

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ BİR KİLİN KİREÇ İLE  
STABİLİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS**

**İnşaat Müh. Melih Murat KIZILÇELİK**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Aydın KAVAK**

**KOCAELİ, 2010**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK PLASTİSELİ BİR KİLİN KİREÇ İLE  
STABİLİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS**

**İnşaat Müh. Melih Murat KIZILÇELİK**

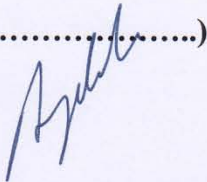
**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18.06.2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 26.07.2010**

**Tez Danışmanı**

**Yrd.Doç.Dr. Aydın KAVAK**

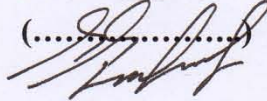
(.....)



**Üye**

**Doç.Dr. Şevket ÖZDEN**

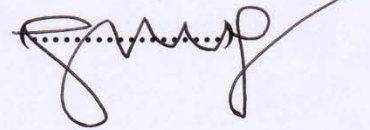
(.....)



**Üye**

**Doç.Dr. Gülgün YILMAZ**

(.....)



**KOCAELİ, 2010**

## **ÖNSÖZ**

İnşaat faaliyetleri ve özellikle de yol inşaatı faaliyetleri sırasında sıklıkla karşılaşılan özellikle kil oranı yüksek bir zeminin oturması ve yeterli yükü taşıyamaması son derece önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu çalışmada kireç kullanılarak yüksek plastisiteli killi bir zeminde daha az deformasyon ve daha fazla taşıma yükü kapasitesi hedeflenmiştir. Laboratuvar ortamında deneyler yapılarak bunlar incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Araştırmada yardımlarını, iyi niyet ve anlayışlarını esirgemeyen Sn. Yrd. Doç. Dr. Aydın KAVAK ve Sn Dr. Utkan MUTMAN'a ve mikro yapı çalışmalarındaki desteklerinden ötürü Kireç Sanayicileri Derneği'ne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER.....	vii
ÖZET.....	viii
İNGİLİZCE ÖZET .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	4
2.1. Kireç.....	4
2.1.1. Kirecin çeşitleri .....	4
2.1.1.1. Sönmemiş kireç.....	4
2.1.1.2. Sönmüş kireç.....	5
2.1.2. Kirecin kullanım alanları.....	5
2.1.2.1. Kirecin inşaat ve yapılardaki kullanımı .....	7
2.1.3. Kireç kullanımının avantajları.....	7
2.2. Kil.....	7
2.2.1. Killerin mineralojik yapıları.....	8
2.2.2. Kil çeşitleri .....	10
2.2.2.1. Kaolinit.....	10
2.2.2.2. Montmorillonit .....	11
2.2.2.3. İllit .....	12
2.2.2.4. Halloysit .....	13
2.2.2.5. Vermikülit .....	13
2.2.2.6. Klorit .....	14
2.2.3. Killerin özellikleri .....	14
2.3. Kireç Stabilizasyonu .....	16
2.3.1. Killi zeminlerde kireç stabilizasyonunun önemi.....	17
2.3.2. Kireç stabilizasyonu sonucu zeminde meydana gelen değişimler .....	18
2.3.2.1. Plastisite indisinde düşüş.....	19
2.3.2.2. $W_{opt}$ değerinde artış ve M.K.B.H.A değerinde düşüş .....	19
2.3.2.3. Uzun ömürlülük .....	20
2.3.2.4. Mukavemetteki değişimler.....	20
2.3.2.5. Permeabilitideki değişimler .....	22
2.3.2.6. Donma-çözünme etkisine karşı davranış .....	22
2.3.3. Kireç stabilizasyonu ile ilgili örnekler çalışmaları.....	23
2.3.3.1. Türkiye’den örnekler.....	23
2.3.3.1.1. Ankara uygulaması .....	24
2.3.3.1.2. Kırklareli uygulaması.....	25
2.3.3.1.3. Türkiye’den yapılan diğer örnek çalışmaları .....	25
2.3.3.1.4. Yapılan çalışmaların sonuçları.....	26
2.3.3.2. Dünyadan Örnekler .....	26

2.3.4. Kireç stabilizasyonunda uygulanan laboratuvar deneyleri .....	30
2.3.4.1. Yıkamalı elek analizi.....	31
2.3.4.2. Atterberg kıvam limitleri (LL – PL deneyleri) .....	31
2.3.4.3. pH deneyi .....	33
2.3.4.4. Harvard Proctor deneyi .....	34
2.3.4.5. Serbest basınç deneyi .....	34
2.3.4.6. CBR deneyi .....	36
2.3.4.7. Enerji dağılım spektroskopisi.....	36
2.3.4.8. Taramalı elektron mikroskopu deneyi .....	37
2.3.4.9. X-ışını kırınım deneyi .....	37
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	38
3.1. Doğal su muhtevasının bulunması .....	39
3.2. Yıkamalı elek analizi.....	39
3.3. Atterberg limitleri ile optimum kireç değerinin bulunması .....	41
3.4. pH optimum kireç değerinin bulunması.....	43
3.5. Harvard Proctor (Sıkıştırma) deneyi ile optimum su muhtevası bulunması .....	44
3.6. Serbest basınç deneyi numunelerinin hazırlanması .....	46
3.7. Serbest basınç deneyi .....	47
3.7.1. Doğal su muhtevasındaki malzemenin serbest basınç grafiği .....	48
3.7.2. $W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin serbest basınç grafiği .....	49
3.7.3. $W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin serbest basınç grafiği .....	52
3.7.4. $W_{doğal}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin serbest basınç grafiği .....	55
3.8. CBR deneyi .....	60
3.9. Enerji dağılım spektroskopisi deneyi .....	62
3.10. Taramalı elektron mikroskopu deneyi .....	65
3.11. X-ışını kırınım deneyi .....	69
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	71
KAYNAKLAR .....	73
EKLER .....	77
ÖZGEÇMİŞ .....	118

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1:	Tetrahedron strüktür .....	9
Şekil 2.2:	Oktahedron strüktür.....	9
Şekil 2.3:	Kaolinit minerali boyutu ve kesiti.....	11
Şekil 2.4:	Montmorillonit mineralinin kesiti .....	12
Şekil 2.5:	İllit mineralinin kesiti .....	13
Şekil 2.6:	Casagrande aleti .....	32
Şekil 2.7:	Plastik limit düzeneği .....	32
Şekil 2.8:	Atterberg limit grafiği .....	33
Şekil 2.9:	pH metre .....	34
Şekil 2.10:	Numune kesiti ve serbest basınç grafiği.....	35
Şekil 2.11:	Drenajsız serbest basınç grafiği.....	35
Şekil 2.12:	CBR düzeneği .....	36
Şekil 3.1:	Elek analizi eğrisi .....	40
Şekil 3.2:	Likit limit deneyi.....	41
Şekil 3.3:	Plastik limit numune hazırlanmasına bir örnek.....	42
Şekil 3.4:	pH deneyi için hazırlanan numuneler.....	43
Şekil 3.5:	pH deneyi sonuç eğrisi .....	44
Şekil 3.6:	Minyatür modifiye Proctor deney sonuçları.....	45
Şekil 3.7:	Minyatür Proctor düzeneği.....	47
Şekil 3.8:	Serbest basınç düzeneği .....	48
Şekil 3.9:	Doğal su muhtevastındaki zemin numunesinin serbest basınç-birim boy kısılması grafiği .....	49
Şekil 3.10:	$W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin anlık deney grafiği.....	50
Şekil 3.11:	$W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin günlük deney grafiği .....	50
Şekil 3.12:	$W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 7 günlük deney grafiği.....	51
Şekil 3.13:	$W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 28 günlük deney grafiği.....	51
Şekil 3.14:	$W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri.....	52
Şekil 3.15:	$W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin anlık deney grafiği .....	53
Şekil 3.16:	$W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 1 günlük deney grafiği .....	53
Şekil 3.17:	$W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 7 günlük deney grafiği .....	54
Şekil 3.18:	$W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 28 günlük deney grafiği ....	54
Şekil 3.19:	$W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri.....	55
Şekil 3.20:	$W_{dpğal}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin anlık deney grafiği .....	56
Şekil 3.21:	$W_{dpğal}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin 1 günlük deney grafiği ..	56
Şekil 3.22:	$W_{dpğal}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin 7 günlük deney grafiği ..	57
Şekil 3.23:	$W_{dpğal}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin 28 günlük deney grafiği ..	57
Şekil 3.24:	$W_{dpğal}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri.....	58
Şekil 3.25:	Bütün deney türlerinin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri.....	59

Şekil 3.26: CBR düzeneği ve test işlemi .....	60
Şekil 3.27: Doğal malzemeli CBR deney grafiği .....	61
Şekil 3.28: %5 Kireçli CBR deney grafiği .....	61
Şekil 3.29: Thermo Noran System Six enerji dağılım spektrometresi .....	62
Şekil 3.30: Doğal malzemenin E.D.S grafiği .....	63
Şekil 3.31: Kireçli malzemenin E.D.S grafiği .....	63
Şekil 3.32: Taramalı elektron mikroskobu .....	65
Şekil 3.33: Kireçsiz numunenin 500 kat yakınlaştırılmış hali.....	66
Şekil 3.34: %5 Kireçli numunenin 500 kat yakınlaştırılmış hali.....	66
Şekil 3.35: Kireçsiz numunenin 2500 kat yakınlaştırılmış hali.....	67
Şekil 3.36: %5 Kireçli numunenin 2500 kat yakınlaştırılmış hali.....	67
Şekil 3.37: Kireçsiz numunenin 5000 kat yakınlaştırılmış hali.....	68
Şekil 3.38: %5 Kireçli numunenin 5000 kat yakınlaştırılmış hali.....	68
Şekil 3.39: Rigaku Rint2200 X.R.D deney düzeneği .....	69
Şekil 3.40: X.R.D başlığı.....	69
Şekil 3.41: X.R.D grafiği.....	70

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Kil minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi (%).....	10
Tablo 2.2: Önerilen kireç karışım oranları .....	17
Tablo 3.1: Uzunçiftlik zemininin doğal su muhtevası, $w_{doğal}$ (%).....	39
Tablo 3.2: Elek analizi sonuç tablosu .....	40
Tablo 3.3: Likit limit – Plastik limit – Plastisite indisi sonuçları .....	42
Tablo 3.4: pH deneyi sonuçları.....	43
Tablo 3.5: Minyatür Modifiye Proctor deney sonuçları .....	45
Tablo 3.6: Uzunçiftlik kilinin geoteknik özellikleri .....	46
Tablo 3.7: Serbest basınç deneyi için hazırlanan numune bilgileri .....	46
Tablo 3.8: Doğal zemin numunesinin $q_u$ ve birim boy kısalması değerleri.....	49
Tablo 3.9: CBR deney sonuçları.....	62
Tablo 3.10: Doğal ve kireçli malzemenin kimyasal içeriği .....	64



## SİMGELER

Å	: angström, $10^{-10}$ metre
Al	: alüminyum
$C_c$	: tokmak yastığı düzeltme katsayısı
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
Cu	: uniformluk sayısı
d	: genişlik, (cm)
$D_{10}$	: %10 geçen yüzdeye karşılık gelen çap, (m)
$D_{30}$	: %30 geçen yüzdeye karşılık gelen çap, (m)
$D_{60}$	: %60 geçen yüzdeye karşılık gelen çap, (m)
Fe	: demir
h	: yükseklik, (cm)
K	: potasyum
kPa	: kilopascal
Mg	: magnezyum
MPa	: megapascal
P	: düzgün yayılı yük, ( $kN/m^2$ )
Psi	: inch kareye düşen pound miktarı
$q_u$	: taşıma gücü, ( $kN/m^2$ )
Si	: silisyum
W	: su muhtevası, (%)
$W_{doğal}$	: doğal su muhtevası, (%)
$W_{opt}$	: optimum su muhtevası, (%)

## Kısaltmalar

$Al_2O_3$	: Alüminyum oksit
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
CaO	: Kalsiyumoksit, sönmemiş kireç
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
$Ca(OH)_2$	: Sönmüş kireç
$H_2O$	: Su
LL	: Likit limit
K.B.H.A.	: Kuru birim hacim ağırlık
M.K.B.H.A.	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
MgO	: Magnezyum oksit
PL	: Plastik limit
PI	: Plastisite indisi
S.E.M	: Taramalı elektron mikroskobu
$SiO_2$	: Silisyum dioksit
X.R.D	: X-ray difraksiyon spektroskopisi

# YÜKSEK PLASTİSİTELİ BİR KİLİN KİREÇ İLE STABİLİZASYONU

**Melih Murat KIZILÇELİK**

**Anahtar Kelimeler:** Kireç, Kil, Stabilizasyon

**Özet:** Bu çalışmada Kocaeli ilindeki Uzunçiftlik mevkiinden alınan yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevasına sahip killi zeminin kireç ile stabilizasyonu incelenmiştir. Çalışmada öncelikle kil numuneleri üzerinde Atterberg limitleri, elek analizi ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Sonrasında uygun kireç karışım oranı bulunarak karışım ve karışısız serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca deneylerde katkı malzemesi olarak doğal su muhtevasında hem sönmüş hem de sönmemiş kireç kullanılmıştır ve sonuçlar optimum su muhtevasında %5 kireçli durum ve doğal durumda bulunan mukavemetler ile karşılaştırılmıştır. Bu deneyler sonucunda 28 gün kür edilen kireç katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde 120 kPa'dan 1.730 kPa'a varan artışlar gözlemlenmiştir. Yapılan yaş CBR deneylerinde ise CBR değeri %4'ten %23'e kadar artmıştır. Ayrıca deneylerde kireç katkılı numunelerdeki boy kısalma oranı %15'ten %1,5'e azalmıştır. Sönmüş ve sönmemiş kireç ile yapılan deney birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Çalışmalardaki sonuca göre artan mukavemet artışları ve deformasyonlardaki azalma sayesinde yol alt yapısında kullanılacak olan kireç karışımı bizlere yol kesitlerinde küçültme ve buna bağlı olarak maliyetlerde azalma sağlayabilecektir. Ayrıca kireç stabilizasyonu için su muhtevası, optimum su muhtevasından yüksek killi zeminlerde sönmüş kireç yerine sönmemiş kirecin kullanımı da uygun görülmektedir. Sönmüş kireç zemindeki yüksek su muhtevasını düşürerek optimum su muhtevasına yaklaştırmakta ve mukavemetlerin zemini kurutmaya gerek kalmadan artmasını sağlamaktadır.

## STABILIZATION OF A HIGH PLASTICITY CLAY WITH LIME

Melih Murat KIZILÇELİK

**Keywords:** Lime, Clay, Stabilization

**Abstract:** In this project, the usage of high plasticity clay, which has been taken from Uzunçiftlik district of İzmit city, has been searched. In this research, initially Atterberg limit tests, sieve analysis and compaction tests are performed on clay samples. Afterwards while appropriate lime mixture ratio has been found, mixed and unmixed unconfined compression tests are performed. Besides this, at natural moisture content both hydrated lime and quicklime has been used for an additive material in tests, and results were compared with strength of %5 lime mixed soil at optimum moisture content and natural soil's strength. As result of these tests, 28 days cured lime mixtured samples's unconfined compression strength has increased from 120 kPa to 1730 kPa. The CBR values for soaked samples has increased from 4% to 23%. Beyond this, lime mixtured samples's length shortening ratio has decreased from 15% to 1,5%. Both hydrated lime's and quicklime's result are roughly equal. According to the results of test and by the increased strength and decreased deformation, the lime mixture which is usable for road infrastructure, will help us to reduce size of cross-section of the road and this will lead a lower cost for the road construction. Also using quicklime instead of hydrated lime for lime stabilization in clay soils, which's moisture content is high from its optimum moisture content, is looking fair enough. Quicklime helps to decrease soil's moisture content nearly to optimum moisture content and increase the strenght without dehydrating the soil.

## 1. GİRİŞ

Zeminler gerek üzerilerine inşa olunan yapıların temelleri gerekse de inşaat malzemesi olarak bütün inşaat projelerinde karşımıza çıkmaktadırlar. Her zemin birbirinden farklı özelliklere sahip olmakla birlikte zeminin mühendislik özellikleri de zeminin cinsi yanında arazi koşullarına bağlı olarak da geniş bir aralık içerisinde değişebilmektedir. Buna bağlı olarak, inşaat sahasında karşılaşılan zeminler her zaman istenilen özelliklerde olmayabilirler. Sorunlu olarak kabul edilen bu zeminlerin yerine elverişli bir zemin kullanılması ya da inşaat yerinin değiştirilmesi bir çözüm olarak kabul edilebilse bile teknolojik ve özellikle de ekonomik açıdan çoğunlukla bu çözümler kabul edilmemektedir. Bu gibi durumlarda mevcut sorunlu addedilen zeminin özelliklerini iyileştirme çalışmalarına başvurulmaktadır.

İnşa edilen yapıların ve özellikle yol kaplamasının stabilitesi üzerine oturduğu zeminin özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Zeminler, kaplamanın temeli olduğundan dolayı kaplamanın ve trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere emniyetle karşı koyabilmelidirler. Çevre ve iklim koşullarından ötürü zemin özelliklerinin (örneğin kabarma-büzülme, don kabarması, oturma, su içeriğindeki değişiklikler, vb.) değişmesi, taşıma gücünde azalmalar, ilave gerilmeler, vb. hususların oluşmaması veya oluşursa da kaplama da olumsuz etkiler yaratmaması gerekir (Tumluer, 2006).

Kaplama performans ve stabilite olmak üzere iki temel işlevi vardır. Trafik yüklerinin oluşturacağı aşınma ve deformasyona karşı yeterince dirençli olmalı, trafik yüklerini yayarak zemine aktarmalı fakat bu yüklere karşı koyabilecek kadar mukavemetli değildir (Tunç, 2002).

Zemin, kaya ve toprak olmak üzere iki ana malzemedendir. Genel olarak kaya zeminler hafriyat zorlukları ve kompaksiyon hariç problemsiz olarak addedilebilecekken toprak zeminler daha problemliler olarak bilinir. Bu nedenle

toprak zeminlerin ıslah edilmesi gerekebilir ve bu sorun göz ardı edilmemelidir. Problemlili olarak tanımlanan zeminlerin bir takım stabilizasyon işlemleriyle iyileştirilmesi mümkündür. Zemin ıslahı yöntemlerinin başlıca amaçları;

- Taşıma kapasitesini arttırmak,
- Toplam oturmayı ve deformasyonu azaltmak,
- Konsolidasyonu hızlandırmak,
- Geçirimsizliği azaltmak,
- Zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltmak,
- Kayma mukavemetini arttırmak,
- Boşluk suyu basıncını azaltmak
- Şişme/kabarma ve don kabarması gibi çevre etkilerini azaltmaktır.

Stabilizasyon gerçek anlamda yirminci yüzyılın bir mühendislik olayıdır. Özellikle son yıllarda yeni yöntemler önerilmiş ve uygulanmıştır. Yetersiz temel ortamının kullanılma zorunluluğu ve sağlam zemin bölgelerinin azalması ile yapıların boyutlarının artması sonucu yarattıkları büyük gerilmeler bunun nedenlerindedir. Öte yandan, bir ülkede stabilizasyon teknolojisinin gelişmesi de endüstrinin gelişimine paralel olmaktadır (Tumluer, 2006).

En eski zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan kireç stabilizasyonu ile zeminin mevcut fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kireç kullanılarak değiştirilip mukavemetini ve durabilitesini artırması sağlanmaktadır.

Bu çalışmada İzmit ilinin Uzunçiftlik mevkiinden alınan killi bir zemin örneğinin üzerinde laboratuvar ortamında deneyler yapılarak kirecin zemine sağladığı olumlu sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca deneyler sırasında sönmemiş kirec de kullanılarak sönmüş kireç ile aralarında ne gibi bir farklılık yaratacağına bakılmıştır.

Laboratuvar ortamında elek analizi, Atterberg limit tayini (likit limit-plastik limit deneyi), Harvard proctor deneyi, serbest basınç deneyi, California Taşıma Oranı (CBR) deneyi, X-Ray deneyi ve elektron mikroskobu ile zemin incelenmiş ve test edilmiştir.

Serbest basınç deneylerinde zemin hem katkı malzemesi olmadan, hem sönmüş kireç hem de sönmemiş kireç kullanılarak yapılmıştır. Aralarındaki sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Kireç katkılı deneyler kirecin uzun süreli reaksiyonlarından dolayı anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük olarak test edilmiş ve her bir deney için en az 4 tane olmak üzere test yapıp ortalaması alınmıştır.

Yaş CBR deneyi de aynı şekilde kireçli ve kireçsiz olarak yapılmış olup iki durum arasındaki şişme miktarı ve taşıma kapasitesi karşılaştırılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Kireç

Kirecin hammaddesi olan kireç taşı yani kalkerin kalsine edilmesi ile elde edilen kalsiyum bazlı maddeye kireç denir. Kimyasal yapısında kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ya da kalsiyum karbonat / magnezyum karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) bileşenleri bulunur. Bunların dışında alüminyum, silisyum, demir, kükürt gibi elementler değişik oranlarda bulunabilir.

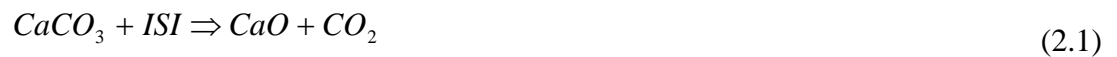
Dünyada çok çeşitli formasyon ve tiplerde kireçtaşı mevcuttur. Bunlar orijin, jeolojik formasyon, mineralojik yapı, kristal yapısı, kimyasal bileşim, renk ve sertlik özelliklerine göre gruplandırılır.

Kirecin elde edilmesi için  $900^\circ\text{C}$  ile  $1100^\circ\text{C}$  arası sıcaklık gerekmektedir. Bu sıcaklık kireç fırınlarında katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılması ile sağlanır. Bu yakıtlardan ekonomik olarak en uygunu tercih edilir.

#### 2.1.1. Kirecin çeşitleri

Kalsinasyon sonucunda elde edilen kireç sönmemiş kireçtir. Sönmemiş kirecin su ile kontrollü olarak söndürülmesi ile sönmüş kireç ( $\text{CaOH}_2$ ) elde edilir. Her iki türünde kullanım alanları farklıdır.

##### 2.1.1.1. Sönmemiş kireç



Sönmemiş kireç yukarıdaki tepkime ile ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan CaO yani kalsiyum oksite sönmemiş kireç denmektedir. Bu şekilde elde edilen sönmemiş kireç

doğrudan kullanılabilir. Özellikle çelik ve kimya endüstrilerinde daha çok kullanılmaktadır.

#### **2.1.1.2. Sönmüş kireç**



Sönmemiş kireç yani CaO'nun su ile tepkimeye sokulmasıyla ortaya çıkan kalsiyum hidroksit yani Ca(OH)<sub>2</sub>'ye sönmüş kireç denilmektedir. Sönmemiş kirecin su molekülleriyle temas etmesi kireç taneciklerinde çok yüksek bir sıcaklık oluşumuna ve yüzey gerilimine neden olur. Bu sayede sönmemiş kireç en küçük taneciklerine kadar parçalanır. Sönmüş kireç sönmemiş kirecin aksine çok daha falza ve yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

#### **2.1.2. Kirecin kullanım alanları**

Demir çelik endüstrisinde;

- Demir cevherinin hazırlanmasında
- Çelik üretiminde
- Döküm kalıplarının hazırlanmasında
- Çelik tel üretiminde

Demir dışı metal endüstrisinde;

- Bakır metalindeki safsızlıkların giderilmesinde
- Alüminyum elde edilmesinde
- Nikel'in saflaştırılmasında
- Düşük karbonlu Krom üretiminde
- Mangan'ın geri kazanılmasında
- Çinko'dan Kükürt'ün ayrıştırılmasında
- Altın ve gümüş üretiminde kullanılan zehirli bileşiklerin ayrıştırılmasında

Kimya endüstrisinde;



- Çevre kirliliğinin önlenmesinde ve rehabilitasyonunun sağlanmasında
- Su arıtma tesislerinde
- Kirli sulu ortamların geri kazanılmasında (göl, ırmak, bataklık ve türlü kimyasallar içeren yerler)
- Kentsel arıkların ve çöplerin ıslahında
- Tarım ve Orman topraklarının geri kazanılmasında

Kağıt endüstrisinde;

- Kağıt üretiminde kullanılan bazı kimyasalların tekrar elde edilmesinde kullanılır

Yapı malzemeleri endüstrisinde;

- Harç ve sıva katkısı olarak
- Bağlayıcılık, dayanıklılık ve esnekliğin artırılmasında
- Gaz beton (Ytong) üretiminde
- Kireç-Kum tuğlası üretiminde
- Karo ve seramik üretiminde

Cam endüstrisinde;

- Cam üretiminde kireç taşları içerdiği metal oksitler nedeniyle hammadde olarak kullanılır
- Cam fırınlarında ısıdan tasarruf sağlar
- Camın sertliğini artırmada kullanılmaktadır

Çevre rehabilitasyonunun sağlanmasında;

- Çöplerin ıslahı
- Atık suların arıtılması
- Fabrika bacalarından çıkan zehirli gazların filtrasyonu
- Göl ve bataklıkların ıslahı gibi çalışmalarda kullanılmaktadır

Zemin stabilizasyonu ve karayolları yapımında;

- Toprağın genişleme büzülme gibi fiziksel değişimleri sonucunda meydana gelen zararların ortadan kaldırılması için kullanılmaktadır.

### **2.1.2.1. Kirecin inşaat ve yapılardaki kullanımı**

Birçok ülkede kireçtaşının ana kullanım sahası %40-70 oranıyla inşaat ve yapı sektörüdür. Kireçtaşı bu sektörde beton harcında agrega olarak ve yol yapımında agrega/dolgu maddesi olarak kullanılır. Bu amaçla kullanılacak olan kireçtaşı; temiz, kuru, kübik formda, yüksek aşınma mukavemetine ve sertliğe sahip olmalıdır. Bu amaçla kullanılacak olan kireçtaşı; temiz, kuru, kübik formda, yüksek aşınma mukavemetine ve sertliğe sahip olmalıdır.

Daha ince gradasyonlu bazı kireçtaşı kumları ise (75 mikron - 5 mm) beton ve inşaat harcı (hazır harç) için de kullanılabilir. Türkiye'de inşaat ve yapı endüstrisinde kullanılan mıcır 1995 istatistiklerine göre 28 milyon ton olup toplam kireçtaşı üretiminin % 33'üne tekabül etmektedir.

### **2.1.3. Kireç kullanımının avantajları**

- Birçok kimyasal prosesin (nötralizasyon, absorpsiyon, kostikleşme gibi) ana girdisi olması
- Kimyasallarla çabuk reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırması
- Pahalı kimyasalların geri kazanılmasındaki rolü
- Organik canlılar için besi maddesi olması
- Ucuzluğu ve kolay bulunabilmesi

gibi nedenler bu malzemenin yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamıştır.

## **2.2. Kil**

Ana kimyasal bileşimi sulu alüminyum silis ve diğer bazı elementlerden oluşan plastik ve kohezif özelliğine sahip, kuruduğu zaman büzülen, ıslandığı zaman şişen ve sıkıştırıldığında suyunu dışarıya atabilen, koloidal tane boyundaki ince dokulu toprak malzeme olarak tanımlanır.

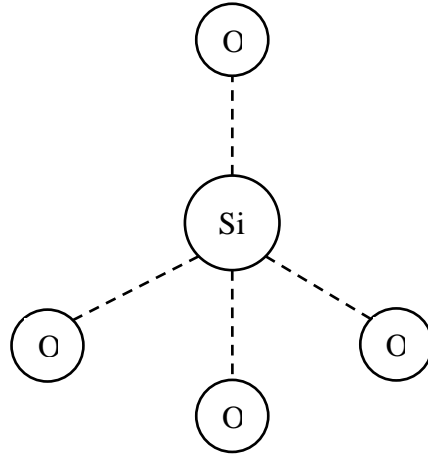
Kil doğada bol miktarda bulunan minerallerdendir. Fakat saf kil bulmak oldukça zordur. Kilin içerisinde en çok kalker, silis, mika ve demir oksit bulunur. Genellikle 2µm'dan daha küçük taneli malzemeye kil adı verilmektedir ancak bu boyutun altında kil dışında da mineraller bulunabilmektedir. Kilin yapısı itibariyle su çekme özelliği vardır. Bu nedenle kil daima nemlidir. Kili meydana getiren maddeler sulu alüminyum silikatlarıdır. Kil  $m \text{ Al}_2\text{O}_3$  ,  $n \text{ SiO}_2$  ,  $p \text{ H}_2\text{O}$  genel kimyasal bileşim formülü ile ifade edilir. Asitte erimeyen killerin bir çoğu kristal silika ve alümine tabakalarından oluşmuş yapıya sahiptirler ve elektro kimyasallıkları çok aktiftir. Dane çapları 2µm'dan azaldıkça elektrik yükleri de artmaktadır. Kil mineralleri elektron mikroskopu, diferansiyel analiz ve x-ray kırınım teknikleri ile kolayca incelenip araştırılabilirler.

### **2.2.1. Killerin mineralojik yapıları**

Kil minerallerinin başlangıçta küre şeklinde olduğu düşünülmüştür. Fakat elektron mikroskopuyla yapılan incelemelerde killerin levhamsı veya tabakamsı (yaprakçıklı) bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. Killerin sıkı istiflenme, plâstiklik ve hacimce genişleyip daralma gibi özellikleri, onların tabakalı yapıda olmasından kaynaklanmaktadır.

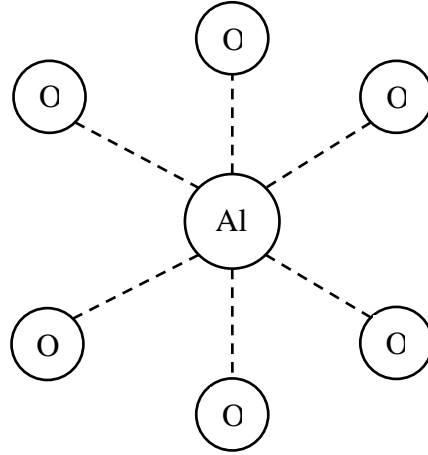
Killerin toprakta etken olan fiziksel ve kimyasal etkilerini daha iyi anlayabilmek için onların kimyasal ve mineralojik yapılarını bilmek gerekir. Kilin oluşumunun önemli iskeletini teşkil eden silisyum ve alüminyum kristal sistemde başlıca iki strüktür yapı tipi meydana getirir. Bu iki yapı tipi tetrahedron ve oktahedrondur.

Şekil 2.1 ile gösterilen tetrahedron yapı tipinde silisyum merkezde olup buna eşit uzaklıkta dört adet oksijen atomunun birleşmesinden meydana gelir.



Şekil 2.1: Tetrahedron strüktür

Şekil 2.2 ile gösterilen oktahedron yapı tipinde ise alüminyum merkezde olup altı adet oksijen ya da hidroksitin köşelerde bulunduğu yapı tipidir.



Şekil 2.2: Oktahedron strüktür

Kil mineralleri tetrahedron ve oktahedron tabakalarının üst üste ve yan yana paket şeklinde bir araya getirilmesi ve ortak konumdaki oksijen iyonları vasıtasıyla birbirine bağlanmasıyla oluşur.

Oluşan tabakalaşmada, tetrahedron-oktahedron düzeninde periyodik bir tekrarlanmayla iki tabakalı kil mineralleri olup, tetrahedron-oktahedron-tetrahedron düzeninde periyodik bir tekrarlanmayla da üç tabakalı kil mineralleri meydana gelir.

### 2.2.2. Kil çeşitleri

Killerin mineral içerikleri ve minerallerin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak, doğal killerin rengi beyaz, gri, pembe, yeşil ve kahverenginin çeşitli tonlarında olabilir. Kil minerallerinin çok küçük boyutlu olması ve su içerisinde uzun süre kalıcı süspansiyonlar oluşturma özelliklerinden yararlanılarak killer, içerdikleri kapta saf olmadıkları için kolaylıkla ayırt edilebilir.

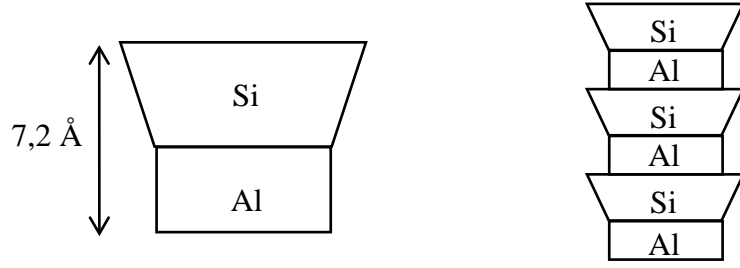
Killer çok saf olduğu zaman hidrate alümin silikat (kaolinit) adını alır. Kaolinit tabakalı bir yapı ile birleşen killerin tetrahedron-oktahedron şeklindeki iki tabakalı killerin en güzel örneğidir. Tetrahedron-oktahedron-tetrahedron şeklindeki üç tabakalı yapıya sahip killere başlıca örnek olarak montmorillonit ve illit verilebilir. Kil minerallerinin ağırlıklarına göre kimyasal bileşimleri Tablo 2.1’ de gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Kil minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi (%) (Scheffer ve Schachtschabel, 1970)

Kil mineralleri	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Kaolinit	45-48	38-40	-	-	-	-	-	-
Montmorillonit Nontronit	42-55	0-28	0-30	0-0.5	0-3	0-2.5	0-0.5	0-3
İllit	50-56	18-31	2-5	0-0.8	0-2	1-4	4-7	0-1
Vermikülit	33-37	7-18	3-12	0-0.6	0-2	20-28	0-2	0-0.4
Klorit	22-35	12-24	0-15		0-2	12-34	0-1	0-1

#### 2.2.2.1. Kaolinit

Kaolinit kayaların hava koşullarıyla oluşturduğu en fazla kil minerali tipidir. İki tabakalı birbirine sıkıca bağlanmış bir yapıya sahip olan kaolinitin, tabakaları arasındaki elektrik çekim kuvveti sebebiyle su ve besin elementlerinin bu tabakalar arasına girmesi önlenir. Ayrıca bu durum kaoliniti çok daha fazla stabil yapmaktadır. Doygun halde ayrıışmayan kaolinitin içsel sürtünme açısı diğer kil minerallerine göre daha yüksektir. Kaolinitin kimyasal formülü Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>’dir. Şekil 2.3 ile bir kaolinit mineralinin boyutu ve kesiti gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Kaolinit minerali boyutu ve kesiti

Kaolinit mineralinde her bir tabaka  $7,2 \text{ \AA}$  inceliğindedir. Tabakalar birbirlerine hidrojen bağı ile bağlıdırlar. Kaolinit yapraklarının boyutu yatay genişliği  $1000 \text{ \AA}$  ile  $2000 \text{ \AA}$  arasında iken kalınlığı  $100 \text{ \AA}$  ile  $1000 \text{ \AA}$  aralığındadır. Yüzey alanları  $15 \text{ m}^3/\text{g}$  'dır.

Kaolinit mineralinin düşük absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu ve bu sebeple boyama deneylerinde az veya hiç renk vermediği ortaya çıkmıştır.

#### 2.2.2.2. Montmorillonit

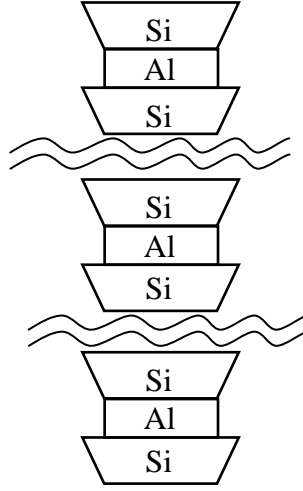
Kimyasal formülü  $(\text{OH})_4\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20} \cdot n \text{ H}_2\text{O}$  olan montmorillonit minerali bir alümina oktahedral tabakasının iki silika tetrahedral tabakası arasında sıkışması ile meydana gelmektedir. İki eşdeğer tabaka yüzeyi karşı karşıya geldiği için, tabakalar arasındaki çekim kuvveti çok zayıftır. Bunun sonucunda ise özellikle ıslak olduğunda stabil olmayan bir mineral oluşturmaktadır.

Montmorillonit minerali şişme ve genişleme özelliğinden dolayı su ile benzerlik göstermektedir. Doygun halden kurduğunda büzülme ve kırılma meydana gelir.

Yatay boyutları  $1000 \text{ \AA}$  ile  $5000 \text{ \AA}$ , kalınlığı ise  $10 \text{ \AA}$  ile  $50 \text{ \AA}$  arasındadır. Yüzey alanı genel olarak  $800 \text{ m}^3/\text{gr}$  olan montmorillonit mineralinin dane boyutuna bağlı olarak yüzey alanı  $1150 \text{ m}^3/\text{gr}$  'a kadar çıkabilmektedir. Tabakaları arasında yaklaşık  $3,4 \text{ \AA}$  mesafe olan montmorillonit minerali su alınca tabakalar arası mesafe  $14$  ile  $18 \text{ \AA}$  arasına kadar çıkar.

Montmorillonit minerali yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu için benzidin ile güzel renk reaksiyonları verdiği ispatlanmıştır.

Bentonitin esas minerali olduğundan, bentonit yataklarında rahatça bulunabilmektedir. Şekil 2.4 ile montmorillonit mineralinin kesiti gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Montmorillonit mineralinin kesiti

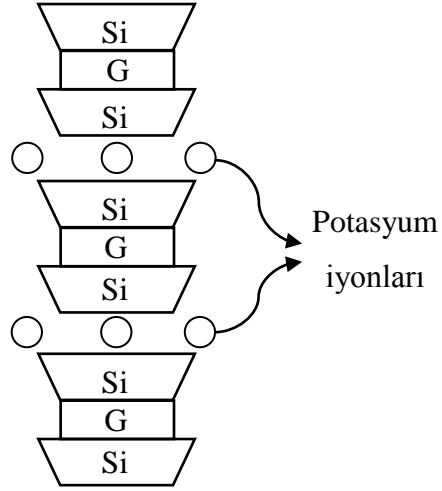
### 2.2.2.3. İllit

Kimyasal formülü  $(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4)(Si_{8y}Al_y)O_{20}$  olan illit minerali yapısal olarak montmorillonitlere benzemekle birlikte kimyasal olarak daha farklıdır. Ana yapısı bir gibsit oktahedral tabakasının iki silika tetrahedral tabakasının arasında yerleşmesinden oluşan yeni bir tabakayı içerir.

Montmorillonit partiküllerinin son derece ufak ve su ile büyük etkileşimi olmasına karşı, illit partikülleri su ile daha az etkileşir. Buna bağlı olarak da genişleme özellikleri daha azdır. Ayrıca içsek sürtünme açısı montmorillonitlere göre daha fazla, katyon değişim kapasitesi ise daha azdır.

İllit minerali, kil ve kil olmayan minerallere göre çok daha ince ve karmaşık partiküllerden oluşmuştur. Yatay boyutları 1000 Å ile 5000 Å, kalınlığı ise 50 Å ile 500 Å arasındadır. Yüzey alanı ise 80 m<sup>3</sup>/gr 'dır.

Tabakaları arasındaki potasyum iyonlarından dolayı iç tabaka bağları son derece kuvvetlidir. Bundan dolayı illit mineralinin tabaka boşluğu doymun halde  $10 \text{ \AA}$  ile sınırlanmıştır. Şekil 2.5 ile illit mineralinin kesiti gösterilmektedir.



Şekil 2.5: İllit mineralinin kesiti

#### 2.2.2.4. Halloysit

Halloysit de kaolinit gibi bir tetrahedron, bir de oktahedron tabakasının üst üste gelmesi ile meydana gelir. Ancak kaolinitin aksine silikat tabakaları arasında su molekülleri yer almıştır. Bu nedenle  $7,2 \text{ \AA}$  olan esas kalınlık su alıp şişerek  $10,1 \text{ \AA}$  'a kadar artabilir. Yaprakçıklar arasındaki  $2,7 \text{ \AA}$  olan kaolinitde değişmediği halde halloysit de su alıp şişme sonucunda artar. Halloysit su alıp şişebildiği için toprakta suyun tutulmasında faydalı olur. Halloysitin katyon değişim kapasitesi  $5-10 \text{ me}/100 \text{ gr}$  'dır.

#### 2.2.2.5. Vermikülit

Mikanın doğal aşınmasıyla oluşmuş magnezyum alüminosilikat kil mineralidir. Uzun süre bir çeşit trioktahedral mika minerali olarak bilinen vermikülit, hızlı ısıtma ile yapraklara ayrılır ve küçük kurtçuklara benzeyen bir şekil alır. Vermikülit terimi, bu özelliği kullanılarak Latince vermiculare'den türetilmiş ve 2:1 genleşebilen, tabaka yükü simektikinden büyük olan ve mikaya benzeyen mineraller için kullanılmıştır.



Doğada; oluşumuna ve bulunduğu ortamlara göre, toprak, otojenik, metamorfik ve makroskopik olmak üzere dört tipine rastlanmıştır (Wikipedia, 2010).

Vermikülit biotitten gelişmiş olan illitin fazla miktarda potasyum kaybetmesi ve yaprakçıkları arasında potasyum yerine magnezyum katyonlarının girmesi ile gelişir. Vermikülitin esas kalınlığı 10 Å olduğu halde su alıp şişerek Mg<sup>++</sup> veya Ca<sup>++</sup> ile doyurulduğunda kalınlık 15 Å 'e ulaşır. Vermikülitin katyon değişim kapasitesi 100-200 me/100 g arasındadır. Eğer vermikülit mineralleri yüksek miktarda K<sup>+</sup> veya NH<sub>4</sub><sup>+</sup> katyonları ile karşılaşılırsa bu katyonlar değiştirilebilir durumdaki Mg<sup>++</sup> ve Ca<sup>++</sup> yerine geçerler. Bu durum vermikülitli toprakların yüksek miktarda potasyumlu veya amonyumlu gübrelere gübrenmesi sonucunda oluşur. Yeniden K<sup>+</sup> ve NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ile doymun hale gelen vermikülit minerallerinin su kaybedip kururlarsa tekrar su almakla şişmediği kalınlığın 10 Å 'e indiği ve illite dönüştüğü görülür. İllite dönüşme ile artık potasyumun toprak suyuna geçmesi zorlaşır veya mümkün olmaz.

#### **2.2.2.6. Klorit**

Klorit bir magnezyum silikat olup klorit şistlerinde (başkalaşım kayalarından) bulunur. Kloritlerin yaprakçıkları 4 tabakalı yapıda olduğundan su alıp şişmezler. Kloritlerin esas kalınlığı 14 Å 'dur. Su alıp şişmedikleri için iç yüzey genişleyemez ve katyon değişiminde kullanılamaz. Bu nedenle kloritlerin katyon değişim kapasitesi 10-40 me/100 g arasındadır. Asit topraklarda ayrışma sonucunda klorit yaprakçıklarındaki tabakalar arasından bir oktahedron tabakasının ayrılması sonucunda Al(OH)<sub>3</sub> (Gibsit = Hidrarjillit) teşekkülü ile dört tabakalı klorit yaprakçığı üç tabakalı sekonder klorit'e dönüşür. Sekonder klorit yaprakçıkları tetrahedron-oktahedron-tetrahedron-oktahedron yapısı bozulduğu için su alınca şişme özelliği gösterirler.

#### **2.2.3. Killerin özellikleri**

Killerin başlıca dört özelliği bulunmaktadır. Bunlar; plastisite, kohezyon, renk ve rötredir.

Plastisite özelliği sayesinde ezilmiş kile uygun miktarda su karıştırıldığı zaman işlenebilme ve şekillendirme özelliği kolaylaşır. Byrece kil kolayca şekil alır. Buna karşılık kum, su ile karıştırıldığı zaman herhangi bir plastik özellik kazanamaz. Kilin plastisite özelliği kazanabilmesi için muhakkak surette su ile karıştırılması gereklidir. Su dışında hiçbir madde kile plastisite özelliği kazandırmaz. Bu konuda yapılmış deneylerde birçok sıvı (alkol, gaz, terebentin, amonyak, aseton vb.) kullanılmışsa da hiç birisi ile bu özellik elde edilmemiştir (Wikipedia, 2010).

Kohezyon özelliği kilin kuruduğu zaman kendisine verilmiş olan şekli muhafaza etme kabiliyeti sağlar. Örneğin kum bu özelliğe sahip olmadığı için su ile ışlandıktan sonra kurumaya terk edildiği zaman kk bir darbe ile kendi kendine dağılır. Kilin kohezyona sahip olabilmesi için mutlaka su ile yoğrulması gereklidir. Su dışında kalan diğer sıvılarla kil kohezyon kazanmaz (Wikipedia, 2010).

Renk özelliği sayesinde killer ayırt edilebilirler. Killer metal oksitlerle karışık bir şekilde bulduklarından doğal olarak renklenmiş durumdadırlar. Ayrıca organik maddeler de ihtiva eder. Kilin saf olması halinde rengi beyaz olur ve kaolen adını alır. Bunun ötesinde killerin renkleri sarı, pembe, kırmızımsı, mavimsi gri, yeşil ve siyahımsı olabilir. Kilin rengi içinde bulunan maddeler hakkında fikir vermektedir. Kilde limonit bulunması halinde rengi esmerdir, demir peroksit bulunması halinde rengi kırmızıdır, manganez bioksit bulunması halinde rengi siyahtır. Kilde organik maddeler bulunması halinde ise menekşe rengindedir. Bununla beraber, kilin pişmeden evvelki rengi piştikten sonrada aynı renkte kalacağını göstermez. Çünkü oksitlerin yüksek sıcaklık derecelerinde renkleri değişir (Wikipedia, 2010).

Son olarak rötre yani büzüşme özelliği sayesinde kil su ile yoğrulup şekillendikten sonra kurumaya terk edilirse şekillendirme sırasında verilmiş olan lleri klr. Diğer bir değişle kil hamurunun kuruma sırasında hacmi klr. Bu olaya kilin rötre yapması denir. Rtre, kilin kuruması sırasında olduğu gibi pişmesi sırasında da devam eder. Kilin kurumasından meydana gelen rötre, kilin plastisite özelliğine bağlıdır (Wikipedia, 2010).

### 2.3. Kireç Stabilizasyonu

Zeminin mevcut kimyasal ve fiziksel özelliklerinin, kireç kullanılarak değiştirilip mukavemetinin ve durabilitesinin iyileştirilme işlemine kireç stabilizasyonu adı verilir. Kireç stabilizasyonu, yol kaplaması altında ve yapılarda sağlam bir temel tabaka teşkil etmek üzere, zemin malzemesi ile kirecin birlikte kullanılması işlemidir (Çıragöz, 1962)

Kireç stabilizasyonu ile özellikle ince daneli zeminlerde gözle görülür önemli iyileşmeler meydana gelir. Kireç montmorillonit, illit ve kaolinit içeren yüksek plastisiteli killerde şişme-kabarma potansiyelini azaltmada ve işlenebilirliğini arttırmada çok verimli bir malzemedir. Ayrıca kireç zemin kompaksiyonu sırasında su oranını da azaltarak yardımcı olmaktadır. Kireç stabilizasyonu ayrıca bir çok zemin türünün hacim değiştirme potansiyelini de azaltmaktadır (U.S. Federal Highway Administration, 2010).

Kireç stabilizasyonunda en çok kullanılan kireç çeşitleri sönmüş kireç ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) ve yüksek kalsiyumlu kireçler ( $\text{Ca}(\text{OH})_2.\text{MgO}$  ve  $\text{CaO.MgO}$ ) kullanılmaktadır. Ama içlerinden en çok sönmüş kireç yaygın olarak kireç stabilizasyonunda tercih edilmesine rağmen son 20 yıl içerisinde sönmemiş kireç kullanımda artışlar gözlemlenmiştir (U.S. Federal Highway Administration, 2010).

Bell (1996), zeminin en yüksek dayanımı sağlaması için eklenecek kireç oranının zeminin kuru ağırlığının % 1' i ile % 3' ü arasında olması gerektiğini, daha fazla kireç karıştırıldığında plastik limitte herhangi bir değişimin olmadığını fakat dayanımın arttığını belirtmiştir. Fakat başka çalışmalara bakıldığında kireç stabilizasyonunda kullanılacak olan kireç miktarı kilin kuru ağırlığının %3 ile %8 oranında bir miktar kullanılmalıdır. 28 günlük kürün sonunda ise serbest basınç mukavemetinde en azından 0,34 MPA (50 psi) 'lık bir artış sağlamalıdır (U.S. Federal Highway Administration, 2010).

Kireç stabilizasyonu ile eklenen kirecin önemli ölçüde; likit limiti (LL), plastisite indisini (PI), maksimum kuru birim hacim ağırlığı (M.K.B.H.A) ve şişmeyi düşürdüğünü ve plastik limiti (PL), optimum su muhtevasını ( $W_{opt}$ ) ve zeminin mukavemetini yükselttiği belirlenmiştir.

Kireç stabilizasyonu, zemine yeterli ölçüde kireç ilave edilerek kirecin su ile tepkimeye girmesi sonucu oluşur. Tablo 2.2 ile farklı zemin türlerine göre sağlıklı bir iyileştirme için eklenmesi gereken kireç miktarları gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Önerilen kireç karışım oranları (Ingles ve Metcalf, 1972)

Zemin cinsi	Modifiye için (%)	Stabilizasyon için (%)
İnce çatlaklı kaya	2 ~ 3	önerilmez
İyi derecelenmiş killi çakıl	1 ~ 3	~ 3
Kumlar	önerilmez	önerilmez
Kumlu killer	önerilmez	~ 5
Siltli killer	1 ~ 3	2 ~ 4
Plastik killer	1 ~ 3	3 ~ 8
Yüksek plastisiteli killer	1 ~ 3	3 ~ 10
Organik zeminler	önerilmez	önerilmez

Etkili bir karışım için kireç yüzdesi %5-10 arasında değişir. İlk %2-3 arasındaki ağırlığa kadar toprağın özelliğini ve işlenebilirliğini geliştirmede tatmin edici bir etkiye sahiptir (Raj, 1995).

### 2.3.1. Killi zeminlerde kireç stabilizasyonunun önemi

Killi zeminler genellikle zayıf zeminler olup inşaat açısından, yol altyapısında veya bina altyapısında bizleri sıkıntıya sokan bir zemin türüdür. Bunların iyileştirilmesi,

mukavemet ve durabilitelerinin artması gerekmektedir. Kireç stabilizasyonu ile killi zeminlerin iyileştirilmesini yapabilmekteyiz.

Killi zeminlerde kireç stabilizasyonu ile kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel değişimler olur. Bunların sonucunda katyon değişimi, topaklaşma, çökeltme, yığılma ve çimentolaşma meydana gelir. Bu reaksiyonlardan bazıları ilk saatlerde başlar. Özellikle pozolanik reaksiyonlar zaman içinde oluşur. Uygun su muhtevasında ve sıcaklıkta yıllarca devam eder. Ayrıca kireç stabilizasyonunda hammadde ocağının kalite ve uzaklığına bağlı olarak değişen oranlarda %70'lere varan maliyet azalması da sağlamaktadır.

Katyon değişim işlemi, ince kil partiküllerinin kaba partiküllerle çimentolaşmasını içermektedir. Katyon değişimi, zeminin plastisite karakterindeki değişimlerin ana unsuru olması nedeniyle önemli bir reaksiyondur.

Çimentolaşma işlemi, kalsiyum-silikat ve kalsiyum-aluminat ya da kalsiyum-silikat-aluminat oluşturan kirecin içinde bulunan kalsiyum ve zeminde bulunan silis ve alümin arasındaki reaksiyonla gelişmektedir. Üretilen çimento bileşimleri, yüksek mukavemet ve düşük hacim değişimiyle karakterize edilir. Geçmişteki araştırmacılar, ağırlıkça küçük oranlarda eklenen kireçlerin ( % 2 - 8 ) önemli ölçüde; likit limiti, plastisite indisini, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve şişmeyi düşürdüğünü, ve plastik limiti, optimum su muhtevasını ve zeminin mukavemetini yükselttiğini belirlemişlerdir ( Croft, 1967; Abduljawad, 1995). Eğer kireç, katyon değişimi için gerekli olan miktardan daha fazla eklenirse, sadece yumak yapılı parçacıkları karıştıran ve ekstra mukavemet yaratan çimento bileşimleri içerir ( Al-Rawas et al., 2002 ).

### **2.3.2. Kireç stabilizasyonu sonucu zeminde meydana gelen değişimler**

Kireç stabilizasyonu sonucu zeminde kısa dönemde optimum su muhtevası artmakta, proctor yoğunlukları düşmekte, plastik limit artmakta, likit limit düşmekte, proctor eğrisi düzleşmekte, CBR değerlerinde artışlar olmaktadır. Uzun dönemde ise, CBR değerleri daha da artmakta, serbest basınç ve kayma mukavemetleri ve

çekme gerilmeleri artmakta, şişme ve büzölmeye karşı stabilite artmaktadır. Eğer bunları sıralayacak olursak, kireç stabilizasyonu yapılan zeminlerde kısa dönemde;

- Proktor yoğunlukları düşmekte
- Plastik limit artmakta
- Likit limit düşmekte
- Proktor eğrisi düzleşmekte
- CBR değerlerinde artışlar olmaktadır.

Uzun dönemde ise;

- CBR değerleri daha da artmakta
- Serbest basınç mukavemeti artmakta
- Kayma mukavemeti artmakta
- Çekme gerilmeleri artmakta
- Şişme ve büzölmeye karşı stabilite artmakta
- Don etkisine karşı direnç artmaktadır ( Kavak, 1996 ).

### **2.3.2.1. Plastisite indisinde düşüş**

İnce daneli zeminler kireç eklendiği andan itibaren fiziksel değişimlerin oluşmaya başladığı geniş ölçüde birçok araştırmacı tarafından kabul görmüştür. Zemine kireç ilave edildiği anda hemen hemen bütün plastisitesi yüksek zeminlerde, plastik limit artmakta ve plastisite indisi düşmektedir.

### **2.3.2.2. $W_{opt}$ değerinde artış ve M.K.B.H.A değerinde düşüş**

Zemine ilave edilen kireç, optimum su muhtevasını arttırırken aynı zamanda maksimum K.B.H.A. değerini de düşürür (Croft, 1967; Abduljauwad, 1995). Kireçli zemin saf zemine göre daha düşük bir yoğunlukta sıkışır.

### **2.3.2.3. Uzun ömürlülük**

Eades ve Grim (1960) kirecin zemin içerisindeki sürekliliğini tespit edebilmek için saf killi zeminlere kireç ilave ederek deneyler yapmışlardır. Tespitlerine göre eğer stabilizasyon sadece katyon değişimi ve topaklanmaya bağlıysa, zeminden sızan su kalsiyumla yer değiştirebilir.

Kennedy (1988)' e göre zemin fiziksel olarak kalsiyum silika hidratla (CSH 1 ve 2) değiştirildiği zaman silikatlar zeminde kalıcı etki bırakmaktadırlar. Kireçle stabilizasyonunda, çevre koşulları etkisi altında zeminin özelliklerindeki bozulma da sınırlı kalmaktadır (Kennedy, 1988). Bu dayanımın sağlanmasında ve uzun vadede reaksiyonların devam etmesinde kullanılan kireç miktarının önemi büyüktür.

Kireç kullanımının uzun ömürlü olup olmadığı konusundaki tartışmalara son noktayı Gutschick (1978) koymuştur. Kireçle killerin karışımları sonucunda kalsiyum ve alüminyum silikatları oluşturmakta ve bu da iyileştirilen tabakaların su hareketlerine karşı dayanımlı olmasına neden olmaktadır.

### **2.3.2.4. Mukavemetteki değişimler**

Yol inşaatında kireç stabilizasyonunun etkisini analiz edebilmek için Kelley (1977) tarafından kapsamlı bir arazi çalışması yapılmıştır. 1940' lı yıllarda ikinci dünya savaşında acele bir şekilde yapılmış olan 4. Ordu Komuta Merkezi' nin oturduğu zemine kireç stabilizasyonu yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanma nedeni, zeminin büyük kısmının plastisite indisi 12' den 50'ye değişen killerden oluşmasıdır. Kireç stabilizasyonu o dönemde çok yeni bir iyileştirme yöntemi olduğundan kullanılan kireç oranları rastgele % 2 ile % 8 arasında değişmiştir. Yapımından 25 yıl geçmesine rağmen kireç kullanılan tabakalara bakıldığında hiçbir bozulma veya göçmeye rastlanmamıştır. Kireçle iyileştirilmiş zeminlerin dayanımında doğal zemine oranla ciddi derecede artış gözlenmiştir (Kelley, 1977).

1969' dan bu yana Soil Conservation Service, 50 baraj inşaatının zemin ıslahında kireci kullanmıştır (McElroy, 1982, 1987). Her baraj inşaatı için sönmemiş kireç % 3 oranında kullanılmıştır.

1973 yılında Dünya' nın en geniş alanlı kireç stabilizasyonu uygulanmıştır. (Dallas – Dördüncü Uluslar arası Havaalanı İnşaatı) Stabilizasyon için % 6 oranında kireç uygulanmıştır. Temel betonunun dökümünden 75 gün öncesinde temelde 45 cm' lik, anayollarda 22.5 cm' lik kireç uygulaması yapılmıştır (Dallaire 1973; Long, 1989). İnşaatın yapımından 15 yıl sonrasında analizler yapıldığında dayanımın günden güne arttığını ve bu süreç içerisinde herhangi bir bakıma ihtiyaç duyulmadığı gözlemlenmiştir (Long, 1989).

Eades ve Grim (1963) yaptıkları çalışmalarda, farklı oranlarda kireç katılan 6 adet kür edilmiş serbest basınç numunesi üzerinde ölçümler yapmış ve serbest basınç değerlerinde artan kireç miktarına bağlı olarak % 200-% 1000 arasında artışlar olduğunu saptamışlardır.

Thompson (1968), kireçle iyileştirilmiş zeminler üzerinde basınç testleri yapmıştır. Sonuçları doğal zeminle kıyasladığında mukavemetlerinde artışlar gözlemlenmiştir.

Biswas (1972), Teksas' dan alınan numuneler üzerinde değişik zamanlarda ve değişik kireç oranlarında dayanım testleri uygulamıştır. Sonuçları doğal zeminle kıyasladığında mukavemetlerin Thompson' ın çalışmalarında olduğu gibi arttığını gözlemlenmiştir.

Hava koşulları killi zeminlerin stabilitesinde uzun dönemde farklılıklar meydana getirir. Yong, Elmoneyera ve Chong (1985) kireçle iyileştirilmiş killi zeminlerden alınmış numuneleri 69 günlük üç eksenli deneye tabi tutmuşlar ve birçok kimyasal değişiklik gözlemlenmişlerdir. Numuneler üzerinde gerilme, drenajlı akma testleri uygulamışlardır. Sonuçlara bakıldığında numunelerin dayanımında ve sıklığında ciddi oranda artışlar gözlemlenmiştir.



Kireç stabilizasyonu, Türkiye' nin Ankara şehrinde bulunan Bala-Kulu ayrımı arasında bulunan yolun 360 m' lik bölümünde Kavak (1996) tarafından uygulanmıştır. Uygulama sonucunda zeminden alınan numunelerin dayanımlarına bakıldığında özellikle yaş CBR değerlerinde keskin artışlar gözlenmiştir.

### **2.3.2.5. Permeabilitideki değişimler**

Permeabilitedeki artışlar üç sebepten kaynaklanabilir. Bunlardan birincisi; minerallerin çözünmesi (D'Appolonia, 1980), ikinci sebep; katyon değişim reaksiyonları, üçüncü sebep ise; organik akışkanlarla suyun yer değiştirmesi sonucu kilin kuruması.

Townsend ve Klym (1966) kireç stabilizasyonunun, topaklanmaya bağlı olarak gözenek hacminin artması sonucu zeminde sıvı akışını engellediğini belirlemişlerdir. Yaptıkları testlerin sonuçlarına bakıldığında kireçle iyileştirilmiş zeminlerin permeabilitelerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Başka bir çalışmada Fossberg (1965) kireçle iyileştirilmiş zeminin permeabilitesinin azaldığını gözlemlemiştir. Bunun nedeni kireçle hazırlanmış olan numunelerin topaklanma oluşmasını beklemeden (numuneler hazırlanır hazırlanmaz) dayanımlarını ölçmesinden kaynaklanmaktadır (Townsend ve Klym, 1966).

### **2.3.2.6. Donma-çözünme etkisine karşı davranış**

Topraktaki buz mercceklerinin donma ve çözülme mekanizmasını tanımlamışlardır. Delik yapısı, donmamış suyun hareketi ile oluşan hidrolik basıncın üretilebilmesine dayanacak kadar güçlü olduğunu gözlemlemiştir. Stabilize edilmiş zeminin delikli yapısının germe mukavemetini geçtiğinde oluşacak hidrolik basıncı da incelemiştir. Hapsedilmiş delikli yapının kaybının ve deliklerin geometrisinin yeniden düzenlenmesinin mukavemet kaybı ve boşluk artışı ile sonuçlandığını belirlemiştir.

Rosen ve Marks (1971) soğuk havada kireç stabilizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın amacı; sıkıştırmadan hemen önce donma-çözülme koşullarına maruz kalan zemin-kireç karışımlarının, pozolanik reaksiyonlarla desteklenen koşullara erişemediğinden meydana gelmesidir. Çalışmalarda tek tip zemin ve bir kireç içeriği kullanmışlardır. Verilerine dayanarak; kireç ile stabilize edilen zeminlerin önemli dayanım kazanımları sağlayan sıkıştırmadan hemen sonra aşırı donma-çözülme koşullarına maruz kaldıklarını belirlemişlerdir. Bu durum, kür koşulları pozolanik reaksiyonları desteklediği zaman ve dayanım kazanımları sağladığı zaman geçerlidir. Yapılan çalışmalarda, hava koşullarındaki ters koşullara rağmen kireçle stabilize edilen zeminde herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir.

### **2.3.3. Kireç stabilizasyonu ile ilgili örnekler çalışmalar**

Roma'lılar ünlü Kral Yolu'nda volkanik toprakla kireç karışımı ve Çinliler 6400 km uzunluğundaki Çin Seddi'nin yapımında pirinç ununun da eklendiği özenle sıkıştırılmış kil ve kireç karışımı kullanılarak çok eskilere dayandığı bilinen kireç stabilizasyonu ayrıca dünyada özellikle de Rusya, Fransa ve İtalya gibi ülkelerde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Ülkemizde ise az da olsa örnekleri bulunabilmektedir.

#### **2.3.3.1. Türkiye'den örnekler**

Kireç stabilizasyonu henüz ülkemizde kullanımı pek yaygın olan bir stabilize yöntemi olmasa da karayollarında killi zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi çalışması yıllardan beri Kireç Sanayicileri Derneği tarafından takip edilen bir projedir. Uzun çalışmalar sonunda 2003 yılında Köy Hizmetleri Ankara il müdürlüğünün tahsis ettiği Yukarı Yurtçu Köyü yolunda 200 metre uzunluğunda ve 7 metre genişliğinde bir deneme yolu gerçekleştirilmiş, bu çalışmanın verileri KAVAK (Kocaeli Üniversitesi) tarafından ölçülüp raporlanmıştır. Yapılan çalışmaların başarısından alınan güvenle karayollu nezdinde daha kararlı girişimler başlatılmıştır. 2004 yılında hazırlanan protokol gereği Ankara Bölgesi'nde Bala ayrımı-Kulu ayrımı arasında karayollarının bölünmüş yol çalışmaları kapsamında 44+200 metre ile 44+560 metreler arasında 360 metrelik kısımda kireç stabilizasyonu uygulaması yapılmıştır.

Daha sonra Kırklareli şehir geçişi 1+250 ile 1+900 metreleri arasında 650 metrelik kısımda da başarıyla uygulanmıştır.

### **2.3.3.1.1. Ankara uygulaması**

Çalışma, karayollarının bölünmüş yol çalışmaları kapsamında bulunan Bala ayrımı-Kulu ayrımı arasında 500 metrelik kısımda uygulanması planlanmasına rağmen 140 metrelik kısmın kireç stabilizasyonuna uygun olmaması sebebiyle 360 metrelik kısımda uygulanmıştır. Arazinin kireç stabilizasyonuna uygun olduğu Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı tarafından yapılan zemin mekaniği deneyleri ile tespit edilmiştir. Arazide kireç kullanılarak zemin iyileştirme çalışmaları bölünmüş yolun yeni yapılmakta olan kısmında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın Toplam 40 cm 'lik kısımda uygulanması planlanmıştır. Kireç Stabilizasyonu 20'şer cm 'lik 2 tabaka halinde uygulanmıştır. İyileştirilme yapılan yolun genişliği yaklaşık olarak 14 metredir. İmalat yolun 7'şer metrelik iki bölümü için ayrı ayrı yapılmıştır. Seçilen kireç miktarı KGM, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı Şefliği tarafından kuru zemin ağırlığının %5'i olarak tespit edilmiştir. Yapılan arazi çalışmaları ise şunlardır;

- Yolun 7 metrelik kısmının 40 cm kazılması ve killi zeminin yolun yanında istiflenmesi.
- İlk 20 cm' lik kısmın greyder vasıtasıyla kazılan yere gevşek olarak aktarılması.
- Kirecin, kireç serme makinasına aktarılması.
- Kirecin, kireç serme makinesiyle gevşek olan kısma istenen dozajda dökülmesi. (Kireç kuru zemin ağırlığının % 5'i olarak uygulanmıştır. )
- Traktör tarafından çekilen rotil ile toprağın ufak parçalara ayrılması.
- Greyderle yeterli olarak karıştırılarak kirecin killi zemin ile homojen olarak karıştırılması sağlanması.
- Arazöz ile sulanarak karışımın optimum su muhtevasına getirilmesi.
- Silindir ile sıkıştırılarak Karayollarının Yollar Fenni Şartnamesi' ne göre relatif sıkılıkların sağlanması.
- Üst tabaka içinde aynı metodun uygulanması.

- Sahada çalışmalar yapılırken su birikmemesi için imalat yolun dış tarafına doğru drenaj yönüne hafif meyilli olarak uygulanmıştır.
- Yolun 7 metrelik diğer kısmı içinde yukarıdaki metot aynen uygulanmıştır. Ancak iki kısmın birbiri ile kaynaşmasını sağlamak için yaklaşık 2 metrelik kısımda bindirme yapılmıştır.

#### **2.3.3.1.2. Kırklareli uygulaması**

Çalışma Karayolları Genel Müdürlüğünün Kisad ile yaptığı protokol çerçevesinde yol talep edilmesiyle başlamıştır. Karayollarının bölünmüş yol çalışmaları kapsamında bulunan Kırklareli Şehir geçişi 1+250-1+900 metreleri arasında 650 metrelik kısımda uygulanmıştır. Arazinin kireç stabilizasyonuna uygun olduğu Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü Araştırma Baş Mühendisliği ve KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı Şefliği tarafından zemin mekaniği deneyleri ile tespit edilmiştir. Arazi çalışmaları Bölünmüş yolun yeni yapılmakta olan kısmında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada taşıma gücü düşük ariyet ocağı malzemesi yol güzergahı üzerine iyileştirilerek kullanılmıştır. Sahaya serilen ariyet ocağı malzemesi kireçle Karayollarına ait ekipmanlarla karıştırılarak serilip sıkıştırılmıştır. Çalışmanın Toplam 40 cm'lik kısımda uygulanması planlanmıştır. Kireç Stabilizasyonu 20'şer cm.'lik 2 tabaka halinde uygulanmıştır. Yolun dolgu yapılan genişliği yaklaşık 14 metredir.

#### **2.3.3.1.3. Türkiye'den yapılan diğer örnek çalışmalar**

Bahsi geçen uygulamalar dışında da Türkiye'de çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Sayıca az olmalarına rağmen kireç stabilizasyonunun geleceğine ışık tutması açısından önemli çalışmalar olduğu söylenebilir. Bu çalışmalar ise şunlardır;

- Karaman – Mut Yolu ( 5km )
- Ankara – Polatlı Yolu ( 500m )
- Sorgun – Akdağ Madeni Yolu ( 5km )

- Adana Şehiriçi Geçiş Yolu ( 2km )
- Pınarbaşı – Gürün – Darende Yolu
- Burdur – Antalya Yolu
- Bolu – Gerede Yolu ( 5km )
- Tekirdağ – Silivri Yolu ( 2km )

#### **2.3.3.1.4. Yapılan çalışmaların sonuçları**

- Laboratuarda yapılan zemin mekaniği deneyleri, arazide yapılan plaka yükleme deneyi ile uygunluk göstermektedir. Bu çalışmalardaki sonuçlar literatürde daha önceden yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir.
- Zemin killi bir zemin olmasına rağmen iyileştirme sonucunda özellikle yaş CBR değerlerinde keskin artışlar gözlenmiştir. Bu çalışmada yol kesit dizaynıyla ilgili bir çalışma yapılmamasına rağmen yüksek CBR değerlerinin yol kesitini küçülterek ekonomi sağlayacağı açıktır.
- Bu çalışmada taşıma gücü düşük ariyet ocağı malzemesi kireç stabilizasyonu ile iyileştirilerek uygun hale getirilerek kullanılmıştır. Bu çalışma dışında taban zemini killi bir zemin olduğu durumlarda da kazı ve dolguya gerek kalmadan kireç stabilizasyonu zemini iyileştirmek için kullanılabilir.
- Plaka yükleme deneyleri sonucunda bulunan kalıcı deformasyonların azlığı ve yüksek yatak katsayıları zeminin trafik altında da deformasyonlarının son derece az olacağını göstermektedir.
- Kireç Stabilizasyonu yapılan yolun üst tabakalarının yapılarak üst kaplamayla kapatılması ve yolun kısa sürede tamamlanması bütün dolgu çalışmaları gibi önemlidir.

#### **2.3.3.2. Dünyadan Örnekler**

Kelley (1977), yaptığı çalışmada kireç stabilizasyonu yapılmış tabakalarının uzun yıllar sonra dahi son derece iyi bir performans gösterdiğini ve dayanım özelliklerinin kusursuz bir şekilde koruduğunu fark etmiştir. Yapılan bu çalışma Amerika'da 5 adet askeri üssü içermekte şunlardır;

- Fort Polk, Louisiana (1951) – kireç-çimento karışımı ile stabilize edilen zemin zayıf bir betonarme performansına yani yaklaşık 12,6 MPa basınç dayanımına erişmiştir.
- Fort Chaffe, Arkansas (1949) – kireç ile stabilize edilen askerin üssün zemini 12,8 MPa basınç dayanımına erişmiştir.
- Fort Sam Houston, Texas (1953) – 24 yıl sonra dahi ağır trafik yüküne rağmen kusursuz bir performans göstermiştir.
- Fort Sill, Oklahoma (1949) – 28 yıllık kireç stabilize edilmiş askeri yol ağır kamyon ve tank trafiğine dayanım gösterebilmiş ve sadece çok küçük bir tadilat ihtiyacı ile kullanımına devam edilmiştir.
- Fort Hood, Texas (1953) – 24 yıl sonunda ağır kamyon trafiği yükü altındaki yol kusursuz bir performans göstermektedir.

Robnett ve Thompson (1979), yaptıkları çalışmada kireç katkılı zemin ile doğal haldeki zeminin esneklik modülünü karşılaştırmış olup farklı 50 bölgeden topladıkları zemin örnekleri üzerindeki 10 tekrarlı donma-çözünme deneyleri sonucu doğal zeminin esneklik modülü 25 MPa çıkarken kireç katkılı zeminin esneklik modülü 108 MPa çıkmıştır.

Gutschick (1978, 1985) yaptığı çalışmalarda taban ve yan cepheleri kireç ile stabilize edilene Friant-Kern Kanalı'nın 25 yıl içindeki aşırı kuruluk ve taşkınlar gibi ağır durumlar altında kalmasına rağmen şev dayanımını koruduğu ve erozyona maruz kalmadığını gözlemlemiştir.

McCallister ve Petry (1990) yaptıkları çalışma Amerika'nın Teksas eyaletinde inceledikleri killi zemin numunelerinde kullandıkları çok az miktar kirecin stabilizasyonun getirisinde çok önemli kayıplar yarattığını ancak yeterli miktarda kirecin kullanılmasıyla optimum faydaları sağladığını gözlemlemişlerdir.

Little (1995) kireç katkılı 9 adet zemin numunesi üzerinde yaptığı testler sonucu numunelerin üç eksenli kesme dayanımlarının arttığını ve nem hassasiyetinde azalma meydana geldiğini ispat etmiştir.

Eades et al. (1960), Thompson (1966), Holtz (1969), Little (1995) yaptıkları Atterberg kıvam testleri ile çalışmalarında kirecin, uygulandığı zeminin plastisite indisini azalttığı ve toprağın daha kolay işlenebilip çalışılabileceğini göstermişlerdir. Bu reaksiyon uygulanan toprağın mineralojisine bağlı olmakla birlikte hemen hemen bütün plastik topraklarda plastisitede azalma işlenebilirlikte iyileşme ortaya çıkarmaktadır. Plastisite indisi 50'nin üzerinde olan bazı zeminler kireç ile stabilize edildikten sonra plastiklik özelliğini kaybetmektedirler.

Goldberg ve Kelin (1952), Dempsey ve Thompson (1968), Thompson (1969), Little (1995) CBR ve konsolidasyon deneyleri gibi birkaç farklı deney ile kireç katkısız deney numunelerinin %8 ile %10 arasında değişen şişme potansiyellerinin, kireç stabilizasyonu ile %0,1'den daha az bir değere kadar düştüğünü ve aynı şekilde plastisite indisinde de azalmalar olduğunu göstermişlerdir. Şişme potansiyeli ve plastisite indisinde azalmalar hemen sonuç göstermiş olsa da özünde bu değerler kür süresine ve pozolanik reaksiyonlar sonucu gelişim göstermektedir.

Neubauer ve Thompson (1972), Little (1995) kireç ile toprağın karışması ile girdikleri reaksiyon sonucu toprağa, kür süresine ve eklenen kireç miktarına bağlı olmakla birlikte su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık ilişkisinde değişimler gözlemlemişlerdir. Kireç katkısı sonucu toprağın maksimum kuru birim hacim ağırlığında azalma meydana gelmiştir.

Eades et al. (1963) 3 yılın üzerinde bir periyot sonrasında kireç stabilize edilmiş zeminin pH değerinin 10'un üzerinde olduğunu ve pozolanik reaksiyonların devam ettiğini fark etmiştir.

Biczysko (1996) 16 yıllık kireç stabilize edilmiş zemin numunelerinin pH değerlerini 10'un üzerinde tutabildiğini elde etmiştir.

Eades ve Grim (1963) 6 farklı toprak üzerinde yaptıkları çalışmada, kireç katkılı toprakların kireç miktarına göre serbest basınç dayanımlarında %200 ile %1000 arasında artış gözlemlemişlerdir. Bu çalışma ile optimum kireç miktarının önemi vurgulanmıştır.

Doty ve Alexander (1978) 12 farklı toprak üzerinde yaptıkları çalışmada 7 gün boyunca 38°C’de kür edilmiş numuneler ile 28 gün boyunca 23°C’de kür edilmiş numunelerin basınç dayanımlarının kabaca eş değer olduğunu gözlemlemişlerdir. Kür süresine bağlı olarak basınç dayanımları artmakta olup düşük plastisite indisine sahip olan numunelerin dahil kayda değer basınç dayanımları artmıştır. Yapılan deneylerdeki bütün numunelerde serbest basınç dayanımı artmış ve bazı zeminlerde 360 günlük kür sonucunda 10 MPa’lık bir serbest basınç dayanımına erişilmiştir.

Uddin et al. (1997) plastik kil üzerinde yaptığı 180 gün kür süreli çalışmada %2,5 ve %15 değerleri arasında kullandığı kireç ile elde ettiği sonuçlar ile en iyi serbest basınç dayanımını %10 kireç miktarında elde etmiş olup bu değerde serbest basınç dayanımında %1100’lük bir iyileşme gözlemlemiştir. Ayrıca numunelerin içsel sürtünme açısı ve kohezif dayanımlarında da iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Evans (1998) Queensland bölgesindeki yüksek plastisiteli siyah kil üzerinde yaptığı çalışmalarda %8 oranındaki kireç katkısı ile zeminin plastisite indisini 40’dan 8’e düşürmekle birlikte 28 günlük kür sonucunda ise serbest basınç dayanımı 0,1 MPa’dan 1,4 MPa’a çıkmıştır. 26 haftalık kür sonucunda ise bu değer 4,5 MPa’a kadar ulaşmıştır. Bu sonuç bize pozolanik reaksiyonları çok uzun bir süre boyunca dahi devam ettiğini göstermektedir.

Thompson (1969), Moore et al. (1971), Little (1995, 1996, 1997) yaptıkları çalışmalarda ince daneli zeminlerde kür süresine veya kireç karışımı sonucu oluşan reaksiyonlara bakmaksızın CBR değerlerinde artışların meydana geldiğini kanıtlamışlardır.

Eades et al. (1963) Virginia eyaletinden aldığı yüksek plastisiteli kilin kireç stabilizasyonu ile yaş CBR değerinin %5’ten yaklaşık %100’e kadar yükselmiştir. Yapılan X.R.D ve S.E.M testleri sonucunda pozolanik içeriklerin bu artışa neden olduğu ortaya çıkmıştır.

Puatti (1998) Avrupa’nın çeşitli yerlerinden aldığı numuneler ile gerçekleştirdiği ve içersine %3 ile %4 kireç miktarı koyduğu deneylerde yaş CBR değerleri %1 ve



%5'ten %15 ve %20'ye kadar çıkmıştır. Bu çalışma sonucunda kaliteli ve uzun ömürlü kaldırımlar inşa edebilmek için kireç kullanımının gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Perry et al. (1996) az miktardaki sönmemiş kirecin (yaklaşık %2,5) %35 ile %40 arasında bir su muhtevasına sahip olan bir zemine eklendiğinde etkin bir biçimde toprağı kuruttuğı ve yaş CBR değerini %1,5'tan %30'a çıkardığını göstermiştir.

Aufmuth (1990) Amerika'da dört farklı eyalette yağış sezonunda yaptığı 3 ile 17 yıllık (ortalama 9 yıllık) kaldırımlarda testler sonucunda kireç stabilize edilmiş olanlarında CBR değeri %65 iken kireçsiz doğal zeminlerde CBR değerleri %10 civarında çıkmıştır.

Geçmiş tarihe baktığımızda ise;

- 6400km uzunluğundaki Çin Seddi'nin yapımında pirinç ununun da eklendiğı özenle sıkıştırılmış kil ve kireç karışımı kullanılmıştır.
- Roma'lılar ünlü Kral Yolu'nda volkanik toprakla kireç karışımı kullanılmıştır.
- Ayrıca kireç stabilizasyonu Rusya, İtalya, Fransa gibi ülkelerde sıkça kullanılmaktadır.

#### **2.3.4. Kireç stabilizasyonunda uygulanan laboratuvar deneyleri**

Stabilizasyonu yapılacak olan killi zeminin özelliklerini belirlemek, zeminin iyileştirilmesi için kullanılacak olan kirecin ve kille kirecin reaksiyona girmesi için gerekli olan suyun ne kadar miktarda kullanılacağı laboratuvar deneylerinden elde edilir. Ayrıca yapılan stabilizasyonun normal zemine göre ne kadar performans sağlayacağı yine laboratuvar deneylerinden elde edilir. Bu çalışmada yapılan laboratuvar deneyleri ise şunlardır;

- Yıkamalı elek analizi
- Likit limit ve plastik limit deneyi
- pH deneyi
- Harvard Proctor ( Sıkıştırma ) deneyi

- Serbest Basınç Deneyi
- CBR Deneyi
- Enerji dağılım spektroskopisi
- Taramalı elektron mikroskobu
- X-ışını kırınım deneyi

#### 2.3.4.1. Yıkamalı elek analizi

Elek analizi deneyi, bir zeminde, ince kum boyutunda ( $> 0.0075\text{mm}$ ) ve daha iri danelerin dane dağılımının belirlenmesi için kullanılan bir metottür. Yıkamalı elek analizinde ince daneli zeminlerin kil + silt olanı bulunabilmektedir. Kuru elek analizi ile zemindeki kum ve çakıl miktarlarının yüzde olarak değerlerini bulabiliriz. Zemindeki ince danelerin toplam miktarı ise deney sonuçlarından bulunabilir. Elek analizi deneyi sonuçlarında bulduğumuz değerleri grafiğe yansıtarak zeminin  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  değerlerine ulaşabiliriz. Bu değerlerden ise gerekli formülleri kullanarak zeminin uniformluk sayısı ( $C_u$ ) ve eğrilik katsayısı ( $C_c$ ) değerlerini bulabiliriz.  $C_u$  ve  $C_c$  değerleri bize zemini sınıflandırmamızda yardımcı olur.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.3)$$

$$C_C = \frac{D_{30}}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2.4)$$

#### 2.3.4.2. Atterberg kıvam limitleri (LL – PL deneyleri)

İnce daneli zeminlerin plastik kıvamdan sıvı kıvama geçtiği su muhtevası değerine likit limit denir. Bu değeri bulmak için yaptığımız deneye likit limit deneyi denir. Bu deneyde değişik su muhtevaları içeren zemin numunesini Casagrande adı verilen bir alet kullanılır. Şekil 2.6 ile Casagrande aleti gösterilmektedir. Casagrande aletinde 25 vuruşa denk gelen değer bizim LL değerimizi vermektedir.



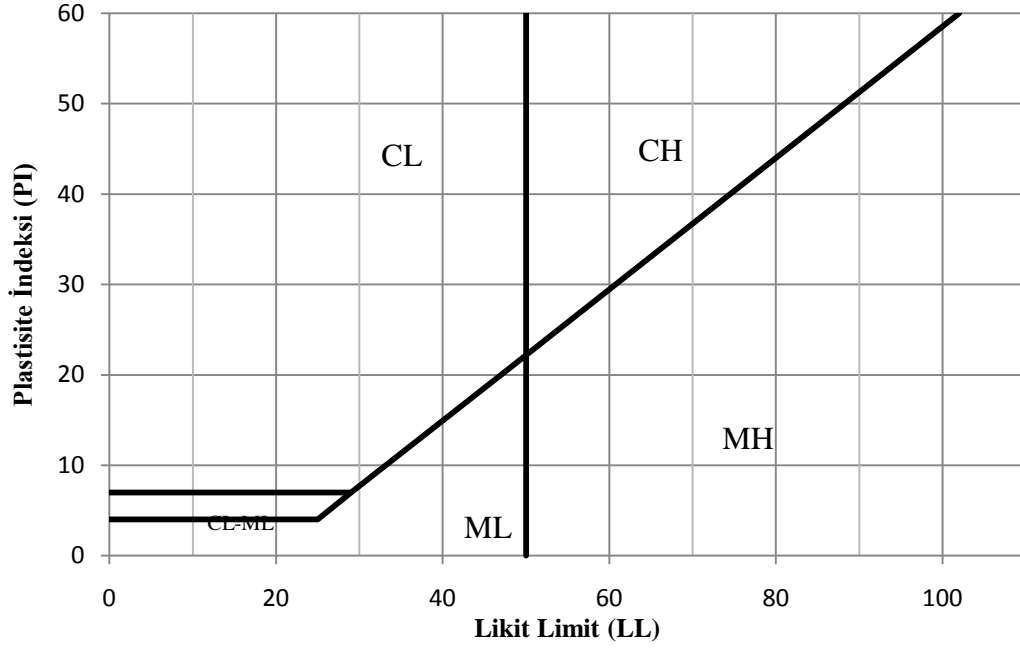
Şekil 2.6: Casagrande aleti

İnce daneli zeminlerde istediğimiz şekli zemin numunesinde herhangi bir kırılmaya neden olmadan sağlıyorsak bu durumdaki zeminlere plastik kıvamdaki zeminler denir. Zeminin plastik kıvamını koruduğu ve en düşük su muhtevasına zeminin plastik limit denir. Deney düzeneği Şekil 2.7 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Plastik limit düzeneği

Yapılan bu iki deney sonrası alınan bilgilere Atterberg kıvam limiti adı verilmektedir. Bu iki deney sonucu yani LL ve PL değerlerinin farkı ise bize PI değerini verir. Atterberg kıvam tayinindeki tabloda elde edilen LL ve PI değerleri ile zemin sınıflandırması yapılabilmektedir. Şekil 2.8 ile Atterberg limit grafiği verilmiştir.



Şekil 2.8: Atterberg limit grafiği

### 2.3.4.3. pH deneyi

Eades ve Grim tarafından geliştirilen pH yöntemi, zemine bağ takasını sağlamak, ilk ve kısa dönem reaksiyonlarını, pozolanik reaksiyonlarını sağlamak için gerekli kirecin eklenmesi mantığına dayanır. Bu yöntemle yaklaşık 1 saat içerisinde uygun kireç oranı bulunur. Eğer pH değerleri 12.40 'a doğru gidiyorsa, en düşük kireç yüzdesi (12.40'lık pH'ı olan) toprağı stabilize etmek için istenen yüzdedir. Eğer pH değerleri 12.30'u geçmiyor ve % 2 'lik kireç aynı değeri veriyorsa, 12.30'luk pH'ı veren en düşük yüzde, toprağı stabilize etmek için istenen yüzdedir. Eğer en yüksek pH değeri 12.30 ise ve sadece % 6 'lık kireç o pH' ı veriyorsa ilave test şişelerine büyük kireç yüzdeleriyle başlanmalıdır. pH ölçer Hyalk elektrotuyla donatılmış olmalıdır (TRB State of Art Report -5 1987). Örnek bir pH ölçer aygıtı Şekil 2.9 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.9: pH metre

#### 2.3.4.4. Harvard Proctor deneyi

Laboratuarda sıkıştırma deneyinde, belirli boyutlardaki bir kap içindeki su içeriği belirli bir zemine, yine belirli bir sıkıştırma enerjisi uygulanır ve sonra zeminin birim hacim ağırlığı belirlenir. Bu işlem değişik su içeriklerinde zeminin birim hacim ağırlığı ve su içeriği oranı arasında belirli bir ilişki elde edinceye dek birkaç kez yinelenir.

Deneyin amacı bir zemin numunesinde ki optimum su muhtevasını bulabilmektir. Deneyde alınan zemin numunesi minyatür proctor düzeneği dediğimiz bir alette özel bir çekiç yardımı ile sıkıştırılır.

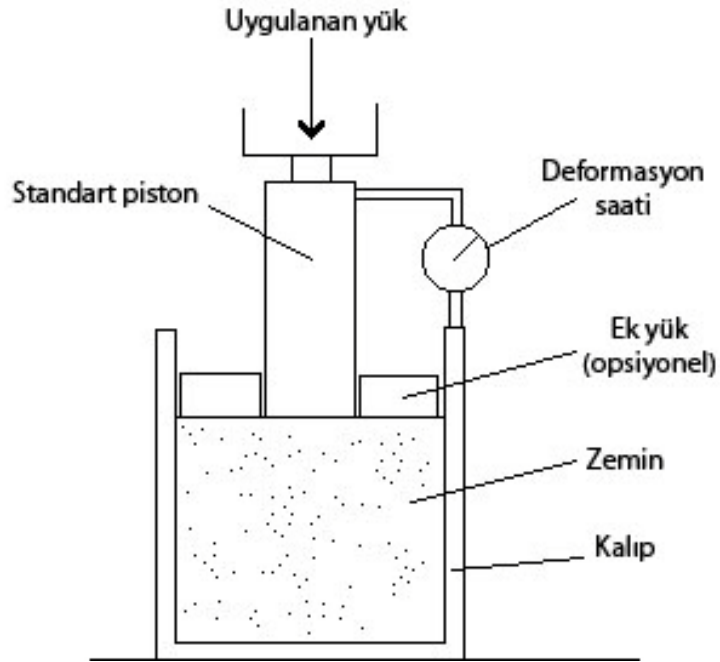
#### 2.3.4.5. Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyi bize silindirik olarak hazırladığımız bir zemin numunesinin aksenal olarak yüklenerek ortaya çıkan serbest basınç mukavemetini verir. Numunenin aksenal yüklenmesi sonucunda numune de aksenal şekil değiştirme meydana gelir ve bu değerlerle bir gerilme – şekil değiştirme grafiği çizilir. Bu grafikteki en yüksek gerilme değeri bize zeminin serbest basınç mukavemeti değeri olan  $q_u$  'yu verir. Şekil 2.10 ile numune kesiti ve serbest basınç grafiği gösterilmektedir.



### 2.3.4.6. CBR deneyi

CBR deneyinde bir numunenin ya da arazinin taşıma oranını bulunur. Bu değere CBR değeri denir. Biri kuru diğeri de yaş olmak üzere iki tane CBR değeri vardır. Kuru CBR'da numune üzerine yük etkiterken yaş CBR'da numune su içinde bırakılarak hesaplamalar yapılır. Bulunan CBR değeriyle de sıkışan zeminin özelliğine göre kullanım amacı tespit edilir. Şekil 2.12 ile CBR düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 2.12: CBR düzeneği

### 2.3.4.7. Enerji dağılım spektroskopisi

Enerji dağılım spektroskopisi olarak bilinen E.D.S deneyi, analitik tekniklerle numuneye enerji dalgaları göndererek bizlere bir numunenin karakterini ve içeriğindeki kimyasal bileşenleri öğrenmemize yardımcı olur.

Enerji dağılım spektroskopisi sisteminde numuneye elektron demetlerinin çarpması sonucu açığa çıkan x-ışınlarının enerjilerine göre ayırım yapılır.

#### **2.3.4.8. Taramalı elektron mikroskobu deneyi**

İngilizcesi scanning electron microscope olan S.E.M yani taramalı elektron mikroskobu çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyine taranması prensibiyle çalışır. Manfred von Ardenne öncülüğünde 1930'lı yıllarda geliştirilmiştir. En sık kullanıldığı biçimiyle, yüzeyden yayılan ikincil elektronlarla yapılan ölçüm, özellikle yüzeyin engebeli (topografik) yapısıyla ilişkili bir görüntü oluşturur. Bu görüntü bize numune hakkında karakteristik bilgiler verebilmektedir.

Taramalı elektron mikroskobunda sıvı olmayan ve sıvı özellik taşımayan her türlü iletken olan olmayan numune incelenebilir. İletken olmayan numuneler çok ince, iletken bir malzemeyle kaplanarak incelenebilir hale getirilir. S.E.M' de incelenecek numuneler temiz olmalıdır; tozlu ve yağlı olmamalıdır. Toz halinde ki numuneler uygun koşullarla palet haline getirilerek incelenebilir.

Taramalı elektron mikroskobunda analizi yapılacak olan numunenin maksimum boyutları 7.5 x 7.5 x 1.5 cm olabilir. Görüntüsü alınacak numunenin maksimum boyutu ise 7.5 x 7.5 x 2 cm olabilir.

#### **2.3.4.9. X-ışını kırınım deneyi**

İngilizcesi x-ray diffraction olan X.R.D yani x-ışını kırınım deneyi isminden de anlaşılacağı üzere x-ışını denilen ultraviyole ışıdan daha kuvvetli fakat gama ışınından daha zayıf enerjili ışın kullanılarak yapılan analizi temel alır.

X-Ray diffractometer denilen aletler ile yapılan bu karakterizasyonda örnek türüne göre değişik uygulamalar görülmektedir. Ayrıca detektör ve ışın doğası da önemli etkenlerdir.

Çalışma prensibi olarak örneğe x-ışını göndererek kırılma ve dağılma verileri toplaması söylenebilir. Kristal yapısına göre ışını farklı açılarda ve şiddette kıran örnekler çok hassas biçimde analizlenebilmektedir.



### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Yapılan bu çalışmada Kocaeli ilinde Uzunçiftlik mevkiinde bulunan zemin üzerinde çalışma yapılmıştır. Buradaki killi toprak son derece sorunlu olup özellikle yol çalışmalarında altyapıyı olumsuz yönde etkilemektedir. Çalışmada bu zeminin hem sönmüş hem de sönmemiş kireç kullanılarak stabilize edip ne kadar oranda bir başarımlı sağlandığı, bize ne gibi artılar getirdiği araştırılmıştır. Asıl amaç sönmemiş kireç kullanılarak yüksek su muhtevasına sahip killi zeminin hem su muhtevasını azaltmak hem de mukavemeti arttırmaktır.

Uzunçiftlik mevkiinden alınan numune örnekleri üzerinde laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda öncelikle zeminin mevcut yapısı, içeriği ve mukavemeti ortaya çıkartılmıştır. Sonraki aşamada ise kireç kullanarak yapısındaki, içeriğindeki ve mukavemetindeki değişimler incelenmiştir.

Öncelikle alınan zemin numunesinin mevcut su muhtevası ardından ise optimum su muhtevası bulunmuştur. Sonrasında ise yıkamalı elek analizi deneyi yapıp zemini içeriği bulunup sınıflandırılmıştır. Likit limit ve plastik limit deneyleri ile plastisite indisi bulunmuştur. pH deneyi yapılarak optimum kireç değeri bulunmuştur. Bu deneylerin ardından sıkıştırma yani proctor deneyleri yapılarak kireçsiz, optimum su muhtevasında kireçli ve doğal su muhtevasındaki ( $W_{doğal}$ ) kireçli numunenin mukavemet ve boy kısalması değerleri anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük olarak bulunarak karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak doğal su muhtevasındaki numuneye sönmemiş kireç eklenerek yapılan testlerde bizlere daha önce kullandığımız sönmüş kirece göre ne gibi artıları ya da eksileri olduğu incelenmiştir. Serbest basınç deneyleri, deneylerdeki yapıp sırasındaki hataları en aza edebilmek için en az 4 kere numune alınarak deneyler yapılmıştır. Sonrasında CBR deneyi de yapıldıktan sonra son olarak EDS, SEM ve XRD deneyleri yapılarak inceleme işlemi tamamlanmıştır.

### 3.1. Doğal su muhtevasının bulunması

Uzunçiftlik'ten getirilen killi zemin gelir gelmez çeşitli yerlerden alına 10 adet numune etüve koyulmuştur. Kurutulan numuneler 24 saat sonra etüvden çıkartılarak mevcut su muhtevalarını tek tek bulunup ortalaması alınmıştır. Bu duruma göre zeminin mevcut su muhtevası yaklaşık olarak %27,5 çıkmış ve doğal su muhtevasında yapılan değerlerde hep bu değer baz alınmıştır. Tablo 3.1 ile etüve koyulan numunelerin değerleri gözükmemektedir.

Tablo 3.1: Uzunçiftlik zemininin doğal su muhtevası,  $w_{\text{doğal}}$  (%)

<i>Numune No</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Su Muhtevası, <math>w_{\text{doğal}}</math> (%)</i>	27,18	28,19	27,49	27,86	28,02
<i>Numune No</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>Su Muhtevası, <math>w_{\text{doğal}}</math> (%)</i>	27,21	27,21	27,52	27,50	27,23

### 3.2. Yıkamalı elek analizi

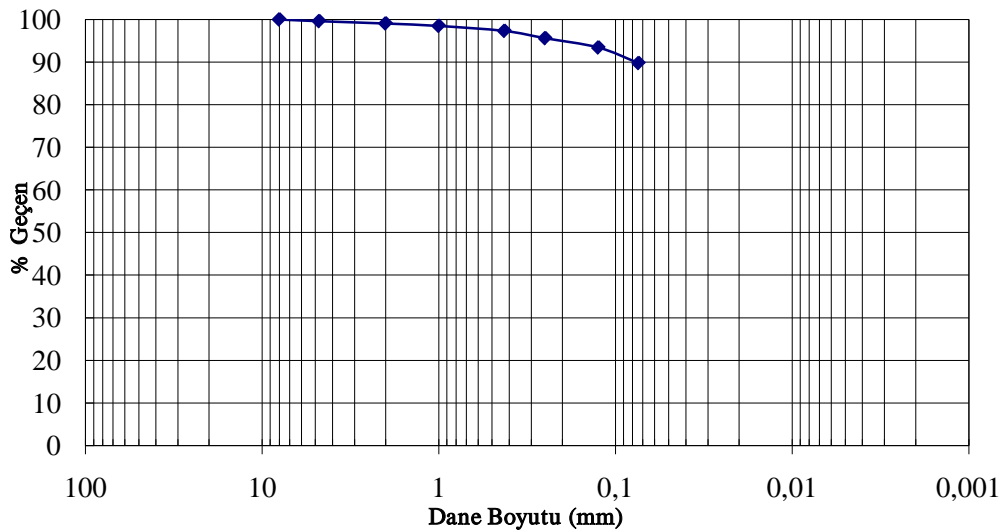
Kullanılan eleklerin göz açıklıkları deneyi yapılan zeminin dane boyutlarını kapsamaktadır. Etüvde kurutulmuş numunelerin ağırlığının %0,1 'ine eşit duyarlılıkta tartılmıştır. Numune 20 mm 'lik eleğe aktarılıp ve elekten geçmeyen iri daneler, üzerindeki ince malzemedan arınana kadar tel fırça ile temizlenmiştir. Temizlenen bu iri daneler yumuşak iseler kendilerinden herhangi bir parça kopmamasına özen gösterilmiştir. Etüvde kurutulmuş malzemenin 20 mm 'lik elekten geçen kısmı uygun ağırlıkta bir numune elde edilene kadar yanlama metodu ile azaltılmıştır. Alınan numunenin ağırlığı 500 g 'dır. Numune toplam ağırlığının %0,1 'ine eşit duyarlılıkta tartılmıştır. Elde edilen numune bir tepsi içine doldurulup ve su ile örtülmüştür. Numunenin tümüyle ıslanması için kabın içindeki numune iyice karıştırılmıştır. Zemin bu şekilde yaklaşık 1 saat bekletilerek sık sık karıştırılmıştır. Numunenin karıştırılma süresi bittikten sonra, üzerine 2,5 mm 'lik elek alarak 80  $\mu\text{m}$  'luk elekten elenir ve eleğin üzerine atılır. Numuneye yeniden su katılarak karıştırılır. Su 80  $\mu\text{m}$  'luk elekten geçirilerek atılır. Yıkama işlemi 80  $\mu\text{m}$  'luk elekten geçen su berrak olana kadar devam edilir. Eleklerde kalan malzemenin

tamamı tepsilere boşaltılır ve etüve konarak kurumaya bırakılır. Etüvde kurutulan malzeme uygun bir elek serisinden kuru olarak geçirilir. Her elekte kalan miktarlar tartılır ve kaydedilir. 80 µm 'luk elekten geçen malzemenin miktarı, deneyde kullanılan eleklerde kalan malzeme ağırlıkları toplamının, kaydedilen toplam ağırlıktan çıkarılması ile elde edilir.

Tablo 3.2: Elek analizi sonuç tablosu

ELEK NO	ELEK AÇIKLIĞI	KALAN AĞIRLIK	KALAN (%)	GEÇEN (%)
5/16"	8.000	0.00	0.00	100.00
No 4	4.760	1.98	0.40	99.60
No 10	2.000	2.72	0.54	99.06
No 18	1.000	2.88	0.58	98.48
No 40	0.425	5.84	1.17	97.32
No 60	0.250	8.55	1.71	95.61
No 120	0.125	10.95	2.19	93.42
No 200	0.074	18.28	3.66	89.76
PAN		448.80	89.76	0.00
		500.00	100,00	

Tablo 3.2 ile gösterilen elek analizi sonuç tablosuna baktığımızda kil + silt oranı yani ince daneli malzeme oranının %89,76 olduğunu görüyoruz. Ayrıca yine tablodaki %geçen değerleri ile toplam dağılım eğrileri Şekil 3.1 ile gösterilmektedir. Bu şekilde de zeminin ince daneli bir zemin olduğunu kolayca anlayabilmekteyiz.



Şekil 3.1: Elek analizi eğrisi

### 3.3. Atterberg limitleri ile optimum kireç değerinin bulunması

Etüvde kurduğumuz malzemenin ilk önce kireç katılmadan önceki LL ve PL bulunmuştur. LL değeri için öncelikle kuru haldeki malzemeye su ekleyerek krema haline getirilmiştir. Elde ettiğimiz krema kıvamındaki malzeme Casangrande aletine yaklaşık 3'te 1'ini dolduracak şekilde silme çekilerek yerleştirilmiştir. Kesme bıçağı ile yerleştirilen zeminin ortasın bir yarık açılmıştır. Sonrasında Casangrande aleti kullanarak saniyede 2 vuruş yapılarak ayırdığımız iki tarafın yaklaşık 13 mm 'lik kısmının kapanmasıyla o kısımdan alınan bir örnek ile deney tamamlanmıştır. Düzgün bir doğru elde etmek ve 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevasını bulmak için vuruş sayılarını 10-20, 20-30 ve 30-40 arasında en az 3 değer bulunmuştur. Yapılan işlemler Şekil 3.2 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Likit limit deneyi

Aynı deney her defasında numuneye kuru ağırlığının %1 'i oranında kireç katılarak %10 kireç eklenene kadar tekrarlanmıştır.

Plastik limit deneyinde ise likit limit deneyinde kullanılan numuneler kullanılarak cam bir yüzey üzerinde silindirik örnekler hazırlanmıştır. Şekil 3.3 ile örnek bir plastik limit numune hazırlanışı gösterilmektedir. Deney 3 mm çapında ve çatlama başladığı örnekler hazırlanana kadar sürdürülmüştür. Bu istenilen değerdeki örnekler etüvde kurtulmaya bırakılmıştır. Eğer numune 3 mm inceliğe gelmeden çatlasaydı su eklenecekti, eğer 3 mm incelikteyken hala çatlama olmasaydı biraz daha kuru malzeme eklenecekti.



Şekil 3.3: Plastik limit numune hazırlanmasına bir örnek

Elde edilen deney sonuçlarına göre kireçsiz malzemenin likit limiti ( $w_L$ ) %53, plastik limit ( $w_P$ ) %21 ve plastisite indisi ise ikisinin farkı %32 çıkmıştır.

Kireç ile karıştırılan deneylerde ise plastisite indisi en düşük %5 kireç katılan deneyde olduğundan zeminimiz optimum kireç değeri %5 olarak bulunmuştur. Sonuçlar Tablo 3.3 ile görülmektedir.

Tablo 3.3: Likit limit – Plastik limit – Plastisite indisi sonuçları

Kireç Oranı (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
0	53	21	32
1	55	24	31
2	53	24	29
3	51	26	25
4	50	26	24
5	46	24	22
6	48	25	23
7	51	27	24
8	51	26	25
9	52	25	27
10	54	24	30

Yapılan Atterberg kıvam limitleri deneylerine göre daha önce Şekil 2.9'daki grafik kullanılarak yapılan sınıflandırma ile zeminimizin yüksek plastisiteli bir kil (CH) olduğu bulunmuştur.

### 3.4. pH optimum kireç değerinin bulunması

Likit limit ve plastik limit deneyleri ile bulunan optimum kireç miktarı pH deneyi ile de bulunabilmektedir. Bu deneyde ilki kireçsiz, sonraki her biri ise kuru ağırlığının %1 'i kadar kireç ilave edilerek 11 adet plastik kaba etüvde kuruttuğumuz zeminden koyulmuştur. 1 saat boyunca her kap sürekli olarak karıştırılmıştır. 1 saatin sonunda ise pH aleti ile değerler okunmuş ve Tablo 3.4 ile gösterilen sonuçlar ortaya çıkmıştır. Şekil 3.4 ile hazırlanan numuneler görülebilmektedir.

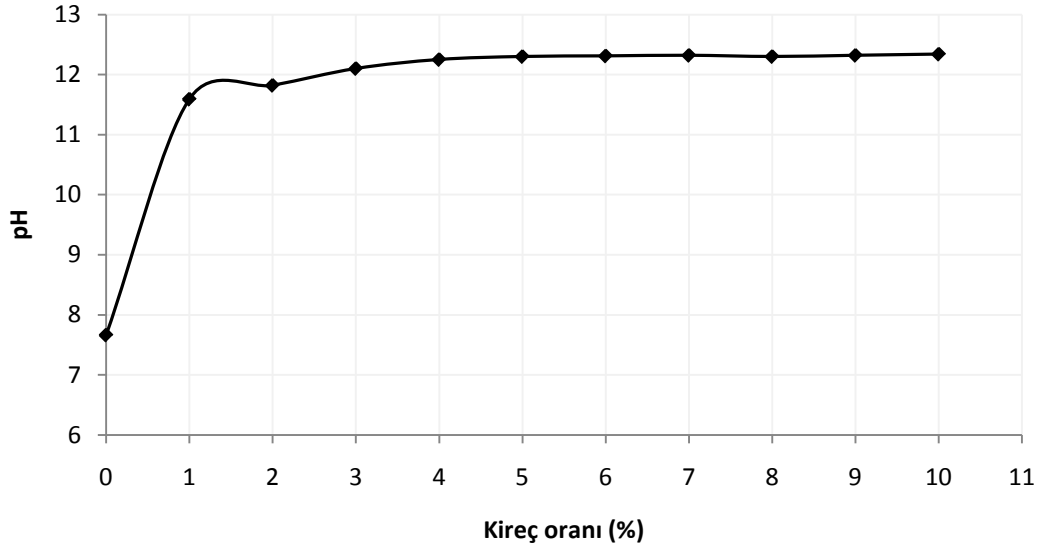
Tablo 3.4: pH deneyi sonuçları

Kireç (%)	pH	C
0	7,66	20,7
1	11,59	20,6
2	11,82	20,9
3	12,10	20,6
4	12,25	21,8
5	12,30	21,5
6	12,31	21,6
7	12,32	21,4
8	12,30	21,3
9	12,32	21,4
10	12,34	21,3



Şekil 3.4: pH deneyi için hazırlanan numuneler

Deney sonuçlarına bakıldığı zaman pH değeri 12.30 değerine %5 kireç miktarındayken ulaştığı görülmektedir. Bu deney sonucunda da likit limit – plastik limit deneyindeki ile aynı sonuç ortaya çıkmıştır. Deneyler birbirinin sağlamasını yapmaktadır. Ayrıca pH değeri grafiği Şekil 3.5 ile görülebilmektedir.



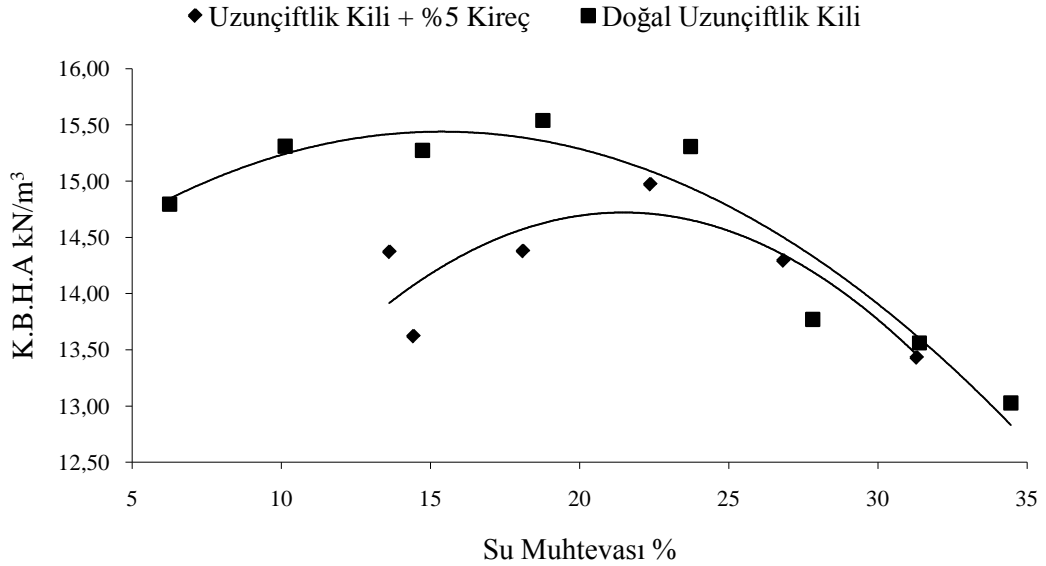
Şekil 3.5: pH deneyi sonuç eğrisi

### 3.5. Harvard Proctor (Sıkıştırma) deneyi ile optimum su muhtevası bulunması

Proctor deneyi ile zeminimizin  $W_{opt}$  değeri bulunmuştur. Deney iki farklı türde yapılabilmektedir. Birincisi standart Proctor ikincisi ise modifiye Proctor deneyidir. Bu çalışmada standart versiyonun daha fazla deney hatası verebilmesinden ve modifiye versiyonun gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesinden dolayı modifiye Harvard Proctor deneyi tercih edilmiştir.

Bu deneyde kullandığımız düzeneğimizdeki kalıbımızın iç hacmi  $62,27 \text{ cm}^3$  'tür. Deney Harvard Proctor düzeneğinin kendi özel çekici ile kalıbın içine zemin sıkıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin yaptığımız modifiye versiyonunda zemin 5 eşit tabaka halinde her tabakaya çekiçle 57'şer vuruş yapılmıştır. Her deney sonucunda kalıp + içindeki zemin tartılmıştır. Deney kalıp + içindeki zemin ağırlığı düşene kadar her seferinde %5 su ilave edilerek tekrar edilmiştir. Çıkan verilerden elde edilen grafikteki eğrinin tepe noktasının y eksenindeki değeri bize maksimum

kuru birim hacim ağırlığını verirken x eksenindeki değeri bize optimum su muhtevasını vermektedir. Bu deney ayrıca pH deneyi ve likit limit – plastik limit deneyleriyle de bulduğumuz %5 optimum kireç miktarı ile de yapılmıştır. İki deneyin sonucu karşılaştırmalı olarak Şekil 3.6 ile verilmiştir.



Şekil 3.6: Minyatür modifiye Proctor deney sonuçları

Kireç kullanılmadan yapılan deney sonrasında M.K.B.H.A'ğı yaklaşık  $15,40 \text{ kN/m}^3$ ,  $W_{opt}$  ise yaklaşık %15,50 çıkmıştır. %5 kireç kullanılarak yapılan deneyde ise M.K.B.H.A'ğı yaklaşık  $14,70 \text{ kN/m}^3$ ,  $W_{opt}$  ise yaklaşık %21,50 çıkmıştır. Daha önceden de öngörüldüğü gibi M.K.B.H.A'ğında azalma  $W_{opt}$  ise artma gerçekleşmiştir. Tablo 3.5 ile sonuçlar açıkça görülebilmektedir. Yapılan bu ilk incelemeler ve sonuçlar doğrultusunda Tablo 3.6 ile Uzunçiftlik kilinin geoteknik özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 3.5: Minyatür Modifiye Proctor deney sonuçları

	Optimum Su Muhtevası, $W_{opt}$ (%)	Maks. K.B.H.A (kN/m <sup>3</sup> )
Saf	15.5	15.40
% 5 Kireçli	21.5	14.70



Tablo 3.6: Uzunçiftlik kilinin geoteknik özellikleri

Zemin Sınıflandırma	
USCS	CH
AASHTO	A-7-6
Atterberg Limit Değerleri	
LL (%)	53
PL (%)	21
PI (%)	32
Elek Analizi	
Kum (%) (4,76mm-0,074mm)	10,24
Kil ve Silt (%) (<0,074mm)	89,76
pH	7,66
Özgül Ağırlık (Mg/m <sup>3</sup> )	2,56
Modifiye Proctor	
K.B.H.A. (kN/m <sup>3</sup> )	15,4
W <sub>opt</sub> (%)	15,5
Doğal Su Muhtevası (%)	27,5

### 3.6. Serbest basınç deneyi numunelerinin hazırlanması

Deneylelerimiz kireçsiz doğal malzemeli, W<sub>opt</sub> 'nda optimum kireçli malzemeli, W<sub>doğal</sub> 'nda optimum kireçli malzemeli ve W<sub>doğal</sub> 'nda optimum sönmemiş kireçli malzemeli olmak üzere 4 çeşit yapılmıştır. Her bir deney için en az 4 adet numune hazırlanmıştır. Kireçsiz doğal malzemede zamana bağlı reaksiyonlar öngörülmediği için sadece 1 kez yapılmış olup kireç kullanılarak yapılan malzemeler kirecin zamanla reaksiyona devam etmesinden ötürü anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük olmak üzere kendi içlerinde 4 çeşit deney yapılmıştır. Deneyler modifiye Proctor deneyi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numune adedi ve kullanılan değerler Tablo 3.7 ile gösterilmektedir. Toplamda 68 adet numune incelenmiştir.

Tablo 3.7: Serbest basınç deneyi için hazırlanan numune bilgileri

Kullanılan Malzeme	W (%)	Anlık	Deney Sayısı		
			1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Doğal	27.5	6	-	-	-
% 5 Kireçli	21.5	6	6	4	6
% 5 Kireçli	27,5	4	6	6	6
% 5 Sönmemiş Kireçli	27,5	4	4	5	5

Numuneler Harvard Proctor düzeneğinde modifiye versiyondaki şekilde sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numunelerin düzenekteki numune çıkarıcıdan çıkarılıp deneye tabii tutulmuştur. Anlık olarak deneye tutulmayan numuneler etraftaki nemden ve sıcaklıklardan etkilenmemeleri için alüminyum folyo ile sarılıp nem kabı adını verdiğimiz altında bir miktar su bulunan ama numuneye su teması olmayan kapalı bir kaptaki bekletilmiştir. Kullanılan kalıp, çekiç ve numune çıkarıcı Şekil 3.7 ile görülmektedir.



Şekil 3.7: Minyatür Proctor düzeneği

### 3.7. Serbest basınç deneyi

Öncelikle Harvard Proctor düzeneği ile hazırlanan numuneler serbest basınç düzeneğine yerleştirilip kapağı kapatılmıştır. Düzeneğin okuma ucu numunenin hemen üzerine koyduğumuz kapağa yerleştirilerek boşluğu sıfırlanmıştır. Son olarak deformasyon saati de sıfırlandıktan sonra düzenek çalışır hale getirilmiştir. Düzenekte üst taraf sabit olup alt taraftaki piston belirli bir hız ile hareket etmektedir. Pistonun yukarı ne kadar çıktığı deformasyon saatinden okunmakta, numunenin ucundaki düzenek ise uygulanan yükü bizlere kg cinsinden vermektedir. Deney okuma uzunluğuna bağlı olarak her 0,1 ya da her 0,2 mm'de bir okunarak numune kırılana kadar devam edilmiştir. Doğal malzemede deformasyon miktarı kireçli malzemeye göre büyük olduğundan okumalar her 0,5 mm'de bir gerçekleştirilmiştir.

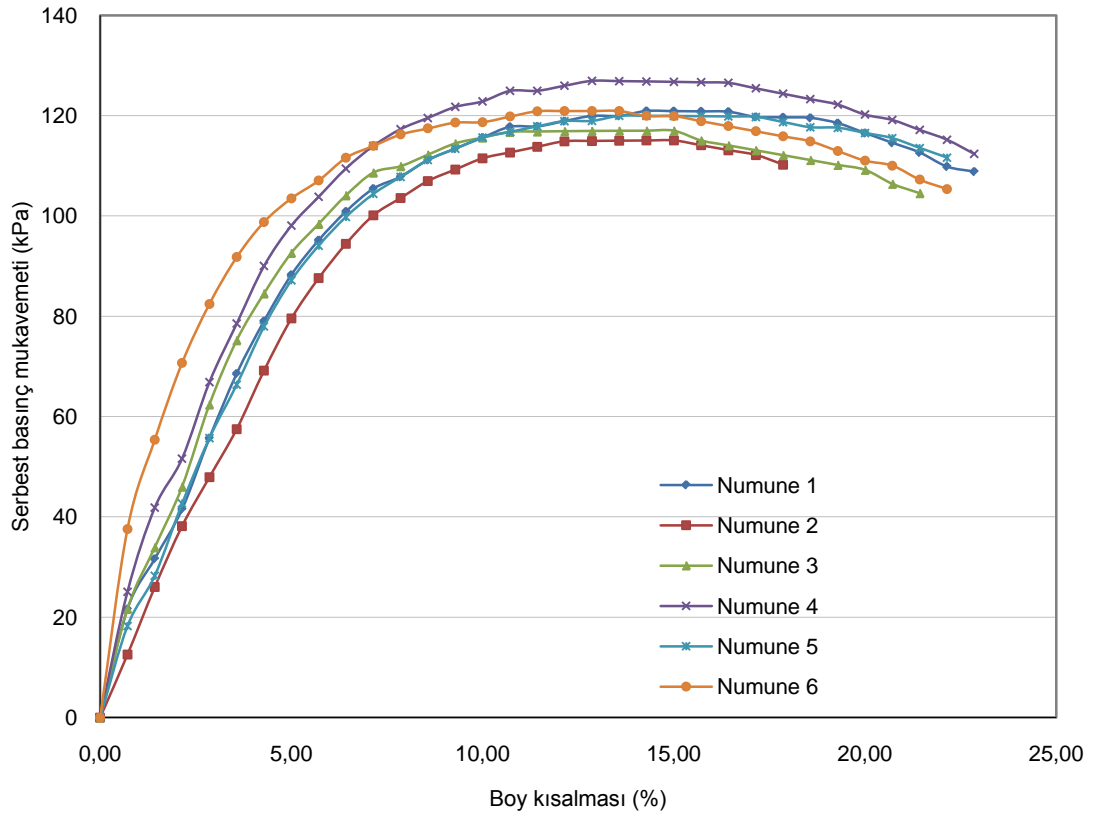
Şekil 3.8 ile serbest basınç deneyi düzeneği ve içinde hazır bulunmakta olan numune gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Serbest basınç düzeneği

### 3.7.1. Doğal su muhtevsındaki malzemenin serbest basınç grafiği

Toplamda 6 adet doğal zemin numunesi incelenmiştir. Bu numunelere ait serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ) – birim boy kısalması grafiği Şekil 3.9 ile verilmiştir. Ayrıca her numunenin tek tek  $q_u$  değeri ve ortalama değeri Tablo 3.8 ile verilmiştir.



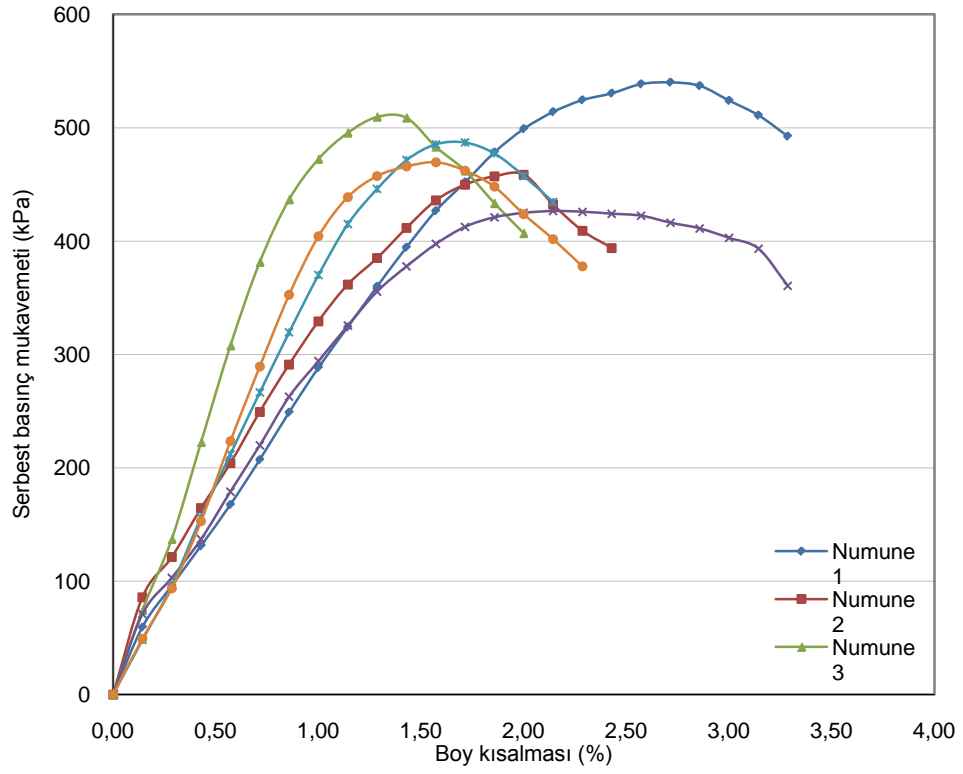
Şekil 3.9: Doğal su muhtevsındaki zemin numunesinin serbest basınç-birim boy kısalması grafiği

Tablo 3.8: Doğal zemin numunesinin  $q_u$  ve birim boy kısalması değerleri

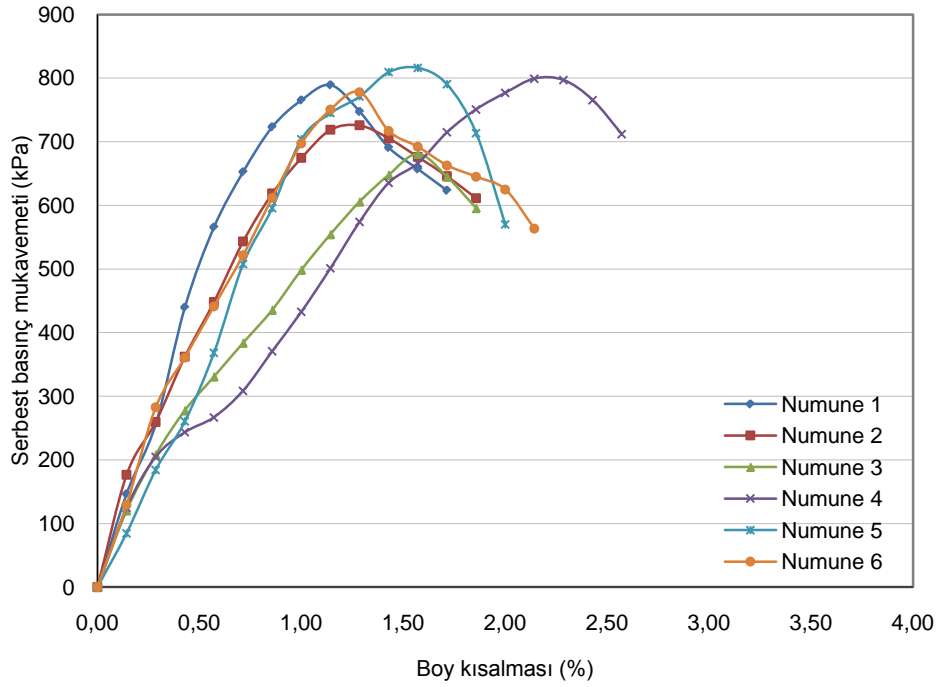
Numune No	1	2	3	4	5	6	Ortalama
$q_u$ (kPa)	120,92	115,04	116,99	126,94	119,95	120,94	120,13

### 3.7.2. $W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin serbest basınç grafiği

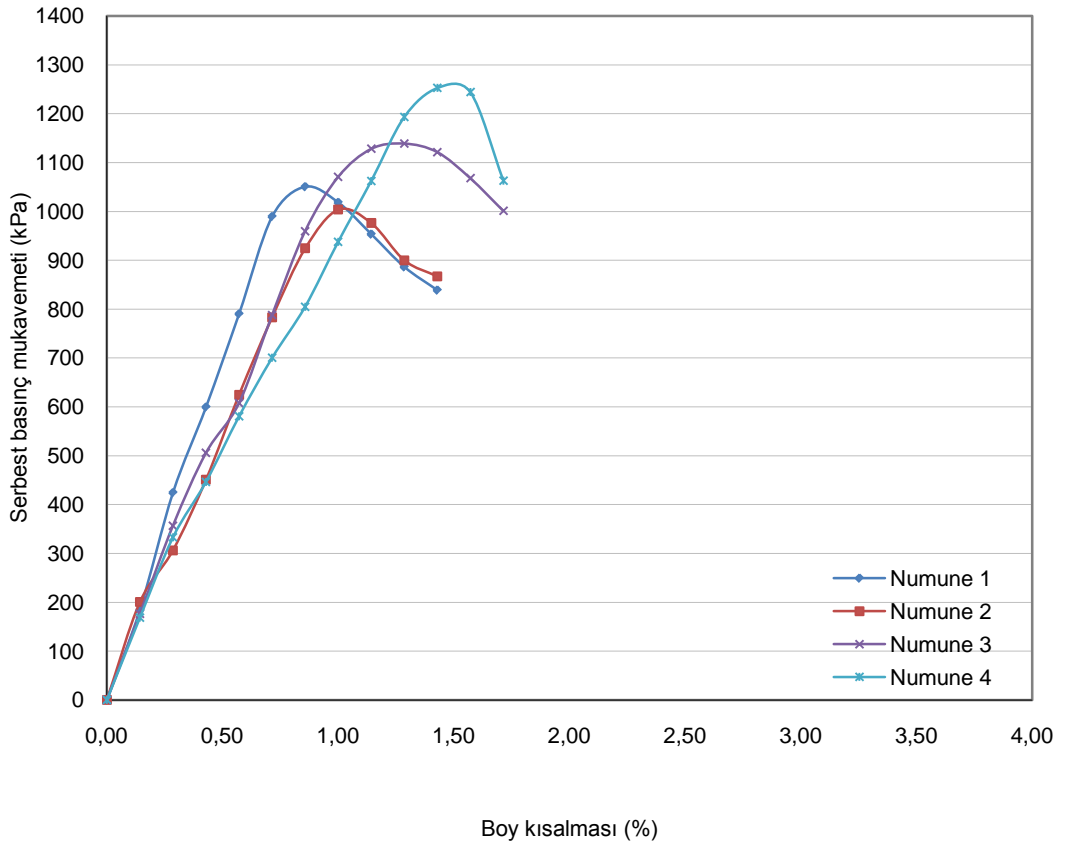
Bu deneyde etüvde kurutulan malzemeye kendisinin %21,5 ağırlığında su ve %5 ağırlığında kireç eklenerek yapılmıştır. Şekil 3.10'de anlık, Şekil 3.11'de 1 günlük, Şekil 3.12'de 7 günlük ve Şekilde 3.13'de 28 günlük deney sonuçlarına ait grafik bulunmaktadır. Ayrıca her kür süresindeki deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerleri Şekil 3.14'te verilmiştir.



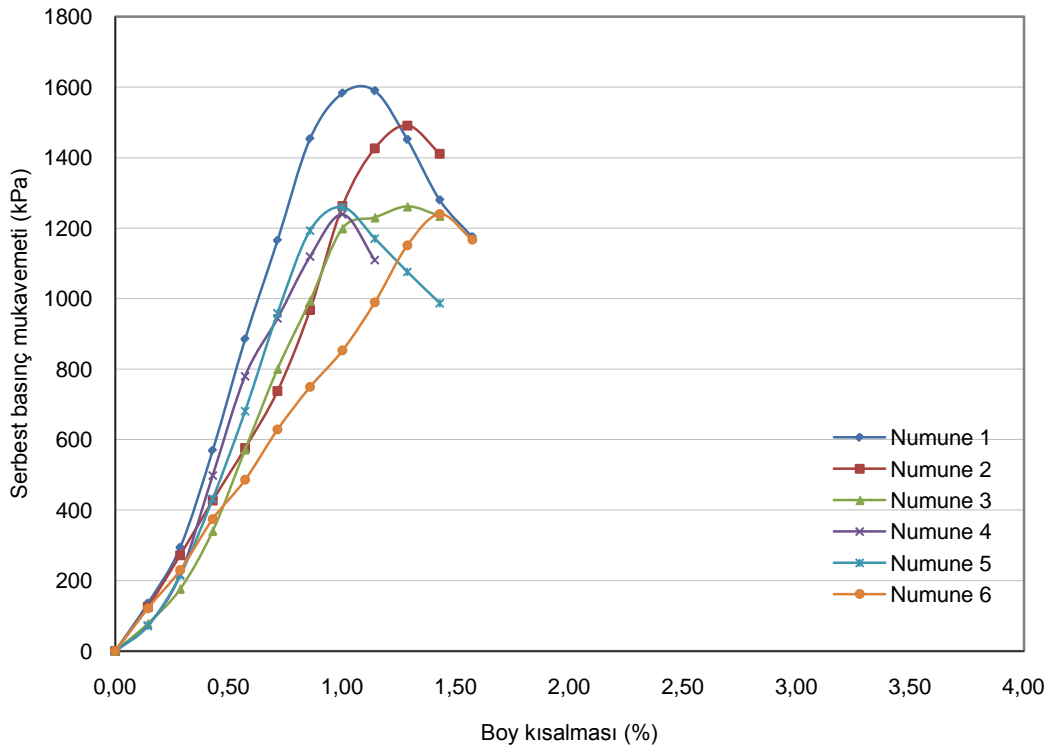
Şekil 3.10:  $W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin anlık deney grafiği



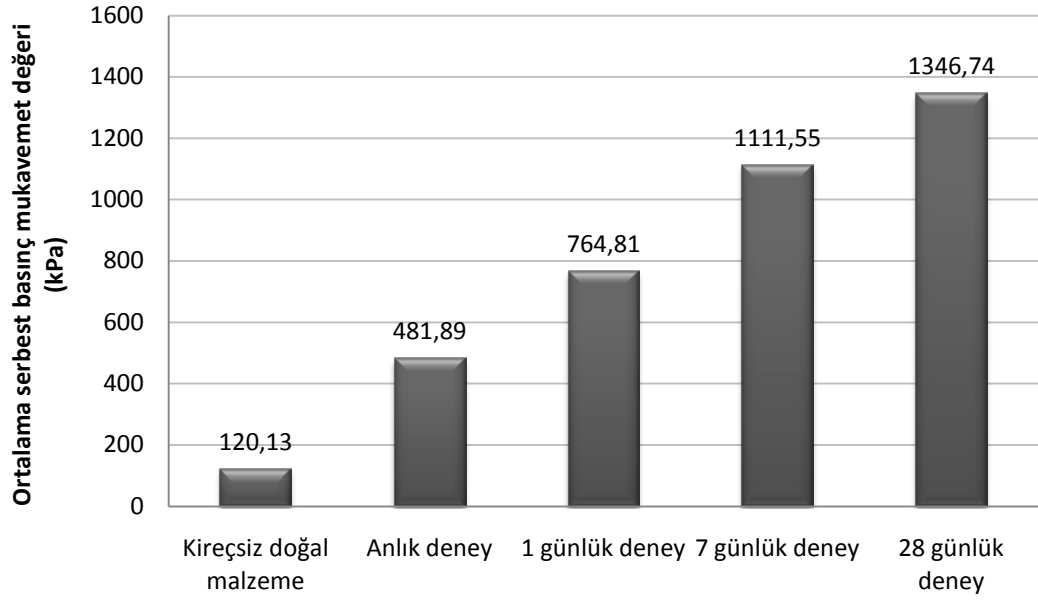
Şekil 3.11:  $W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin günlük deney grafiği



Şekil 3.12:  $W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 7 günlük deney grafiği



Şekil 3.13:  $W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 28 günlük deney grafiği

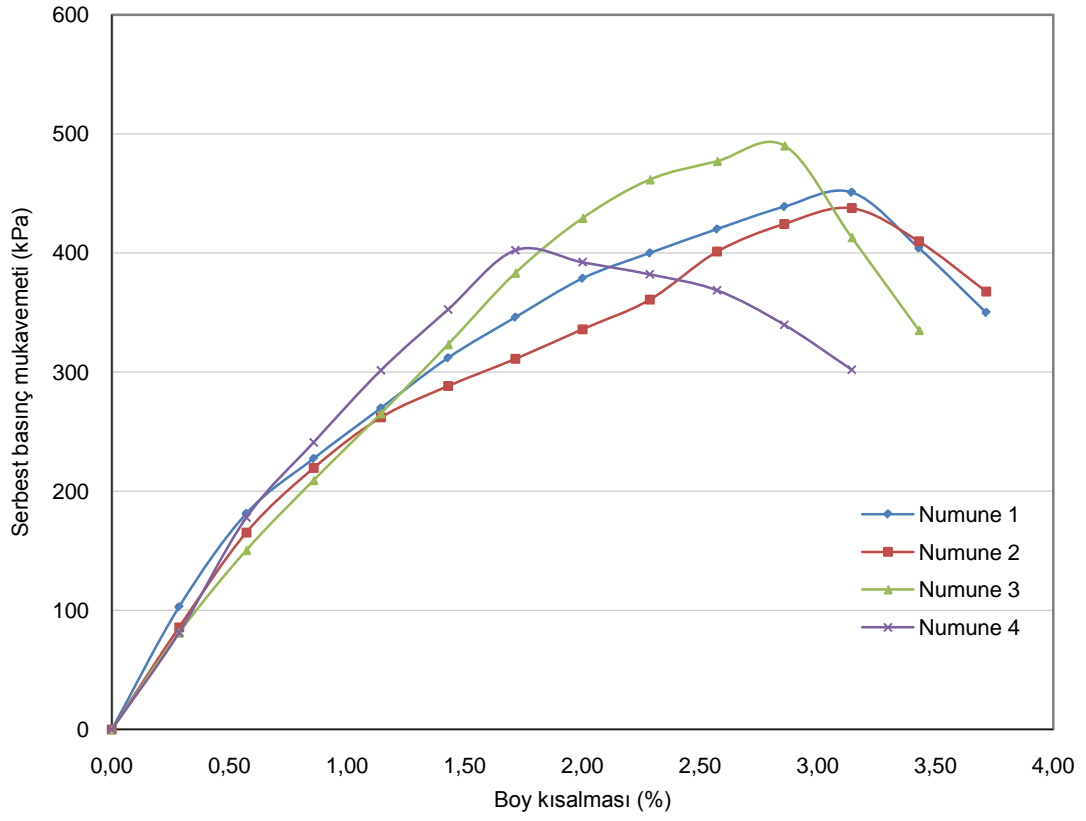


Şekil 3.14:  $W_{opt}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri

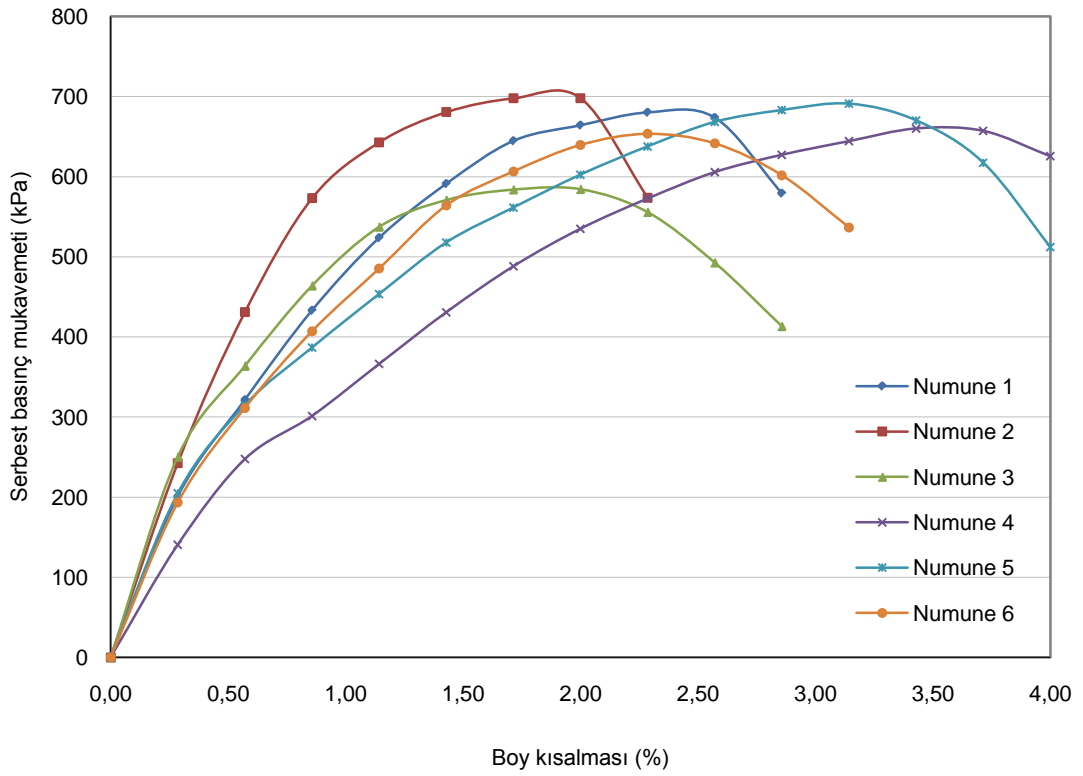
Çıkan sonuçlara göre optimum su muhtevasındaki kireçli zemin numunemiz, kireçsiz olana göre 28 günün sonunda yaklaşık % 1021 daha iyi bir sonuç vererek dayanımı arttırmıştır. Aynı şekilde yine 28 günün sonunda yüzde boy kısalması değeri %15'lerden %1.20'lere gerileyerek çok daha az deforme olmuştur.

### 3.7.3. $W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin serbest basınç grafiği

Bu seferki deneyde ise bir öncekinden farklı olarak su miktarı %21,5 değil %27,5 alınmıştır. Kalan yapılan işlemler ise aynıdır. Şekil 3.15'de anlık, Şekil 3.16'de 1 günlük, Şekil 3.17'de 7 günlük ve Şekilde 3.18'de 28 günlük deney sonuçlarına ait grafik bulunmaktadır. Ayrıca her kür süresindeki deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerleri Şekil 3.19'te verilmiştir.

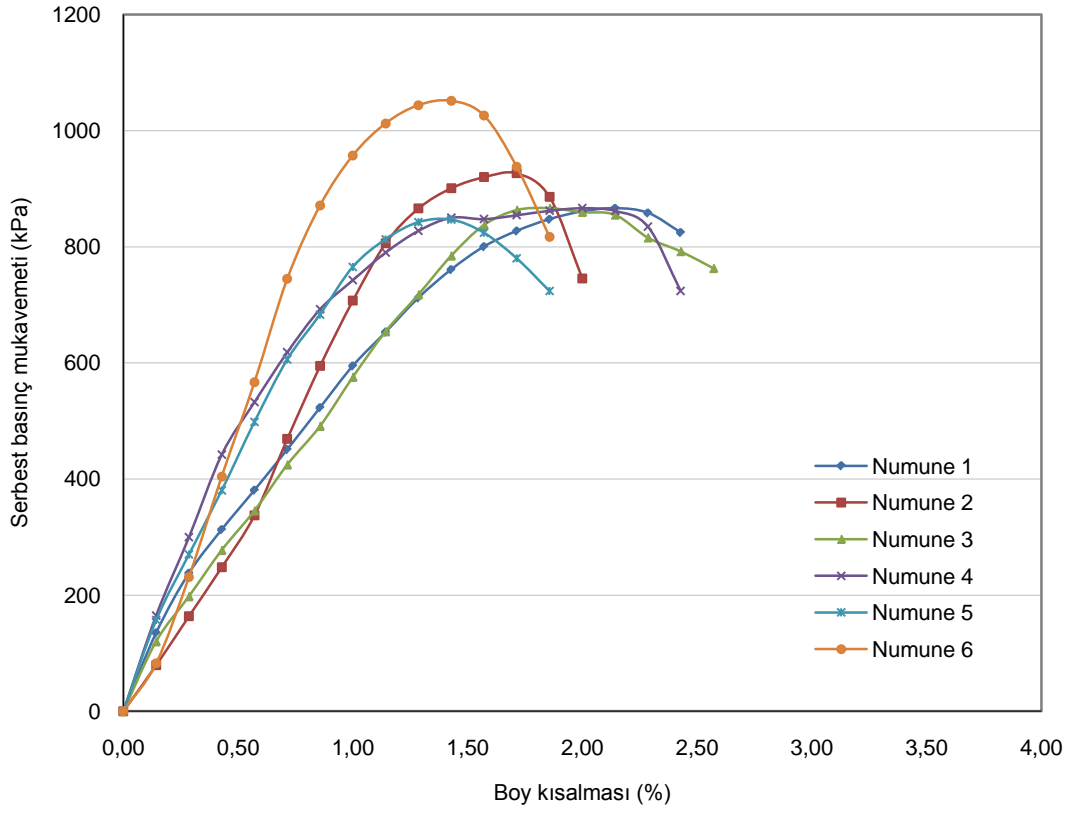


Şekil 3.15:  $W_{\text{doğal}}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin anlık deney grafiği

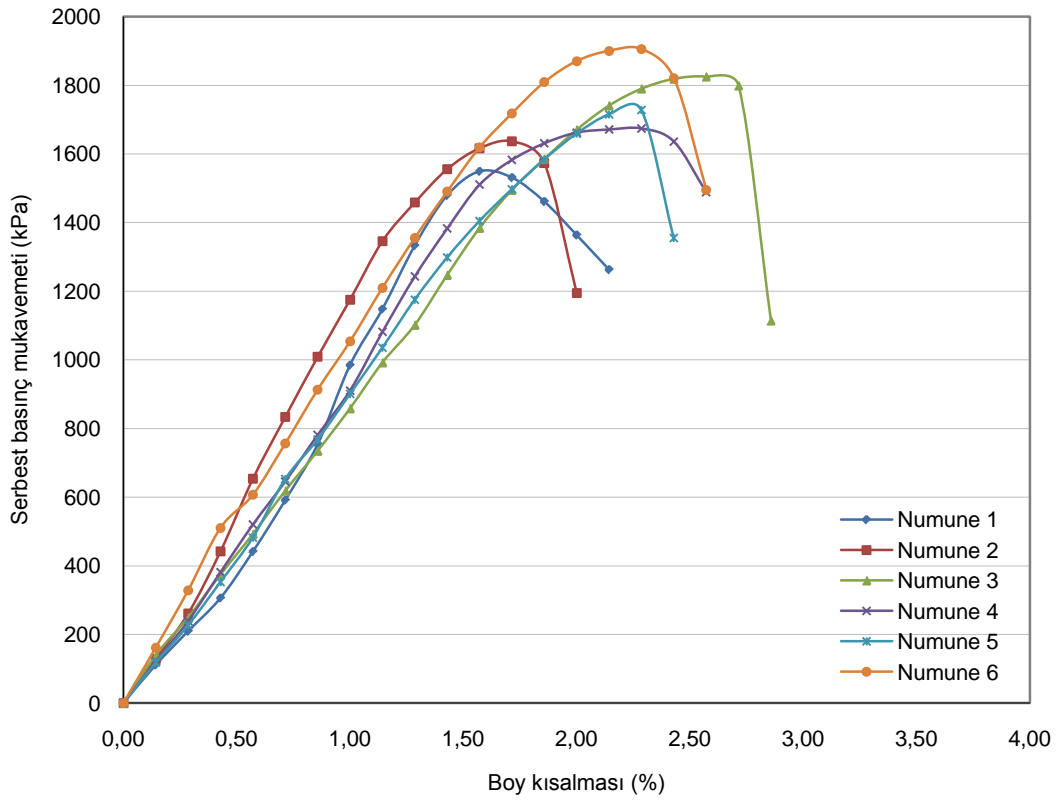


Şekil 3.16:  $W_{\text{doğal}}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 1 günlük deney grafiği

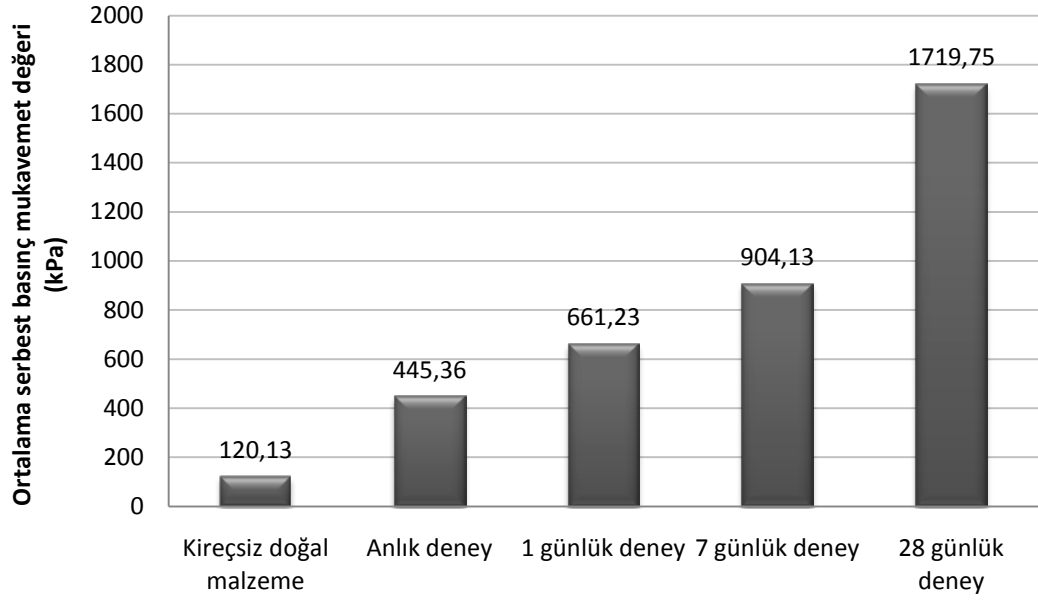




Şekil 3.17:  $W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 7 günlük deney grafiği



Şekil 3.18:  $W_{doğal}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin 28 günlük deney grafiği

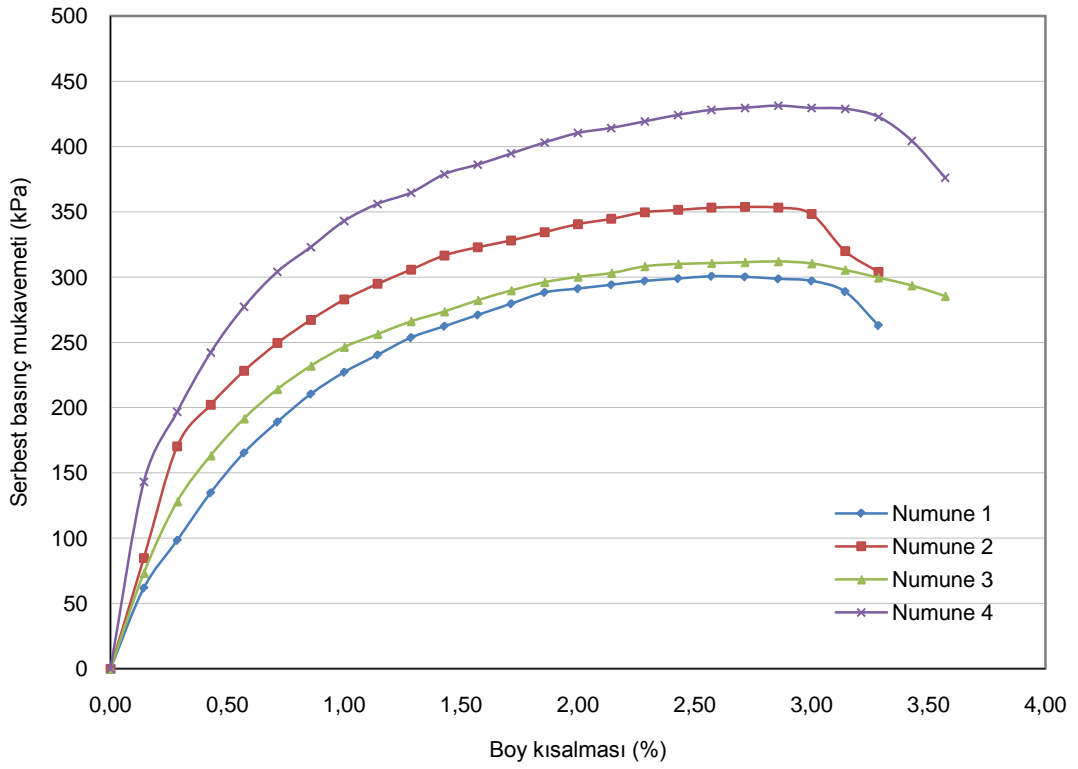


Şekil 3.19:  $W_{\text{doğal}}$ 'daki %5 sönmüş kireçli malzemenin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri

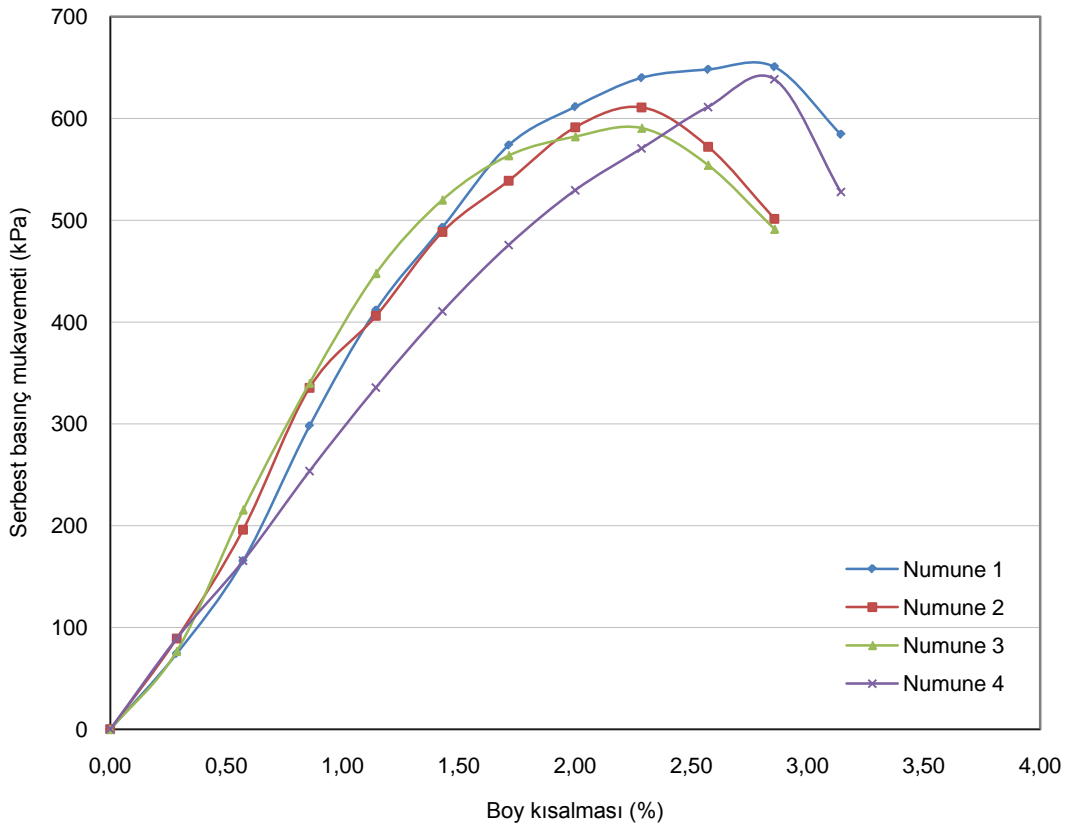
Çıkan sonuçlara göre doğal su muhtevsındaki kireçli zemin numunemiz, kireçsiz olana göre 28 günün sonunda yaklaşık % 1331,5 daha iyi bir sonuç vererek dayanımı arttırmıştır. Aynı şekilde yine 28 günün sonunda yüzde boy kısalması değeri %15'lerden %2'lere gerileyerek çok daha az deforme olmuştur.

#### 3.7.4. $W_{\text{doğal}}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin serbest basınç grafiği

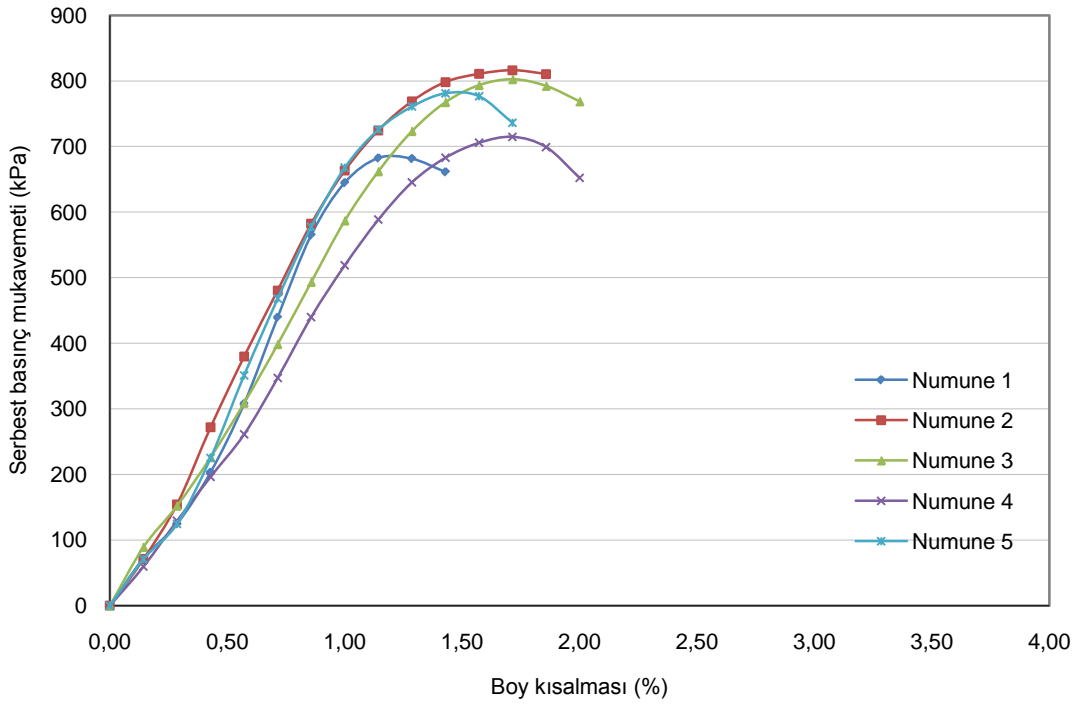
Bu seferki deneyde ise bir su miktarımız %27,5 kireç olarak ise sönmüş kireç yerine sönmemiş kireç alınmıştır. Kalan yapılan işlemler ise yine aynıdır. Şekil 3.20'de anlık, Şekil 3.21'de 1 günlük, Şekil 3.22'de 7 günlük ve Şekilde 3.23'de 28 günlük deney sonuçlarına ait grafik bulunmaktadır. Ayrıca her kür süresindeki deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerleri Şekil 3.24'te verilmiştir.



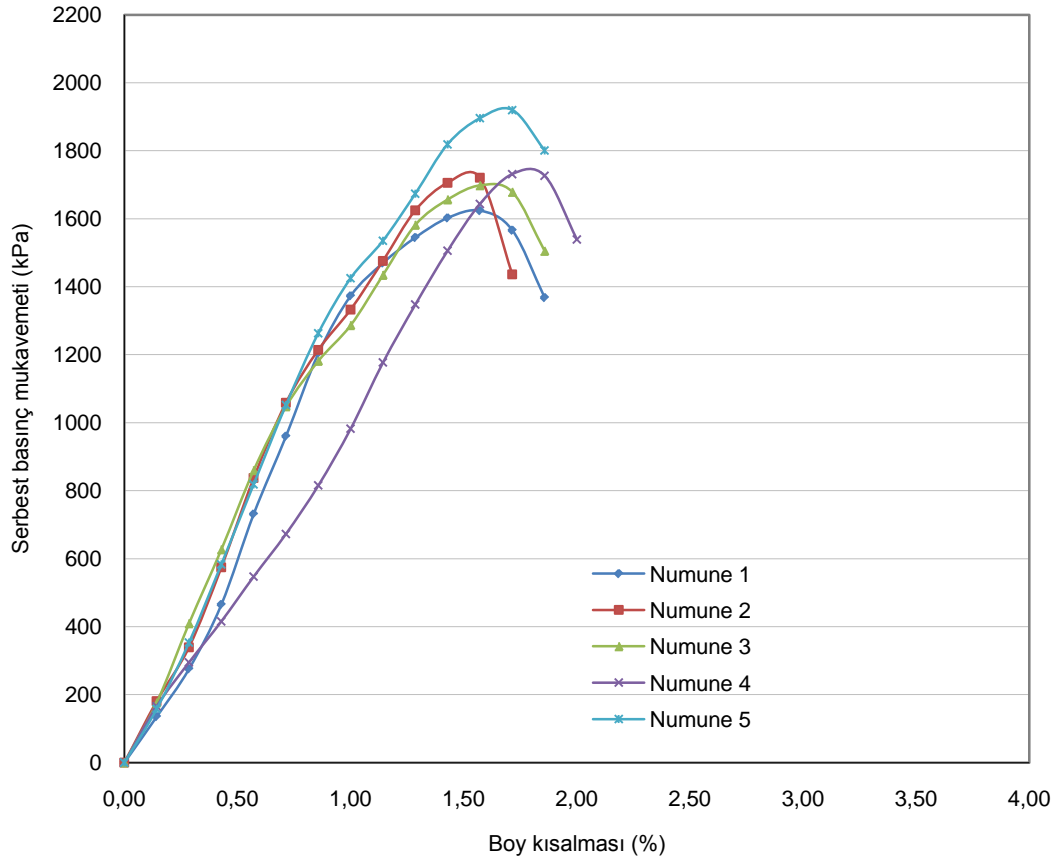
Şekil 3.20:  $W_{dp\tilde{g}al}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin anlık deney grafiği



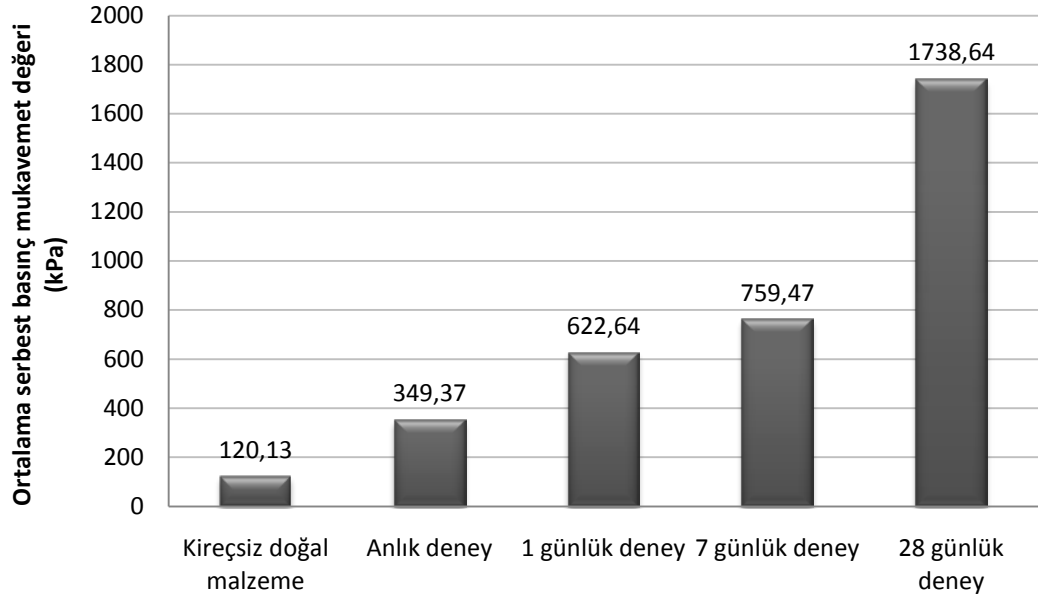
Şekil 3.21:  $W_{dp\tilde{g}al}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin 1 günlük deney grafiği



Şekil 3.22:  $W_{dp\tilde{g}al}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin 7 günlük deney grafiği



Şekil 3.23:  $W_{dp\tilde{g}al}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin 28 günlük deney grafiği

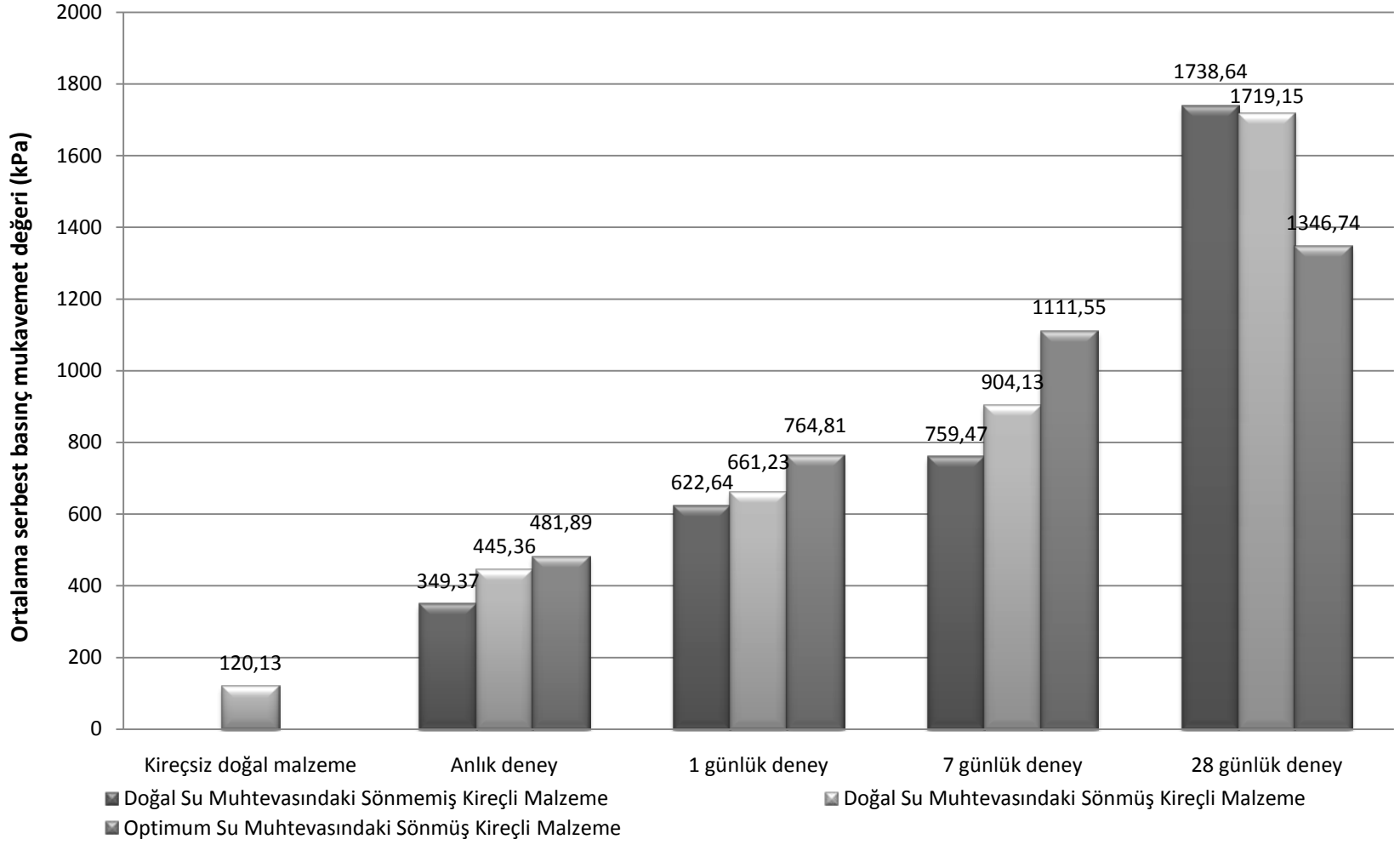


Şekil 3.24:  $W_{dp\text{ğal}}$ 'daki %5 sönmemiş kireçli malzemenin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri

Çıkan sonuçlara göre doğal su muhtevsındaki sönmemiş kireçli zemin numunemiz, kireçsiz olana göre 28 günün sonunda yaklaşık % 1347,3 daha iyi bir sonuç vererek dayanımı arttırmıştır. Aynı şekilde yine 28 günün sonunda yüzde boy kısılması değeri %15'lerden %1.50'lere gerileyerek çok daha az deforme olmuştur.

Şekil 2.25'de bütün sonuçların bir arada görüldüğü bir grafikte kireç stabilizasyonunun serbest basınç mukavemetine yaptığı olumlu sonuçlar görülmektedir.

Şekil 3.25: Bütün deney türlerinin kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetleri



### 3.8. CBR deneyi

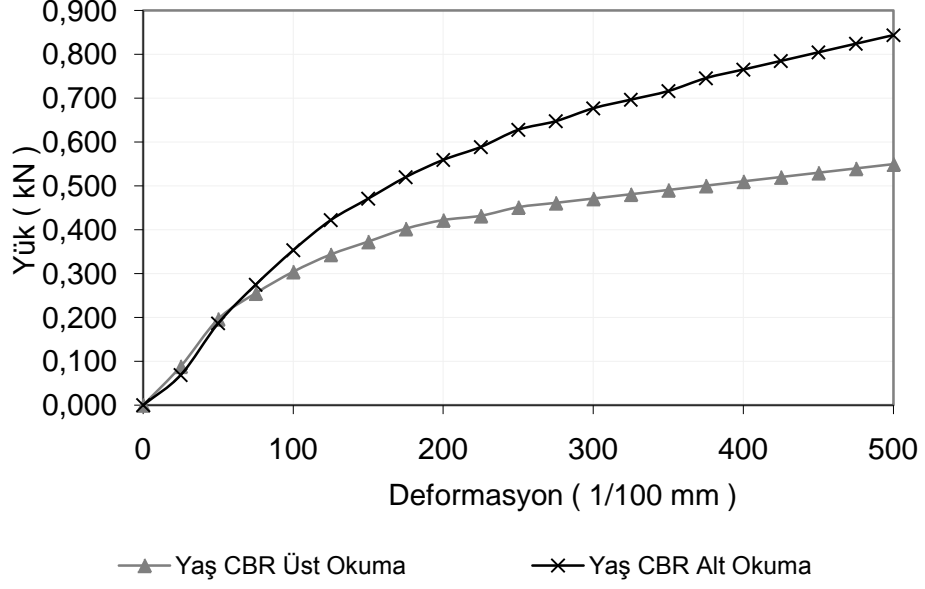
Hesaplamalarımız sırasında zeminin kabarmasının da hesabı içinde olan ve daha geçerli bir yöntem olan yaş CBR tercih edilmiştir. CBR deneyinde mevcut deneylerde kullandığımız minyatür Proctor kalıbı yerine asıl Proctor kalıbı kullanılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında yine modifiye yöntemi seçilmiş olup numune 5 eşit tabaka halinde her tabakaya 56 vuruş denk gelecek şekilde sıkıştırılmıştır. Kalıpta Proctor düzeneği ile sıkıştırılan numune 4 gün boyunca içi su dolu bir kaptan bekletilmiştir. Bekleme sırasında suya ilk yerleştirildiği andan itibaren ucuna deformasyon saati yerleştirilmiş böyle 4 gün boyunca ki kabarma miktarı hesaplanmıştır.

Dördüncü günün sonunda su dolu kaptan çıkartılan kalıp içindeki numune serbest basınç düzeneğine yerleştirilerek önce üst tarafından ardından ise alt tarafından her 0,25 mm'de bir okuma alınmıştır. Deney 2,5 ve 5 mm değerleri okunduktan sonra sonlandırılmıştır. Şekil 3.26 ile yapılan CBR örneği ve test işlemi gözükmektedir.

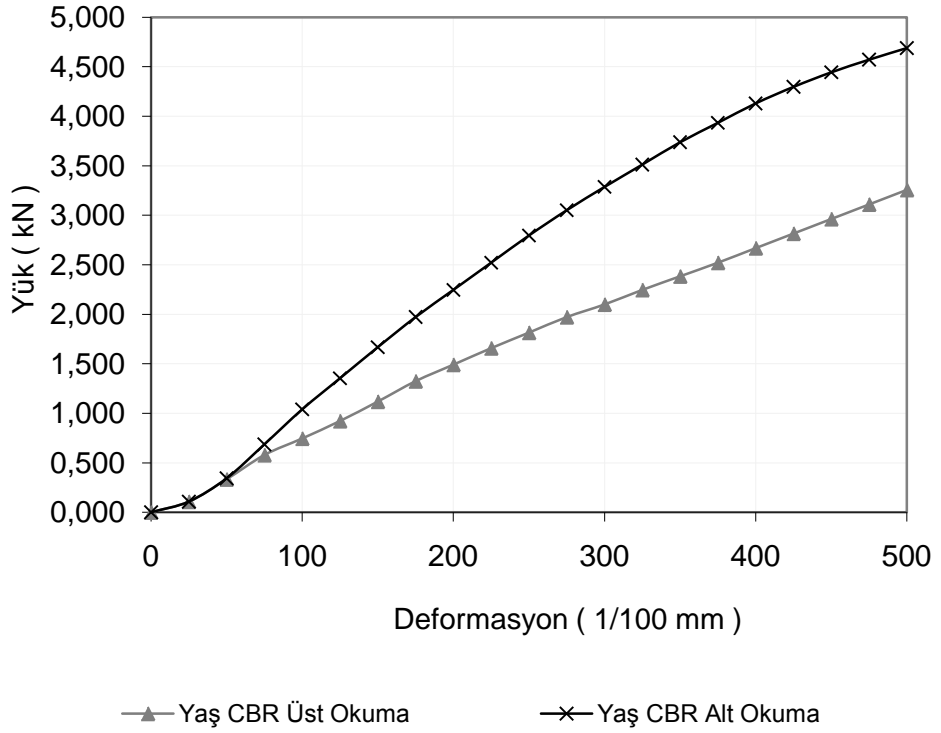


Şekil 3.26: CBR düzeneği ve test işlemi

Deney bir doğal bir de kireçli olmak üzere 2 şekilde yapılmıştır. 2 deney sonucuna ait alt ve üst okuma grafikleri Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de verilmiştir.



Şekil 3.27: Doğal malzemeli CBR deney grafiği



Şekil 3.28: %5 Kireçli CBR deney grafiği



CBR deneyleri sonrasındaki şişme miktarları ve CBR değerleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9: CBR deney sonuçları

	Doğal Malzeme		%5 Sönmüş Kireçli Malzeme	
Şişme miktarı ( mm)	2,75		0,45	
Penetrasyon ( mm )	2,50	5,00	2,50	5,00
Yük ( kN )	0,628	0,844	2,796	4,689
CBR Değerleri ( % )	5	4	21	23

CBR deneyi sonrasında kireçli malzemenin CBR değeri doğal malzemeye göre yakın 5 kat artmıştır. Şişme miktarı ise 2.75 mm’den 0,45 mm’ye düşmüştür.

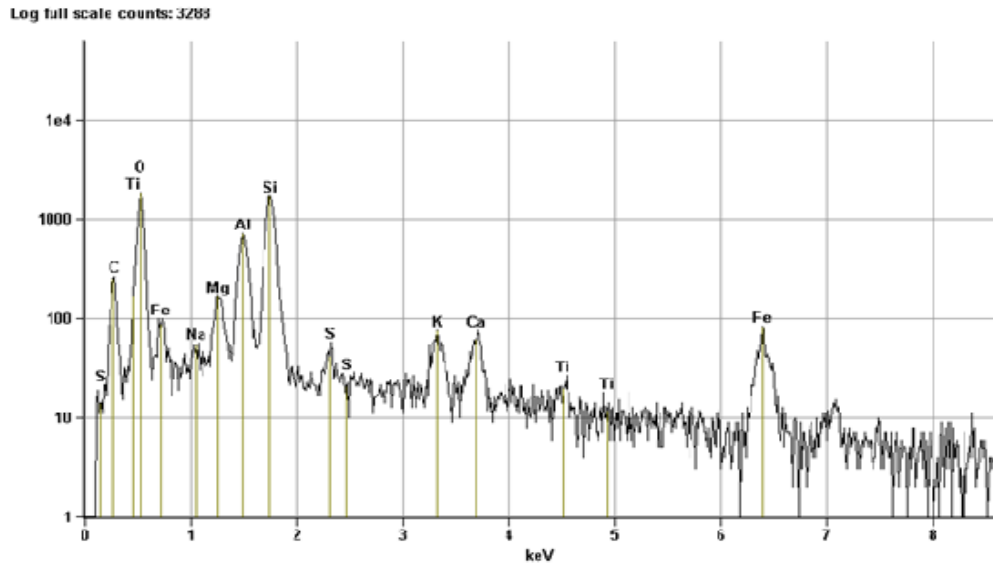
### 3.9. Enerji dağılım spektroskopisi deneyi

Deneyde Şekil 3.29 ile gösterilen Thermo Noran System Six adlı enerji dağılım spektrometresi kullanılmıştır. Kullanılan cihaz 20 kattan 200.000 kata kadar 41 basamaklı yakınlaştırma sunabilmekte ve hızlandırma voltajı 0.5’den 25 kV’ye kadar 39 adımda arttırabilmektedir. Örnek olarak maksimum 150 mm çapındaki örnekleri alabilmektedir. Hazırlanan numuneler yükseklikleri 70 mm çapları da 31 mm olduğunda en ufak bir sorun çıkartmadan cihazda kullanılabilmiştir.

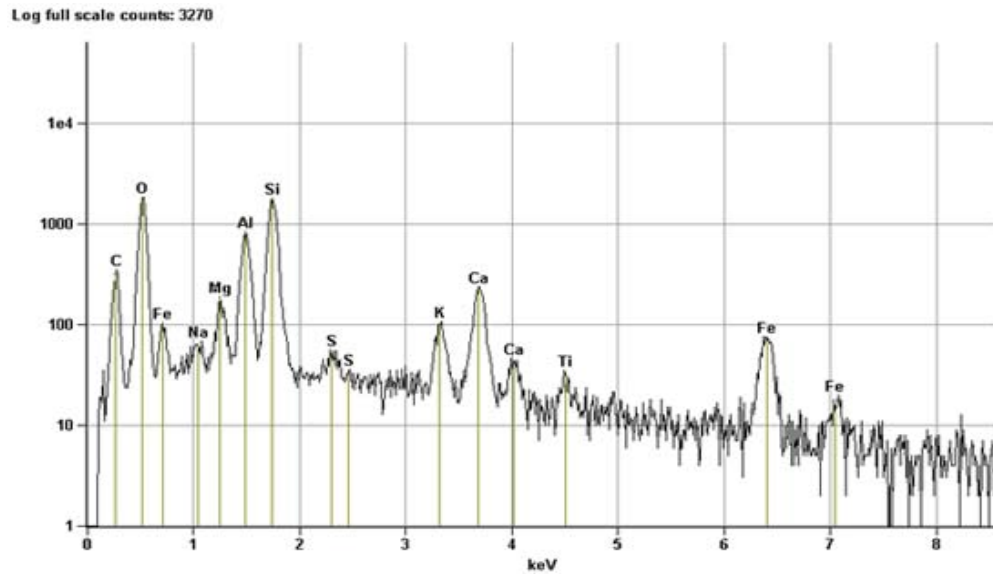


Şekil 3.29: Thermo Noran System Six enerji dağılım spektrometresi

Minyatür Proctor düzeneğinde modifiye yöntem ile kireçli ve kireçsiz olmak üzere 2 farklı numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler enerji dağılım spektroskopisi cihazına yerleştirilmiştir. Bu cihaz bize numunelerin kimyasal içerikleri hakkında bilgiler vermektedir. Şekil 3.30'da doğal malzemenin enerji dağılım spektroskopisi grafiği, Şekil 3.31 ile de optimum kireçli malzemenin enerji dağılım spektroskopisi grafiği görülmektedir. Tablo 3.10 ise normal ve sönmüş kireçli numunelerin kimyasal içeriği hakkında veriler bulunmaktadır.



Şekil 3.30: Doğal malzemenin E.D.S grafiği



Şekil 3.31: Kireçli malzemenin E.D.S grafiği

*Doğal Malzemenin Kimyasal İçeriği**Kireçli Malzemenin Kimyasal İçeriği*

<i>Element</i>	<i>Net Sayım</i>	<i>Ağırlık (%)</i>	<i>Formülü</i>	<i>Bileşik Oranı (%)</i>	<i>Net Sayım</i>	<i>Ağırlık (%)</i>	<i>Formülü</i>	<i>Bileşik Oranı (%)</i>
<i>Oksijen</i>	12905	47.65		---	12810	45.76S		---
<i>Sodyum</i>	114	0.32	Na <sub>2</sub> O	0.43	228	0.55	Na <sub>2</sub> O	0.74
<i>Magnezyum</i>	1168	2.29	MgO	3.80	1183	2.04	MgO	3.38
<i>Alüminyum</i>	6096	10.10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.08	6944	10.05	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.99
<i>Silisyum</i>	16425	27.80	SiO <sub>2</sub>	59.46	16673	24.56	SiO <sub>2</sub>	52.54
<i>Kükürt</i>	282	0.57	SO <sub>3</sub>	1.42	253	0.43	SO <sub>3</sub>	1.09
<i>Potasyum</i>	625	1.60	K <sub>2</sub> O	1.92	925	2.03	K <sub>2</sub> O	2.45
<i>Kalsiyum</i>	684	1.92	CaO	2.69	2728	6.65	CaO	9.30
<i>Titanyum</i>	127	0.52	TiO <sub>2</sub>	0.87	205	0.74	TiO <sub>2</sub>	1.23
<i>Demir</i>	895	7.23	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.34	1018	7.19	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.28
<i>Toplam</i>		100.00		100.00		100.00		100.00

Tablo 3.10: Doğal ve kireçli malzemenin kimyasal içeriği

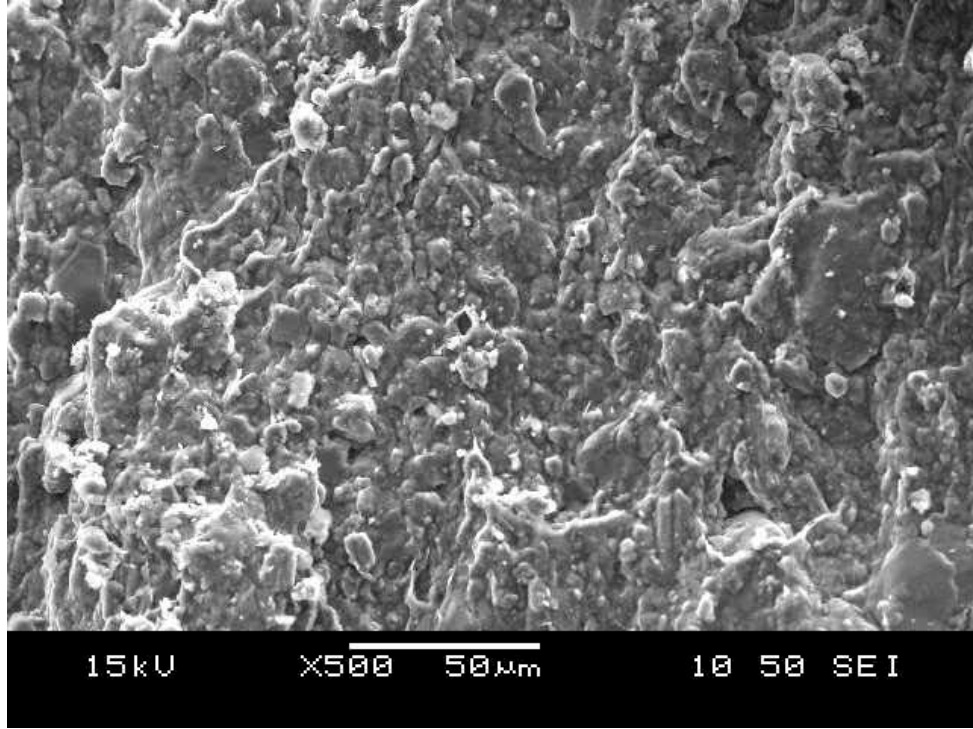
### 3.10. Taramalı elektron mikroskobu deneyi

Bu deneyde Jeol JSM6360LV isimli taramalı elektron mikroskobu (S.E.M) kullanılmıştır. Genellikle enerji dağılım spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu cihazları ortak özelliklere sahip olup aynı işlevleri görebilmektedir. Şekil 3.32’de kullanılan deney düzeneği görülmektedir.

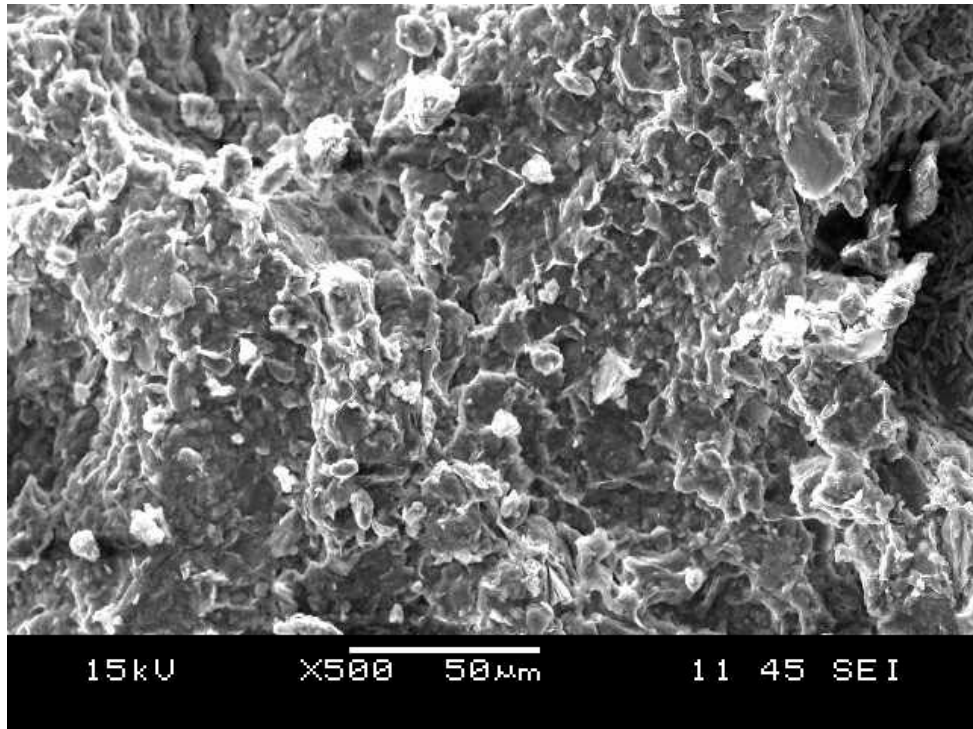


Şekil 3.32: Taramalı elektron mikroskobu

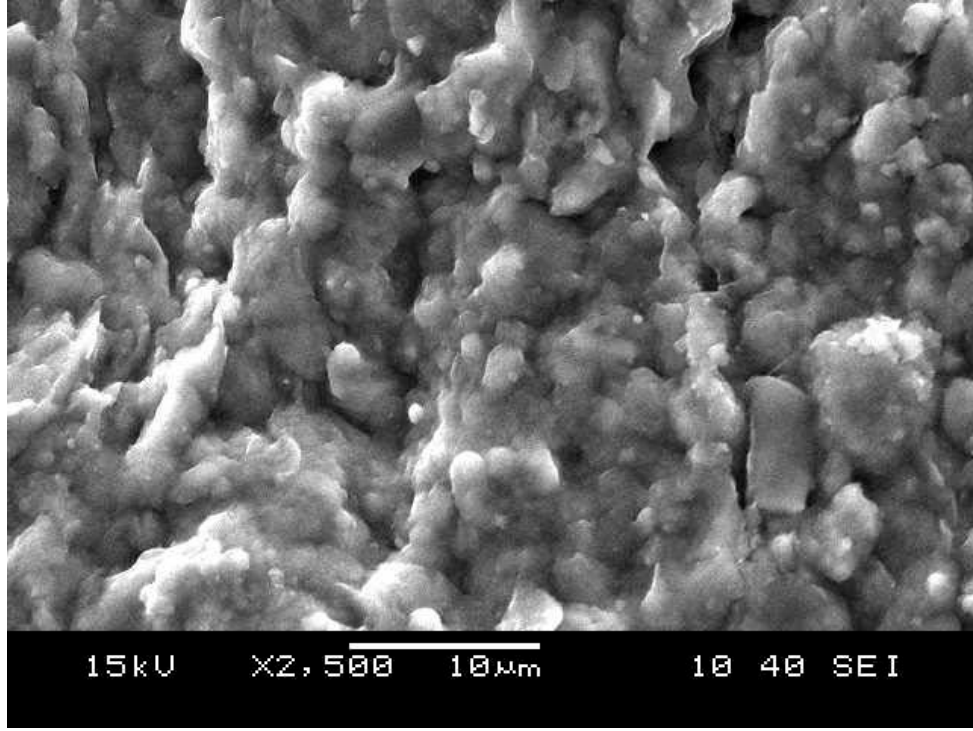
Deney numuneleri saklandıkları alüminyum folyo sargılardan çıkarıldıktan sonra iyi bir görüntü elde edebilmek amacıyla üzerileri ince bir fırça ile temizlenmiştir. Numune düzenlenip kalıbın içerisine koyulduktan sonra yaklaşık bir yarım saat vakum süresi beklenmiştir. Bu süre tamamlandıktan sonra ancak görüntü alınabilmektedir. Cihazın prensibinde yolladığı x-ışınları numuneden geri dönerek tekrar kendi detektörüne döner. Buradaki açı ve mesafeler cihazda işlenerek numunenin mikroskobik boyuttaki görüntüsü elde edilir. Taramalı elektron mikroskobu sonuçları 500, 2500 ve 5000 kat yakınlaştırma değerleri için hem kireçli hem de kireçsiz numune için alınmıştır. Aşağıdaki şekillerde iki numune için de taramalı elektron mikroskobu değerleri bulunmaktadır.



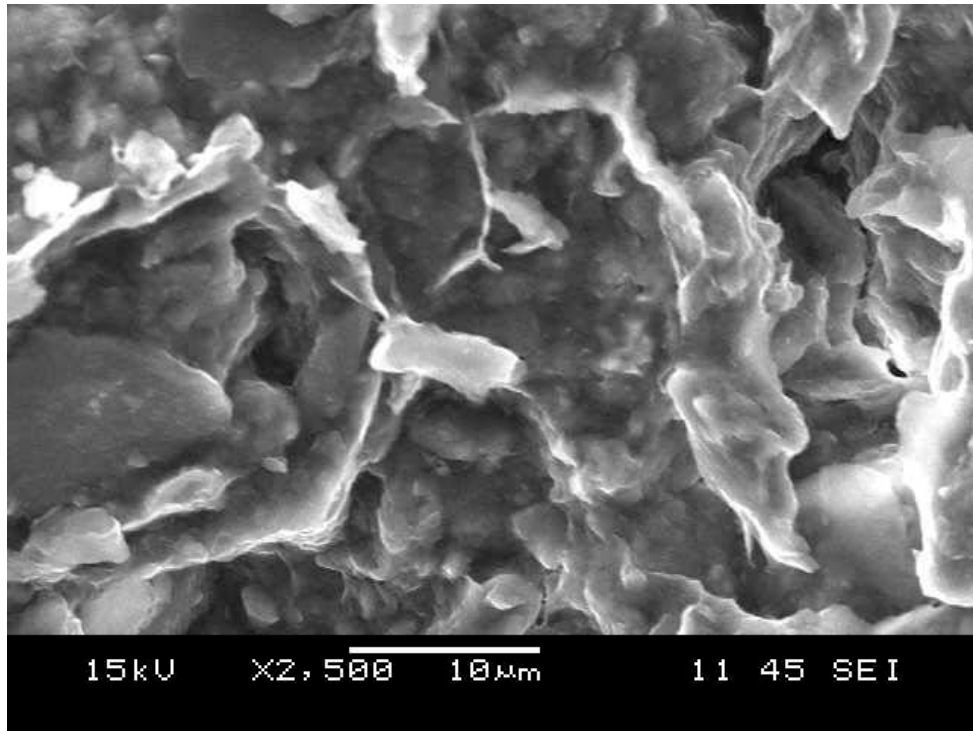
Şekil 3.33: Kireçsiz numunenin 500 kat yakınlaştırılmış hali



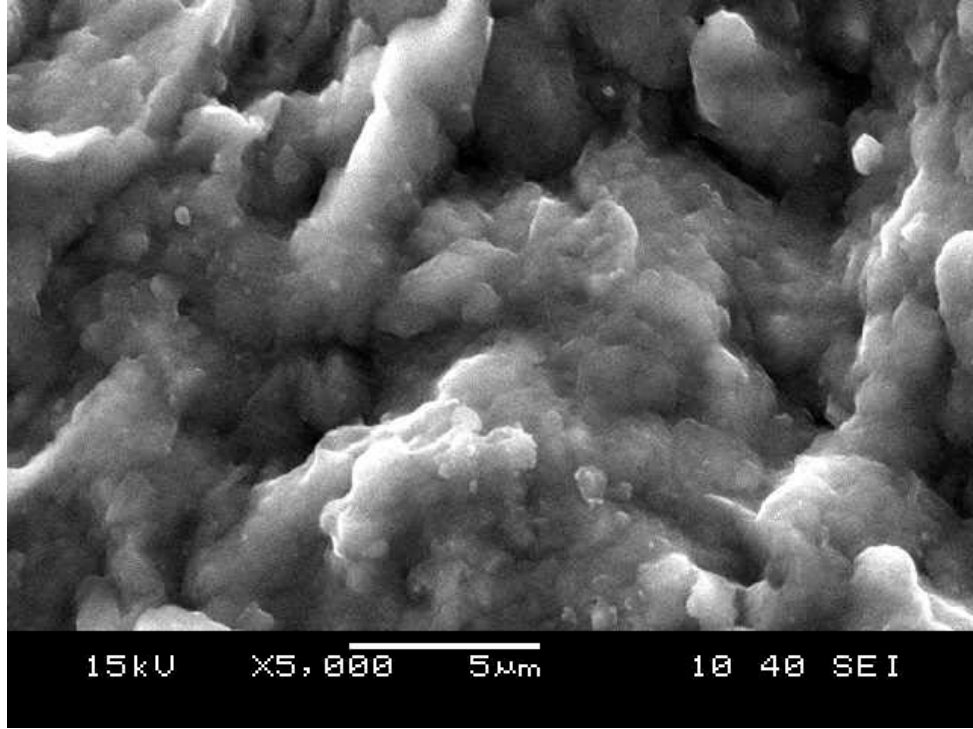
Şekil 3.34: %5 Kireçli numunenin 500 kat yakınlaştırılmış hali



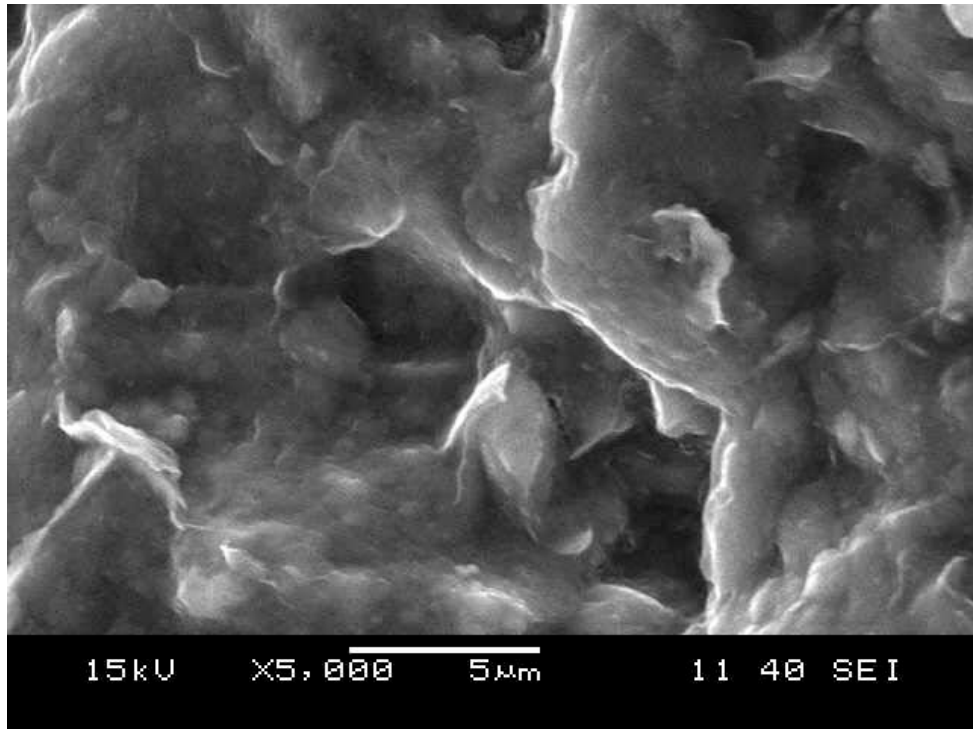
Şekil 3.35: Kireçsiz numunenin 2500 kat yakınlaştırılmış hali



Şekil 3.36: %5 Kireçli numunenin 2500 kat yakınlaştırılmış hali



Şekil 3.37: Kireçsiz numunenin 5000 kat yakınlaştırılmış hali



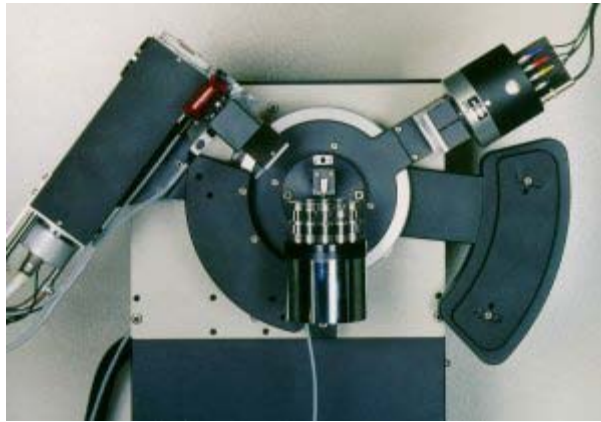
Şekil 3.38: %5 Kireçli numunenin 5000 kat yakınlaştırılmış hali

### 3.11. X-ışını kırınım deneyi

Şekil 3.39’da gözükmekte olan Rigaku Rint2200 model cihazı kullanılan bu deneyde numuneler üzerine farklı açı ve şiddetlerde x-ışını gönderilerek numunelerin kırılma ve dağılma verileri elde edilmiştir. Bu ışınlar Şekil 3.40’da gözüken başlık kısmından gönderilip V şeklinde bir açı yaparak detektör ile veriler toplanmıştır. Şekil 3.41’de skireçsiz ve %5 kireçli numunelerin x-ışını kırınım grafikleri gözükmektedir.

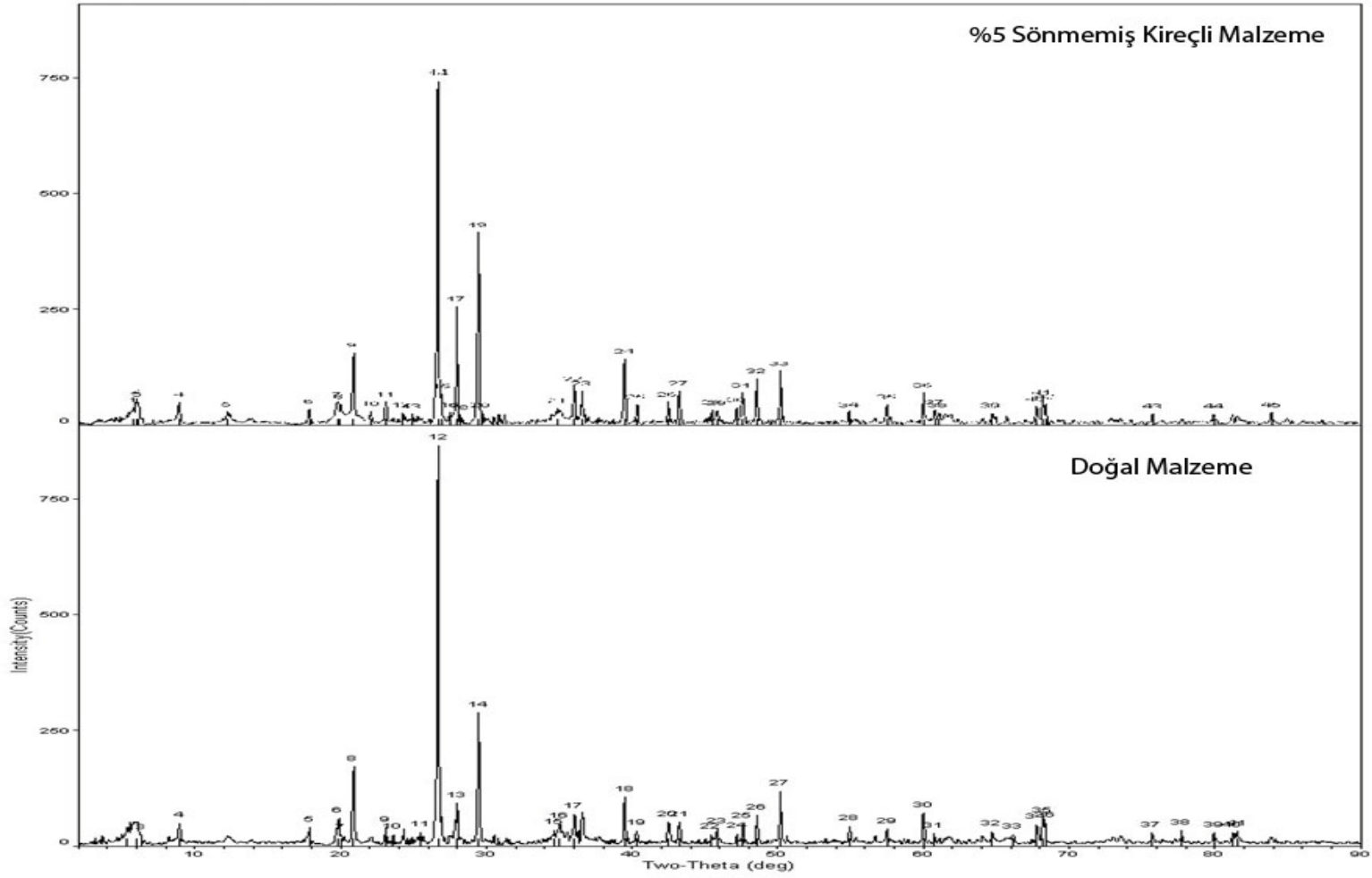


Şekil 3.39: Rigaku Rint2200 X.R.D deney düzeneği



Şekil 3.40: X.R.D başlığı





Şekil 3.41: X.R.D grafiği

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerek laboratuarda yapılan deneyler gerekse araziye uyumluluk açısından yapılmış olan CBR deneyleri sonucunda saf ve % 5 kireçli zeminler arasında geoteknik ve kimyasal özellikler bakımından ciddi farklılıklar gözlemlenmiştir. Geoteknik özelliklere bakıldığında;

- Doğal zemine belirli oranlarda katılan kirecin 1 saatlik kür koşullarında bekletilmesinden sonra yapılan LL ve PL deneylerine bakıldığında likit limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş, plastik limit değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu da yüksek plastisiteli bir kil olan zeminimizin doğru orandaki kireç ilavesiyle birlikte daha katı bir kıvam aldığı ve inşaat mühendisliği açısından bakıldığında, işlenebilirliğinin arttığı anlamına gelmektedir.
- Sönmemiş ve sönmüş kireç katkılı yüksek plastisiteli kilin serbest basınç mukavemetlerin kür süreleriyle doğru orantılı olarak arttığı, deformasyonlarının ise azaldığı gözlemlenmiştir. 28 günlük kür süresinin sonunda doğal halde bulunan zemin numunesine göre optimum su muhtevsındaki kireçli numune yakın 10 kat, doğal su muhtevsındaki kireçli ve sönmemiş kireçli numuneler yakın 13,5 kata var artış gözlemlenmiştir. Kırılma anında birim deformasyon %15'ten %1,5'e düşmüş olup kireçli numuneler daha stabil bir görüntü çizmiştir.
- Yapılan CBR deneylerinde %5 kireç katkılı malzeme kireçsiz doğal malzemeye göre CBR deneyinde yakın 5 kata varan bir artış gösterirken şişme miktarı 2,75 mm'den 0,45 mm'ye inerek %83'lük bir azalma gerçekleşmiştir.
- Uzunçiftlik mevkiinden getirilen yüksek plastisiteli kil üzerinde yapılan deneyler sonucunda yüksek plastisiteli killerin kireç ile stabilize edilebildiği ortaya çıkmıştır.

- Serbest basınç mukavemetleri ve CBR değerlerindeki artış ile deformasyonlardaki azalmalar bizlere özellikle yol inşaatlarında yol kesitini daha ince yapabilme, bununla birlikte ekonomik açıdan daha düşük maliyetli yapılar yapabileceğimizi ortaya çıkarmıştır.
- Doğal su muhtevasında sönmemiş kireç ile hazırlanan numunelerin serbest basınç değerleri anlık, 1 günlük ve 7 günlük deney sonuçları, sönmüş kireç ile hazırlanan numunelerin serbest basınç değerlerine göre biraz daha düşük kalmasına rağmen 28 günlük kür süresi sonunda daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda sönmemiş kirecin kireç stabilizasyonuna sönmüş kireç yerine kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Arazi çalışmalarında yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde, zeminin su muhtevasını azaltmak çok güç olacağından bunun yerine zemine sönmemiş kireç karıştırılarak su muhtevası azaltılabilmektedir ve bu değer optimum su muhtevası değerine yaklaştıkça mukavemetlerinde daha yüksek artışlar elde edilebileceği ortaya çıkmıştır. Bu da sönmemiş kirecin yüksek su muhtevasındaki killi zeminlerde kullanımının hem ekonomik hem zaman hem de dayanım açısından faydasını ortaya koymaktadır.

## KAYNAKLAR

Abduljawad, S.N., "Improvement of Plasticity and Swelling Potential of Calcareous Expansive Clays", *Geotechnical Engineering Journal*, 3-16, (1995).

Al-Rawas, A.A., Taha, R., Nelson, J.D., Beit Al-Shab, T., Al-Siyabi, H., "A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 25(2), 199-209, (2002).

Aufmuth, R.E., "Strength and Durability of Stabilized Layers Under Existing Pavements", *Construction Engineering Research Laboratory Report M-4*, (1970).

Bell, F.G., "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Engineering Geology*, 42, 223-237, (1996).

Biczysko S. J., "Long-Term Performance of Lime Stabilized Road Subgrade", Lime Stabilization, *Thomas Telford Publisher*, (1996)

Biswas, B.R., "Study of Accelerated Curing and Other Factors Influencing Soil Stabilization", *Dissertation presented to Texas A&M University*, College Station, Texas, (1972).

Çıragöz M., "Yol İnşaatında Kireç Stabilizasyonu", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 13-15, (1962).

Croft J.B., "The process involved in the lime stabilization of clay soils", *Australian Research Board*, 2, 1169-1203, (1967).

D'Appolonia, D.J., "Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 106, No. GT4, 399-417, (1980).

Dallaire, G., "Dallas/Fort Worth: World's Largest, Best Planned Airport", *Civil Engineering Magazine*, American Society of Civil Engineers, Vol. 43, No. 7, 53-58, (1973).

Dempsey B. J., Thompson M.R., "Durability Properties of Lime-Soil Mixtures", *Highway Research Record 235*, National Research Council, Washington, D. C., 61 - 75, (1968).

Doty R.N., Alexander M.L., "Determination of Strength Equivalency Factors for the Design of Lime-Stabilized Roadways", *California Department of Transportation*, Sacramento: California Department of Transportation, 60, (1978).

Eades J.L., Grim, R.E., “Reactions of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization, *Highway Research Bull. Board*, 262, 51-63, (1960).

Eades J.L., Grim, R.E.,” A quick test to determine lime requirements for lime stabilization”, *Highway Research Board*, 139, 61-72, (1963).

Evans P., “Lime Stabilization of Black Clay Soils in Queensland, Australia”, *Presentation to the National Lime Association Convention*, San Diego, California, (1998).

Fossberg, P.E., “Some Fundamental Engineering Properties of Lime-Stabilized Clay”, *Proceedings of the 6th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, Vol. 1, 221, (1965).

Goldberg I., Kelin A., “Some Effects of Treating Expansive Clays with Calcium Hydroxide”, Symposium on Exchange phenomena In Soils, *ASTM special publication*, Vol.141, (1952).

Gutschick, K.A., “Lime Stabilization under Hydraulic Conditions”, *4th International Lime Congress, Hershey, PA*. National Lime Association, Washington, (1978).

Gutschick, K.A., “Canal Lining Stabilization Proves Successful”, *Pit and Quarry*, (1985).

Holtz, W. G., “Volume Change in Expansive Clay Soils and Control by Lime Treatment”, *Presented at the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas A&M University, (1969).

Ingles O.G., Metcalf J.B., “Soil stabilization: principles and practice”, *Ejge*, (1972).

İnternet: “Chapter 7 (continued) - NHI-05-037 Geotechnical Aspects of Pavements - Geotechnical - Engineering”, U.S. Federal Highway Administration Home, <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/07d.cfm> .(**Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2010**).

İnternet: “Kil – Vikipedi”, Vikipedi özgür ansiklopedi, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kil> .(**Ziyaret tarihi: 18 Nisan 2010**).

İnternet: “Vermikülit – Vikipedi”, Vikipedi özgür ansiklopedi, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Vermik%C3%BClit> .(**Ziyaret tarihi: 18 Nisan 2010**).

Kavak, A., “The behavior of lime stabilized clays under cyclic loading”, Ph. D., *University of Boğaziçi*, İstanbul, 110-112, (1996).

Kelley, C. M., “A Long Range Durability Study of Lime Stabilized Bases at Military Posts in the Southwest,” *National Lime Association Bulletin* 328, (1977).

Kennedy, J., "Applying log-linear models in educational research", *Australian Journal of Education*, 32, 3-24, (1988).

Little, D.N., "Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime", *Kendall/Hunt Publishing Company*, Dubuque, Iowa, (1995).

Little, D.N., "Evaluation of Resilient and Strength Properties of Lime-Stabilized Soils from the Denver, Colorado Area", *Report for the Chemical Lime Company*, (1996).

Little, D.N., "Reclamation of Caliche Base with Lime and Lime Fly Ash Structural Evaluation", *Presentation at Seminar on Reclamation and Recycling sponsored by the Asphalt Recycling and Reclamation Association*, Oklahoma City, (1997).

Long, R.E., "Utilization of Lime Treated Soils at the Dallas/Fort Worth International Airport", *Lime-Notes, Updates on Lime Applications in Construction*, National Lime Association, Issue No. 4, Fall, Waco, Tx, (1989).

McCallister, L.D., Petry, T. M., "Property Changes in Lime Treated Expansive Clays Under Continuous Leaching", Technical Report GL-90-17, *U. S. Army Corps of Engineers*, Vicksburg, Mississippi, (1990).

McElroy, C.H., "Effectiveness of Dispersed Clay Treatment, Progress Report", National Program, *Soil Conservation Service*, Soil Mechanics Laboratory, South National Technical Center, Fort Worth, Tx, (1982).

McElroy, C.H., "Using Hydrated Lime to Control Erosion of Dispersive Clays", *Lime for Environmental Uses*, ASTM STP 931, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Penn, 100-114, (1987).

Neubauer, C. H., Thompson, M.R., "Stability Properties of Uncured Lime-Treated Fine Grained Soils", *In Highway Research Record 381*, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 20-26, (1972).

Perry, J., MacNeil, D.J., Wilson, P.E., "The Uses of Lime in Ground Engineering: A Review of Recent Work Undertaken at the Transportation Research Laboratory" Lime Stabilization, *Thomas Telford Publisher*, (1996).

Raj, P.P., Geotechnical engineering, *Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited*, New Delhi, (1995).

Robnett, Q.L., Thompson, M.R., "Resilient properties of subgrade soils", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 105, No. 1, 71-89, (1979).

Rosen, W., Marks, D., "Lime and lime-flyash stabilization", *Transportation Research Record*, (1971).

Scheffer F., Schachtschabel P., "Lehrbuch der Bodenkunde", *SSSAJ*, (1970).

Thompson, M.R., “Lime Reactivity of Illinois Soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM5, 67-92, (1966).

Thompson, M.R., “Lime-Treated Soils for Pavement Construction”, *Journal of the Highway Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 94, No. HW5, 191-217, (1968).

Thompson, M.R., “Engineering properties of lime-soil mixtures”, *Journal of Materials, ASTM*, (1969).

Townsend, D.L., Klym, T.W., “Durability of Lime-Stabilized Soils”, *Highway Research Record No. 139*, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 25-41, (1966).

Tumluer G., “Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti” Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi*, (2006).

Tunç, E., “Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları”, *Atlas Yayın ve Dağıtım*, İstanbul, 147, (2002).

Uddin, K., “Engineering behaviors of cement-treated Bangkok soft clay”, *Geotechnical Engineering Journal*, (28)1, 89-119, (1997).

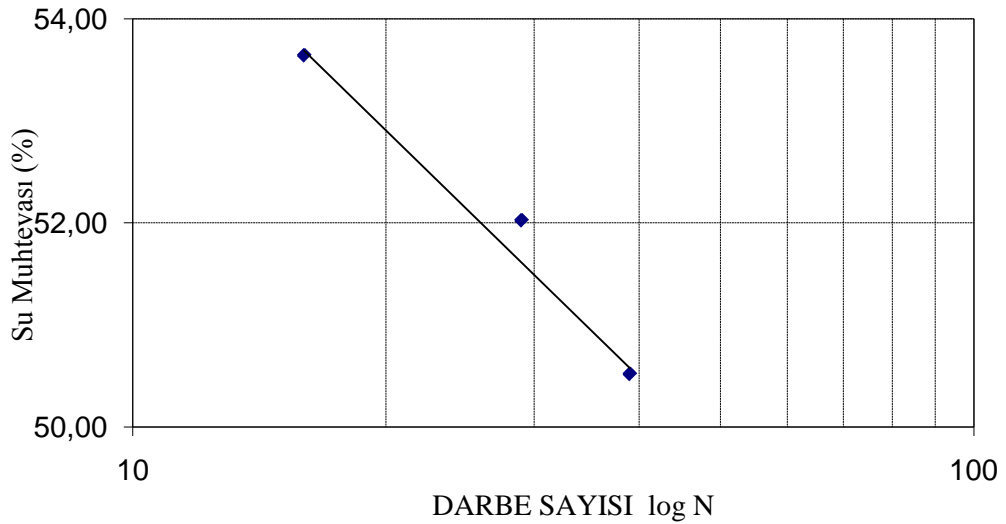
Yong, R.N., Elmonayera, D.S., Chong, T.S., “The Effects of Leaching on the Integrity of a Natural Clay”, *Engineering Geology*, Vol.21, 279-299, (1985).

## EKLER

### Ek A- Atterberg Kıvam Limitleri

Tablo A.1: Doğal haldeki Uzunçiftlik kilinin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	Saf					
TARİH	03.11.2008					
	Likit L.			Plastik L.		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	74	152	123	Kap No	217	55
Kap+Örnek (gr.)	48,31	47,20	48,85	Kap+Örnek (gr.)	37,02	37,85
Kap+Kuru Örnek (gr.)	44,04	43,35	44,98	Kap+Kuru Örnek (gr.)	36,65	37,16
Kap Ağırlığı (gr.)	36,08	35,95	37,32	Kap Ağırlığı (gr.)	34,07	34,83
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	7,96	7,40	7,66	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	2,58	2,36
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	4,27	3,85	3,87	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,37	0,66
Su Muhtevası, w (%)	53,64	52,03	50,32	Su Muhtevası w (%)	14,34	27,97
Darbe Sayısı, N	16	29	39	Plastik Limit Wp (%)	21	



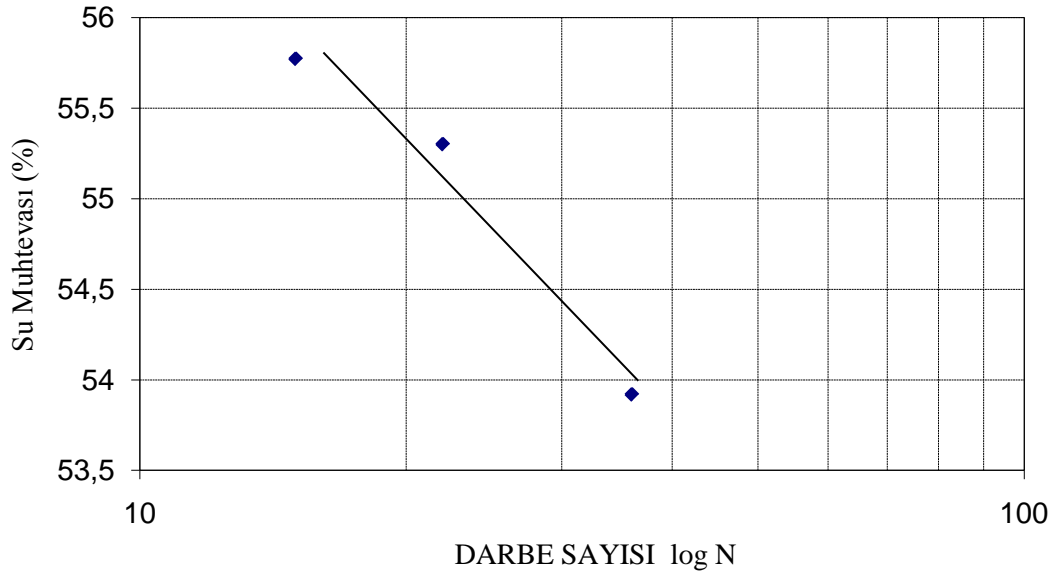
Şekil A.1: Doğal numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	53
PLASTİK LİMİT	21
PLASTİSİTE İNDİSİ	32



Tablo A.2: %1 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%1 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	231	114	113	Kap No	72	177
Kap+Örnek (gr.)	41,34	42,40	42,34	Kap+Örnek (gr.)	37,50	37,67
Kap+Kuru Örnek (gr.)	39,07	39,74	39,49	Kap+Kuru Örnek (gr.)	37,19	37,29
Kap Ağırlığı (gr.)	34,86	34,93	34,38	Kap Ağırlığı (gr.)	35,88	35,69
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	4,21	4,81	5,11	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	1,31	1,60
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	2,27	2,66	2,85	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,31	0,38
Su Muhtevası, w (%)	53,92	55,30	55,77	Su Muhtevası w (%)	23,66	23,75
Darbe Sayısı, N	36	22	15	Plastik Limit Wp (%)	24	

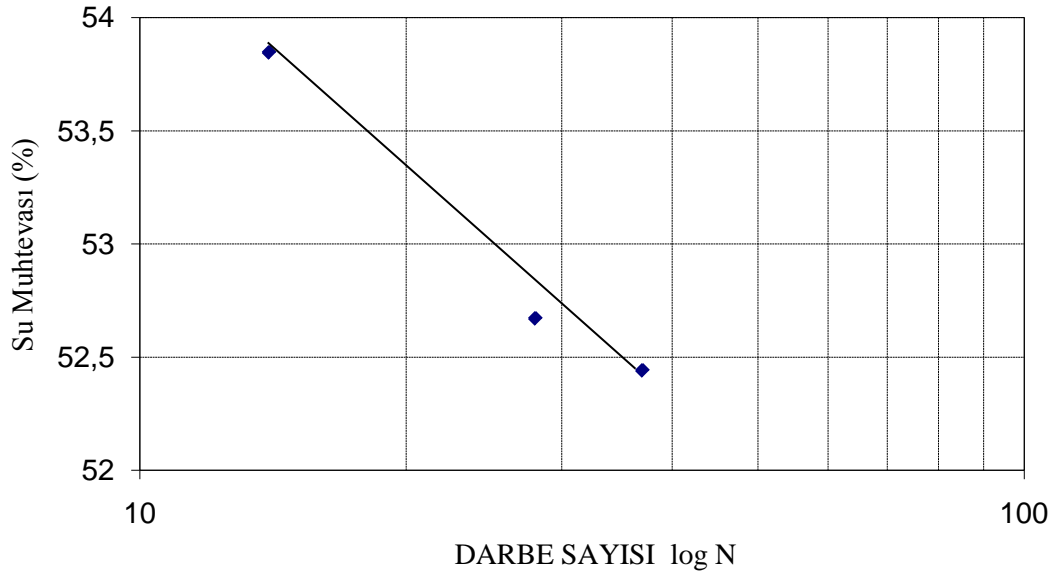


Şekil A.2: %1 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	55
PLASTİK LİMİT	24
PLASTİSİTE İNDİSİ	31

Tablo A.3: %2 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%2 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	189	119	60	Kap No	103	70
Kap+Örnek (gr.)	41,58	41,91	43,14	Kap+Örnek (gr.)	38,52	38,47
Kap+Kuru Örnek (gr.)	39,54	39,15	40,62	Kap+Kuru Örnek (gr.)	38,11	38,12
Kap Ağırlığı (gr.)	35,65	33,91	35,94	Kap Ağırlığı (gr.)	36,41	36,63
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	3,89	5,24	4,68	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	1,70	1,49
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	2,04	2,76	2,52	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,41	0,35
Su Muhtevası, w (%)	52,44	52,67	53,85	Su Muhtevası w (%)	24,12	23,49
Darbe Sayısı, N	37	28	16	Plastik Limit Wp (%)	24	

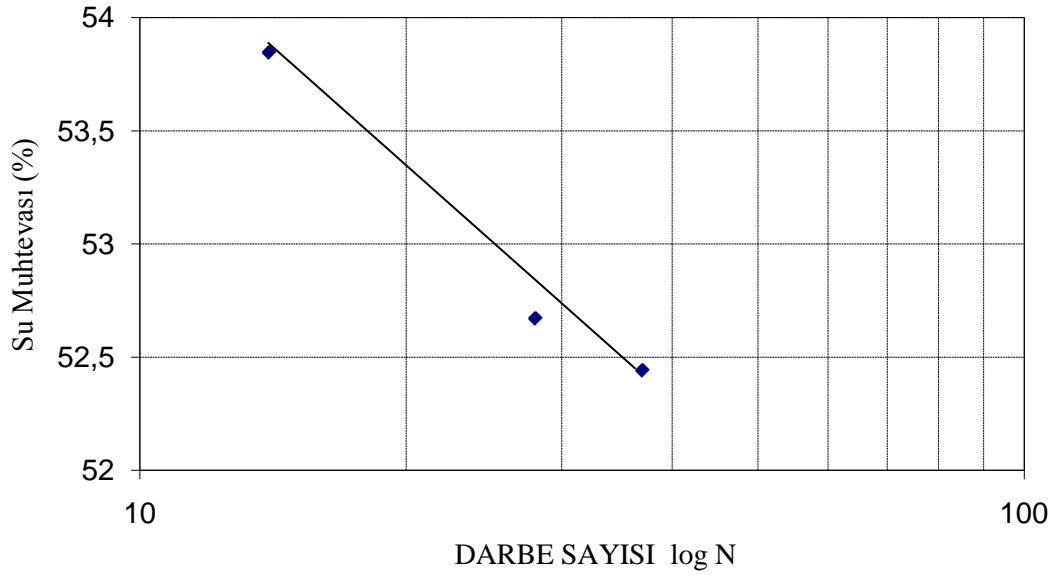


Şekil A.3: %2 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	53
PLASTİK LİMİT	24
PLASTİSİTE İNDİSİ	29

Tablo A.4: %3 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%3 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	161	172	185	Kap No	131	170
Kap+Örnek (gr.)	44,36	42,15	47,30	Kap+Örnek (gr.)	36,35	37,95
Kap+Kuru Örnek (gr.)	41,19	39,56	43,55	Kap+Kuru Örnek (gr.)	35,92	37,51
Kap Ağırlığı (gr.)	34,99	34,38	36,34	Kap Ağırlığı (gr.)	34,26	35,82
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	6,20	5,18	7,21	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	1,66	1,69
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	3,17	2,59	3,75	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,43	0,44
Su Muhtevası, w (%)	51,13	50,00	52,01	Su Muhtevası w (%)	25,90	26,04
Darbe Sayısı, N	23	32	16	Plastik Limit Wp (%)	26	

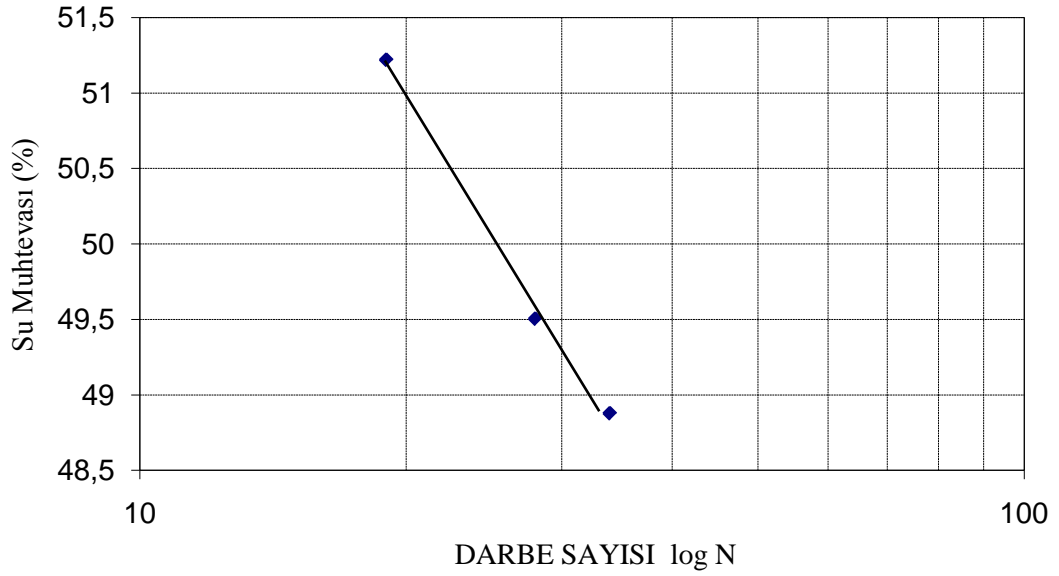


Şekil A.4: %3 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	51
PLASTİK LİMİT	26
PLASTİSİTE İNDİSİ	25

Tablo A.5: %4 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%4 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	112	108	155	Kap No	117	53
Kap+Örnek (gr.)	43,74	43,66	43,75	Kap+Örnek (gr.)	38,23	36,73
Kap+Kuru Örnek (gr.)	40,74	40,72	40,48	Kap+Kuru Örnek (gr.)	37,73	36,29
Kap Ağırlığı (gr.)	34,68	34,98	33,79	Kap Ağırlığı (gr.)	35,84	34,58
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	6,06	5,74	6,69	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	1,89	1,71
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	3,00	2,94	3,27	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,50	0,44
Su Muhtevası, w (%)	49,50	51,22	48,88	Su Muhtevası w (%)	26,46	25,73
Darbe Sayısı, N	28	19	34	Plastik Limit Wp (%)	26	

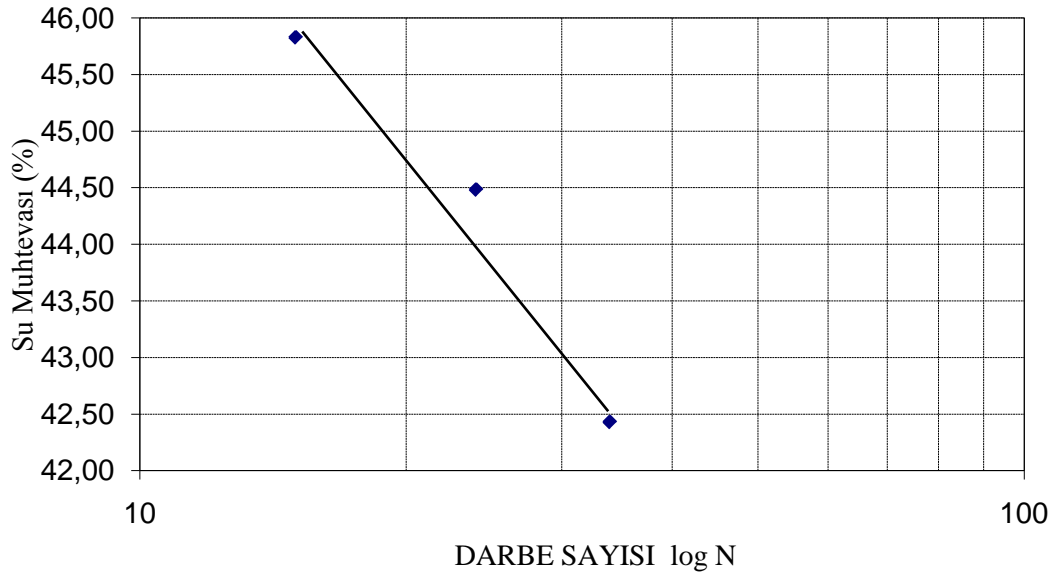


Şekil A.5: %4 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	50
PLASTİK LİMİT	26
PLASTİSİTE İNDİSİ	24

Tablo A.6: %5 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%5 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	Likit L.			Plastik L.		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	173	180	164	Kap No	243	165
Kap+Örnek (gr.)	41,01	46,74	49,90	Kap+Örnek (gr.)	37,01	37,56
Kap+Kuru Örnek (gr.)	39,02	42,99	45,45	Kap+Kuru Örnek (gr.)	36,49	36,97
Kap Ağırlığı (gr.)	34,33	34,56	35,74	Kap Ağırlığı (gr.)	34,30	34,60
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	4,69	8,43	9,71	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	2,19	2,37
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	1,99	3,75	4,45	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,52	0,59
Su Muhtevası, w (%)	42,43	44,48	45,83	Su Muhtevası w (%)	23,74	24,89
Darbe Sayısı, N	34	24	15	Plastik Limit Wp (%)	24	

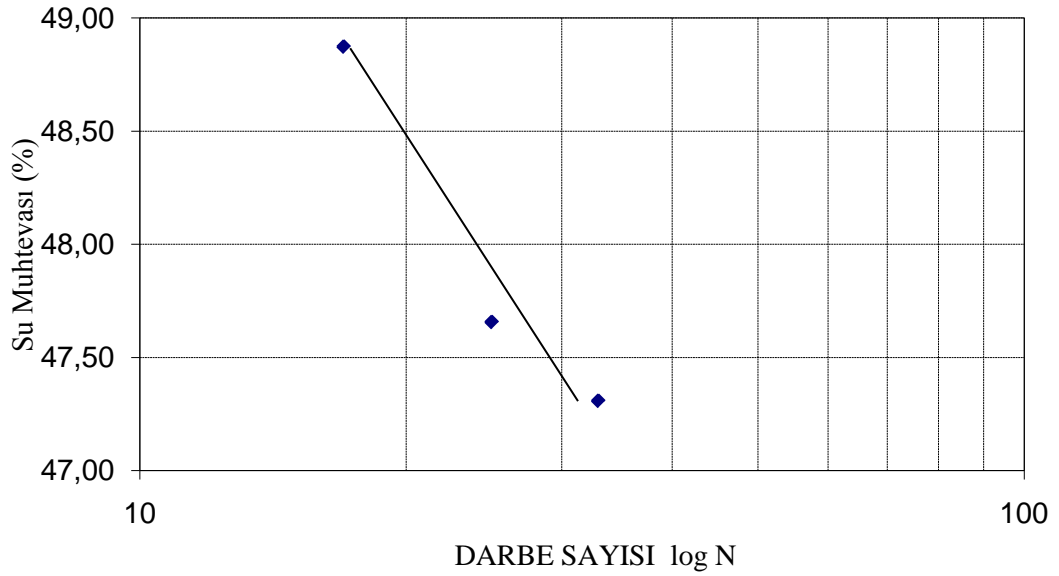


Şekil A.6: %5 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	46
PLASTİK LİMİT	24
PLASTİSİTE İNDİSİ	22

Tablo A.7: %6 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%6 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	88	187	212	Kap No	175	65
Kap+Örnek (gr.)	46,78	45,39	47,28	Kap+Örnek (gr.)	38,31	37,90
Kap+Kuru Örnek (gr.)	43,00	41,92	43,11	Kap+Kuru Örnek (gr.)	37,72	37,33
Kap Ağırlığı (gr.)	35,01	34,82	34,36	Kap Ağırlığı (gr.)	35,40	35,05
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	7,99	7,10	8,75	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	2,32	2,28
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	3,78	3,47	4,17	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,59	0,57
Su Muhtevası, w (%)	47,31	48,87	47,66	Su Muhtevası w (%)	25,43	25,00
Darbe Sayısı, N	33	17	25	Plastik Limit Wp (%)	25	

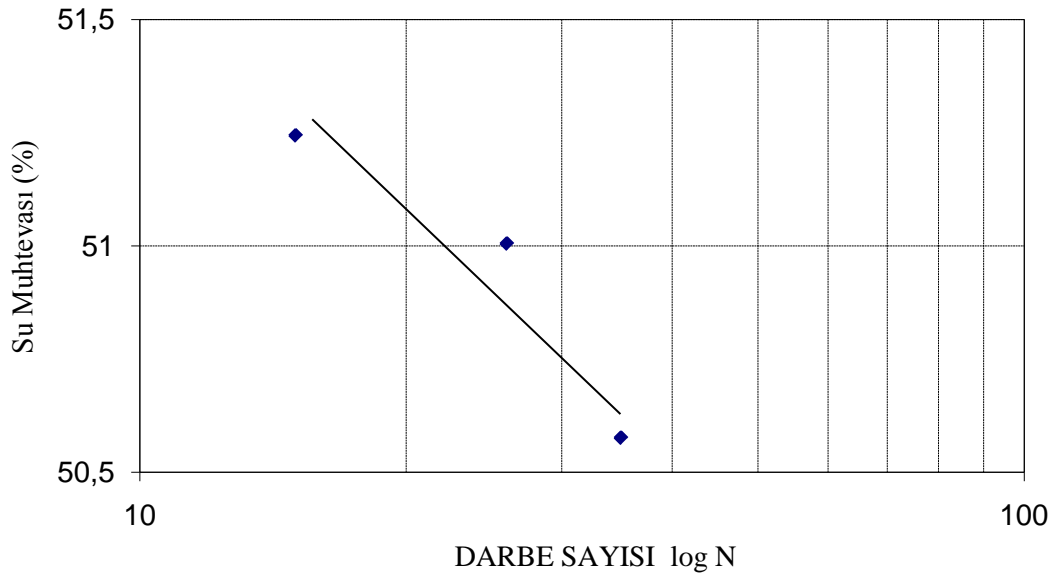


Şekil A.7: %6 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	48
PLASTİK LİMİT	25
PLASTİSİTE İNDİSİ	23

Tablo A.8: %7 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%7 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	201	132	153	Kap No	65	56
Kap+Örnek (gr.)	42,32	44,60	44,81	Kap+Örnek (gr.)	36,80	37,36
Kap+Kuru Örnek (gr.)	39,53	41,10	41,30	Kap+Kuru Örnek (gr.)	36,42	37,01
Kap Ağırlığı (gr.)	34,06	34,27	34,36	Kap Ağırlığı (gr.)	35,05	35,72
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	5,47	6,83	6,94	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	1,37	1,29
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	2,79	3,50	3,51	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,38	0,35
Su Muhtevası, w (%)	51,01	51,24	50,58	Su Muhtevası w (%)	27,74	27,13
Darbe Sayısı, N	26	15	35	Plastik Limit Wp (%)	27	

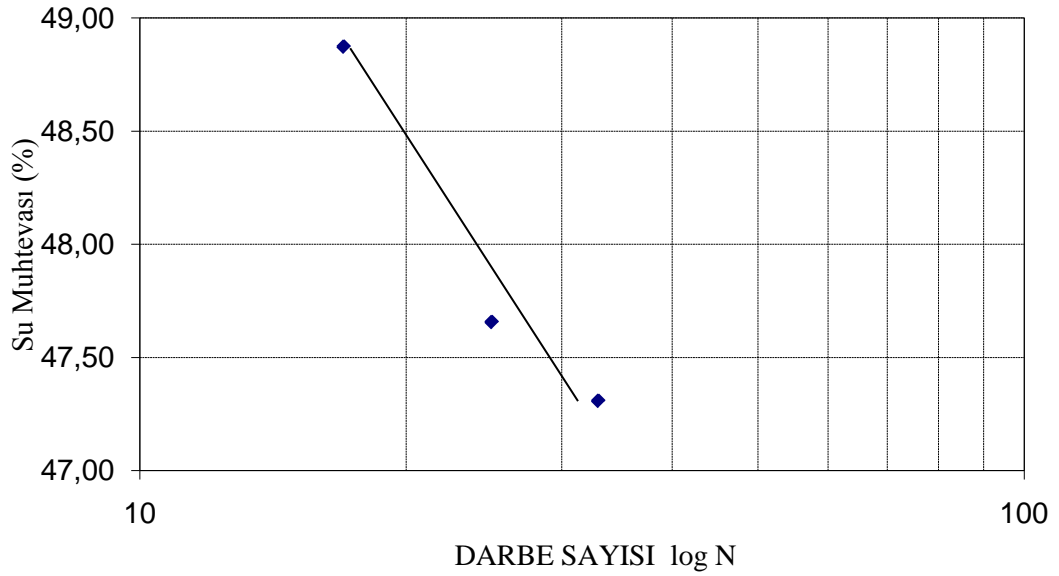


Şekil A.8: %7 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	51
PLASTİK LİMİT	27
PLASTİSİTE İNDİSİ	24

Tablo A.9: %8 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%8 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	72	137	226	Kap No	179	178
Kap+Örnek (gr.)	45,20	43,34	45,44	Kap+Örnek (gr.)	37,83	36,01
Kap+Kuru Örnek (gr.)	42,11	40,49	42,06	Kap+Kuru Örnek (gr.)	37,58	35,71
Kap Ağırlığı (gr.)	35,87	35,10	35,42	Kap Ağırlığı (gr.)	36,60	34,62
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	6,24	5,39	6,64	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	0,98	1,09
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	3,09	2,85	3,38	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,25	0,30
Su Muhtevası, w (%)	49,52	52,88	50,90	Su Muhtevası w (%)	25,51	27,52
Darbe Sayısı, N	36	16	28	Plastik Limit Wp (%)	27	



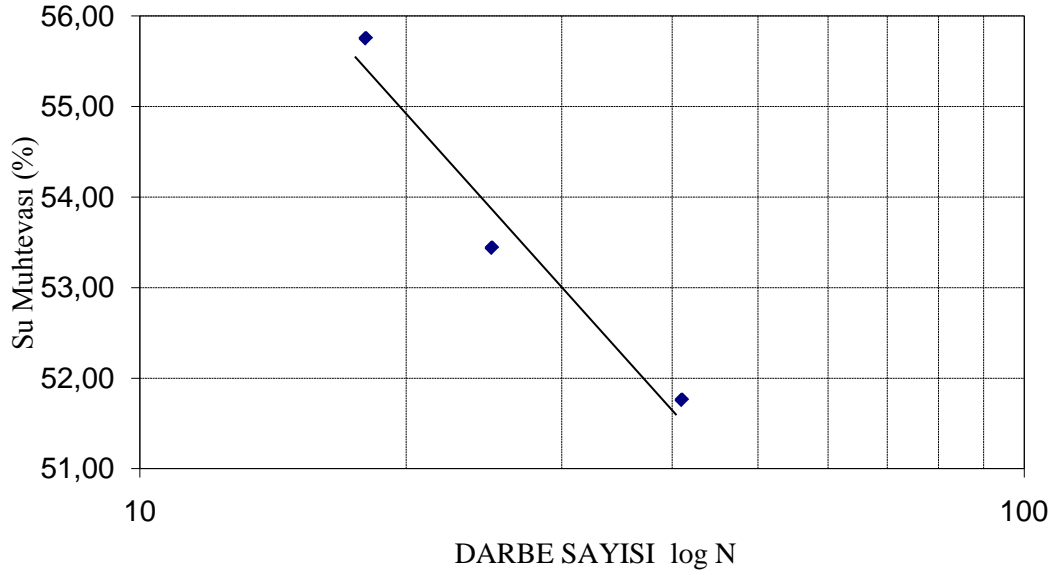
Şekil A.9: %8 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	51
PLASTİK LİMİT	25
PLASTİSİTE İNDİSİ	26



Tablo A.10: %9 kireç katkıli numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%9 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	Likit L.			Plastik L.		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	232	89	155	Kap No	120	167
Kap+Örnek (gr.)	44,18	41,09	40,48	Kap+Örnek (gr.)	36,05	36,49
Kap+Kuru Örnek (gr.)	41,03	38,74	38,15	Kap+Kuru Örnek (gr.)	35,70	36,20
Kap Ağırlığı (gr.)	35,38	34,20	33,79	Kap Ağırlığı (gr.)	34,33	34,98
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	5,65	4,54	4,36	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	1,37	1,22
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	3,15	2,35	2,33	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,35	0,29
Su Muhtevası, w (%)	55,75	51,76	53,44	Su Muhtevası w (%)	25,55	23,77
Darbe Sayısı, N	18	41	25	Plastik Limit Wp (%)	25	

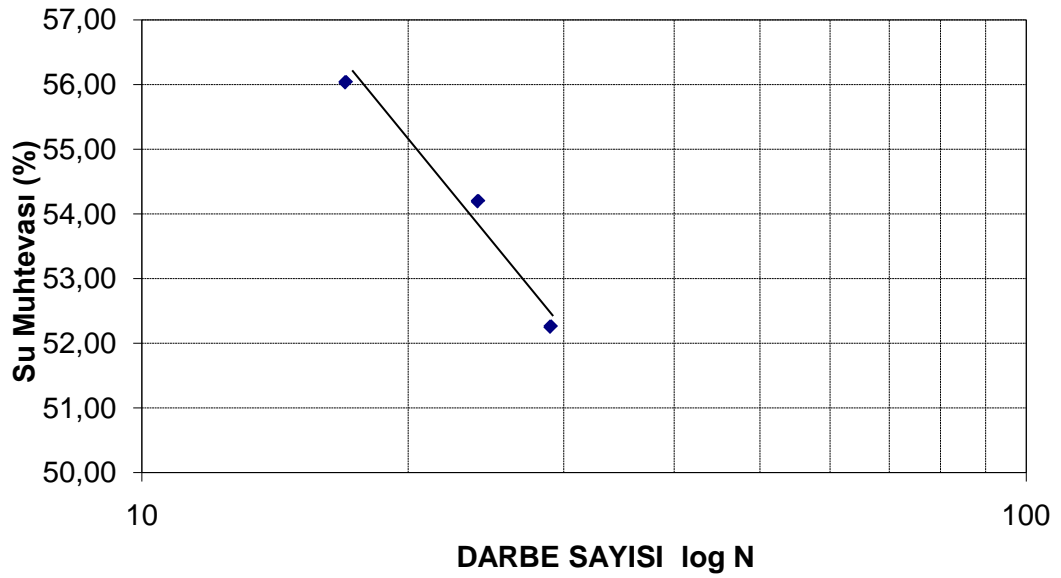


Şekil A.10: %9 kireç katkıli numunenin likit limit grafiği

LİKİT LİMİT	52
PLASTİK LİMİT	25
PLASTİSİTE İNDİSİ	27

Tablo A.11: %10 kireç katkılı numunenin kıvam limitleri

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu					
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit					
ÖRNEĞİN TANIMI	%10 Kireçli					
TARİH	03.11.2008					
	<b>Likit L.</b>			<b>Plastik L.</b>		
Deney No	1	2	3	Deney No	1	2
Kap No	202	150	151	Kap No	122	118
Kap+Örnek (gr.)	42,44	42,31	48,01	Kap+Örnek (gr.)	35,27	36,07
Kap+Kuru Örnek (gr.)	40,18	39,88	43,46	Kap+Kuru Örnek (gr.)	34,99	35,87
Kap Ağırlığı (gr.)	36,01	35,23	35,34	Kap Ağırlığı (gr.)	33,85	35,03
Kuru Örnek Ağırlığı, Ws (gr.)	4,17	4,65	8,12	Kuru Örnek Ağırlığı Ws (gr.)	1,14	0,84
Su Ağırlığı, Ww (gr.)	2,26	2,43	4,55	Su Ağırlığı Ww (gr.)	0,28	0,20
Su Muhtevası, w (%)	54,20	52,26	56,03	Su Muhtevası w (%)	24,56	23,81
Darbe Sayısı, N	24	29	17	Plastik Limit Wp (%)	24	



Şekil A.11: %10 kireç katkılı numunenin likit limit grafiği

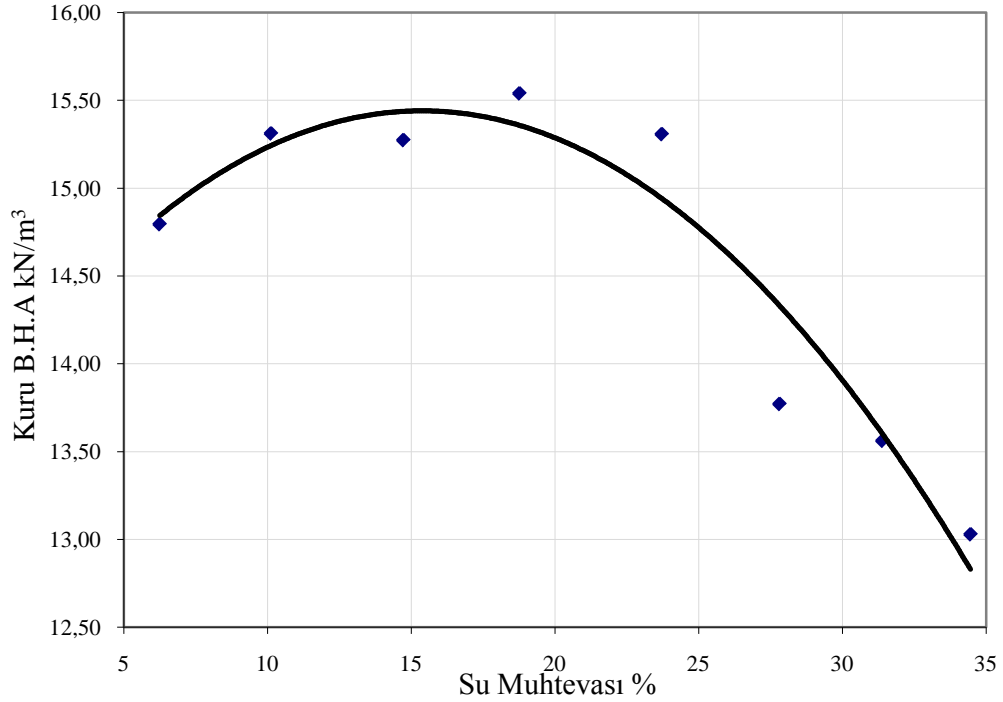
LİKİT LİMİT	54
PLASTİK LİMİT	24
PLASTİSİTE İNDİSİ	30

## Ek B- Harvard Proctor deneyleri

Tablo B.1: Doğal malzemenin modifiye Harvard Proctor deneyi

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit
ÖRNEĞİN TANIMI	Doğal malzeme
DENEYİN ÖZELLİĞİ	Modifiye
KALIBIN İÇ HACMİ (cm.3)	62.27
TARİH	17.11.2008

Ör. Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8
Kap No	140	101	61	63	92	49	221	182
Kap Ağırlığı (gr)	35,80	36,70	34,74	34,97	34,84	34,83	34,04	34,81
Kap+Yaş zemin (gr)	44,30	47,47	50,32	45,16	44,23	41,31	45,76	48,39
Kap+Kuru zemin (gr)	43,80	46,48	48,32	43,55	42,43	39,90	42,96	44,91
Su Ağırlığı (gr)	0,50	0,99	2,00	1,61	1,80	1,41	2,80	3,48
Zemin Ağırlığı (gr)	8,00	9,78	13,58	8,58	7,59	5,07	8,92	10,10
Su muhtevası w (%)	6,25	10,12	14,73	18,76	23,72	27,81	31,39	34,46
Tahm. Su Muhtev.%	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Su muhtevası w (%)	6,25	10,12	14,73	18,76	23,72	27,81	31,39	34,46
Kalıp+Zemin ağı. (gr)	520,74	527,99	532,19	538,11	541,17	532,68	534,06	532,15
Kalıp Ağırlığı (gr)	420,96	420,96	420,96	420,96	420,96	420,96	420,96	420,96
Zemin Ağırlığı (gr)	99,78	107,03	111,23	117,15	120,21	111,72	113,10	111,19
Doğ.BHA (kN/m <sup>3</sup> )	15,72	16,86	17,52	18,46	18,94	17,60	17,82	17,52
Kuru BHA (kN/m <sup>3</sup> )	14,79	15,31	15,27	15,54	15,31	13,77	13,56	13,03

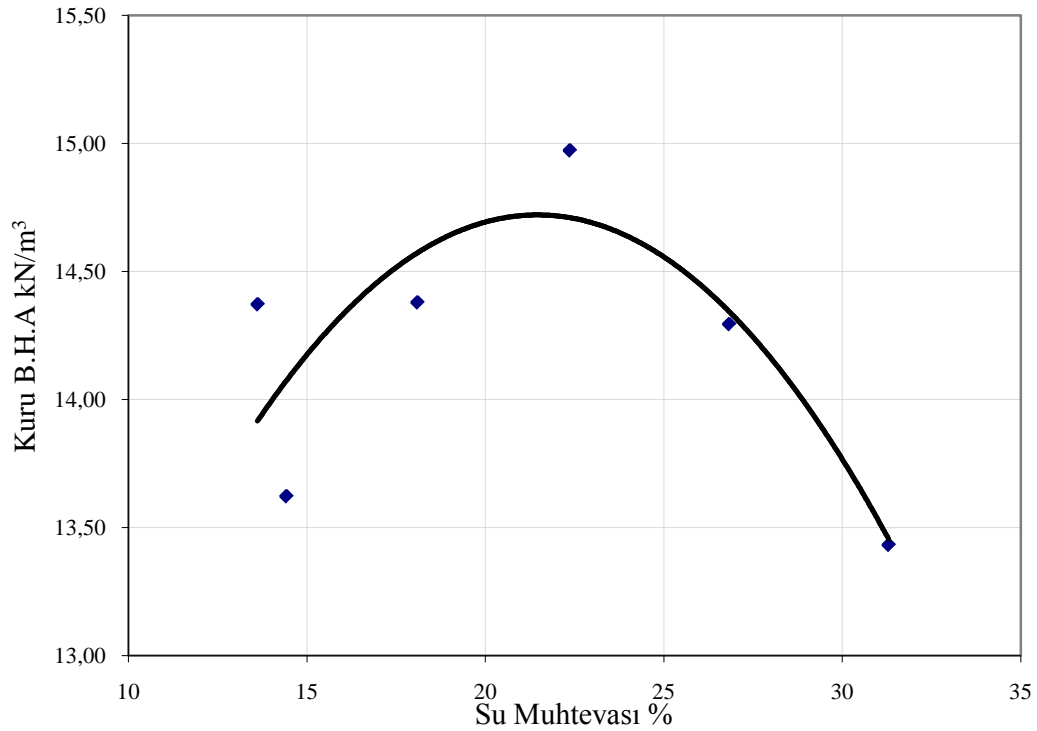


Şekil B.1: Doğal malzemenin modifiye Harvard Proctor grafiği

Tablo B.2: %5 Kireçli numunenin modifiye Harvard Proctor deneyi

PROJE	Yüksek Plastisiteli Killerin Kireç İle Stabilizasyonu
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER	Uzunçiftlik - İzmit
ÖRNEĞİN TANIMI	Doğal malzeme
DENEYİN ÖZELLİĞİ	Modifiye
KALIBIN İÇ HACMİ (cm.3)	62.27
TARİH	17.11.2008

Ör. Numune No	1	2	3	4	5	6
Kap No	64	78	85	130	81	131
Kap Ağırlığı (gr)	35,68	35,50	34,79	33,96	35,08	34,27
Kap+Yaş zemin (gr)	48,77	46,43	45,95	44,41	46,52	49,12
Kap+Kuru zemin (gr)	47,12	45,12	44,24	42,50	44,10	45,58
Su Ağırlığı (gr)	1,65	1,31	1,71	1,91	2,42	3,54
Zemin Ağırlığı (gr)	11,44	9,62	9,45	8,54	9,02	11,31
Su muhtevası w (%)	14,42	13,62	18,10	22,37	26,83	31,30
Tahm. Su Muhtev.%	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00
Su muhtevası w (%)	14,42	13,62	18,10	22,37	26,83	31,30
Kalıp+Zemin ağır. (gr)	519,90	524,61	528,75	537,26	536,04	532,91
Kalıp Ağırlığı (gr)	420,96	420,96	420,96	420,96	420,96	420,96
Zemin Ağırlığı (gr)	98,94	103,65	107,79	116,30	115,08	111,95
Doğ.BHA (kN/m <sup>3</sup> )	15,59	16,33	16,98	18,32	18,13	17,64
Kuru BHA (kN/m <sup>3</sup> )	13,62	14,37	14,38	14,97	14,29	13,43



Şekil B.2: %5 Kireçli numunenin Modifiye Harvard Proctor Grafiği

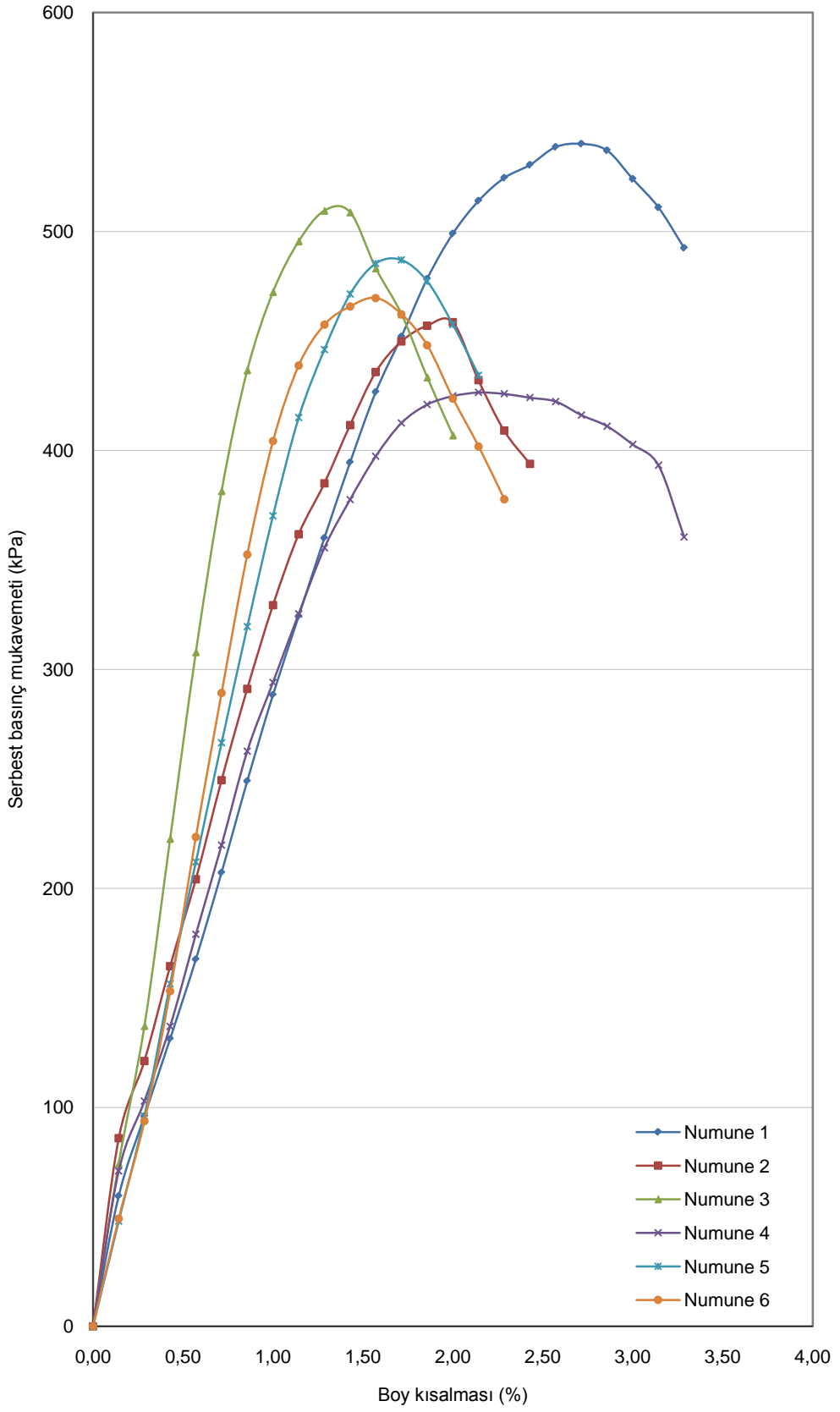
## Ek C- Serbest basınç deneyleri

Tablo C.1: Optimum su muhtevasında 5% kireçli numunenin anlık modifiye serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)						
Boy kısalma %	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,14	59,56	85,90	74,45	71,01	48,10	49,25
0,29	96,07	121,23	137,24	102,93	96,07	93,78
0,43	131,34	164,46	222,70	137,05	156,46	153,04
0,57	167,64	204,13	307,91	179,04	212,12	223,52
0,71	207,26	249,39	381,49	219,78	266,47	289,25
0,86	249,03	291,11	436,66	262,68	319,54	352,51
1,00	288,42	329,29	472,37	294,09	370,17	404,24
1,14	324,28	361,70	495,50	325,42	414,99	438,80
1,29	360,05	384,96	509,50	355,52	446,10	457,42
1,43	394,57	411,53	508,76	377,61	471,45	465,80
1,57	426,74	435,77	483,19	397,39	485,45	469,64
1,71	452,05	449,79	462,20	412,59	487,00	462,20
1,86	478,41	457,02	433,38	421,00	477,28	448,02
2,00	499,07	458,60	406,90	424,88	457,48	423,76
2,14	514,05	432,12		426,51	434,36	401,82
2,29	524,51	409,07		425,89		377,69
2,43	530,46	393,93		424,14		
2,57	538,62			422,41		
2,71	540,06			416,21		
2,84	537,04			411,14		
3,00	524,02			402,75		
3,14	511,02			393,27		
3,29	492,52			360,52		

### ORTALAMALAR

$q_u$ (kPa)	481,89
$c$ (kPa)	240,94



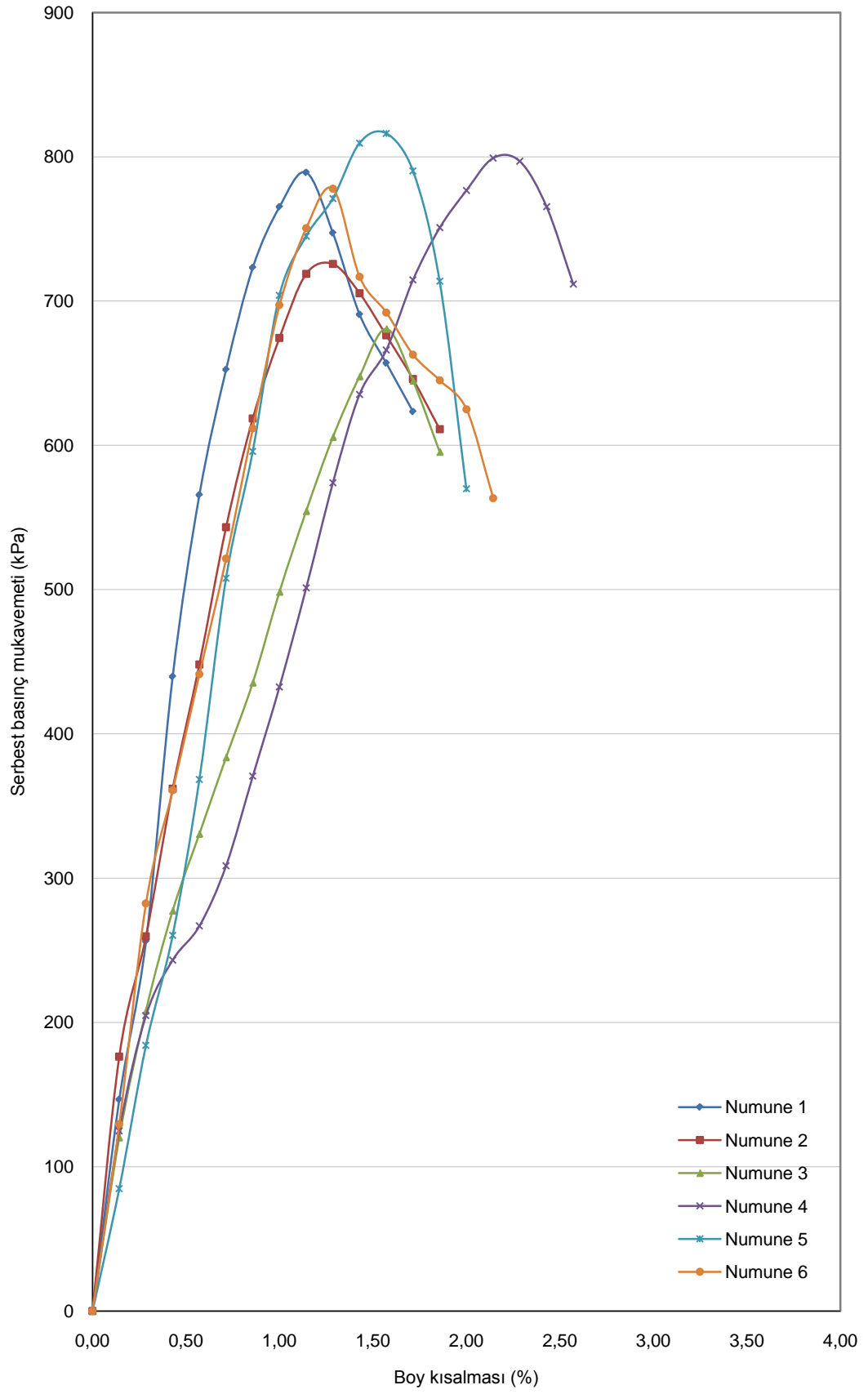
Şekil C.1:  $W_{opt}$ 'nda 5% kireçli numunenin anlık modifiye proctor grafiği

Tablo C.2: Optimum su muhtevasında 5% kireçli numunenin 1 günlük modifiye serbest basınç deneyi

Boy kısalma %	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,14	146,60	176,38	120,26	124,84	84,75	129,42
0,29	256,19	259,62	208,15	204,72	184,13	282,49
0,43	439,69	362,03	277,52	243,26	260,39	360,89
0,57	565,65	448,18	330,72	266,86	368,35	441,34
0,71	652,52	543,20	383,77	308,61	507,89	521,56
0,86	723,22	618,60	435,52	370,71	595,86	611,78
1,00	765,33	674,49	498,48	432,62	704,01	697,20
1,14	789,17	718,87	554,46	501,17	744,95	750,62
1,29	747,27	725,75	605,74	574,04	771,04	777,84
1,43	690,79	705,48	647,82	635,39	809,50	716,79
1,57	657,05	676,24	680,75	666,08	816,23	692,04
1,71	623,40	645,95	644,82	714,71	790,24	662,86
1,86		611,24	595,48	750,82	713,67	645,01
2,00				776,70	569,88	624,96
2,14				799,14		563,44
2,29				796,85		
2,43				765,47		
2,57				711,83		

ORTALAMALAR

q <sub>u</sub> (kPa)	764,81
c (kPa)	382,41



Şekil C.2:  $W_{opt}$ 'nda 5% kireçli numunenin 1 günlük modifiye proctor grafiği

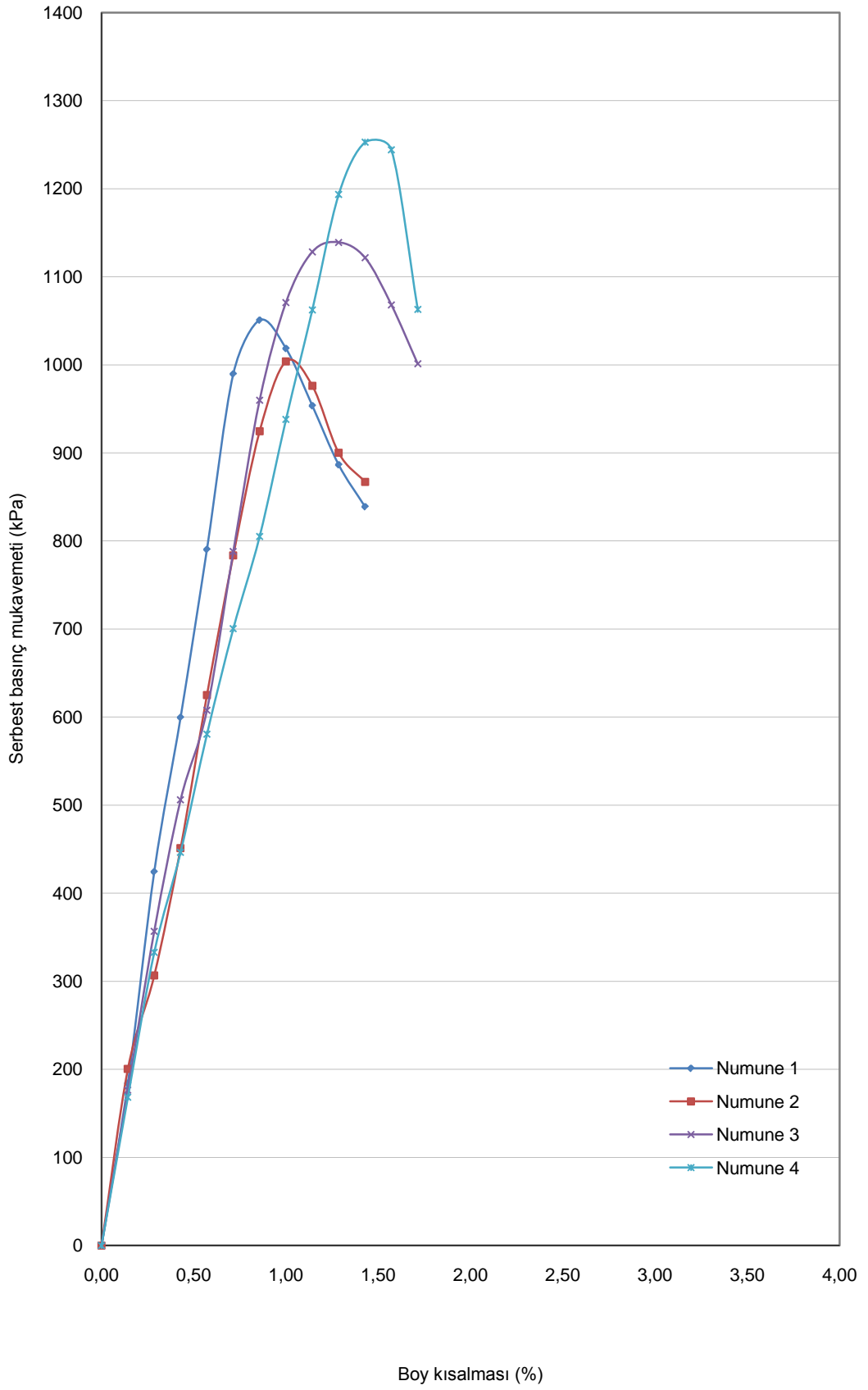


Tablo C.3: Optimum su muhtevasında 5% kireçli numunenin 7 günlük modifiye serbest basınç deneyi

<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>						
Boy kısalma %	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,14	184,40	200,43	176,38	168,36		
0,29	424,31	306,51	356,83	332,81		
0,43	599,58	451,11	505,93	446,54		
0,57	790,31	624,95	607,84	580,47		
0,71	989,60	783,48	788,03	700,35		
0,86	1050,71	924,49	959,74	805,09		
1,00	1018,54	1003,78	1070,77	937,92		
1,14	953,58	976,25	1128,19	1062,43		
1,29	886,53	900,12	1139,01	1193,36		
1,43	838,89	867,16	1121,54	1252,69		
1,57	804,94		1067,98	1244,10		
1,71			1001,05	1063,05		
1,86			980,46	961,32		
2,00						
2,14						

ORTALAMALAR

$q_u$ (kPa)	1111,55
$c$ (kPa)	555,77



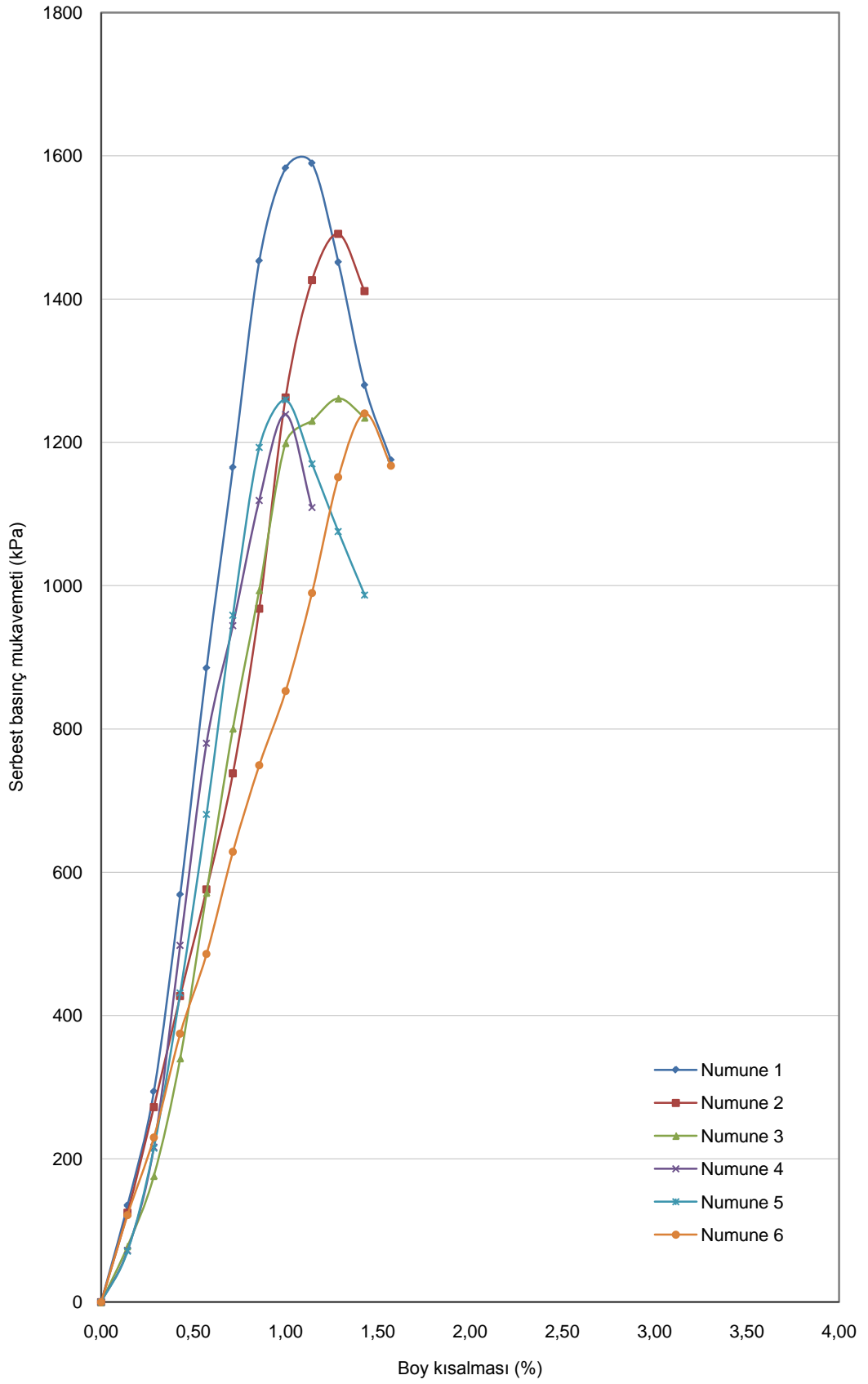
Şekil C.3:  $W_{opt}$ 'nda 5% kireçli numunenin 7 günlük modifiye proctor grafiği

Tablo C.4: Optimum su muhtevasında 5% kireçli numunenin 28 günlük modifiye serbest basınç deneyi

Boy kısalma %	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,14	135,15	124,84	77,88	72,16	71,01	121,40
0,29	293,93	272,20	176,13	216,16	215,01	229,88
0,43	568,74	427,13	340,33	497,93	431,70	374,59
0,57	884,96	575,91	571,35	780,04	680,83	485,82
0,71	1164,97	737,93	800,56	944,04	958,85	628,60
0,86	1453,26	967,70	993,86	1118,94	1192,86	749,37
1,00	1582,88	1262,67	1199,09	1238,83	1259,27	852,76
1,14	1589,67	1426,40	1230,24	1108,91	1170,14	989,86
1,29	1451,51	1491,14	1261,29		1075,61	1151,47
1,43	1279,82	1410,97	1234,60		987,00	1240,25
1,57	1175,23					1167,33
1,71						
1,86						
2,00						
2,14						

ORTALAMALAR

$q_u$ (kPa)	1346,74
$c$ (kPa)	673,37



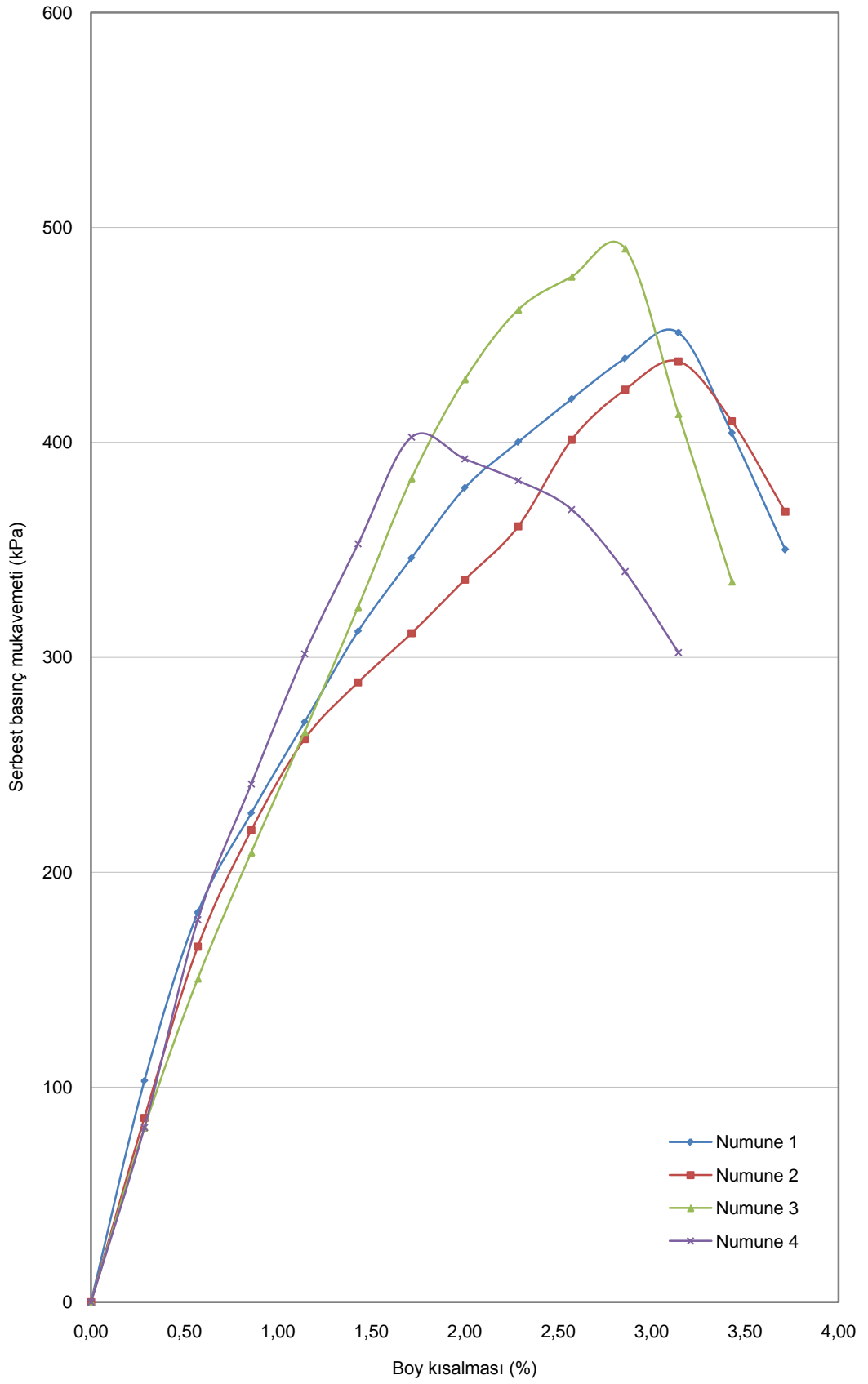
Şekil C.4:  $W_{opt}$ 'nda 5% kireçli numunenin 28 günlük modifiye proctor grafiği

Tablo C.5: Doğal su muhtevasında 5% kireçli numunenin anlık modifiye serbest basınç deneyi

Boy kısalma %	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,29	102,93	85,78	81,20	81,20		
0,57	181,33	165,36	150,53	177,90		
0,86	227,43	219,47	209,23	241,07		
1,14	269,86	261,92	265,32	301,61		
1,43	312,04	288,30	323,35	352,74		
1,71	346,08	311,14	383,28	402,45		
2,00	378,80	336,08	429,38	392,29		
2,29	400,11	360,88	461,75	382,18		
2,57	420,17	401,17	477,16	368,77		
2,86	438,99	424,51	490,25	339,83		
3,14	451,03	437,70	413,26	302,17		
3,43	404,29	409,83	335,25			
3,71	350,08	367,75				

ORTALAMALAR

$q_u$ (kPa)	445,36
$c$ (kPa)	222,68



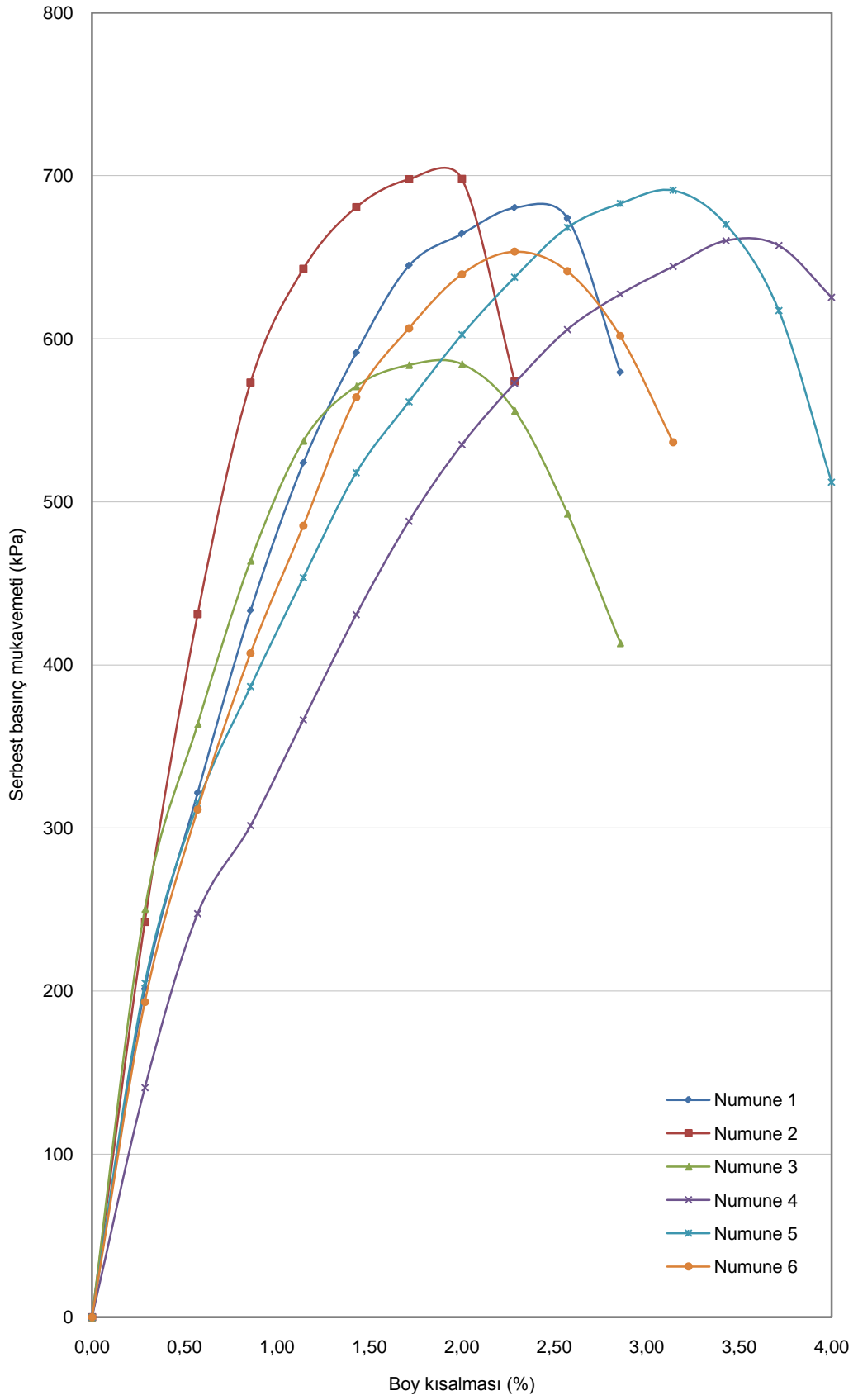
Şekil C.5:  $W_{doğal}$ 'da 5% kireçli numunenin anlık modifiye proctor grafiği

Tablo C.6: Doğal su muhtevasında 5% kireçli numunenin 1 günlük modifiye serbest basınç deneyi

<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>						
Boy kısalma %	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,29	201,29	242,46	250,47	140,67	204,72	193,28
0,57	321,60	431,08	363,79	247,47	314,75	311,33
0,86	433,25	573,12	463,95	301,34	386,63	407,09
1,14	523,84	642,90	537,45	366,24	453,54	485,29
1,43	591,29	680,61	570,94	430,75	517,81	564,16
1,71	644,82	697,80	583,94	488,12	561,40	606,49
2,00	664,30	698,02	584,49	535,04	602,48	639,57
2,29	680,30	573,82	555,89	572,70	637,71	653,40
2,57	673,84		492,81	605,67	668,25	641,43
2,86	579,38		413,37	627,29	683,00	601,67
3,14				644,33	690,99	536,57
3,43				660,16	670,12	
3,71				657,10	617,34	
4,00				625,42	512,01	

ORTALAMALAR

q <sub>u</sub> (kPa)	661,23
c (kPa)	330,61



Şekil C.6:  $W_{doğal}$ 'da 5% kireçli numunenin 1 günlük modifiye proctor grafiği

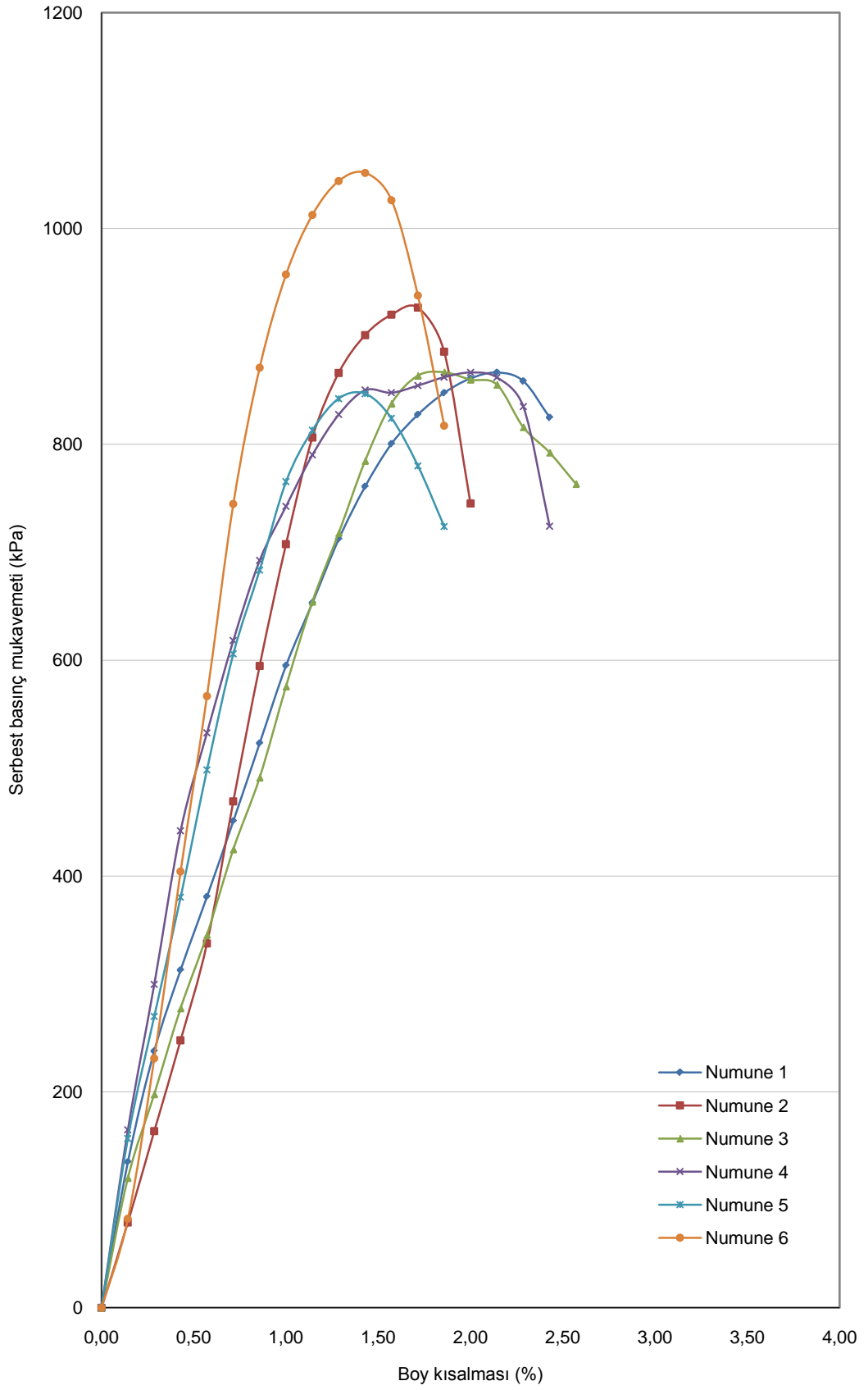


Tablo C.7: Doğal su muhtevasında 5% kireçli numunenin 7 günlük modifiye serbest basınç deneyi

Boy kısalma %	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,14	135,15	79,03	120,26	164,93	156,91	82,46
0,29	237,89	163,55	197,86	299,65	269,91	231,03
0,43	312,92	247,83	277,52	441,97	380,30	404,29
0,57	380,90	337,56	345,55	532,57	498,36	566,79
0,71	450,95	469,18	424,76	618,35	605,83	744,76
0,86	523,08	594,72	491,24	692,52	683,42	871,05
1,00	595,00	707,42	575,70	742,62	765,33	957,22
1,14	653,10	806,17	654,24	790,30	812,98	1012,54
1,29	712,17	866,15	717,83	827,65	842,37	1043,91
1,43	760,88	901,07	784,62	850,20	846,81	1051,44
1,57	800,42	920,09	837,68	847,84	824,13	1026,21
1,71	827,44	926,65	863,52	854,50	780,10	937,92
1,86	847,63	885,90	866,76	862,26	723,80	817,23
2,00	861,01	745,23	859,88	866,63		
2,14	866,49		855,26	862,00		
2,29	858,50		815,91	834,96		
2,43	824,79		792,33	724,07		
2,57			763,24			

ORTALAMALAR

q <sub>u</sub> (kPa)	904,13
c (kPa)	452,06



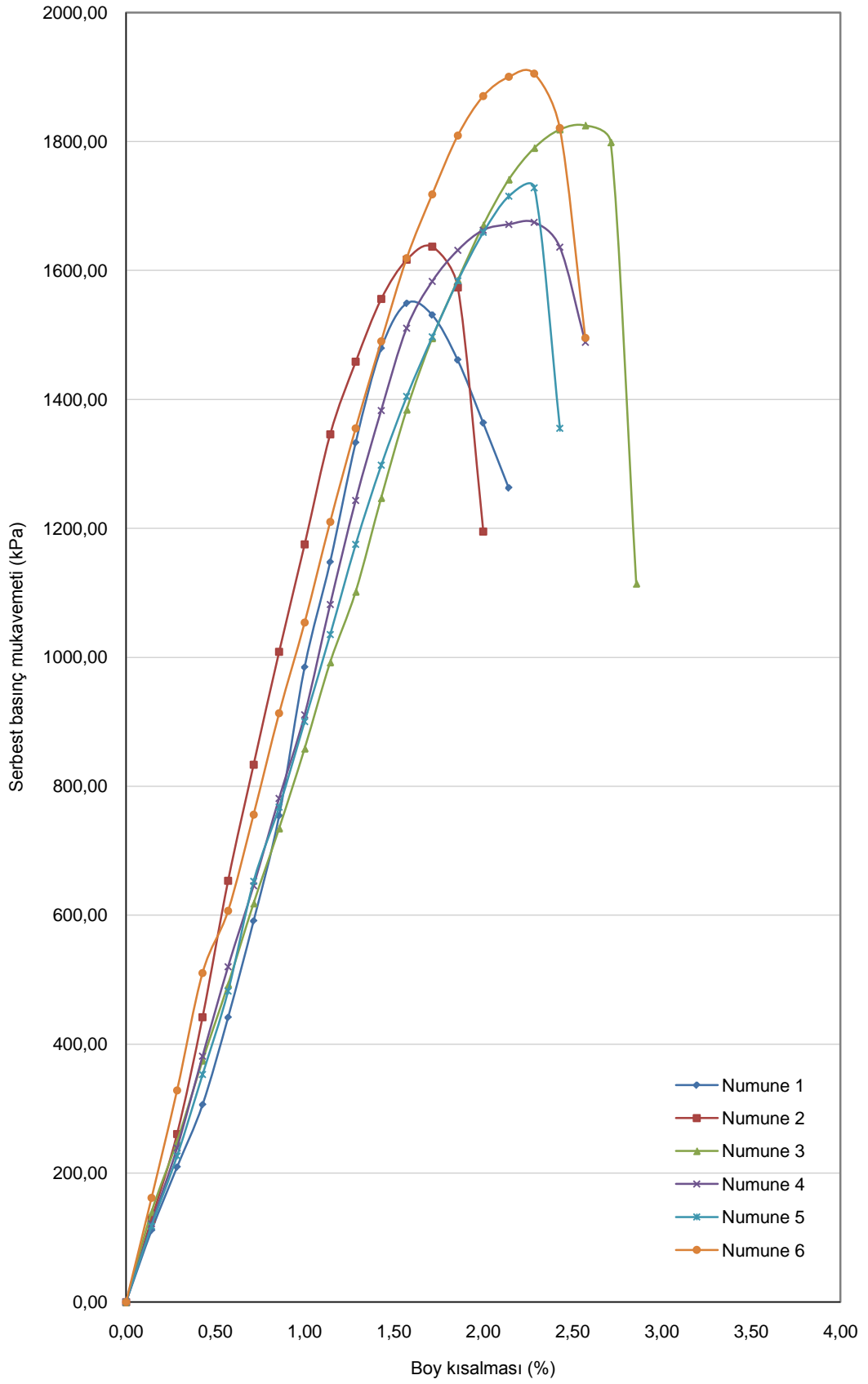
Şekil C.7:  $W_{doğal}$ 'da 5% kireçli numunenin 7 günlük modifiye proctor grafiği

Tablo C.8: Doğal su muhtevasında 5% kireçli numunenin 28 günlük modifiye serbest basınç deneyi

Boy kısalma %	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,14	135,15	128,28	139,73	121,40	117,97	161,49
0,29	237,89	260,76	249,32	239,03	226,45	328,24
0,43	312,92	441,97	374,59	381,45	352,89	510,50
0,57	380,90	653,46	492,66	520,03	482,40	606,70
0,71	450,95	833,58	618,35	645,69	652,52	756,15
0,86	523,08	1008,64	734,59	781,21	767,57	913,12
1,00	595,00	1175,24	858,44	910,67	900,45	1053,74
1,14	653,10	1345,89	992,13	1081,70	1035,21	1209,83
1,29	712,17	1458,30	1101,65	1243,18	1175,25	1355,27
1,43	760,88	1555,68	1247,03	1382,70	1297,91	1490,11
1,57	800,42	1616,65	1384,09	1510,53	1404,41	1618,91
1,71	827,44	1636,85	1494,81	1582,74	1497,06	1718,01
1,86	847,63	1573,68	1584,94	1631,09	1583,81	1808,95
2,00	861,01	1194,84	1670,31	1662,44	1659,07	1870,38
2,14	866,49		1740,83	1671,24	1715,01	1900,21
2,29	858,50		1789,84	1674,40	1728,20	1905,28
2,43	824,79		1818,56	1636,14	1355,25	1820,80
2,57			1824,84	1488,48		1495,18
2,71			1798,73			
2,86			1114,20			

ORTALAMALAR

q <sub>u</sub> (kPa)	1719,75
c (kPa)	859,87



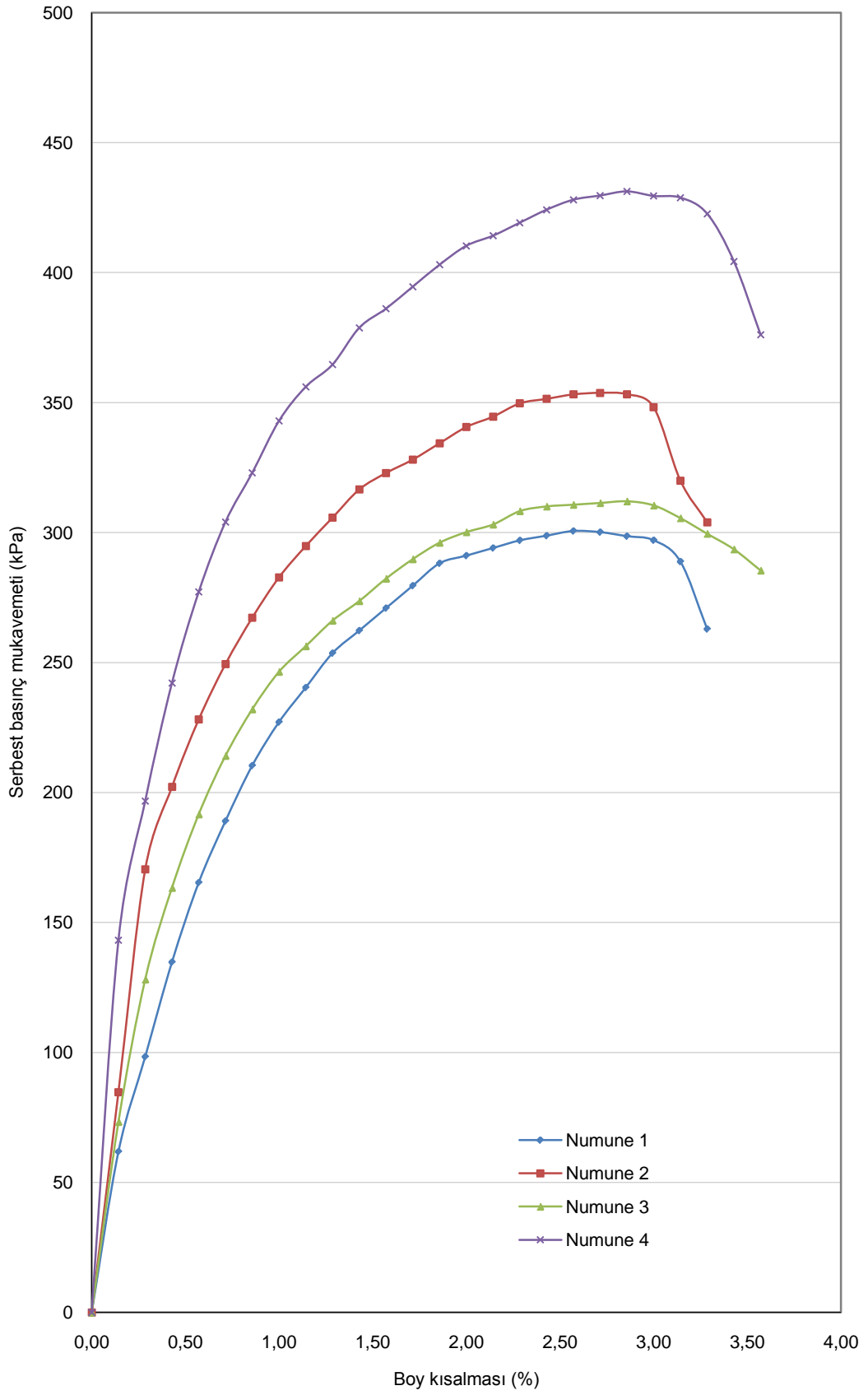
Şekil C.8:  $W_{doğal}$ 'da 5% kireçli numunenin 28 günlük modifiye proctor grafiği

Tablo C.9: Doğal su muhtevasında 5% sönmemiş kireçli numunenin anlık modifiye serbest basınç deneyi

Boy kısalma %	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,14	61,85	84,75	73,30	143,17		
0,29	98,36	170,41	128,09	196,71		
0,43	134,76	202,14	163,31	242,12		
0,57	165,36	228,08	191,59	277,12		
0,71	189,04	249,39	214,09	304,05		
0,86	210,37	267,23	231,98	322,95		
1,00	227,10	282,74	246,40	342,92		
1,14	240,38	294,80	256,25	356,03		
1,29	253,62	305,70	266,07	364,58		
1,43	262,30	316,56	273,60	378,75		
1,57	270,95	322,88	282,24	386,10		
1,71	279,57	328,05	289,72	394,56		
1,86	288,17	334,32	296,05	402,99		
2,00	291,12	340,58	300,12	410,27		
2,14	294,07	344,57	303,05	414,16		
2,29	297,00	349,67	308,21	419,16		
2,43	298,80	351,40	309,99	424,14		
2,57	300,60	353,12	310,66	427,99		
2,71	300,16	353,72	311,32	429,60		
2,86	298,60	353,20	311,98	431,19		
3,00	297,05	348,23	310,40	429,45		
3,14	288,84	319,95	305,50	428,82		
3,29	262,90	303,94	299,51	422,64		
3,43			293,53	404,29		
3,57			285,35	376,04		
3,71				332,41		

ORTALAMALAR

q <sub>u</sub> (kPa)	349,37
c (kPa)	174,69



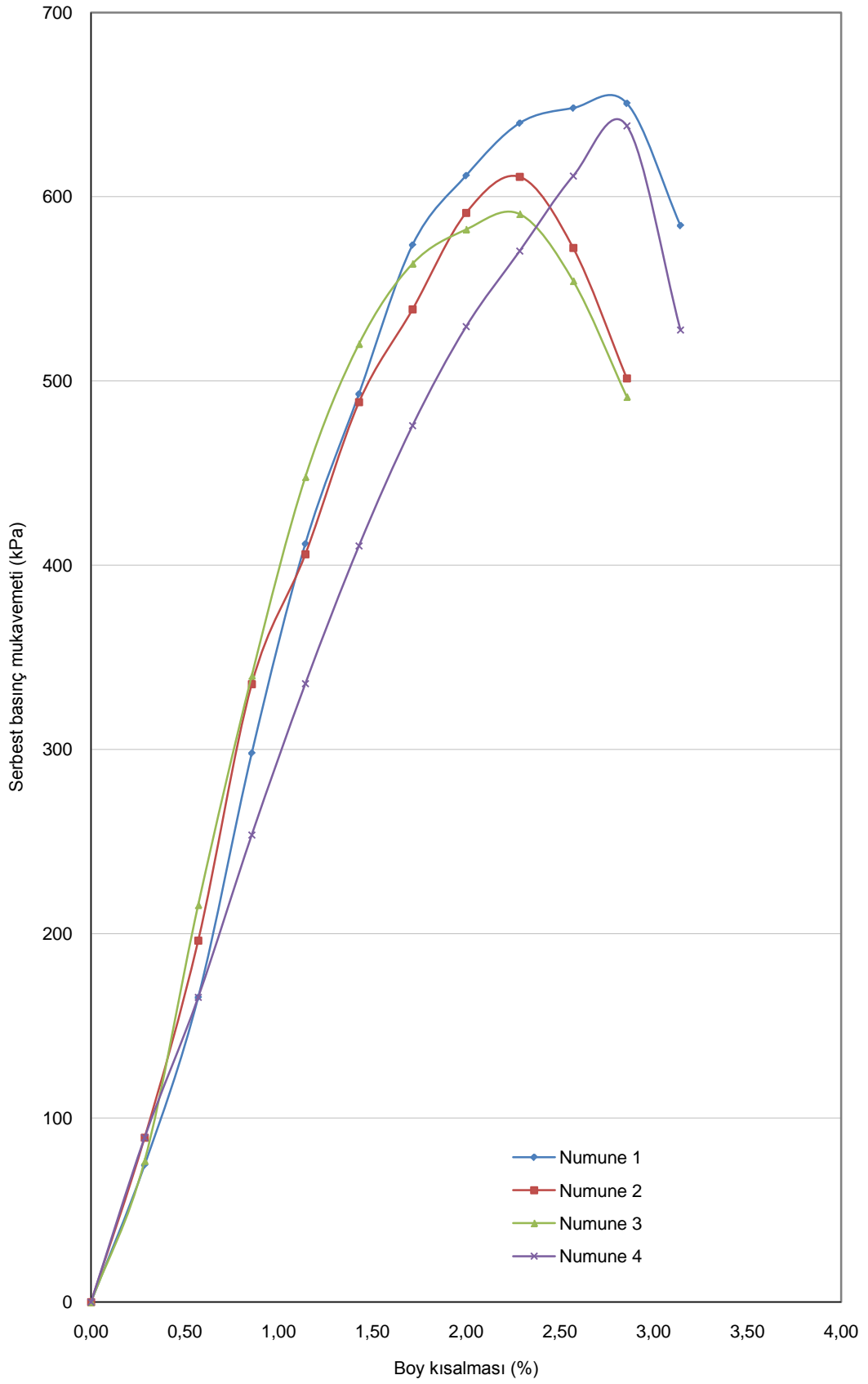
Şekil C.9:  $W_{\text{doğal}}$ 'da 5% sönmemiş kireçli numunenin anlık modifiye proctor grafiği

Tablo C.10: Doğal su muhtevasında 5% sönmemiş kireçli numunenin 1 günlük modifiye serbest basınç deneyi

	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
Boy kısalma %	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,29	74,34	89,21	76,63	89,21		
0,57	165,36	196,15	215,54	165,36		
0,86	297,93	335,46	340,00	253,58		
1,14	411,59	405,92	447,87	335,62		
1,43	492,93	488,41	520,07	410,40		
1,71	573,80	538,85	563,65	475,72		
2,00	611,47	591,24	582,25	529,42		
2,29	639,95	610,81	590,64	570,46		
2,57	648,14	572,15	554,27	611,26		
2,86	650,69	501,39	491,36	638,44		
3,14	584,34			527,69		
3,43						
3,71						
4,00						

ORTALAMALAR

$q_u$ (kPa)	622,64
$c$ (kPa)	311,32



Şekil C.10:  $W_{\text{doğal}}$ 'da 5% sönmemiş kireçli numunenin 1 günlük modifiye proctor grafiği

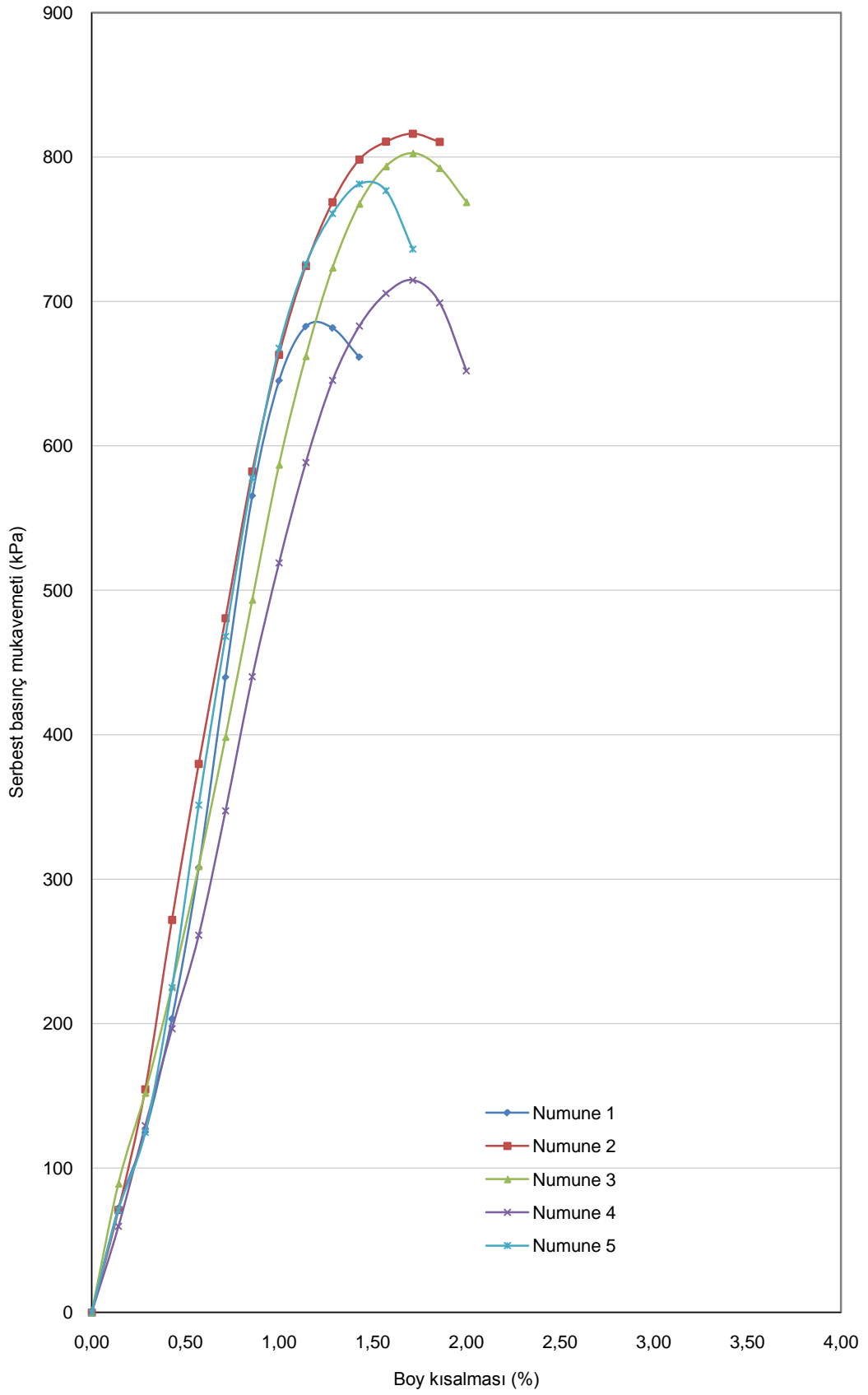


Tablo C.11: Doğal su muhtevasında 5% sönmemiş kireçli numunenin 7 günlük modifiye serbest basınç deneyi

<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>						
Boy kısalma %	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,14	72,16	71,01	89,34	59,56	71,01	
0,29	124,66	154,40	152,11	129,24	124,66	
0,43	203,29	271,81	226,13	196,43	224,98	
0,57	307,91	379,76	309,05	261,15	351,25	
0,71	439,57	480,56	398,57	347,33	468,04	
0,86	565,16	582,21	493,52	440,07	577,67	
1,00	644,96	663,13	587,05	518,92	667,67	
1,14	682,58	724,54	662,17	588,47	725,67	
1,29	681,60	768,78	723,49	645,37	760,85	
1,43	661,39	798,19	767,67	682,87	781,23	
1,57		810,58	793,65	705,59	776,71	
1,71		816,17	802,64	714,71	736,13	
1,86		810,48	792,47	699,04		
2,00			768,84	651,94		

ORTALAMALAR

q <sub>u</sub> (kPa)	759,47
c (kPa)	379,73



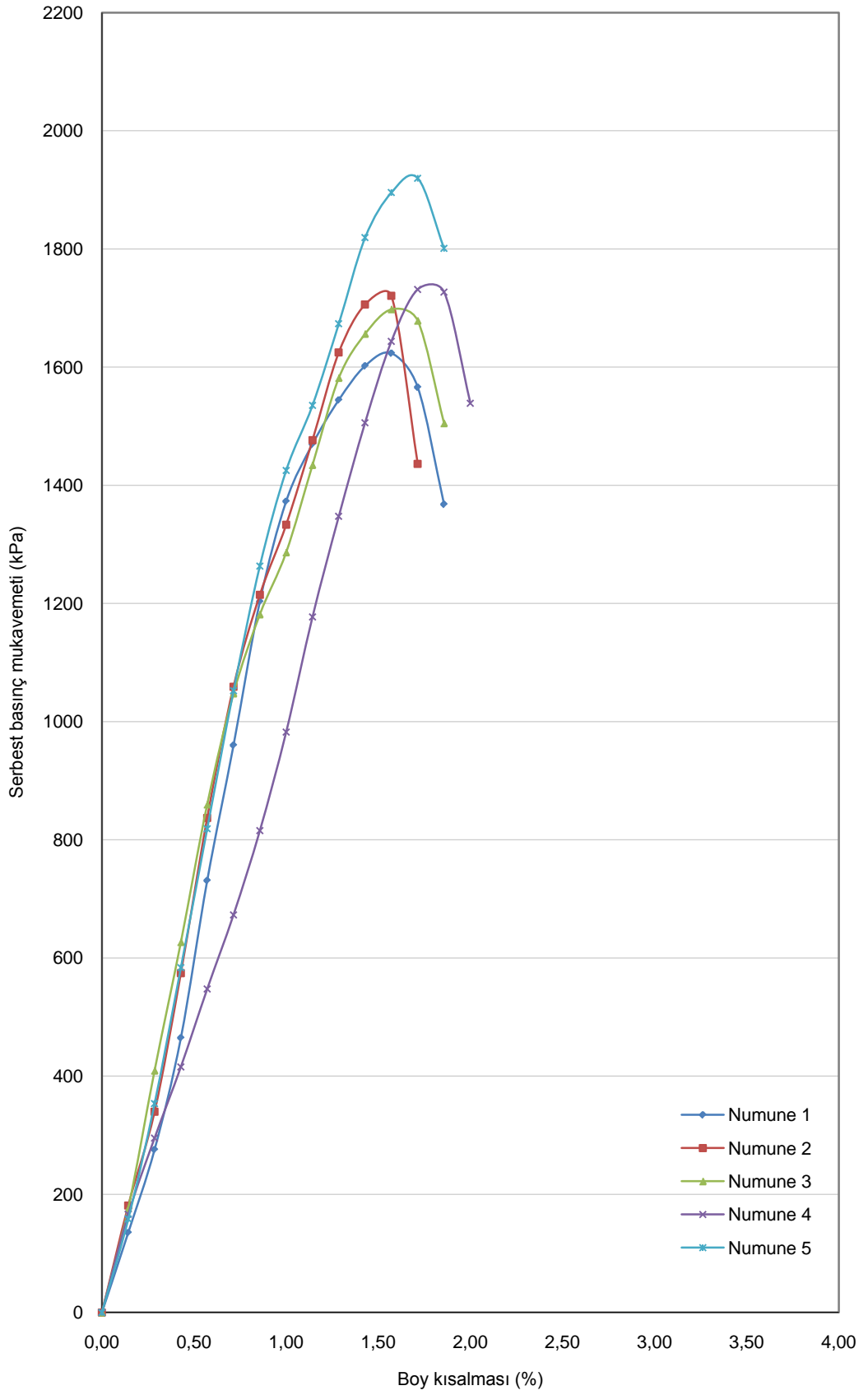
Şekil C.11:  $W_{\text{doğal}}$ 'da 5% sönmemiş kireçli numunenin 7 günlük modifiye proctor grafiği

Tablo C.11: Doğal su muhtevasında 5% sönmemiş kireçli numunenin 28 günlük modifiye serbest basınç deneyi

	<u>Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)</u>					
Boy kısalma %	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,14	135,15	180,96	176,38	166,07	158,06	
0,29	275,63	339,68	409,44	295,07	353,40	
0,43	464,82	574,45	626,99	415,71	583,59	
0,57	731,01	837,06	859,87	547,40	818,82	
0,71	959,99	1059,06	1047,67	673,02	1052,23	
0,86	1203,09	1214,46	1181,49	815,33	1263,36	
1,00	1372,82	1333,07	1286,52	982,21	1425,05	
1,14	1469,48	1476,29	1434,33	1176,95	1535,25	
1,29	1544,35	1624,74	1581,71	1347,34	1673,42	
1,43	1602,04	1706,05	1656,30	1505,94	1819,11	
1,57	1623,42	1720,51	1697,93	1643,74	1895,50	
1,71	1565,83	1436,19	1678,56	1731,54	1919,80	
1,86	1367,69		1505,02	1726,77	1801,07	
2,00				1538,80		

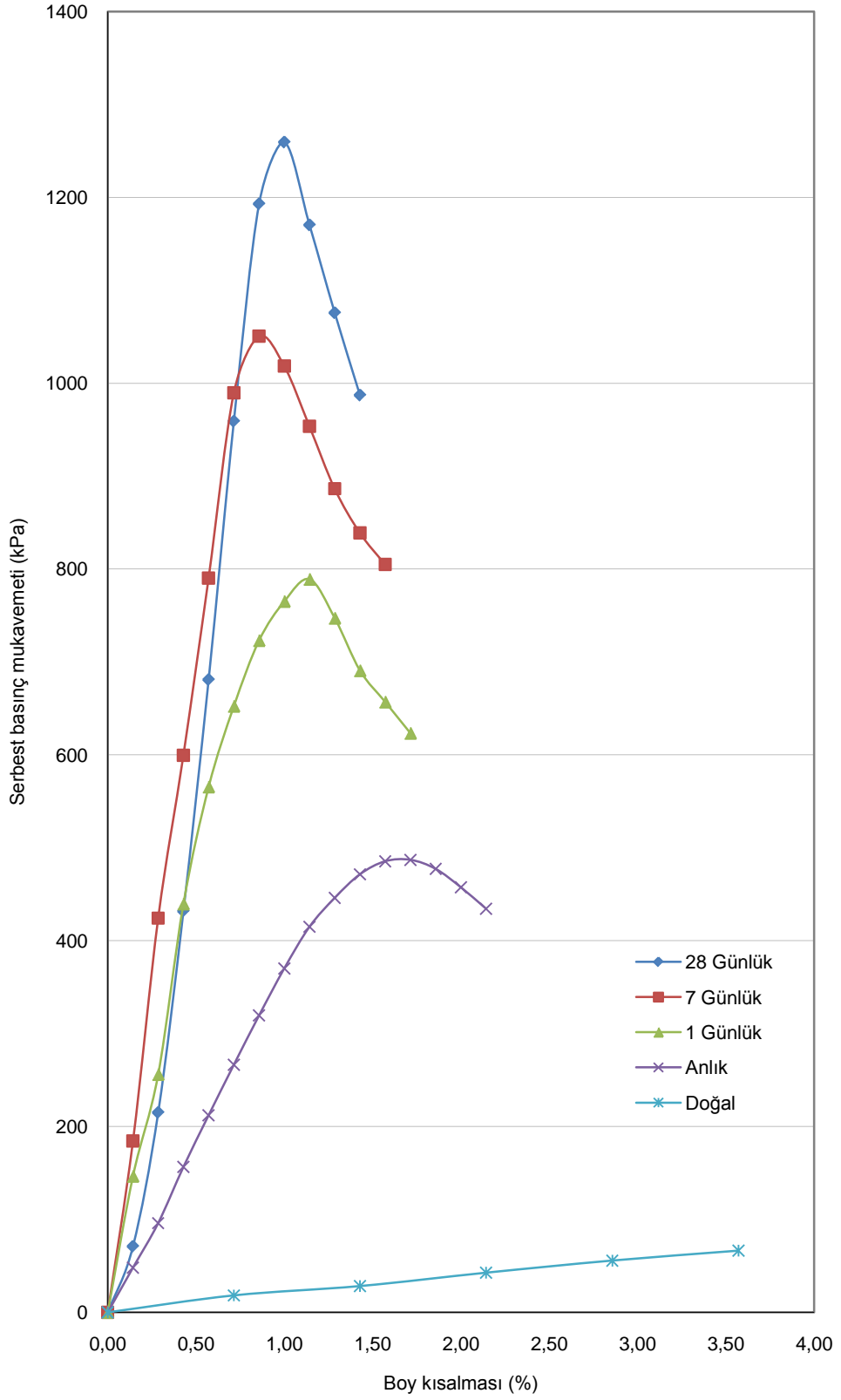
ORTALAMALAR

q <sub>u</sub> (kPa)	1738,64
c (kPa)	869,32

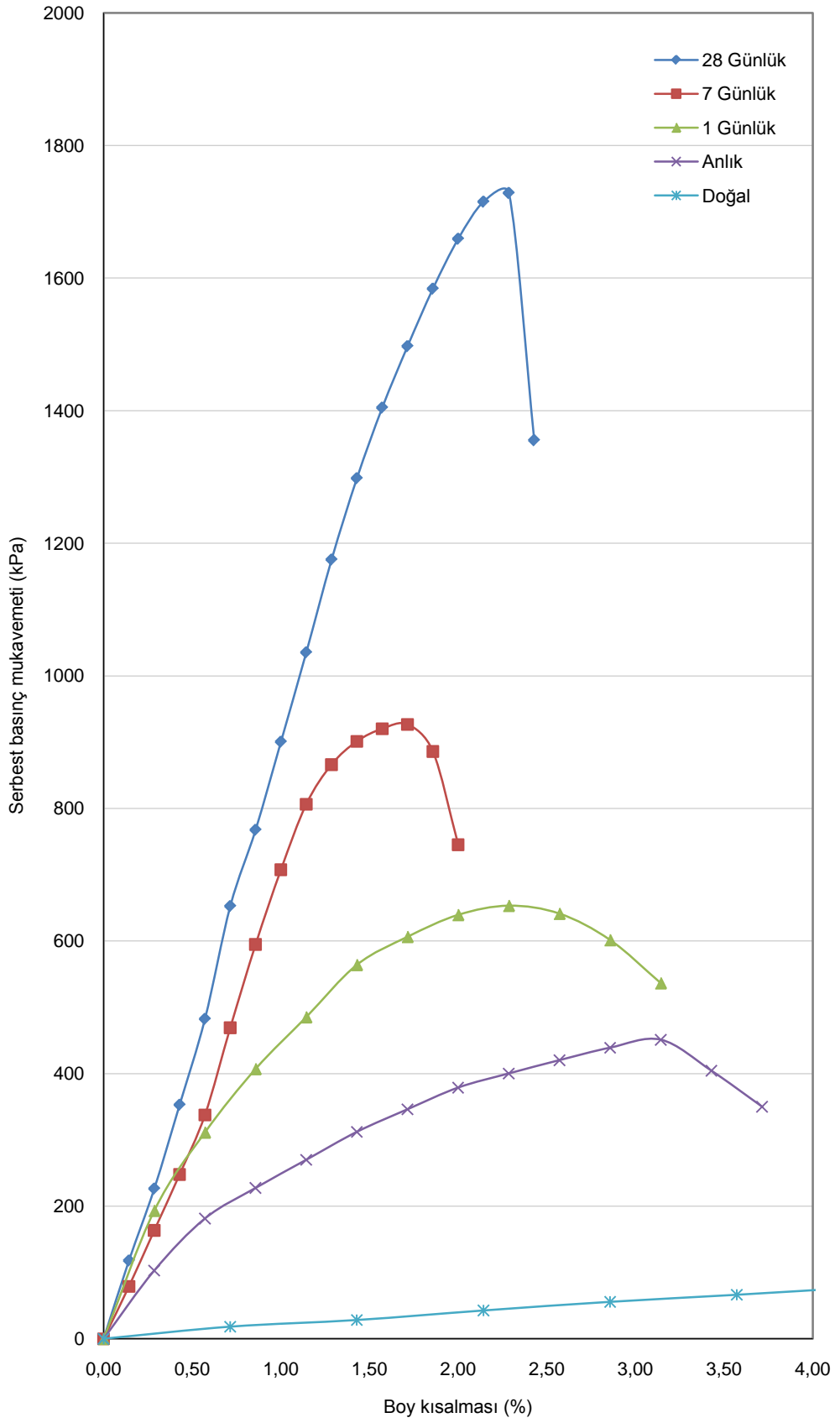


Şekil C.12:  $W_{\text{doğal}}$ 'da 5% sönmemiş kireçli numunenin 28 günlük modifiye proctor grafiği

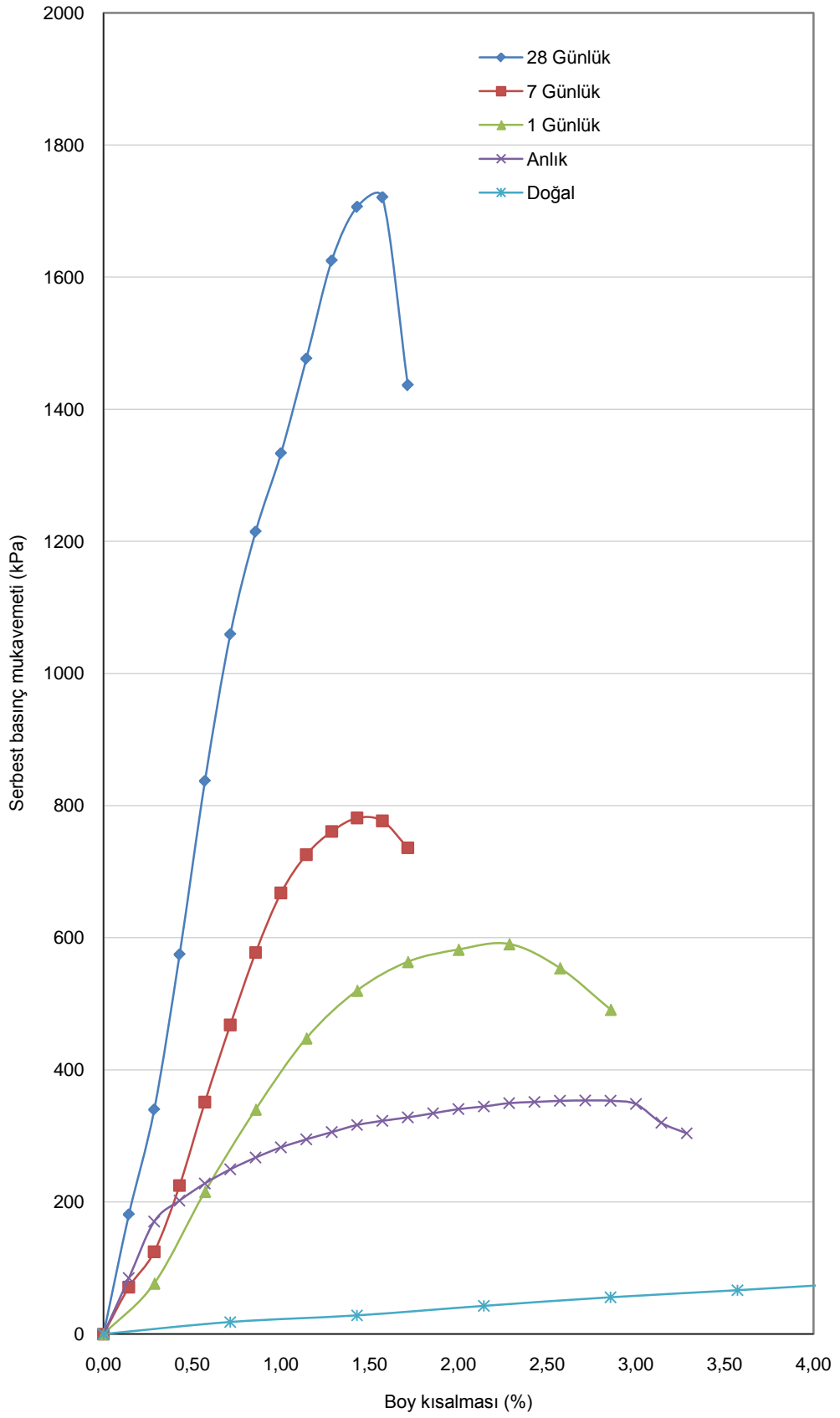
Ek D- Karşılaştırmalı serbest basınç grafikleri ( ortalama  $q_u$  değerine göre)



Şekil D.1:  $W_{opt}$ 'da 5% kireçli numunelerin modifiye proctor grafiği

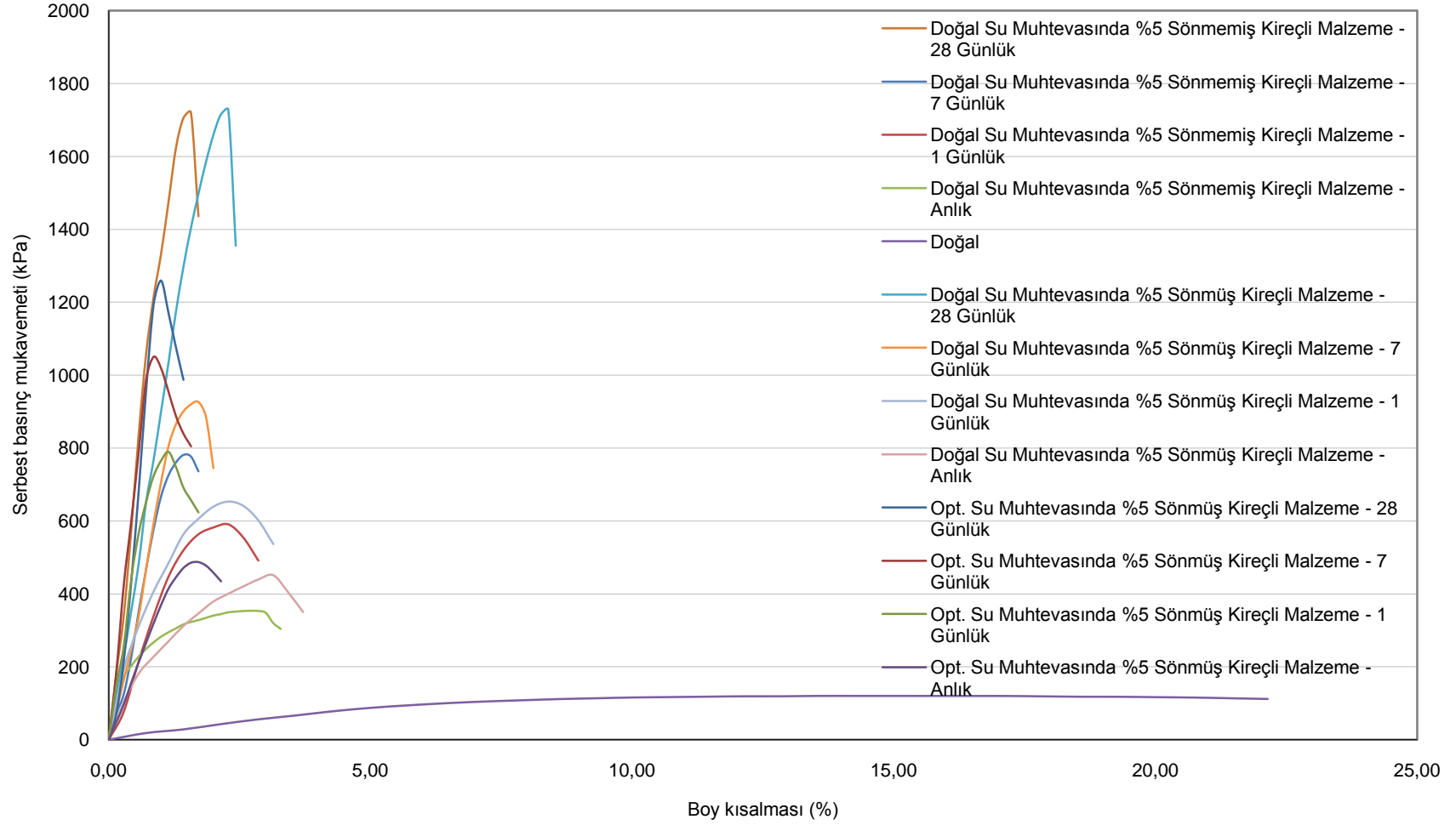


Şekil D.2:  $W_{doğal}$ 'da 5% kireçli numunelerin modifiye proctor grafiği



Şekil D.3:  $W_{doğal}$ 'da 5% sönmemiş kireçli numunelerin modifiye proctor grafiği

Serbest Basınç Deneyi - Modifiye Proctor - Opt. Su Muhtevası ve Kireçli Malzeme ( 28 Günlük )



Şekil D.4: Bütün deneylerin serbest basınç grafiği



## **ÖZGEÇMİŞ**

1984 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2002 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl yüksek öğrenime başladı. 2007 ile 2009 tarihleri arasında ErYapı İnşaat Tic. Taah. Ltd. Şti.'nde şantiye şefliği yaptı.