

**ZEMİNLERİN ENDEKS ÖZELLİKLERİNİN KALICI
KAYMA MUKAVEMETİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Ertan YILMAZ
(501021267)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Haziran 2006**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Recep İYİSAN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. A. Oğuz TAN (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (Y.T.Ü.)**

TEMMUZ 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın amacı killi zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ile endeks özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesidir. Ülkemizde kalıcı kayma mukavemeti parametreleri genel olarak kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri ile belirlenmektedir. Fakat bu deneylerde, numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı vardır. Bu nedenle zeminlerin büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetlerini belirlemede, halka kesme deneyleri daha kullanışlı olmaktadır. İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği laboratuvarında bulunan halka kesme deney düzeneği ile yapılan çalışmaların, kalıcı kayma mukavemetinin halka kesme deneyi yöntemi ile belirlenmesinin yaygınlaşmasına yardımcı olacağına inancım sonsuzdur. Ayrıca bu çalışma kapsamında elde edilen bağıntıların, pratik amaçlar doğrultusunda kullanabileceğini belirtmek ile beraber deneysel sonuçların yerini kesinlikle tutamayacağını da belirtmek isterim.

Bu çalışmaya beni yönlendiren ve çalışmamın her aşamasında yardımcı olan Sayın Doç.Dr. Recep İYİSAN'a, İnş.Yük.Müh. Serdar KOLTUK'a, Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanlarına ve İnş.Yük.Müh. Gökhan ÇEVİKBİLEN'e, Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerine teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans çalışmalarım boyunca bana maddi manevi destek olan sevgili annem ve babama, aylarca kahrını çeken kardeşime ve nişanlıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2006

Ertan YILMAZ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİ	3
2.1 Zeminlerin Kayma Mukavemetinin tanımı	3
2.2 Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tanımı	7
2.3 Kayma Yer Değiştirmesi ile Kalıcı Kayma Mukavemetinin Değişimi	9
2.4 Deneysel Yöntemlerle Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi	9
2.5 Kalıcı Kayma Mukavemetini Etkileyen Faktörler	11
2.5.1 Efektif normal gerilme	11
2.5.2 Kesme hızı	11
2.5.3 Zemin yapısı ve mineroloji	14
2.6 Endeks Özelliklerinin Kalıcı Mukavemete Etkisi	17
2.6.1 Likit limit ile kalıcı kayma mukavemet açısı arasındaki ilişki	17
2.6.2 Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemet açısı arasındaki ilişki	21
2.6.3 Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemet açısı arasındaki ilişki	25
2.6.4 Aktivite ile kalıcı kayma mukavemet açısı arasındaki ilişki	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	29
3.1 Deney Numunelerinin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi	29
3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanışı	32
3.3 Kesme Kutusu Deney Aleti ve Deneyin Yapılışı	33
3.4 Halka Kesme Deney Aleti	33
4. DENEYSEL SONUÇLAR	36
4.1 Halka Kesme Deneyleri	36
4.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri	38
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	42
5.1 Halka Kesme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	42
5.1.1 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının likit limit ile ilişkisinin incelenmesi	42
5.1.2 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastik limit ile ilişkisinin incelenmesi	44
5.1.3 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile ilişkisinin incelenmesi	45
5.1.4 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının kil yüzdesi ile ilişkisinin incelenmesi	46
5.1.5 Kalıcı kayma mukavemeti açıları ile pik kayma mukavemeti açıları arasındaki ilişkinin incelenmesi	48

5.1.6	Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve aktivite ile ilişkisinin incelenmesi	48
5.1.7	Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve kıvam indisi ile ilişkisinin incelenmesi	50
5.1.8	Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ve kıvam indisi ile ilişkisinin incelenmesi	51
5.1.9	Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi ile ilişkisinin incelenmesi	52
5.1.10	Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi ile ilişkisinin incelenmesi	53
5.2	Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	54
5.2.1	Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının likit limit ile ilişkisinin incelenmesi	54
5.2.2	Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastik limit ile ilişkisinin incelenmesi	55
5.2.3	Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile ilişkisinin incelenmesi	57
5.2.4	Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının kil yüzdesi ile ilişkisinin incelenmesi	58
5.2.5	Kalıcı kayma mukavemeti açıları ile pik kayma mukavemeti açıları arasındaki ilişkinin incelenmesi	59
5.2.6	Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve aktivite ile ilişkisinin incelenmesi	60
5.2.7	Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve kıvam indisi ile ilişkisinin incelenmesi	61
5.2.8	Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ve kıvam indisi ile ilişkisinin incelenmesi	62
5.2.9	Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi ile ilişkisinin incelenmesi	63
5.2.10	Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi ile ilişkisinin incelenmesi	64
5.3	Halka Kesme ve Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Geçmiş Çalışmalar ile Karşılaştırılması	65
6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER		68
KAYNAKLAR		71
EKLER		74
ÖZGEÇMİŞ		152

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1	Deney numunelerinin geoteknik özellikleri.....	31
Tablo 4.1	Halka kesme deney sonuçları.....	38
Tablo 4.2	Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları.....	41

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Coulomb göçme zarfı	4
Şekil 2.2	: Gerilme-deformasyon ilişkisi.....	6
Şekil 2.3	: Kil yüzdesi ile kalıcı ve pik kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki	8
Şekil 2.4	: Kesme hızının kalıcı kayma mukavemet açısına etkisi.....	13
Şekil 2.5	: Plastisite Kartı.....	15
Şekil 2.6	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi	18
Şekil 2.7	: Kalıcı mukavemet açısı-likit limit ilişkisi	18
Şekil 2.8	: Literatürde yapılan çeşitli deneysel çalışmalar kullanılarak likit limit ile kalıcı mukavemet açısı arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	19
Şekil 2.9	: Likit limitin $\tan \phi_r$ değeriyle değişimi	20
Şekil 2.10	: Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki.....	20
Şekil 2.11	: Plastisite indisi ile $\tan \phi_r$ arasındaki ilişki	21
Şekil 2.12	: Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki.....	22
Şekil 2.13	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının ΔPI ile değişimi	23
Şekil 2.14	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi.....	24
Şekil 2.15	: $\tan \phi_r$ ile W_p / W_L arasındaki ilişki	25
Şekil 2.16	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi	26
Şekil 2.17	: Kil yüzdesi-kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi	26
Şekil 2.18	: Aktivitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisinin incelenmesi.....	27
Şekil 2.19	: Aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki.....	28
Şekil 3.1	: Deney numunelerinin plastisite kartındaki yerleşimi	30
Şekil 3.2	: Numune hazırlama dış ringine oturtulmuş deney numunesi	32
Şekil 3.3	: Halka kesme deney aleti	34
Şekil 3.4	: Deney sonrası kesilmiş numunelerin görünümü	35
Şekil 4.1	: N-1 numunesine ait halka kesme deney sonucu	37
Şekil 4.2	: N-1 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları	37
Şekil 4.3	: N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (200kPa).....	39
Şekil 4.4	: N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (300 kPa)	40
Şekil 4.5	: N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (400 kPa).....	40
Şekil 4.6	: N-1 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları	41
Şekil 5.1	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi.....	43
Şekil 5.2	: Pik kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi	43
Şekil 5.3	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi.....	44
Şekil 5.4	: Pik kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi	45
Şekil 5.5	: Plastisite indisinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi	45
Şekil 5.6	: Plastisite indisinin pik kayma mukavemeti açısına etkisi	46

Şekil 5.7	: Kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi.....	47
Şekil 5.8	: Pik kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi.....	47
Şekil 5.9	: Halka kesme deneyleri için ϕ_r ile ϕ_p arasındaki ilişkinin incelenmesi	48
Şekil 5.10	: Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve aktivite arasındaki ilişkinin incelenmesi	50
Şekil 5.11	: Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi	51
Şekil 5.12	: Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile plastisite indisi ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi	51
Şekil 5.13	: Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi	52
Şekil 5.14	: Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi	53
Şekil 5.15	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi.....	54
Şekil 5.16	: Pik kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi	55
Şekil 5.17	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi	56
Şekil 5.18	: Pik kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi	56
Şekil 5.19	: Plastisite indisinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi	57
Şekil 5.20	: Plastisite indisinin pik kayma mukavemeti açısına etkisi	58
Şekil 5.21	: Kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi	59
Şekil 5.22	: Pik kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi	59
Şekil 5.23	: Tekrarlı kesme kutusu deneyleri için ϕ_r ile ϕ_p arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	60
Şekil 5.24	: Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve aktivite arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	61
Şekil 5.25	: Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	62
Şekil 5.26	: Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile plastisite indisi ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi	63
Şekil 5.27	: Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi	64
Şekil 5.28	: Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	65
Şekil 5.29	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişiminin literatür ile karşılaştırılması.....	66
Şekil 5.30	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişiminin literatür ile karşılaştırılması	67
Şekil 5.31	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişiminin literatür ile karşılaştırılması	68
Şekil A.1	: N-1 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	74
Şekil A.2	: N-2 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi	74
Şekil A.3	: N-3 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	75
Şekil A.4	: N-4 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	75
Şekil A.5	: N-5 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	76
Şekil A.6	: N-6 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	76

Şekil A.7	: N-7 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	77
Şekil A.8	: N-8 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	77
Şekil A.9	: N-9 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	78
Şekil A.10	: N-10 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	78
Şekil A.11	: N-11 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	79
Şekil A.12	: N-12 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	79
Şekil A.13	: N-13 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	80
Şekil A.14	: N-14 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	80
Şekil A.15	: N-15 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	81
Şekil B.1	: İç ringin montajı	97
Şekil B.2	: En üst iç ring ile çekme metalinin sisteme monte edilmesi.....	98
Şekil B.3	: Sisteme dengeleme basıncının uygulanması.....	98
Şekil B.4	: Tork kolunun sisteme monte edilmesi.....	99
Şekil B.5	: Düşey sürtünme alıcısının sisteme monte edilmesi.....	99
Şekil B.6	: Sarı ringin en alt dış ringe değdirilmesi.....	100
Şekil C.1	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	105
Şekil C.2	: Göçme zarfı eğrisi.....	105
Şekil C.3	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	106
Şekil C.4	: Göçme zarfı eğrisi.....	106
Şekil C.5	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	107
Şekil C.6	: Göçme zarfı eğrisi.....	107
Şekil C.7	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	108
Şekil C.8	: Göçme zarfı eğrisi.....	108
Şekil C.9	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	109
Şekil C.10	: Göçme zarfı eğrisi.....	109
Şekil C.11	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	110
Şekil C.12	: Göçme zarfı eğrisi.....	110
Şekil C.13	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	111
Şekil C.14	: Göçme zarfı eğrisi.....	111
Şekil C.15	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	112
Şekil C.16	: Göçme zarfı eğrisi.....	112
Şekil C.17	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	113
Şekil C.18	: Göçme zarfı eğrisi.....	113
Şekil C.19	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	114
Şekil C.20	: Göçme zarfı eğrisi.....	114
Şekil C.21	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	115
Şekil C.22	: Göçme zarfı eğrisi.....	115
Şekil C.23	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	116
Şekil C.24	: Göçme zarfı eğrisi.....	116
Şekil C.25	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	117
Şekil C.26	: Göçme zarfı eğrisi.....	117
Şekil C.27	: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği.....	118
Şekil C.28	: Göçme zarfı eğrisi.....	118

Şekil C.29 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirme grafiği.....	119
Şekil C.30 : Göçme zarfı eğrisi.....	119
Şekil C.31 : Göçme zarfı eğrisi.....	120
Şekil C.32 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	120
Şekil C.33 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	121
Şekil C.34 : Göçme zarfı eğrisi.....	121
Şekil C.35 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	122
Şekil C.36 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	122
Şekil C.37 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	123
Şekil C.38 : Göçme zarfı eğrisi.....	123
Şekil C.39 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	124
Şekil C.40 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	124
Şekil C.41 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	125
Şekil C.42 : Göçme zarfı eğrisi.....	125
Şekil C.43 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	126
Şekil C.44 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	126
Şekil C.45 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	127
Şekil C.46 : Göçme zarfı eğrisi.....	127
Şekil C.47 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	128
Şekil C.48 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	128
Şekil C.49 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	129
Şekil C.50 : Göçme zarfı eğrisi.....	129
Şekil C.51 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	130
Şekil C.52 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	130
Şekil C.53 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	131
Şekil C.54 : Göçme zarfı eğrisi.....	131
Şekil C.55 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	132
Şekil C.56 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	132
Şekil C.57 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	133
Şekil C.58 : Göçme zarfı eğrisi.....	133
Şekil C.59 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	134
Şekil C.60 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	134
Şekil C.61 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	135
Şekil C.62 : Göçme zarfı eğrisi.....	135
Şekil C.63 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	136
Şekil C.64 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	136
Şekil C.65 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	137
Şekil C.66 : Göçme zarfı eğrisi.....	137
Şekil C.67 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	138
Şekil C.68 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	138
Şekil C.69 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	139
Şekil C.70 : Göçme zarfı eğrisi.....	139

Şekil C.71 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	140
Şekil C.72 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	140
Şekil C.73 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	141
Şekil C.74 : Göçme zarfı eğrisi.....	141
Şekil C.75 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	142
Şekil C.76 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	142
Şekil C.77 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	143
Şekil C.78 : Göçme zarfı eğrisi.....	143
Şekil C.79 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	144
Şekil C.80 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	144
Şekil C.81 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	145
Şekil C.82 : Göçme zarfı eğrisi.....	145
Şekil C.83 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	146
Şekil C.84 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	146
Şekil C.85 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	147
Şekil C.86 : Göçme zarfı eğrisi.....	147
Şekil C.87 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa).....	148
Şekil C.88 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa).....	148
Şekil C.89 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)	149
Şekil C.90 : Göçme zarfı eğrisi.....	149
Şekil D.1 : Kesme kuvveti (CH 1) kalibrasyonu.....	150
Şekil D.2 : Sürtünme kuvveti (CH 2) kalibrasyonu.....	150
Şekil D.3 : Düşey deformasyon (CH 3) kalibrasyonu.....	151
Şekil D.4 : Düşey gerilme (CH 4) kalibrasyonu.....	151

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktivite
c_p	: Pik gerilmeye göre kohezyon
c_p'	: Efektif pik kohezyon
c_r	: Kalıcı kohezyon
c_r'	: Efektif kalıcı kohezyon
D	: Çap
D_r	: Relatif sıkılık
G_s	: Dane özgül ağırlığı
H	: Numune yüksekliği
k	: Geçirimsizlik (Permeabilite) katsayısı
KY	: Kil yüzdesi (0.002 mm den küçük çaplı danelerin yüzdesi)
I_c	: Kıvam indisi
I_p	: Plastisite indisi
R_h	: Orijinal hidrometre okuması
S	: Düşey deformasyon
T	: Kesme kuvveti
t	: Zaman
V	: Kesme hızı
w	: Su muhtevası
w_{opt.}	: Optimum su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
W	: Ağırlık
Δl	: Kayma yerdeğiştirme
γ	: Birim hacim ağırlık
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
σ	: Normal gerilme
σ'	: Efektif normal gerilme
φ_p	: Pik kayma mukavemeti açısı
φ_p'	: Efektif pik kayma mukavemeti açısı
φ_r	: Kalıcı kayma mukavemeti açısı
φ_r'	: Efektif kalıcı kayma mukavemeti açısı
τ	: Kayma mukavemeti
τ_p	: Pik kayma mukavemeti
τ_r	: Kalıcı kayma mukavemeti

ZEMİNLERİN ENDEKS ÖZELLİKLERİNİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİNE ETKİSİ

ÖZET

Fisürlü veya aşırı konsolide kil şevlerin stabilite hesaplarında ve bu tür zeminlerde yapılacak mühendislik yapılarının tasarımında kalıcı kayma mukavemeti parametreleri büyük önem kazanmaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti büyük deformasyonlar sonucu olduğundan, göçme sonucu oluşan yüzeylerde mukavemetin kalıcı kayma mukavemeti değerinde olduğu ya da gittikçe bu değere yaklaşmakta olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla zeminlerde, deformasyonla değişmeyen ve sabit olarak kalan en küçük kayma gerilmesinin değerine kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir. Kalıcı kayma mukavemetini belirlemede kullanılan başlıca deney yöntemleri; kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve halka kesme deneyidir. Zeminlerin büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetlerini belirlemede en uygun deney yöntemi halka kesme deneyi yöntemidir. Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini etkileyen başlıca faktörler efektif normal gerilme, kesme hızı, zemin yapısı ve minerolojidir. Bu çalışmada, zeminlerin kalıcı mukavemet parametrelerini belirlemek için farklı endeks özelliklerine sahip, standart Proctor sıkılığında hazırlanmış numuneler üzerinde üç değişik normal gerilme altında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Aynı numuneler üzerinde ve aynı gerilmeler altında tekrarlı kesme kutusu deneyleri de yapılmıştır. Elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki tekil ve ikili ilişkiler incelenmiştir. Sonuç olarak, halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile bulunan kalıcı mukavemet açısının artan likit limit, plastik limit, kil yüzdesi ve plastisite indisi ile beraber düştüğü görülmüştür. Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı mukavemet açısının halka kesme deneyinden bulunan değerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

THE EFFECT OF INDEX PROPERTIES OF SOILS TO THE RESIDUAL SHEAR STRENGTH

SUMMARY

Residual shear strength of soils is very important in the design of constructions and stability analysis on fissured or over consolidated clay slopes. The residual shear strength is occurred with big deformations, so it is known that the strength on collapsed slope is approaching or equal to residual shear strength value. So for soils, minimum shear strength value which is constant with deformation is called residual shear strength. The main experimental methods for determining residual shear strength are reversal direct shear, triaxial pressure and ring shear tests. Ring shear test is the most suitable method for determining the strength of soils after huge deformations. The main factors affecting the residual shear strength of soils are effective normal stress, shear displacement rate, soil composition and mineralogy. In this study ring shear tests were carried out in three different effective normal stress value on soil samples having different index properties and prepared in standard proctor density to determine the residual strength parameters. Also reversal direct shear tests were performed under same vertical stresses. The singular and binary relations between index properties and residual shear strength parameters are analyzed from the data obtained by these tests. In conclusion, it is apparent that with increasing liquid limit, plastic limit, clay fraction and plasticity index residual shear strength angle is decreasing. It has observed that the residual friction angle obtained by reversal shear box test is greater than the one obtained by ring shear test.

1. GİRİŞ

Zeminlerde meydana gelen göçme, bir kayma düzlemi boyunca kayma direncinin aşılması ile mümkün olmaktadır. Fakat bu düzlem her zaman kayma gerilmesinin en büyük olduğu düzlem olmayabilir. Genelde göçme, normal gerilme ve kayma gerilmesinin kayma yüzeyine beraber etkimesi sonucu meydana gelmektedir. Zeminlerdeki kayma mukavemeti, zeminin göçme olmadan karşı koyabileceği maksimum kayma gerilmesi değeri olarak tanımlanmaktadır. Kayma mukavemeti şev stabilitesi analizlerinde, istinat duvarı tasarımlarında ve temellerin taşıma gücü hesaplarında büyük önem taşımaktadır.

Kil zeminlerden oluşan şevlerde pik değerlere göre yapılan uzun süreli stabilite analizlerinde güvenli olduğuna karar verilen şevlerin bir süre sonra göçmeye maruz kaldığı görülmüştür. Göçmeye maruz kalan şevler üzerinde ortalama kayma gerilmeleri belirlenmiş ve bu değerlerin tasarım aşamasında kullanılan pik kayma mukavemeti değerinden daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Bu konuyu araştırmak için önceden pik mukavemet değeri yakalandıktan sonra kesilen laboratuvar deneylerine devam edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda artan deformasyon değerleri ile beraber önce bir pik yaptığı ardından azalarak deformasyonla değişmeyen sabit bir değer aldığı gözlenmiştir. Artan deformasyon değeri ile değişmeyen zeminin bu sabit kayma mukavemeti değerine kalıcı kayma mukavemeti denir (Skempton,1964).

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan başlıca deney yöntemleri tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleridir. Tekrarlı kesme kutusu deneyinde sabit düşey yük altında konsolidasyona bırakılan numune, kesme kutusunun üst parçası sabit tutulurken alt parçasının yatay bir düzlem boyunca sabit hızla hareket ettirilmesi ile kayma hareketi oluşturulmakta ve numune kesmeye zorlanmaktadır. Halka kesme deney düzeneğinde ise halka şeklindeki numune kesme kutusu deneyindeki gibi verilen sabit bir normal gerilme altında deney aletinin üst kısmı sabit tutularak alt kısmının döndürülmesi vasıtasıyla numune üzerinde kayma hareketi oluşturulmakta ve numune kesilmektedir. Halka kesme deneyinin diğer yöntemlere göre iki temel üstünlüğü bulunmaktadır. Bunlar deneyin sınırsız kayma

yerdeğiştirmesine olanak sağlaması ve zeminlerde görölen rotasyonel kaymayı en gerçekçi şekilde modellemesidir.

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti mekanizmaları incelendiğinde kalıcı kayma mukavemetine etkiyen başlıca faktörlerin minerolojik yapı, efektif normal gerilme ve kesme hızı olduğu anlaşılmaktadır (Mitchell,1993).

Bu çalışma kapsamında endeks özellikleri belirlenen birçok numunenin arasından seçilen farklı endeks özelliklerine sahip 15 numune üzerinde halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Standart Proktor sıkılığında hazırlanan numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri 0.035 mm/dak, halka kesme deneyleri ise 25 mm/dak kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa normal gerilmeler altında tekrarlanmış halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri içeren 15 set deney yapılmıştır.

İkinci bölümde kalıcı kayma mukavemetinin tanımlanması ve işleyişi hakkında temel bilgiler ve konu ile ilgili literatür çalışmaları irdelenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde seçilen numunelerin endeks özellikleri, numune hazırlama yöntemi ve yapılan deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlara, beşinci bölümde ise deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler irdelenmiştir. Son bölümde ise genel sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

2. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİ

Fisürlü veya aşırı konsolide kil şevlerin stabilite hesaplarında ve bu tür zeminlerde yapılacak mühendislik yapılarının tasarımında kalıcı kayma mukavemeti parametreleri büyük önem kazanmaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti büyük deformasyonlar sonucu oluştuğundan, göçme sonucu oluşan yüzeylerde mukavemetin kalıcı kayma mukavemeti değerinde olduğu ya da gittikçe bu değere yaklaşmakta olduğu bilinmektedir. Fisürlü veya aşırı konsolide kil zeminlerde ise kayma mukavemeti değeri zamanla düşerek kalıcı değere yaklaşmakta ve ani göçmelere sebep olabilmektedir (Mitchell,1993).

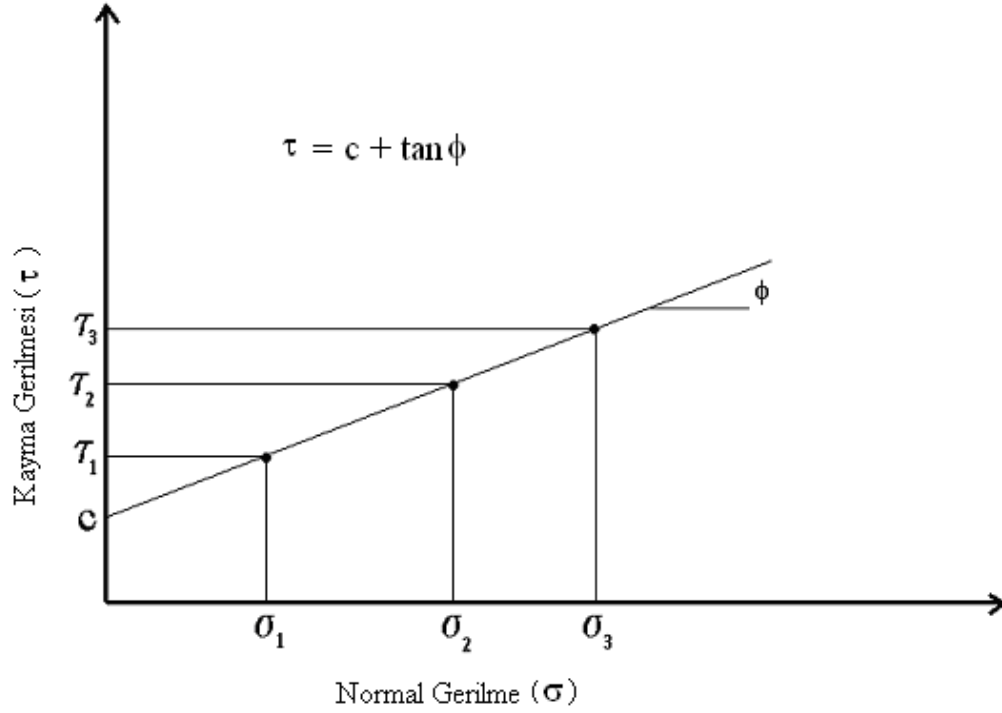
Bu bölümde öncelikle kayma mukavemeti ve kalıcı kayma mukavemeti kavramları tanımlanmıştır. Temel tanımlamalardan sonra kalıcı kayma mukavemetinin işleyişi ve belirlenmesi, kayma mukavemetinin kayma yerdeğiştirmesi ile değişimi, kalıcı kayma mukavemetini etkileyen faktörler ve kalıcı kayma mukavemeti ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler anlatılmıştır.

2.1 Zeminlerin Kayma Mukavemetinin Tanımı

Zeminlerde göçme meydana gelmesi için, olası bir kayma düzlemi boyunca kayma direncinin aşılması gerekmektedir. Bu düzlem her zaman en büyük kayma gerilmesi düzlemi olmayabilmektedir. Genel olarak göçme belli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu ortaya çıkmaktadır. Zeminin kayma mukavemeti ise, göçmeye meydan vermeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir. Mohr-Coulomb göçme kriterine göre zeminlerin kayma mukavemeti;

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (2.1)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Bu ifade incelendiğinde, kayma mukavemetinin iki bileşenden oluştuğu görülmektedir. Bu bileşenlerden biri normal gerilmeye bağlı ($\sigma \tan\phi$), diğeri ise (c) normal gerilmeden bağımsızdır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Coulomb göçme zarfı

Zeminlerin kayma mukavemetinin olası bir göçme düzlemi boyunca kaymaya karşı oluşan dirençten kaynaklandığı bilinmektedir. Bu direnç, o düzlem boyunca ortaya çıkan sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.1’de yer alan bağıntıda ikinci terimin ($\sigma \cdot \tan \phi$) bir sürtünme direnci ifade ettiği görülmektedir ve ϕ açısı zeminin kayma mukavemeti açısı olarak nitelendirilmektedir. Kayma mukavemeti açısı (ϕ) sadece dane yüzeyleri arası sürtünmeden kaynaklanan direnci değil, aynı zamanda danelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitlenme etkisini de içeren toplam direnci temsil etmektedir. Coulomb bağıntısındaki diğer kayma mukavemeti parametresi (c) ise kohezyon olarak tanımlanmaktadır.

Zemin tabakalarının gerilme-şekil değiştirme davranışlarını ve kayma mukavemetlerini belirlemek için, tabakalardan alınan numuneler üzerinde birçok laboratuvar deney yöntemi geliştirilmiştir. Bunlar arasında daha yaygın olarak kullanılanlar; serbest basınç, kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleridir.

Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır. Eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısılması (eksenel şekil değiştirmesi) ölçülmekte ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Eksenel gerilmenin en büyük değeri (veya

göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri) zeminin serbest basınç mukavemeti (q_u) değerini vermektedir. Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yanal destek olmaksızın kendi kendini dik olarak ayakta tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir, bu yüzden sadece killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemidir. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilmediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir. Eksenel yüklemeden önce zemini konsolide etmek ve eksenel yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün olmamaktadır. Bu kısıtlayıcı yönlerine karşın, serbest basınç deneyi killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemekte yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır. Bu deneyde drenajsız kayma mukavemeti ;

$$\tau_f = c_u = q_u/2 \quad (2.2)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir.

Üç eksenli basınç deneyi arazi şartlarına en yakın şekilde modellediği için kayma mukavemetini saptamaya yarayan deney yöntemleri içerisinde en gerçekçi olanıdır.

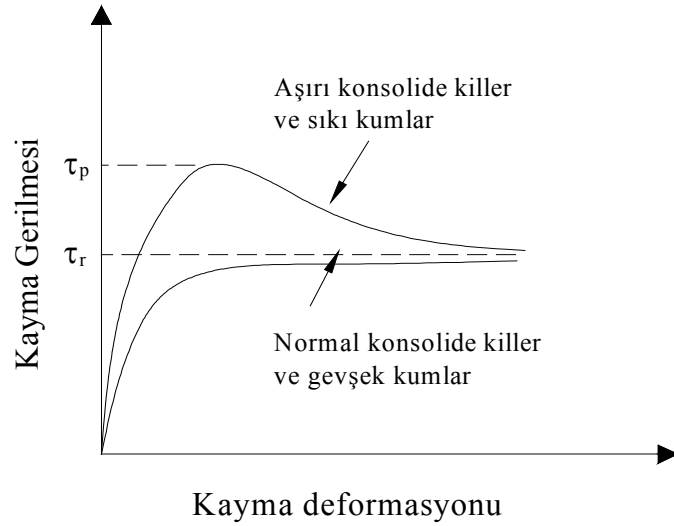
Üç eksenli basınç deneyinde, silindirik bir zemin numunesi bir hücre içine yerleştirilmekte ve hücreye uygulanan basınç (hava veya su basıncı) vasıtası ile zemin numunesi üzerinde hidrostatik bir basınç uygulanmaktadır. Numune etrafına geçirilen bir lastik kılıf zeminin hücreyi dolduran su ile temas etmesini önlemekte ve numune içine ve dışına ayrı ayrı basınçlar uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Numune üst başlığına bir piston ile eksenel gerilme uygulanmakta, numune alt ve üst başlıklarına bağlı ince kanallar vasıtası ile de deney sırasında drenaj durumu kontrol altına alınmaktadır. Bu deney yöntemi ile üç farklı deney yapılabilmektedir:

- Konsolidasyonsuz-Drenajsız Deneyler (UU-deneyleri): Bu tür deneyde, zemin suyunun gerek hücre basıncı uygulanmasında gerekse eksenel yükleme sırasında numuneden dışarı çıkmasına izin verilmemektedir.
- Konsolidasyonlu-Drenajsız Deneyler (CU-deneyleri): Birinci aşamada hidrostatik basınç altında numunenin konsolide olmasına izin verdikten sonra, ikinci aşamada drenajsız durumda eksenel yükleme yapılmaktadır.
- Konsolidasyonlu-Drenajlı Deneyler (CD-deneyleri): Her iki aşamada da drenaja izin verilmektedir.

Bu deney yönteminde boşluk suyu basıncı ve hacim değişiklikleri, drenaj koşulları, konsolidasyon, yükleme koşulları ve suya doygunluk kontrol edilebilmektedir. Üç eksenli basınç deneylerinde göçme zarfı, elde edilen mohr daireleri ile oluşturulur. Dairelere çizilen teğet vasıtası ile kayma mukavemetinin denklemi elde edilir.

Kayma mukavemetinin belirlenmesinde kullanılan laboratuvar deneyleri içinde en eski ve yaygın kullanımda olanı kesme kutusu deneyidir. Kesme kutusu deneyinde, zemin numunesi kare veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içine yerleştirilmektedir. Uygulanan bir kesme kuvveti altında, kutunun üst kısmı sabit tutulurken alt kısmı yatayda hareket ettirilmekte ve böylece numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmaktadır. Kesme işlemi göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme değerlerine kadar (%15~20) devam ettirilmelidir. Farklı düşey yükler altında deney tekrarlanarak zeminin göçme zarfı elde edilmektedir.

Göçme zarfı oluşturulurken gerilme-deformasyon eğrilerindeki pik kayma gerilmesi ve kalıcı kayma mukavemeti değerleri göz önünde bulundurulmalıdır. Gerilme-deformasyon ilişkileri incelendiğinde iki çeşit davranış gözlenmektedir. Birinci türde artan deformasyon değeri ile zeminin kayma mukavemeti önce bir pik yapmaktadır ve daha sonra azalarak sabit bir değer aldığı gözlenmektedir. Bu davranış sıkı kum ve aşırı konsolide killerde gözlenmektedir. Diğer davranışta ise belirli bir pik gözlenmemekte artan deformasyonla kayma gerilmesi artmakta ve belli bir değerden sonra artan deformasyon değeriyle değişmemektedir. Bu davranış türü ise gevşek kum ve normal konsolide killerde görülmektedir. Her iki davranış türünde de görülen, artan deformasyon değeriyle değişmeyen kayma mukavemetinin bu sabit değerine zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir (Şekil 2.2).



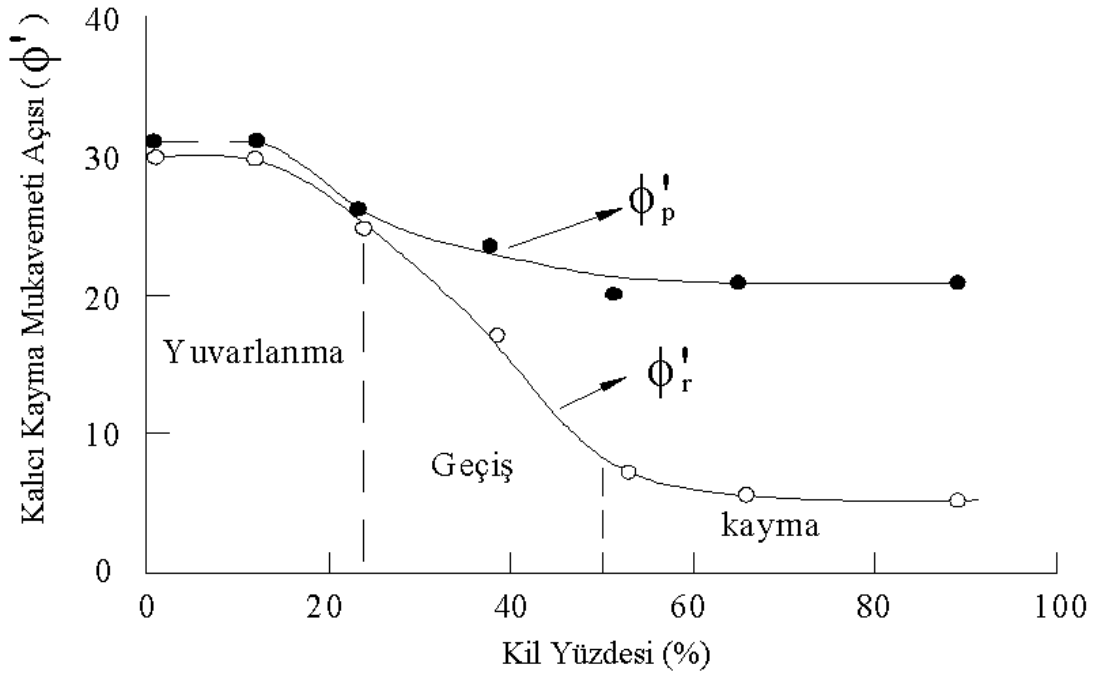
Şekil 2.2 : Gerilme-deformasyon ilişkisi

Kesme kutusu deneyi ile, kesme sırasında zeminin drenajını kontrol etmek ancak yükleme hızını zeminin permeabilitesine göre ayarlamak ile mümkün olmaktadır. Permeabilitesi yüksek zeminlerde (kumlarda) drenajlı koşullar geçerli olurken, killer gibi düşük permeabiliteli zeminlerde normal yükleme hızlarında drenajsız, çok yavaş yükleme hızlarında drenajlı koşullar geçerli olmaktadır. Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarını ölçmenin mümkün olmaması, göçmeye ulaşılmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır.

2.2 Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tanımı

Kil şevlerin uzun süreli stabilite analizleri pik değerlere göre yapıldığında güvenli olduğuna karar verilen aşırı konsolide kil şevlerde zamanla göçme meydana gelmiştir. Göçme sonrasında şevler üzerinde yapılan incelemelerde ortalama kayma gerilmesi hesaplanmış ve bulunan değer pik kayma mukavemetinden daha düşük olduğu anlaşılmış ve numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerine devam edilmiştir. Aşırı konsolide killer üzerinde yapılan deneyler sonucunda artan deformasyon değerleri ile beraber kayma mukavemetinin yaptığı pik değerden sonra azalarak artık deformasyonla değişmeyen sabit bir değer aldığı görülmüştür. Zeminin kayma mukavemetinin deformasyonla değişmeyen bu sabit değerine zeminin kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir (Skempton,1964).

Baskın dane yapısı ve daneler arası sürtünmeye bağlı olarak kalıcı kayma mukavemetinin davranışı incelendiğinde üç farklı davranış biçimi gözlenmektedir. Bunlar yuvarlanma, kayma ve geçiş biçimleridir (Şekil 2.3). Yuvarlanma tipi davranış, baskın olarak yuvarlak ve dolgun danelerden oluşan zeminler için geçerlidir. Kalıcı mukavemet yüksektir ve dane yönelimi oluşmaz. Kalıcı kayma mukavemeti açısı, daneler arası sürtünme katsayısına değil, iri danelerin yapısına ve bağlanmalarına bağlıdır (Lupini ve diğ., 1981).



Şekil 2.3 : Kıl yüzdesi ile kalıcı ve pik kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Lupini ve diğ., 1981).

Kayma tipi davranış, yüksek oranda yassı şekilli daneler içeren zeminlerde meydana gelir. Kalıcı kayma mukavemeti açısı, mineroloji ve daneler arası sürtünme katsayısına bağlıdır. Kayma tipi davranış ilk kayma yüzeyi oluşuktan sonra meydana gelen gerilme durumundan önemli ölçüde etkilenmez. İlk kayma yüzeyi oluşumu sırasındaki gevreklik özelliği birincil olarak baskın dane yapısının yönelimine bağlıdır. Geçiş davranışı, belirli bir dane yapısının olmadığı durumlarda meydana gelir ve kayma yüzeyinin farklı bölümlerinde kayma ve yuvarlanma tipi davranışlarını birlikte ihtiva eder. Kalıcı kayma mukavemetinde zeminin özellikleri yuvarlanma tipinden kayma tipine doğru geçiş şeklindedir. Bu tip zemin davranışında kalıcı kayma mukavemeti açısı zemin derecelenmesindeki küçük değişikliklere karşı son derece hassastır (Lupini ve diğ., 1981).

Skempton (1985) kil numuneler üzerinde yaptığı çalışmalarda sabit efektif normal gerilmeler altında kayma mukavemetinin işleyişini incelemiştir. Yüksek kil yüzdeli zeminlerdeki kayma mekanizması incelendiğinde kayma mukavemetindeki düşüşün normal konsolide killeri için tek, aşırı konsolide killeri için ise iki kademeli olduğu belirlenmiştir. Birinci düşüş kademesi küçük deplasman değerlerinde su muhtevastaki artıştan kaynaklanmaktadır. İkinci kademe ise çok daha büyük deplasmanlar sonucu yassı kil minerallerinin kayma yüzeyine paralel bir şekilde dane yönelimi oluşturmast sonucunda meydana gelir. Dane yönelimi sonucunda temas yüzeyi arttığı için mukavemet bir miktar daha düştükten sonra artık deformasyonla değişmemekte ve kalıcı kayma mukavemeti değerine ulaşmaktadır. Düşük kil yüzdeli zeminlerde ise dane yönelimine bağlı kayma mukavemetindeki düşüş genelde görülmez. Mukavemet mekanizması daha çok kum ve silt daneleri tarafından kontrol edilir.

2.3 Kayma Yerdeğiştirmesi ile Kalıcı Kayma Mukavemetinin Değişimi

Kamai (1998) kil numuneler üzerinde yaptığı çalışmalarda kalıcı duruma ulaşılması için büyük yerdeğiştirmeler gerektiğini belirlemiştir. Kalıcı duruma geçildiğinde kayma gerilmesindeki değişimler sabit kalmaktadır. Böylece efektif gerilmenin kalıcı haldeki değeri belirlenebilir. Kayma mukavemetinin kalıcı hale geçtiği bu durumda kil minerallerinin dane yönelimi sonucunda pürüzlü olan kayma yüzeyi rahatça kaymaya başlamaktadır.

Skempton (1985) yaptığı halka kesme deneyleri sonucunda kalıcı kayma mukavemeti değerine genelde 100 mm'lik yerdeğiştirmelerden sonra bazen ise 500 mm'yi aşan yerdeğiştirmelerden sonra kayma mukavemeti değerinin kalıcı hale geçtiğini belirlemiştir. Kesme kutusu veya halka kesme deneylerinde aşırı konsolide killeri ile yapılan deneylerde ise pik mukavemet değerlerinin 1 mm'lik yerdeğiştirmeler sonucu elde edildiği gözlenmiştir.

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli konu da zemine uygulanan normal gerilmenin etkisi olmaktadır. Zemine uygulanan yüksek normal gerilmelerde dane yönlenmesi daha hızlı bir şekilde gerçekleşmekte ve böylece küçük yerdeğiştirme değerlerinde kayma mukavemeti değeri kalıcı değerine ulaşmaktadır.

2.4 Deneyisel Yöntemlerle Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Kalıcı kayma mukavemetini belirlemede kullanılan başlıca deney yöntemleri; kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve halka kesme deneyidir. Zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri arasında üç eksenli basınç deneyi en gelişmişlerinden biri olmaktadır. Bu deney düzeni ile, zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemetini gerçeğe yakın olarak belirlemek mümkün olmaktadır. Fakat bu deneylerde, numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı vardır. Aynı şekilde kesme kutusu deneyi de çok yaygın olarak kullanılmakla beraber çok sınırlı bir deplasmana izin verebilmektedir. Bu nedenle zeminlerin büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetlerini belirlemede, halka kesme deneyleri daha kullanışlı olmaktadır.

Kesme kutusu deneyinde, zemin numunesi kare veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içine yerleştirilmektedir. Uygulanan kesme kuvveti ile kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket edebilmekte ve böylece numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmaktadır.

Kesme kutusu deneyi kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan deney yöntemlerinden biri olmakla birlikte bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Kesme kutusu deneyinde numune sürekli aynı yönde değil, ileri-geri kesilmektedir. Bu yüzden kayma yüzeyini oluşturması beklenen yassı kil danelerinin tamamının kayma yüzeyine paralel doğrultuda dane yönelimi oluşturması mümkün olmamaktadır (Bromhead ve Curtis, 1983).

Halka kesme deneyi kalıcı kayma mukavemetini hızlı bir şekilde belirlemek ve farklı normal gerilmeler altında kalıcı göçme zarfını oluşturmak için en uygun deney yöntemidir. Halka kesme deneyinde; verilen sabit bir normal gerilme altında deney aletinin üst kısmı sabit tutularak alt kısmının döndürülerek halka şeklindeki numune üzerinde kayma hareketi oluşturularak kesmeye zorlanır. Deney düzeneği, kesme süresi boyunca kesme yüzeyinde sabit en kesit alanı sağlar ve yerdeğiştirmede bir sınır olmaksızın numunenin tek yönde kesilmesine olanak verir. Bu durum kil danelerinin kayma yüzeyine paralel bir şekilde yönelenmesini ve böylece kalıcı mukavemet durumunun oluşmasını sağlar. Deney sonuçları öncelikli olarak eski

heyelan yüzeyleri ve faylar gibi önceden oluşmuş kayma yüzeyleri içeren şevlerin kayma mukavemetinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (ASTM D-6467,2000).

Halka kesme deneyi zeminlerde görülen rotasyonel kaymayı en gerçekçi şekilde modelleyen ve sınırsız kayma yerdeğiştirmesine olanak veren bir deney yöntemidir. Uygulanan normal gerilme altında, deney aletinin üst kısmı sabit tutularak, alt kısmının belirlenen yerdeğiştirme değerine kadar hiçbir sınırlama olmadan aynı yönde hareket etmesiyle deney numunesi kesilir. Halka kesme deneyinin üstünlükleri aşağıdaki gibidir:

- Tek yönde sınırsız ve sürekli bir kayma yerdeğiştirmesi.
- Kesme sırasında sabit en kesit alanı.
- Minimal laboratuvar gözetimi.
- Kolayca kullanılabilen data elde etme teknikleri (Hillman ve Stark, 2001).

2.5 Kalıcı Kayma Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörler; efektif normal gerilme, kesme hızı ve minerolojidir. Bu faktörler aşağıda ayrıntılı olarak incelenecektir.

2.5.1 Efektif normal gerilme

Hawkins ve Privett (1985) yüksek kil yüzdeli zeminler üzerinde yaptıkları çalışmalarda numunelere ait göçme zarflarında eğrilik olduğunu saptamışlardır. Eğriliğin 200 kPa efektif normal gerilmeden düşük gerilme değerlerinde görüldüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti açılarının zemine etkiyen efektif normal gerilme ile değiştiğini göstermektedir. Yani efektif normal gerilme arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açısı azalmakta ve 200 kPa gerilme değerinden sonra gerilme artışı ile değişmeyen sabit bir kalıcı kayma mukavemeti açısı elde edilmektedir.

Göçme zarfındaki eğriliğin sebebi tam olarak bilinmemekle beraber, kil yüzdesi yüksek olan ve smektit gibi ince kil minerali içeren zeminlerde göçme zarfındaki eğriliğin daha fazla olduğu saptanmıştır. Olası kayma yüzeyi boyunca dane yönelimi sayesinde yassı kil mineralleri yoğunlaştığı için yüzey alanı artar ve gerilme

değerlerinde azalma olur. Bu yüzden kalıcı göçme zarfında eğrilik meydana gelmektedir (Hawkins ve Privett, 1985).

2.5.2 Kesme hızı

Zeminlerde oluşması muhtemel kayma yüzeyleri çok farklı hızlardaki kesme etkisine maruz kalabilmektedir. Zeminler deprem yükleri altında çok yüksek kayma hızlarının etkisi altında kalabileceği gibi, heyelan bölgelerindeki zeminlerde olduğu gibi çok düşük kayma hızlarına da maruz kalabilmektedir. Bu yüzden kayma hızının kalıcı kayma mukavemeti mekanizmasına etkisinin bilinmesi önem taşımaktadır.

Lemos (2003) tarafından yüksek kesme hızlarında (100-400 mm/dak) yapılan deneyler sonucunda üç tip hızlı kalıcı mukavemet değişimi olduğu belirlenmiştir. Bunlar negatif, nötr ve pozitifdir. Yuvarlanma tipi kayma davranışına sahip zeminler nötr veya negatif hız etkisi göstermektedir. Bu tip zeminler kil yüzdesindeki değişimlere karşı çok hassastır ve normal gerilmeye bağlı olarak her iki hız etkisini de gösterebilir. Geçiş tipi kayma davranışı gösteren zeminler negatif hız etkisi altındadır. Kayma tipi davranış gösteren zeminler ise pozitif veya negatif hız etkisi gösterirler.

Yapılan çeşitli araştırmalarla birlikte, negatif hız etkisinin nedenleri ile ilgili bir mekanizma belirlenmiştir. Numunelerin hızlı kesilmesi kayma yüzeylerindeki boşluk oranında ve su muhtevasında artışa neden olmaktadır. Böylece numunenin kayma mukavemetinde kalıcı düşmeler meydana gelmektedir. Kritik değerden daha yüksek yerdeğiştirmelerde oluşan düşük mukavemet değerleri sabit bir değerdir ve büzülmeye veya sürtünmeye bağlı oluşan efektif gerilmelere bağlı değildir. Hızlı kesmenin durduğu veya yavaşladığı zaman, kayma yüzeyi büzülme eğilimine girer ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Fakat hızlı kesme sonucunda ortaya çıkan kayma yüzeyindeki düşük mukavemet önemli şekilde bu etkene bağlı değildir. Düşük mukavemet, hızlı evrenin ardından devam eden yavaş kesme hızlarında da aşırı boşluk suyu basıncı yok olana kadar devam eder. Her ne kadar sahada negatif hız etkisinin sonuçları felaket de olsa, serbest suyun kayma yüzeyine girişi böyle bir etkinin görülebilmesi için önkoşul olduğu görülmektedir (Lemos,2003).

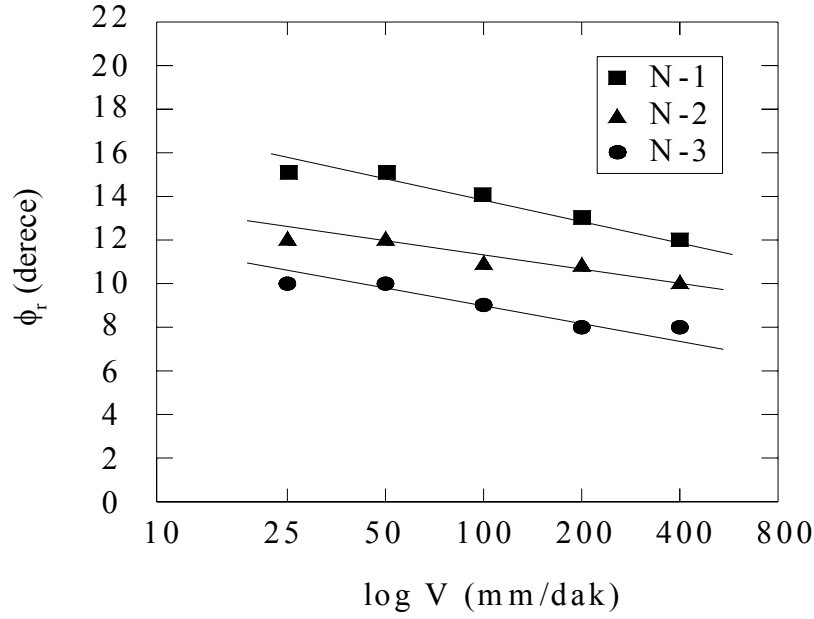
Kayma yerdeğiştirmesi hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisini açıklığa kavuşturmak için değişik hızlarda (0.02- 2 mm/dak) kaolin ve çamurtaşı numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yapılmış ve hız etki katsayısı (α) tanımlanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda, kaolin ve çamurtaşının kalıcı kayma mukavemetinin kayma yerdeğiştirmesi hızına bağlı olduğu görölmüştür. Tanımlanan hız etki katsayısı parametresinin, kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisini değerlendirmede ne kadar etkili olduğu görölmektedir. Ayrıca kesme hızına bağlı olarak kalıcı kayma mukavemetindeki değişimlerin zemindeki kil minerallerinin yapısı ve çeşidine bağlı olduğu belirlenmiştir (Suzuki ve diğ.,2001).

Skempton (1985), farklı kesme hızlarında deneyler yaparak kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisini incelemiştir. Yapılan düşük hızlı deneylerde mukavemet değişimlerinin göz ardı edilebilecek değerlerde olduğu saptanmış ve hızın kalıcı kayma mukavemetine etkisi önemsiz kabul edilmiştir. Toprak kaymalarının göröldüğü bölgelerde, kesme hızı değerleri çok düşük olduğu için düşük hızlı laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri kullanılabilir. Yüksek kesme hızlarının etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmalarda ise 0.01 mm/dak kesme hızıyla kalıcı kayma mukavemeti değeri elde edildikten sonra hız değeri 100 mm/dak'ya çıkarılmış ve boşluk suyu basıncı sönümlenene kadar bekledikten sonra tekrar ilk hız değeri uygulanmıştır. Daha sonra hız bu sefer 400 mm/dak'ya çıkarılmış. Bu yöntem ile yapılan deneyler sonucunda kalıcı kayma mukavemetindeki dikkate alınması gereken değişimlerin 100 mm/dak kesme hızını aşan değerlerde meydana geldiği belirlenmiştir.

Koltuk (2005), dört farklı numune üzerinde 25, 50, 100, 200 ve 400 mm/dak kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyleri ile kesme hızının kalıcı kayma mukavemeti parametrelerine olan etkisini incelemiştir. Deneyler sonucunda kohezyonlu numunelerde hız değişimlerinin kayma gerilmelerini etkilediği belirlenmiştir. Bu değişim, kesme esnasında kayma yüzeyinde oluşan boşluk suyu basıncından kaynaklanmaktadır. Yüksek kesme hızından dolayı, numunede suyun geçişine (hacim değişimine) izin verilmemektedir. Dolayısıyla kesme yüzeyi boyunca boşluk suyu basıncı oluşmaktadır.

şekil 2.4'te farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyleri ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının kesme hızı ile değişimi incelenmiştir. Grafik irdelendiğinde kesme hızı arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açısının 2-3° azaldığı görölmektedir.



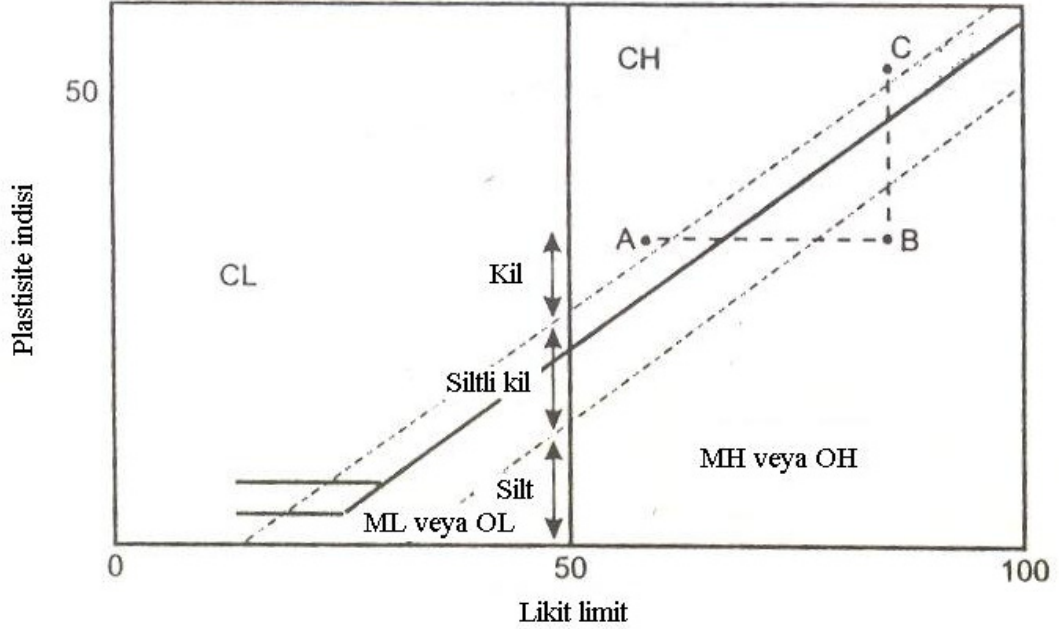
Şekil 2.4 : Kesme hızının kalıcı kayma mukavemet açısına etkisi (Koltuk,2005)

2.5.3 Zemin Yapısı ve Mineroloji

Yapılan araştırmalar sonucu zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti değerinin zeminin aşırı konsolide veya normal konsolide olmasına bağlı olmadığı ve artan kayma deformasyonu değeriyle aynı sabit değere ulaştığı belirlenmiştir. Bu yüzden kalıcı kayma mukavemetini etkileyen diğer bütün şartlar aynı kaldığı takdirde aşırı konsolidasyon oranının zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini etkilemediği söylenebilir (Skempton,1985). Özellikle yüksek kil yüzdeli aşırı konsolide killerde pik mukavemet ile kalıcı kayma mukavemeti arasında büyük bir fark oluşmaktadır. Bu yüzden bu tür zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti değerinin önemi artmaktadır. Sonuç olarak aşırı konsolidasyon oranı zeminin pik mukavemeti ile doğru orantılı olduğu için, aşırı konsolide killerde mukavemetteki düşüş daha büyük olacaktır ve her ne kadar kalıcı kayma mukavemeti değeri değişmese de önemi artmış olacaktır.

Wesley (2003), kohezyonlu zeminler üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda her ne kadar likit limit ve plastisite indisine bağlı bağıntıların geçerliliği olsa da kohezyonlu zeminlerin tek başına bu parametrelere bağlı ifadelerle tanımlanamayacağını belirtmiştir. Şekil 2.5'te A ve B zeminleri aynı plastisite indisi değerine sahip olmasına rağmen çok farklı özellikleri vardır. Benzer şekilde B ve C'nin likit limitleri aynı olmasına rağmen geoteknik özellikleri tamamen farklıdır. Buna rağmen likit limiti ve plastisite indisi aynı olmamasına rağmen birbirine en yakın özellikleri

olan iki zemin A ve C'dir. Dolayısıyla zeminin davranışını belirleyen faktör, tek başına likit limit veya plastisite indisi değil zeminin Casagrande plastisite kartındaki yeridir.



Şekil 2.5 : Plastisite Kartı (Wesley, 2003)

Daha önce değişik araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar incelendiğinde şev stabilite problemleri ile bağlantılı yapılan çalışmalarda sık rastlanan mineral çeşitlerinin incelendiği görülmüştür. Bu çalışmalarda zeminlerde en çok rastlanan kil minerali çeşitlerinin smectit, kaolinit, halloysit, mica ve klorit olduğu belirlenmiştir. Kuartz, kalsit ve feldispat ise sıkça rastlanan iri daneli minerallerdir.

Ayrıca çalışmalarda bu saf minerallerin ve onların karışımlarının kalıcı kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda bu minerallerin kalıcı kayma mukavemeti açılarını belirlenmiş ve minerolojik bileşimleri üç temel gruba ayrılmıştır:

- İri daneli mineraller (feldispat, kalsit ve kuartz); ($\phi_r' \geq 25^\circ$)
- Düşük aktiviteli kil mineralleri (kaolinit, mika, halloysit ve klorit) ; ($\phi_r' = 12^\circ \sim 17^\circ$)
- Yüksek aktiviteli kil mineralleri (smectit); ($\phi_r' \leq 5^\circ$)

Aktivite üzerindeki etkisinden dolayı özgül yüzey alanının ϕ_r' değeri üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Özgül yüzey alanı arttıkça kalıcı kayma gerilmesinin azaldığı

bilinmektedir. Bu yüzden bu üç grubu oluşturan saf mineraller de ϕ_r' değerlerine göre ayrıca gruplandırılabilir (Tiwari ve diğ., 2005).

Kil zeminlerin minerolojisi incelenirken dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da kil yüzdesi ile kil içeriği kavramlarıdır. Her ne kadar killer, dane çapı 0.002 mm'den küçük daneler olarak tanımlansa da bütün kil mineralleri 0.002 mm'den küçük değildir. Aynı durumun tam tersi kil olmayan mineraller için de geçerlidir. Kil yüzdesi, 0.002 mm'den küçük çaplı danelerin ağırlıkça yüzdesidir. Kil içeriği ise dane çapında sınırlama olmadan zeminde bulunan kil minerallerinin yüzdesini vermektedir. Bu tanımlamalara rağmen kil minerallerinin zemindeki miktarı kil minerallerinin büyük bir çoğunluğu 0.002 mm'den küçük olduğu için kil yüzdesi ile belirlenir (Mitchell, 1993).

ϕ_r' ile aktivitenin arasındaki ilişki bilindiğinden, ϕ_r' 'yi elde etmenin bir diğer yöntemi aktiviteyle doğrudan bağlantılı olan özgül yüzey alanını belirlemektir. Özgül yüzey alanı arttıkça kalıcı kayma mukavemeti azalmaktadır. Özgül yüzey; yüzey alanının, hacim veya ağırlığa oranı olarak tanımlanır. Dolayısıyla boyut arttıkça özgül yüzey azalacaktır. Zemin danelerinin yüzeyleri belirli bir geometriye sahip olmadıklarından pratikte özgül yüzey hesabı yapılamamaktadır. Ancak aynı hacmi dolduran ince daneli zeminlerin özgül yüzeyi, iri danelilerden çok daha fazla olacaktır. Özgül yüzeyden hareketle, ince daneli zeminlerin doğal su içeriğinin, diğer tüm özellikler aynı olmak şartıyla iri danelilerden çok daha fazla olacağı açıktır (Tiwari ve Marui, 2005).

Stark ve Hisham (1994) kil ve kil şeyller üzerinde yaptığı deneysel çalışmalarda kil minerolojisinin kalıcı göçme zarfına etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda likit limit arttıkça kalıcı kayma mukavemeti düştüğü belirlenmiştir. Dolayısıyla likit limit, kil minerolojisi ve dolaylı olarak da dane şekli ve çapı hakkında bir fikir vermektedir. Genelde kil danelerinin yassılığı arttıkça plastisite de artmaktadır. Danelerin yassılığının artması genellikle daneler arası etkileşime neden olmakta ve böylece kalıcı kayma mukavemeti düşmektedir.

Bir zeminin aktivitesi doğrudan numunenin minerolojik bileşiminden etkilenmektedir. Kil yüzdeleri aynı olmasına rağmen farklı ϕ_r' ve likit limit değerlerinin oluşması farklı kil minerallerinin özgül yüzey alanlarının farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden kil minerolojisi yani kil minerallerinin ayrı ayrı

yüzdelerin incelenmesi, belirli bir zeminin özelliklerinin belirlenmesi durumunda kil yüzdesinden daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Tiwari ve Marui, 2005).

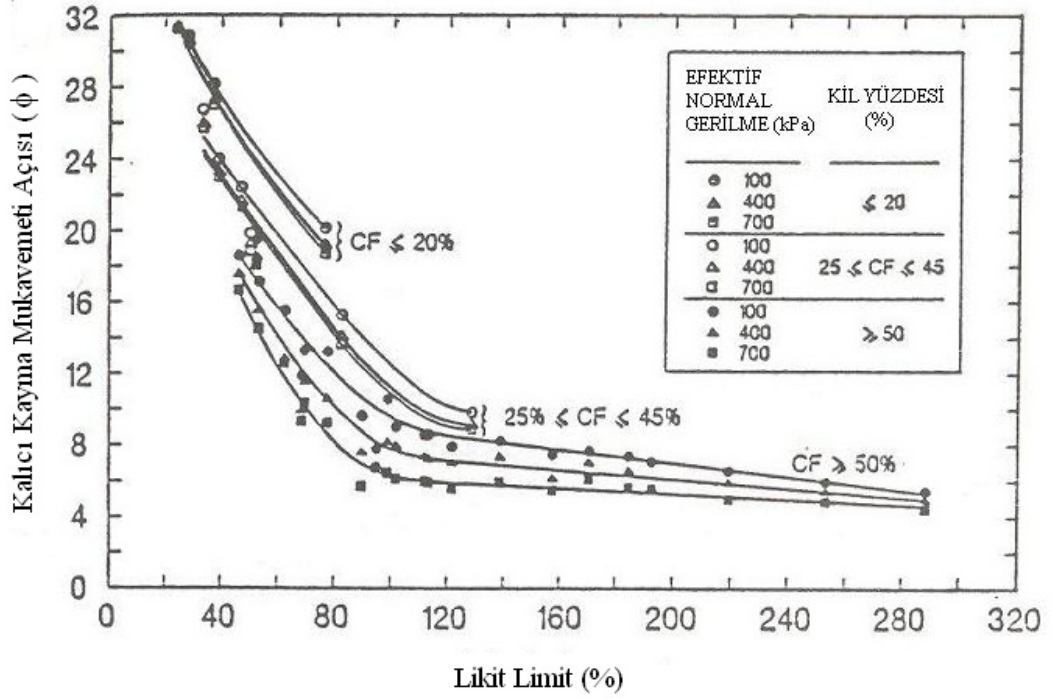
2.6 Endeks Özelliklerinin Kalıcı Mukavemete Etkisi

Skempton'un (1964) Rankine konferansından sonra, kalıcı kayma mukavemetini ölçme yöntemleri ve kalıcı kayma mukavemeti açısı ile zeminlerin çeşitli endeks özellikleri arasında bağıntıları içeren birçok çalışma yapılmıştır. Bu bağıntılar numunenin alınmadığı veya yeterli imkanların olmadığı durumlarda kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde faydalı olmaktadır (Tiwari ve Marui, 2005).

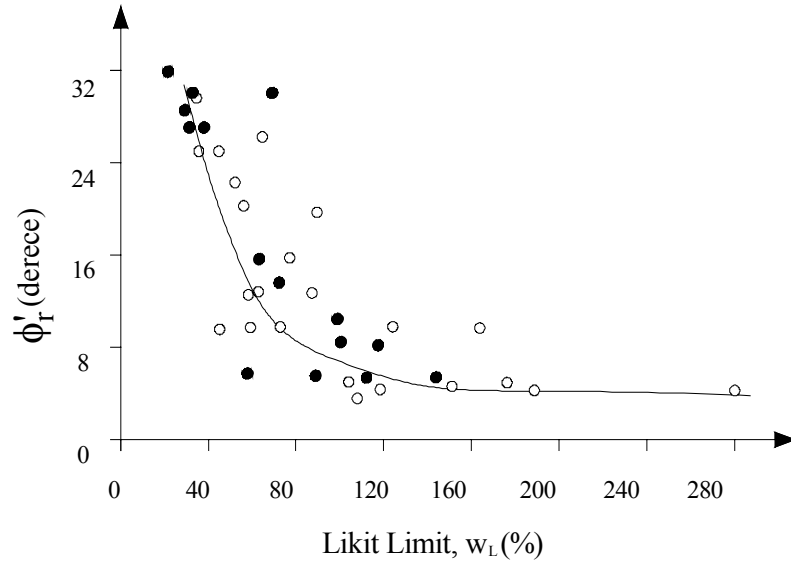
2.6.1 Likit Limit ile Kalıcı Kayma Mukavemet Açısı Arasındaki İlişki

Stark ve Hisham (1994), 0.018 mm/dak'lık kesme hızında halka kesme deneyleri yaparak, kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit, kil yüzdesi ve efektif normal gerilme arasında yeni bir ilişki geliştirmiştir (Şekil 2.6). Belirli bir efektif normal gerilme değeri için kohezyonlu zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti açıları, likit limit-kil yüzdesi ve şekildeki eğrilerin interpolasyonu ile belirlenebilir. Ayrıca bu şekilden, 100-400 ve 700 kPa değerlerindeki efektif normal gerilmelerdeki ϕ_r' değerleri belirlenerek, bu değerlere karşılık gelen kayma gerilmeleri belirlenebilir. Böylece kayma gerilmesi-normal gerilme grafiği çizilerek doğrusal olmayan kalıcı göçme zarfı tahmin edilebilir. Şekilden görüldüğü gibi kil yüzdesinin %45'ten ve likit limitin % 120'den düşük olduğu durumlar için 100'den 700 kPa'a kadar olan normal gerilmeler altında, her gerilme kademesinde kalıcı kayma mukavemeti açısındaki düşüş 1-2°'den azdır.

Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki ilişkiyi irdelemek amacıyla aşırı konsolide killer üzerinde düşük kesme hızında (0.0005mm/dak) tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Elde edilen datalar kullanılarak Şekil 2.7'deki ilişki elde edilmiştir. Mesri ve Cepeda-Diaz (1986) artan likit limit değerleriyle beraber kalıcı kayma mukavemeti açısının azaldığını fakat likit limitin % 160 değerini geçtikten sonra likit limitteki artışın kayma mukavemeti açısını kayda değer bir şekilde değiştirmediğini belirlemişlerdir.

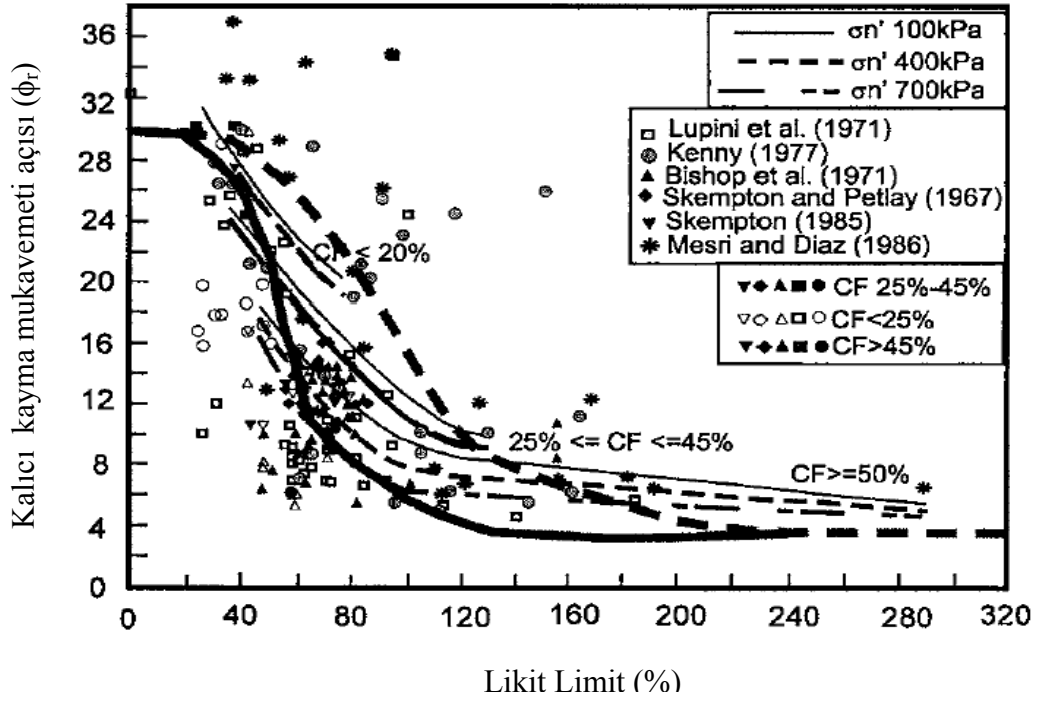


Şekil 2.6 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi (Stark ve Hisham,1994)



Şekil 2.7 : Kalıcı mukavemet açısı-likit limit ilişkisi (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986)

Literatür çalışmaları incelendiğinde düşük likit limit değerlerinde, aynı likit limite sahip doğal numunelerin kalıcı kayma mukavemeti açılarının Şekil 2.8'de görüldüğü gibi geniş bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Likit limitin %70 civarında olduğu değerlerde bile kalıcı kayma mukavemeti açısının 3-4° değişim göstermektedir. Genelde çalışmalarda kullanılan numunelerin %80'inin, likit limit değerinin %80'den az olduğu belirlenmiştir. (Tiwari ve Marui, 2005).

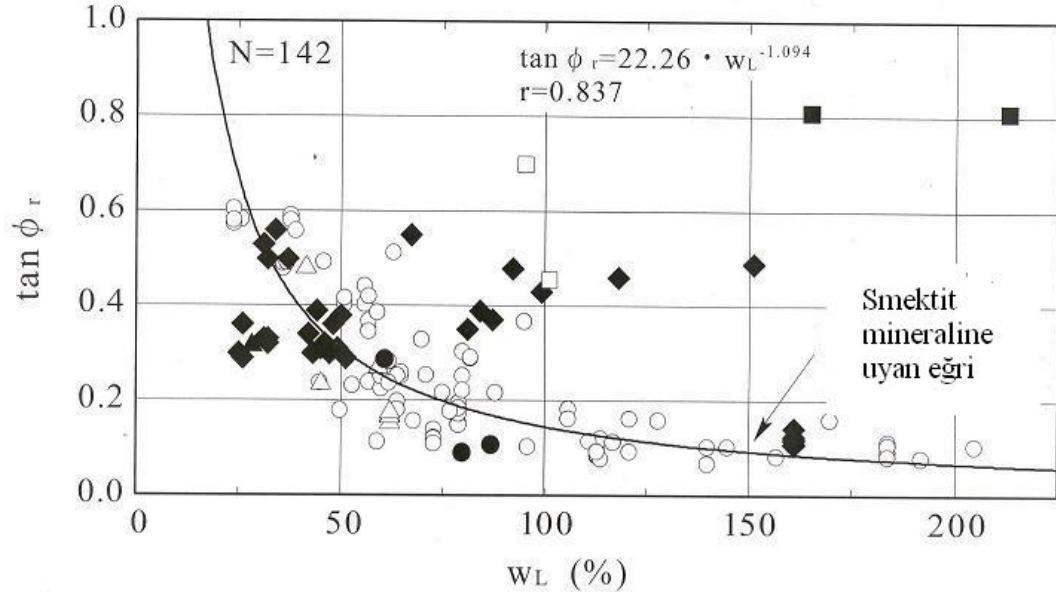


Şekil 2.8 : Literatürde yapılan çeşitli deneysel çalışmalar kullanılarak likit limit ile kalıcı mukavemet açısı arasındaki ilişkinin incelenmesi (Tiwari ve Marui, 2005).

Suzuki ve diğ. (2005), baskın dane yapısı kil olan numuneler üzerinde yaptığı çalışmalarda likit limitin kalıcı kayma mukavemeti açısı ile olan ilişkisini incelemiştir. Deneylerde kullanılan numuneler smektit , illit, klorit, kaolin, alofan, halosit, mika ve kuartz gibi geniş bir mineral ölçeğinde dağılım göstermektedir. Seçilen 142 numune üzerinde yapılan halka kesme deneyleri sonucunda likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında bir ilişki olduğu saptanmıştır (Şekil 2.9). Şekilden de görüldüğü gibi likit limit değeri arttıkça $\tan \phi_r$ değeri azalmaktadır. Ayrıca yapılan çoklu regresyon analizleri sonucunda likit limit ile $\tan \phi_r$ arasında

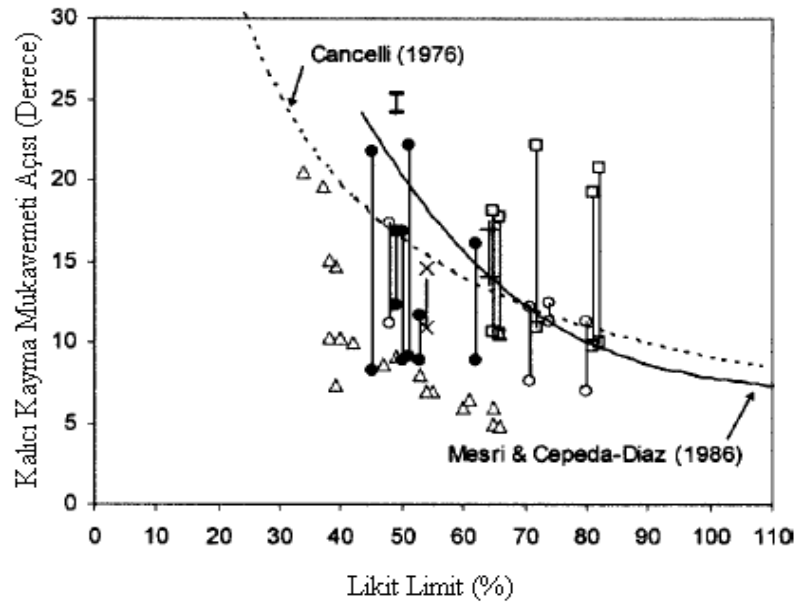
$$\tan \phi_r = 22.26 * W_L^{-1.094} \quad (2.3)$$

bağıntısı elde edilmiştir.



Şekil 2.9 : Likit limitin $\tan \phi_r$ değeriyle değişimi (Suzuki ve diğ.,2005)

Dewoolkar ve Huzjak (2005), yedi farklı sahadan alınan numuneler kullanılarak kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit ve plastisite indisi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar kapsamında 30 ile 960 kPa efektif normal gerilmeler altında halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmış ve en düşüğü 5.5°, en yükseği ise 30° olan kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmiştir. Elde edilen veriler, geçmiş çalışmalardan elde edilen bağıntı ve grafikler ile karşılaştırılmış ve plastisite indisine dayanan bağıntıların, likit limite dayanan bağıntılardan çok daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Dewoolkar ve Huzjak, 2005).

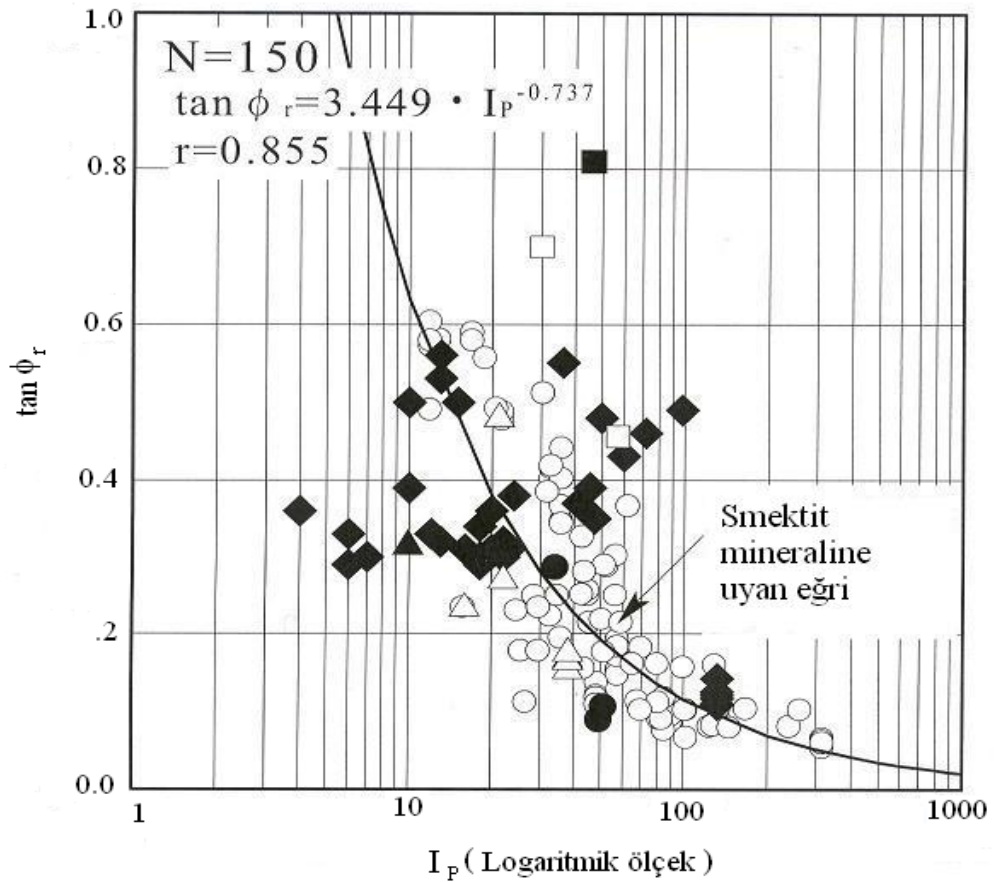
Grafik incelendiğinde Mesri ve Cepeda-Diaz ve Cancelli'nin bağıntıları sonucunda elde edilen verilerin bu çalışma kapsamında elde edilen verilerden yüksek olduğu görülmektedir.

2.6.2 Plastisite İndisi ile Kalıcı Kayma Mukavemet Açısı Arasındaki İlişki

Plastisite indisi ile kalıcı mukavemet arasında pratik bir bağıntı oluşturmak amacıyla 150 numune üzerinde deneyler yapılmıştır (Şekil 2.11). Seçilen numuneler genelde halosit, alofan ve mika mineralleri içermekle beraber düzgün bir ilişki elde edebilmek için numuneler çeşitlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar çoklu regresyon analizleri ile incelenmiş ve baskın mineral yapısı smektit olan numuneler için

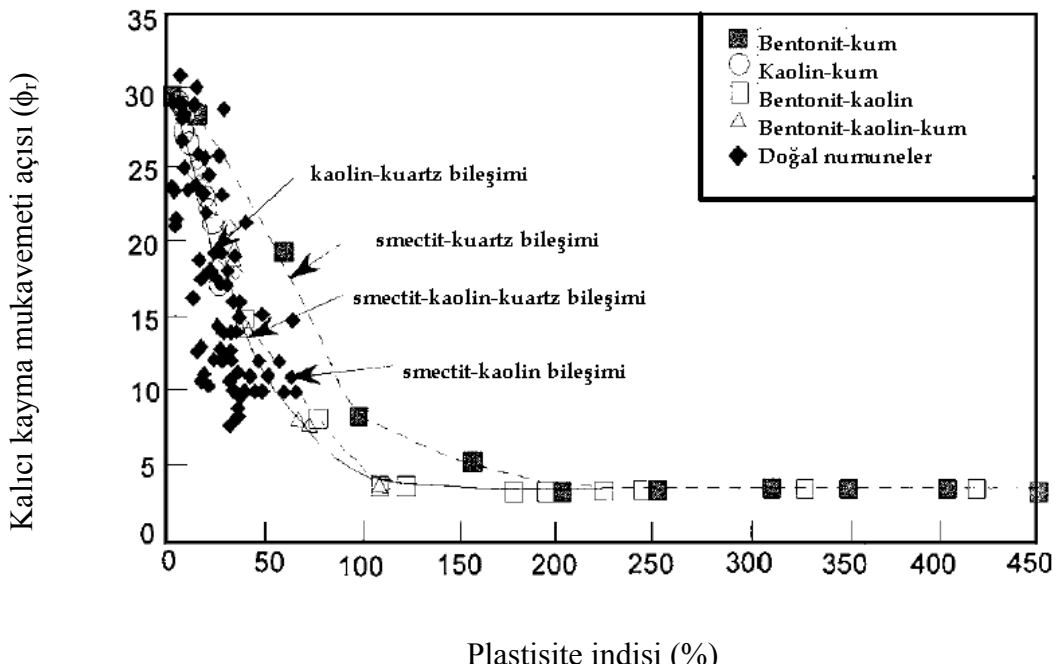
$$\tan \phi_r = 3.449 \cdot I_p^{-0.74} \quad (2.4)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Bu formülde regresyon katsayısı 0.855'dir. Bu yüzden formülün deneysel çalışmaları iyi bir şekilde yansıttığı söylenebilir (Suzuki ve diğ.,2005).



Şekil 2.11 : Plastisite indisi ile $\tan \phi_r$ arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ.,2005).

Tiwari ve Marui (2005), zeminlerin minerolojik birleşimlerinin kayma mukavemetine etkisini incelemek üzere kuartz, smektit ve kaolinit minerallerinin farklı oranda hazırlanan birleşimlerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda farklı minerolojik yapıya sahip numunelerin kalıcı kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Aynı kil yüzdesinde (%40) hazırlanan smektit-kuartz ve kaolinit-kuartz karışımlarının kalıcı kayma mukavemeti açıları arasındaki farkın 20°'den fazla olduğu belirlenmiş ve kalıcı kayma mukavemetine kil yüzdesinden çok kildeki baskın mineral cinsinin ve oranının etki ettiği anlaşılmıştır. Ayrıca bu numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda ϕ_r değerinin plastisite indisiyle, likit limitle arasındaki ilişkiye benzer bir ilişki olduğu Şekil 2.12'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde doğal numunelerin smektit-kaolinit, kaolinit-kuartz ve smektit-kaolinit-kuartz karışım eğrilerinin altında kaldığı açıkça görülmektedir. Karışım eğrilerinin eğimleri minerolojik bileşime ve zemin danelerinin uniformluğuna bağlıdır.

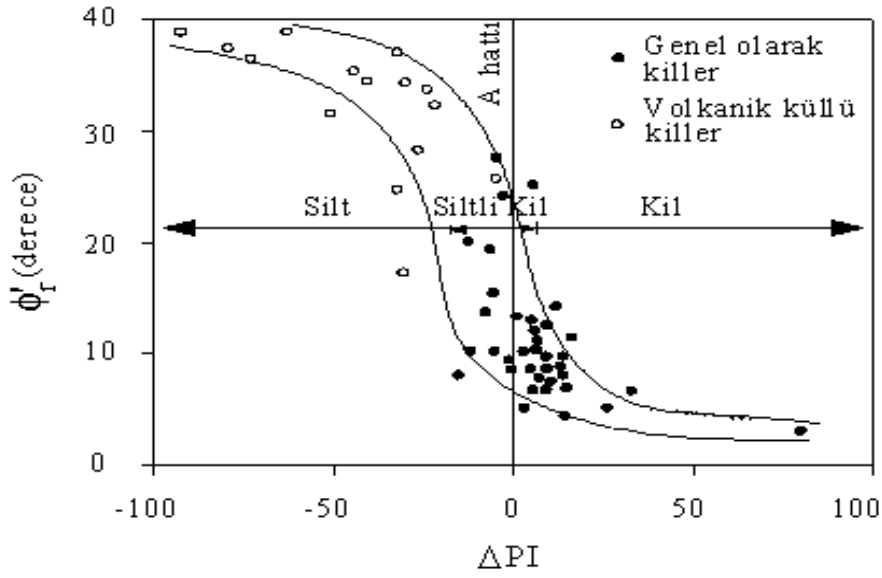


Şekil 2.12 Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Tiwari ve Marui, 2005).

Wesley (2003), Atterberg limitleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında daha etkin bir korelasyon elde etmek için çalışmalar yapmıştır (Şekil 2.13). Çalışmalar sonucunda plastisite kartındaki noktaların A hattına uzaklığı (ΔPI) kavramı tanımlanmış ve ΔPI değerinin kalıcı kayma mukavemeti açısıyla arasındaki ilişki irdelenmiştir. Burada ΔPI 'nın değeri aşağıdaki gibidir:

$$\Delta PI = PI - 0.73 (LL-20)$$

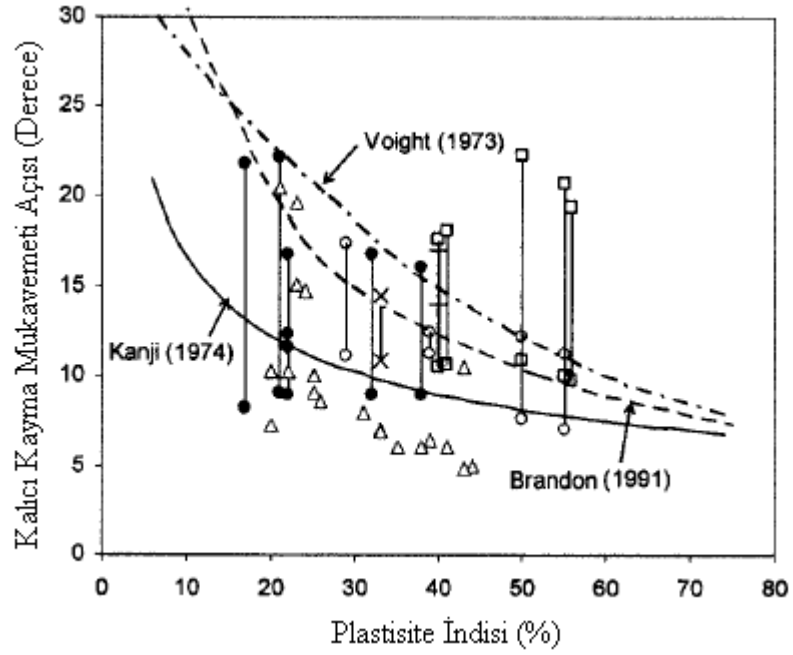
(2.5)



Şekil 2.13 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının ΔPI ile değişimi (Wesley, 2003)

Grafikte likit limiti 50'den büyük olan numuneler kullanılmıştır. Her ne kadar noktalar hatırı sayılır bir dağılım gösterse de bütün numuneleri içine alan bir eğilimi olduğu ortadadır. A hattının çok üzerinde olan (yüksek ΔPI değerleri) zeminlerde düşük ϕ_r' değerleri beklenebilir. Halbuki A hattının çok altında kalanlarda (yüksek negatif ΔPI değerleri) ise yüksek ϕ_r' değerleri beklenmektedir. A çizgisine göre bulunulan yer, tek başına plastisite indisi veya likit limitten çok daha kullanışlı bir ϕ_r' göstergesidir. Aynı likit limit veya plastisite indisi değerinde, ϕ_r' değerinin zeminin A hattındaki yerine göre biraz farklı olacağı aşıkardır (Wesley, 2003).

Dewoolkar ve Huzjak (2005), plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Farklı özelliklere sahip zeminler üzerinde yaptıkları halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonuçlarını geçmiş çalışmalarda grafikler ve bağıntılarla karşılaştırmışlardır (Şekil 2.14). Yapılan bu çalışma sonucunda plastisite indisini içeren bağıntıların likit limite dayanan bağıntılardan daha gerçekçi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



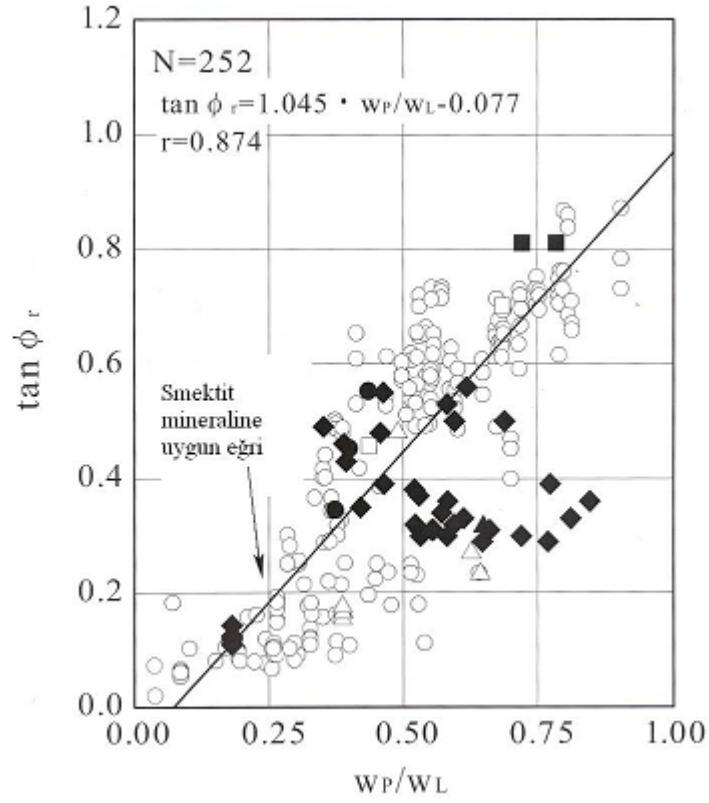
Şekil 2.14 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi (Dewoolkar ve Huzjak, 2005)

Grafik incelendiğinde deney verilerinin çoğunluğunun bu eğriler arasında kaldığı ve bu çalışma kapsamında elde edilen kayma mukavemeti açısı değerlerinin plastisite indisi ile değişiminin literatür ile uygunluk gösterdiği açıkça görülmektedir.

Suzuki ve diğ. (2005), $\tan \phi_r$ ile W_p / W_L arasındaki ilişkiyi incelemiş ve Şekil 2.15'deki grafiği elde etmişlerdir. Numune olarak çeşitli minerallerin baskın olduğu zeminler seçilmiş fakat dataların büyük bir çoğunluğu şekildeki smektit minerali için çizilen doğrunun etrafında çıkmıştır. Grafik incelendiğinde W_p / W_L arttıkça zeminlerin $\tan \phi_r$ değerinin arttığı açıkça görülmektedir. Veriler üzerinde yapılan regresyon analizi sonucunda,

$$\tan \phi_r = 1.045 * (W_p / W_L) - 0.077 \quad (2.6)$$

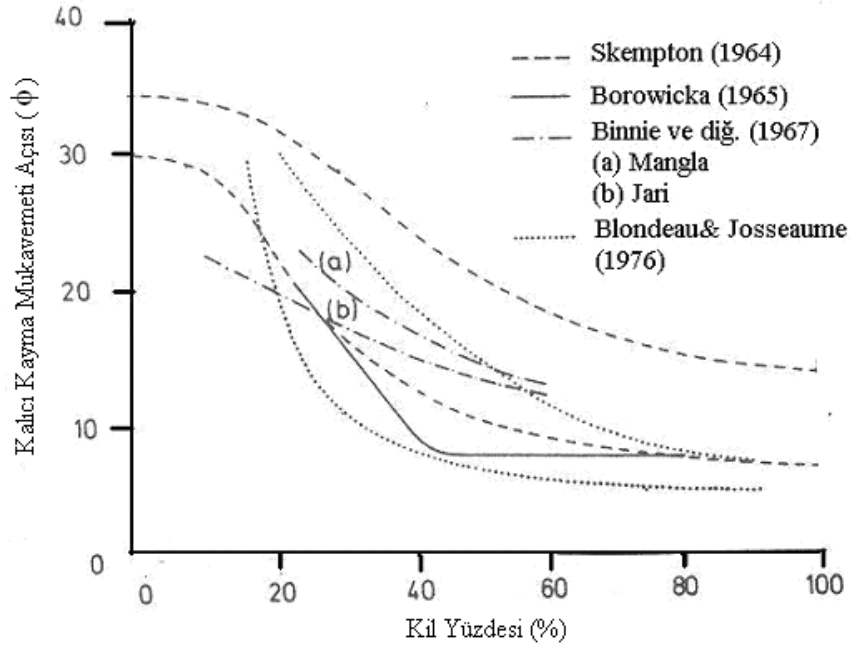
bağıntısı elde edilmiştir. Bu bağıntının regresyon katsayısı 0.874 olarak belirlenmiştir, dolayısıyla yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerle uyum gösterdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 2.15 : $\tan \phi_r$ ile W_p / W_L arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2005)

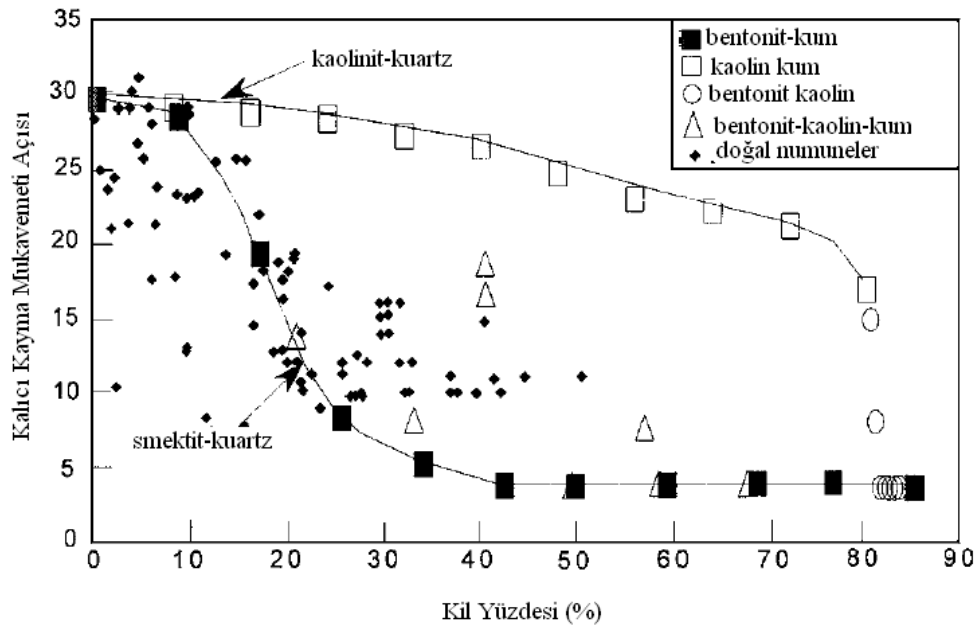
2.6.3 Kil Yüzdesi ile Kalıcı Kayma Mukavemet Açısı Arasındaki İlişki

Kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısıyla değişimini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. İlk olarak Skempton (1964) kalıcı kayma mukavemetinin şev stabilitesindeki etkisini incelemiş ve çalışmalarında kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimini irdelemiştir. Daha sonra bu çalışmayı devam ettiren diğer deneysel çalışmalarda farklı kil numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kil yüzdesi ile kalıcı mukavemet arasında benzer bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde artan kil yüzdesiyle beraber kalıcı kayma mukavemeti açısının düştüğü Şekil 2.16'daki grafikten de açıkça görülmektedir.



Şekil 2.16 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi (Lupini ve diğ.,1981)

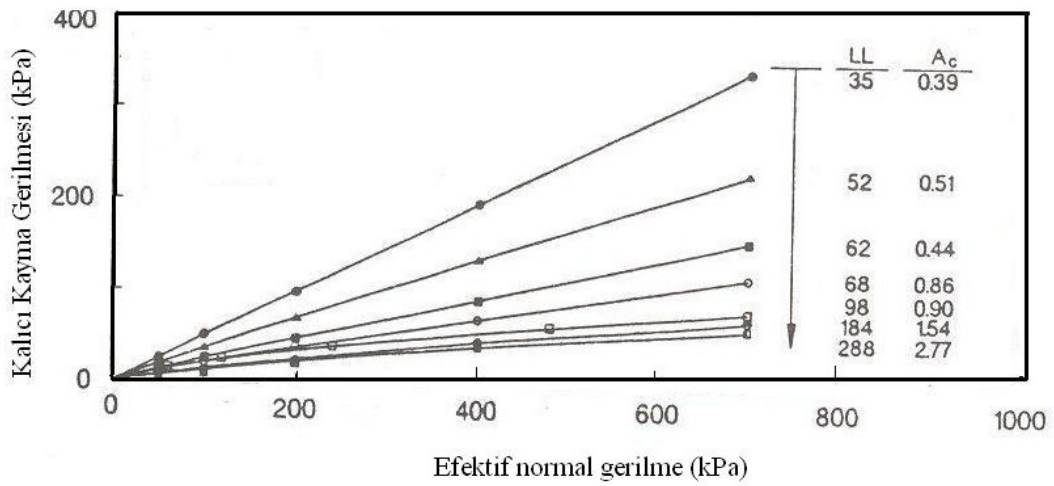
Kaolinit, kuartz ve smektit minerallerinin karışımları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısı ile ilişkisi incelenmiştir. Şekil 2.17'deki grafik incelendiğinde % 40 kil yüzdesi değerinde smektit-kuartz karışımı ile kaolinit-kuartz karışımının kalıcı kayma mukavemeti açıları arasındaki fark 20°'yi geçmektedir. Bu sonuç bize zemin içindeki baskın mineral cinsi ve oranı belirlenmeden zeminin kayma mukavemeti davranışını açıklayamayacağımızı açıkça göstermektedir (Tiwari ve Marui, 2005).



Şekil 2.17 : Kil yüzdesi-kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Tiwari ve Marui, 2005).

2.6.4 Aktivite ile Kalıcı Kayma Mukavemet Açısı Arasındaki İlişki

Stark ve Hisham(1994), yedi kil ve kil şeyl üzerinde yaptığı çalışmada likit limit ve aktivitenin kalıcı kayma mukavemeti ile ilişkisini incelemiştir. Şekil 2.18’de likit limit ve aktivite arttıkça kalıcı kayma mukavemetinin düştüğü açıkça görülmektedir. Hem likit limit hem de aktivite, kil minerolojisi ve dolaylı olarak da dane şekli ve çapı hakkında bir fikir vermektedir. Genelde kil danelerinin yassılığı arttıkça plastisite de artmaktadır. Danelerin yassılığının artması genellikle daneler arası etkileşime neden olmakta ve böylece kalıcı kayma mukavemetini düşürmektedir.



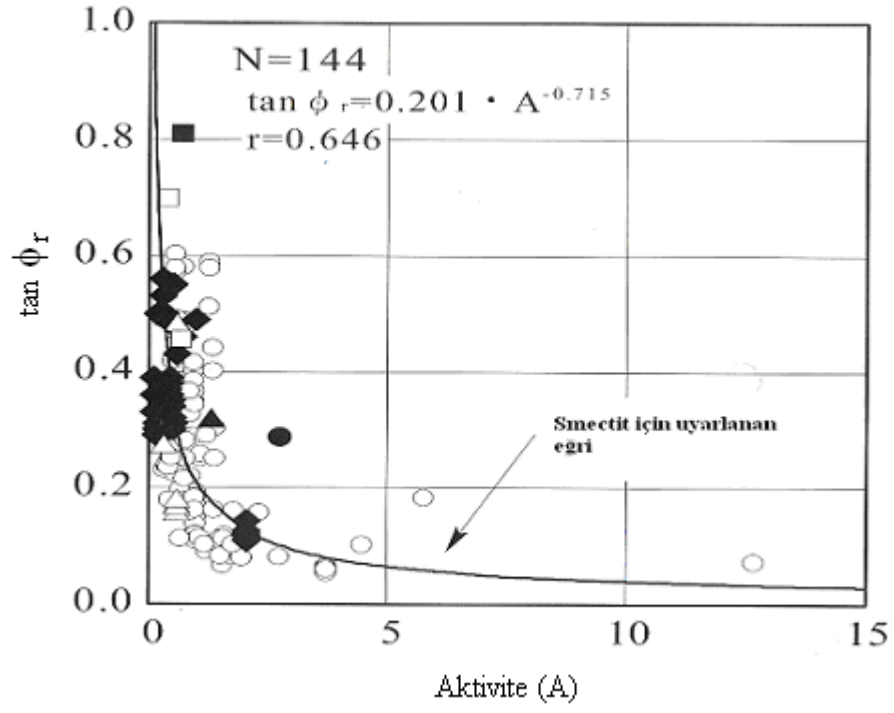
Şekil 2.18 : Aktivitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisinin incelenmesi (Stark,1994)

Suzuki ve diğ. (2005), çeşitli zeminler üzerinde endeks özelliklerinin kalıcı kayma mukavemetine etkisini incelemiştir (Şekil 2.19). Kalıcı kayma mukavemeti parametreleri tekrarlı kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri ile elde edilmiştir. Elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler regresyon analizleri sonucunda elde edilmiştir. Özellikle alofan ve halosit göz önünde bulundurulduğunda aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında yüksek bir korelasyon bulunmaktadır. Ayrıca smektit içeren zeminler için aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiyi belirlemek için deney dataları üzerinde regresyon analizleri yapılarak

$$\tan \phi_r = 0.201 * A^{-0.715} \quad (2.7)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Bu bağıntı sayesinde kalıcı kayma mukavemeti ile aktivite arasındaki ilişki belirlenerek pratik bir bağıntı elde edilmiştir. Formülün regresyon

katsayısı 0.646 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla formülün yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerle uygunluk gösterdiği söylenebilir.



Şekil 2.19 : Aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2005).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

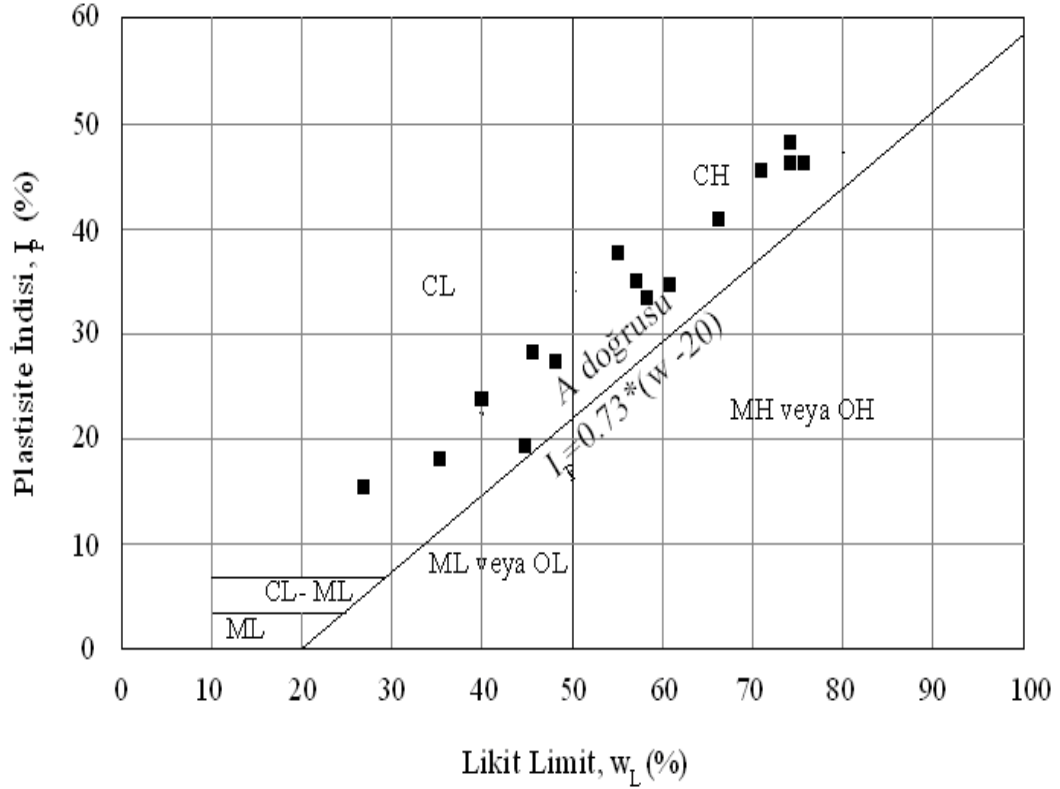
Bu bölümde endeks özellikleri belirlenen birçok numunenin arasından seçilen farklı endeks özelliklerine sahip 15 numune üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneylerinin yapım şekli kısaca anlatılmaktadır. Halka kesme deneyinin yapım metodu EK-B’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Ayrıca tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri için seçilen numune hazırlama metodu da ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Aynı yöntemle hazırlanan tekrarlı kesme kutusu deneyleri 0.035 mm/dak, halka kesme deneyleri ise 25 mm/dak kesme hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri her numune için 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa olmak üzere üç farklı normal gerilme altında tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda üç farklı yük altında halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri içeren 15 set deney yapılmıştır.

3.1 Deney Numunelerinin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi

Farklı endeks özelliklerine sahip 15 adet numune seçmek amacıyla öncelikle likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Daha sonra seçilen numunelere ıslak elek analizi ve hidrometre analizi yapılarak dane çapı dağılımları ve kil yüzdeleri belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra seçilen farklı endeks özelliklerine sahip numunelerle standart kompaksiyon deneyi yapılmış ve optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenerek bu çalışmaya esas olacak farklı endeks özelliklerine sahip 15 adet deney numunesi elde edilmiştir.

Deneysel çalışma için seçilen bu 15 numunenin dane çapı dağılımlarını belirlemek için ıslak elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin % 0-15 oranında çakıl, % 0-40 oranında kum, % 47-82 oranında silt ve % 2-41 oranında kil içerdikleri belirlenmiştir. Daha sonra bu numuneler üzerinde kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Deney numunelerinin likit limitleri % 27-75 oranında, plastik limitleri % 12-29 oranında, plastisite indisi ise % 15-48 oranı arasında değişmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre numuneler

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre sınıflandırılmış ve numunelerin CL ve CH zemin sınıflarında olduğu belirlenmiştir. Seçilen deney numunelerinin plastisite kartındaki yerleşimi şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Deney numunelerinin plastisite kartındaki yerleşimi

Numunelerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemek üzere kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Numunelerin optimum su muhtevaları % 13-30 arasında, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise 13.7 kN/m^3 ile 19.1 kN/m^3 arasında değişmektedir.

Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri sonucunda kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenecek 15 numunenin geoteknik özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir. Endeks özelliklerini belirlemek için yapılan deneylere ait grafik ve föyler EK-A’da verilmiştir.

Tablo 3.1 : Deney numunelerinin geoteknik özellikleri

Numune No.	Çakıl Yüzdesi (%)	Kum Yüzdesi (%)	Silt Yüzdesi (%)	Kil Yüzdesi (%)	Likit Limit W_L (%)	Plastik Limit W_P (%)	Plastisite İndisi I_p (%)	Zemin Sınıfı	Optimum Su Muhtevası W_{opt} (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_{kmaks} (kN/m ³)
N-1	8	40	50	2	27	12	15	CL	13	19.1
N-2	0	1	80	19	61	26	35	CH	21	15.6
N-3	0	7	60	33	74	26	48	CH	25	14.9
N-4	1	12	72	15	48	21	27	CL	20	16.5
N-5	0	7	77	16	74	28	46	CH	30	13.7
N-6	5	29	61	5	35	17	18	CL	17	17.5
N-7	0	11	72	17	40	17	23	CL	20	16.3
N-8	0	0	59	41	75	29	46	CH	29	14.2
N-9	0	18	70	12	46	18	28	CL	24	15.5
N-10	2	10	82	6	71	25	46	CH	26	15.5
N-11	0	26	67	7	46	27	19	CL	24	14.4
N-12	15	20	47	18	55	18	37	CH	23	15.7
N-13	0	3	75	22	57	22	35	CH	23	15.8
N-14	0	0	76	24	67	26	41	CH	28	14.1
N-15	0	9	74	17	59	27	32	CH	26	15.1

3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanışı

Modifiye proktor kalıbının iç çapının elde etmek istediğimiz halka kesme deney numunesinin dış çapına çok yakın olması dolayısıyla halka kesme deney numuneleri modifiye proktor kalıbında standart proktor enerjisi (594 kN-m/m³) kullanılarak hazırlanmıştır. Halka kesme deneylerinde çok büyük deformasyonlar söz konusu olduğu için kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde numune hazırlamanın bir önemi kalmamakla beraber sabit ve belirli bir numune hazırlama yöntemi olması için numuneler standart proktor sıklığında hazırlanmıştır. Modifiye proktor kalıbında standar proktor enerjisini sağlamak amacıyla şu eşitlik kullanılmaktadır:

$$E_{\text{standart}} = (N.L.M.H) / V \quad (3.1)$$

Bu formül; tabakaya yapılan vuruş sayısı (N), tabaka sayısı (L), tokmak ağırlığı (M), tokmak düşüş yüksekliği (H) ve proktor kalıbının hacmi (V) bileşenlerinden oluşmaktadır.

Halka kesme deneyi için hazırlanacak numune etüvde kurutulup ve 4 no'lu elekten elendikten sonra optimum su muhtevasında hazırlanmaktadır. Optimum su muhtevasındaki numune her tabakaya standart proktor tokmağı ile 56 vuruş yapılarak 3 tabaka halinde sıkıştırılır. Daha sonra kalıptan çıkarılan numune, numune hazırlama dış ringine oturtulur ve kalıbın dışında kalan kısım kesilerek 150 mm çapında ve 40 mm yüksekliğinde numune elde edilmiş olur.



Şekil 3.2 : Numune hazırlama dış ringine oturtulmuş deney numunesi

Sıkıştırma sırasında oluşan tabakalar arasındaki yüzeyin deney numunesinde yer almaması için numune hazırlama dış ringindeki 40 mm'lik numunenin alt ve üst

kısımındaki 10'ar mm'lik kısımlar dairesel metal parça vasıtasıyla traşlanır. Bu işlemden sonra halkasal metal parça ve numune hazırlamak için kullanılan iç ring vasıtasıyla numunenin ortası oyulur ve böylece dış çapı 150 mm, iç çapı 100 mm olan 20 mm yüksekliğindeki deney numunesi elde edilmiş olur.

3.3 Kesme Kutusu Deney Aleti ve Deneyin Yapılışı

Tekrarlı kesme kutusu deneyi kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde en yaygın deney yöntemidir. Kesme kutusu deneyinde, zemin numunesi kare kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu (60 mm×60 mm) içine yerleştirilmektedir. Sabit düşey bir yük altında konsolidasyona bırakılan numune, kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçasının yatay bir düzlem boyunca sabit bir hızla hareket ettirilmesi vasıtasıyla kayma hareketi oluşturulmaktadır. Değişik düşey yüklerde bu işlem tekrarlanır ve deney numunesinin göçme zarfı böylece elde edilmiş olunur.

Tekrarlı kesme kutusu deneyi yenilmeye karşılık gelen birim deformasyon değeri (%20) olan 12 mm yerdeğiştirme değerine kadar 0.035 mm/dak. sabit kesme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kesme kutusu eski yerine kadar tekrar geri çekilerek bir gün bekletildikten sonra tekrar kesilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için 3. çevrim sonucu elde edilen değerler kalıcı kayma gerilmesi olarak kabul edilmiştir.

3.4 Halka Kesme Deney Aleti

Halka kesme deneyi gerek rotasyonel kaymayı modellemesi gerek ise sınırsız kayma yerdeğiştirmesi sağlaması dolayısıyla kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde üstünlük sağlayan bir deney yöntemidir. Verilen sabit bir normal gerilme altında deney aletinin üst kısmı sabit tutularak alt kısmının döndürülmesi vasıtasıyla numune üzerinde kayma hareketi oluşturulmaktadır. Deney aleti olarak İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan Seiken inco./DTC-138 model (Şekil 3.1) halka kesme deney aleti kullanılmıştır. Halka kesme deney aletinin en düşük hızı 20 mm/dak., en yüksek hızı 2000 mm/dak.'dır. Ayrıca amplifikatör vasıtasıyla kesme kuvveti, düşey sürtünme kuvveti, düşey deplasman ve düşey gerilme değerleri sürkli ölçülebilmektedir.



Şekil 3.3 : Halka kesme deney aleti

Bu çalışmada, belirlenen numune hazırlama tekniğiyle hazırlanan halka şeklindeki deney numuneleri EK-B’de yer alan prosedüre uygun şekilde monte edilen halka kesme deney aletine yerleştirilerek deney gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerine 25 mm/dak kesme hızıyla 3 tura denk gelen yaklaşık 1200 mm kayma yerdeğiştirmesi yaptırılmıştır. Deneyler 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa normal gerilme değerleri altında tekrarlanmış ve göçme zarfları elde edilmiştir. Her bir gerilme kademesi için numuneler deney öncesi 2 gün konsolidasyona bırakılmıştır. Halka kesme deneyi sonrası elde edilen kesilmiş deney numunelerine ait örnekler Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Deney sonrası kesilmiş numunelerin görünümü

4. DENEYSEL SONUÇLAR

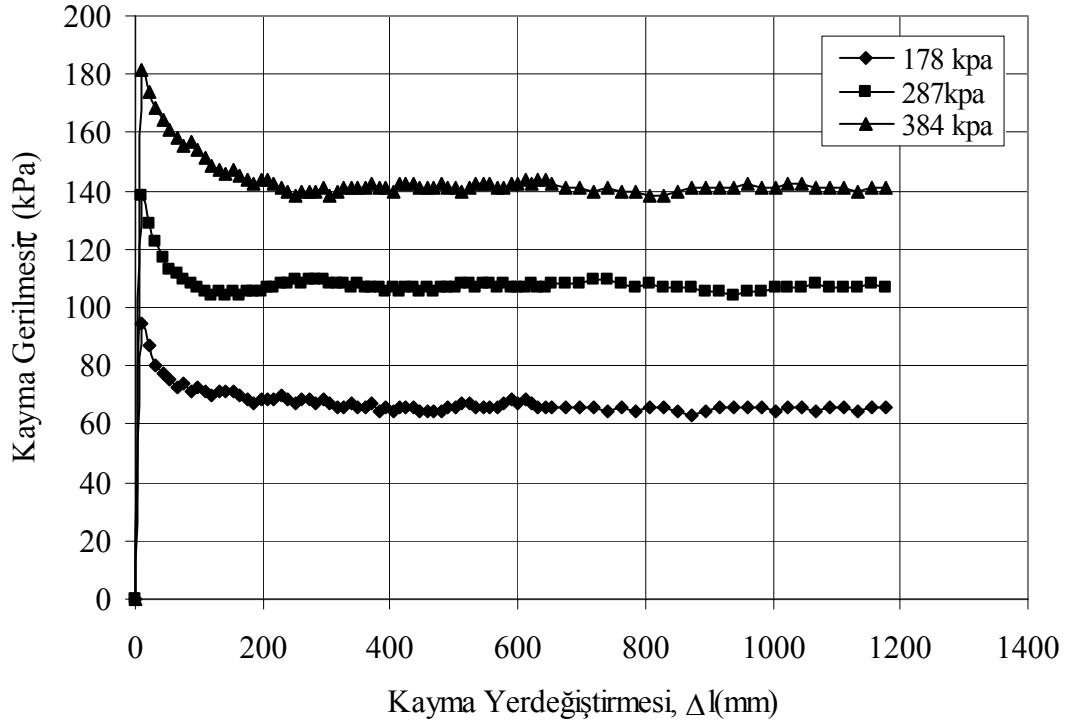
Bu kısımda, çalışma kapsamında yapılan 15 set halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına ve elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametrelerine yer verilmiştir. Deneysel çalışma bölümünde anlatılan çalışmalar sonucunda seçilen farklı endeks özelliklerine sahip 15 kohezyonlu numune üzerinde 3 farklı düşey gerilme etkisinde 25mm/dak kesme hızında halka kesme deneyleri ve aynı düşey yük değerleri kullanılarak 0.035 mm/dak kesme hızında tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Numuneler, üzerlerine etkiyen düşey gerilmeler altında halka kesme deneyleri için 2 gün, tekrarlı kesme kutusu deneyleri için 1 gün konsolidasyona bırakılmıştır. Gerek halka kesme gerekse tekrarlı kesme kutusu deneylerinde sabit kayma gerilmesi elde edilene kadar deneylere devam edilmiştir.

Farklı yükler altında deneyler tekrarlanmış kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenerek göçme zarfları oluşturulmuştur. Bu bölümde deneysel sonuçlara ait örnekler verilmiş ve tüm deney sonuçları tablolar halinde gösterilmiştir.

4.1 Halka kesme deneyleri

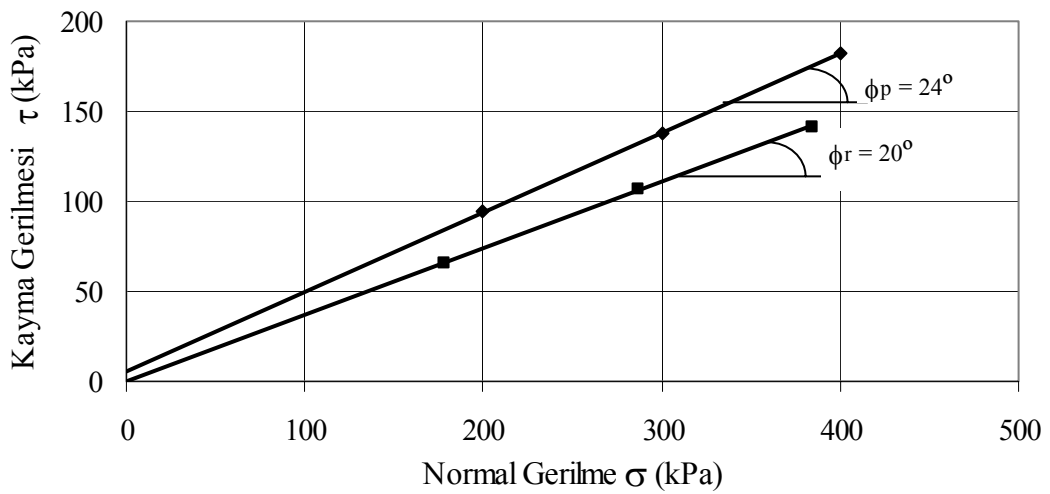
Halka kesme deneyinde yaklaşık üç tura denk gelen 1200 mm kayma yerdeğiştirmesi değerine kadar kesme işlemi sürdürülmüştür. Ringler arasındaki açıklıktan dolayı numune kayıpları olmakta ve bu durum farklı yüzeylerin kesilmesine yol açarak beklenenin dışında deneysel sonuçlar verebilmektedir. Bu yüzden fazla numune kaybına izin vermemek için deneyler 1200 mm kayma yerdeğiştirmesi değeri geçildikten sonra kesilmiştir.

Halka kesme deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrilerine ve göçme zarflarına bir örnek N-1 numunesi için Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



şekil 4.1 : N-1 numunesine ait halka kesme deney sonucu

şekilden de görüldüğü gibi 0-10 mm yatay yerdeğiştirme aralığında pik kayma gerilmesi değeri ne ulaşılmış ve numune çevresi kadar kayma yerdeğiştirmesi meydana geldiğinde kayma gerilmesi kalıcı değere ulaşmıştır. Benzer tip davranış çalışılan diğer deney numunelerinde de gözlenmiştir. Deneyler 200,300 ve 400 kPa değeri lerinde yapılmıştır. şekillerde de belirtildiğı gibi sürtünme kuvvetlerinin etkisi dikkate alınmış ve düzeltilmiş normal gerilme değerileriyle göçme zarfları oluşturulmuştur.



şekil 4.2 : N-1 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları

Halka kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak pik ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. Pik kayma gerilmelerine göre oluşturulan göçme zarflarında kohezyon oluşmakta fakat kalıcı duruma ulaşıldığında kayma mukavemeti üzerinde kohezyonun etkisi görülmemektedir. Yapılan halka kesme deneyleri sonucunda numunelere ait kalıcı ve pik kayma mukavemeti parametreleri Tablo 4.1 'de verilmiştir.

Tablo 4.1 : Halka kesme deney sonuçları

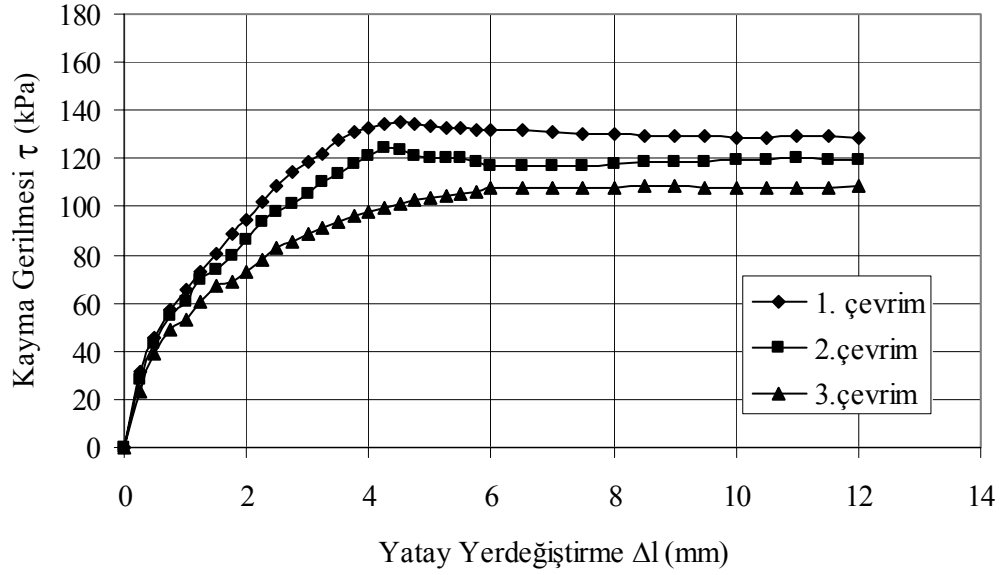
NUMUNE NO	$\phi_r (^\circ)$	c_r (kPa)	$\phi_p (^\circ)$	c_p (kPa)
N-1	20	0	24	4.5
N-2	9	0	20	13.0
N-3	10	0	14	19.4
N-4	14	0	18	10.0
N-5	7	0	11	19.0
N-6	16	0	19	6.0
N-7	15	0	19	7.7
N-8	10	0	13	18.8
N-9	14	0	16	10.5
N-10	10	0	14	17.7
N-11	14	0	17	6.5
N-12	13	0	15	14.0
N-13	12	0	15	13.7
N-14	11	0	14	16.5
N-15	12	0	15	11.8

Çalışma kapsamındaki halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kayma mukavemeti parametrelerini gösteren tablo incelendiğinde kalıcı halde kohezyon oluşmadığı açıkça görülmektedir. Pik mukavemet değerlerinde ise kohezyon görülmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı değerleri 7-20 derece arasında değişiklikler göstermektedir.

4.2 Tekrarlı kesme kutusu deneyleri

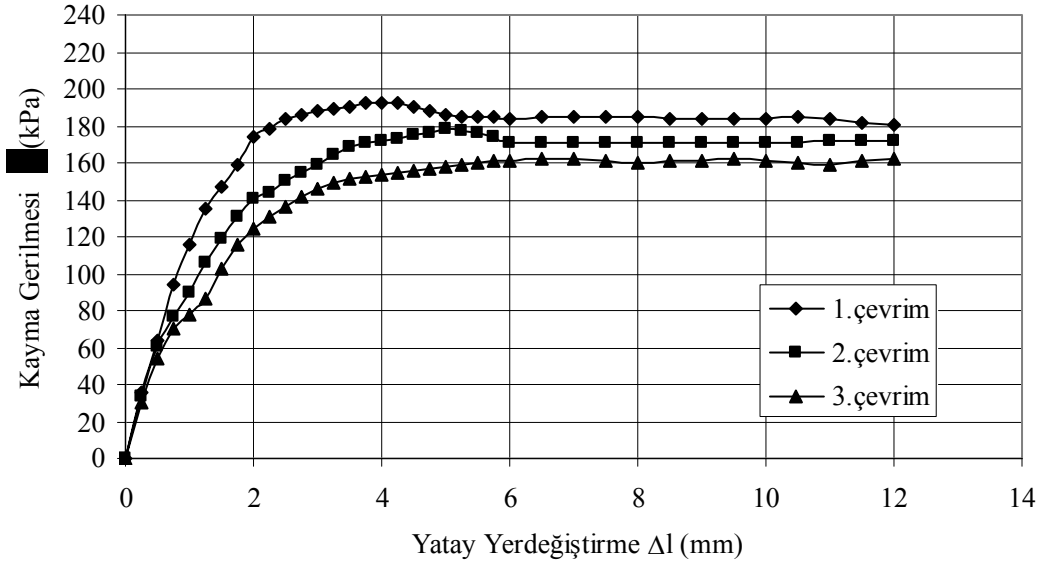
Tekrarlı kesme kutusu deneyinde ise her çevrim sonunda numune geri çekilip deney başındaki hale getirilip bir gün süre ile bekletilip tekrar kesilmiştir. Kalıcı mukavemet değeri olarak 3. çevrim sonunda elde edilen kayma mukavemeti değeri alınmıştır.

Tekrarlı kesme kutusu deneylerinden, her çevrim sonucu elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrilerine birer örnek, N-1 numunesi için sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bu numune için oluşturulan pik ve kalıcı göçme zarfları ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda numunelere ait kalıcı ve pik mukavemet parametreleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

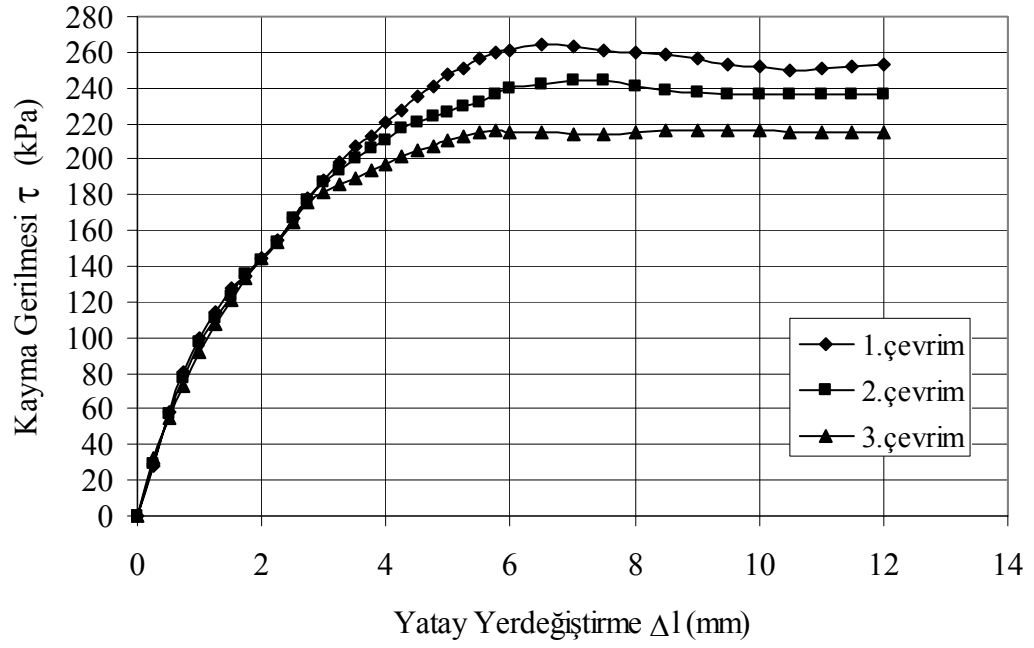


Şekil 4.3 : N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (200kPa)

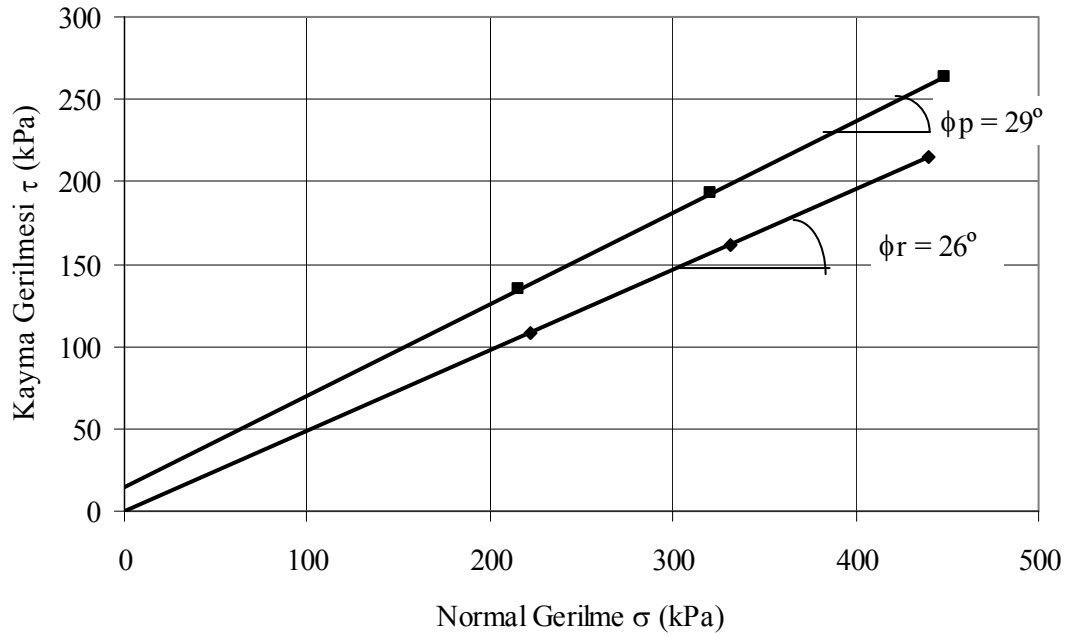
Şekillerden de görüldüğü gibi artan yatay yerdeğiştirme değeriyle kayma gerilmesi önce bir pik yapmakta daha sonra azalarak belirli bir değerde sabit duruma geçmektedir. Grafikler incelendiğinde her çevrim sonunda kayma gerilmesi değeri azaldığı fakat gerilme - yerdeğiştirme diyagramının benzer davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Kalıcı ve pik göçme zarfları oluşturulurken, kesme esnasında yüzey alanının azalması ile oluşan gerilme artışları da alan düzeltmeleri yapılarak hesaba katılmıştır.



Şekil 4.4 : N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (300 kPa)



Şekil 4.5 : N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (400 kPa)



Şekil 4.6 : N-1 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları

Tablo 4.2 : Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları

NUMUNE NO	ϕ_r (°)	c_r (kPa)	ϕ_p (°)	c_p (kPa)
N-1	26	0	29	15.0
N-2	16	0	21	26.5
N-3	13	0	18	29.0
N-4	21	0	24	19.5
N-5	11	0	15	29.4
N-6	23	0	26	16.8
N-7	22	0	25	18.6
N-8	14	0	16	28.0
N-9	20	0	23	19.1
N-10	15	0	19	27.5
N-11	21	0	23	15.7
N-12	17	0	20	26.0
N-13	19	0	22	27.2
N-14	15	0	18	24.0
N-15	18	0	21	21.5

Tekrarlı kesme kutusu sonuçlarının gösterildiği tablo incelendiğinde kalıcı değerlerde kohezyon oluşmadığı görülmektedir. Burada elde edilen sonuçların halka kesme deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında, farklı endeks özelliklerine sahip 15 adet numune için yapılan tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler irdelenmiştir. Bu bölümde yapılan incelemeler ve bu incelemeler sonucunda elde edilen pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek bağıntılar ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

5.1 HALKA KESME DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

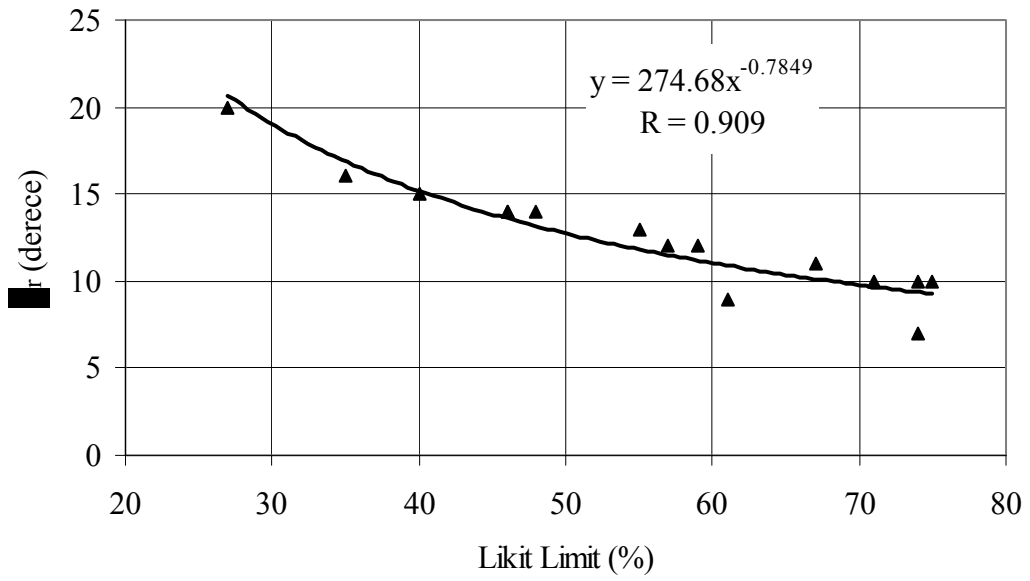
Bu bölümde halka kesme deney sonuçlarından elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin endeks özellikleri ile değişimi ayrıntılı olarak incelemiştir. Öncelikle kayma mukavemeti ile endeks özellikleri arasındaki tekil ilişkiler daha sonra regresyon analizleri kullanılarak ikili ilişkiler incelenmiştir.

5.1.1 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi

Dane boyutu azalırken yani özgül yüzey artarken, likit limitin de artması beklenir. Bu yüzden likit limit ile kil minerolojisi arasında bir ilişki olması gerekir. Çünkü her ikisinde de dane büyüklüğü faktörü mevcuttur (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986). Yapılan halka kesme deneyleri sonucunda belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

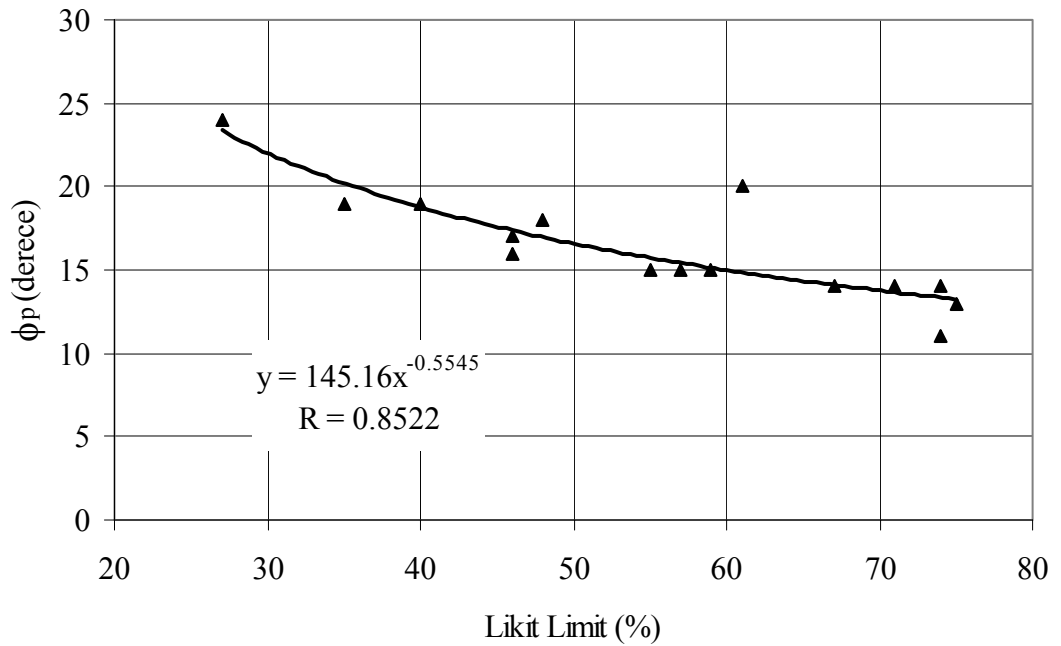
Şekilden de görüldüğü gibi halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi incelenmiş ve likit limit değeri arttıkça kalıcı mukavemet değerleri azalmaktadır. Ayrıca veriler incelenerek likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasında bir bağıntı elde edilmiştir. Bağıntının korelasyon katsayısı $R=0.909$ olarak bulunmuştur.

$$\phi_r = 274.68 (W_L)^{-0.785} \quad (5.1)$$



Şekil 5.1 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi

Aynı çalışma, deneylerden elde edilen pik mukavemet değerleri için de yapılmış ve likit limit ile pik kayma mukavemeti açısı arasındaki değişim Şekil 5.2’de incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi likit limitin pik mukavemetle ilişkisi kalıcı kayma mukavemetiyle ilişkisiyle benzerlik göstermektedir.



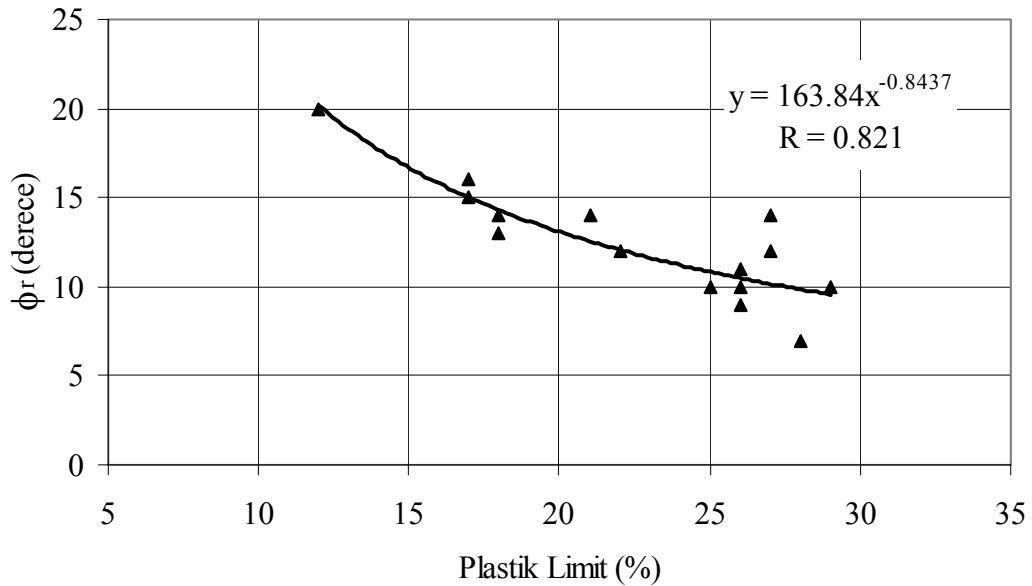
Şekil 5.2 : Pik kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi

Grafikten elde edilen bağıntıda yüksek korelasyon katsayısı elde edilmiş ve deney dataları ile bağıntının uyum gösterdiği belirlenmiştir.

$$\phi_p = 145.16 (W_L)^{-0.555} \quad (5.2)$$

5.1.2 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastik limit ile değişimi

Bu çalışmada kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastik limit ile ilişkisi, likit limit ile ϕ_r ve ϕ_p arasındaki ilişkiyle benzer bir özellik göstermektedir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görülebileceği gibi plastik limit değerleri arttıkça kalıcı ve pik kayma mukavemeti açıları düşmektedir.



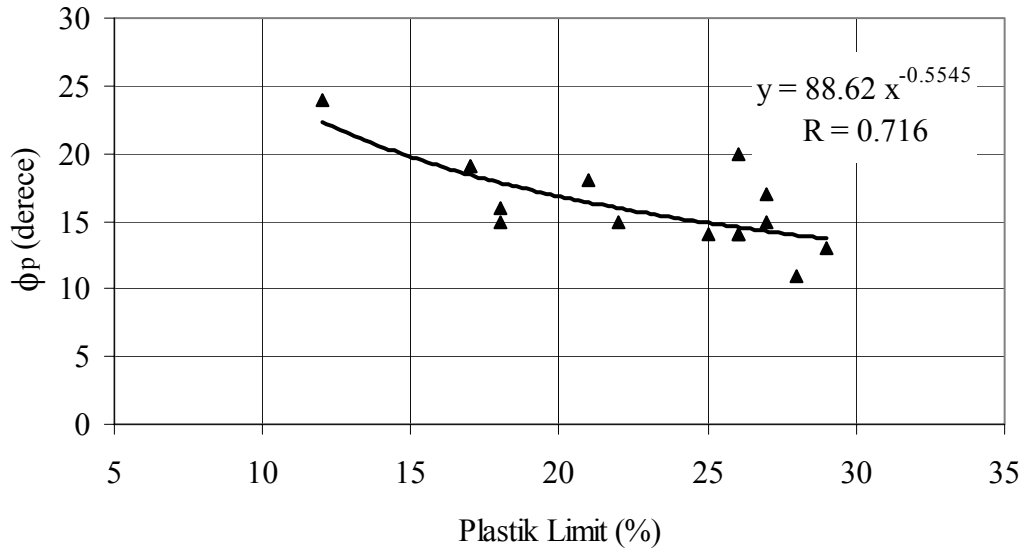
Şekil 5.3 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi

Şekil 5.3’de gösterilen grafik incelendiğinde plastik limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasında aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 163.84 (W_p)^{-0.844} \quad (5.3)$$

Kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ile plastik limit değerleri arasındaki ilişki pik mukavemet değerleri için de incelenmiş ve aşağıdaki bağıntı ve grafikler elde edilmiştir.

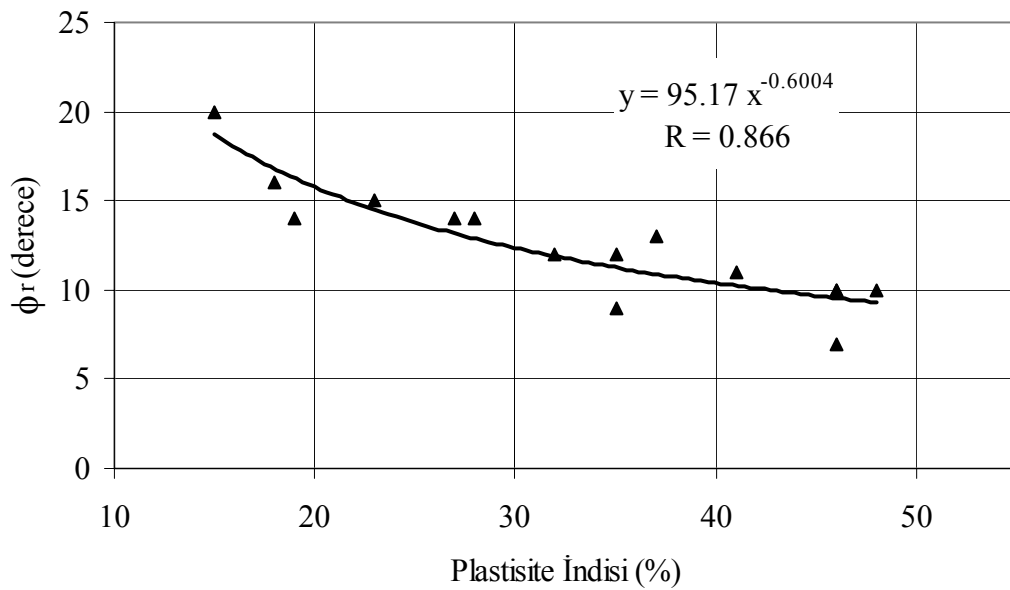
$$\phi_p = 88.62 (W_p)^{-0.555} \quad (5.4)$$



Şekil 5.4 : Pik kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi

5.1.3 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi

Tiwari ve Marui (2005), zeminlerin minerolojik birleşimlerinin kayma mukavemetine etkisini araştırmak üzere kuartz, smektit ve kaolinit minerallerinin farklı oranda hazırlanan birleşimlerini incelemişlerdir. Bu numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda ϕ_r değerinin plastisite indisiyle değişiminin , likit limitle arasındaki ilişkiye benzer olduğu görülmektedir.

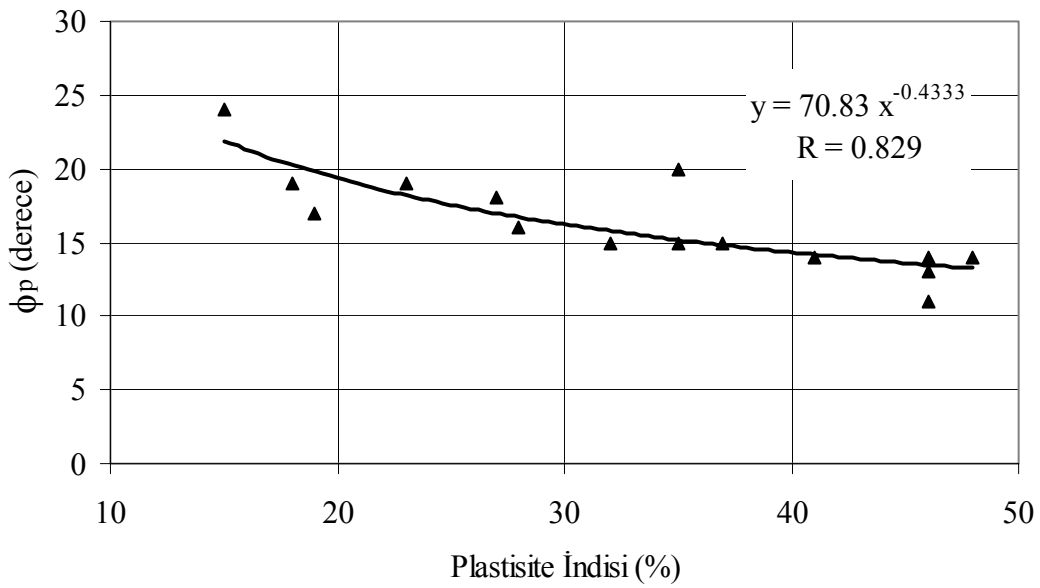


Şekil 5.5 : Plastisite indisinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi

Kayma mukavemeti açısının likit ve plastik limitle ilişkilerinin benzer özellikler göstermesi, plastisite indisi ile ϕ_r ve ϕ_p arasında benzer bir ilişki olabileceğini göstermektedir. Yapılan incelemeler Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da gösterilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi gerek kalıcı gerek ise pik kayma mukavemeti açısı, artan plastisite indisi ile azalmaktadır.

$$\phi_r = 95.17 (I_p)^{-0.600} \quad (5.5)$$

$$\phi_p = 70.83 (I_p)^{-0.433} \quad (5.6)$$

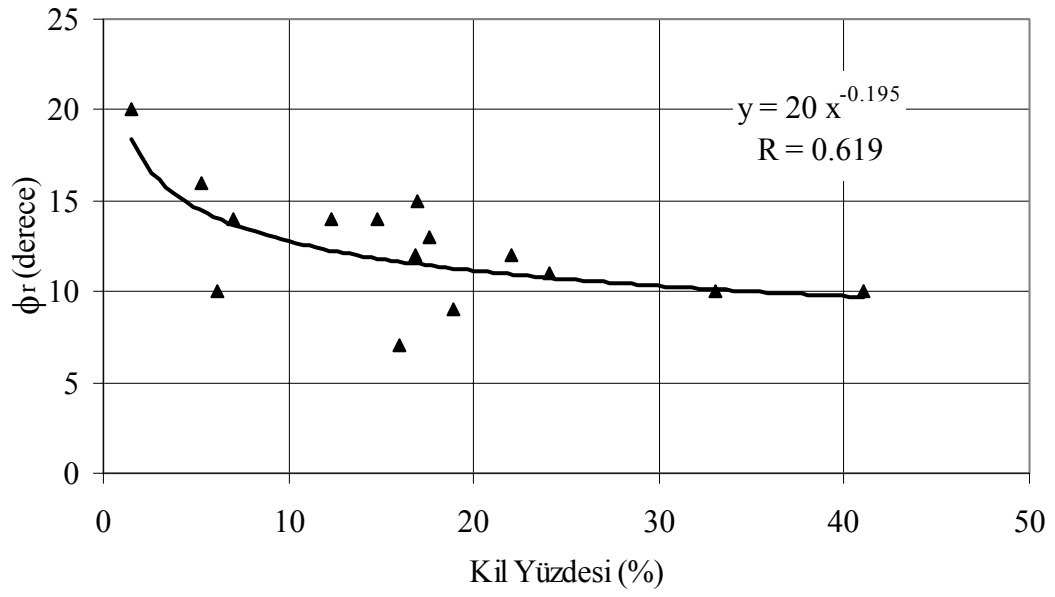


Şekil 5.6 : Plastisite indisinin pik kayma mukavemeti açısına etkisi

5.1.4 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının kil yüzdesi ile değişimi

Geçmiş çalışmalarda farklı kil numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda kil yüzdesi ile kalıcı mukavemet arasında bir ilişki olduğunu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde artan kil yüzdesiyle beraber kalıcı kayma mukavemeti açısının düştüğü belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan hidrometre deneyleri sonucunda elde edilen kil yüzdelerinin kayma mukavemeti açısı ile arasındaki ilişki Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de incelenmiştir. Grafiklerden kil yüzdesinin arttıkça kalıcı ve pik kayma mukavemeti değerlerinin azaldığı görülmüştür.

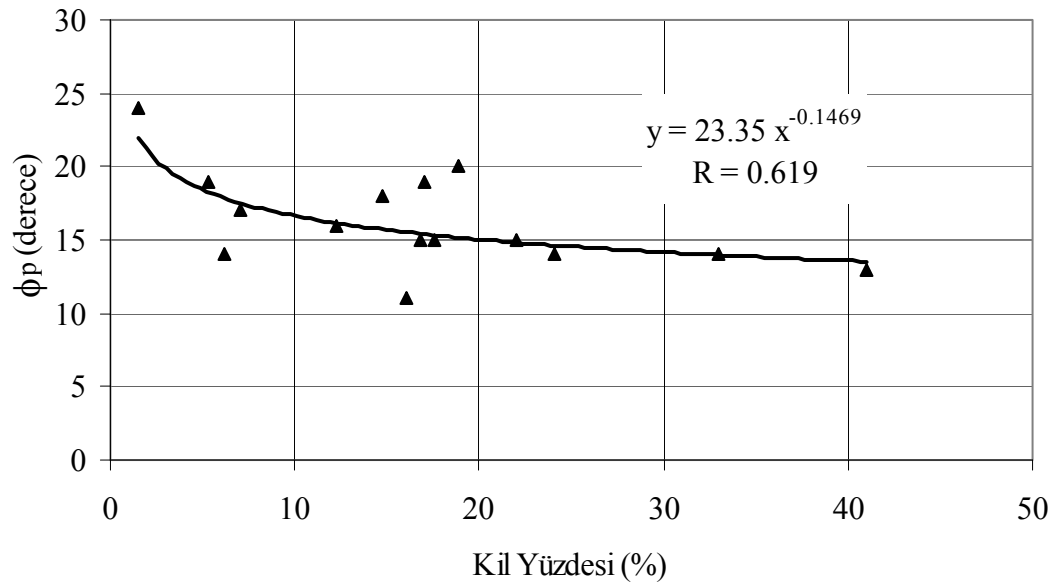


Şekil 5.7 : Kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi

Ayrıca veriler kullanılarak kil yüzdesi ile kalıcı ve pik kayma mukavemet değerleri arasında bağıntılar elde edilmiştir.

$$\phi_r = 20 (K.Y.)^{-0.195} \quad (5.7)$$

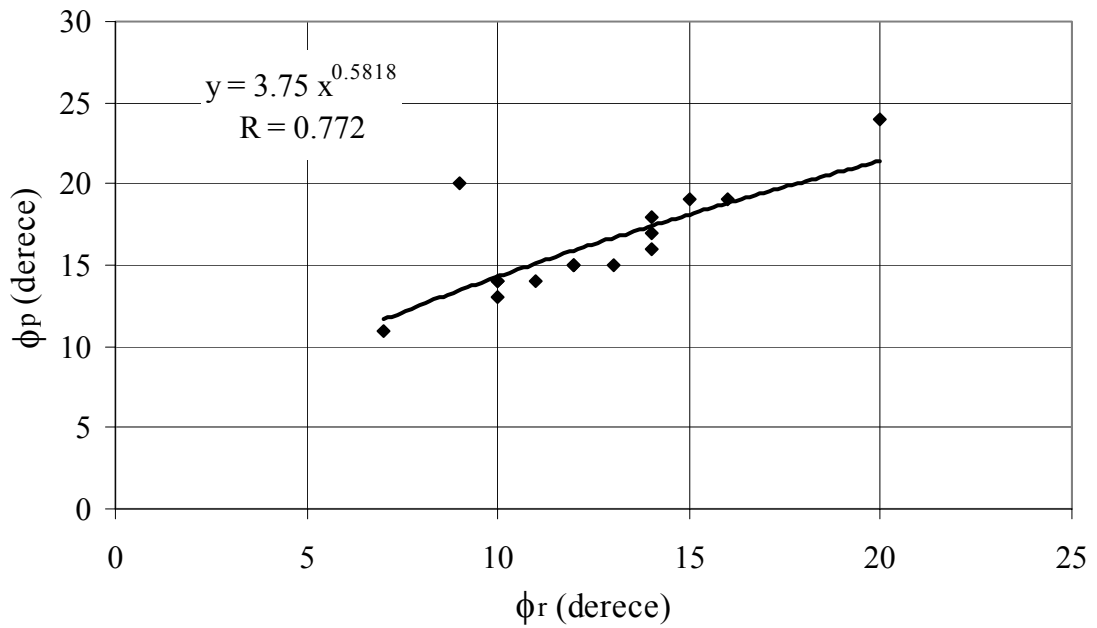
$$\phi_p = 23.35 (K.Y.)^{-0.147} \quad (5.8)$$



Şekil 5.8 : Pik kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi

5.1.5 Kalıcı kayma mukavemeti açıları ile pik kayma mukavemeti açılarının değişimi

Yapılan halka kesme deney sonuçları kullanılarak pik kayma mukavemeti açısı ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 5.9'da verilen grafik kullanılarak ϕ_r ile ϕ_p arasında uygun bir bağıntı elde edilmiştir. Elde edilen bağıntının yapılan deney sonuçlarının tutarlılığını test etmekte ve ϕ_p elde edildikten sonra ϕ_r değerinin yaklaşık olarak bulunmasına imkan sağlayarak kısa zamanda kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesini sağlayacağı aşikardır.



Şekil 5.9 : Halka kesme deneyleri için ϕ_r ile ϕ_p arasındaki ilişkinin incelenmesi

$$\phi_p = 3.75 (\phi_r)^{0.582} \quad (5.9)$$

5.1.6 Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve aktivite ile değişimi

Halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kayma mukavemeti verilerinin endeks özellikleri ile tekil ilişkileri irdelendikten sonra, farklı endeks özelliklerinin kayma mukavemeti açısına ortak etkilerini incelemek için regresyon analizleri ile ikili ilişkiler incelenmiştir. Bu analizler sonucunda hem dar bir veri aralığında olduğu için uygun tekil ilişkiler elde edilemeyen kıvam indisinin ve aktivitenin kayma

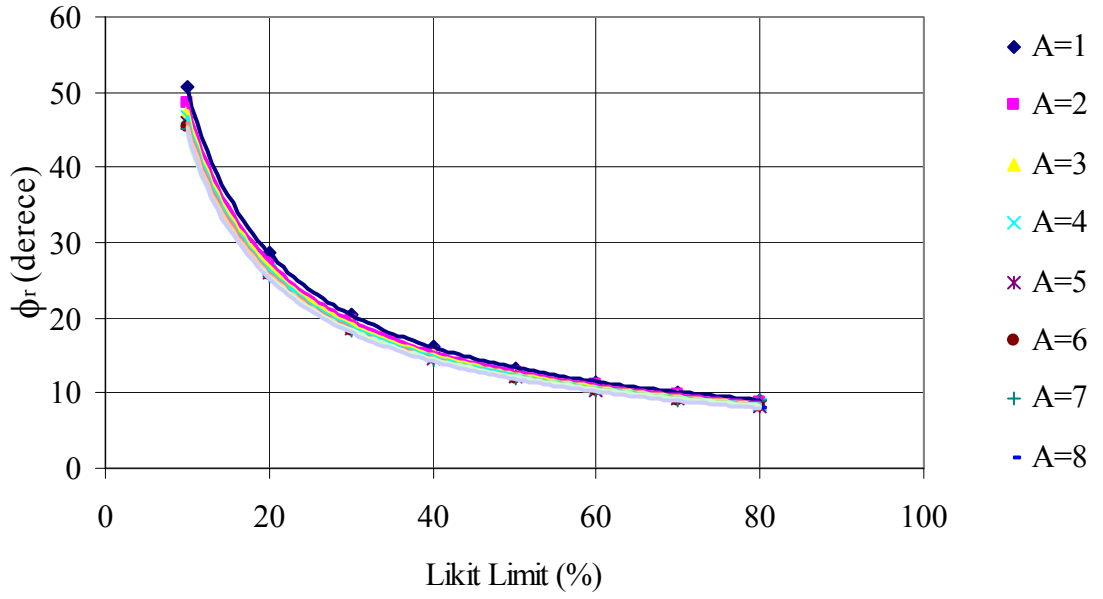
mukavemeti açısına etkisi incelenmiş hem de hangi endeks özelliğinin kayma mukavemeti açısı üzerinde daha etkili olduğu karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir

Kil yüzdesi, bir numunenin 2µm'den daha küçük danelerin ana numuneye göre ağırlıkça yüzdesi olarak tanımlanır. Aktivite ise kil zeminlerde plastisite ile kil yüzdesinin oranıdır. Fakat aktivitenin tanımındaki kil yüzdesi farklı bir şekilde tanımlanmaktadır. Aktivitenin hesaplanmasında kullanılan kil yüzdesi, 2µm'den daha küçük dane çapına sahip kil danelerinin, numunenin 425 µm'den geçen miktarına göre ağırlıkça yüzdesi olarak tanımlanır (K.H. Head,1992). Aktivite tanımında likit limit, plastik limit ve kil yüzdesini barındırdığı için kayma mukavemeti parametreleri ile değişimi büyük önem kazanmaktadır. Fakat bu çalışmada doğal numuneler ile çalışıldığı için aktivite değerleri kısıtlı bir aralıkta yer aldığı için anlamlı bir tekil ilişki gözlenememiştir.

Halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı değerleri kullanılarak likit limit ve aktivite ile aralarındaki ikili ilişki regresyon analizleri ile incelenmiştir (Şekil 5.10). Regresyon analizleri sonucunda bileşenleri aktivite ve likit limit olan bir bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 339 * W_L^{-0.826} * A^{-0.059} \quad (5.10)$$

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi farklı aktivite değerlerinde ϕ_r – likit limit grafiğinde çok önemli değişiklikler olmamaktadır. Dolayısıyla ϕ_r 'ye likit limit ve aktivitenin ortak etkisi incelendiğinde aktivitenin etkisinin likit limite göre çok az olduğu görülmektedir. Ayrıca bu grafiğin, tekil ilişkileri incelenen ϕ_r - likit limit grafiğiyle benzer davranış gösterdiği açıkça görülmektedir.



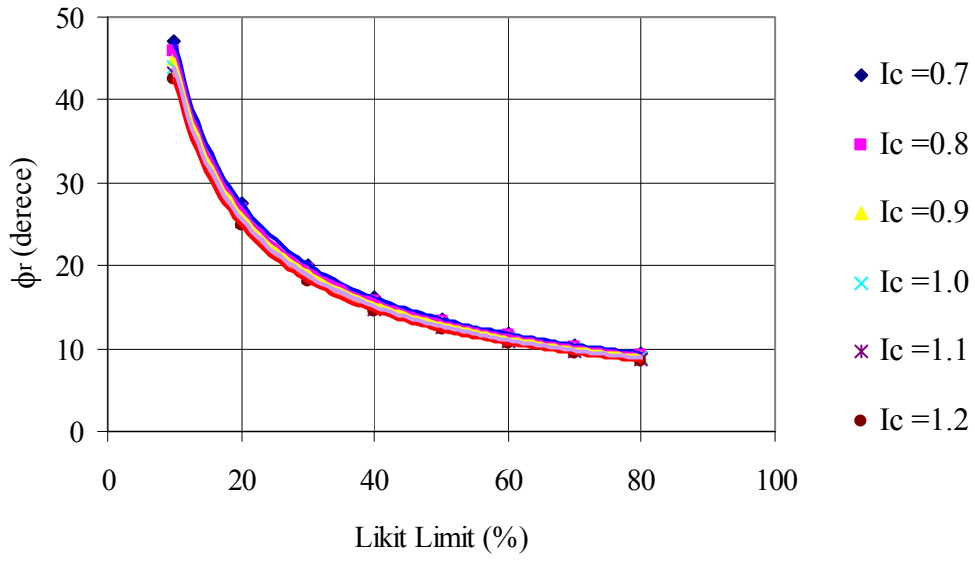
Şekil 5.10 : Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve aktivite arasındaki ilişkinin incelenmesi

5.1.7 Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve kıvam indisi ile değişimi

Kıvam indisi tanımı içinde hem likit limit ve plastik limit hem de zeminin tabi su muhtevasını barındırdığı için mühendislik uygulamalarında önemli bir parametredir. Kıvam indisi değerleri kısıtlı bir aralıkta yer aldığı için anlamlı bir tekil ilişki gözlenememiştir. Bu yüzden kıvam indisinin diğer endeks özellikleri ile anlamlı ikili ilişkileri araştırılmıştır.

Likit limit ile kıvam indisinin ϕ_r ile ikili ilişkileri Şekil 5.11'de incelenmiştir. Grafikten görüldüğü gibi artan likit limit değerleri ile beraber ϕ_r değeri azalmaktadır. Farklı I_C değerleri için W_L - ϕ_r eğrisinin çok fazla değişmediği görülmüş ve kıvam indisinin ϕ_r 'ye etkisinin likit limitin etkisi yanında önemsiz olduğu açıkça görülmektedir. Regresyon analizleri sonucunda likit limit ve kıvam indisinin ϕ_r 'ye etkisini gösteren bağıntı elde edilmiştir. Bağıntı incelendiğinde artan likit limit ve kıvam indisi değerlerinde ϕ_r 'nin azaldığı görülmektedir.

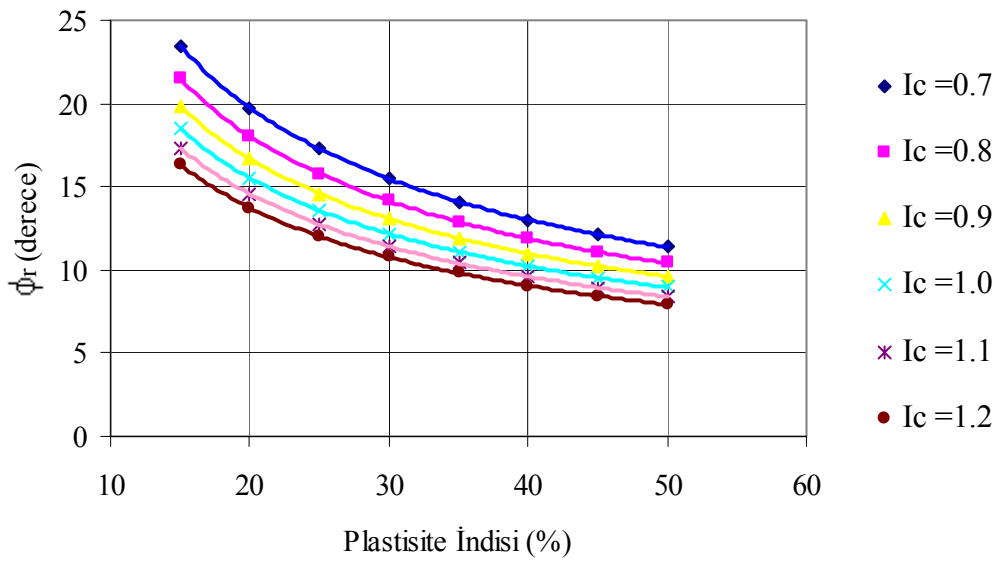
$$\phi_r = 260 * W_L^{-0.772} * I_C^{-0.187} \quad (5.11)$$



Şekil 5.11 : Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

5.1.8 Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ve kıvam indisi ile değişimi

Kalıcı kayma mukavemeti ile plastisite indisi ve kıvam indisi ile değişimi irdelenmiş ve farklı kıvam indisi değerleri için plastisite indisi- ϕ_r eğrilerinin değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 5.12).



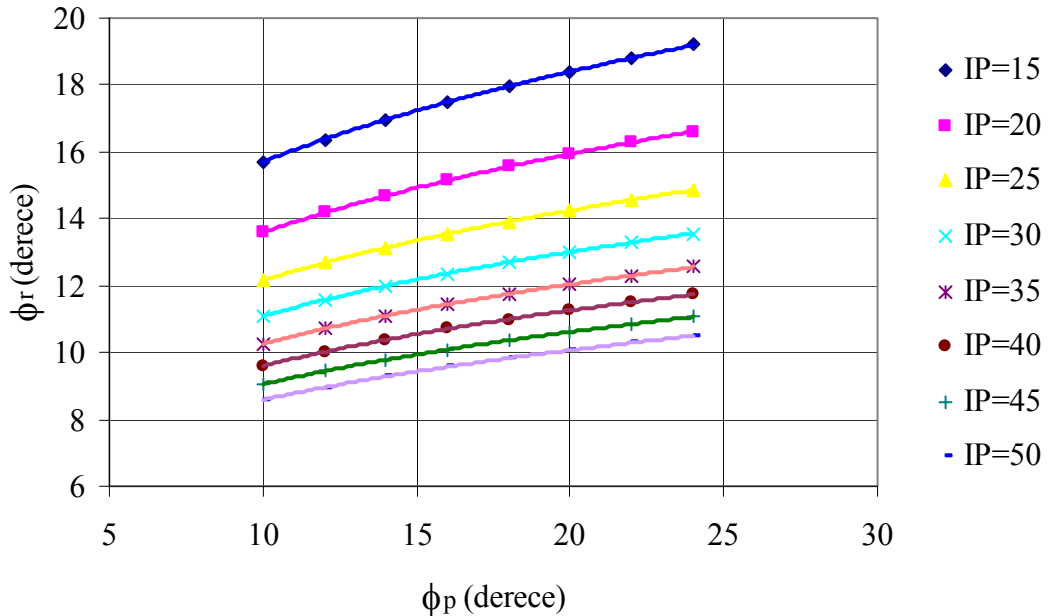
Şekil 5.12 : Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile plastisite indisi ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi artan plastisite indisi ve kıvam indisi değerlerinde ϕ_r değeri azalmaktadır. Sabit plastisite indisi değerlerinde kıvam indisi arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açısı değeri düşmektedir. Bu yüzden farklı kıvam indisi değerlerinde I_p - ϕ_r eğrileri farklılık göstermektedir. Dolayısıyla ϕ_r üzerinde hem plastisite indisinin hem de kıvam indisinin etkili olduğu söylenebilmektedir. Deney verileri üzerinde regresyon analizi yapılarak aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 94 * I_p^{-0.601} * I_C^{-0.673} \quad (5.12)$$

5.1.9 Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi ile değişimi

Pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi değerleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki incelenmiş ve böylece pik mukavemeti kullanarak kalıcı mukavemetin elde edilmesini sağlayacak bir bağıntı araştırılmıştır. Şekil 5.13 incelendiğinde artan plastisite indisi değerleri ile ϕ_r değerinin düştüğü fakat artan ϕ_p değerleri ile ϕ_r değerlerinin de arttığı görülmektedir.



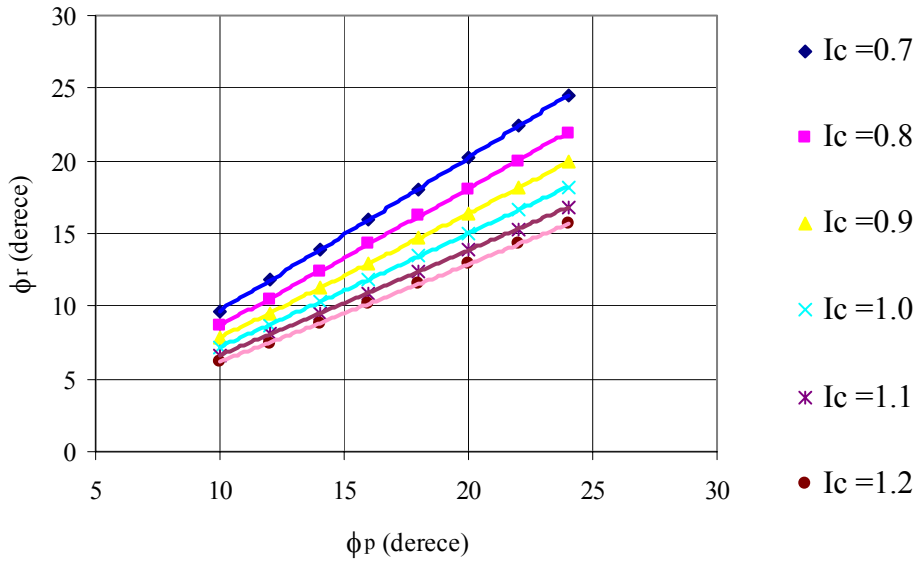
Şekil 5.13 : Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

Grafik incelendiğinde farklı plastisite indisi değerlerinde aynı pik mukavemet açısı değerinde farklı ϕ_r değerleri elde edilmiştir. Bu yüzden ϕ_r üzerinde ikili ilişkiler incelendiğinde hem plastisite indisin hem de pik kayma mukavemeti değerinin etkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan regresyon analizi ve grafiklerden aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 36 * \phi_p^{0.229} * I_p^{-0.501} \quad (5.13)$$

5.1.10 Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi ile ilişkisinin incelenmesi

Pik kayma mukavemeti ve kıvam indisinin kalıcı kayma mukavemeti ile olan ikili ilişkileri incelenmiş ve regresyon analizleri sonucunda Şekil 5.14’de gösterilen grafik ve ϕ_r ile ϕ_p arasında korelasyon katsayısı yüksek pratik bir bağıntı elde edilmiştir.



Şekil 5.14 : Halka kesme deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

$$\phi_r = 0.627 * \phi_p^{1.060} * I_C^{-0.836} \quad (5.14)$$

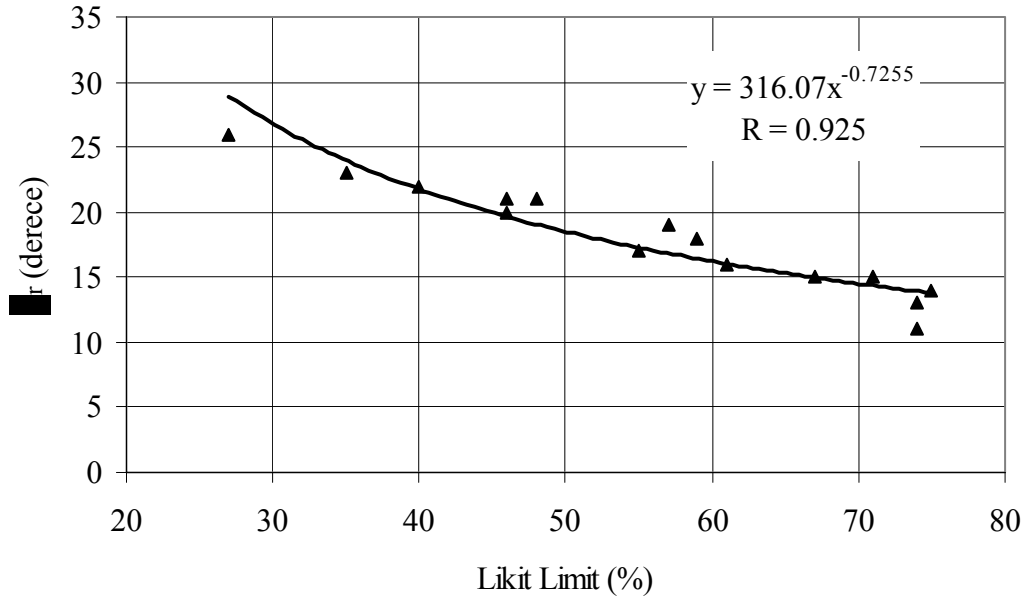
Grafik ve bağıntı incelendiğinde ϕ_r 'nin pik kayma mukavemeti ile doğru orantılı, kıvam indisi ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca farklı kıvam indisi değerlerinde, $\phi_r - \phi_p$ grafikleri farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar bize ϕ_r 'nin belirlenmesinde hem ϕ_p 'in hem de kıvam indisinin etkili olduğunu göstermektedir.

5.2 TEKRARLI KESME KUTUSU DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin endeks özellikleri ile değişimi tekil ilişkiler ile daha sonra ise regresyon analizleri kullanılarak ikili ilişkiler ile incelenmiştir.

5.2.1 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi

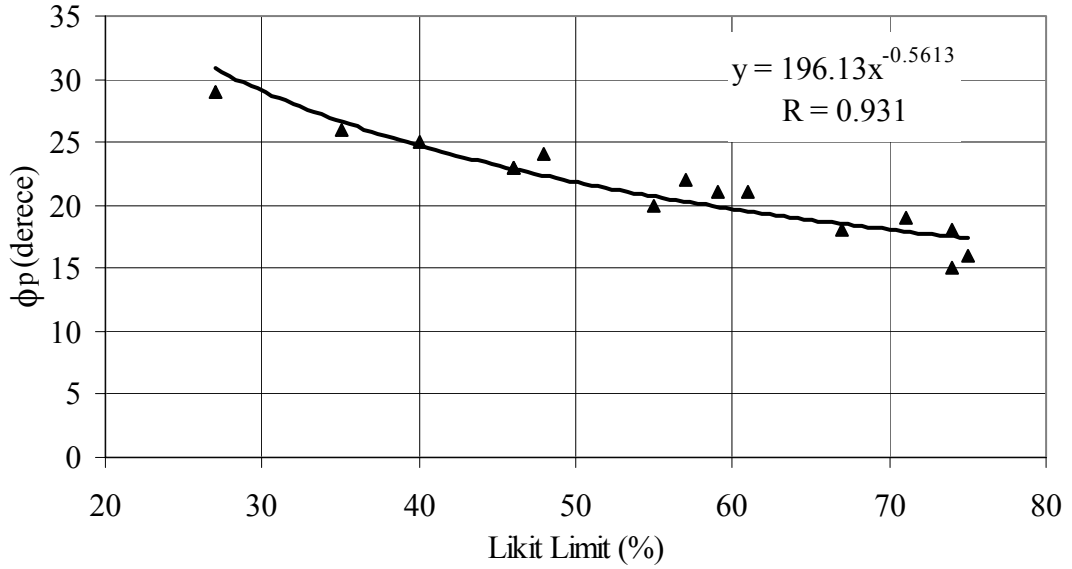
Tekrarlı kesme kutusu ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile ilişkisi incelenmiş ve korelasyon katsayısı yüksek bir bağıntı elde edilmiştir (Şekil 5.15). Grafik incelendiğinde artan likit limit değerleriyle kalıcı kayma mukavemeti açısının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen eğrinin halka kesme deneyleri ile elde edilen eğriyle benzer davranış gösterdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.15 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi

$$\phi_r = 316.07 (W_L)^{-0.726} \quad (5.15)$$

Tekrarlı kesme deneylerden elde edilen pik mukavemet değerleri için de aynı analiz çalışması yapılmış ve likit limit ile pik kayma mukavemeti açısı arasındaki değişim Şekil 5.16’da incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi likit limitin pik mukavemetle ilişkisi kalıcı kayma mukavemetiyle ilişkisiyle benzer özellik göstermektedir.



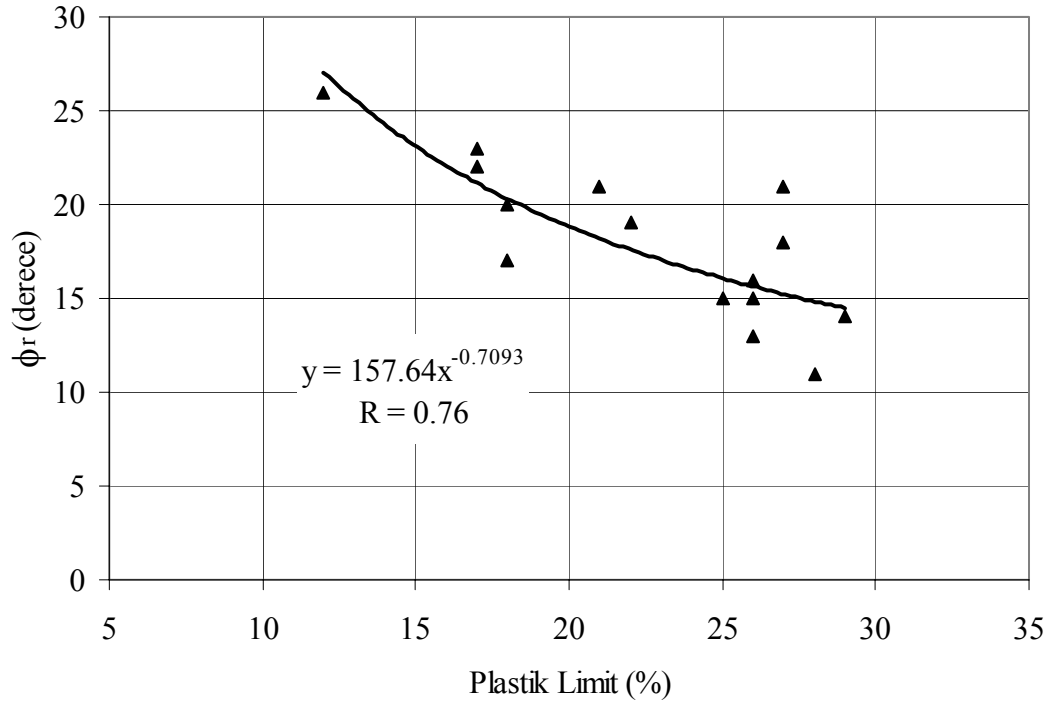
Şekil 5.16 : Pik kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi

$$\phi_p = 196.13 (W_L)^{-0.561} \quad (5.16)$$

5.2.2 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastik limit ile değişimi

Plastik limitin kayma mukavemeti açıları ile ilişkisi, likit limit ile ϕ_r arasındaki ilişkiyle benzerlik göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda plastik limit ile ϕ_r arasındaki ilişkiyi gösteren grafik ve bağıntı elde edilmiştir. Şekil 5.17’den de görüldüğü gibi plastik limit arttıkça ϕ_r değeri düşmektedir.

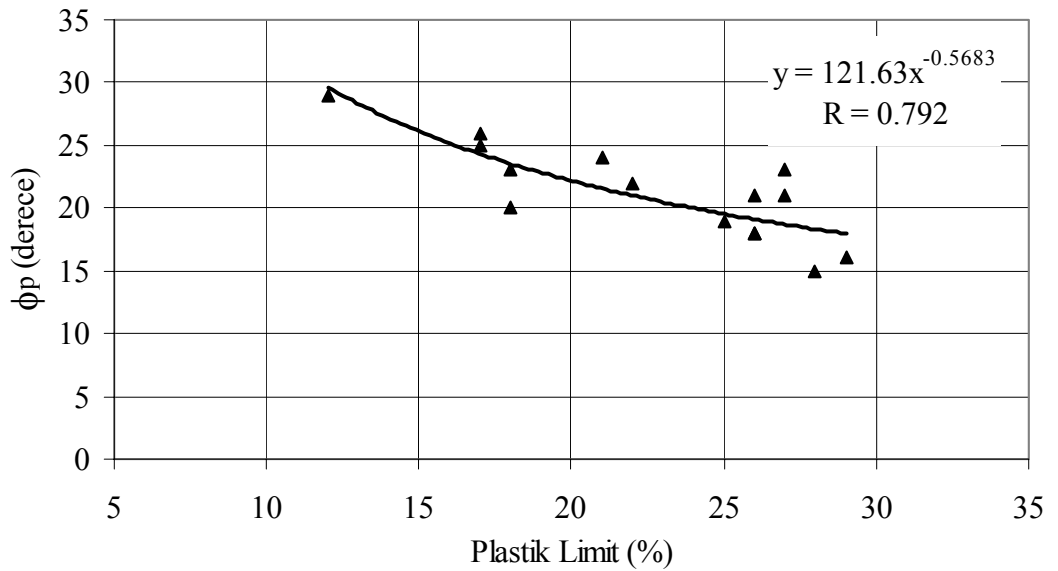
$$\phi_r = 157.64 (W_p)^{-0.709} \quad (5.17)$$



Şekil 5.17 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi

Pik kayma mukavemeti değerleri için de aynı analiz çalışması yapılmış ve aşağıdaki bağıntı ve grafikler elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde pik ve kalıcı kayma mukavemeti eğrilerinin benzer davranış gösterdiği açıkça görülmektedir.

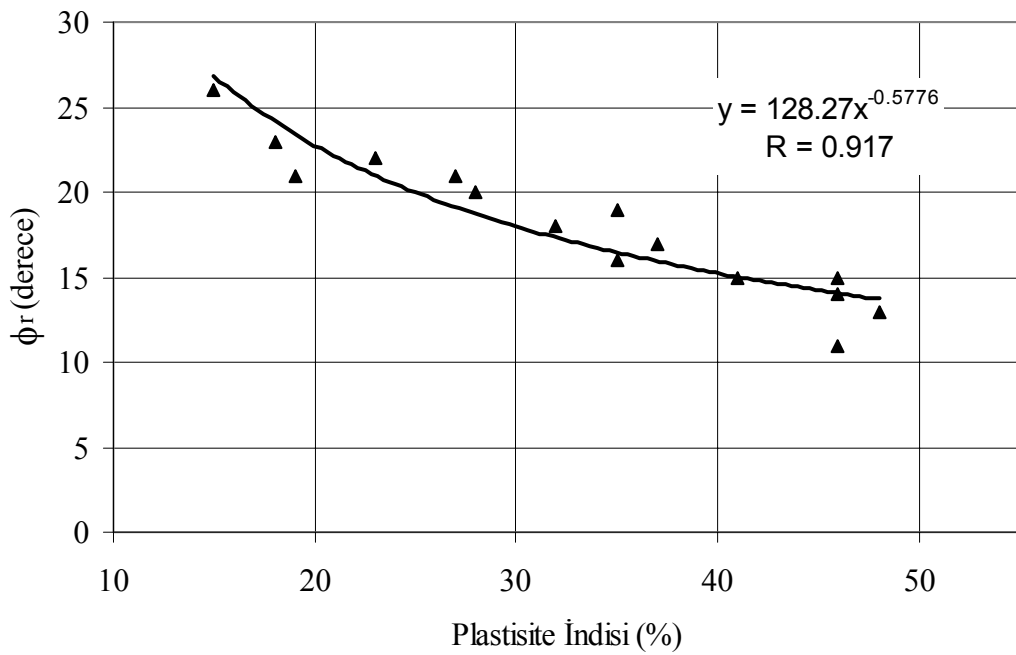
$$\phi_p = 88.62 (W_p)^{-0.555} \quad (5.18)$$



Şekil 5.18 : Pik kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi

5.2.3 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi

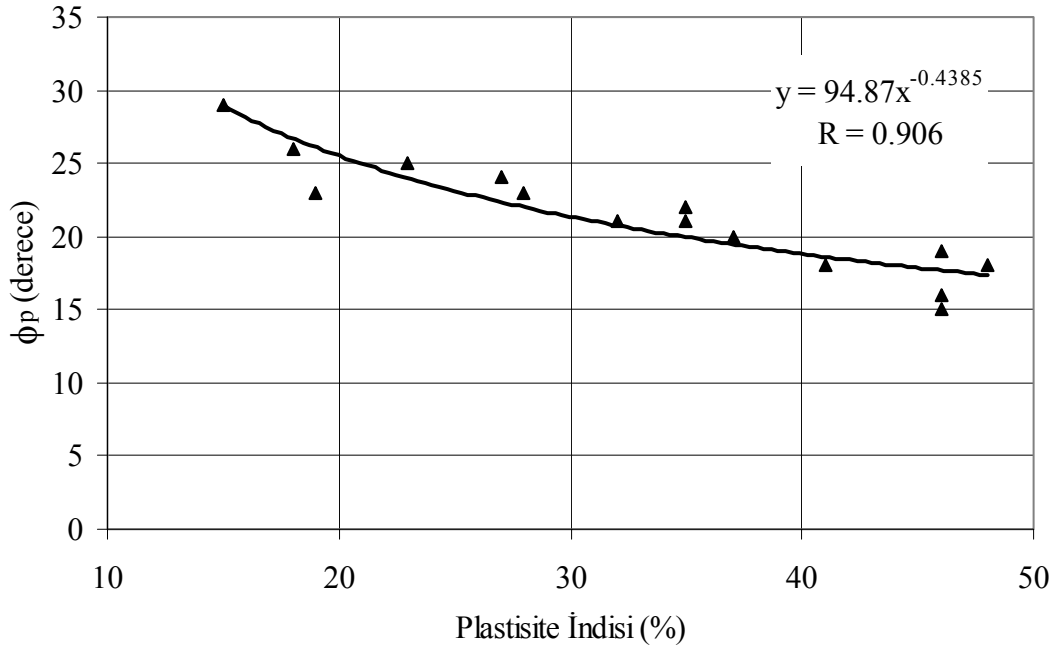
Tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kayma mukavemeti açıları ile plastisite indisi arasında, halka kesme deney sonuçları ile yapılan analizlerle benzer bir ilişki bulunmuştur. Ayrıca ϕ_r 'nin likit limit ve plastik limitle ilişkilerinin benzer davranış göstermesi, plastisite indisi ile ϕ_r ve ϕ_p arasında benzer bir ilişkinin var olduğunu açıkça göstermektedir. Yapılan incelemeler Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi artan plastisite indisi değerlerinde, kayma mukavemeti açıları azalma göstermektedir.



Şekil 5.19 : Plastisite indisinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi

$$\phi_r = 128.27 (I_p)^{-0.577} \quad (5.19)$$

$$\phi_p = 94.87 (I_p)^{-0.439} \quad (5.20)$$



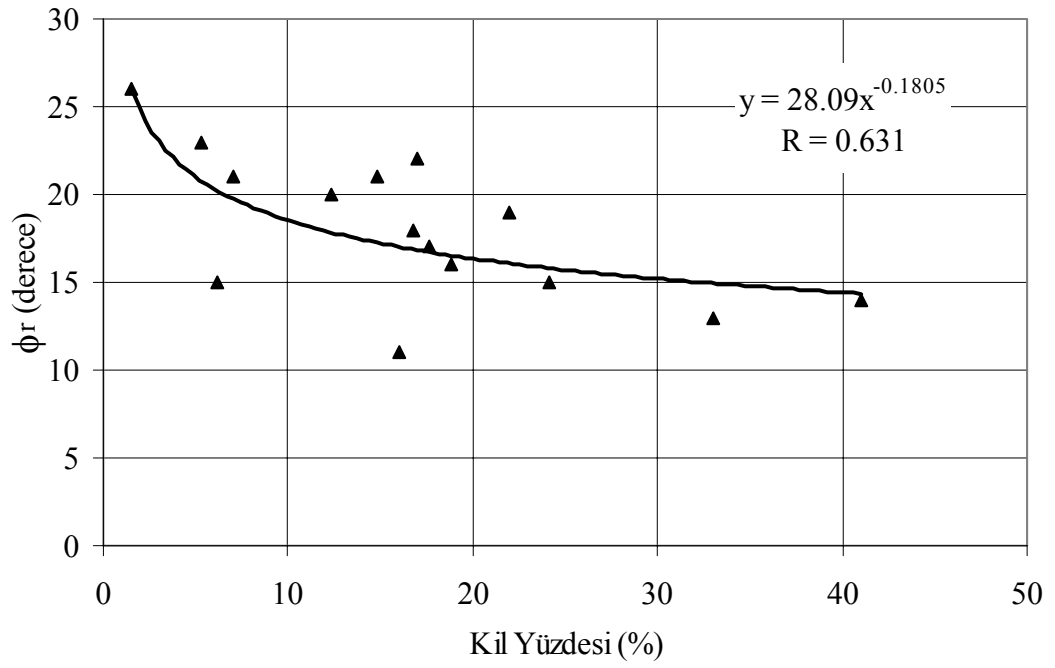
Şekil 5.20 : Plastisite indisinin pik kayma mukavemeti açısına etkisi

5.2.4 Kalıcı ve pik kayma mukavemeti açılarının kil yüzdesi ile değişimi

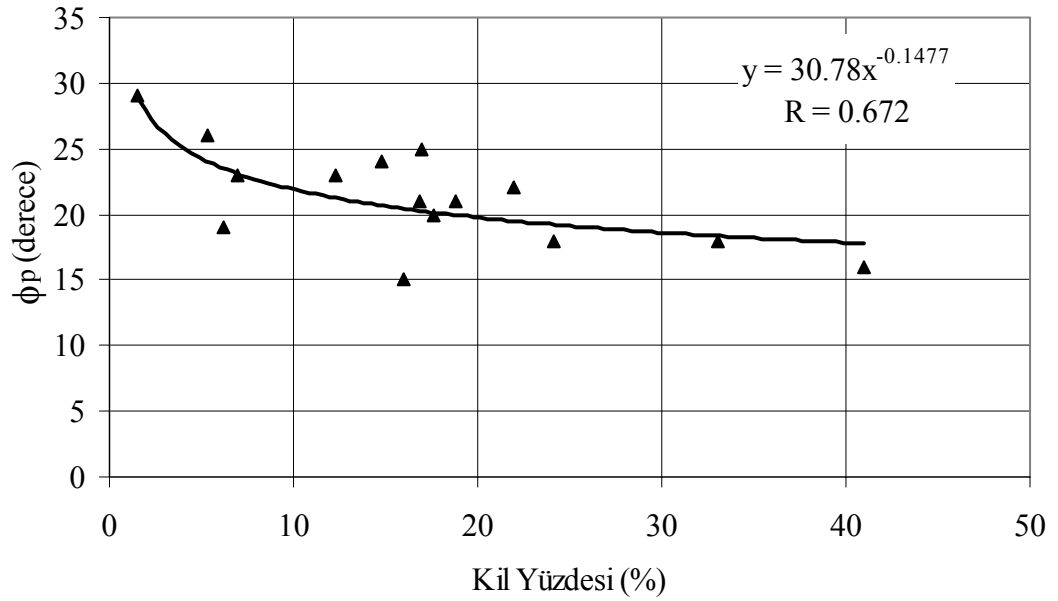
Kil yüzdesi ile kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de gösterilen grafik ve bağıntılar elde edilmiştir. Grafiklerden kil yüzdesinin artması ile kalıcı ve pik kayma mukavemeti değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ile yapılan analiz sonuçları ile ,halka kesme deneyi ile elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ile kil yüzdesi arasında yapılan analiz sonuçlarının benzer davranış gösterdiği anlaşılmıştır.

$$\phi_r = 28.09 (K.Y.)^{-0.181} \quad (5.21)$$

$$\phi_p = 30.78 (K.Y.)^{-0.148} \quad (5.22)$$



Şekil 5.21 : Kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi

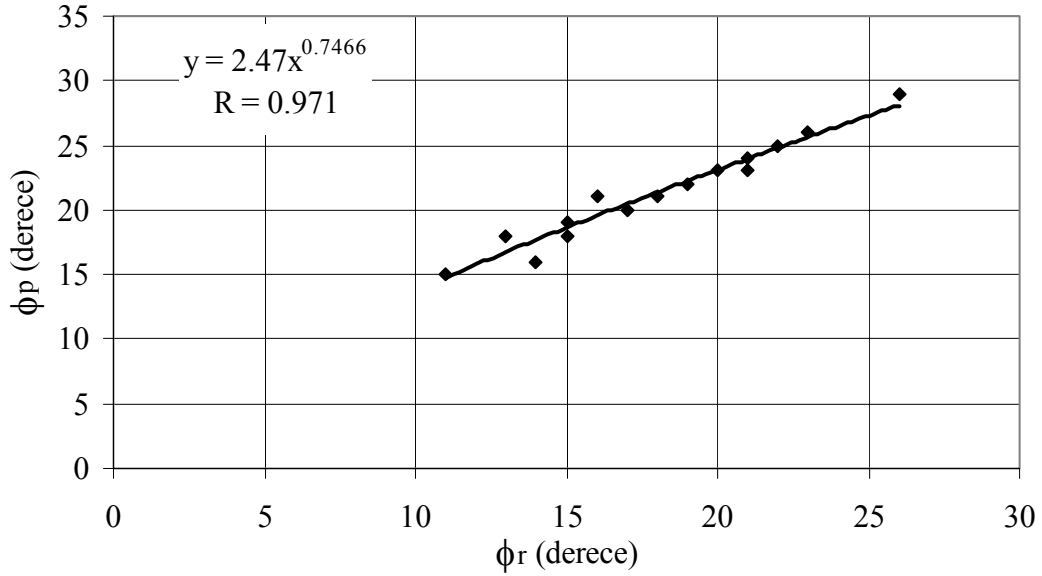


Şekil 5.22 : Pik kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi

5.2.5 Kalıcı kayma mukavemeti açıları ile pik kayma mukavemeti açılarının değişimi

Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları kullanılarak pik kayma mukavemeti açısı ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeler sonucunda Şekil 5.23’de gösterilen grafik ve bağıntı elde edilmiştir. Elde edilen bağıntının acil

kalıcı kayma mukavemeti parametrelerine ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda, 10 gün süren bir set tekrarlı kesme kutusu deneyinin beklenemeyeceği kritik sahalarda ϕ_p kullanılarak ϕ_r hakkında yaklaşık da olsa bir fikir verebileceği için çok faydalı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 5.23 : Tekrarlı kesme kutusu deneyleri için ϕ_r ile ϕ_p arasındaki ilişkinin incelenmesi

$$\phi_p = 2.47 (\phi_r)^{0.747} \quad (5.23)$$

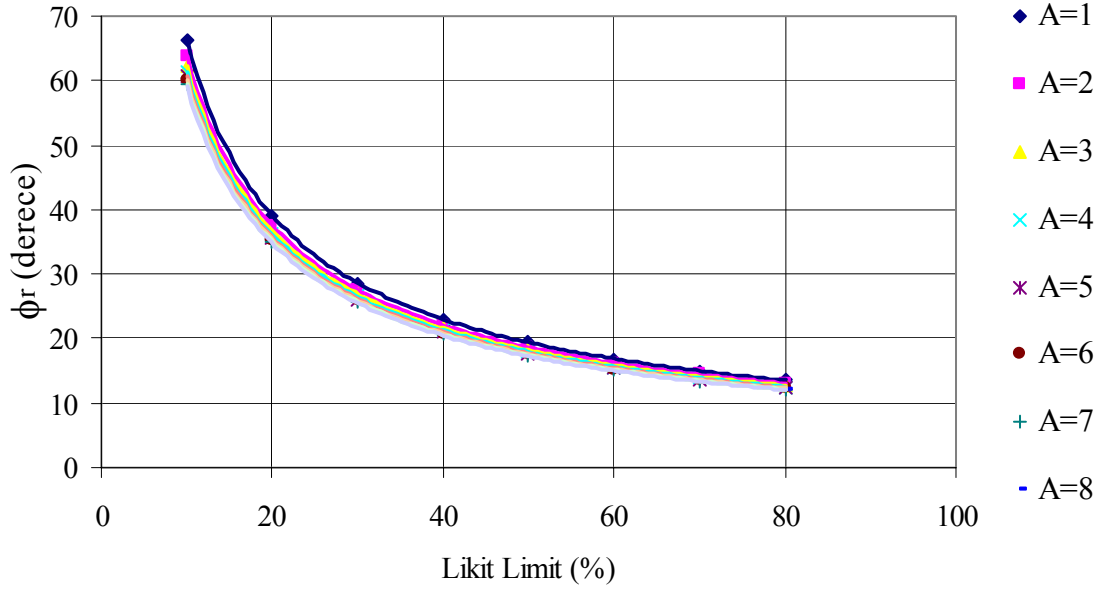
5.2.6 Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve aktivite ile değişimi

Tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kayma mukavemeti verilerinin endeks özellikleri ile tekil ilişkileri irdelendikten sonra, halka kesme deney sonuçları kullanılarak regresyon analizleri sonucunda incelenen endeks özellikleri ile ϕ_r arasındaki ikili ilişkiler, tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri için de incelenmiştir. Böylece dar bir veri aralığında olduğu için uygun tekil ilişkiler vermeyen bazı endeks özelliklerinin de kalıcı kayma mukavemeti açısı üzerindeki etkisi incelenmiş olacaktır.

Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı değerleri kullanılarak likit limit ve aktivite ile aralarındaki ikili ilişki regresyon analizleri ile incelenmiştir (Şekil 5.24). Aktivitenin tanımındaki kil yüzdesi $2\mu\text{m}$ 'den daha küçük dane çapına sahip kil danelerinin, numunenin $425\mu\text{m}$ 'den geçen

miktarına göre ağırlıkça yüzdesi olarak tanımlanmıştır. Regresyon analizleri sonucunda aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 385 * W_L^{-0.764} * A^{-0.056} \quad (5.24)$$



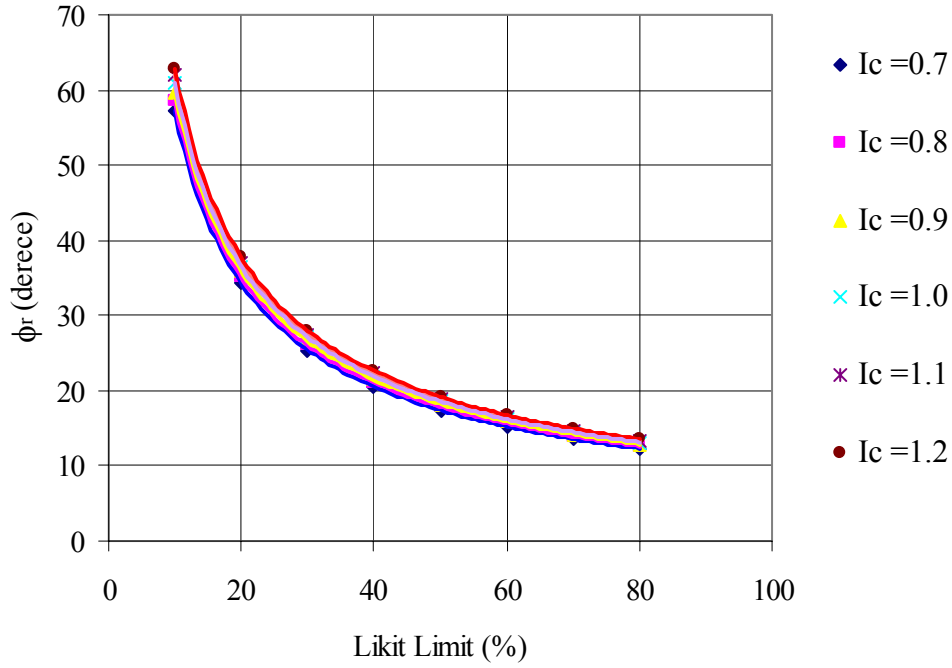
Şekil 5.24 :Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve aktivite arasındaki ilişkinin incelenmesi

Şekil 5.24 incelendiğinde farklı aktivite değerleri için ϕ_r – likit limit grafiğinde çok önemli değişiklikler olmadığı görülmektedir. Bu yüzden ϕ_r ’nin likit limit ve aktivite ile ikili ilişkisi incelendiğinde aktivitenin etkisinin likit limite göre çok az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu grafiğin, tekil ilişkileri incelenen ϕ_r - likit limit grafiğiyle benzer davranış gösterdiği de anlaşılmaktadır.

5.2.7 Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve kıvam indisi ile değişimi

Regresyon analizleri sonucunda likit limit ve kıvam indisinin ϕ_r ’ye etkisi incelenmiş ve ikili ilişkileri gösteren bağıntı ve grafik Şekil 5.25’de gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi farklı I_C değerleri için W_L - ϕ_r eğrisinin çok fazla değişmediği görülmüştür. Ayrıca artan likit limit değerleri ile beraber ϕ_r değeri azalmaktadır. Kıvam indisinin ϕ_r ’ye etkisinin likit limitin etkisi yanında önemsiz olduğu da açıkça görülmektedir. Bağıntı incelendiğinde ϕ_r ’nin likit limit ile ters, kıvam indisi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

$$\phi_r = 333 * W_L^{-0.738} * I_C^{0.178} \quad (5.25)$$

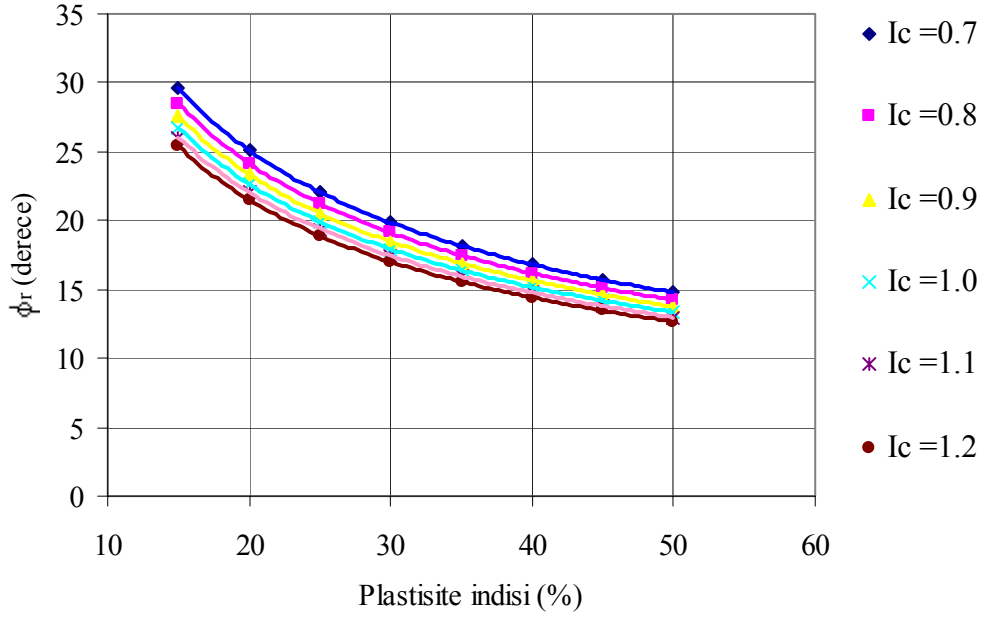


Şekil 5.25 : Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile likit limit ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

5.2.8 Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ve kıvam indisi ile değişimi

ϕ_r ile plastisite indisi ve kıvam indisi arasındaki ikili ilişki regresyon analizleri ile irdelenmiş ve farklı kıvam indisi değerleri için plastisite indisi- ϕ_r eğrilerinin değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 5.26). Grafik incelendiğinde farklı kıvam indisi değerlerinde IP- ϕ_r eğrilerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Ayrıca artan plastisite indisi ve kıvam indisi değerlerinde ϕ_r değeri azalmaktadır. Sonuç olarak ϕ_r üzerinde hem plastisite indisinin hem de kıvam indisinin etkili olduğu söylenebilmektedir. Deney verileri üzerinde regresyon analizi yapılarak aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

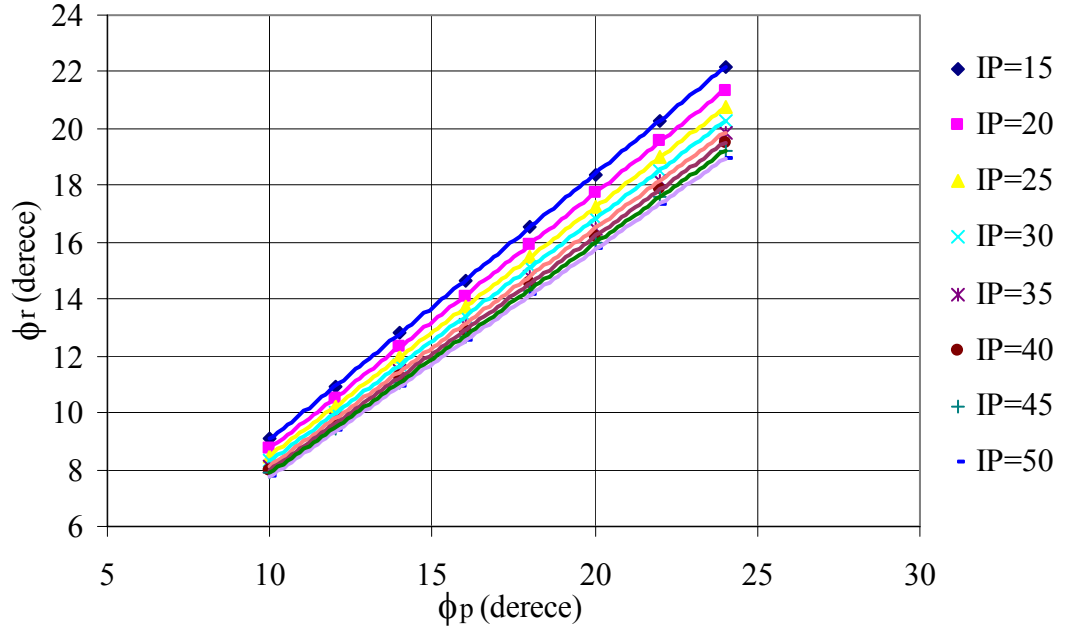
$$\phi_r = 128 * I_P^{-0.578} * I_C^{-0.287} \quad (5.26)$$



Şekil 5.26 : Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile plastisite indisi ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

5.2.9 Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi ile değişimi

Pik kayma mukavemeti kullanılarak kalıcı mukavemetin elde edilmesini sağlamak amacıyla, pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi değerleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki regresyon analizleri yapılmış ve aşağıdaki grafik ve bağıntı elde edilmiştir (Şekil 5.27). Grafik incelendiğinde farklı plastisite indisi değerleri için ϕ_r - ϕ_p eğrilerinin değiştiği belirlenmiş ve plastisite indisinin pik ve kalıcı kayma mukavemeti açıları arasındaki ilişkiye etkisi olduğu anlaşılmıştır.



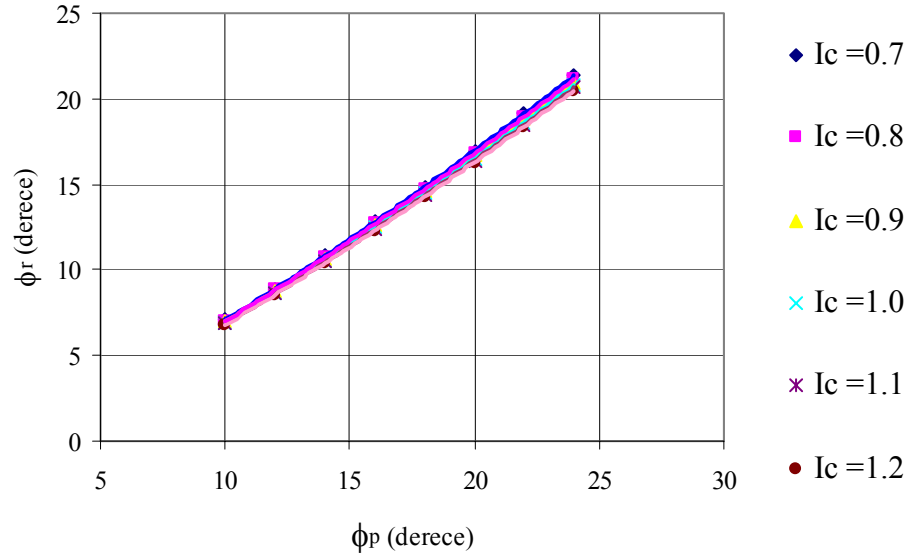
Şekil 5.27 : Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

$$\phi_r = 1.229 * \phi_p^{1.021} * I_p^{-0.13} \quad (5.27)$$

Ayrıca regresyon analizleri sonucunda elde edilen grafik bağıntı incelendiğinde ϕ_r 'nin pik kayma mukavemeti ile doğru plastisite indisi ile ters orantılı olduğu açıkça görülmektedir.

5.2.10 Kalıcı kayma mukavemeti açısının pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi ile değişimi

Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisinin regresyon analizleri ile incelenen ikili ilişkisi Şekil 5.28'de gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde farklı kıvam indisi değerleri için $\phi_r - \phi_p$ eğrilerinin önemli bir değişiklik göstermediği görülmektedir. Dolayısıyla ikili ilişkilere bakıldığında ϕ_r 'nin belirlenmesinde, kıvam indisinin pik kayma mukavemetine göre etkisinin önemsiz olduğu söylenebilir.



Şekil 5.28 : Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile ϕ_r ile pik kayma mukavemeti açısı ve kıvam indisi arasındaki ilişkinin incelenmesi

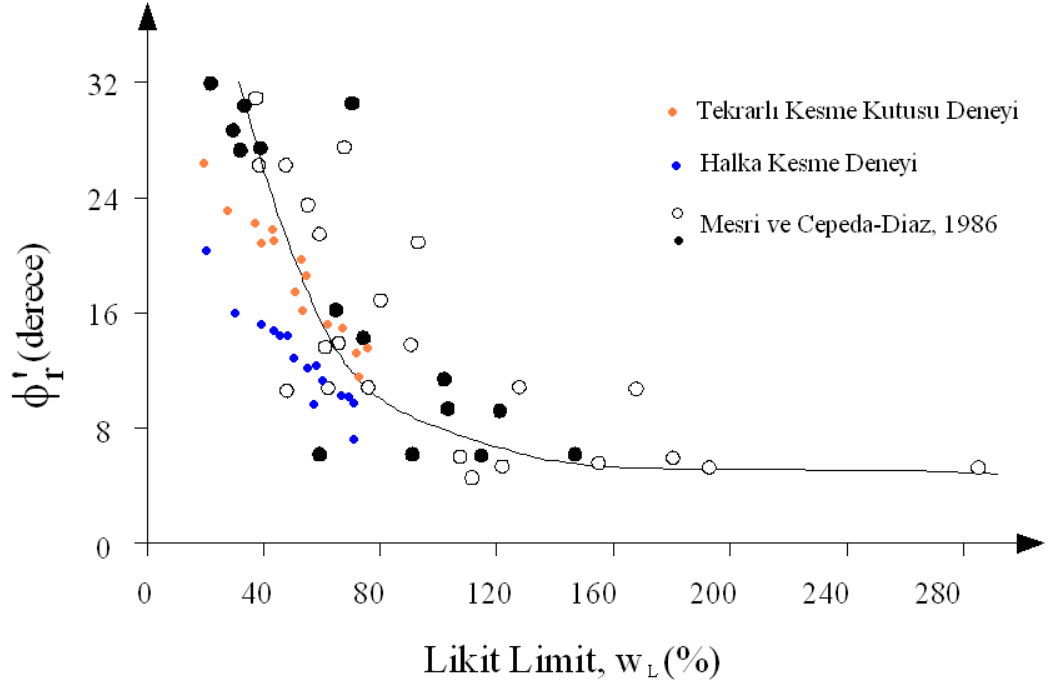
Regresyon analizleri sonucunda aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir. Bağıntı incelendiğinde artan ϕ_p değerleri için ϕ_r 'nin arttığı ayrıca kıvam indisinin artmasıyla ϕ_r değerinin azaldığı anlaşılmaktadır.

$$\phi_r = 0.379 * \phi_p^{1.260} * I_C^{-0.076} \quad (5.28)$$

5.3 HALKA KESME VE TEKRARLI KESME KUTUSU DENEY SONUÇLARININ GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti açısı değerlerinin endeks özellikleri ile değişimi geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılmış ve verilerin geçmiş çalışmalarla uygunluk gösterdiği belirlenmiştir.

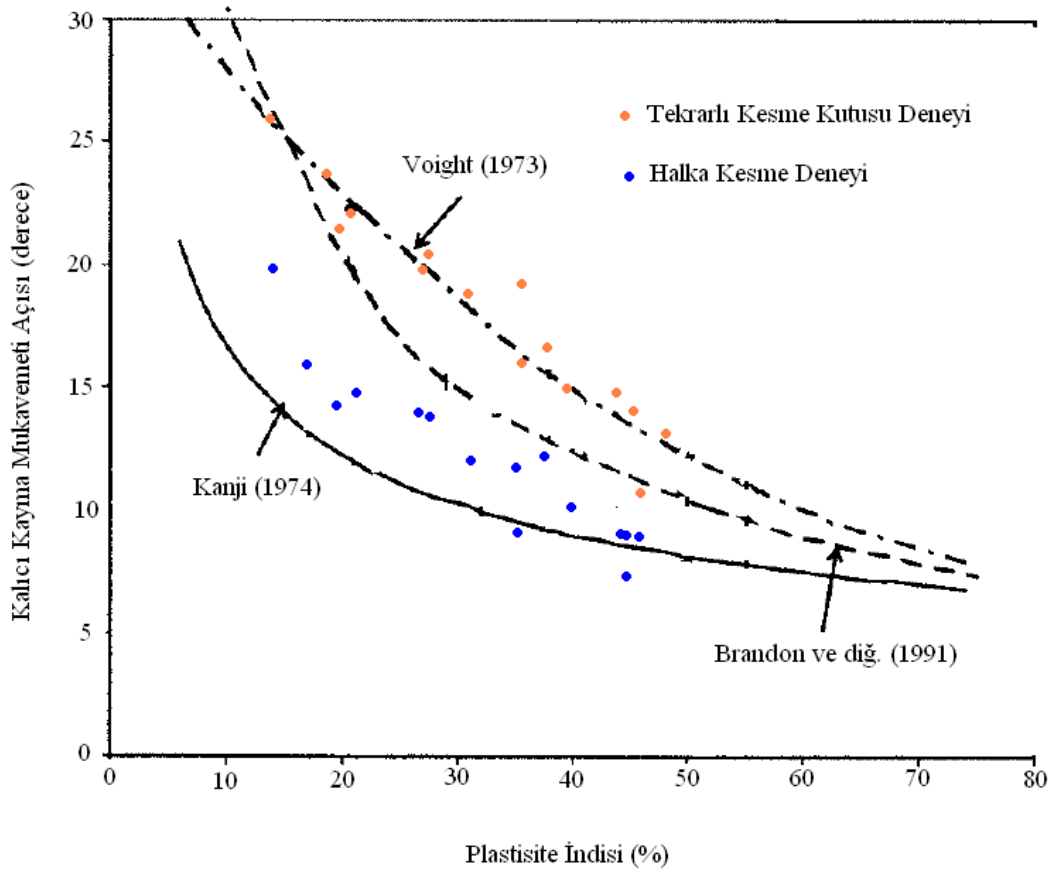
Mesri ve Cepeda-Diaz (1986) tarafından kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki ilişkiyi irdelemek amacıyla aşırı konsolide killeri üzerinde düşük kesme hızında (0.0005mm/dak) tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Mesri ve Cepeda-Diaz'ın (1986) elde ettikleri kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limitle değişimini gösteren grafik üzerine bu çalışmada halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen veriler yerleştirilmiştir (Şekil 5.29).



Şekil 5.29 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişiminin literatür ile karşılaştırılması

Şekilden de görüldüğü gibi gerek halka kesme deney sonuçlarının gerek ise tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının likit limit ile değişimi Mesri ve Cepeda-Diaz (1986) eğrisi ile benzer bir davranış göstermektedir.

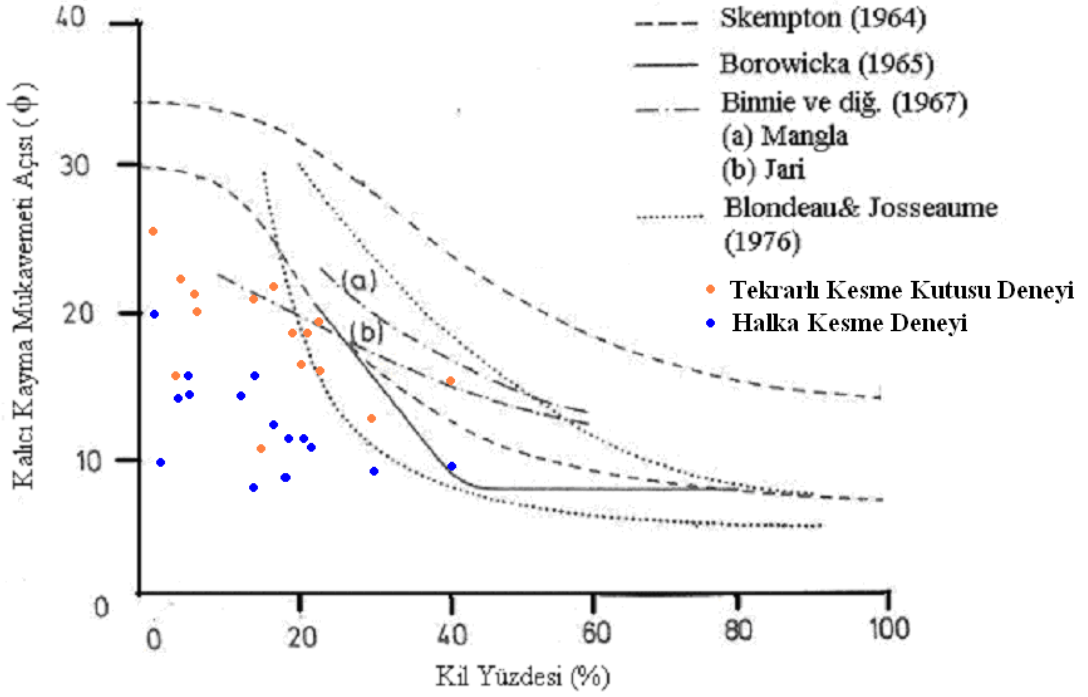
Dewoolkar ve Huzjak (2005), plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Farklı özelliklere sahip zeminler üzerinde yaptıkları halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonuçlarını geçmiş çalışmalardaki grafikler ve bağıntılarla karşılaştırmışlardır. Dewoolkar ve Huzjak'ın elde ettikleri kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimini gösteren grafik ile bu çalışma kapsamında elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları bir grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 5.30).



Şekil 5.30 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişiminin literatür ile karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde halka kesme deney sonuçlarının Kanji (1974) ve Brandon ve diğ. (1991) eğrileri arasında kaldığı ve artan plastisite indisi değerleri ile birlikte bu eğrilere benzer bir davranış içerisinde olduğu belirlenmiştir. Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ise, Voight (1973) tarafından tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları kullanılarak elde edilmiş eğri ile çok büyük oranda uyum gösterdiği açıkça görülmektedir.

Lupini ve diğ. (1981), kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisini incelemiş geçmiş çalışmaları bir grafikte toplayarak kalıcı kayma mukavemetinin kil yüzdesi ile değişimini göstermiştir. Grafiğin bu çalışma kapsamında yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile karşılaştırması Şekil 5.30'da gösterilmektedir.



Şekil 5.31 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişiminin literatür ile karşılaştırılması

Şekil incelendiğinde halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyi verilerinin geçmiş çalışmalarda elde edilen eğrilerin altında kaldığı ve dolayısı ile daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Fakat gerek halka kesme gerek ise tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının geçmiş çalışmalardan elde edilen eğrilerle benzer davranış gösterdiği açıkça görülmektedir.

6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Fisürlü veya aşırı konsolide kil şevlerin stabilite hesaplarında ve bu tür zeminlerde yapılacak mühendislik yapılarının tasarımında kalıcı kayma mukavemeti parametreleri büyük önem kazanmaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti büyük deformasyonlar sonucu oluştuğundan, göçme sonucu oluşan yüzeylerde mukavemetin kalıcı kayma mukavemeti değerinde olduğu ya da gittikçe bu değere yaklaşmakta olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla zeminlerde, deformasyonla değişmeyen ve sabit olarak kalan en küçük kayma gerilmesinin değerine kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir.

Kalıcı kayma mukavemetini belirlemede kullanılan başlıca deney yöntemleri; kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve halka kesme deneyidir. Zeminlerin kayma

mukavemetini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri arasında üç eksenli basınç deneyi en gelişmişlerinden biridir. Fakat bu deneylerde, numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı vardır. Aynı şekilde kesme kutusu deneyi de çok yaygın olarak kullanılmakla beraber çok sınırlı bir deplasmana izin verebilmektedir. Bu nedenle zeminlerin büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetlerini belirlemede, halka kesme deneyleri daha kullanışlı olmaktadır. Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini etkileyen başlıca faktörler efektif normal gerilme, kesme hızı, zemin yapısı ve minerolojidir.

Bu çalışma kapsamında endeks özellikleri belirlenen birçok numunenin arasından seçilen farklı endeks özelliklerine sahip 15 numune üzerinde halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Standart proktor sıkılığında hazırlanan numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri 0.035 mm/dak, halka kesme deneyleri ise 25 mm/dak kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa normal gerilmeler altında tekrarlanmış halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri içeren 15 set deney yapılmıştır. Yapılan çalışma ve analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Artan likit limit, plastik limit, kil yüzdesi ve plastisite indisi ile kalıcı mukavemet açısı azalmaktadır.
2. Halka kesme deney verileri regresyon analizleri kullanılarak incelenmiş ve kalıcı kayma mukavemeti açısının endeks özellikleri ile ikili ilişkileri belirlenmiştir.
3. Halka kesme deney verileri için yapılan tekil ve ikili ilişkileri belirleyen analizler tekrarlı kesme kutusu deney verileri için de tekrarlanmış ve uygun bağıntılar elde edilmiştir.
4. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri, halka kesme deneylerine göre daha yüksek mukavemet parametreleri vermektedir.
5. Deney verileri üzerinde regresyon analizleri yapılmış ve ikili ilişkiler incelendiğinde kalıcı kayma mukavemeti mekanizmasına hangi endeks özelliklerinin daha etkili olduğu belirlenmiştir.
6. Hem tekrarlı kesme kutusu hem de halka kesme deneylerinden elde edilen pik ve kalıcı kayma mukavemeti değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve pik ve kalıcı değerlerin arasındaki ilişkiyi gösteren pratik bağıntılar elde edilmiştir.

Aktivitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisi olduğu bilinmekle beraber deneylerde kullanılan numunelerin aktivitelerinin çok dar bir alanda değışim göstermesinden dolayı artan aktivite ile kalıcı mukavemet açısındaki düşüş tam anlamıyla gözlenememiştir. Bu nedenle, değışik aktiviteye sahip daha fazla numune üzerinde deneye ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada yapılan halka kesme deneylerinde uygulanan kesme hızı, heyelan durumlarında görülen kayma hızlarından çok yüksek olduğu ve deney esnasında oluşan boşluk suyu basıncı değışimlerini ölçme olanağı bulunmadığı için, halka kesme deney aletinin hızı düşürülmesinde yarar vardır.

Bu çalışmada doğal numuneler ile çalışıldığı için endeks özellikleri belirli ve sınırlı değerler arasında çalışılmıştır. Bağıntıların daha uygun hale revize edilebilmesi için uç noktaların oluşturulabileceği özel karışımlarla deneysel çalışmanın genişletilmesi yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Agung, M.W., S., Sassa, K. and Fukuoka, H.,** 2003. "The evolution of sliding-flow structure under the undrained shearing in the ring shear tests", *Annals of Disas. Prev. Res. Inst Kyoto Univ.*, **No. 46 B**.
- ASTM, D 6773-02.,** 2002. "Standard shear test method for bulk solids using the Schulze ring shear tester", *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM, D 6467.,** 2000. "Standard test method for torsional ring shear test to determine drained residual shear strength of cohesive soils", *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Bardet, J.P.,** 1997. "*Experimental Soil Mechanics*", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Bishop, A.W., Green, G.E., Garga,V.K., Andersen, A., Brown, J.D.,** 1971. "A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength", *Geotechnique*, Vol.**21**, No.4, 273-328.
- Bromhead, E.N.,** 1979. "A simple ring shear apparatus", *Ground Engineering*, **12(5)**, 40-44.
- Bromhead, E.N., and Curtis, R.D.,** 1983. "A comparison of alternative methods of measuring the residual strength of London Clay", *Ground Engineering*, **16 (4)**, 39-41.
- Craig, R.F.,** 1987. "*Soil Mechanics*", Fourth Edition, English Language Book Society / Van Nostrand Reinhold, London.
- Das, B.M.,** 2002. "*Principles of Geotechnical Engineering*", Fifth Edition, Brooks/Cole, Thomson Learning, USA.
- Dewoolkar M.M. and Huzjak, J.R.,** 2005. "Drained Residual Shear Strength of Some Claystones from Front Range, Colorado", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. **131**, No. 12.
- Fearon, R.,** 1999. "Effect of displacement rate on residual shear strength of soils", <http://cvfeller.cv.ic.ac.uk/ruth.html>

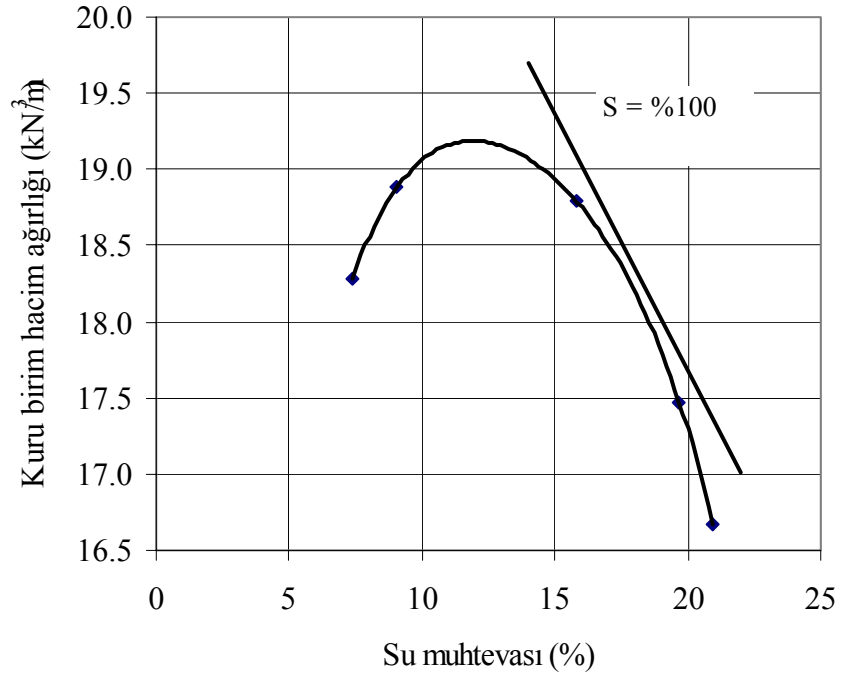
- Gibo, S., Egashira, K., Ohtsubo, M. and Nakamura, S.,** 2002. "Strength recovery from residual state in reactivated landslides", *Geotechnique*, Vol.**52**, No.9, 683-686.
- Hawkins, A.B. and Privett, K.D.,** 1985. "Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils", *Ground Engineering*, page 22-29.
- Head, K.H.,** 1992. "Manual of soil laboratory testing", Vol. **1**, Second Edition, Pentech Press, London.
- Hillman, R.P. and Stark, T.D.,** 2001, "Shear Strength Characteristics of PVC Geomembrane-Geosynthetic Interfaces", *Geosynthetics International*, Vol. **8**, No. 2.
- Kakou, B.G., Shimizu, H. and Nishimura, S.,** 2001. "Residual shear strength of landslide soils by presheared flush testing for stability quantification", <http://www.ejge./2002/Ppr0217/Ppr0217.htm>
- Lemos, L.J.L.,** 2003. "Shear behaviour of pre-existing shear zones under fast loading-insights on the landslide motion", web page address: <http://www.unina2.it/flows2003/flows2003/articoli/lemos.pdf>
- Kamai, T.,** 1998. "Monitoring the process of ground failure in repeated landslides and associated stability assessments", *Engineering Geology* **50**, pp.71-84
- Kenney, T.C.,** 1967. "The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils." Proc., Geotech. Conf., Vol.1, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 123-129
- Koltuk, S.,** 2005. "Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi" , *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lupini, J.F., Skinner, A.E., and Vaughan, P.R.,** 1981. "The drained residual strength of cohesive soils", *Geotechnique*, Vol.**31**, No.2, 181-213.
- Mesri, G. and Abdel-ghaffar, M.E.M.,** 1993. "Cohesion intercept in effective stress-stability analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. **119**, No. 8.
- Mesri, G. and Cepeda-diaz, A.F.,** 1986. "Residual shear strength of clays and shales", *Geotechnique*, Vol.**36**, No.2, 269-274.
- Mesri, G. and Shahien, M.,** 2003. "Residual shear strength mobilized in first time slope failures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Mitchell, J.K.,** 1993. "*Fundamentals of Soil Behaviour*", Second Edition, John Wiley & Sons, New York.

- Seiken INC.**, 1994. “*Ring Shearing Test Apparatus Instruction Manual*”, Model: DTA-138.
- Skempton, A.W.**, 1964. “Long -term stability of clay slopes”, *Geotechnique*, Vol. **14**, No.2, 75-101.
- Skempton, A.W.**, 1970. “First time slides in overconsolidated clays”, *Geotechnique*, Vol.**20**, No.3.
- Skempton, A.W.**, 1985. “Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory”, *Geotechnique*, Vol. **35**, No.1, 3-18.
- Smith, G.N. and Smith, Ian G.N.**, 1998. “*Elements of Soil Mechanics*”, Seventh Edition, Blackwell Science.
- Stark, T.D. and Hisham,T.E.**, 1994. “Drained residual strength of cohesive soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.**120**, No.5.
- Suzuki, M., Tsuzuki, S. and Yamamoto, T.**, 2005. “Physical and chemical index properties of residual strength of various soils”, <http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/561/01.pdf>
- Suzuki, M., Yamamoto, T., Tanikawa, K., Fukuda, J. and Hisanaga, K.**, 2001. “Variation in residual strength of clay with shearing speed”, <http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/521/06.pdf>
- Tiwari, B., Brandon, T.L., Marui, H. and Tuladhar, G.R.**, 2005. “Comparison of residual shear strength from back analysis and ring shear tests on undisturbed and remolded specimens”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. **131**, No. 9.
- Tiwari, B. and Marui, H.**, 2005. “A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with minerological composition”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. **131**, No. 9.
- Towsend, F.C., Gilbert, P.A.**, 1973. “Tests to measure residual strength of some clay shales”, *Geotechnique*, Vol. **23**, 267-271.
- Wang, G. and Sassa, K.**, 2000. “Undrained shear behavior of silty soils in ring shear tests”, <http://lib.jzit.edu.cn/geoeng/PAPERS/SNES/SNES0803.PDF>
- Wedage, A.M.P., Morgenstern, N.R. and Chan, D.H.**, 1998. “A strain rate dependent constitutive model for clays at residual strength”, *Canadian Geotechnical Journal*, **35-2**, page 364-373.
- Wesley, L.D.**, 1977. “Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia”, *Geotechnique*, Vol. **27**, 125-136.
- Wesley, L.D.**, 2003. “Residual strength of clays and correlations using Atterberg Limits”, *Geotechnique*, Vol. **53**, No.7, 669-672.

EK A

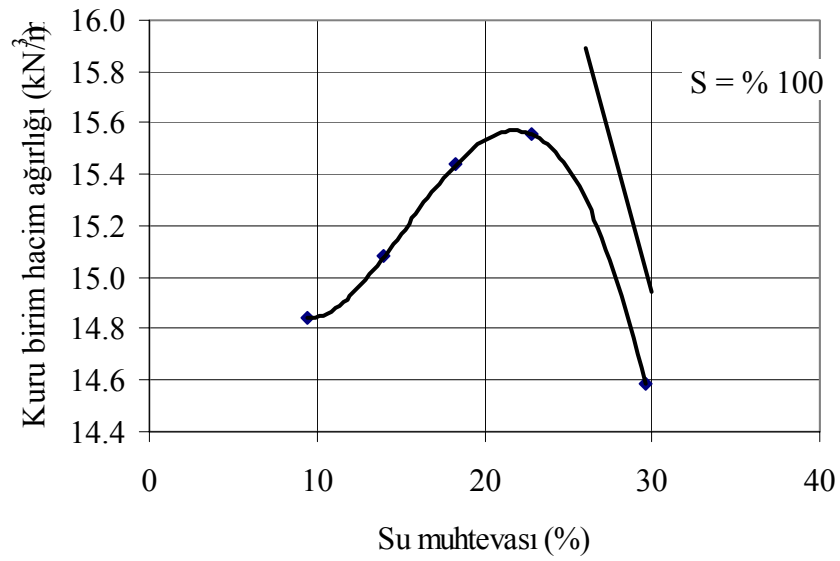
A.1 KOMPAKSİYON DENEYLERİ

A.1.1 N-1 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



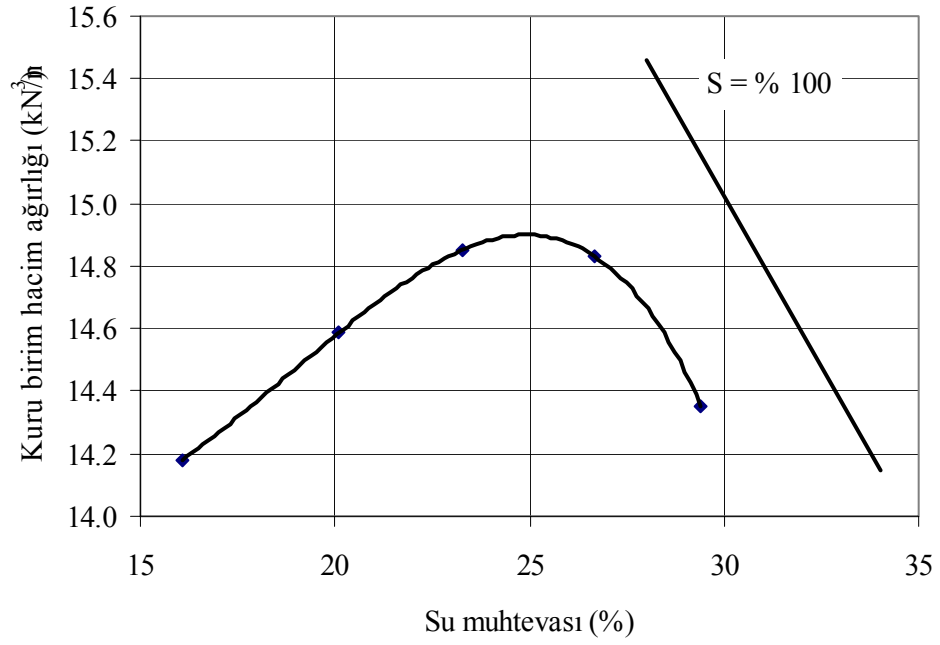
Şekil A.1 : N-1 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.2 N-2 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



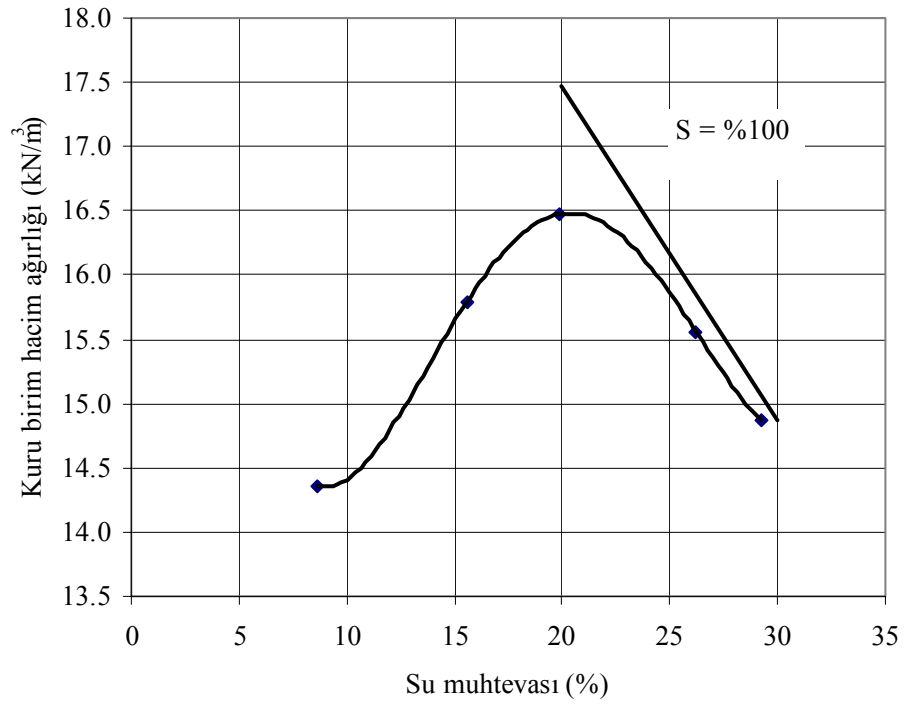
Şekil A.2 : N-2 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.3 N-3 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



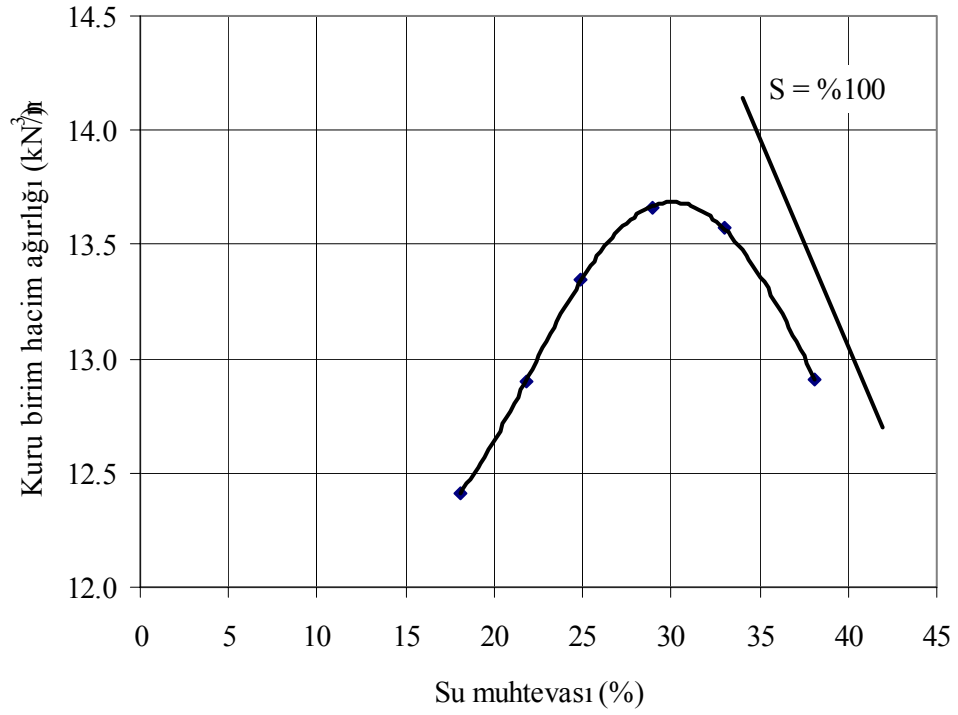
Şekil A.3 : N-3 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.4 N-4 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



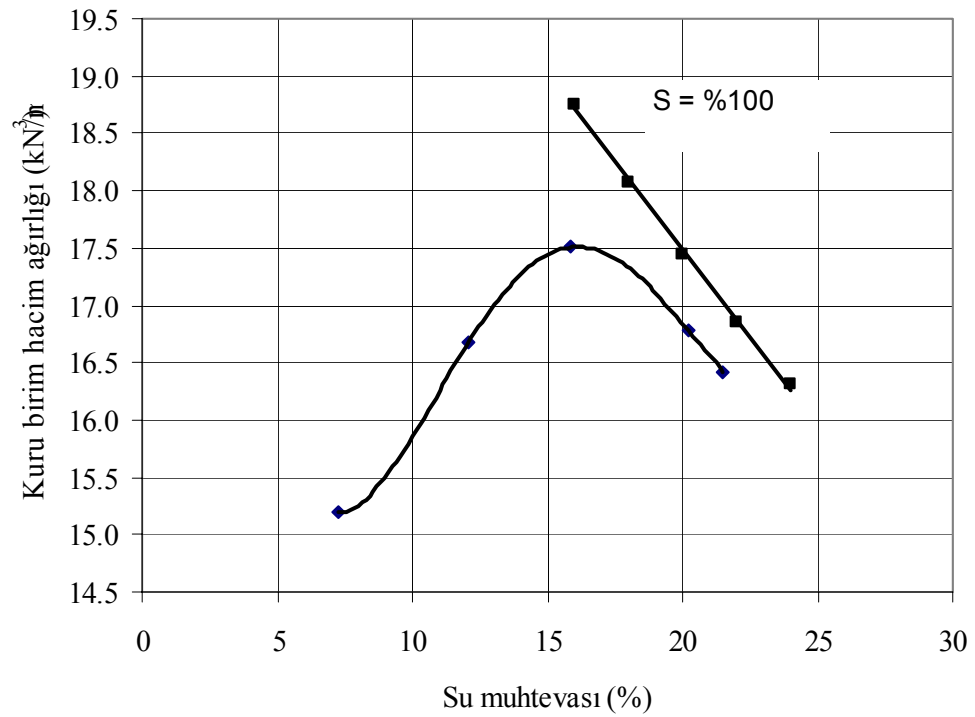
Şekil A.4 : N-4 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.5 N-5 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



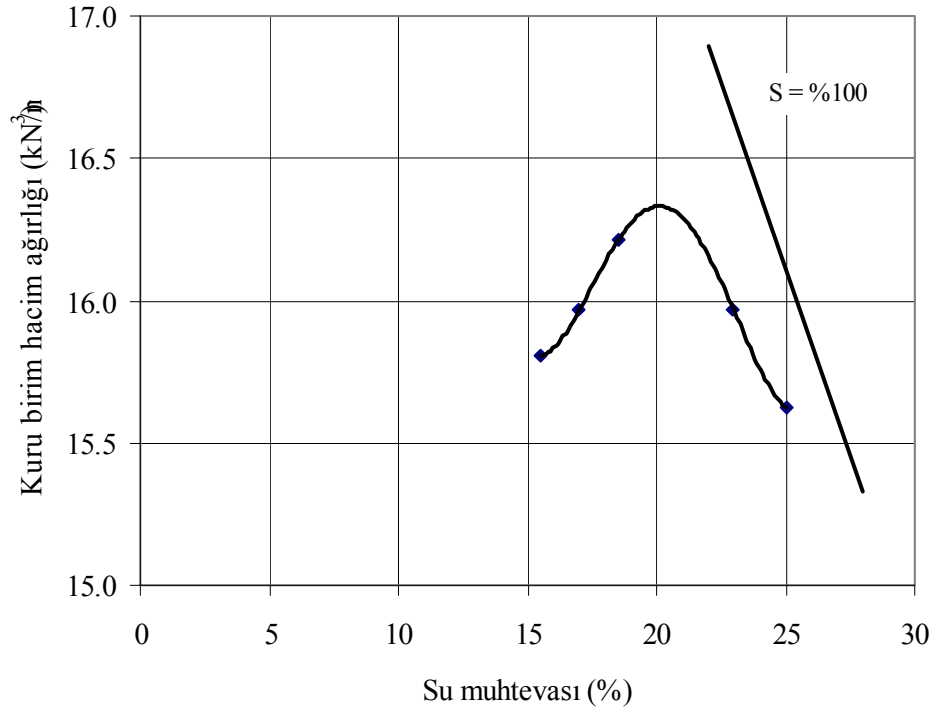
Şekil A.5 : N-5 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.6 N-6 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



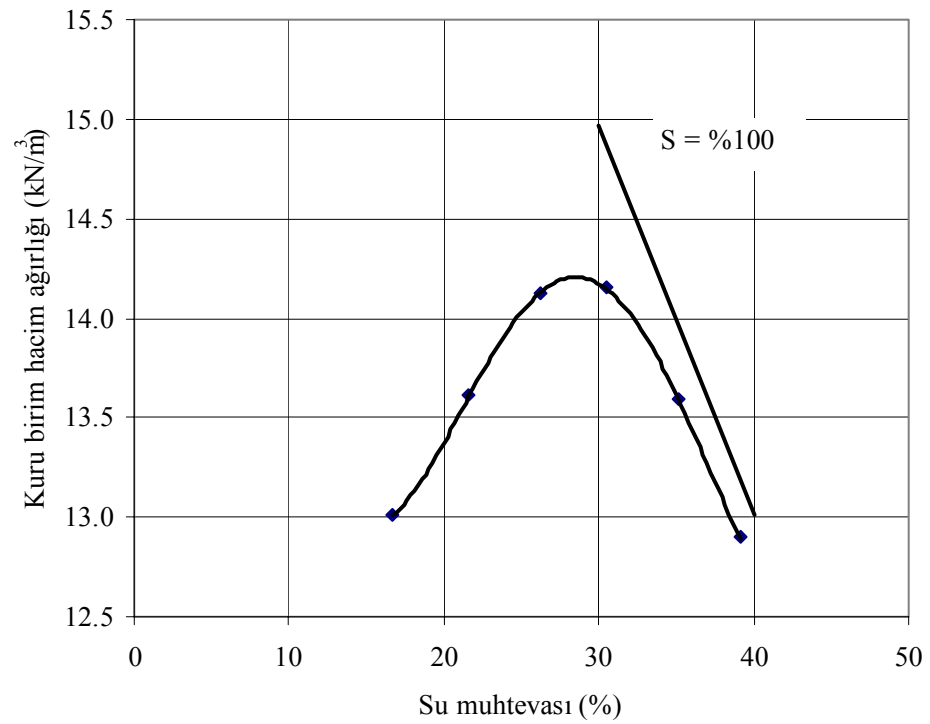
Şekil A.6 : N-6 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.7 N-7 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



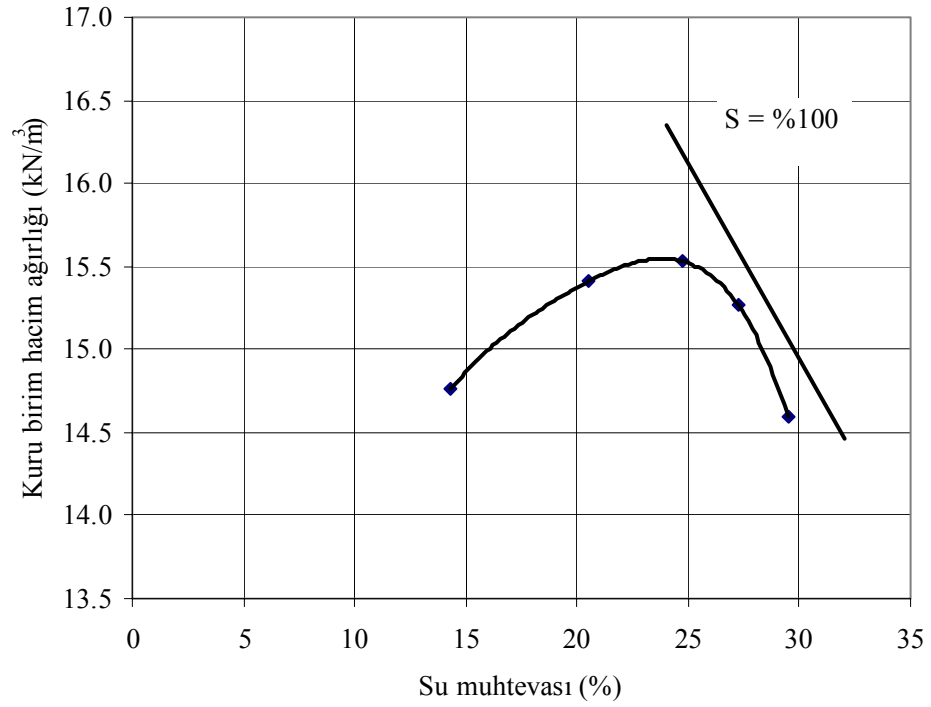
Şekil A.7 : N-7 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.8 N-8 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



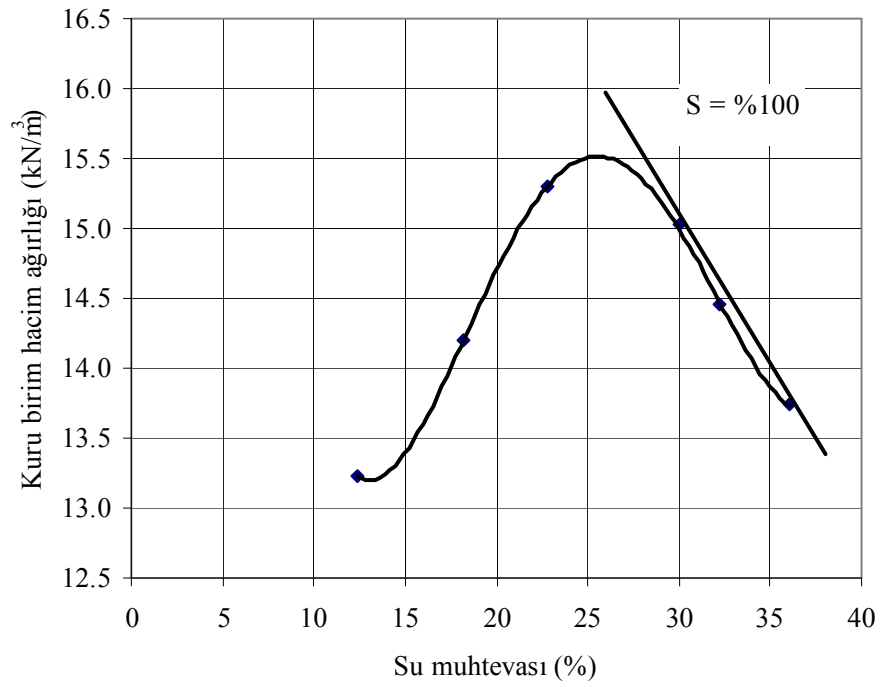
Şekil A.8 : N-8 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.9 N-9 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



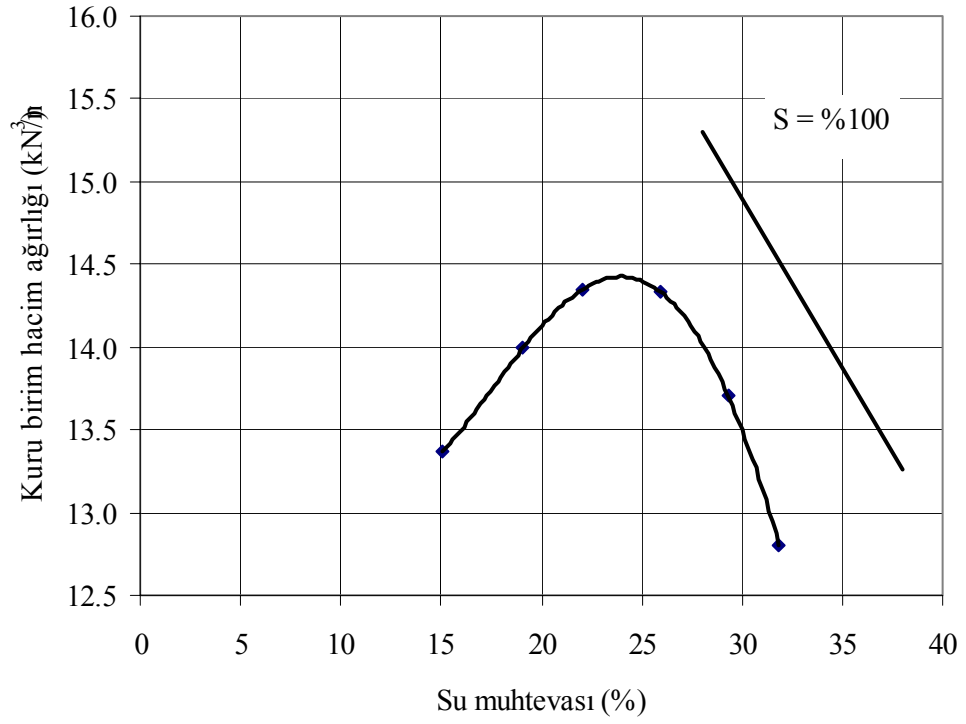
Şekil A. 9 : N-9 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.10 N-10 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



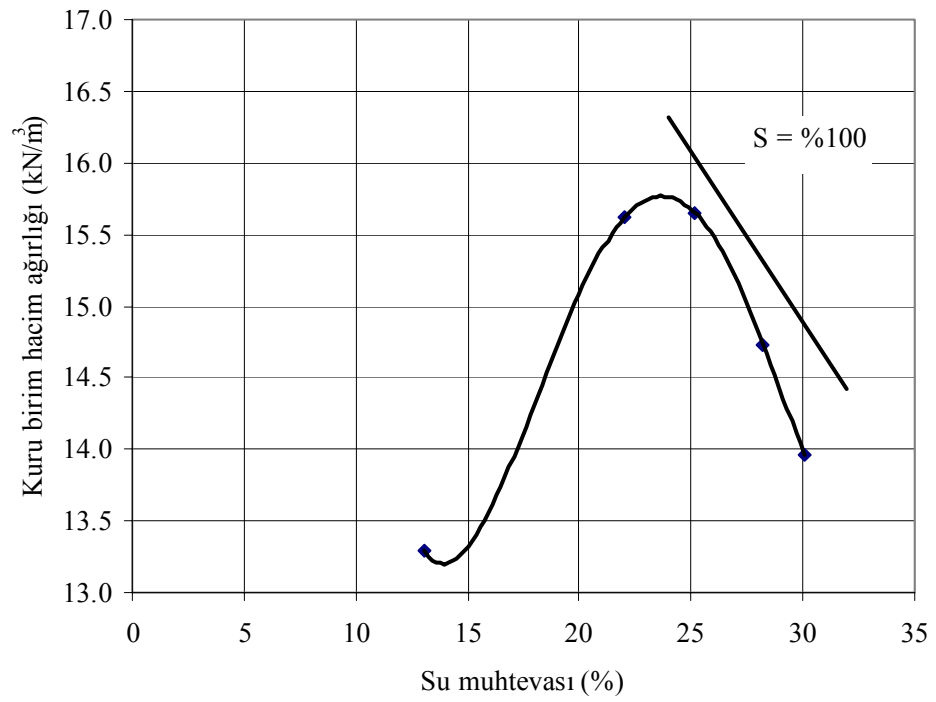
Şekil A. 10 : N-10 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.11 N-11 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



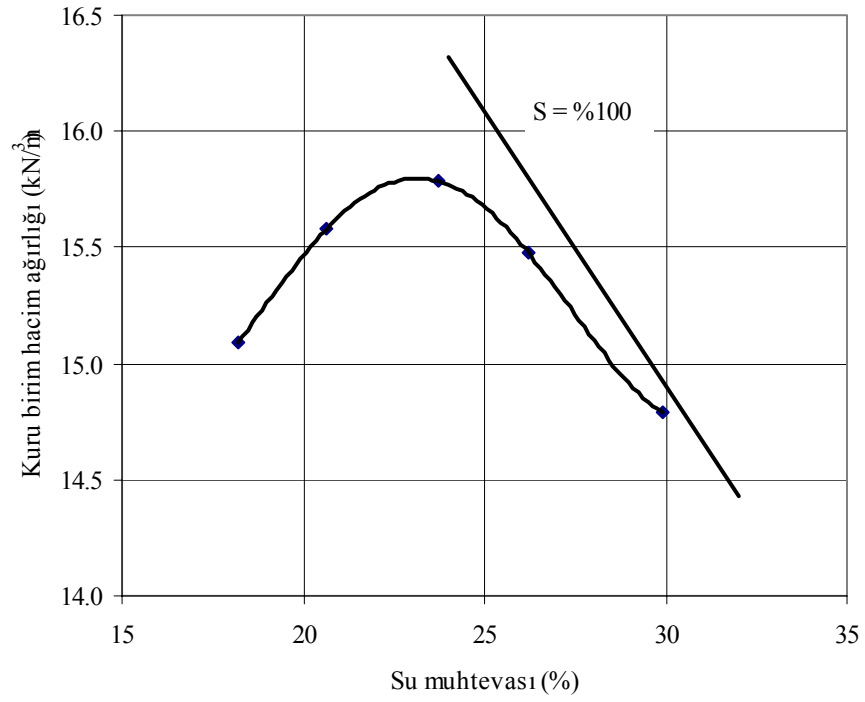
Şekil A. 11 : N-11 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.12 N-12 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



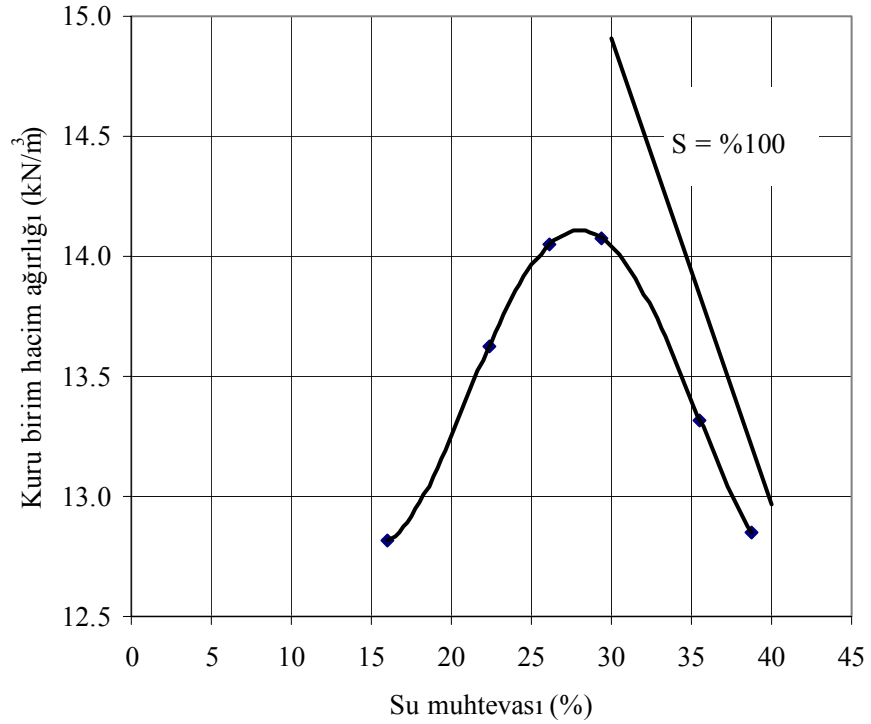
Şekil A. 12 : N-12 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.13 N-13 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



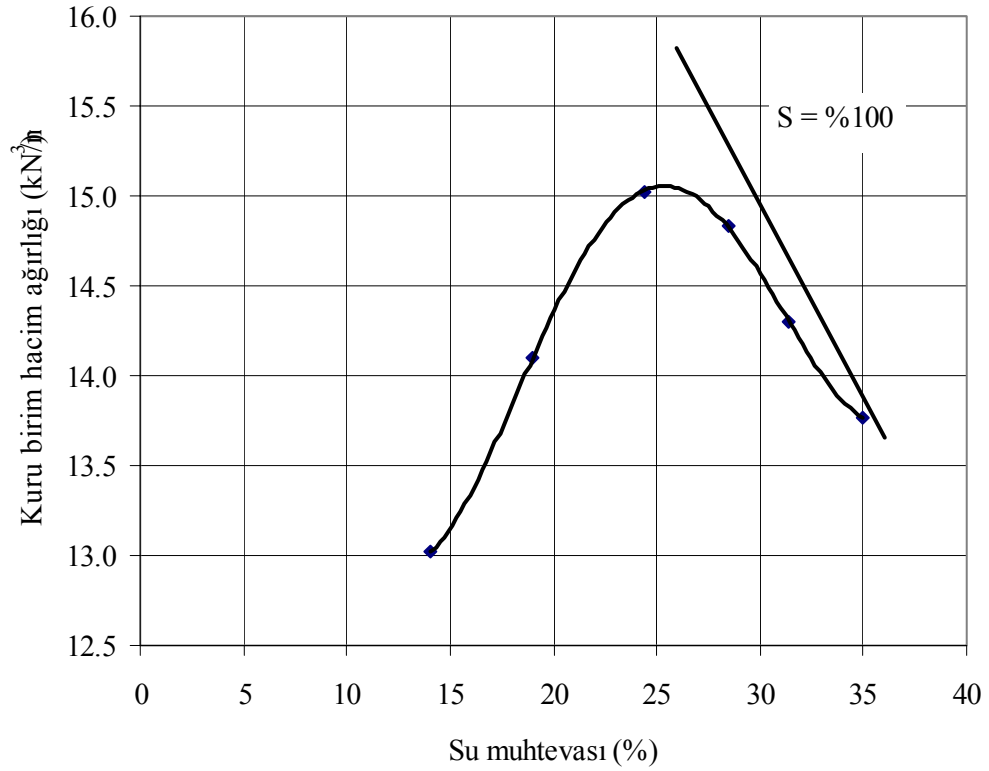
Şekil A.13 : N-13 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.14 N-14 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



Şekil A.14 : N-14 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1.15 N-15 numunesine ait kompaksiyon deneyi sonuçları



Şekil A. 15 : N-15 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.1 KOMPAKSİYON DENEYLERİ

Bu bölümde deneysel çalışmalar kapsamında yapılan ıslak elek analizi ve hidrometre deney sonuçlarından elde edilen granülometri eğrilerine yer verilmektedir. Böylece deney numunelerinin dane çapı dağılımı ve kil yüzdesi saptanmış ve elde edilen veriler kayma mukavemeti parametreleri ile karşılaştırılmıştır.

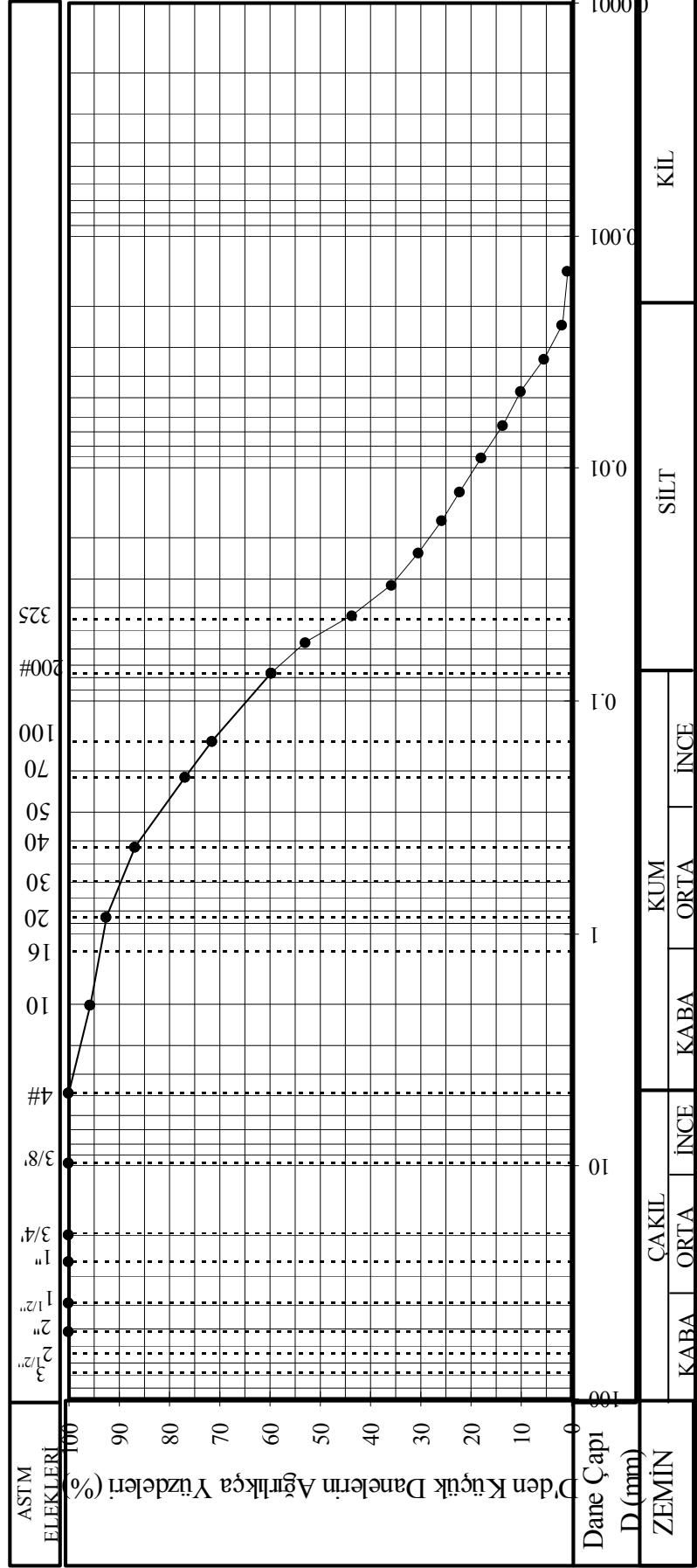
I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :

PROJENİN İSMİ:

DENEY TARİHİ:



GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :
PROJENİN İSMİ:



GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

PROJENİN İSMİ:

ASTM ELEKLERİ	D'den Küçük Danelelerin Ağırlıkça Yüzdeleri (%)										Dane Çapı D (mm)										ZEMİN										KİL									
	ÇAKIL					KUM					SİLT					KİL																								
	KABA	ORTA	İNCE	KABA	ORTA	İNCE	KABA	ORTA	İNCE	KUM (%)	SİLT (%)	KİL (%)	D ₆₀	D ₃₀	C _u	C _c																								
N-3										7	60	33																												

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

DENEY TARİHİ:



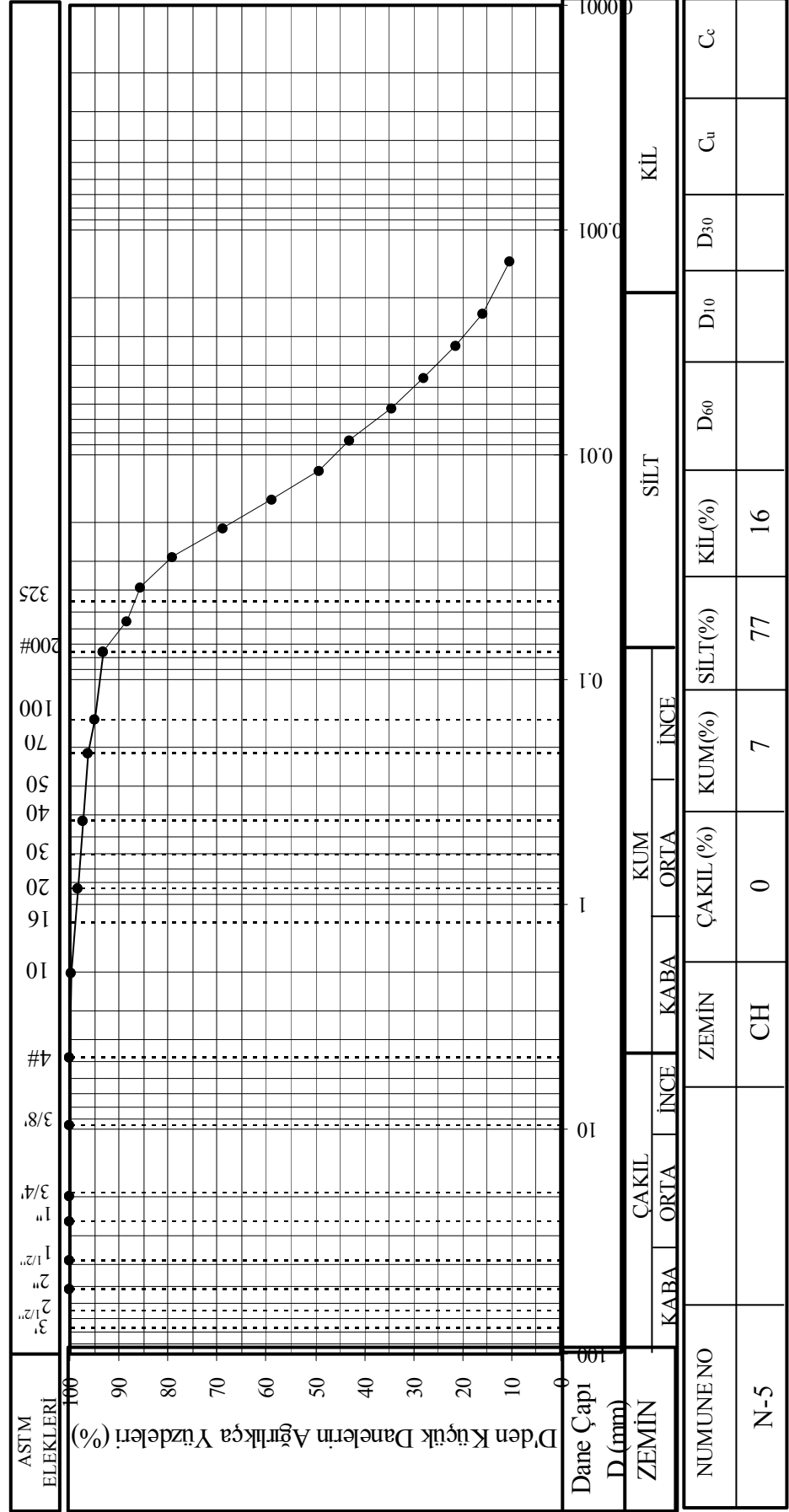
I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :

PROJENİN İSMİ:

DENEY TARİHİ:



GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

PROJENİN İSMİ:

ASTM ELEKLERİ	D'den Küçük Danelemin Ağırlıkça Yüzdelemleri (%)										SİLİT					KİL						
	D (mm)										KİL			SİLİT			KİL					
											ÇAKİL			KİL			SİLİT			KİL		
	KABA	ORTA	İNCE	KABA	ORTA	İNCE	KABA	ORTA	İNCE	KİL	SİLİT	KİL	SİLİT	KİL	SİLİT	KİL						
NUMUNE NO	ZEMİN										ÇAKİL (%)			KİL (%)			SİLİT (%)			KİL (%)		
N-6	CL										0			28			67			5		

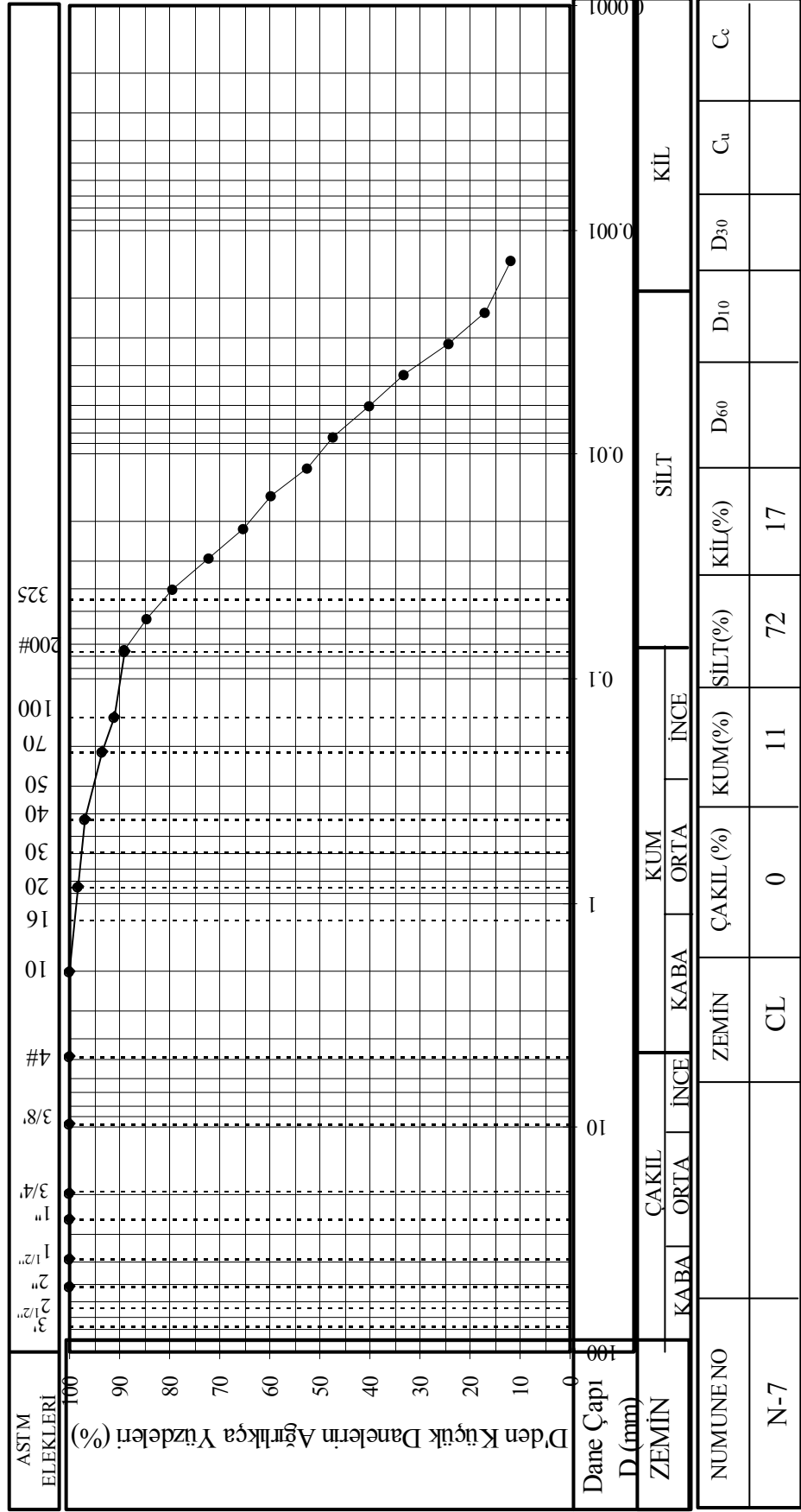
I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :

PROJENİN İSMİ:

DENEY TARİHİ:



GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

PROJENİN İSMİ:

Dane Çapı D (mm)	D'den Küçük Danelerin Ağırlıkça Yüzdeleeri (%)
0.075	0
0.085	10
0.095	20
0.105	30
0.115	40
0.125	50
0.135	60
0.145	70
0.155	80
0.165	90
0.175	95
0.185	98
0.195	100
0.205	100
0.215	100
0.225	100
0.235	100
0.245	100
0.255	100
0.265	100
0.275	100
0.285	100
0.295	100
0.305	100
0.315	100
0.325	100
0.335	100
0.345	100
0.355	100
0.365	100
0.375	100
0.385	100
0.395	100
0.405	100
0.415	100
0.425	100
0.435	100
0.445	100
0.455	100
0.465	100
0.475	100
0.485	100
0.495	100
0.505	100
0.515	100
0.525	100
0.535	100
0.545	100
0.555	100
0.565	100
0.575	100
0.585	100
0.595	100
0.605	100
0.615	100
0.625	100
0.635	100
0.645	100
0.655	100
0.665	100
0.675	100
0.685	100
0.695	100
0.705	100
0.715	100
0.725	100
0.735	100
0.745	100
0.755	100
0.765	100
0.775	100
0.785	100
0.795	100
0.805	100
0.815	100
0.825	100
0.835	100
0.845	100
0.855	100
0.865	100
0.875	100
0.885	100
0.895	100
0.905	100
0.915	100
0.925	100
0.935	100
0.945	100
0.955	100
0.965	100
0.975	100
0.985	100
0.995	100
1.005	100
1.015	100
1.025	100
1.035	100
1.045	100
1.055	100
1.065	100
1.075	100
1.085	100
1.095	100
1.105	100
1.115	100
1.125	100
1.135	100
1.145	100
1.155	100
1.165	100
1.175	100
1.185	100
1.195	100
1.205	100
1.215	100
1.225	100
1.235	100
1.245	100
1.255	100
1.265	100
1.275	100
1.285	100
1.295	100
1.305	100
1.315	100
1.325	100
1.335	100
1.345	100
1.355	100
1.365	100
1.375	100
1.385	100
1.395	100
1.405	100
1.415	100
1.425	100
1.435	100
1.445	100
1.455	100
1.465	100
1.475	100
1.485	100
1.495	100
1.505	100
1.515	100
1.525	100
1.535	100
1.545	100
1.555	100
1.565	100
1.575	100
1.585	100
1.595	100
1.605	100
1.615	100
1.625	100
1.635	100
1.645	100
1.655	100
1.665	100
1.675	100
1.685	100
1.695	100
1.705	100
1.715	100
1.725	100
1.735	100
1.745	100
1.755	100
1.765	100
1.7	

ZEMİN	ÇAKIL			KUM			SİLT			KİL		
	KABA	ORTA	İNE	KABA	ORTA	İNE	KUM(%)	SİLT(%)	KİL(%)	D ₆₀	D ₃₀	C _u
NUMUNE NO				ZEMİN	ÇAKIL (%)	KUM (%)						C _c
N-8				CH	0	0		59	41			

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

PROJENİN İSMİ:

ASTM ELEKLERİ	D'den Küçük Danelelerin Ağırlıkça Yüzde (%)										ZEMİN					KİL							
											ÇAKIL		KUM			SİLT							
											KABA	ORTA	İNCE	KABA	ORTA	İNCE	KİL(%)	SİLT(%)	D ₆₀	D ₃₀	C _u	C _c	
N-9	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	0	18	70	12								

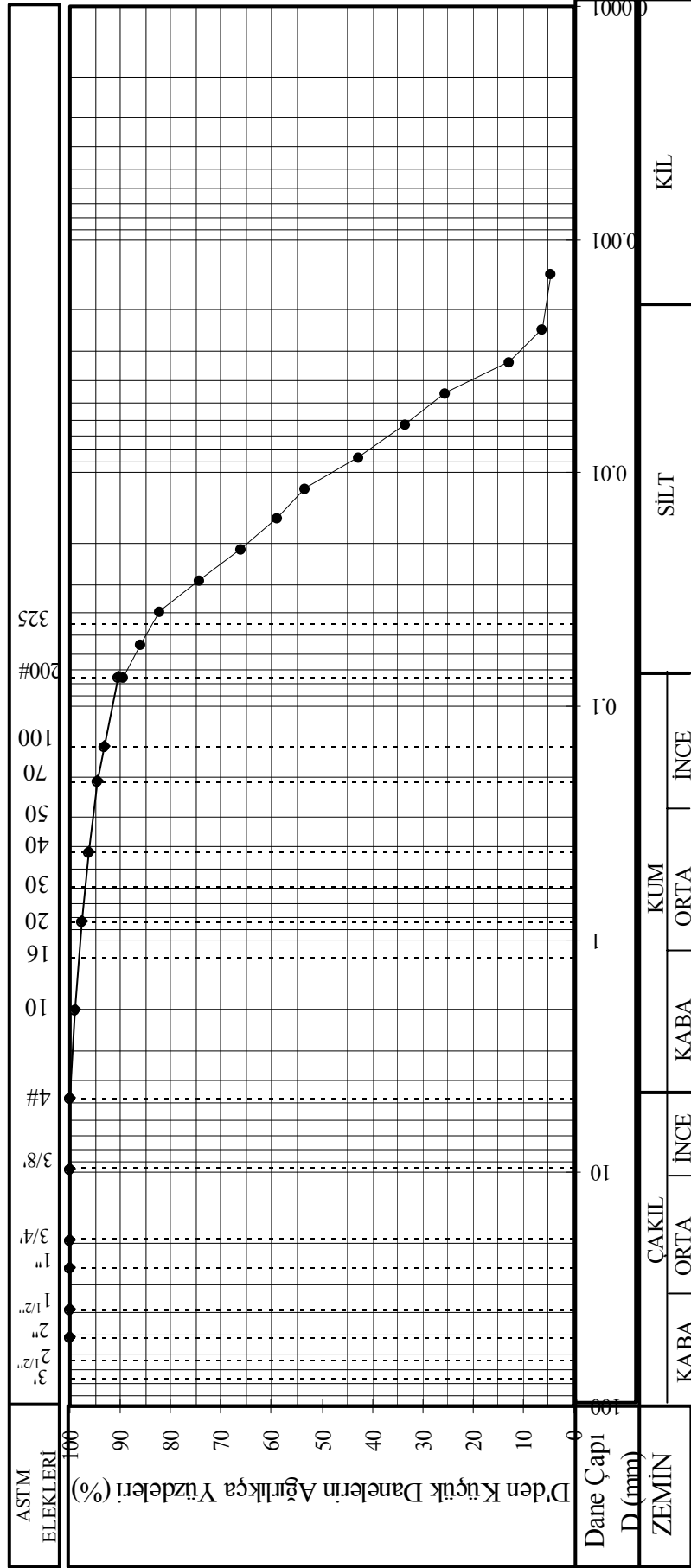
I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

DENEY TARİHİ:

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :

PROJENİN İSMİ:



NUMUNE NO	ZEMİN	ÇAKIL (%)	KUM (%)	SİLT (%)	KİL (%)	D ₃₀	C _u	C _c
N-10	CH	0	10	84	6			

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

DENEY TARİHİ:



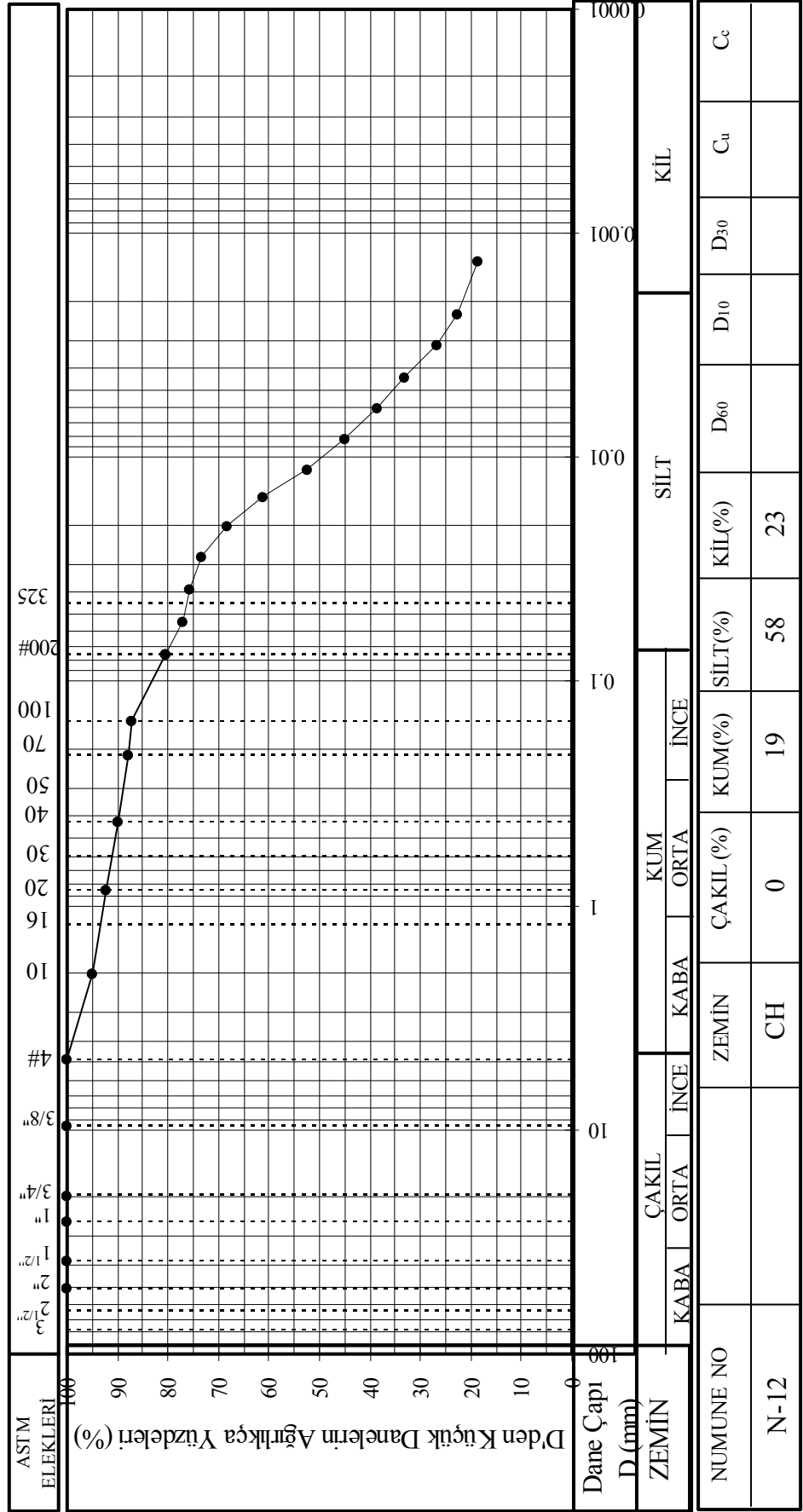
I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :

PROJENİN İSMİ:

DENEY TARİHİ:



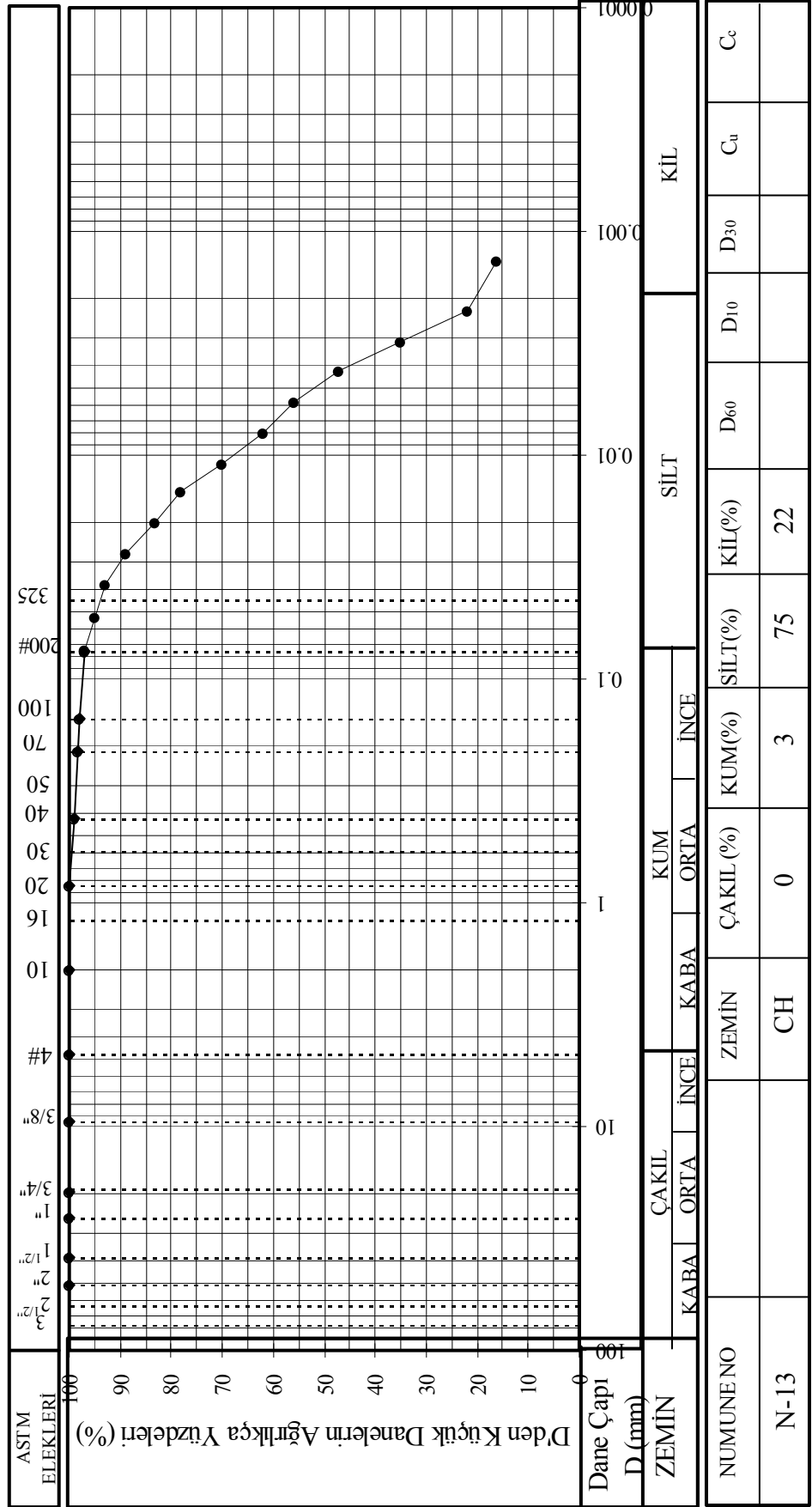
I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

DENEY TARİHİ:

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :

PROJENİN İSMİ:

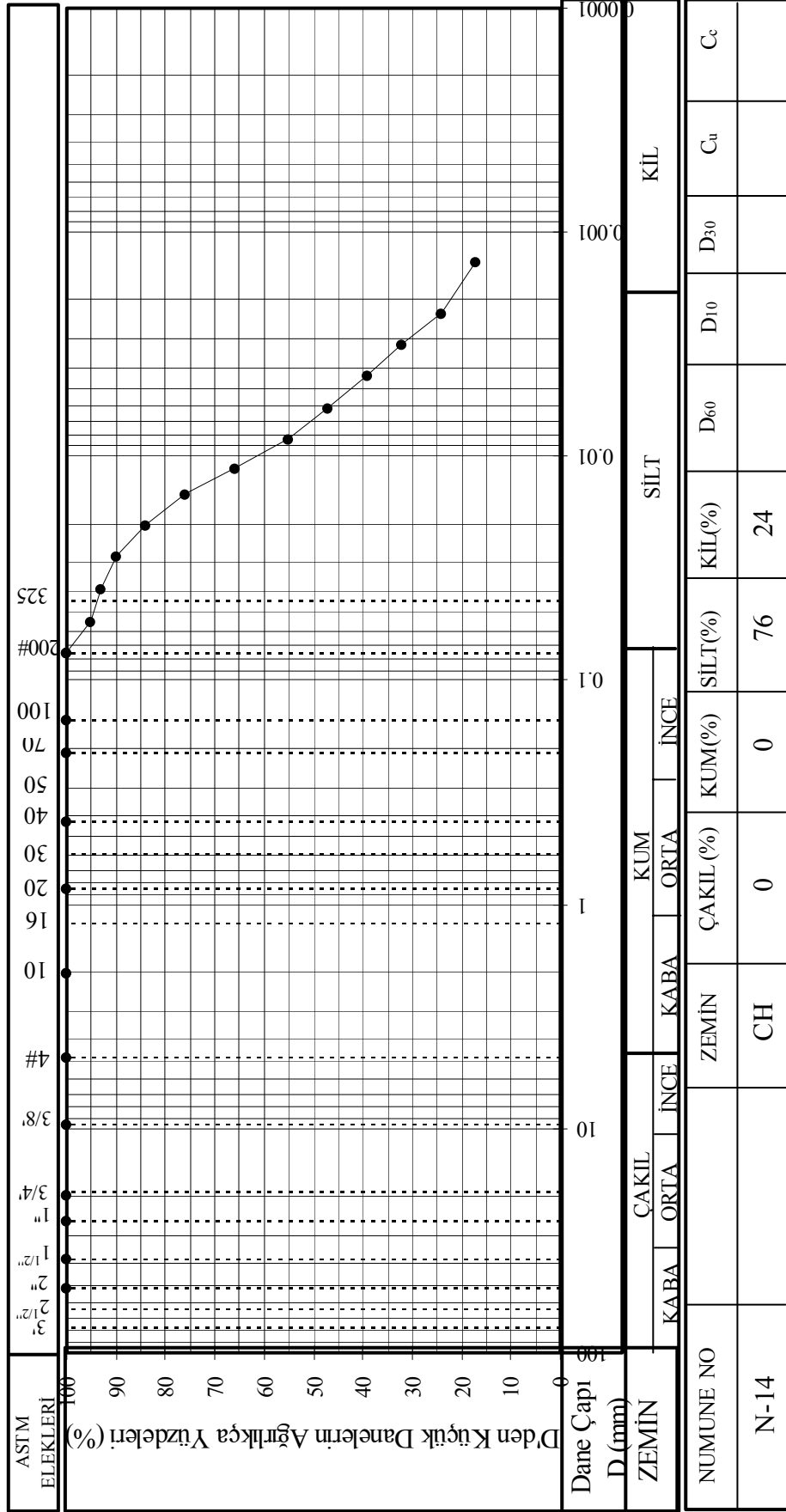


I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :
PROJENİN İSMİ:

DENEY TARİHİ:

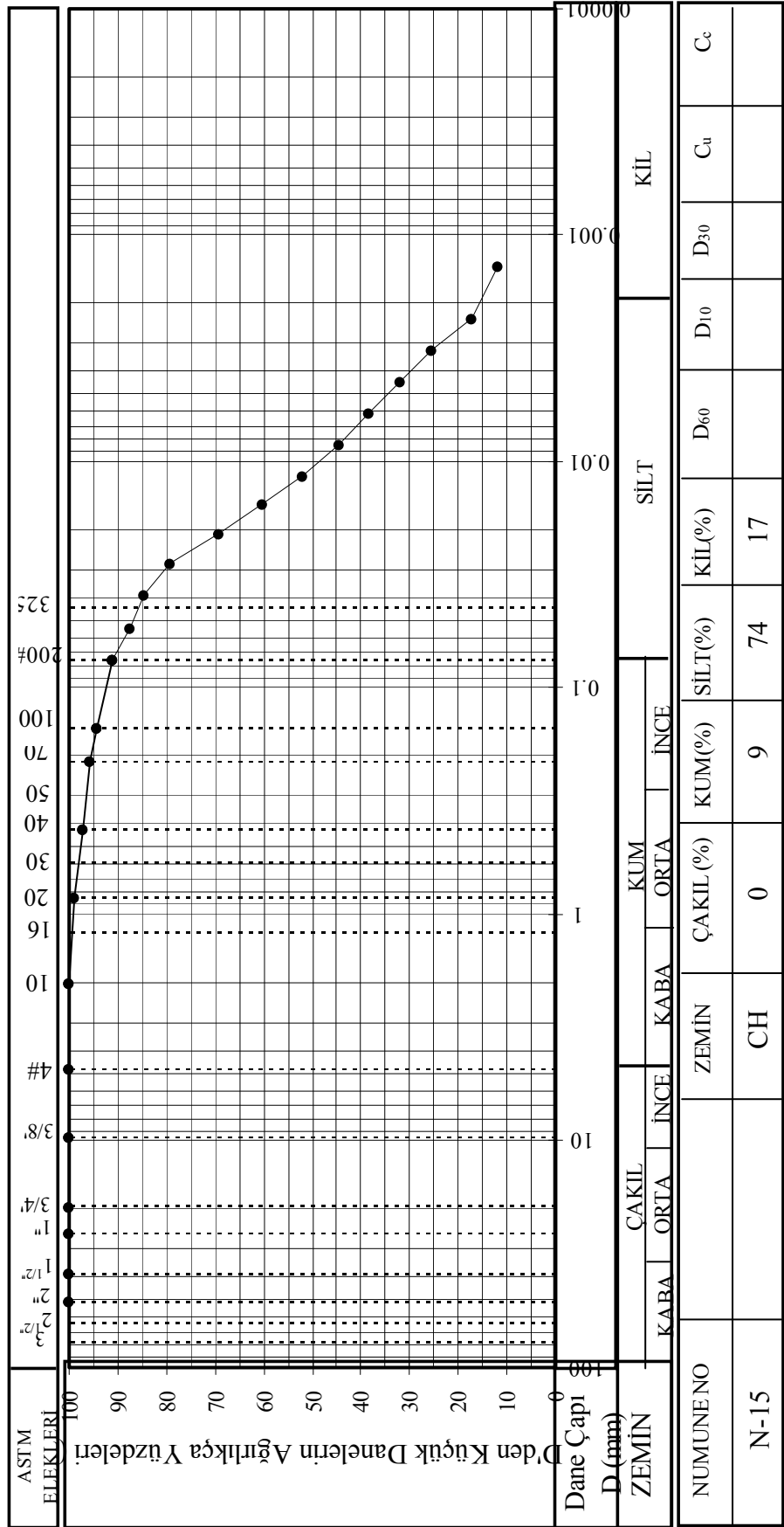


I.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

NUMUNENİN GELDİĞİ YER :
PROJENİN İSMİ:

DENEY TARİHİ:

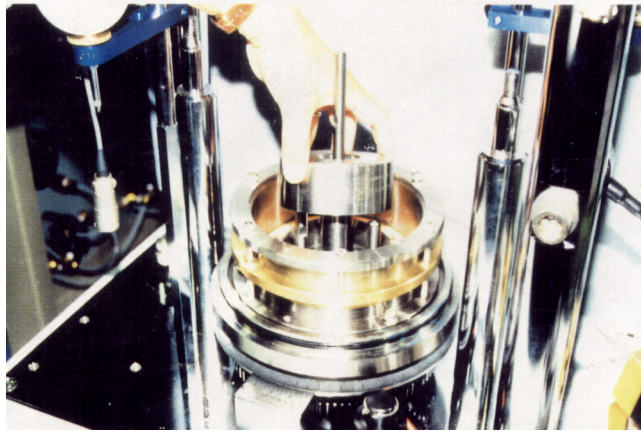


EK B

B.1 Deney Aletinin Montajı ve Deneyin Yapılışı

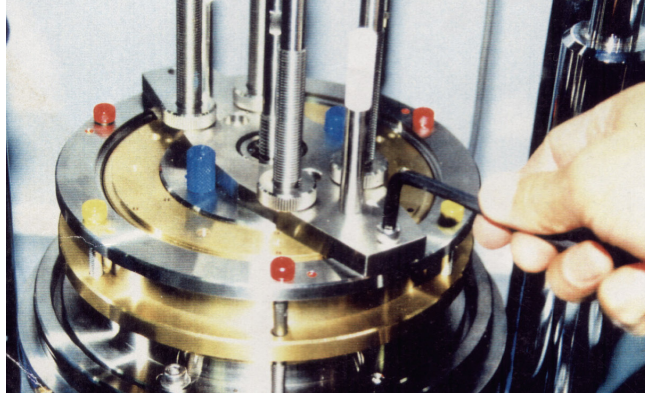
Bu çalışma kapsamında halka kesme deneyleri İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan Seiken inco./DTC-138 model halka kesme deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Halka kesme deneyleri 25 mm/dak. kesme hızı ile yapılmıştır. Deneysel çalışma öncesi belirlenen numune hazırlama yöntemi ile deney numuneleri hazırlandıktan sonra aşağıda anlatılan adımlar takip edilerek halka kesme deney aleti kurulur ve deney gerçekleştirilir.

- Sarı renkli vidalar vasıtasıyla kılavuz ve üst dış ring birbirine tutturularak alt dış ring üzerine yerleştirilir. Daha sonra iç ring mavi renkli pimler ile sisteme monte edilir. Bu işlemden sonra en alt dış ring, sarı renkli ve en üst dış ring kırmızı renkli vidalarla birbirine tutturulur (Şekil B.1).



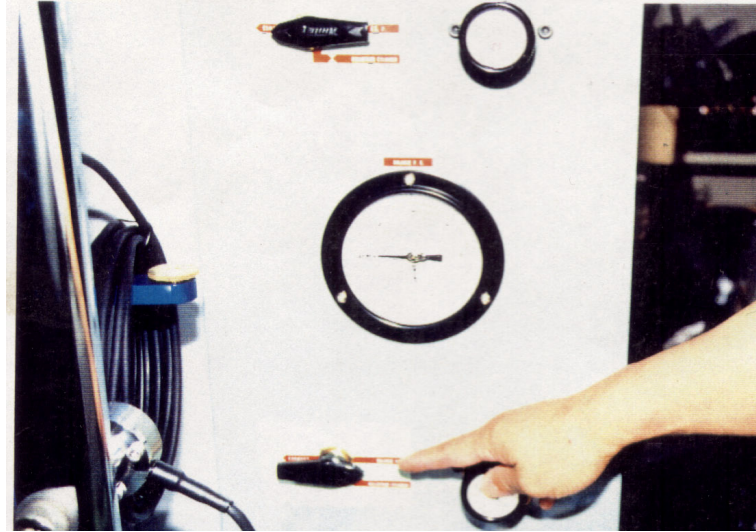
Şekil B.1 : İç ringin montajı

- Deney numunesinin temas edeceği yüzeyler vazelinlendikten sonra halka şeklinde hazırlanmış numune kesme hücresinin içerisine yerleştirilir. Yalnız bu işlemin öncesinde ve sonrasında numunenin alt ve üst kısmına suya doymun hale getirilmiş poroz kağıt konulması gerektiği unutulmamalıdır. Daha sonra üst iç ring ile çekme metali beyaz vidalarla birbirine tutturulduktan sonra sisteme sabitlenir. Daha sonra çekme meteline somunlarla beraber çekme çubukları monte edilir (Şekil B.2).



Şekil B.2 : En üst iç ring ile çekme metalinin sisteme monte edilmesi

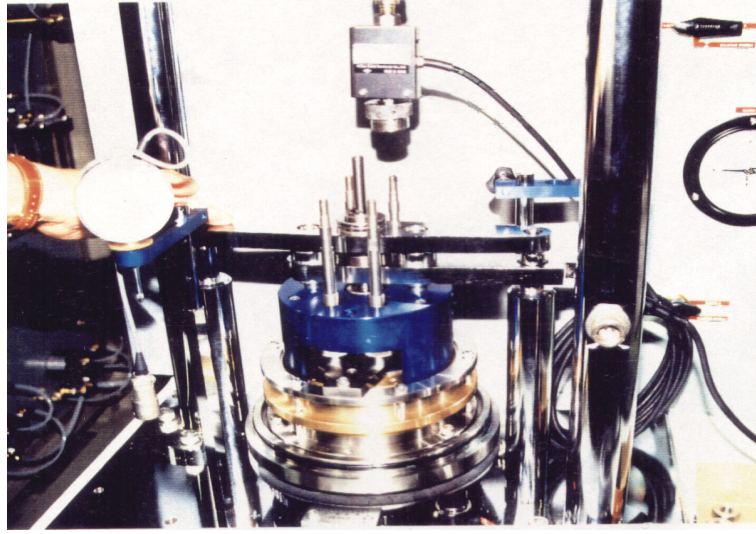
- Mavi pimler çıkarıldıktan sonra mavi renkteki basınç plakası sisteme monte edilir. Daha sonra çekme çubukları ile sisteme monte edilen somunların basınç plakasına değmesi sağlanır. Bu işlem de tamamlandıktan sonra sisteme 0.2 kg/cm^2 'lık dengeleme basıncı uygulanır (Şekil B.3). Bu işlemin sonucunda basınç plakasının ortasındaki şaftın yukarı doğru hareket ettiği gözlenmelidir.



Şekil B.3 : Sisteme dengeleme basıncının uygulanması

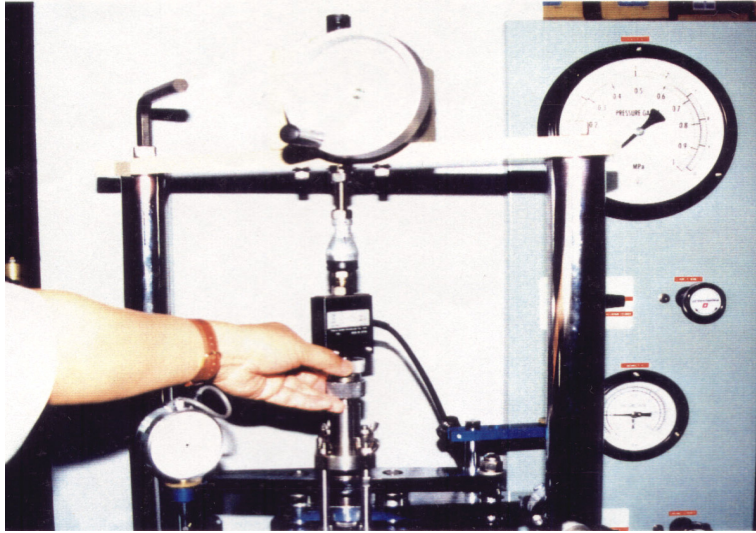
- Yukarı çıkmış olan yük uygulama şaftına ve çekme çubuklarına somunlar takılır. Daha sonra uygulanan 0.2 kg/cm^2 'lık dengeleme basıncı kaldırılarak şaftın aşağı inmesi sağlanır. Bu işlemin ardından numuneyi suya doygun hale getirmek amacıyla kullanılan su tutma aparatı sisteme monte edilir.
- Tork kolundaki yuvaların oturacağı, basınç plakasındaki metal çubuklar ile uç kısımlar aynı doğrultuya getirildikten sonra tork kolu sisteme monte edilir (Şekil B.4). Montaj sırasında iki hususa dikkat edilmelidir. Tork kolu sisteme

oturtulduğunda çarklar kesinlikle hareket ettirilmemelidir ve basınç plakasının mümkün olduğunca az sarsılmasına özen gösterilmelidir.



Şekil B.4 : Tork kolunun sisteme monte edilmesi

- Tork kolu sisteme yerleştirildikten sonra, ring çekme metali sisteme monte edilir ve sabitlenir. Daha sonra kriko vasıtasıyla düşey sürtünmeyi ölçmeye yarayan alıcı ring çekme metaline değiştirildikten sonra sabitlenir (Şekil B.5).

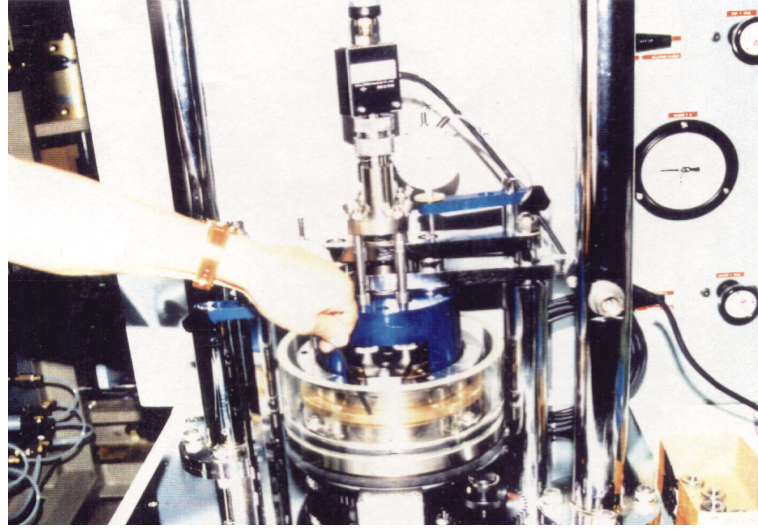


Şekil B.5 : Düşey sürtünme alıcısının sisteme monte edilmesi

- Basınç plakasında yer alan beyaz renkli vidalar çıkarıldıktan sonra basınç plakasının alt yüzeyine değdirdiğimiz somunlar gevşetilerek indirilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus aynı yöndeki somunların aynı anda gevşetilmesidir. Aksi taktirde sıkışmalar olacağı için somunlar gevşemeyecektir. Bu işlem de

tamamlandıktan sonra tork koluna bağlı olan vida ile kesme kuvvetini ölçen alıcı sabitlenir.

- Önceden monte ettiğimiz sistemi birleştirmekte kullanılan sarı ve kırmızı renkli vidalar söküldükten sonra sarı ring itilerek en alt dış ringe değiştirilir (Şekil B.6).



Şekil B.6 : Sarı ringin en alt dış ringe değiştirilmesi

- Ringler arası açıklığı ölçmek için kullanılan saat en üst dış ringe, düşey deformasyonu ölçmeye yarayan saat ise basınç plakasına yerleştirilir. Bu işlemin ardından amplifikatörün ayarları yapılmalıdır. Önce amplifikatördeki CAL butonu, tüm LOCK butonları ve ATT düğmeleri kapalı konuma getirilir. Daha sonra CAL bölümüne her kanal için Tablo 3.2’de verilen değerler girildikten sonra amplifikatör POWER tuşu sayesinde açılır ve en az 10 dakika beklenir.

Tablo B.1 : Amplifikatörün ayarlanması

ÖZELLİKLER	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4
	Kesme yük hücresine gelen kesme kuvveti	Düşey sürtünme kuvveti	Numunenin düşey deformasyonu	Numuneye uygulanan düşey gerilme
Kapasite	2000 N	1000 N	20 mm	5000 kPa
Cal.	4005	4001	3000	3987
Att.	1/10	1/10	1/5	1/10
Range (Volt)	5	5	6	8

- Bekleme işlemi tamamlandıktan sonra tabloda görülen ATT değerleri amplifikatörde ayarlanır ve BAL düğmesine basılarak volt değerleri sıfırlanır. Daha sonra LOCK düğmesi artı pozisyonuna getirilerek VAR düğmesi vasıtasıyla volt değerleri ayarlanarak tekrar BAL düğmesiyle değerler sıfırlanır. Daha sonra uygulanacak yük değeri ayarlanarak zemine deney için belirlenen düşey yük uygulanır. Yalnız burada önemli bir husus gözardı edilmemelidir. Bellofram kesit alanının numune kesit alanına eşit olmamasından dolayı sistemin uyguladığı düşey gerilme numuneye aynı şekilde iletilemez. Bu yüzden sisteme uygulanan düşey gerilme numuneye azalarak iletilecektir (Seiken, 1994).

$$\text{Kesit alan oranı} = \text{Bel. kesit alanı} / \text{Num. kesit alanı} = 67.5 \text{ cm}^2 / 98.17 \text{ cm}^2 = 0.69 \quad (\text{B.1})$$

- Dolayısıyla deney aletinde ayarlanacak gerilme değeri deney için uygulanması gereken değer kesit alan oranına bölünmesi ile bulunmaktadır. Bu çalışmada uygulanması gereken normal gerilme değerleri 200, 300 ve 400 kPa'dır. Daha sonra bu hesap yöntemiyle belirlenen düşey gerilme değerleri sisteme basınç paneli vasıtasıyla uygulanarak zeminin bir süre oturması beklenir. Daha sonra su tutma yatağı ağzına kadar su ile doldurularak numunenin konsolidasyonun tamamlanması için 2 gün beklenir.

- 2 günlük konsolidasyon süresi tamamlandıktan sonra deneyin uygulanmasına başlanabilir. Öncelikle ringler arasında düşey sürtünmeyi en aza indirmek için boşluk bırakılması gerekmektedir. Ancak açıklığın artması ile beraber numune kaybının çok olacağı göz önünde bulundurulmalı ve ringler arası açıklık ile düşey sürtünme arasında optimizasyon yapılması gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda ringler arası açıklık genelde 0.3mm-0.5 mm arasında değişmiştir.

- Bütün bu adımlardan sonra artık kesme işlemine geçilebilir. Öncelikle makine açılarak LOAD butonu vasıtasıyla yükleme konumuna getirilir. Daha sonra düşük hızlarda çalışılacağı için hız butonu LOW konumuna getirilir ve kontrol düğmesi vasıtasıyla hız ayarlanır. Yalnız numunenin kesilme hızı, butonla ayarlanan kesme hızı değerinden yaklaşık olarak 10 mm/dak daha hızlı olduğu bilinmelidir. Hız değeri de ayarlandıktan sonra CLUTCH butonu vasıtasıyla sistem kavrama konumuna geçerek deney başlatılır. Kesme işlemi belirlenen deformasyon değerine

ulaşıldıktan sonra durdurulur. Daha sonra drenaj deliği vasıtasıyla su yatağında bulunan su boşaltılır ve numune üzerine uygulanan düşey yük kaldırılır.

B.2 Hesaplamalar

Halka kesme deneyi başladığında amplifikatörden yapılan okumaların değeri volt cinsindendir. Bu yüzden bu değerlerin kullanılan mühendislik birimlerine dönüştürmek gerekmektedir. Bu dönüşümler için aşağıdaki deklemler kullanılmalıdır. Amplifikatör kanallarının kalibrasyon grafikleri de ayrıca EK-D’de verilmiştir.

$$\text{CH 1 : Kesme kuvveti (N)} = 404.11 \times (\text{amplifikatör okuması}) \quad (\text{B.2})$$

$$\text{CH 2 : Düşey sürtünme kuvveti (N)} = 202.38 \times (\text{amplifikatör okuması}) \quad (\text{B.3})$$

$$\text{CH 3 : Düşey deplasman (mm)} = 5 \times (\text{amplifikatör okuması}) \quad (\text{B.4})$$

$$\text{CH 4 : Uygulanan düşey gerilme (kPa)} = 95.76 \times (\text{amplifikatör okuması}) \quad (\text{B.5})$$

B.2.1 Kayma gerilmelerinin hesaplanması

Deney numunesi halka şeklinde olduğu için, halka numunenin ortasındaki ($D=125$ mm) kayma gerilmesi hesaplanmalıdır. Deney numunesi, dış çapı ($D_{\text{dış}}$) 150 mm, iç çapı ($D_{\text{iç}}$) 100 mm ve yüksekliği 20 mm olan halka şeklindedir. Bu sebeple, numunenin ortasındaki ($D=125$ mm) kayma gerilmeleri hesaplanacaktır.

Numune ortasındaki kayma gerilmesinin bulunması için öncelikle kesme kuvveti belirlenmelidir. Numune ortasındaki kesme kuvveti (T), amplifikatörden okunan volt değerine karşılık gelen kesme kuvveti (T') ile birlikte momentlerin eşitlenmesi prensibi kullanılarak bulunabilir.

$$T' \times L = T \times R \quad (\text{B.6})$$

Bu formülde görülen L değeri kuvvet alıcısı ile dönme merkezi arasındaki mesafe ($L=20$ cm) olup, R değeri ise numunenin ortasının dönme merkezine olan mesafesini temsil eder. Numune ortasında oluşan kayma gerilmesi (τ) aşağıdaki formülle bulunur:

$$\tau = T/A \quad (\text{B.7})$$

Burada A değerinin numune kesit alanını temsil ettiği unutulmamalıdır. Tüm veriler formüllerde yerine konduğunda numune ortasında oluşan kayma gerilmesini veren

$$\tau = T'/30.68 \quad (\text{B.8})$$

formülü elde edilmiş olur.

Bulunan bu formülü amplifikatör okumaları cinsinden elde etmek için aşağıdaki hesaplamalar yapılmalıdır.

$$\tau \text{ (kg/cm}^2\text{)} = (40.411 \times \text{Okuma})/30,68 \quad (\text{B.9})$$

$$\tau \text{ (kPa)} = 131.72 \times \text{Okuma} \quad (\text{B.10})$$

B.2.2 Düşey sürtünme kuvvetinin hesaplanması

Numunenin kesilmesi aşamasında en üst dış ring ile numuneyi sabitleyerek kesilme işlemini gerçekleştiren ring arasında oluşan sürtünme kuvvetinden dolayı sistemde deney süresince değişken olan bir düşey sürtünme gerilmesi oluşmaktadır. Numune üzerindeki net normal gerilmeyi bulmak için Denklem 3.13 ile belirlenen sürtünme gerilmesi uygulanan düşey normal gerilemden çıkarılmalıdır.

$$\text{Düşey sürtünme kuvveti, } F(\text{N}) = 202.38 \times (\text{CH 2'den yapılan okuma}) \quad (\text{B.11})$$

$$\text{Düşey sürtünme gerilmesi, } \sigma_f \text{ (kPa)} = F/A = 20.61 \times \text{Okuma} \quad (\text{B.12})$$

Burada A, numune kesit alanı olup 98.17 cm^2 değerindedir.

B.2.3 Düşey deformasyonun hesaplanması

Düşey deformasyonlar hesaplanırken numunenin bir kısmının içine alt ve üst ringdeki dişlerin geçtiği unutulmamalıdır. Bu yüzden reel düşey deformasyon değeri amplifikatörden okunan volt değerine karşılık gelen deformasyon değerinden yaklaşık olarak 2 mm daha az olacaktır. Amplifikatörden okunan volt değerinin karşılık geldiği düşey deformasyon miktarı aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

$$\text{Düşey deformasyon (mm)} = 5 \times \text{CH 3 kanalından yapılan okuma} \quad (\text{B.13})$$

B.2.4 Numune üzerindeki normal gerilmenin hesaplanması

Numune kesit alanı ile bellofram kesit alanı aynı olmadığı içi sisteme uygulanan yüklerde azalma meydana gelmektedir. Ayrıca düşey sürtünmeden kaynaklanan kuvvet kayıplarından dolayı sistemde gerilme kayıpları da meydana gelmektedir. Bu sebeple deney esnasında numune üzerinde oluşan net normal gerilme aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$\text{Panelden uygulanan gerilme (kPa)} = 95.76 \times (\text{CH 4'den yapılan okuma}) \quad (\text{B.14})$$

$$\text{Numune üzerindeki gerilme} = 0.69 \times (\text{Panelden uyg. düşey gerilme}) \quad (\text{B.15})$$

$$\text{Numune üzerindeki normal gerilme, } \sigma \text{ (kPa)} = 65.84 \times \text{Okuma} \quad (\text{B.16})$$

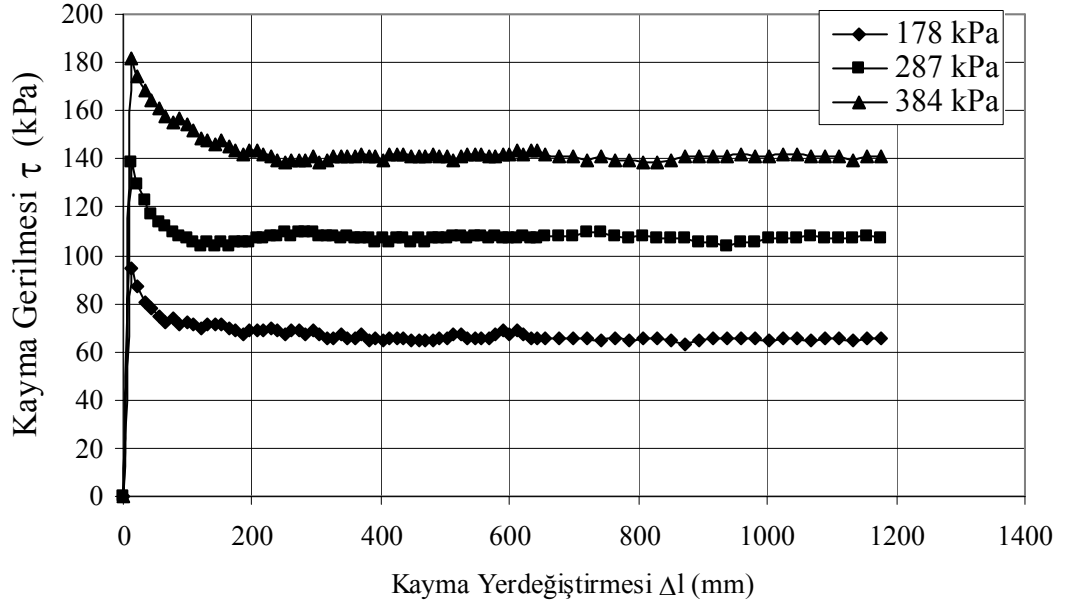
Düşey sürtünme nedeniyle, numune üzerindeki gerilme azalacaktır.

$$\text{Numune üzerindeki net normal gerilme, } \sigma_{\text{net}} = \sigma - \sigma_f \quad (\text{B.17})$$

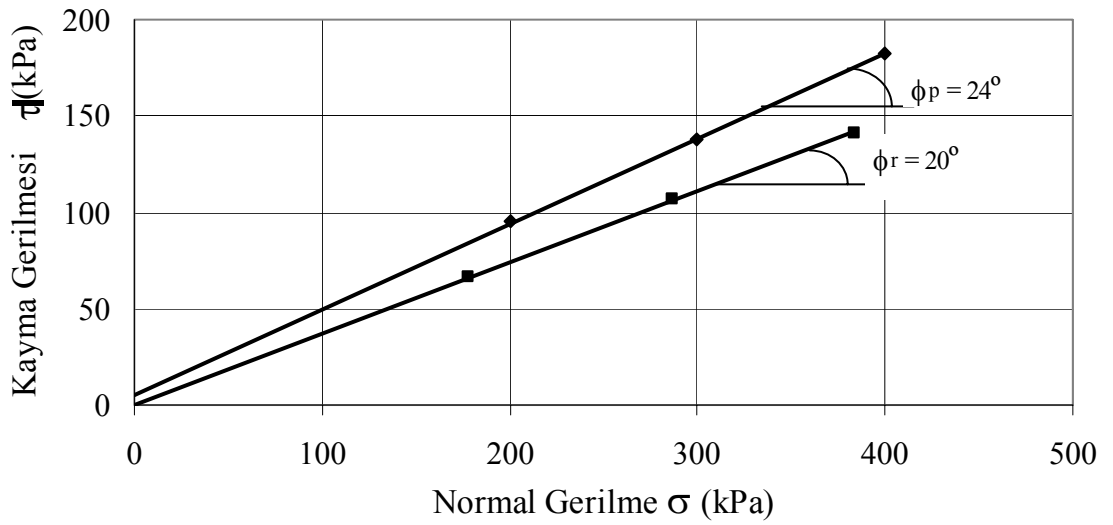
EK C

C.1 HALKA KESME DENEYİ SONUÇLARI

C.1.1 N-1 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

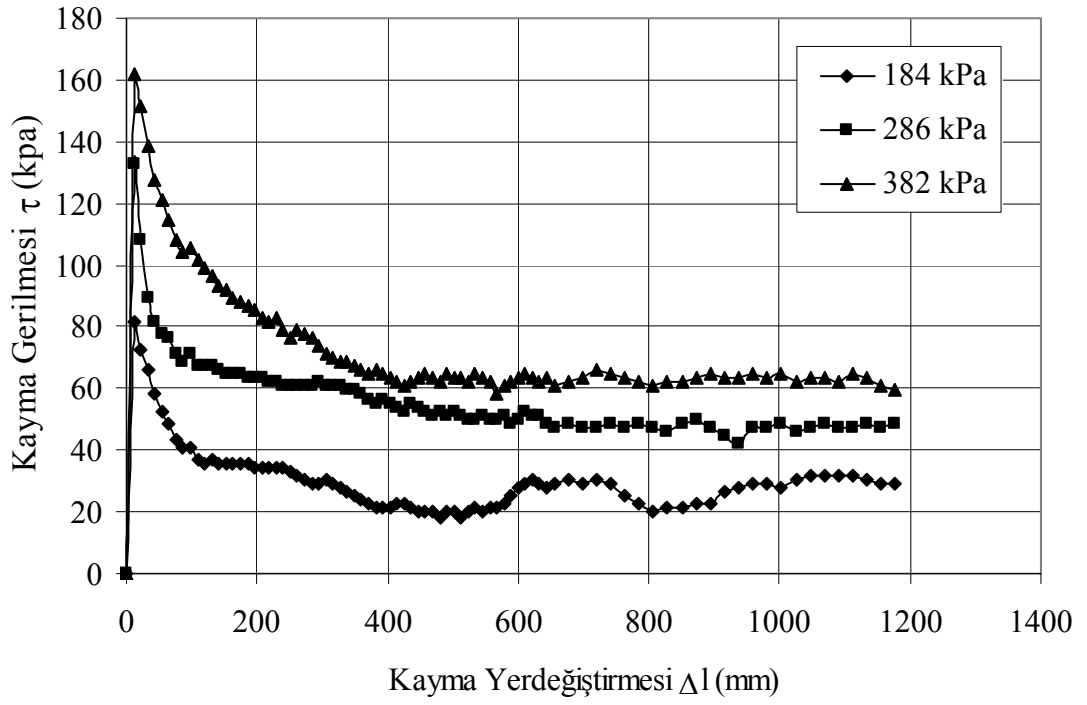


Şekil C.1 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

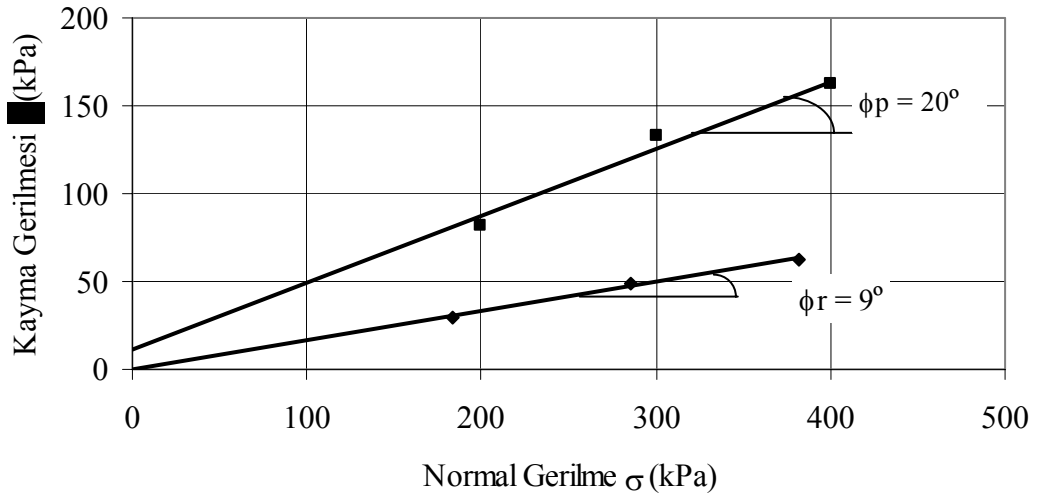


Şekil C.2 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.2 N-2 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

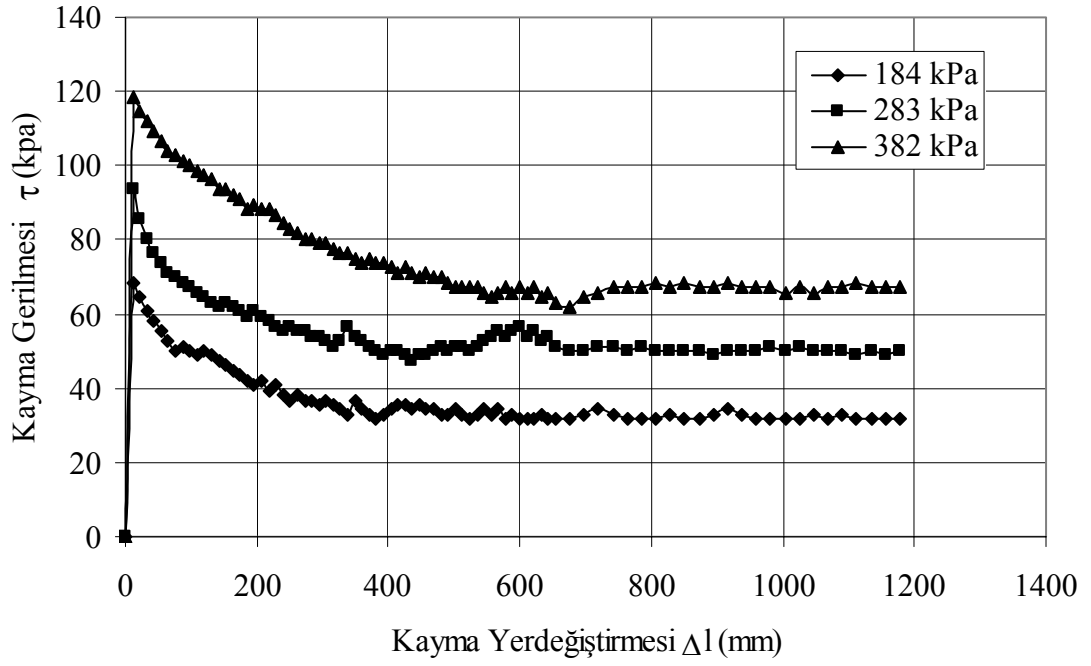


Şekil C. 3 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

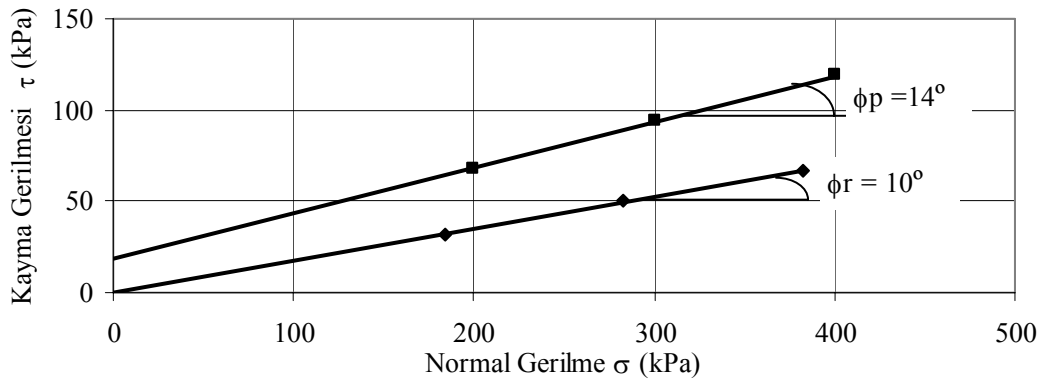


Şekil C. 4 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.3 N-3 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

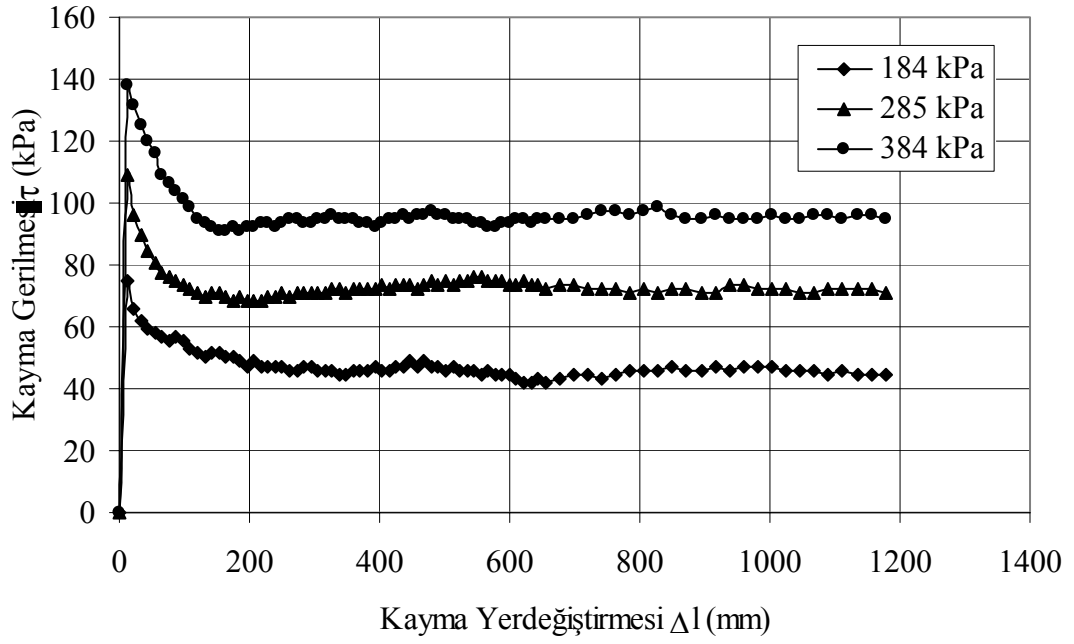


Şekil C. 5 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

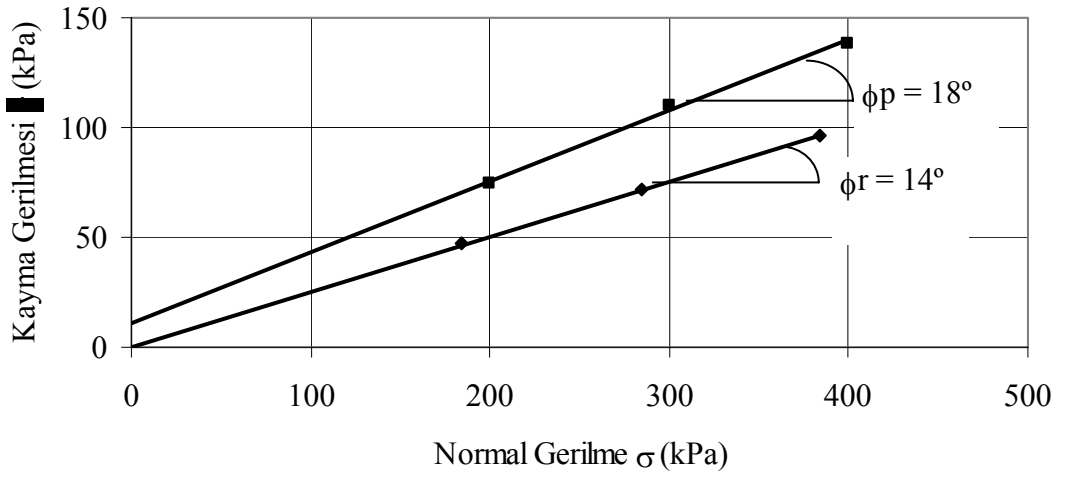


Şekil C.6 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.4 N-4 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

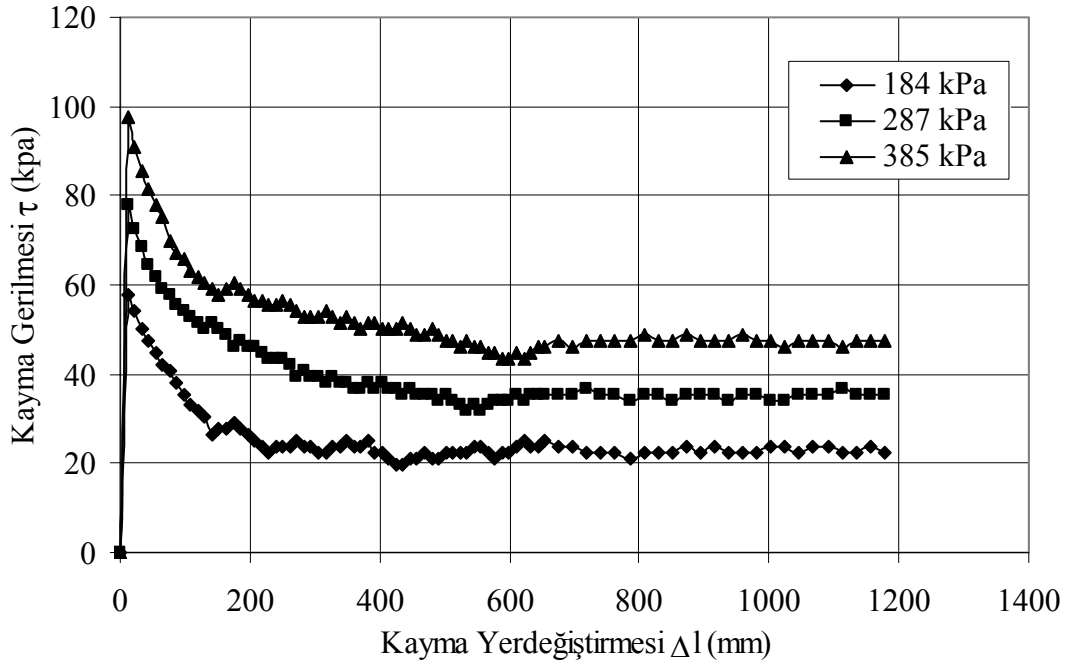


Şekil C.7 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

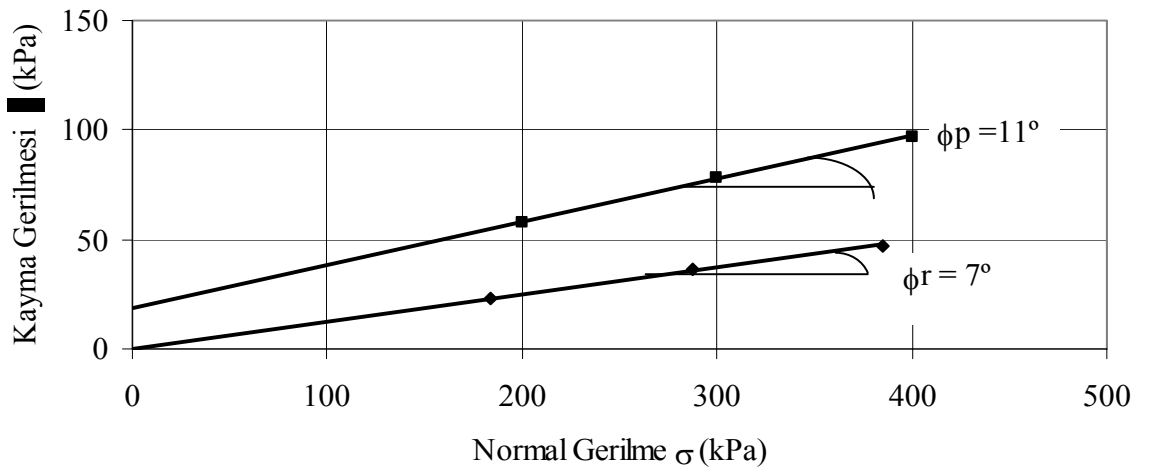


Şekil C.8 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.5 N-5 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

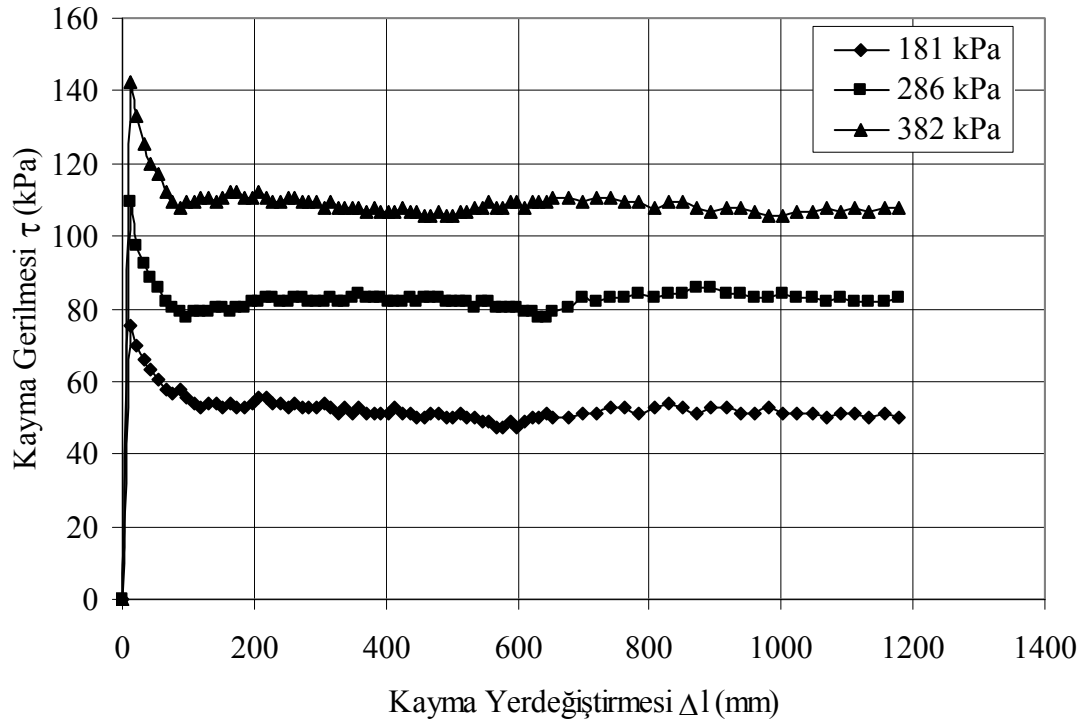


Şekil C.9 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

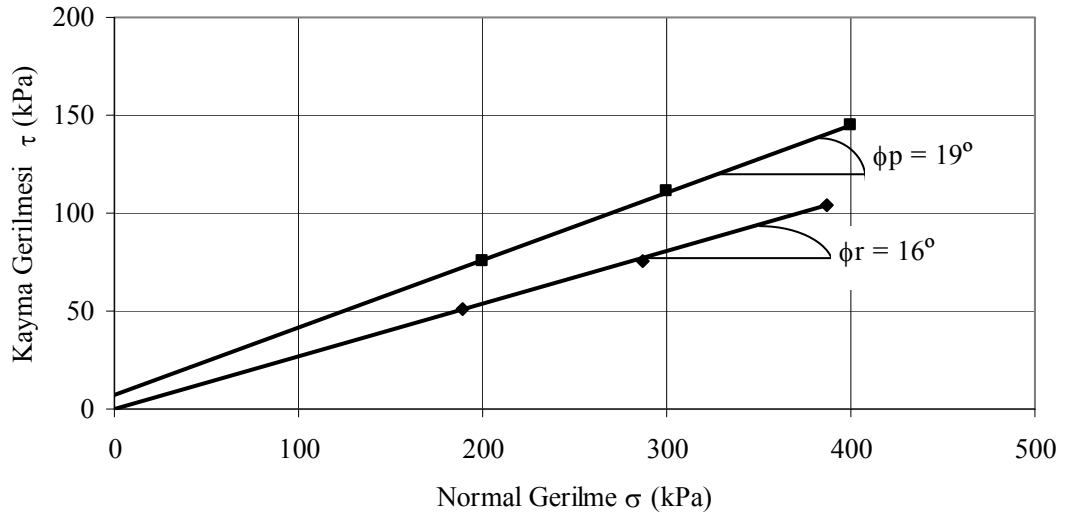


Şekil C.10 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.6 N-6 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

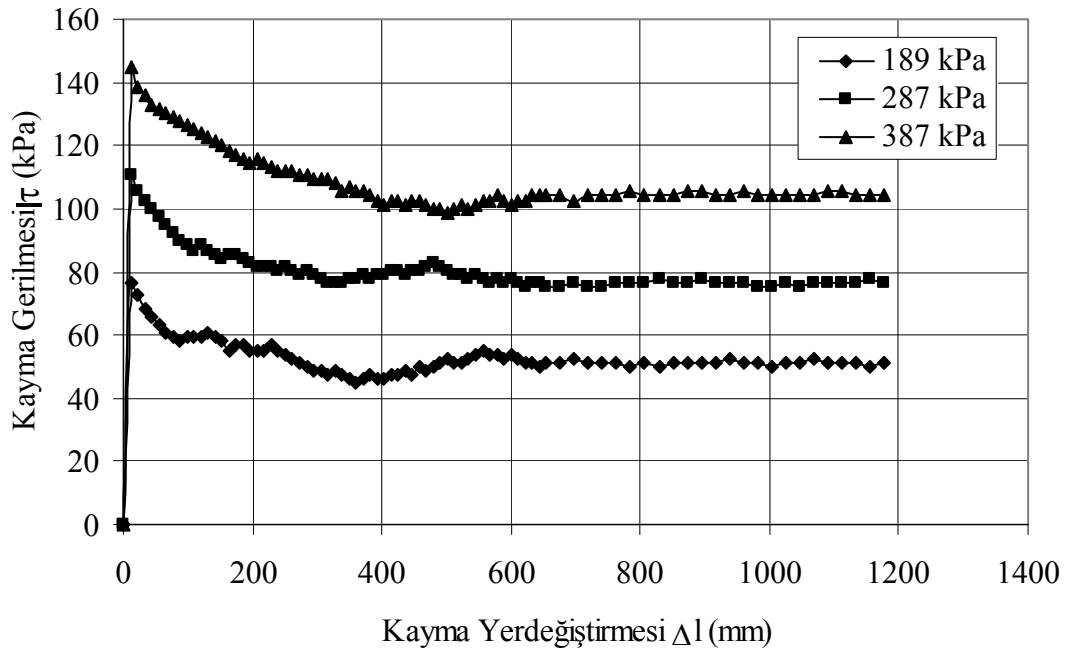


Şekil C.11 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirme grafiği

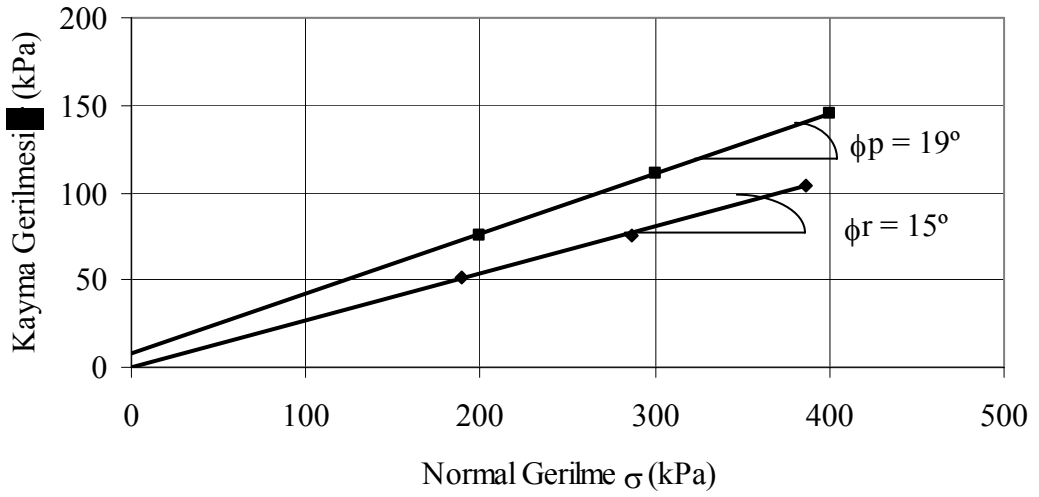


Şekil C.12 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.7 N-7 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

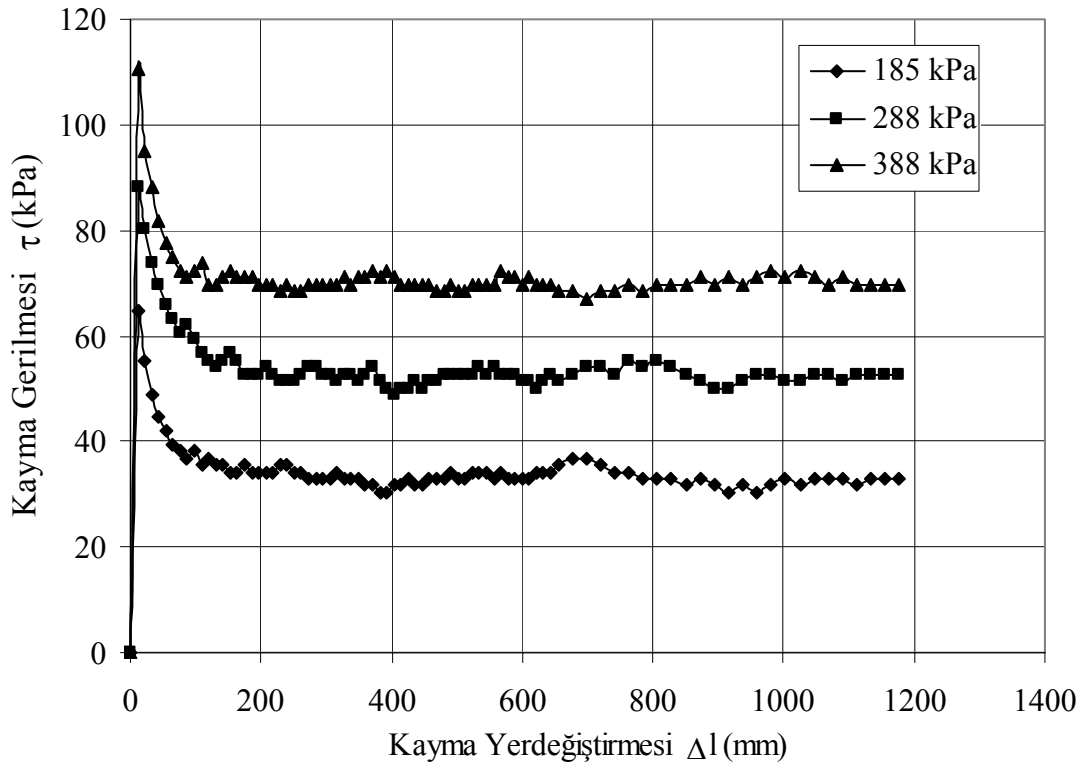


Şekil C.13: Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

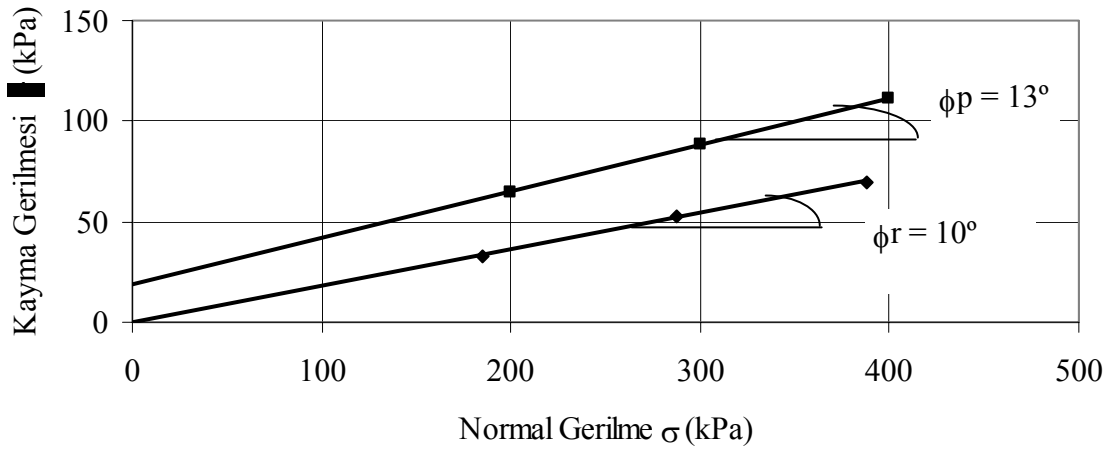


Şekil C.14 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.8 N-8 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

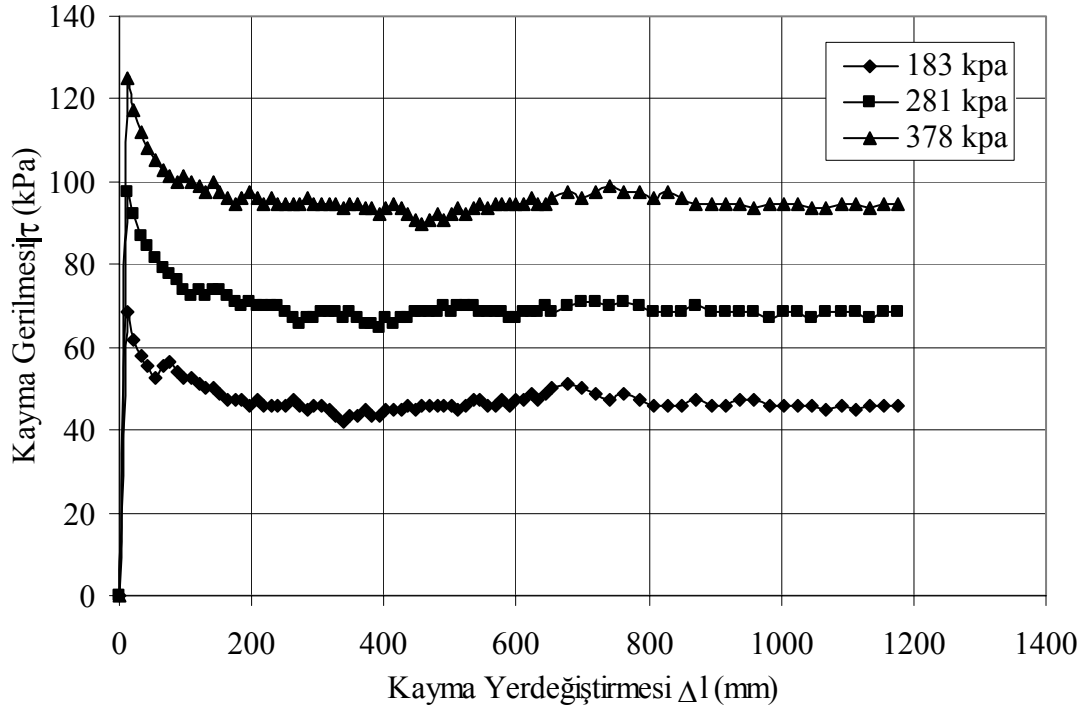


Şekil C.15 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

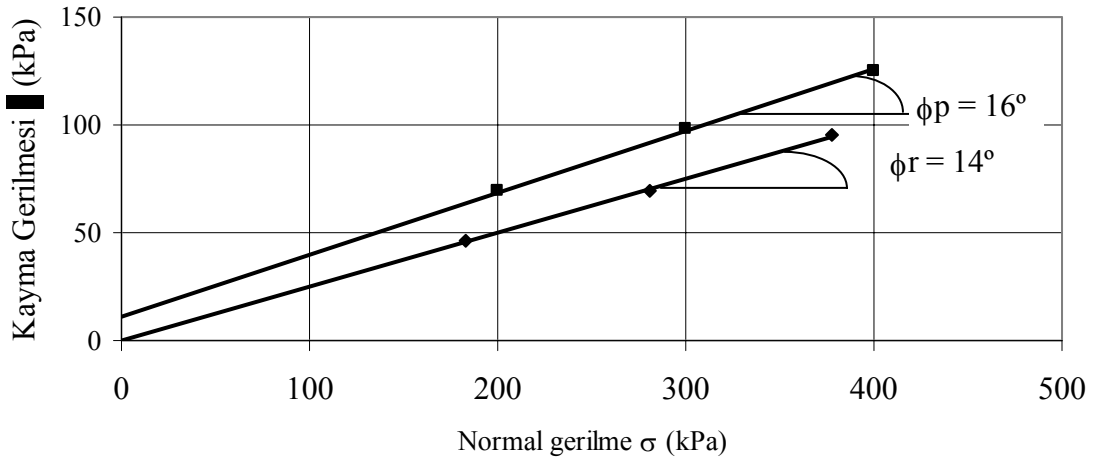


Şekil C.16 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.9 N-9 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

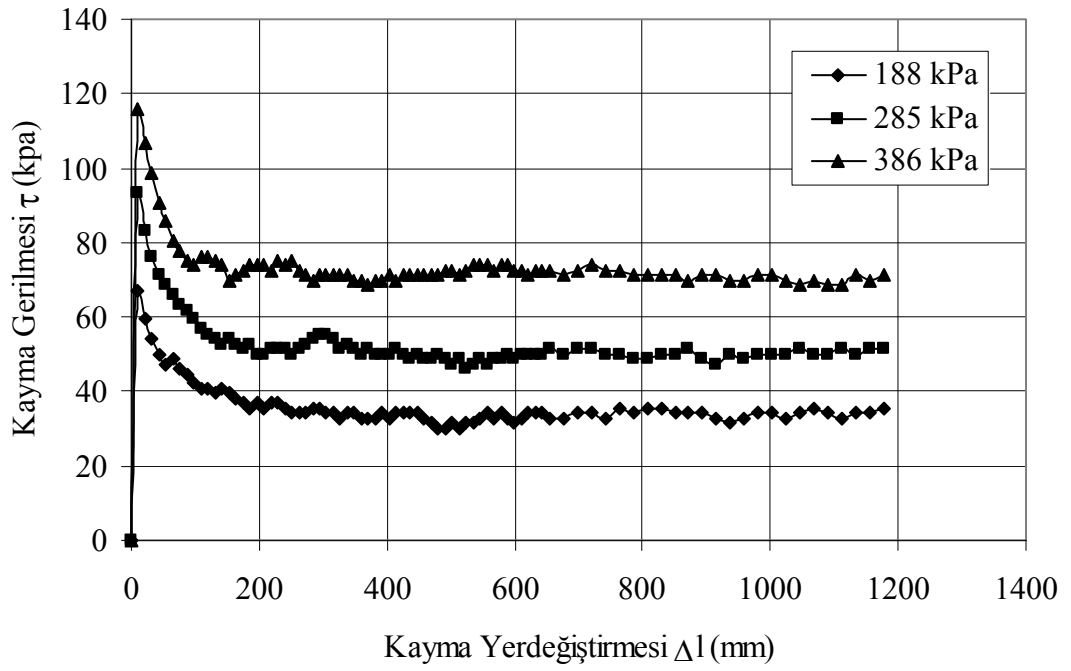


Şekil C.17 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

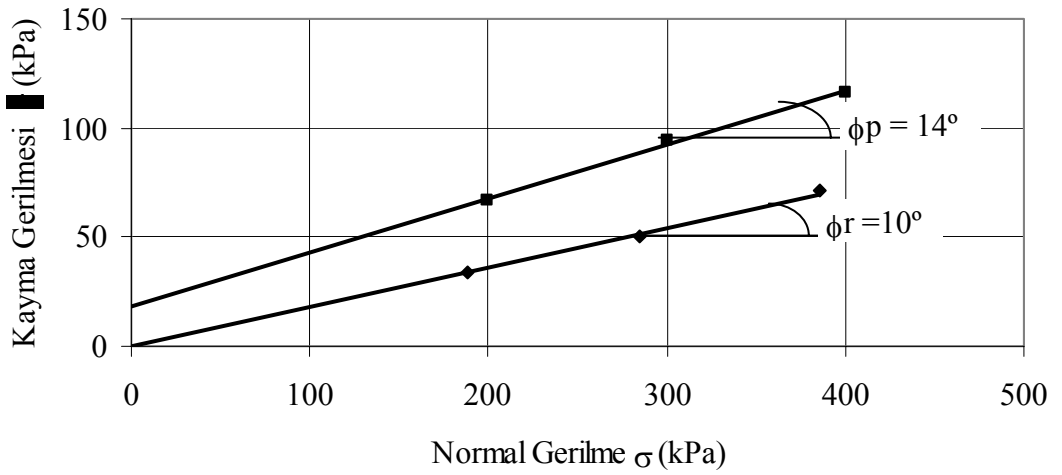


Şekil C.18 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.10 N-10 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

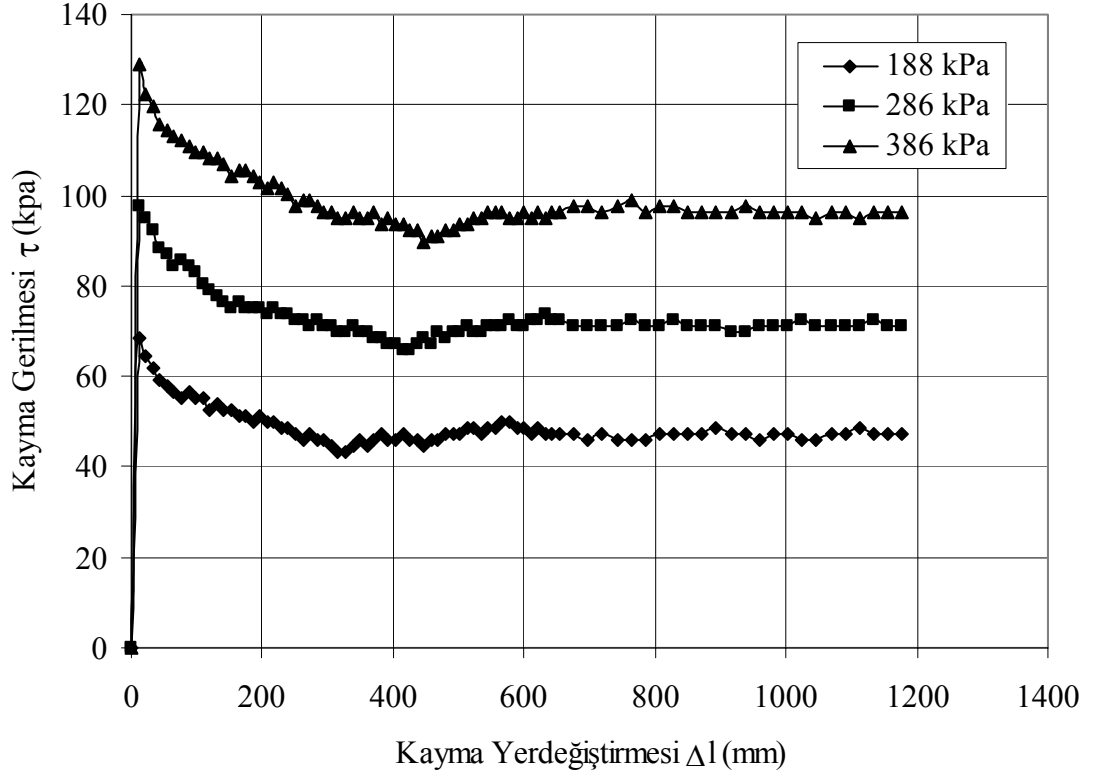


Şekil C.19 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

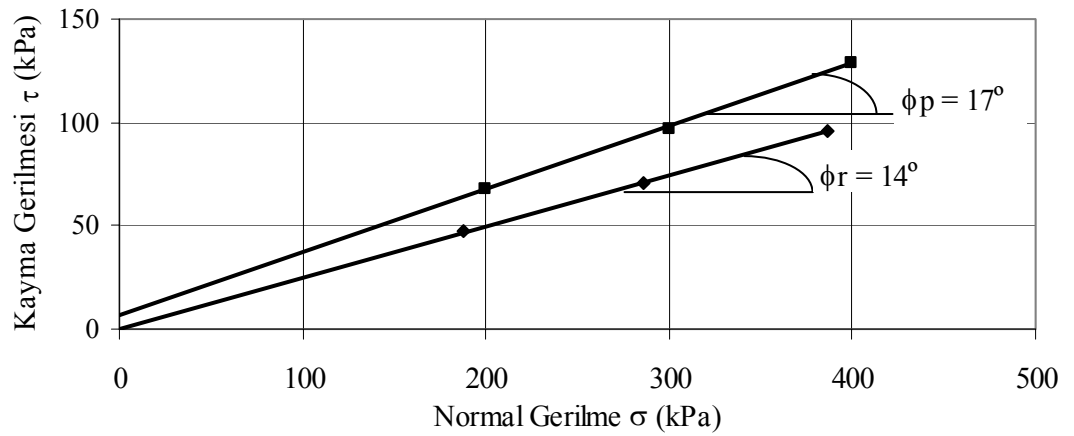


Şekil C.20 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.11 N-11 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

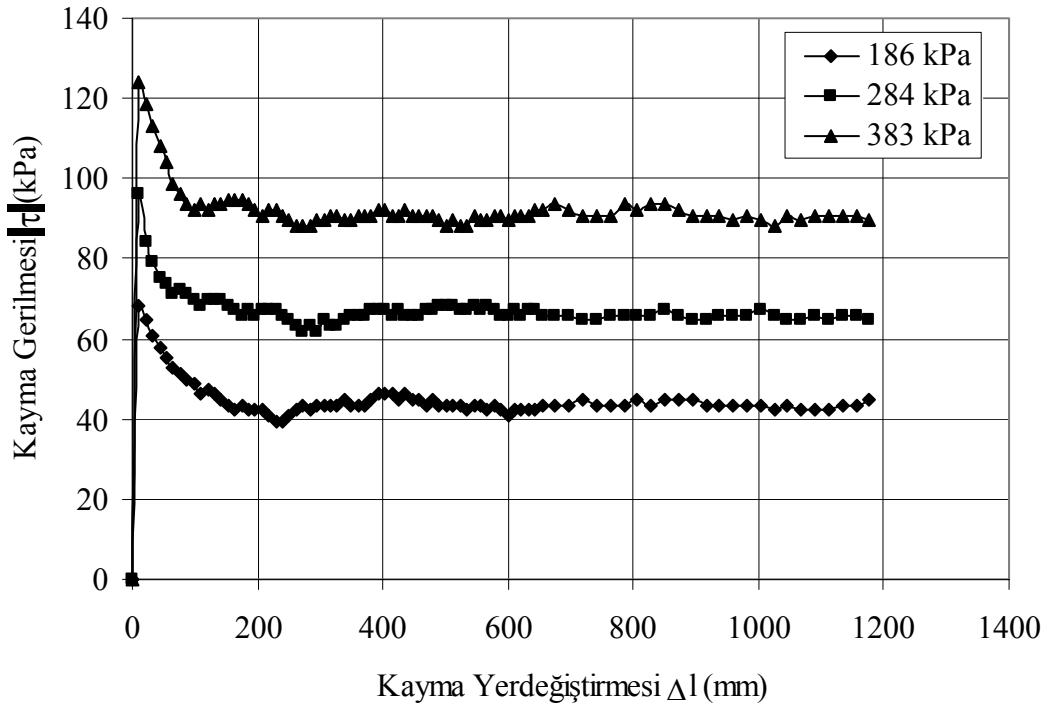


Şekil C.21 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

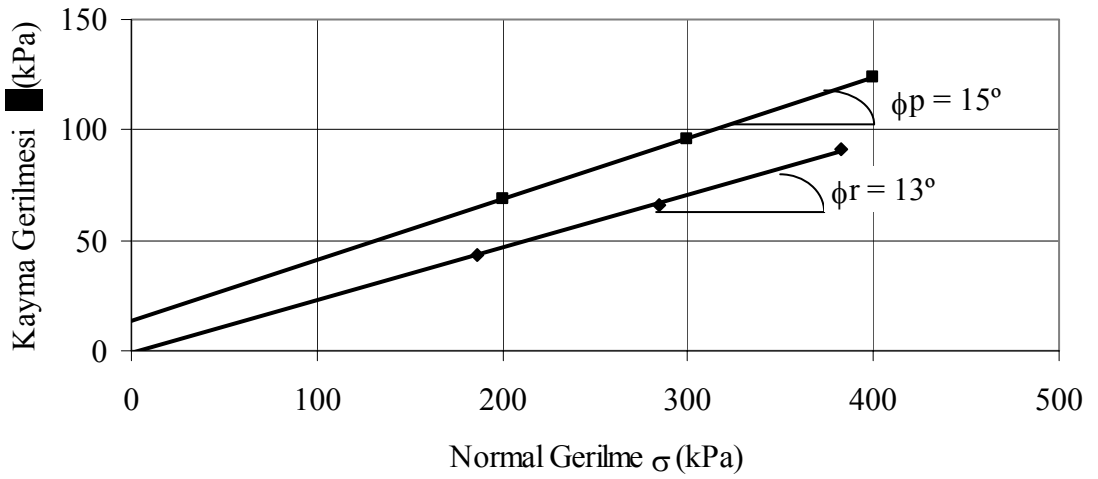


Şekil C.22 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.12 N-12 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

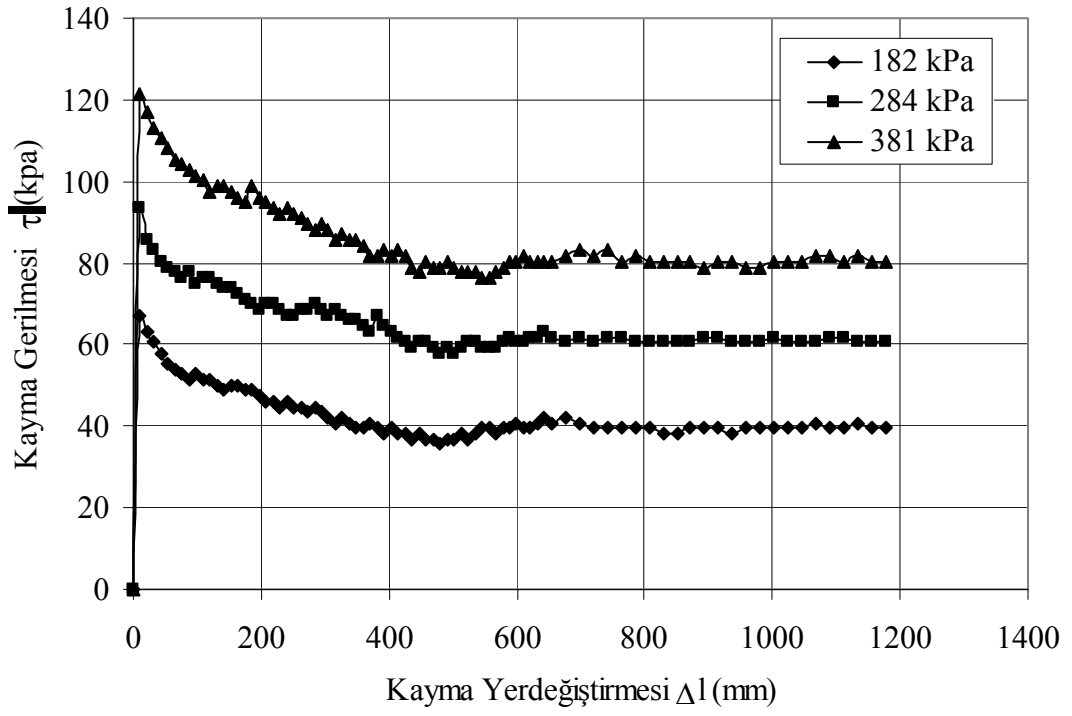


Şekil C.23 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

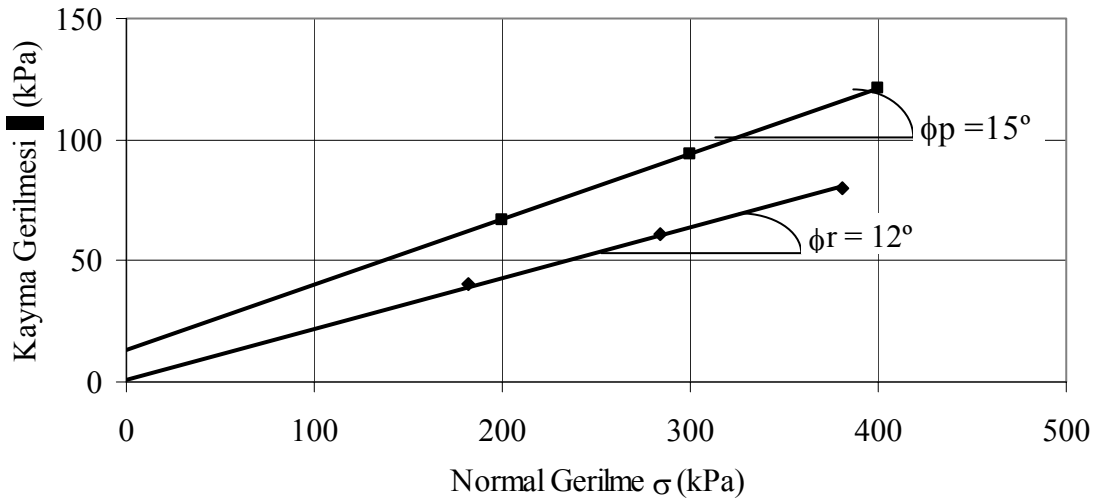


Şekil C.24 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.13 N-13 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

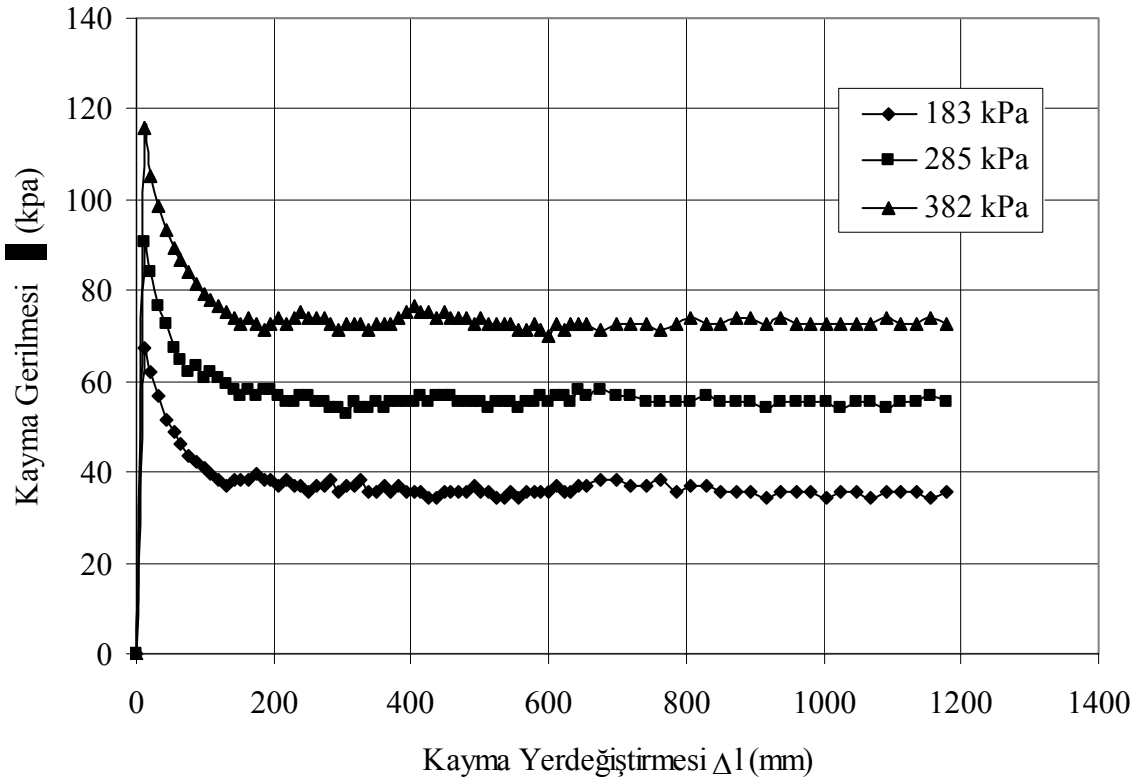


Şekil C.25 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

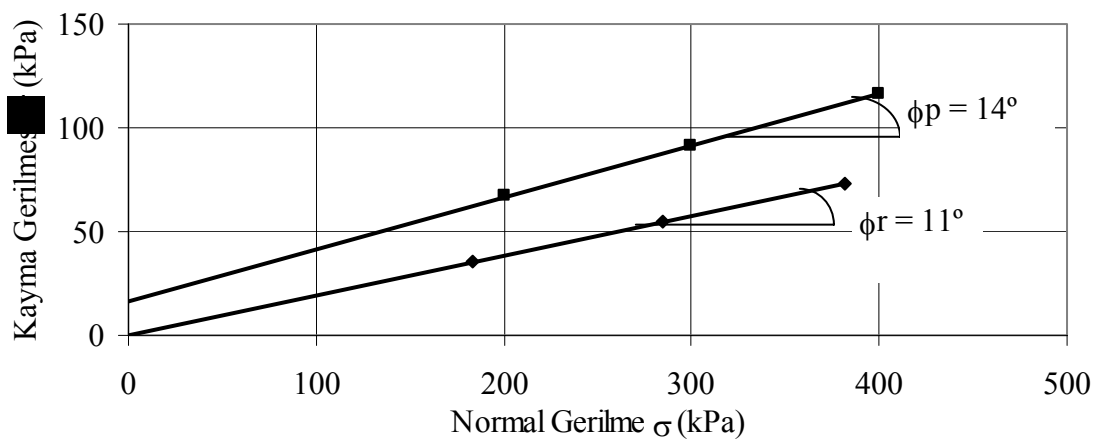


Şekil C.26 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.14 N-14 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

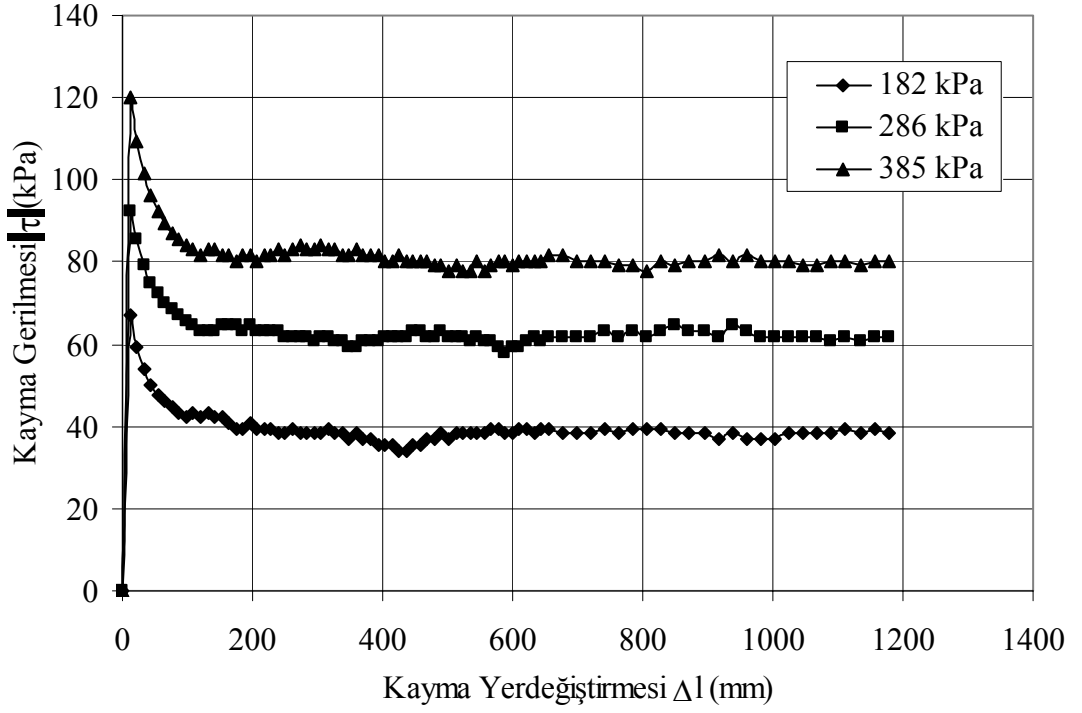


Şekil C.27 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği

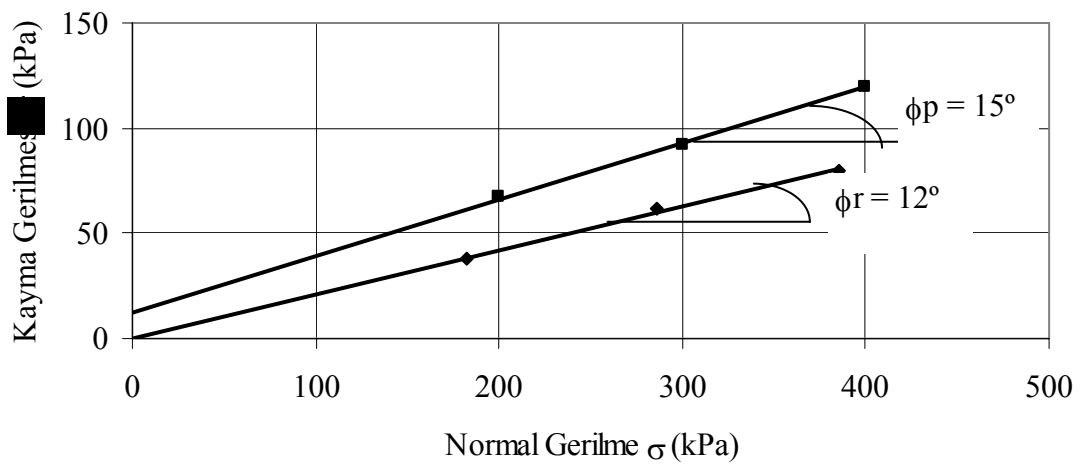


Şekil C.28 : Göçme zarfı eğrisi

C.1.15 N-15 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları



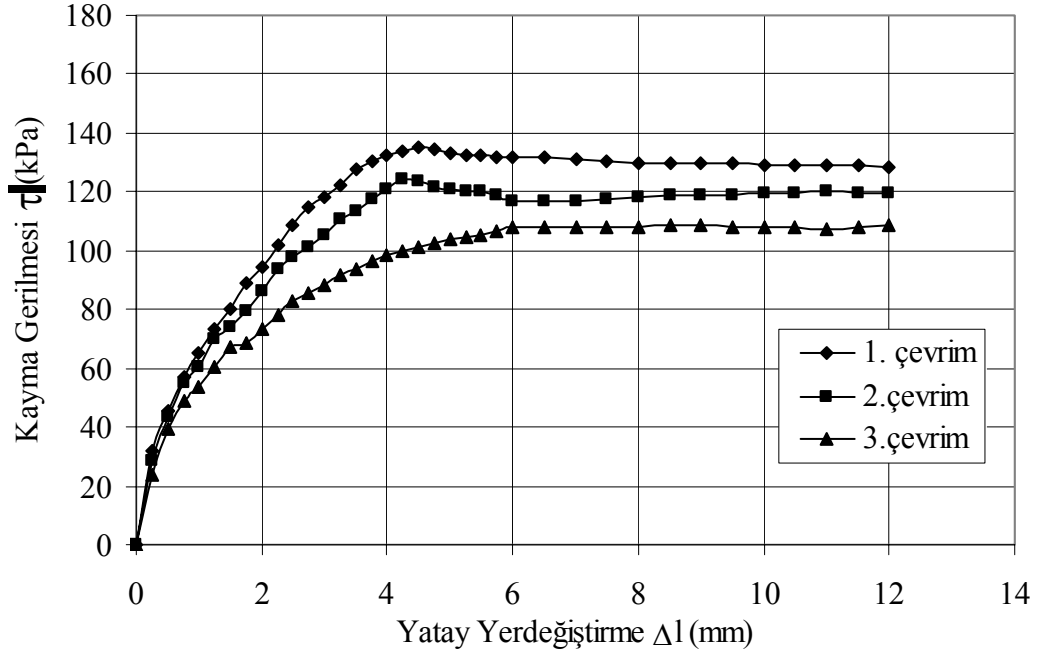
Şekil C.29 : Kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği



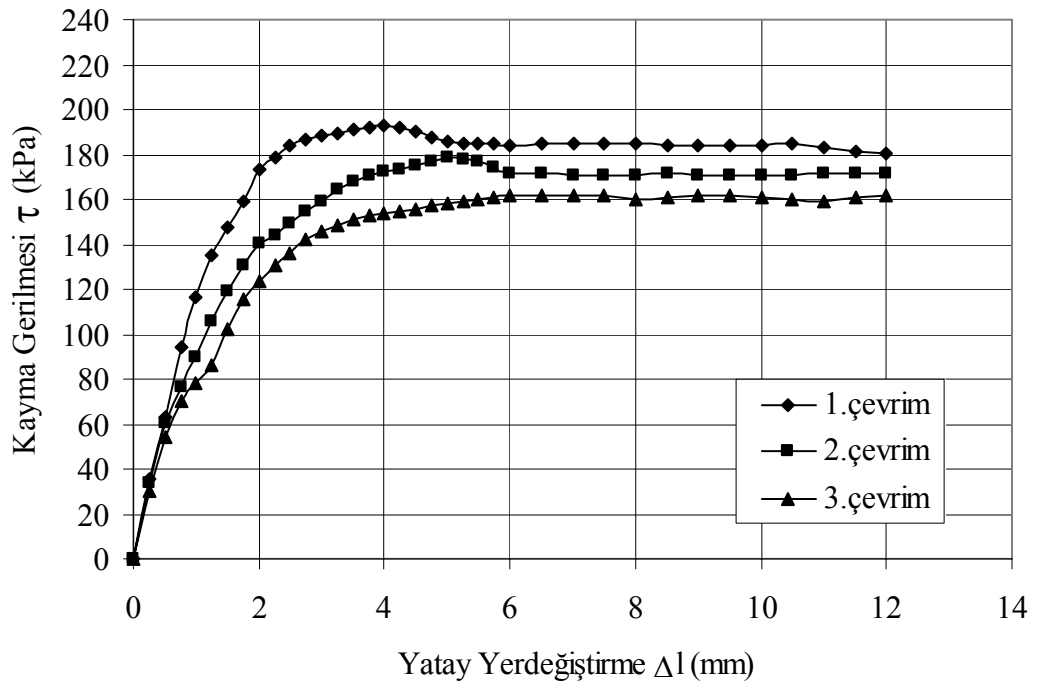
Şekil C.30 : Göçme zarfı eğrisi

C.2 TEKRARLI KESME KUTUSU DENEY SONUÇLARI

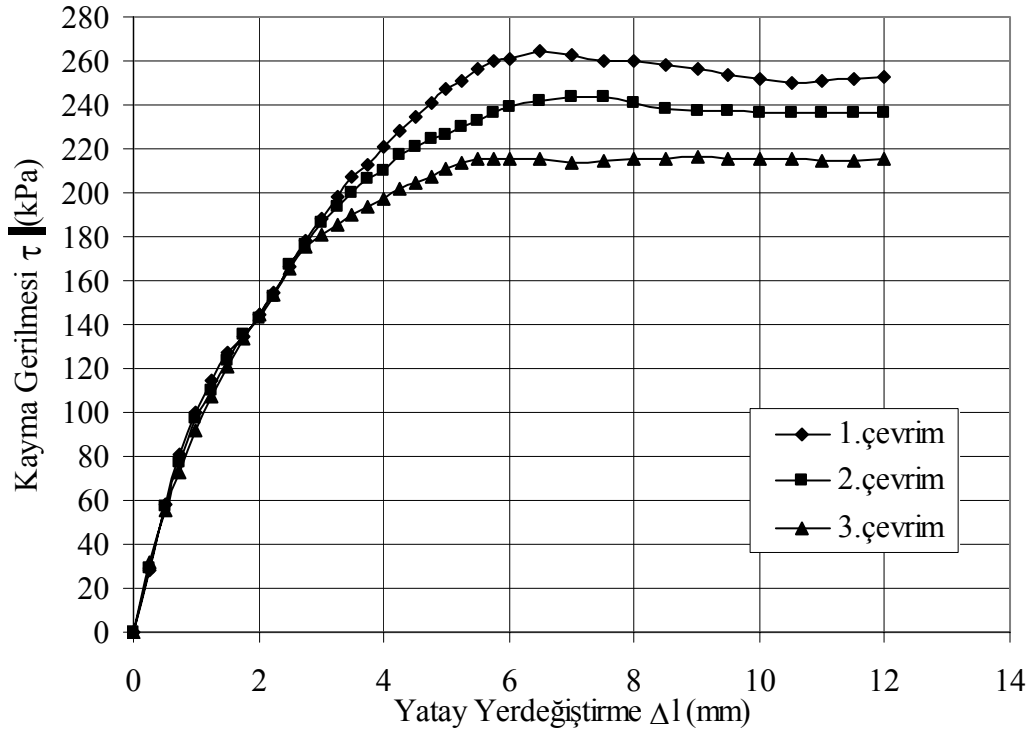
C.2.1 N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



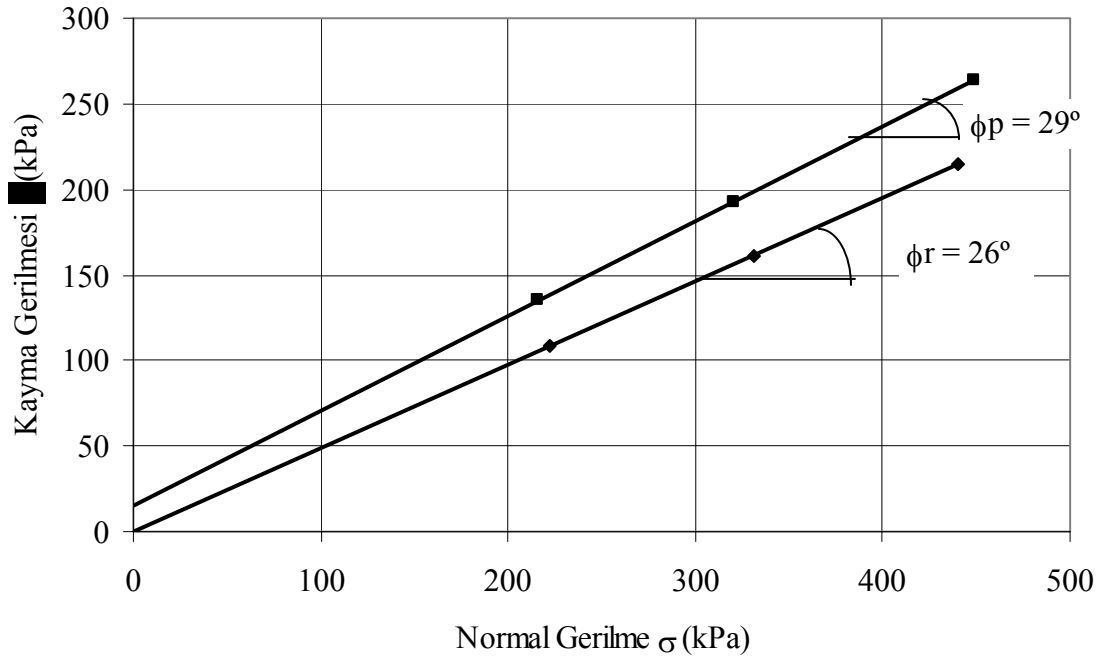
Şekil C.31 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.32 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

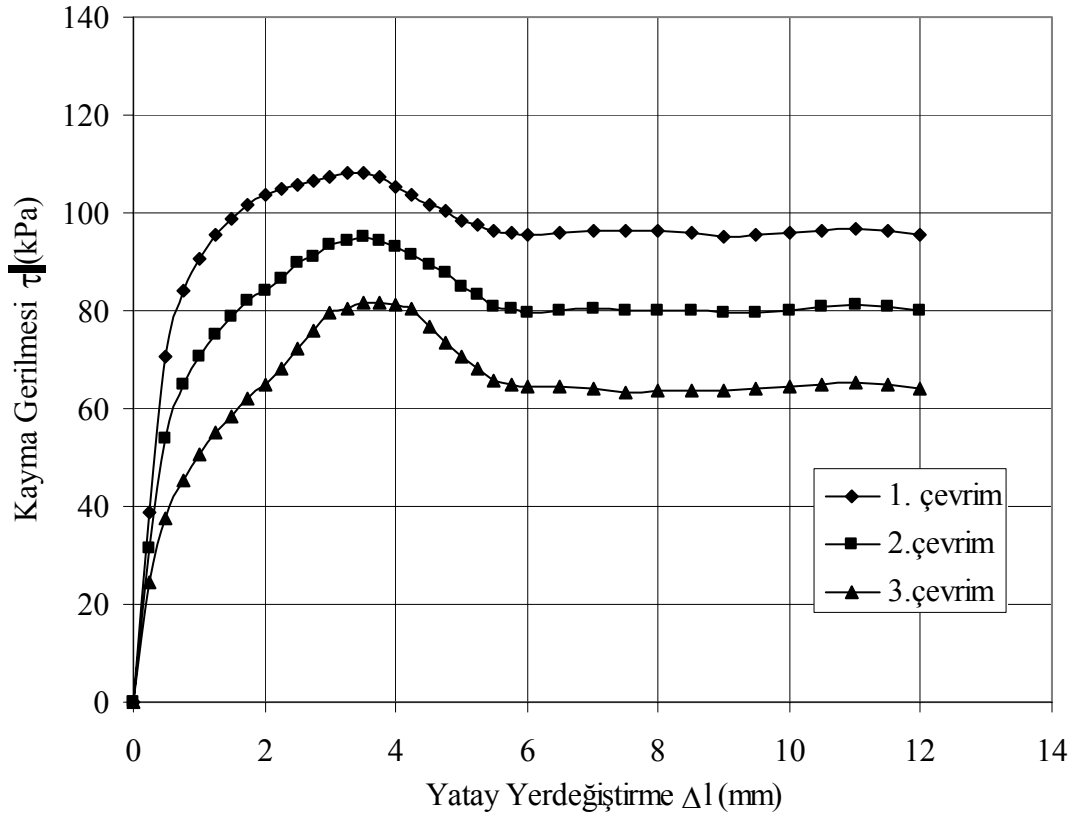


Şekil C.33 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

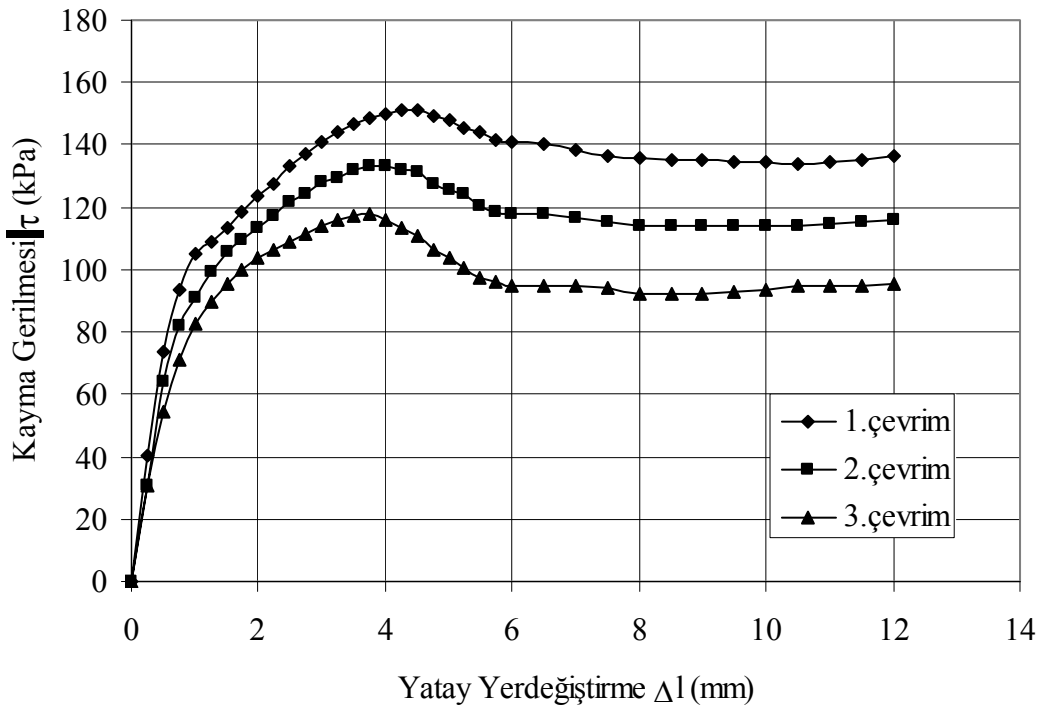


Şekil C.34 : Göçme zarfı eğrisi

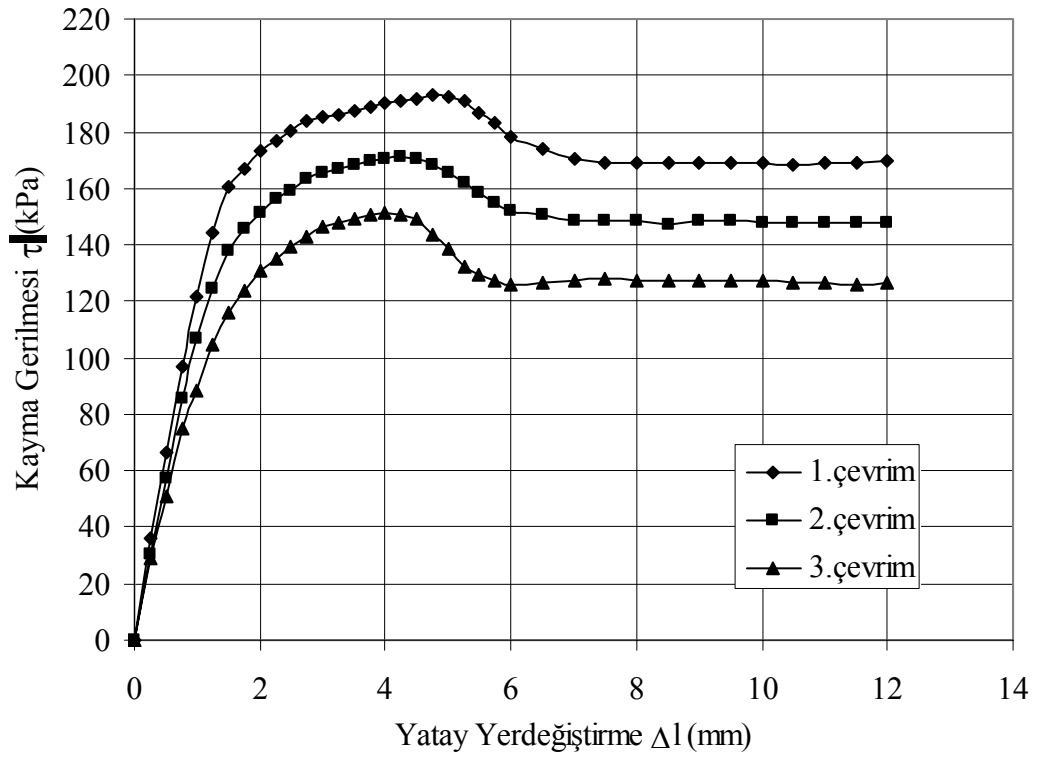
C.2.2 N-2 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



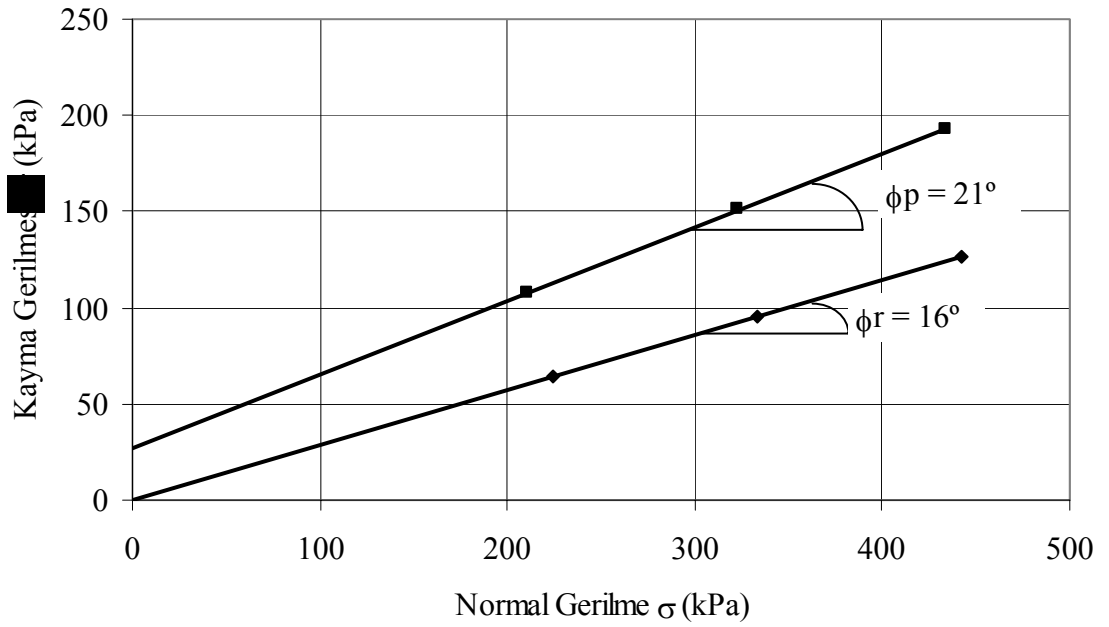
Şekil C.35 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.36 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

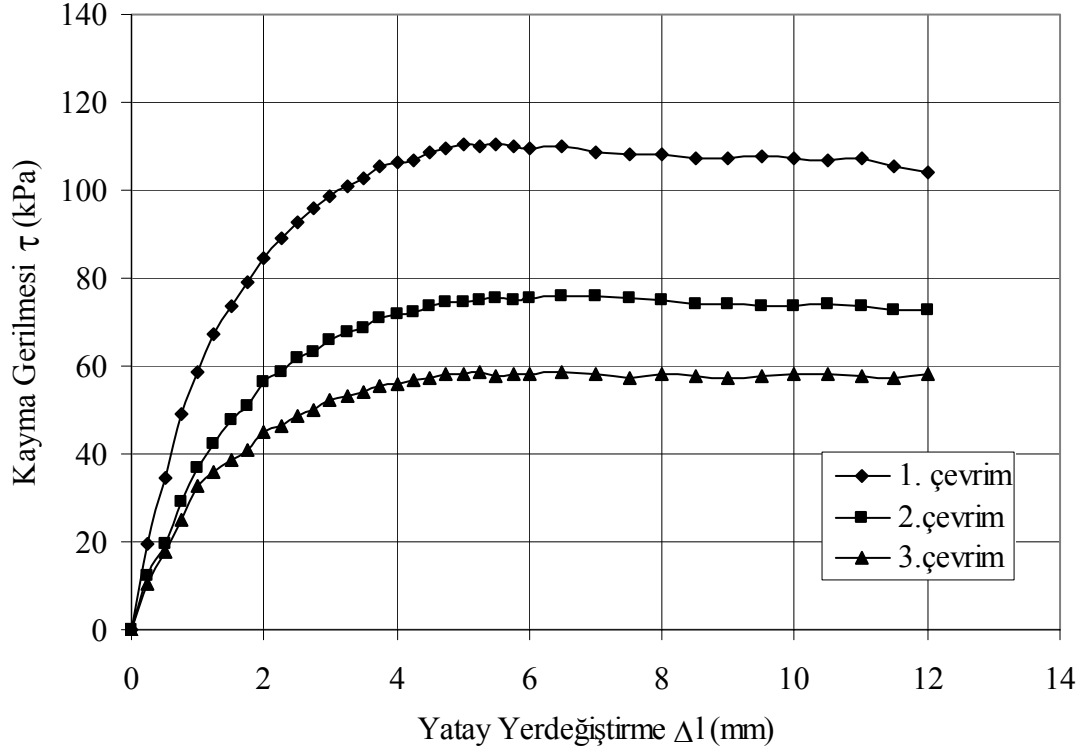


Şekil C.37 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

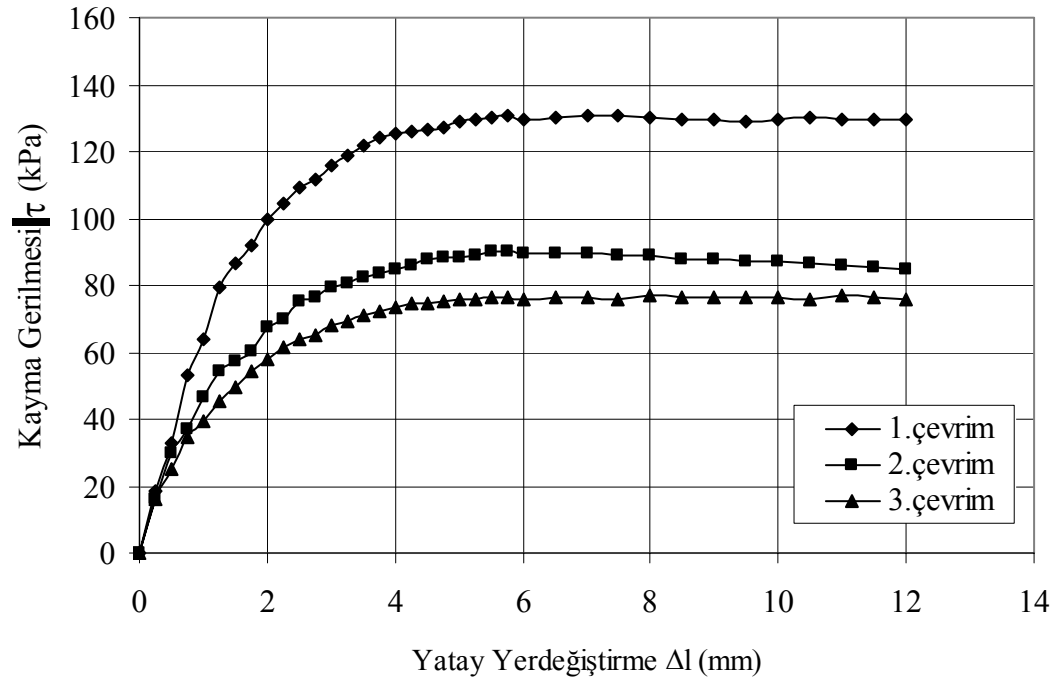


Şekil C.38 : Göçme zarfı eğrisi

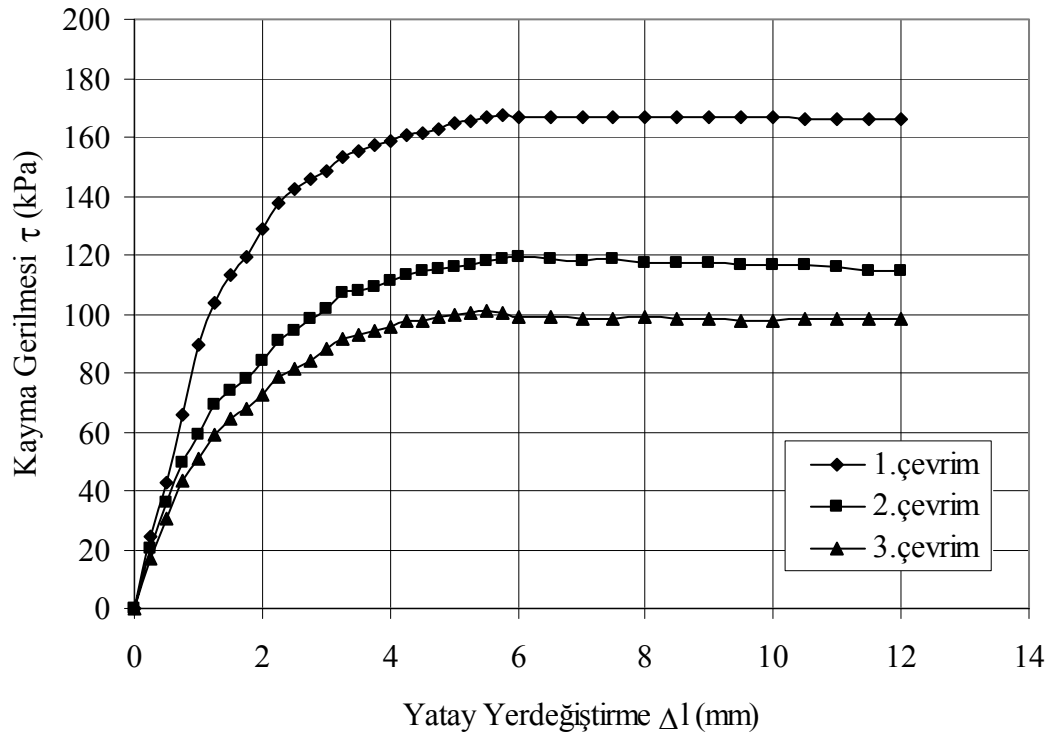
C.2.3 N-3 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



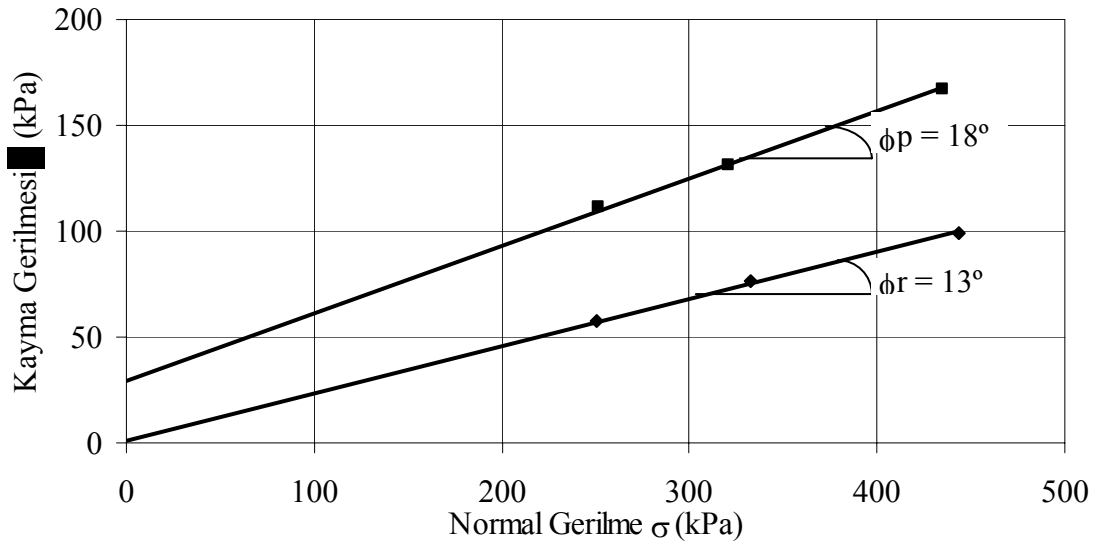
Şekil C.39 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.40 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

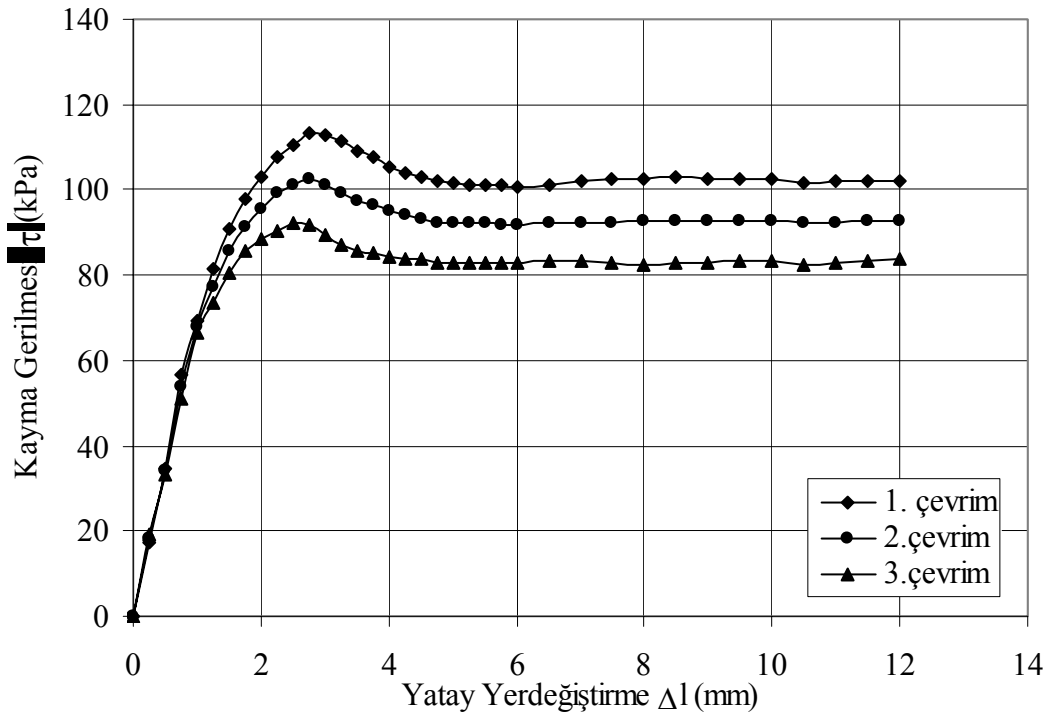


Şekil C.41 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

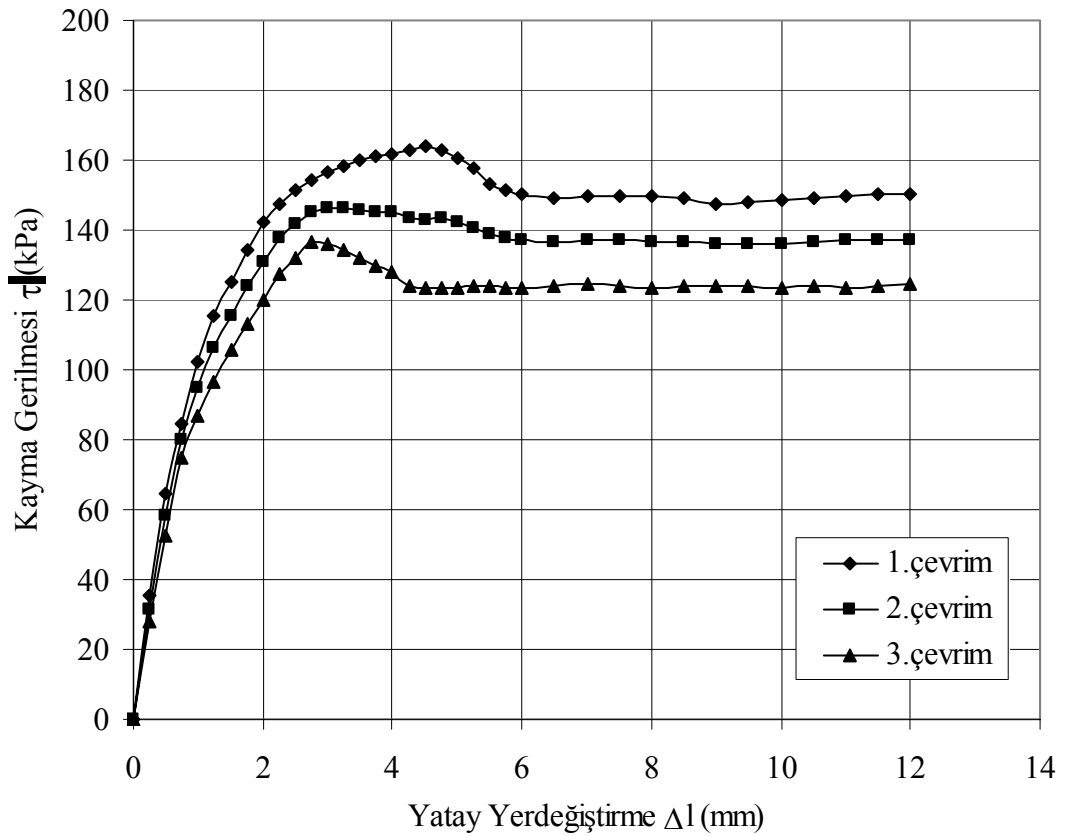


Şekil C.42 : Göçme zarfı eğrisi

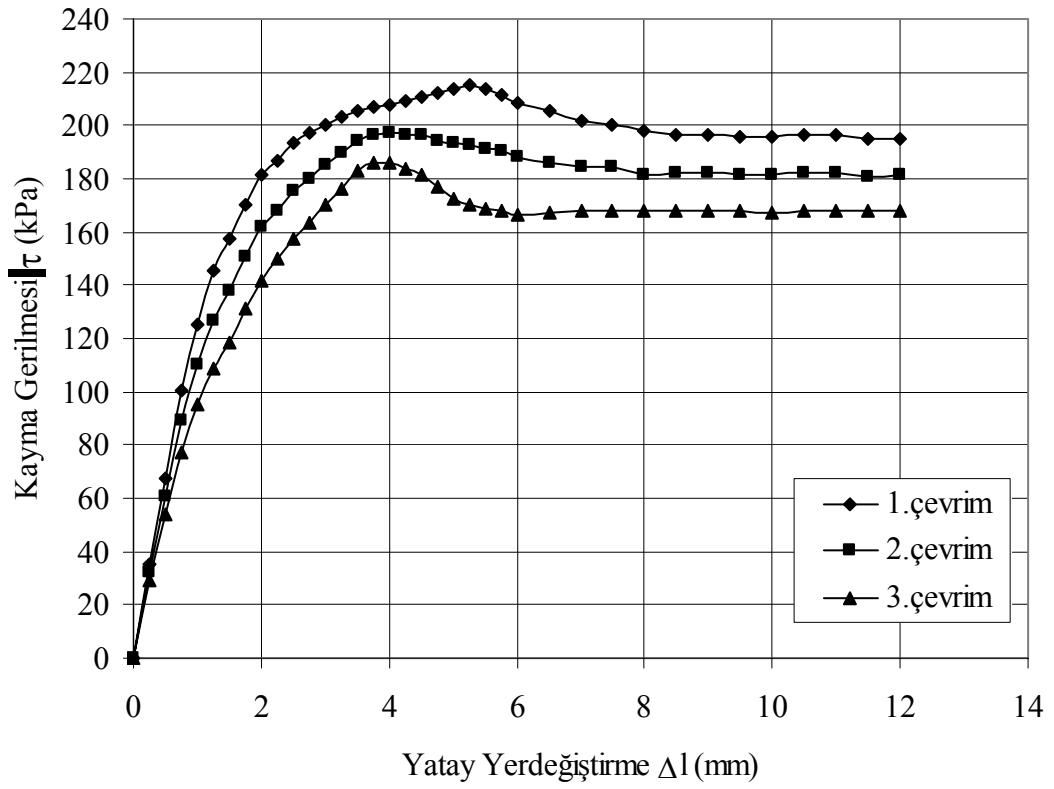
C.2.4 N-4 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



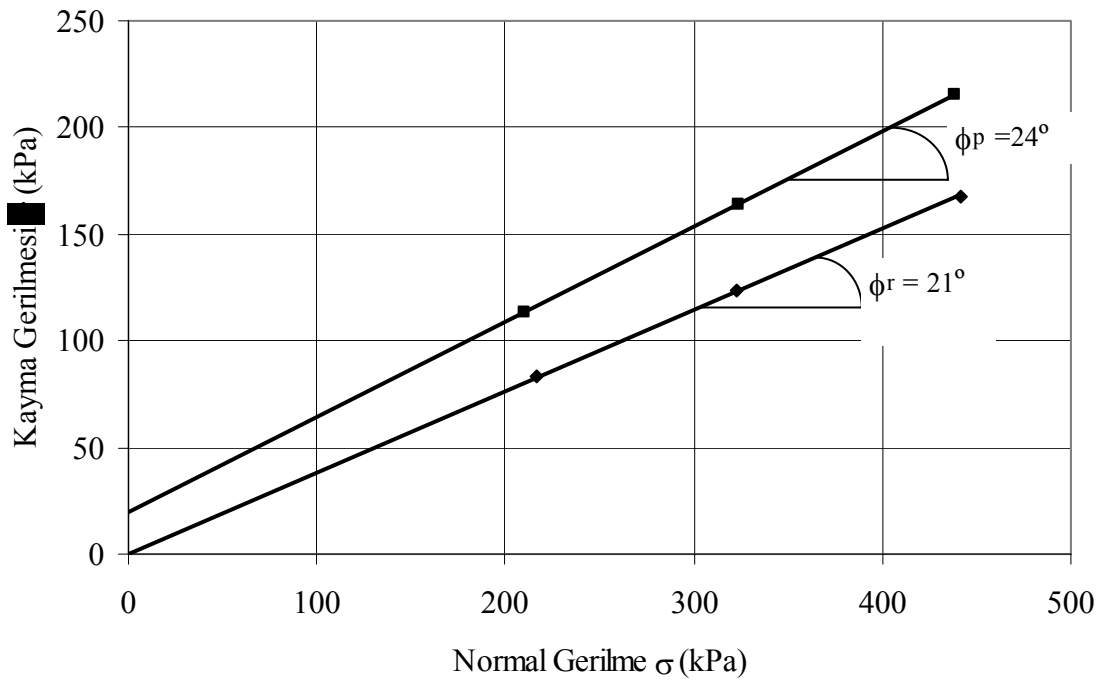
Şekil C.43 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.44 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

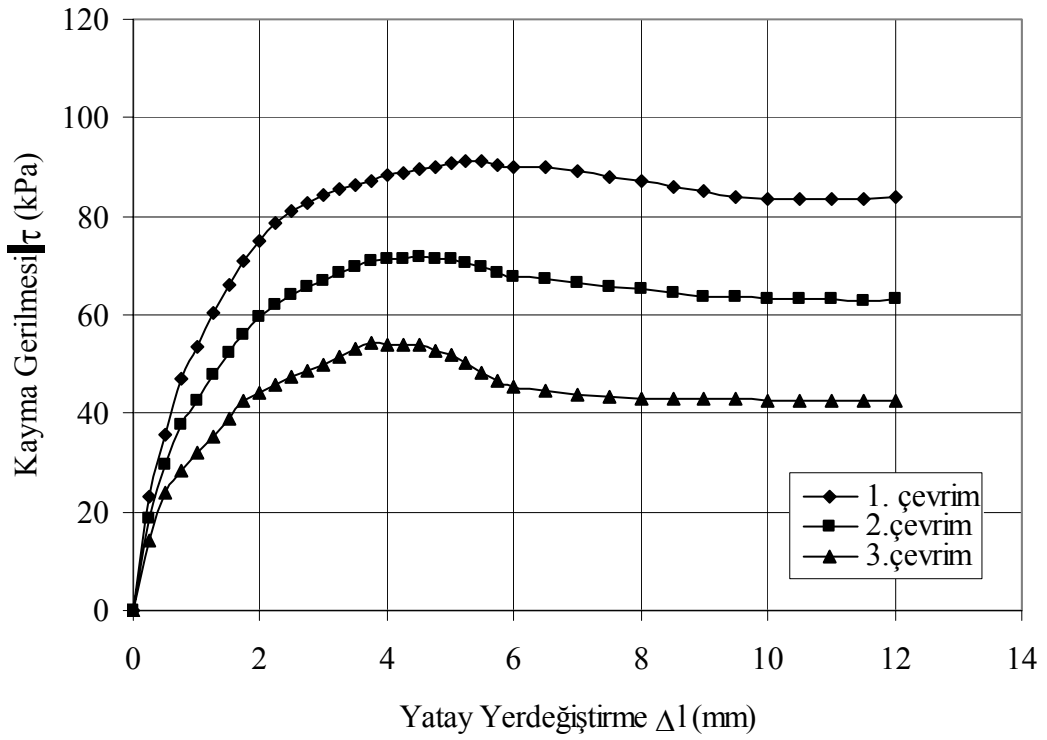


Şekil C.45 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

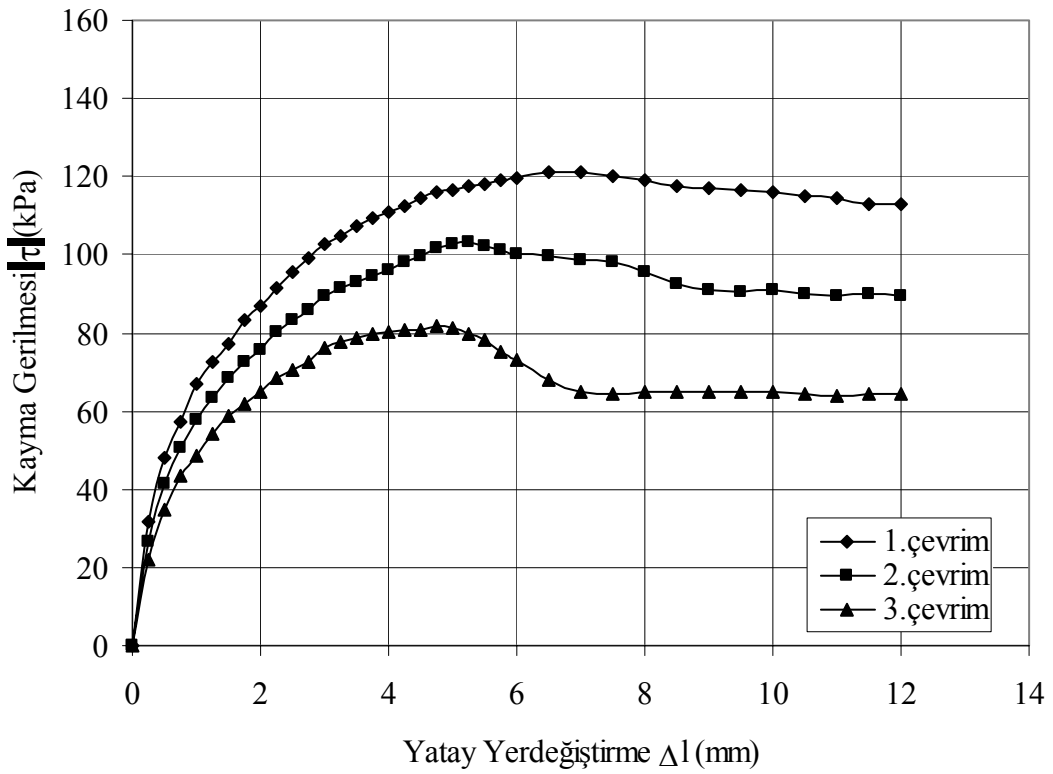


Şekil C.46 : Göçme zarfı eğrisi

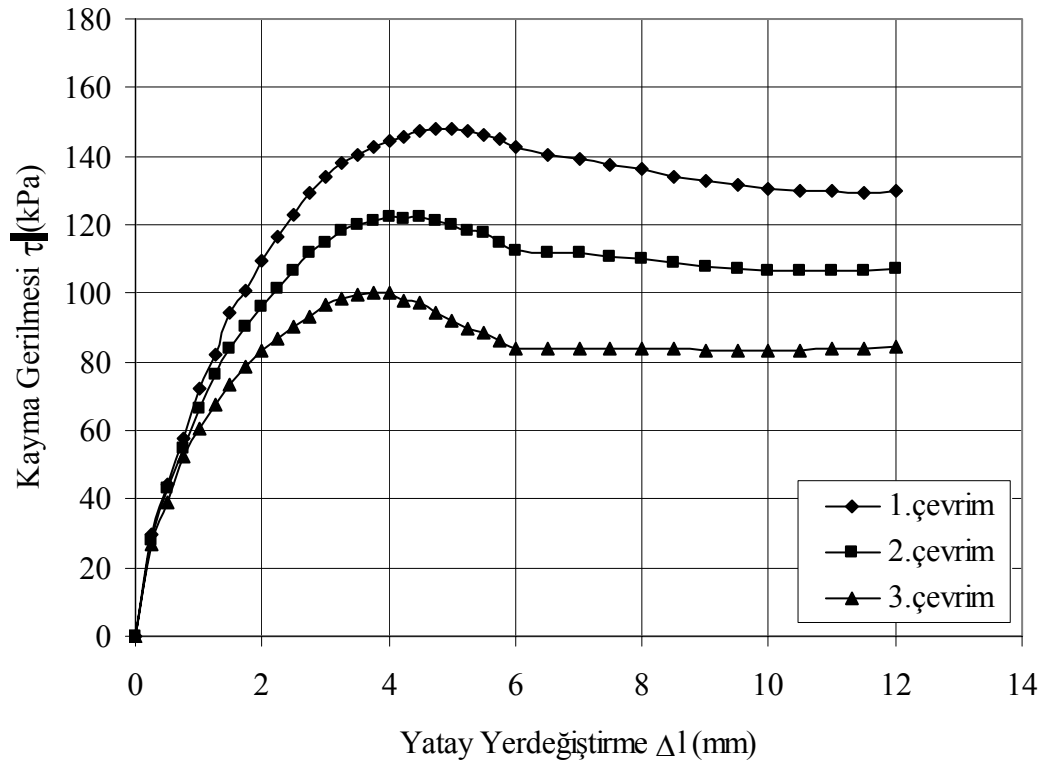
C.2.5 N-5 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



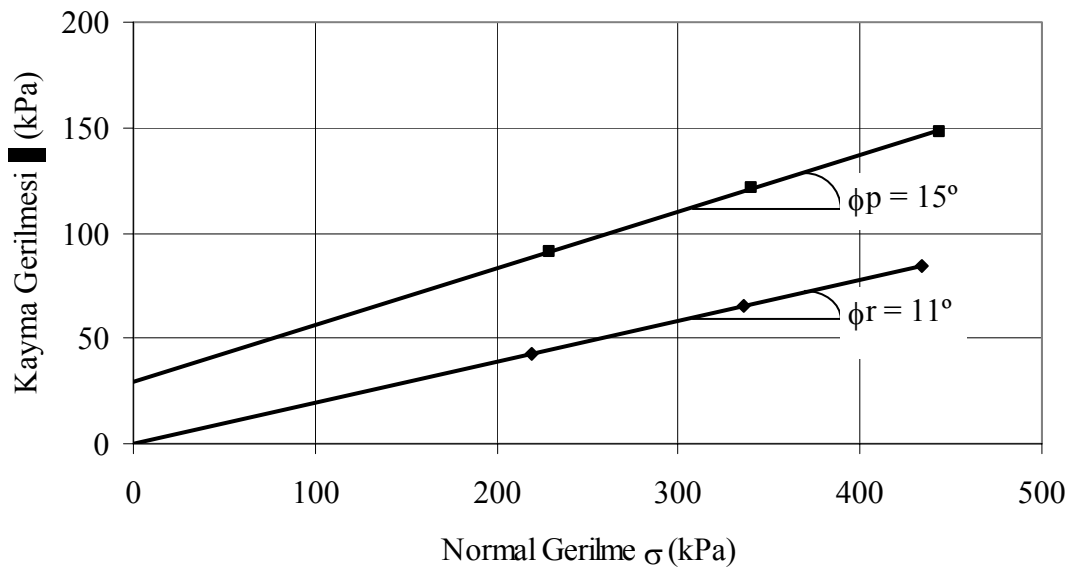
Şekil C.47 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.48 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

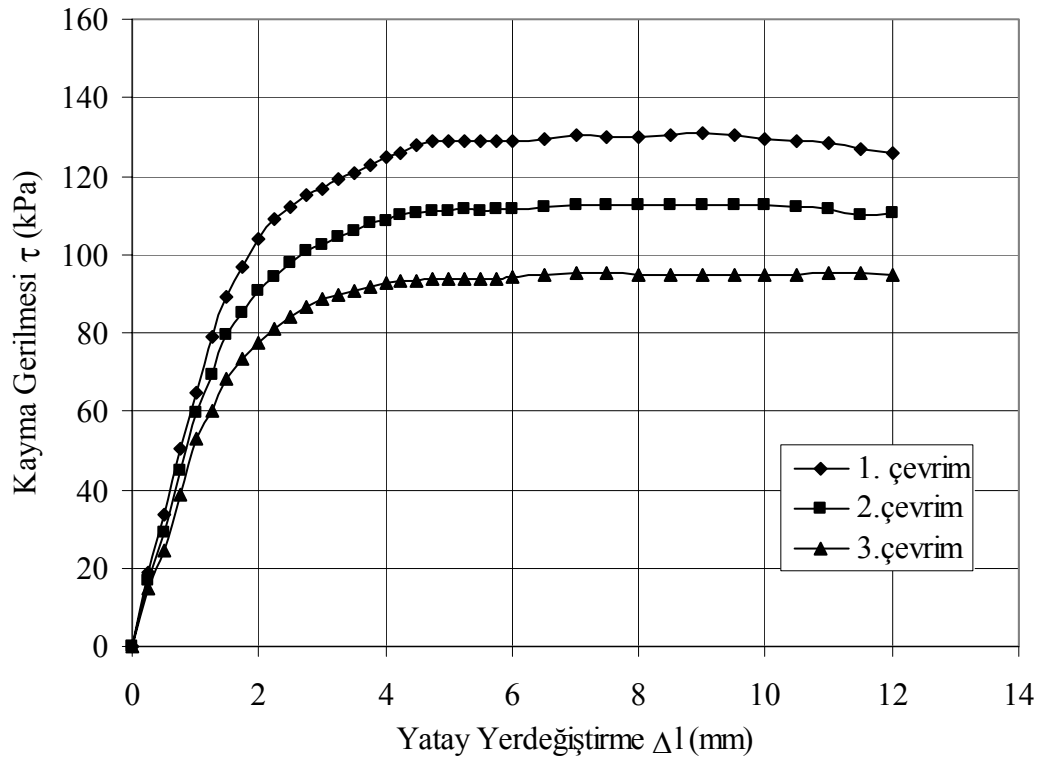


Şekil C.49 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

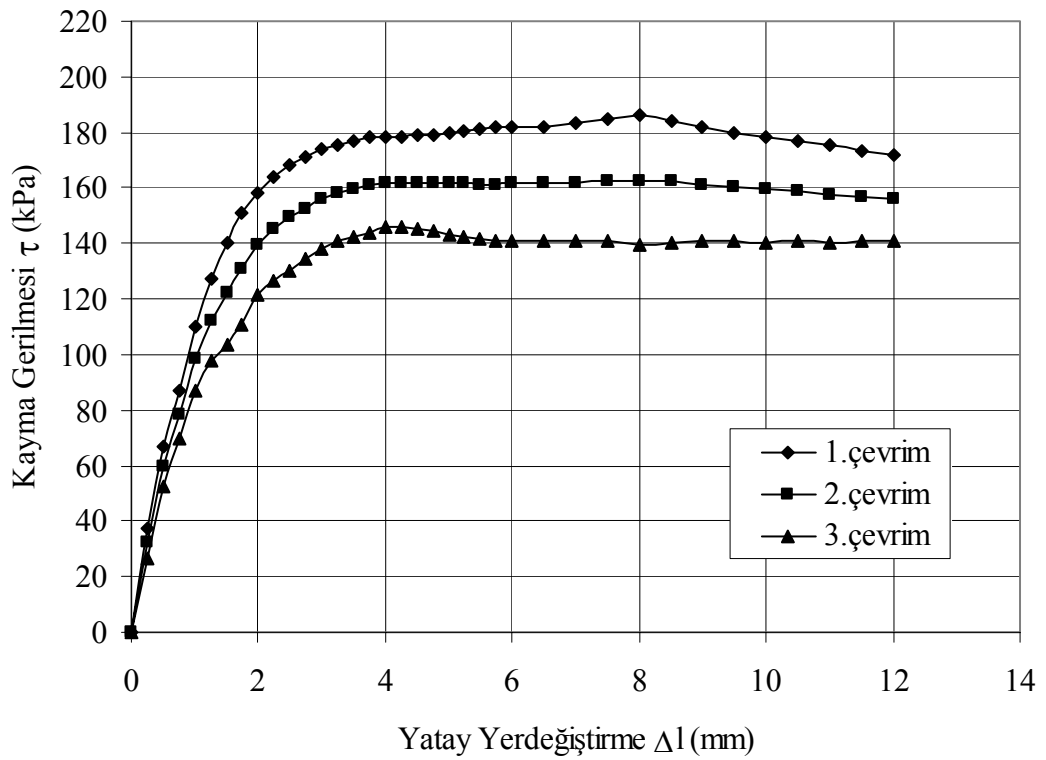


Şekil C.50 : Göçme zarfı eğrisi

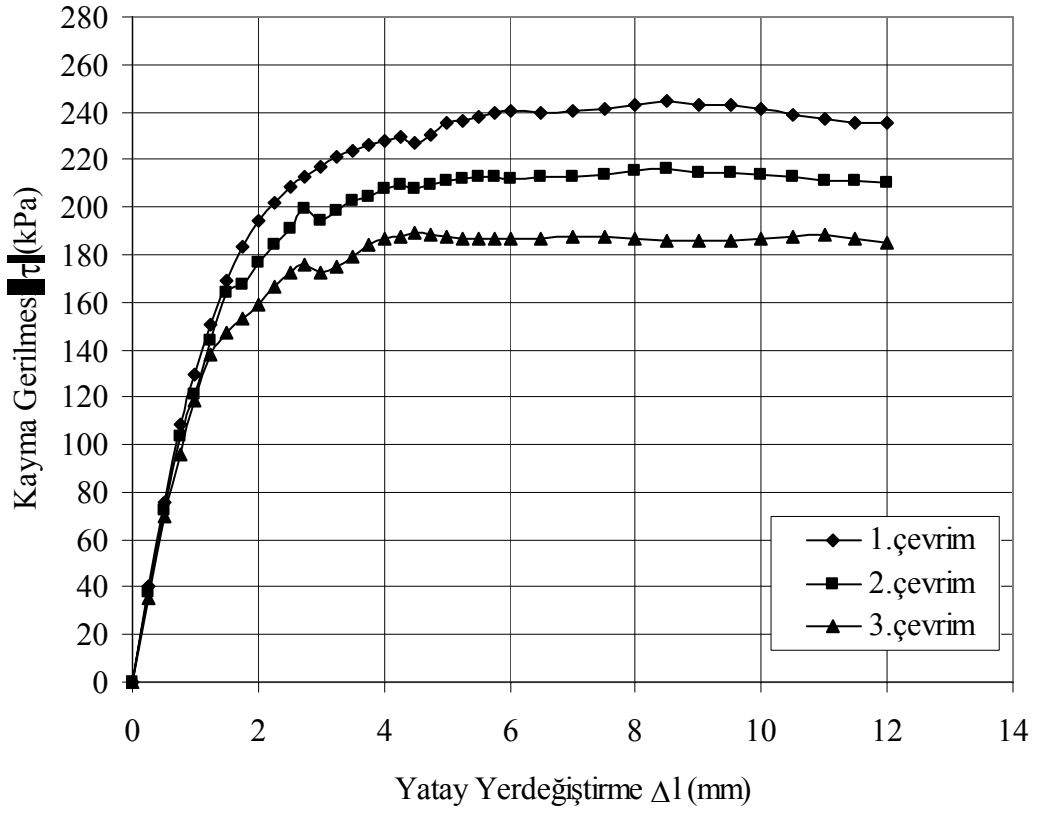
C.2.6 N-6 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



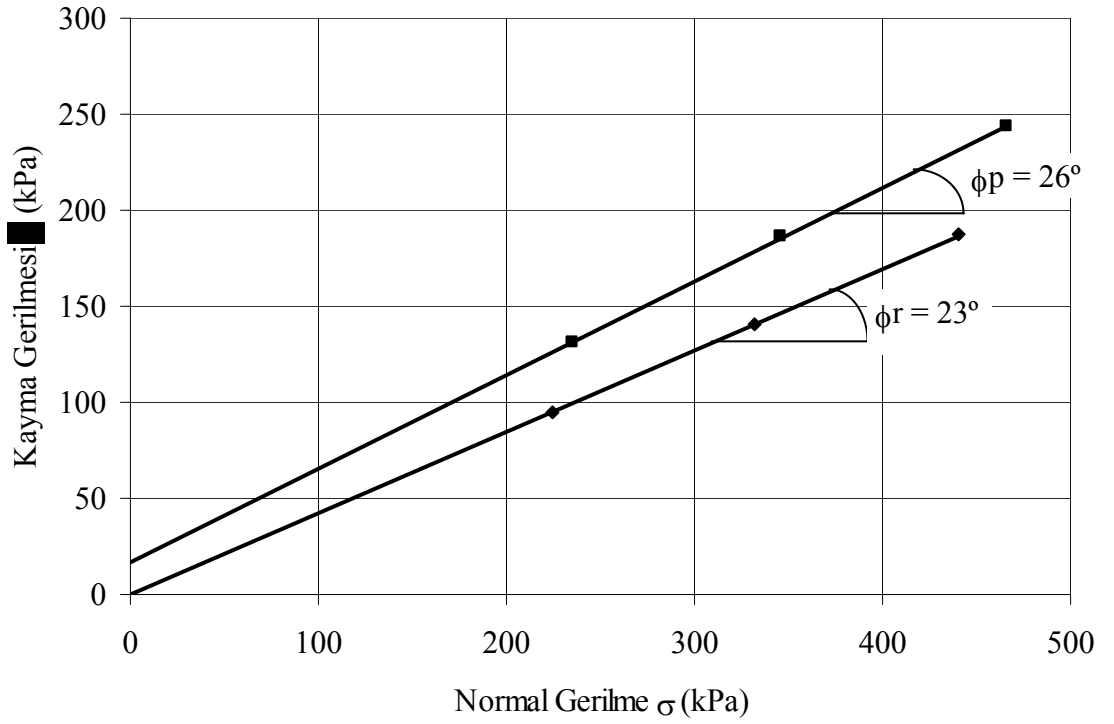
Şekil C.51 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.52 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

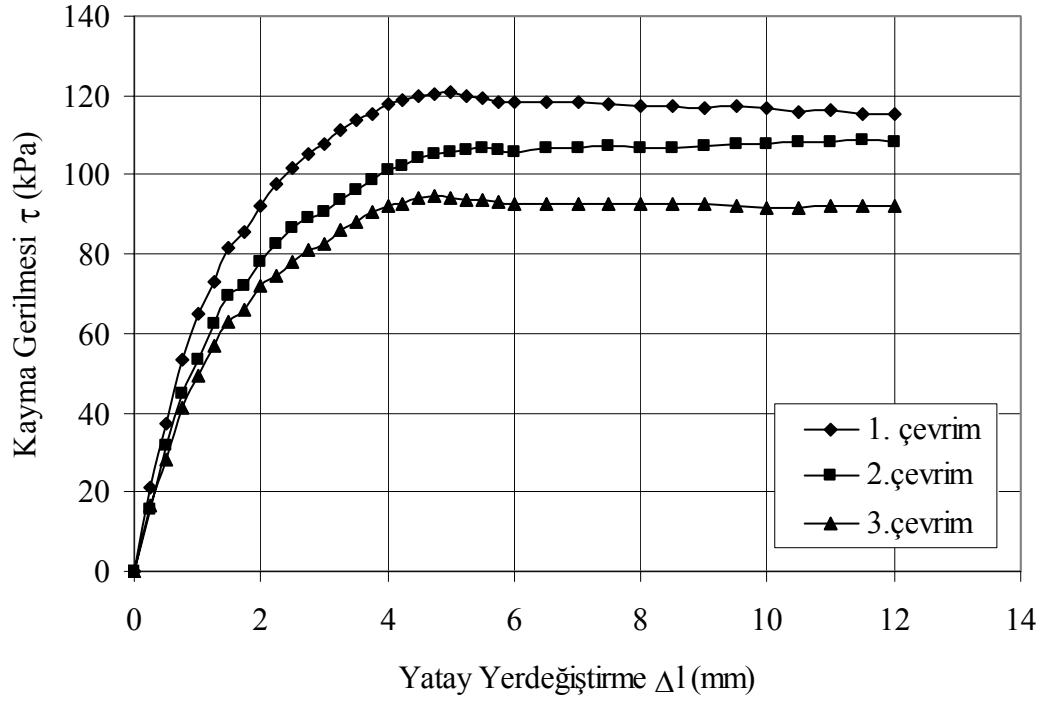


Şekil C.53 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

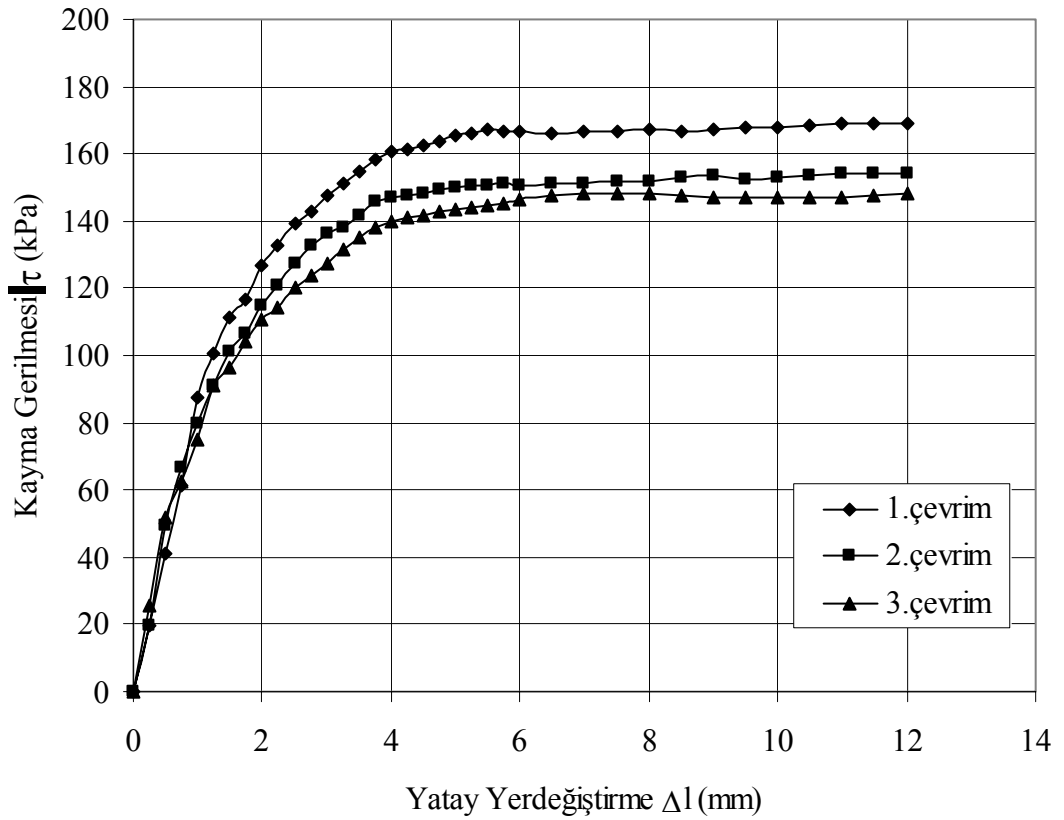


Şekil C.54 : Göçme zarfı eğrisi

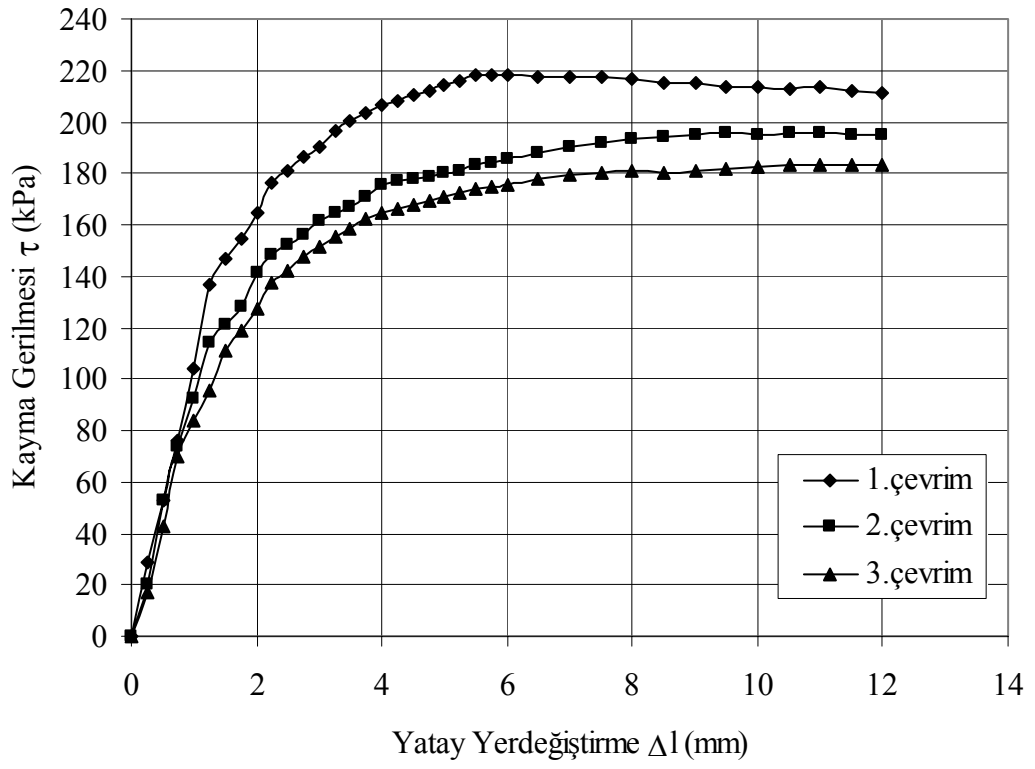
C.2.7 N-7 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



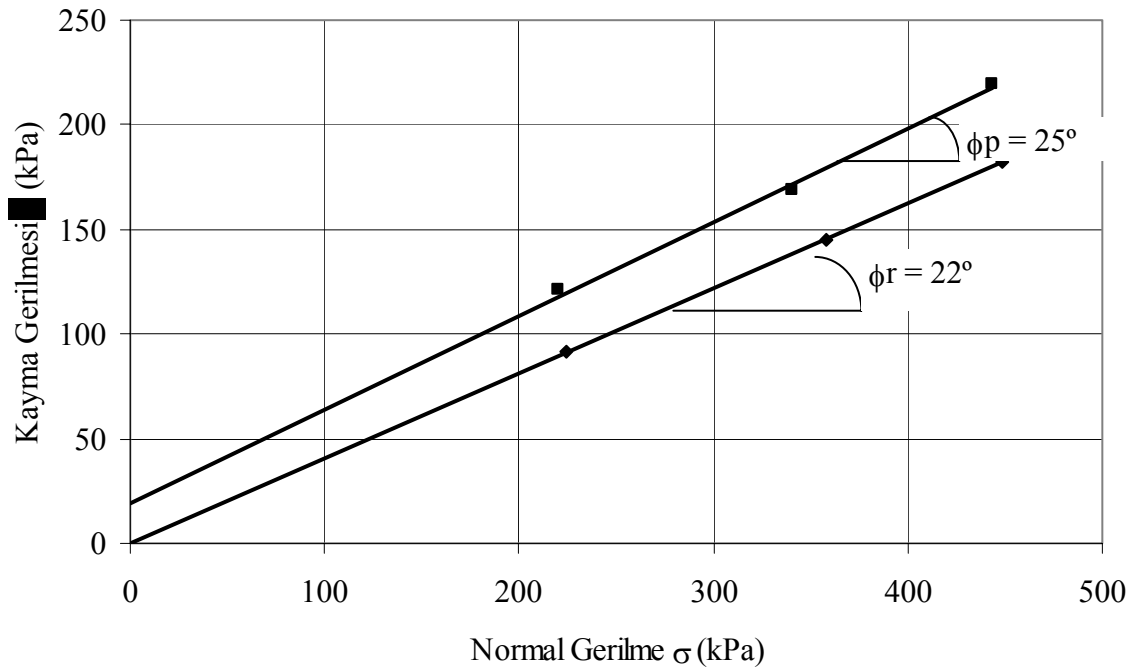
Şekil C.55 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.56 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

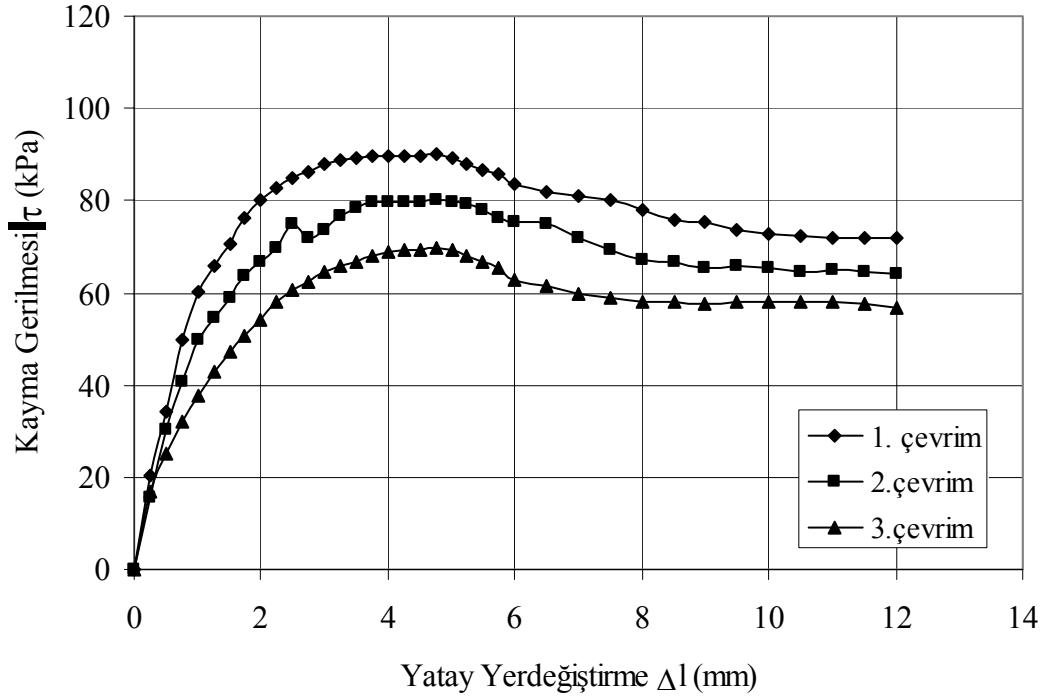


Şekil C.57 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

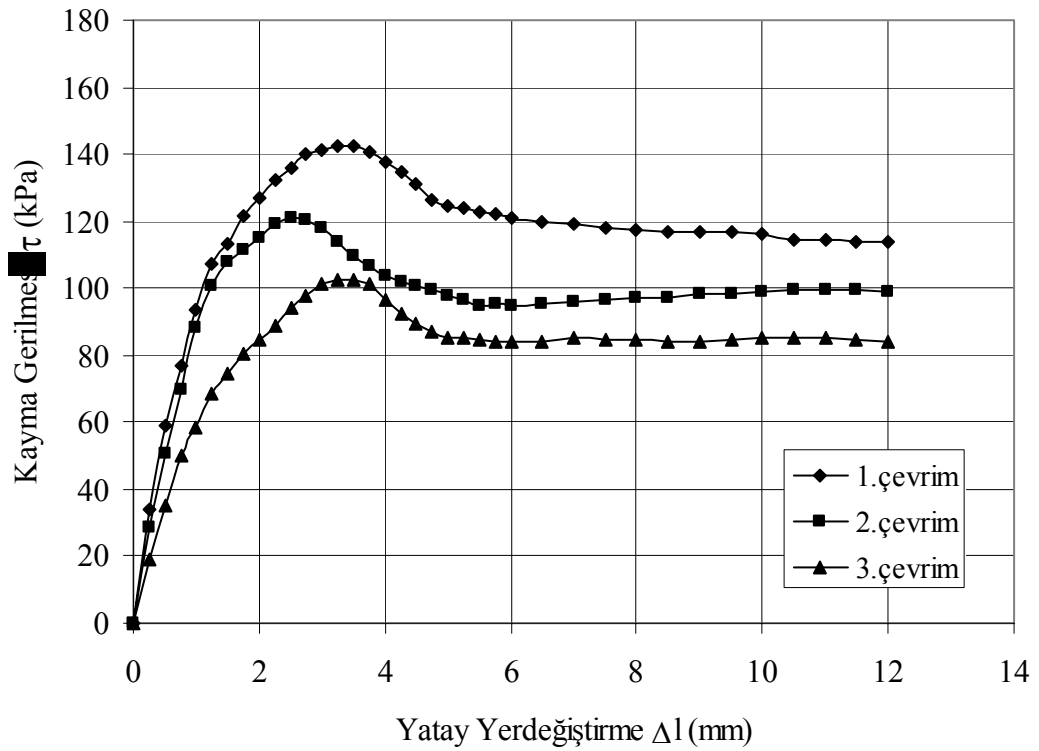


Şekil C.58 : Göçme zarfı eğrisi

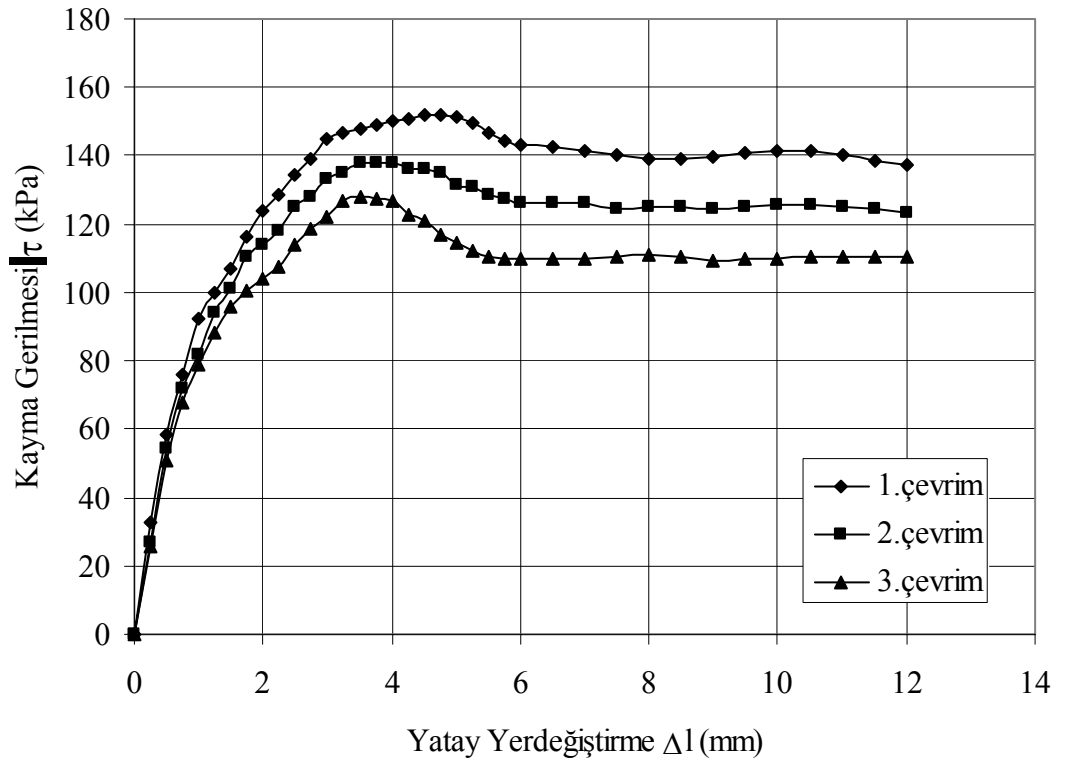
C.2.8 N-8 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



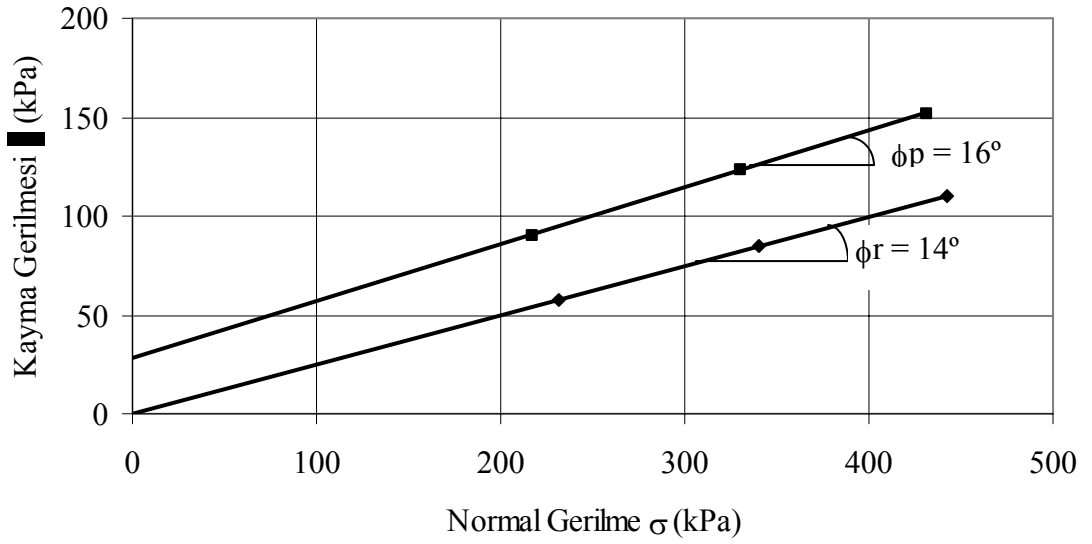
Şekil C.59 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.60 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

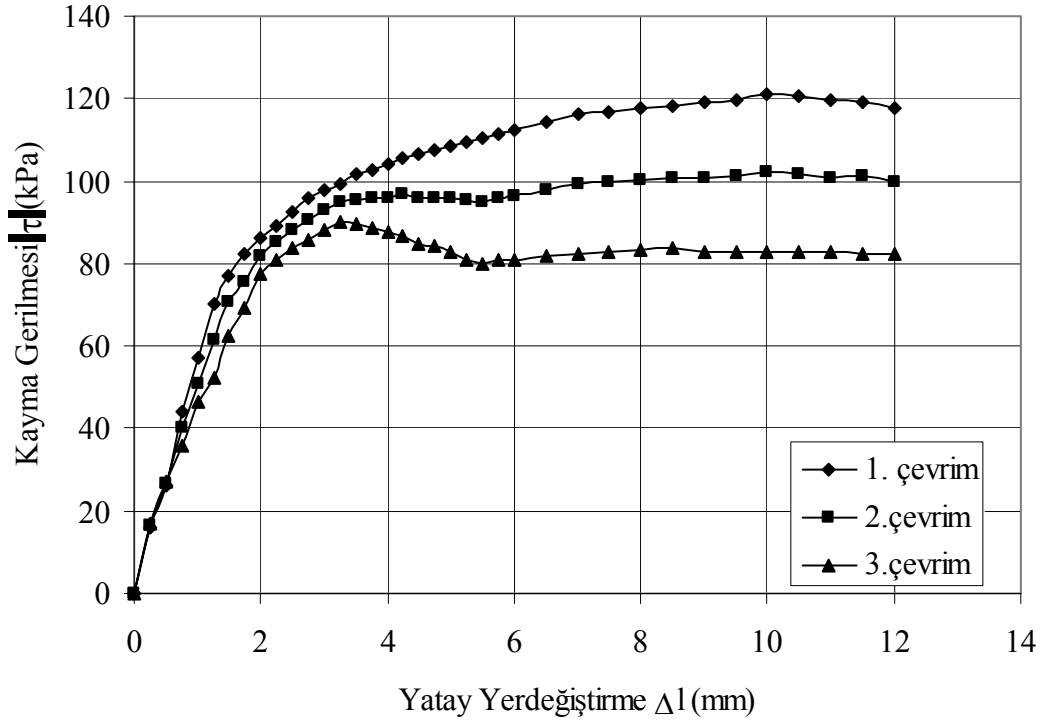


Şekil C.61 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

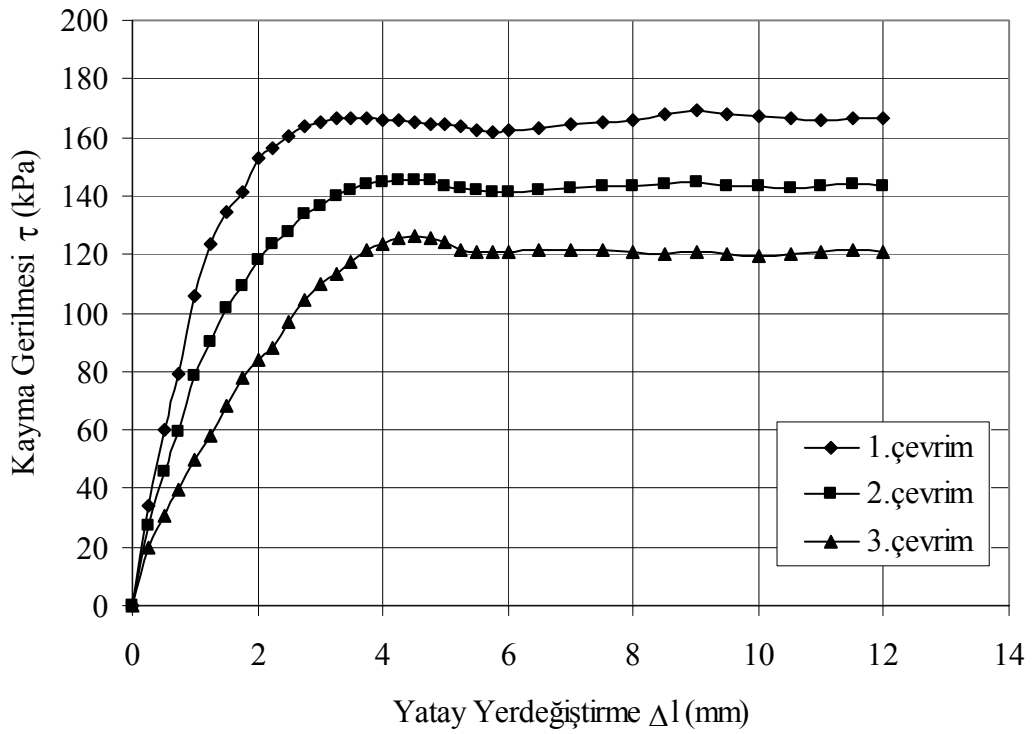


Şekil C.62 : Göçme zarfı eğrisi

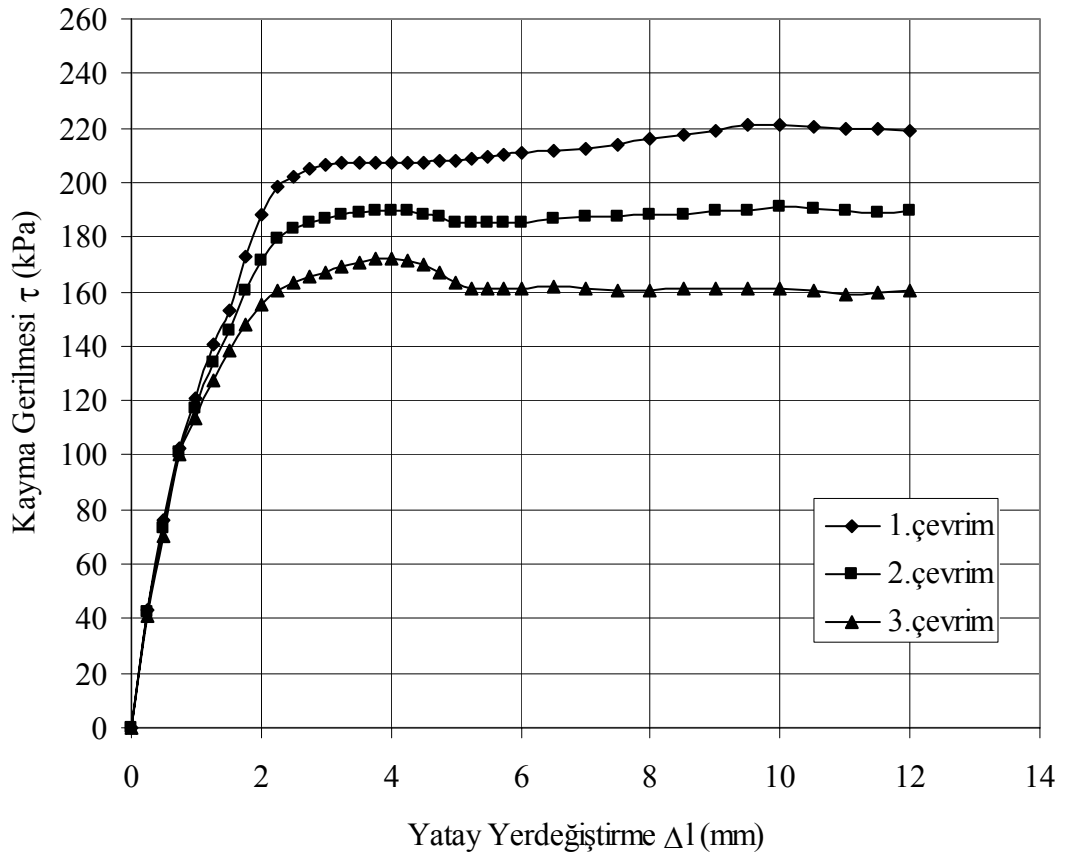
C.2.9 N-9 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



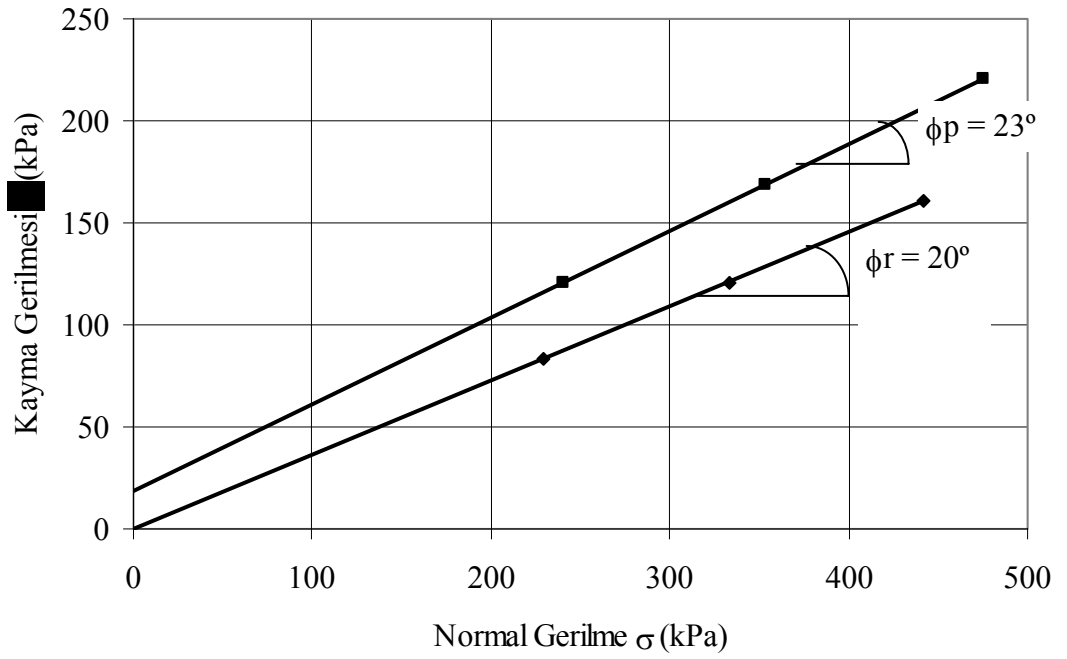
Şekil C.63 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.64 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

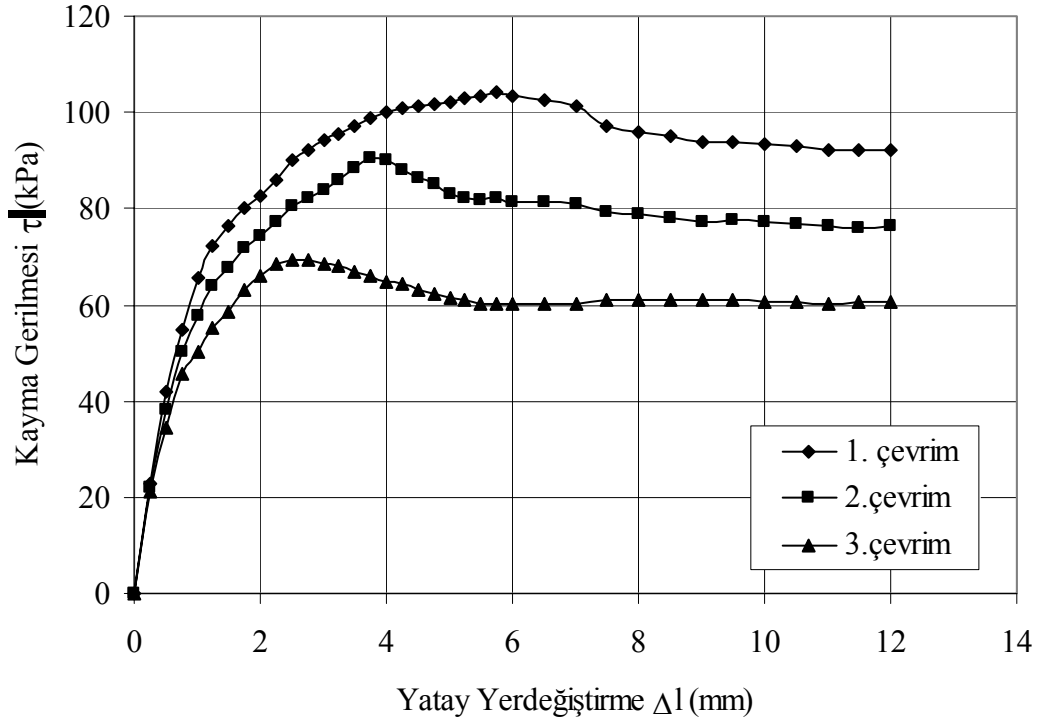


Şekil C.65 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

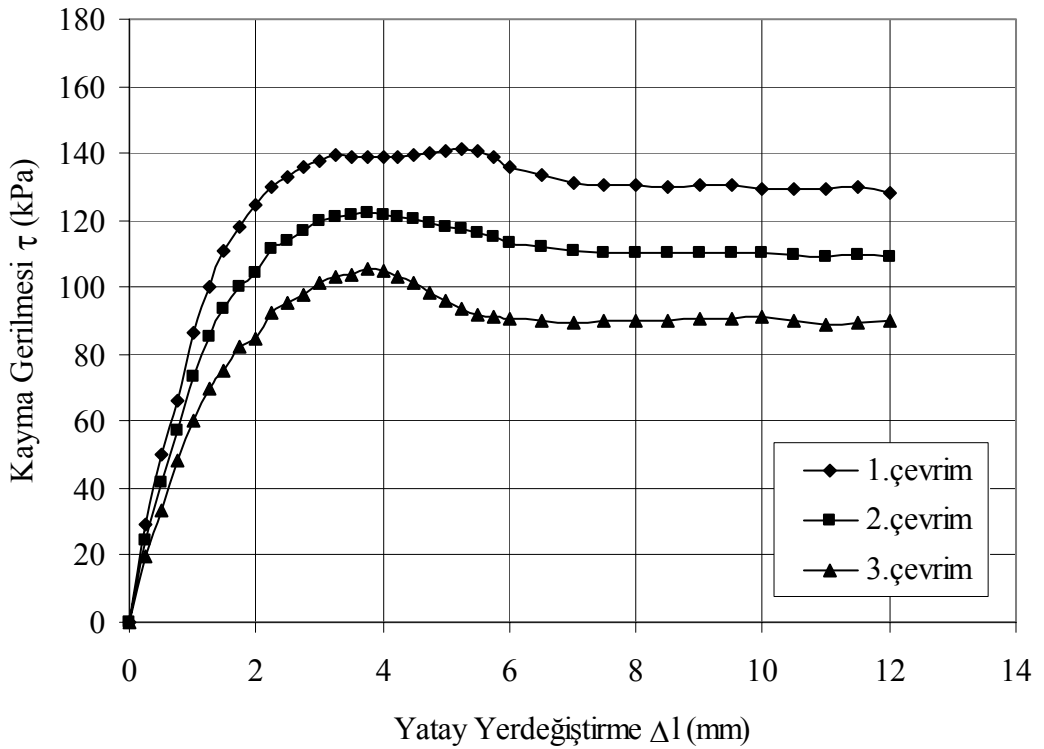


Şekil C.66 : Göçme zarfı eğrisi

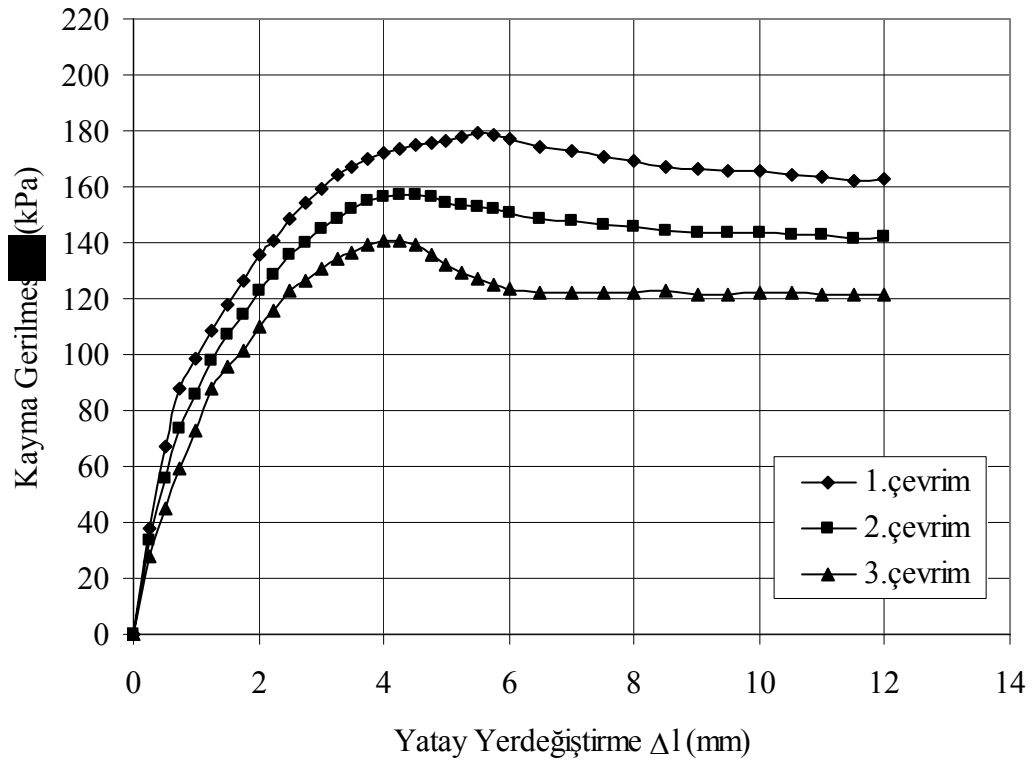
C.2.10 N-10 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



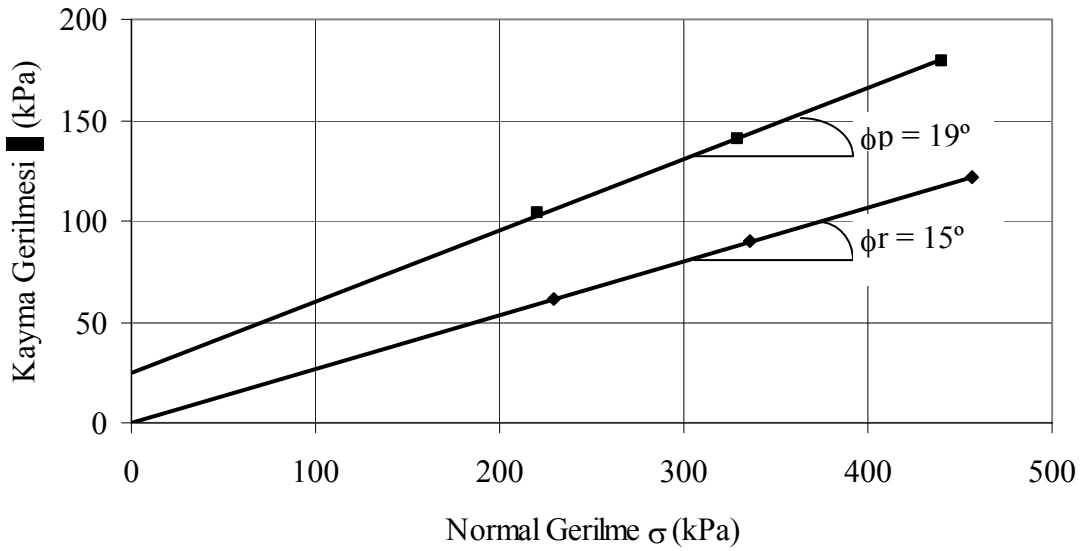
Şekil C.67 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.68 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

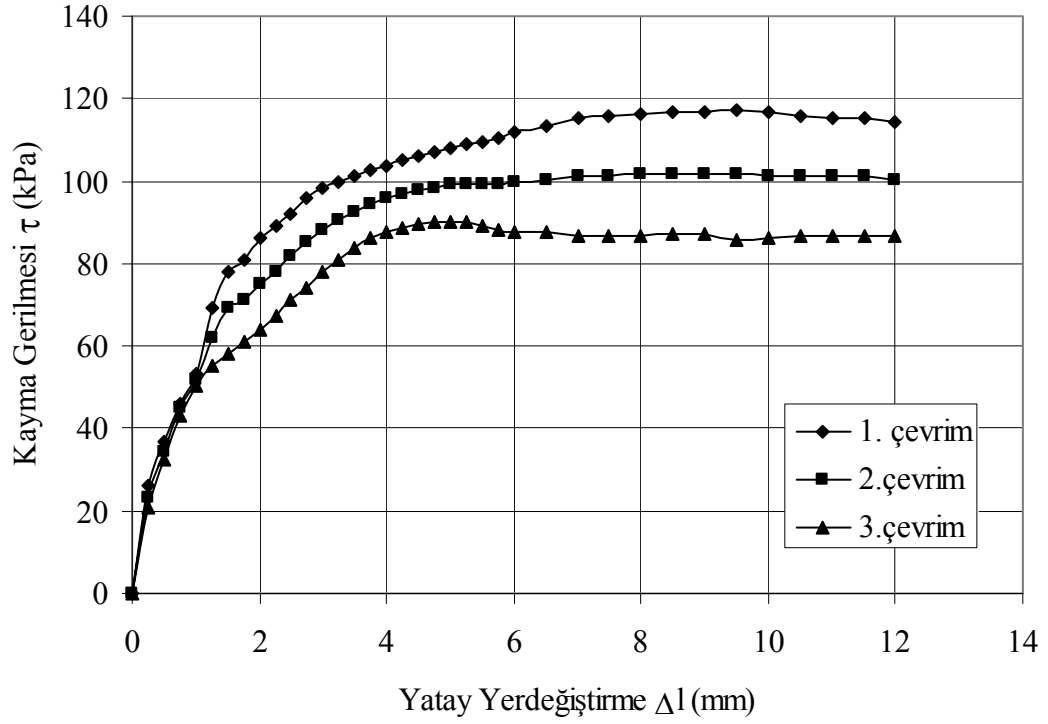


Şekil C.69 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

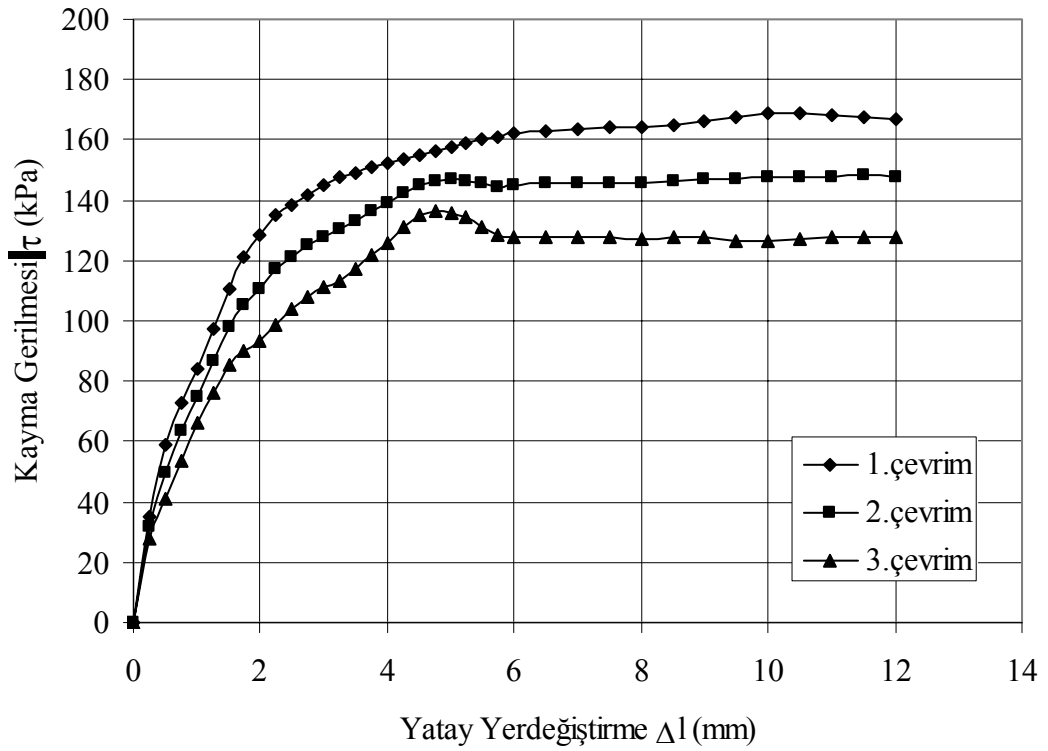


Şekil C.70 : Göçme zarfı eğrisi

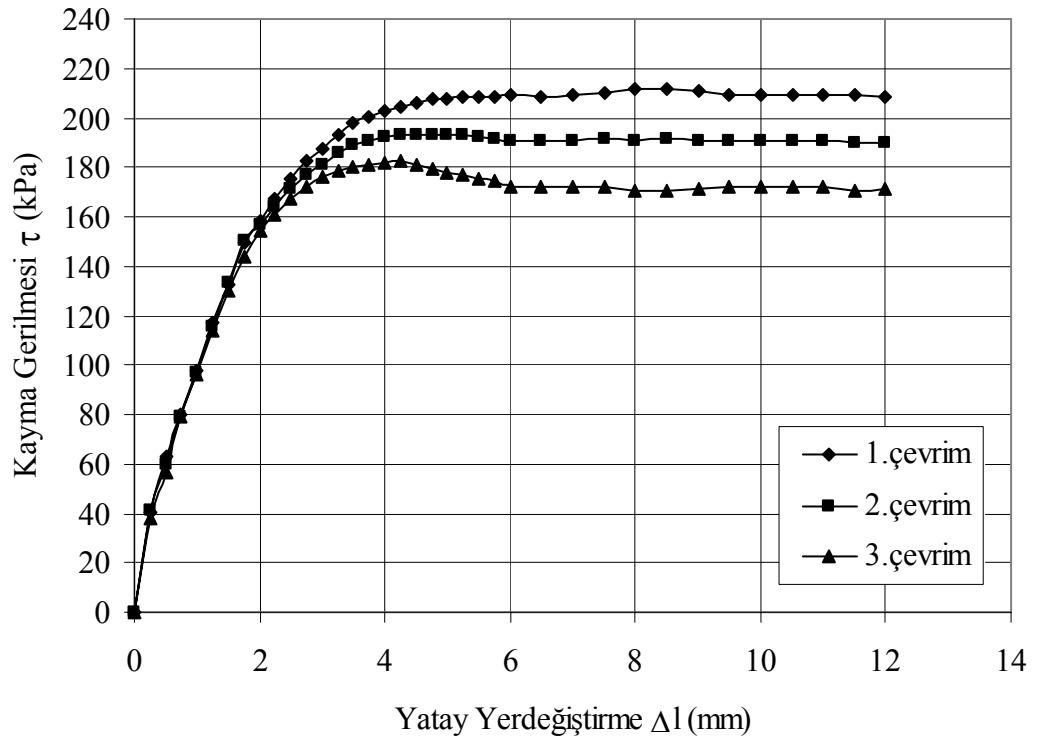
C.2.11 N-11 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



Şekil C.71 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.72 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

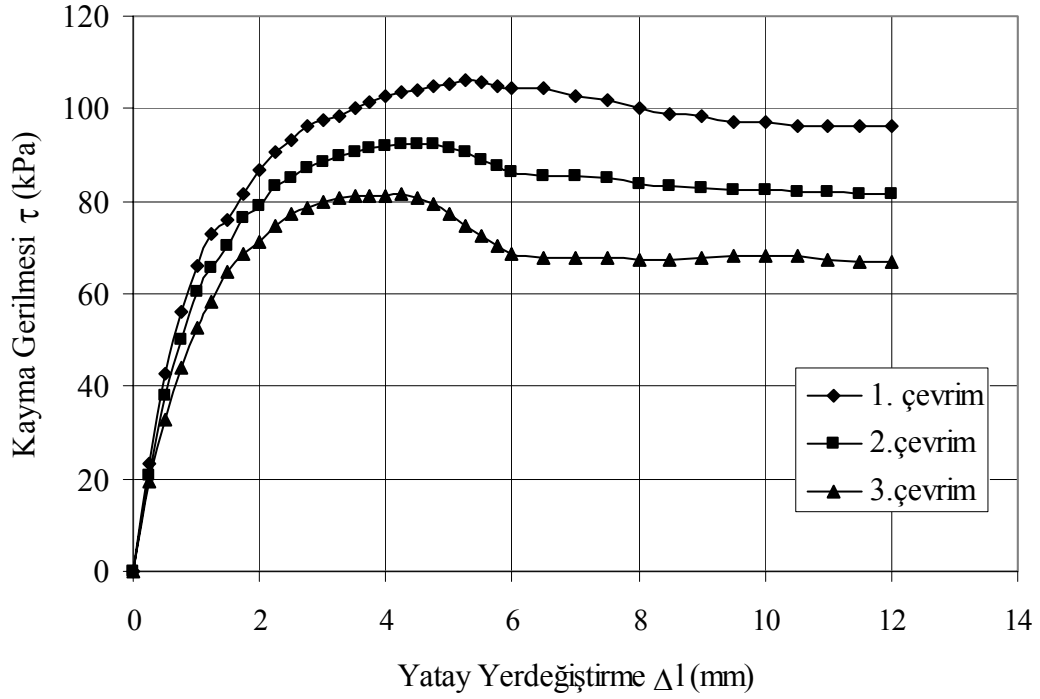


Şekil C.73 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

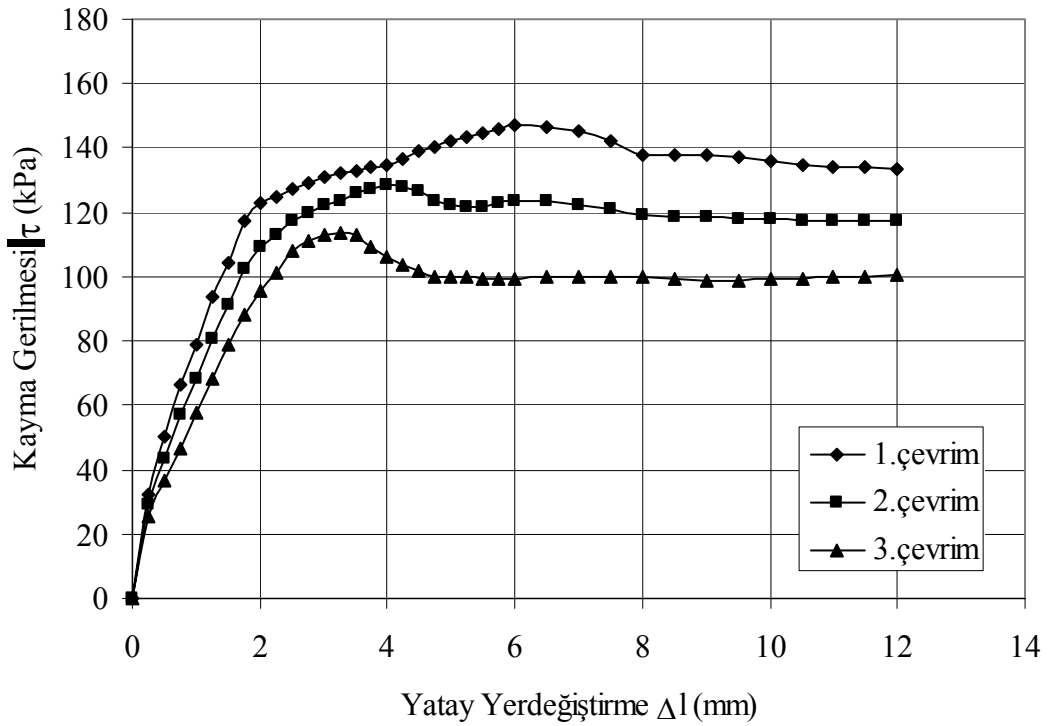


Şekil C.74 : Göçme zarfı eğrisi

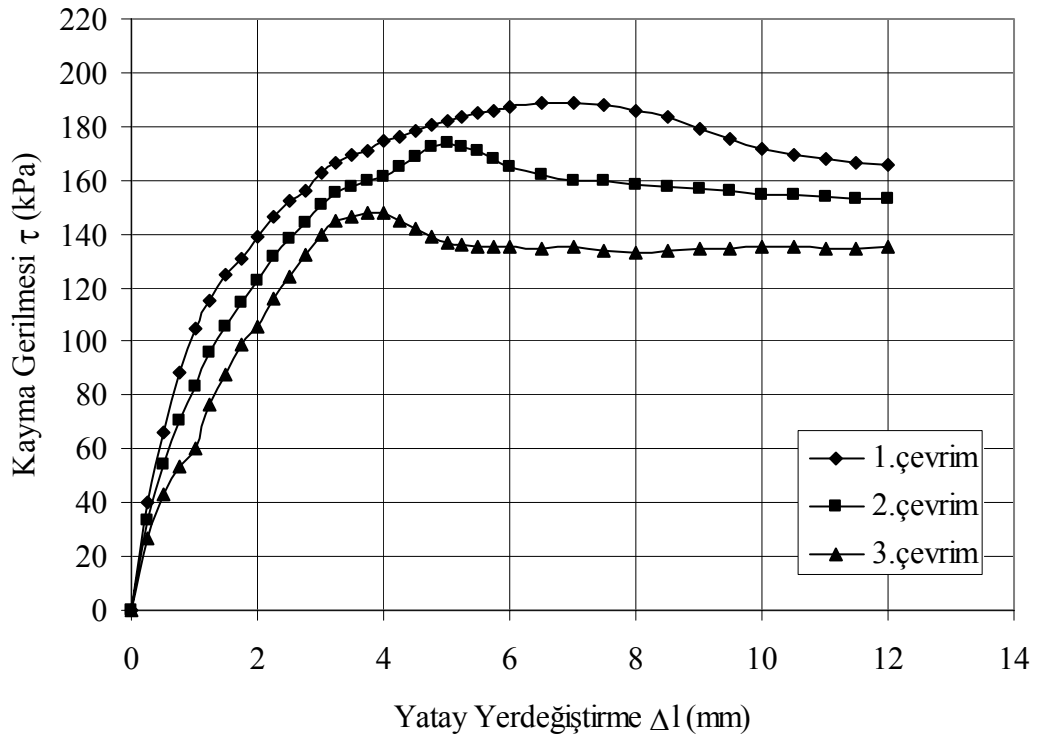
C.2.12 N-12 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



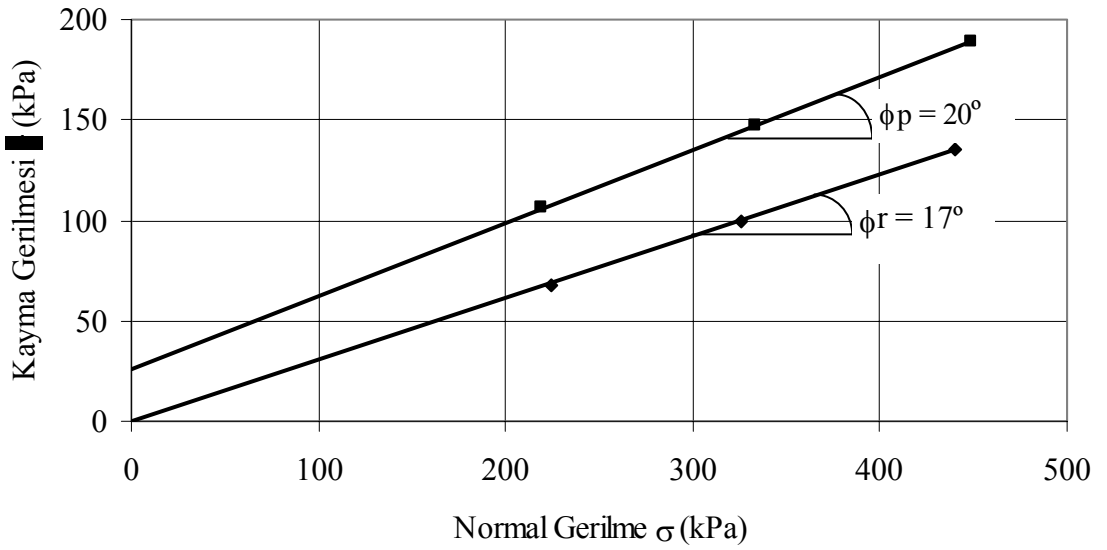
Şekil C.75 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.76 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

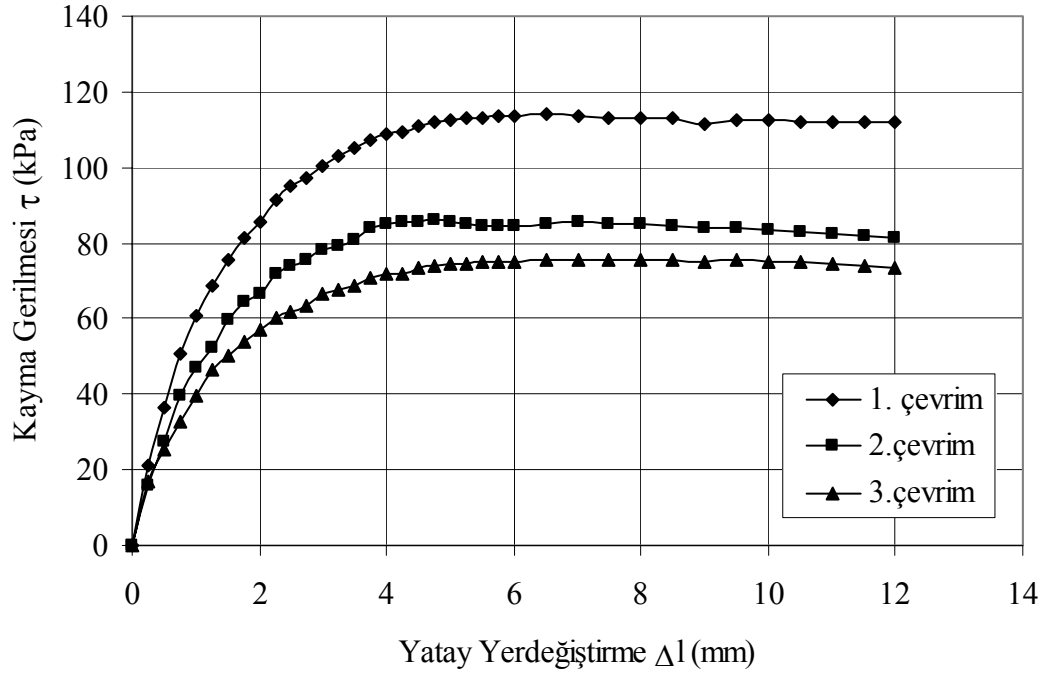


Şekil C.77 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

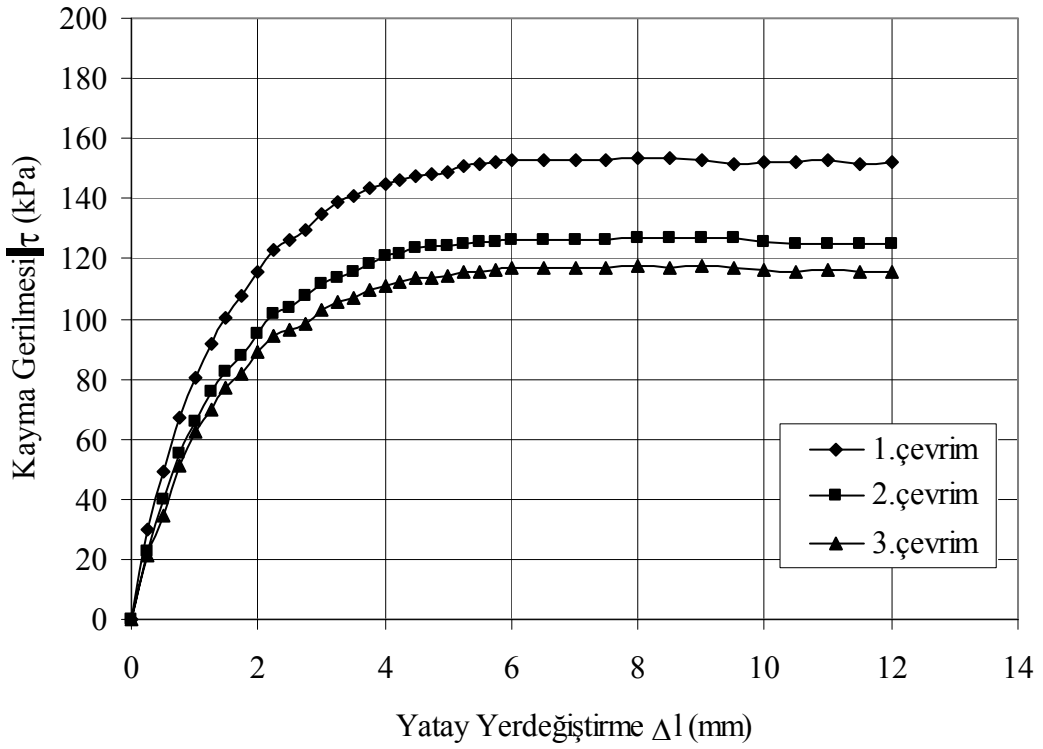


Şekil C.78 : Göçme zarfı eğrisi

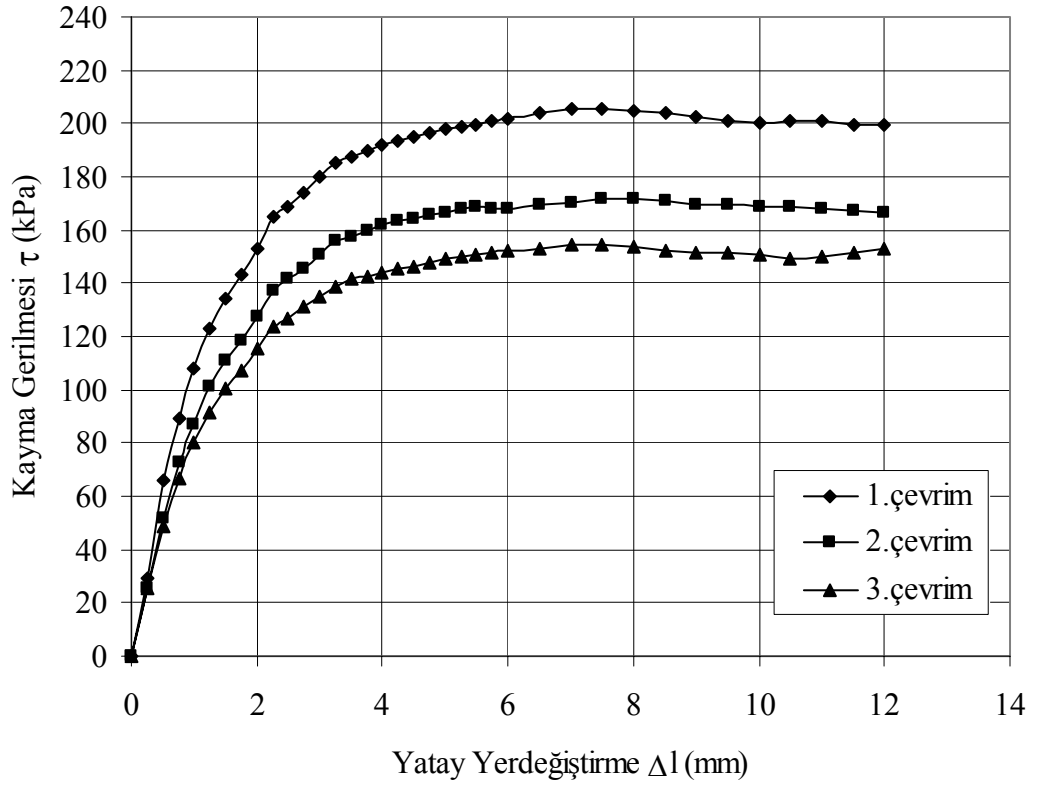
C.2.13 N-13 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



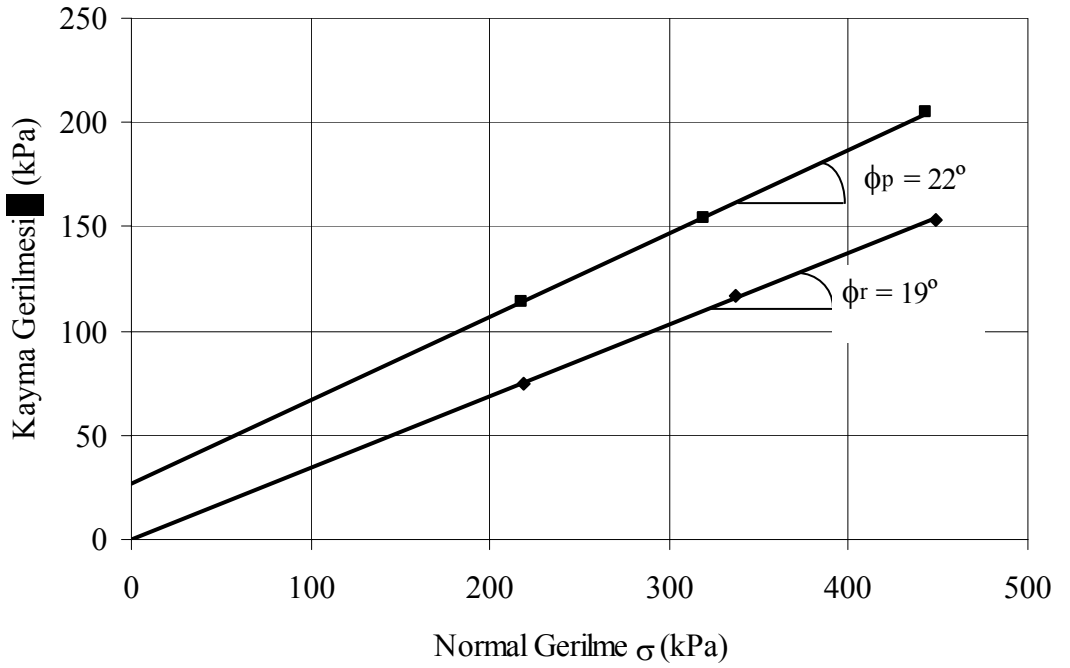
Şekil C.79 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.80 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

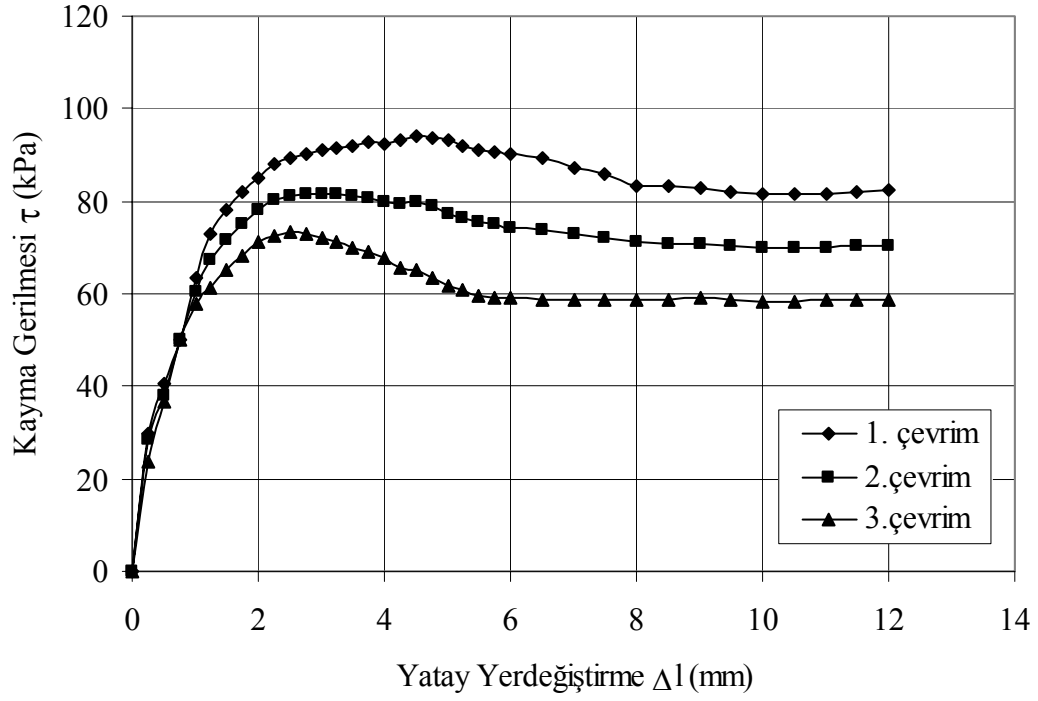


Şekil C.81 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

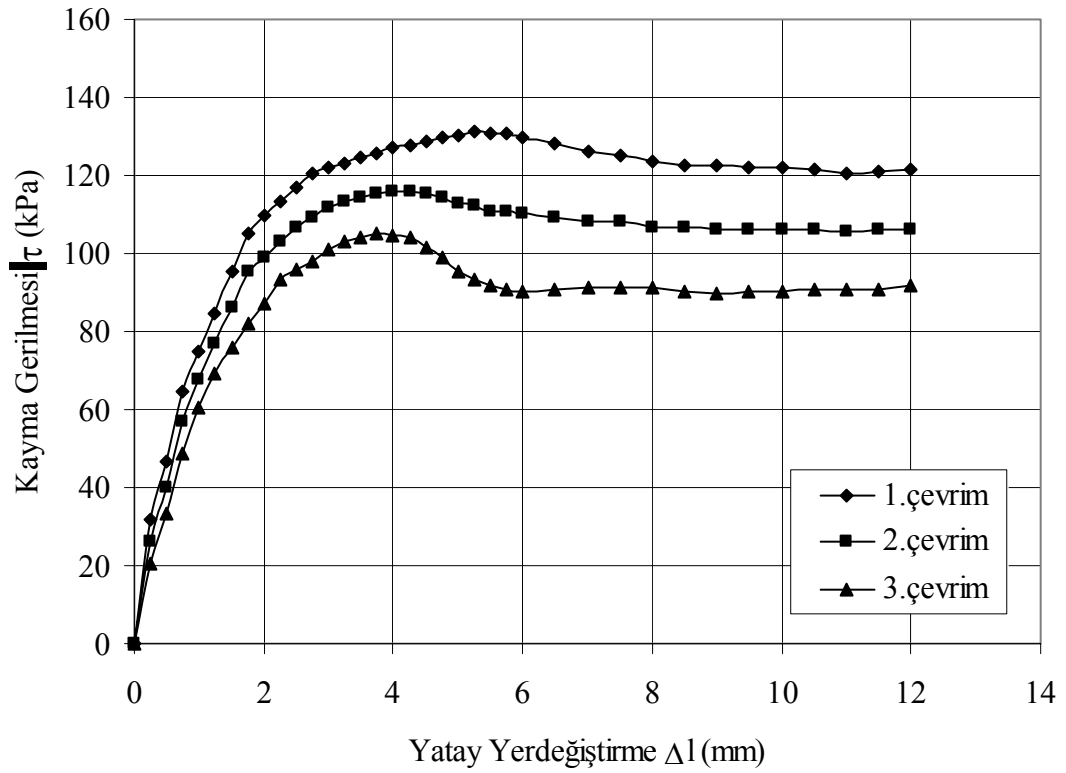


Şekil C.82 : Göçme zarfı eğrisi

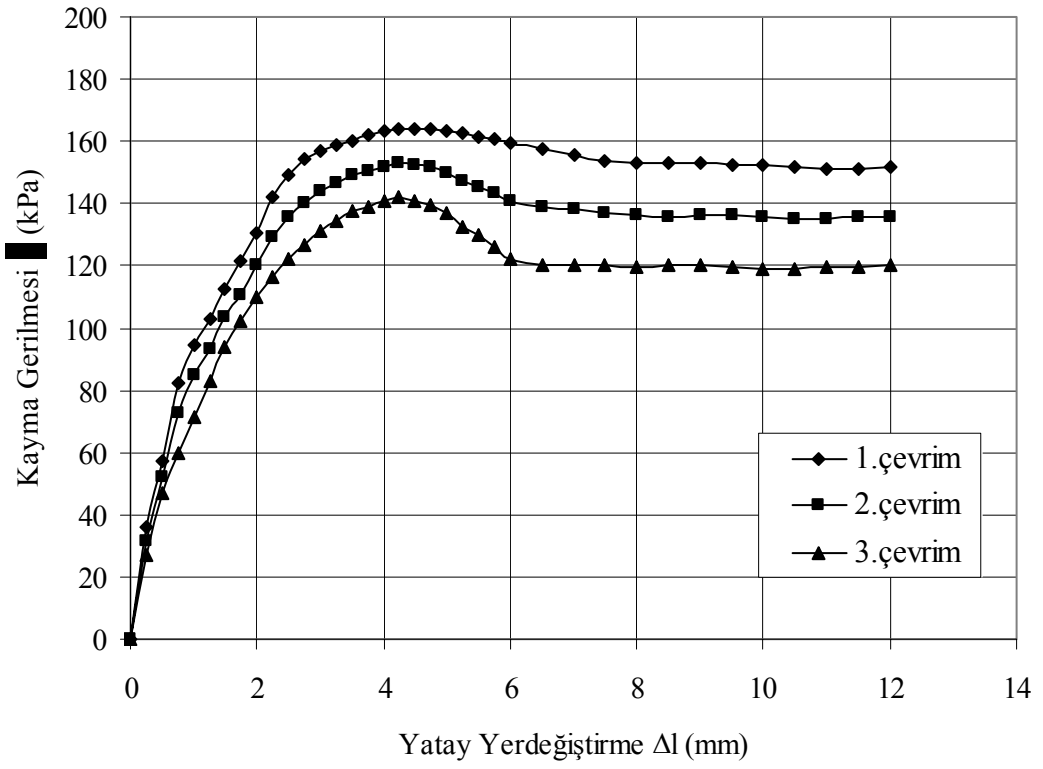
C.2.14 N-14 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



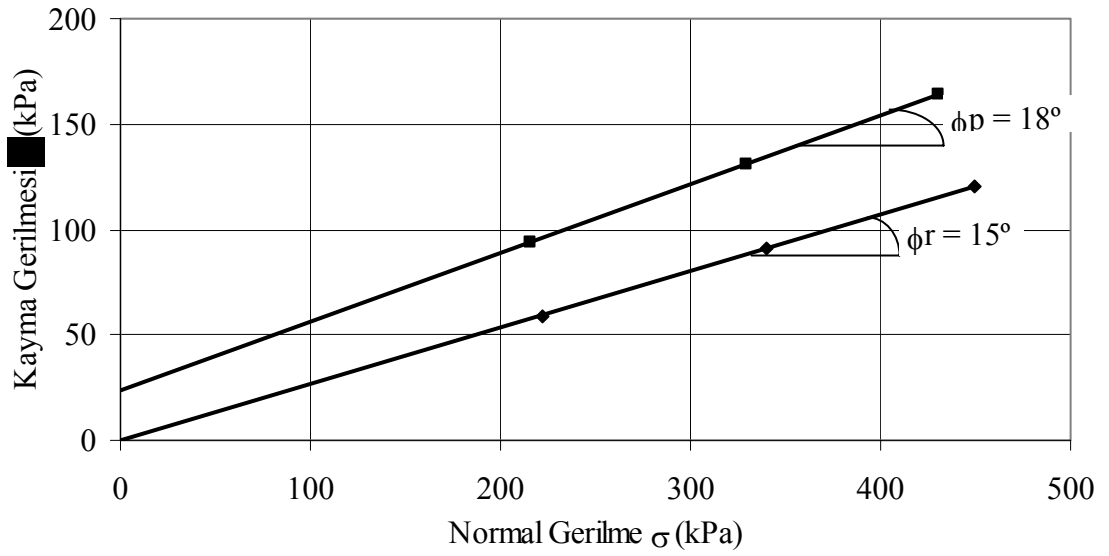
Şekil C.83 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.84 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)

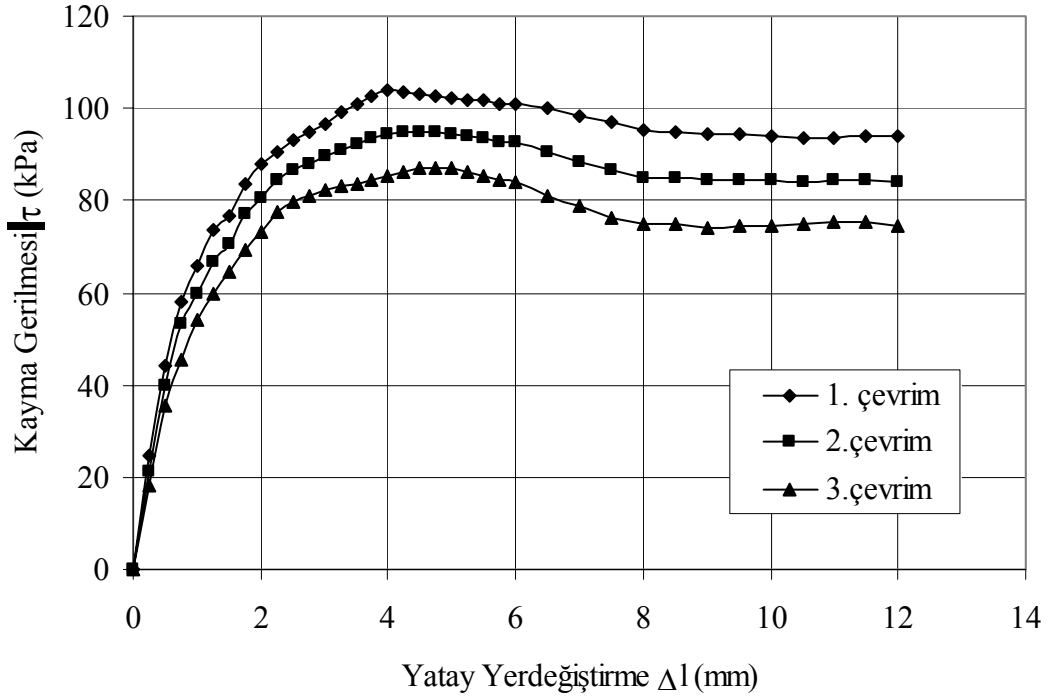


Şekil C.85 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)

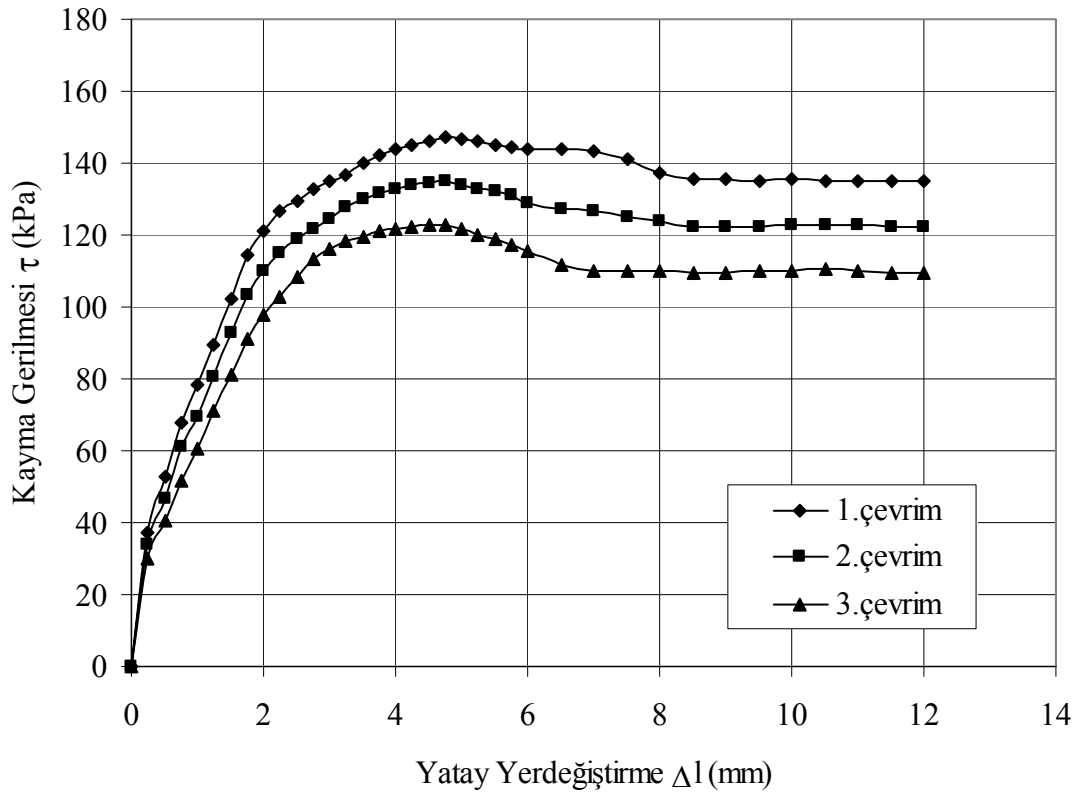


Şekil C.86 : Göçme zarfı eğrisi

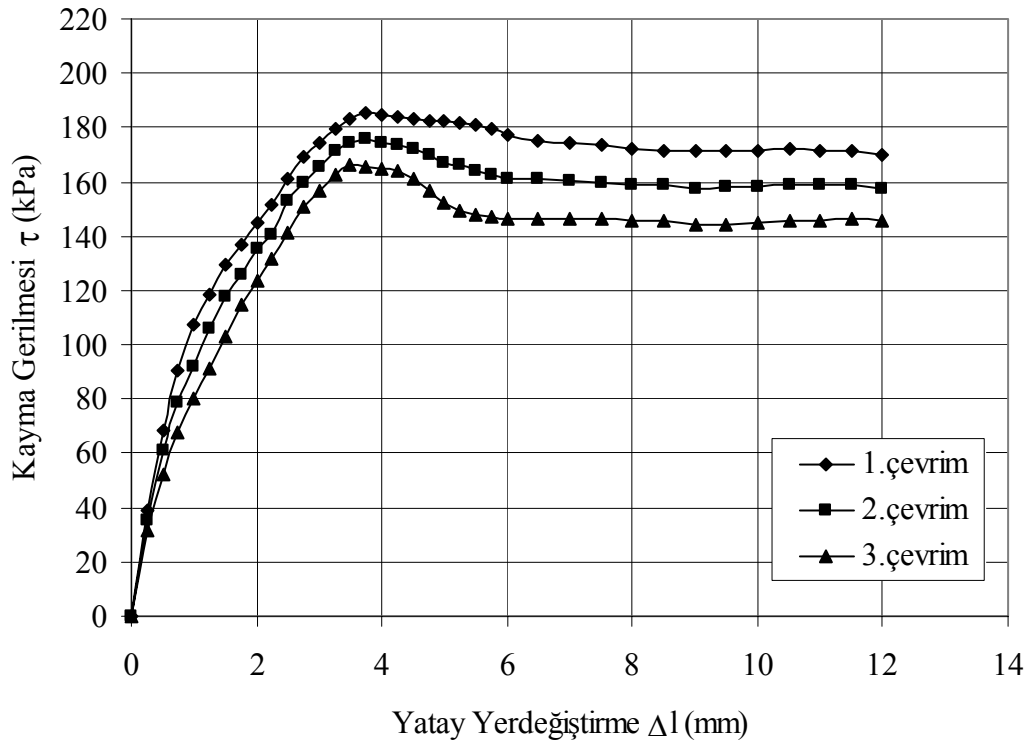
C.2.15 N-15 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları



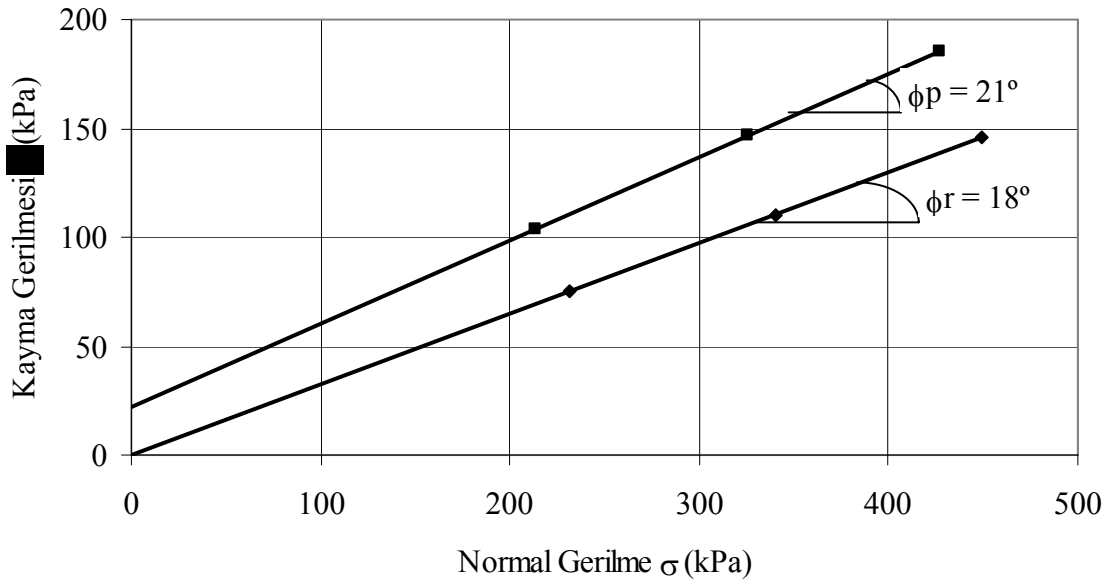
Şekil C.87 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (200 kPa)



Şekil C.88 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (300 kPa)



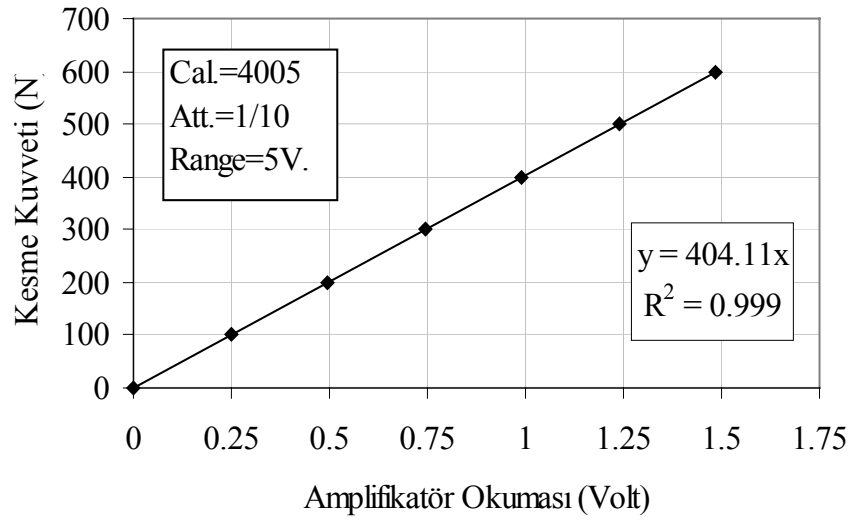
Şekil C.89 : Kayma gerilmesi – yatay yerdeğiştirme grafiği (400 kPa)



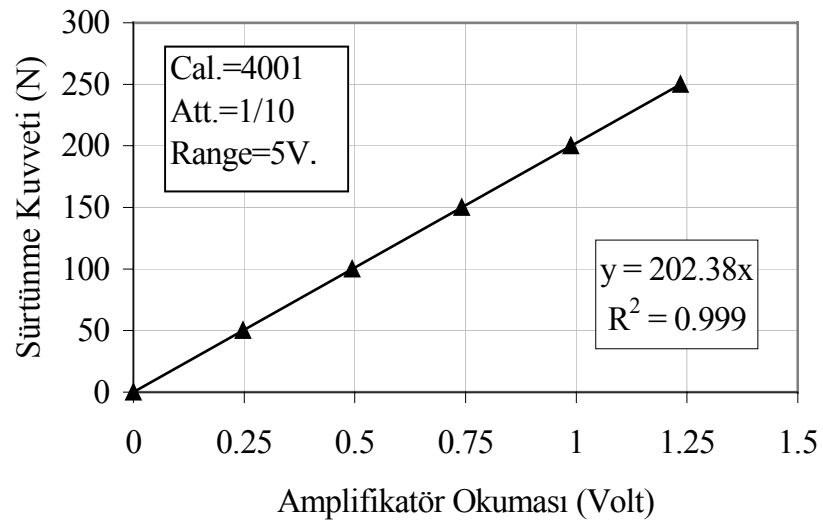
Şekil C.90 : Göçme zarfı eğrisi

EK D

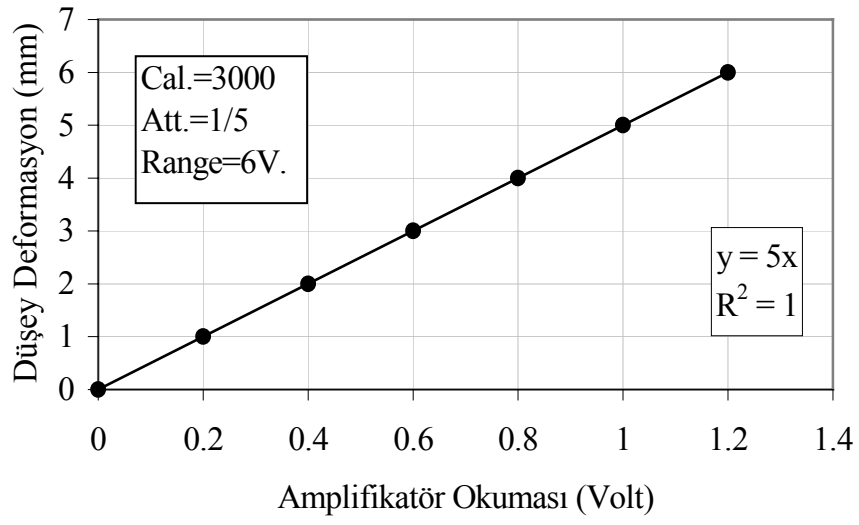
D.1 Amplifikatör Kalibrasyonu



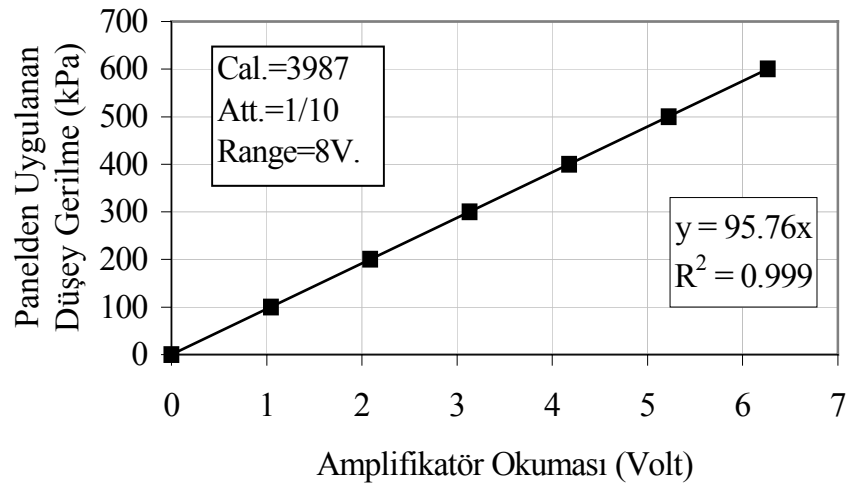
Şekil D.1 : Kesme kuvveti (CH 1) kalibrasyonu



Şekil D.2 : Sürtünme kuvveti (CH 2) kalibrasyonu



Şekil D.3 : Düşey deformasyon (CH 3) kalibrasyonu



Şekil D.4 : Düşey gerilme (CH 4) kalibrasyonu

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 09.09.1978 tarihinde Samsun'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Samsun Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi'nden inşaat mühendisi olarak mezun olup, aynı yıl İ.T.Ü. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programında yüksek lisansa başladı.