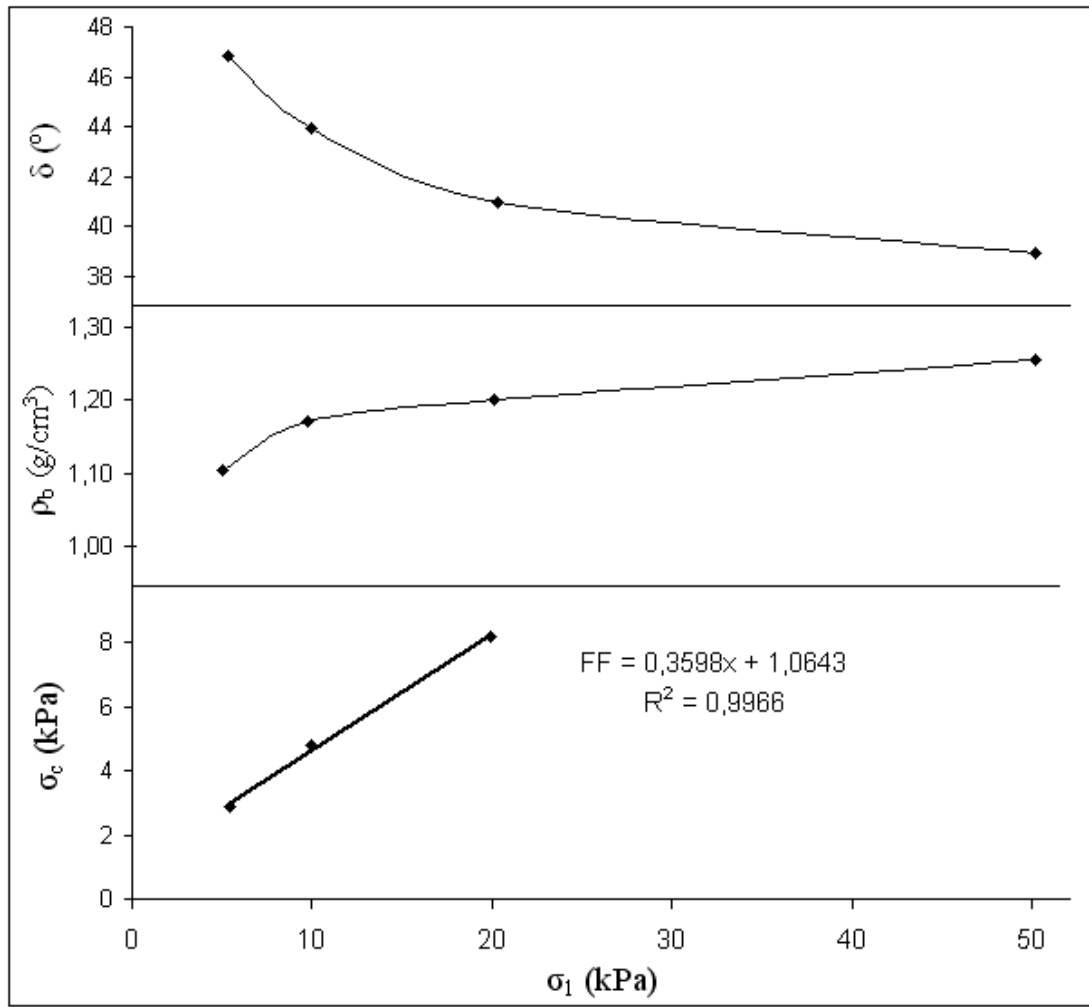
σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	δ ($^\circ$)	ρ_b (g/cm ³)	ϕ' ($^\circ$)	
				Beton-2	Paslanmaz Çelik
5.8335	0.7514	39.91	1.2292	34.4	26.4
13.4141	1.3891	39.82	1.2468	34.4	24.5
24.6547	2.1272	38.91	1.2539	34.4	23.7
53.9038	4.2757	38.87	1.2697	34.4	23.2



Şekil E.6: σ_1 ' in fonksiyonu olarak sodanın özellikleri

Tablo E.6: Kil için elde edilen akış parametreleri

σ_1 (kPa)	σ_c (kPa)	δ (°)	ρ_b (g/cm³)	ϕ' (°)	
				Beton-2	Paslanmaz Çelik
5.4069	2.8885	46.9	1.1051	-	22
9.9441	4.8179	44.01	1.1717	-	22.5
19.9486	8.1863	41.07	1.2009	-	22.7
48.851	13.728	39.04	1.2560	-	22.9



Şekil E.7: σ_1 ' in fonksiyonu olarak kilin özellikleri

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Diyarbakır’ da doğdu. İlk ve Orta öğrenimini Özel Karacadağ İlköğretim Okulu’nda, lise öğrenimini Kadıköy İntaş Lisesi’nde tamamladı. 1997 yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi (İ.T.Ü), Kimya Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. Aynı yıl İ.T.Ü İngilizce hazırlığa, 1998 yılında da Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitime başladı. Laboratuvar stajını Bilim İlaç’ta Kalite Kontrol Laboratuvarı’nda (2000), bilgisayar stajını EVYAP Sabun, Yağ ve Gliserin Sanayi ve Ticaret A.Ş.’ de (2001) ve işletme stajını yine EVYAP’ ta Üretim Planlama ve Stok Kontrol Bölümü’nde (2001) tamamladı. 2002’ de İ.T.Ü Kimya Mühendisliği Bölümü’nden ikincilikle mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü Kimya Mühendisliği’ nde başladığı yüksek lisans eğitime halen devam etmektedir ve aynı zamanda bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.