KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİMYASAL STABİLİZASYON TEKNİKLERİNİN BENTONİT ÜZERİDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

KUBİLAY KARACA

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİMYASAL STABİLİZASYON TEKNİKLERİNİN BENTONİT ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

KUBİLAY KARACA

Doç. Dr. Aydın KAVAK		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Doç. Dr. Utkan MUTMAN		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Dr. Öğretim Üyesi Erdinç KESKİN		
Jüri Üyesi,	**Kırklareli Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gerek üst yapı gerekse alt yapı olmak üzere tüm inşaat projelerinde karşımıza öncelikli olarak ilk çıkan ve çözmemiz gereken problemlerden biri zeminlerdir. Özellikle kil oranı yüksek bir zeminde yeterli yükün taşınamaması ve yüksek zemin oturmaları sonucunda üst yapının hasara uğraması gibi birçok sorun meydana gelmektedir. Bu çalışmada yüksek plastisiteli bentonit kilinin kireç ile stabilizasyonu sonucundaki mukavemet değerlerindeki artış göz önünde bulundurularak ve ilave olarak taşıma yükünü arttırarak deformasyonu azalmak amaçlı kireç karışımına farklı malzemeler eklenerek laboratuvar ortamında deneyler yapılmış, sonuçları incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen, çalışmalarıma yön veren, bana güvenen ve yüreklendiren danışmanım Sn. Doç. Dr. Aydın KAVAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan sevgili eşim Özlem KARACA, kızım Ayça KARACA, annem Gülseren KARACA, maddi manevi desteğini eksik etmeyen babam Mustafa KARACA 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Haziran - 2018 Kubilay KARACA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLO DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. ZEMİN STABİLİZASYONU 3
1.1. Yüzeysel Zemin Stabilizasyon Yöntemleri 4
1.1.1. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda alternatif yeni yöntemler 5
1.1.1.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu 5
1.1.1.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu 10
1.1.1.3. Polimer ile zemin stabilizasyonu 14
1.1.1.4. Silikon ile zemin stabilizasyonu 15
1.2. Zemin Stabilizasyonunda Uygulanan Laboratuvar Deneyleri 17
1.2.1. Yıkamalı elek analizi 18
1.2.2. Atterberg kıvam limitleri (Plastik limit ve likit limit deneyleri) 18
1.2.3. pH deneyi 20
1.2.4. Harvard Proctor deneyi 21
1.2.5. Serbest basınç deneyi 21
1.2.6. CBR deneyi 23
1.2.7. Enerji dağılım spektroskopisi 23
1.2.8. Taramalı elektron mikroskobu deneyi 23
1.2.9. X-ışını kırım deneyi 24
2. ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILAN MALZEMELER 25
2.1. Kireç 25
2.1.1. Kireç çeşitleri 25
2.1.1.1. Sönmemiş kireç özellikleri 25
2.1.1.2. Sönmüş kireç özellikleri 26
2.1.2. Kirecin kullanım alanları 26
2.1.2.1. Kirecin inşaat ve yapılardaki kullanımı 27
2.1.3. Kireç kullanım avantajları 27
2.2. Kil 28
2.2.1. Killerin mineralojik yapıları 28
2.2.2. Kil çeşitleri 30
2.2.2.1. Bentonit 30
2.3. Çimento 34
2.3.1. Çimento tarihi 34
2.3.2. Çimento bileşimi ve tipleri 35

2.3.3. Çimento türleri 37
2.3.3.1. Portland çimentosu 37
2.3.3.2. Yüksek fırın curüflu çimentolar 37
2.3.3.3. Harç çimentosu 38
2.3.3.4. Uçucu küllü çimento 38
2.3.3.5. Sülfata dayanıklı çimento 38
2.3.3.6. Erken dayanımı yüksek çimento 39
2.3.3.7. Katkılı çimento 39
2.3.4. Çimento kullanımının avantajları 39
2.4. Polimer 39
2.4.1. Polimer çeşitleri 40
2.4.1.1. Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması 40
2.4.1.2. Polimerlerin davranışlarına göre sınıflandırılması 41
2.4.1.3. Polimerlerin fiziksel yapılarına göre sınıflandırılması 41
2.5. Silikon 42
2.5.1. Silikonun elde edilmesi 42
2.5.2. Silikonun teknik özellikleri 43
3. MALZEME VE YÖNTEM 45
3.1. Doğal Su Muhtevasının ($W_{doğal}$) Bulunması 46
3.2. Özgül Kütle Tayini 46
3.3. Atterberg Kıvam Limitleri İle Optimum Kireç Değerinin Bulunması 46
3.4. Harvard Proctor Deneyi İle Optimum Su Muhtevasının Bulunması 47
3.5. Serbest Basınç Deneyi Numunelerinin Hazırlanması 49
3.6. Serbest Basınç Deneyi Numunelerinin Deney Sonuçları 50
3.6.1. W_{opt}' da bentonit malzemesinin serbest basınç grafiği 51
3.6.2. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesinin serbest basınç grafiği 55
3.6.3. Wopt' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %5 çimento karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği 59
3.6.4. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %7,5 çimento karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği 64
3.6.5. Wopt' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %4 silikon karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği 69
3.6.6. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %2 polimer karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği 74
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 81
KAYNAKLAR 84
EKLER 87
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 116
ÖZGEÇMİŞ 117

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Zemin parametrelerinin kireç oranı ile değişimi 8
Şekil 1.2. Kireç oranının serbest basınç mukavemeti üzerindeki 9
Şekil 1.3. Toprak parçacıklarının sudan şemsiye gibi önlenmesi 16
Şekil 1.4. Silikonlu ve silikonsuz toprağın su ile karıştırılması 16
Şekil 1.5. Casagrande aleti 18
Şekil 1.6. Plastik limit düzeneği 19
Şekil 1.7. Atterberg limit grafiği 20
Şekil 1.8. pH metre 21
Şekil 1.9. Hazırlanan numune kesiti ve serbest basınç grafiği 22
Şekil 1.10. Drenajsız serbest basınç grafiği 22
Şekil 1.11. CBR düzeneği 23
Şekil 2.1. Tetrahedron strüktür 29
Şekil 2.2. Oktahedron strüktür 29
Şekil 2.3. Montmorillonit mineralinin kesiti 31
Şekil 2.4. Bentonitlerin su ile temas ettiklerinde yapılarında oluşan değişim 33
Şekil 2.5 Çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri 36
Şekil 2.6. Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması 41
Şekil 3.1. Bentonit + %7,5 kireç karışımının modifiye proctor eğrileri 48
Şekil 3.2. Minyatür Proctor düzeneği 50
Şekil 3.3. Serbest basınç düzeneği 51
Şekil 3.4. Wopt ’daki bentonit malzemesinin anlık deney grafiği 52
Şekil 3.5. Wopt ’daki bentonit malzemesinin 7 günlük deney grafiği 53
Şekil 3.6. Wopt’daki bentonit malzemesinin 28 günlük deney grafiği 54
Şekil 3.7. Wopt’daki bentonit malzemesinin kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri 55
Şekil 3.8. Wopt’daki bentonit ve %7,5 kireç karışım malzemesinin anlık deney grafiği 56
Şekil 3.9. Wopt ’daki bentonit ve %7,5 kireç karışım malzemesinin 7 günlük deney grafiği 57
Şekil 3.10. Wopt’ daki bentonit ve %7,5 kireç karışım malzemesinin 28 günlük deney grafiği 58
Şekil 3.11. Wopt’daki bentonit ve %7,5 kireç karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri 59
Şekil 3.12. Wopt’daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazrılanan numunelerin anlık deney grafiği 60
Şekil 3.13. Wopt’daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği 61
Şekil 3.14. Wopt’daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği 62
Şekil 3.15. Wopt’daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği 63

Şekil 3.16. Wopt'daki bentonit ve %7,5 kireç ve %5 çimento karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri 64
Şekil 3.17. Wopt'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin anlık deney grafiği 65
Şekil 3.18. Wopt'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği 66
Şekil 3.19. Wopt'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği 67
Şekil 3.20. Wopt'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği 68
Şekil 3.21. Wopt'daki bentonit, %7,5 kireç ve %7,5 çimento karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri 69
Şekil 3.22. Wopt'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin anlık deney grafiği 70
Şekil 3.23. Wopt'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği 71
Şekil 3.24. Wopt'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği 72
Şekil 3.25. Wopt'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği 73
Şekil 3.26. Wopt'daki bentonit, %7,5 kireç ve %4 silikon karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri 74
Şekil 3.27. Wopt'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin anlık deney grafiği 75
Şekil 3.28. Wopt'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği 76
Şekil 3.29. Wopt'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği 77
Şekil 3.30. Wopt'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği 78
Şekil 3.31. Wopt'daki bentonit, %7,5 kireç ve %2 polimer karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri 79
Şekil 3.32. Tüm deney sonuçlarının 28 günlük kür süresince bulunan serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması 80
Şekil A. 1. Bentonit ve %7,5 kireç karışımının Harvard Proctor grafiği 89
Şekil B. 1. Deney türlerinin anlık kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması 112
Şekil B. 2. Deney türlerinin 7 günlük kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması 113
Şekil B. 3. Deney türlerinin 28 günlük kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması 114
Şekil B. 4. Deney türlerinin 28 günlük kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması 115

TABLO DİZİNİ

Tablo 1.1. Farklı zemin türlerine göre kireç karışım oranları 7
Tablo 1.2. Zemin tiplerine göre optimum çimento 13
Tablo 2.1. Kil minerallerinin ağırlığına göre kimyasal bileşimi 30
Tablo 3.1. Bentonit için değişik kireç oranlarındaki 47
Tablo 3.2. Serbest basınç mukavemetleri için hazırlanan numune bilgileri 49
Tablo A. 1. Bentonit + %7,5 kireç karışımının modifiye Harvard Proctor deneyi için hazırlanan numuneler 89
Tablo B. 1. Optimum su muhtevasında bentonit numunesinin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi 90
Tablo B. 2. Optimum su muhtevasında bentonit numunesinin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 91
Tablo B. 3. Optimum su muhtevasında bentonit numunesinin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 92
Tablo B. 4. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışım numunesinin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi 93
Tablo B. 5. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışım numunesinin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 94
Tablo B. 6. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışım numunesinin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 95
Tablo B. 7. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi 96
Tablo B. 8. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 97
Tablo B. 9. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 98
Tablo B. 10. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 99
Tablo B. 11. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi 100
Tablo B. 12. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 101
Tablo B. 13. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 102
Tablo B. 14. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 103

Tablo B. 15. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi 104
Tablo B. 16. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 105
Tablo B. 17. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 106
Tablo B. 18. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 107
Tablo B. 19. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi 108
Tablo B. 20. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 109
Tablo B. 21. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 110
Tablo B. 22. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi 111

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Å	: Angström, 10^{-10} metre
A	: Yüzey alanı
Al	: Alüminyum
C_c	: Sıkışma indisi
C_s	: Şişme indisi
C_a	: İkincil konsolidasyon katsayısı
C_c	: Eğrilik katsayısı
CH	: Yüksek plastisiteli kil
C	: Düşük plastisiteli kil
Cu	: Uniformluluk katsayısı
d	: Genişlik, (cm)
D_{10}	: Elekten geçen %10'a karşılık gelen çap, (m)
D_{30}	: Elekten geçen %30'a karşılık gelen çap, (m)
D_{60}	: Elekten geçen %60'a karşılık gelen çap, (m)
h	: Yükseklik, (cm)
kPa	: Kilopascal
P	: Düzgün yayılı yük, (kN/m^2)
qu	: Serbest basınç mukavemeti
R. C.	: Rölatif kompaksiyon
Si	: Silisyum
w	: Su muhtevası
$W_{doğal}$	: Doğal su muhtevası
W_{opt}	: Optimum su muhtevası
τmak	: Kayma gerilmesi
φ	: İçsel sürtünme açısı
σ	: Arazideki jeolojik gerilme
σ'	: Efektif Gerilme
Δu	: Boşluk suyu basıncı değişimi
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı

Kısaltmalar

(C_2SHx, $C_3S_2H_x$)	: Hidrate kalsiyum silika
(C_3AHx, C_4AH_x)	: Hidrate kalsiyum alümin
$2CaO.SiO_2C_2S$	: Dikalsiyum silikat
$3CaO.Al_2O_3C_3A$	: Trikalsiyum alüminat
$3CaO.SiO_2$ C_3S	: Trikalsiyum silikat
$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3C_4AF$	: Tetrakalsiyum alüminoferrit

Al_2O_3	: Alümünyim oksit
C_2S	: Dikalsiyum silika
C_3A	: Trikalsiyumalümin
C_3S	: Trikalsiyum silika
C_4A	: Tetrakalsiyumalumino-ferrit
$Ca(OH)_2$	: Sönmüş kireç
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyumoksit (sönmemiş kireç)
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
E.Y.Ç.	: Erken dayanımı yüksek çimento
Fe_2O_3	: Demir oksit
K.B.H.A.	: Kuru birim hacim ağırlık
K.Ç.	: Katkılı çimento
kPa	: Kilopascal
LL	: Likit limit
M.K.B.H.A.	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
$MgCO_3$	: Magnezyum karbonat
MgO	: Magnezyum oksit
PÇ	: Portland çimentosu
PI	: Plastisite indisi
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
PL	: Plastik limit
S.E.M	: Taramalı elektron mikroskobu
S.D.Ç	: Sülfata dayanıklı çimento
SiO_2	: Silisyum dioksit
U.K.Ç	: Uçucu küllü çimento
X.R.D	: X-ray difraksiyon spektroskopisi
Y.F.Ç	: Yüksek fırın cürufunun portland çimentosu

KİMYASAL STABİLİZASYON TEKNİKLERİNİN BENTONİT ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit kilinin kireç ile stabilizasyonu sonucunda meydana gelen serbest basınç mukavemetindeki artışlar incelenmiştir. Sonrasında ise kireç ile stabilizasyonu yapılmış olan bentonit kilinin, ek olarak çimento, polimer ve silikon malzemeleri ile ayrı ayrı ve önceki çalışmalarda belirlenen oranlar ile stabilizasyon çalışmaları incelemiştir. İlk olarak bentonit kili üzerinde Atterberg kıvam limit deneyleri yapılmıştır. Sönmüş kireç kullanılarak yapılan %7,5 kireçli deney sonuçları ile bentonit deney sonuçları karşılaştırılmıştır. 28 günlük kür süresi sonunda mukavemetlerde 123,84 kPa'dan 843,33 kPa'a artışlar görülmüştür. Bentonit kili ve %7,5 kireç karışımına sahip malzemenin, Harvard Proctor deneyi uygulanarak optimum su muhtevası tespit edilmiştir. Bentonit kili ve %7,5 kireç karışımına ilave olarak sırasıyla %5 ve %7,5 oranında çimento, %4 oranında silikon ve %2 oranında polimer malzemesi karıştırılarak modifiye proctor düzeneğinde en az 3'er adet optimum su muhtevasında hazırlanan tüm numuneler anlık, 1 günlük ve 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra serbest basınç deneyleri yapılmış tüm numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılmalı tabloları hazırlanmıştır. 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinde sırası ile bentonit kil numunesi optimum su muhtevasında %7,5 kireç ilavesi sonucunda 123 kPa'dan 843 kPa 'a yükselmiştir. Daha sonrasında bentonit ve %7,5 kireç karışımı, çimento ilaveleri sonucunda 952 kPa 'a kadar serbest basınç mukavemetinde yükselme meydana gelmiştir. %4 silikon ilavesi sonucunda 1759 kPa ve %2 polimer ilavesinde sonucunda ise 2117 kPa 'a ulaşmıştır. Kireç katkılı numunelerde doğal bentonite oranla boy kısalma oranları %12 'den %1,6 'ya kadar azalmalar meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bentonit, Çimento, Kireç, Silikon, Stabilizasyon.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CHEMICAL STABILIZATION TECHNIQUES ON BENTONITE

ABSTRACT

In this work, unconfined compressive strength increases that occurs between stabilization of bentonite clay with high plasticized features and lime is observed. Afterwards bentonite clay that was stabilized with lime, was observed for its stabilization in different and separate ratios with cement, polymer and silicon materials. That has been conducted, Attenberg limit experiments are done over the bentonite samples. In addition to that, slacked lime is used as additive and the results are compared with 7,5% clayed optimized water contents in and water contents with natural strength. As a result of these experiments, it was found out that clayed added samples which was cured for 28 days had their unconfined compressive strength values increased from 123,84kPa to 843,33kPa. Bentonite and 7,5% Lime material had it's W_{opt} determined with Harvard Proctor experiment. In addition to bentonite clay and 7,5% lime blended mixture respectively 5% and 7,5% cement, 4% silicon and 2% polymer added to at least 3 water content samples. All these samples had their unconfined compressions strength tests in modified proctor setting instantaneous, after completing their 1 day,7 days and after 28 cure days. With the addition of 7,5% lime the 28 days cured optimum water content had it's unconfined compression strength raised from 123kPa to 843kPa. Afterwards with the addition of bentonite, 7,5 lime mixture, cement the unconfined compression strength raised to 952kPa. With the addition of 1759kPa and 2% polymer the figures reached to 2117kPa. Also in these experiments Sample longitudinal construction is decreased from 12% to 1,6%.

Keywords: Bentonite, Cement, Lime, Silicon, Stabilization

GİRİŞ

Gerek üst yapı gerekse alt yapı olmak üzere tüm inşaat projelerinde karşımıza öncelikli olarak ilk çıkan ve çözmemiz gereken problemlerden biri zeminlerdir. Farklı zeminler değişken özelliklere sahip olduğu gibi doğal koşullar taşıma gücünün azalmasına sebep olacağı gibi tüm zemin mukavemet ve diğer özelliklerinde değişikliklere sebep olabilir.

Herhangi bir inşaat projesinde, ilk adım arazide karşılaşılacak olan zeminin özelliklerinin kapsamlı ve doğru bir şekilde belirlenmesidir. Proje sahasında, yapılacak çalışmaya bağlı olmakla birlikte, zemin özellikleri her zaman mühendislik açısından uygun olmayabildiği gibi ulaşım ve yol gibi yapılarda birçok problemli zeminin üzerinden geçilmesi, yapıların imalatı sırasında ise kullanılması gerekmektedir. Problem teşkil eden zeminlerin değiştirilmesi veya inşaat yerinin değiştirilmesi çözüm olarak düşünülebilse bile ekonomik, teknolojik ve uygulanabilirlik gibi nedenlerden ötürü bu çözümler uygulanamamaktadır [1]. Bu gibi durumlarda mevcut zeminin değiştirilme imkanı yoksa sorunlu olarak görülen zeminlerin stabilizasyon gibi taşıma gücü, mukavemet ve tüm özelliklerini değiştiren iyileştirme amaçlı çalışmalara başvurulmalıdır.

Zeminler üzerine inşaa edilen yol veya yapılar zemin özelliklerinden tamamıyla etkilenmektedirler [2]. Zeminlerin kaya ve topraktan oluştuğu kabulünü göz önünde bulundurursak kaya zeminlerinin özellikleri kontrol edildiğinde mukavemetleri çok yüksek fakat sıkışabilirlik ve inşaat yapımında hafriyat sırasında problem teşkil etmektedir. Toprak zeminler ile karşılaştırıldıklarında daha az problem teşkil etmektedirler. Kaya zeminler dışında toprak zeminlerin taşıma kapasitesini arttırmak, konsolidasyonu hızlandırmak, geçirimliliği azaltmak, kayma mukavemetini arttırmak ve şişme/kabarma gibi çevre etkilerini azaltmak amacıyla kireç, çimento, polimer veya silikon gibi bazı katkı maddeleri kullanılarak stabilizasyon işlemleriyle iyileştirilmesi mümkündür.

Stabilizasyon teknikleri 1900'lü yıllarda gerçek anlamda kullanılmaya başlayan bir mühendislik olayıdır. Günümüzde birçok yeni yöntem uygulanmış ve niceleri geliştirilmeye devam edilmektedir. Nüfus artışlarından dolayı yapı alanlarının yetersiz olmasından ve ihtiyacı karşılamayıp yapı boyutlarının artmasından dolayı sağlam zemin bölgelerinin ihtiyacı artmıştır. Ayrıca gelişmesi ile doğru orantılı bir şekilde stabilizasyon teknikleri de gelişmiştir. [2].

Bu çalışmada yüksek plastisiteli bentonit kiline kireç karışımı yapılarak zemin özelliklerinde oluşan olumlu sonuçlar incelenmiştir. Kireç ile yapılan deneyler sonrasında kireçli karışımlara çimento, silikon ve polimer malzemeleri karıştırılarak mukavemetteki değişimler gözlemlenmiştir.

Laboratuarda Atterberg limitleri kullanılarak kireç oranları belirlenmiş, Harvard Proctor deneyleri kullanılarak optimum su muhtevaları tespit edilmiş ve tüm zemin numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda mukavemet artışları gözlemlenmiştir.

Bentonit numunesi, hem karışım olmadan doğal hali ile hem de sönmüş kireç karışımı yapılarak sonrasında sırasıyla belirlenen oranlarda çimento, polimer ve silikon kullanılarak serbest basınç testleri yapılmıştır. Tüm sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Her bir karışımdan en az 3' er tane olmak kaydı ile hazırlanan tüm numuneler anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutularak testleri yapılmıştır. Sonunda ortalama serbest basınç mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır.

1. ZEMİN STABİLİZASYONU

Doğal afetler göz önünde bulundurulduğunda zemin özellikleri, yapılara temel oluşturma adına eksik kaldığı tespiti yapılmıştır. Özellikle killi ve siltli zeminlerde yapı imalatında oldukça zorluk çekilmektedir. Mukavemetleri değerlendirildiğinde yapılar için elverişsiz olmakla beraber, yapı imalatlarına başlandığında birden faza olumsuz koşul içermektedirler. İnşaa edilmesi planlanan yapının tüm bu zeminlerin olumsuz özelliklerini güçlendirme işlemleri zemin iyileştirmesi adını almaktadır.

Tüm zemin iyileştirme yöntemleri mekanik yöntemlerle zemin boşluklarının azaltılması veya bazı karışımlar ile zemin boşluklarının azaltılması olarak iki şekilde incelenebilir. İki yöntemde aşağıdaki amaçlar doğrultusunda yapılmıştır;

- Toplam oturmayı azaltarak konsolidasyonu hızlandırmak,
- Zayıf zeminlerin mukavemetlerini artırmak,
- Permeabilite düşürülerek geçirimsizliğin arttırılması,
- Dolgu ve şevlerde çökmeyi engelleyerek stabilitenin sağlanması,
- İstinat duvarlarında destek yapılarak göçükleri engellemek,
- Sıvılaşma riskini azaltmak
- Doğal afetler gerçekleşmeden önce önlemler alınarak can ve mal kaybını azaltmak.

Zemin iyileştirme yöntemlerinde zaman, maliyet ve uygulanabilirlik gibi özellikler ele alındığında;

- Mevcutta bulunan problemin türüne,
- Güçlendirilmesi gereken zemin tabakasının derinliğine,
- Zemin profili özelliğine (Granülometri kıvam, aşırı konsolidasyon oranı vb.)

göre değişkenlik gösterebilir.

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulama açısından kontrol edildiğinde 3 şekilde incelenebilir;

i. İnşaat aşaması sırasında uygulanan geçici kabul edilen iyileştirme yöntemleri,
ii. Herhangi bir karışım uygulanmadan kalıcı olarak yapılan iyileştirme yöntemleri,
iii. Karışım uygulanarak kalıcı iyileştirme yöntemleri.

Tüm zemin iyileştirme yöntemlerinde en nemli faktör uygulama derinliğidir. Aşağıda uygulama derinliğine göre zemin iyileştirme yöntemleri belirtilmiştir;

- Derin zemin stabilizasyonu
- Yüzeyse uygulanan zemin stabilizasyonu

1.1. Yüzeysel Zemin Stabilizasyon Yöntemleri

Üst yapı yüklerinin fazla olmadığı yapılarda, demiryolu ve kara yolu gibi yapılarda da yüzeysel zemin stabilizasyon yöntemlerinin kullanımı hem ekonomik hem de uygulanabilirlik açısından önem teşkil etmektedir. Derin zemin stabilizasyonunun gerekli olmadığı bu gibi uygulamalarda zemin yüzeyinden onlarca metre derinliklerde etkili olması yerine yüzeysel zemin iyileştirme yapılarak mukavemet artışı yapılabilmektedir.

Derin zemin stabilizasyonların sırasında karşılaşılan maliyetler ve uygulama zorluğu nedeni, yüzeysel zemin stabilizasyon tekniklerinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Bu yöntemler ilk olarak zeminlere çeşitli katkı maddeleri karıştırılarak uygulanmış olmakla beraber herhangi bir katkı maddesi kullanılmadan da uygulamaları bulunmaktadır. Yüzeysel zemin stabilizasyon yöntemlerini kontrol edecek olursak bazıları şunlardır;

- Dinamik kompaksiyon
- Ön yükleme (sürşarj) yöntemi
- Zemin yer değiştirilmesi (kontrollü dolgular)
- Geosentetikler ile güçlendirme
- Alternatif yeni yöntemler

1.1.1. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda alternatif yeni yöntemler

İnşaat mühendisliği yapıların oluşturulabilmesi için zemin seçimleri oldukça zorlaşmıştır. Ulaşım yapılarında farklı özeliklere sahip zeminlerden geçilmesi karşılaşılan zayıf zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunu gerektirir. Mevcutta kullanılan yüzeysel zemin stabilizasyonlarının yüksek maliyetlere mal olması sebebiyle ve sağladıkları avantajları yükselmek amaçlı ile alternatif malzemeler ile zemin stabilizasyon tekniklerinin araştırma yoluna gidilmiştir.

Son yıllarda farklı malzemeler üzerine birçok araştırma yapılmış ve ürün yelpazesine her seferinde yeni malzemeler eklenmiştir. Bu malzemelere örnek olarak sanayi atığı olan pirinç kabuğu külü, araba lastiği, metal cürufu, uçucu kül gibi sanayi atıkları ile beraber kireç, çimento, silikon veya polimer gibi yapı malzemeleri verilebilir. Uzun yıllardır zeminlerin iyileştirilmesinde ve inşaat yapılarının birçok alanında yer altı ve yer üstü yapılarında bu malzemeler kullanılarak birçok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Tüm bu çalışmalardaki temel gaye yüksek maliyetleri düşürerek sanayi atıklarını güvenilir bir şekilde geri dönüşümünü sağlayarak ortadan kaldırmaktır. Tüm dünyadaki sanayi atıklarının ortadan kaldırılması gibi önemli bir konu ile ilgili yapılan bu çalışmalar örnek teşkil etmektedir. Geoteknik mühendisliği ise tüm bu maddelerin ve atıkları kullanarak zemin iyileştirmelerinde kullanımı sağlamakta ve gelişimini sürdürmektedir.

1.1.1.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu

Zeminlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini arttırmak amaçlı kireç ile karıştırılarak yapılan ve mukavemet artışı sağlanarak durabilitesinin iyileştirme işlemlerine kireç stabilizasyonu denir. Yol kaplamaları altında ve yapılar için sağlam bir temel tabakası yaratması uğruna zemin malzemesinin kireç ile karıştırılarak kullanılması işlemi kireç stabilizasyonudur [3].

Kireç stabilizasyonu sonucunda ince daneli ve killi zeminlerde iyileşmeler meydana gelir. Kireç, şişme-kabarma potansiyeli azaltarak işlenebilirliği arttırarak ve mukavemeti iyileştirmede montmorillonit, illit ve kaolinit gibi kil çeşitlerinde oldukça etkili bir malzemedir. Kireç zemin kompaksiyonu sırasında su oranını ve zemin türünün hacim değiştirme potansiyelini de azaltmaktadır [4].

Kireç stabilizasyonunda en çok sönmüş kireç olarak ($Ca(OH_2)$), sönmemiş kireç olarak (CaO) ve yüksek kalsiyumlu kireç olarak ise ($CA(OH)_2$.MgO ve CaO.MgO) kullanılmaktadır. Son yıllarda her ne kadar kireç stabilizasyonunda en çok sönmüş kireç kullanılsa da 25 yıl içerisinde sönmemiş kireç kullanımında artışlar görülmektedir [4].

İlk yıllarda yapılan çalışmalarda uygun kireç karışım oranının %1 ile %3 arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu oranlardan fazla yapılan karışımlarda mukavemet dayanımının arttığı plastisite indisinin değişmediği kanısına varılmıştır. Fakat diğer yıllarda yapılan çalışmalar kontrol edildiğinde kullanılan kil malzemesinin kuru ağırlığının %3 ile %8 oranında yapılan kireç karışımlarının daha verimli olduğu kanısına varılmıştır. Tüm bu çalışmalardaki genel amaç 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemetinde 0,34 MPA (50psi) 'lık bir artış sağlanması gerektiği tespit edilmiştir[4].

Kireç stabilizasyonu sonunda eklenen kireç ile likit limit, plastisite indisi maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve şişmeyi düşürdüğü, optimum su muhtevasını, mukavemeti ve plastik limiti arttırdığı belirlenmişti.

Zemine yeterli ölçüde kireç ile belirli oranlarda su eklenerek oluşan tepkime ile kireç stabilizasyonu gerçekleşmektedir. Farklı zemin türlerine göre kireç karışım oranları Tablo 1.1. 'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Farklı zemin türlerine göre kireç karışım oranları [6].

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

Tabloya göre iyi bir kireç stabiliazsyonu için %5 ile %10 oranı arasında yapılan kireç karışımları gerekmektedir. %2 ile %3 oranları arasında yapılan kireç karışımları ise torak zeminlerin iyileştirilmesinde ve işlenebilirliğini geliştirmesinde önemli rol oynayabilir [1, 7].

Kireç stabilizasyonu sonucunda CBR değerlerinde artış olmakta, plastik limit artmakta, likit limit ise düşmekte, proctor eğrisi düzleşmekte, optimum su muhtevası artmakta ve proctor yoğunlukları düşmektedir. Uzun kür dönemi sonucunda ise CBR değerleri daha da artmakta, serbest basınç, kayma mukavemetleri ve çekme gerilmeleri artmaktadır.

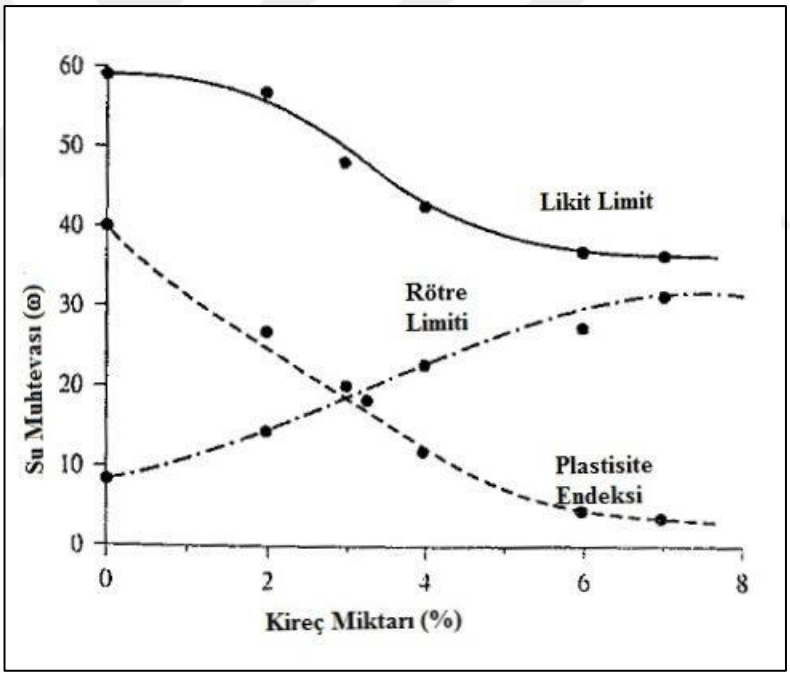
Kısa dönemde ve uzun dönemde olmak koşulu ile iki şekilde kontrol edecek olursak kısa dönemde;

- Proctor yoğunlukları düşmektedir.
- Plastik limit artmaktadır.
- Likit limit düşmektedir.
- Proktor eğrisi düşmektedir.
- CBR değerlerinde ise artış meydana gelmektedir.

Uzun kür dönemi sonucunda ise;

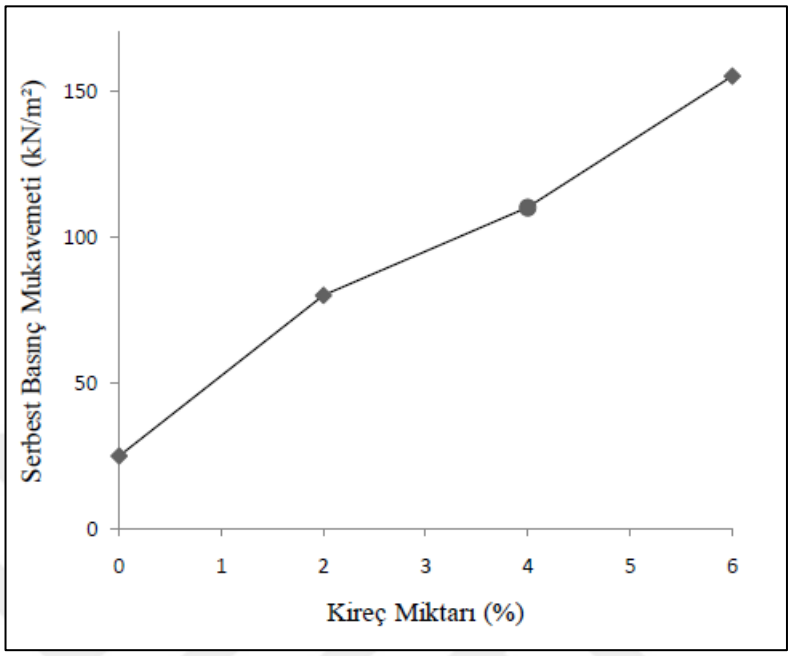
- CBR değerleri kısa dönem kür süresine göre daha da artmaktadır.
- Serbest basınç mukavemeti artmaktadır.
- Kayma mukavemeti artmaktadır.
- Çekme gerilmeleri artmaktadır.
- Zeminlerde şişme ve büzülmeye karşı stabilite artmaktadır.
- Son olarak don etkisine karşı dayanıklılık artmaktadır [8].

İyileştirme yapılacak zemin içerisine iyileştirme amaçlı katılan kireç oranının artmasıyla plastisite indisindeki ve likit limitlerdeki değişimler Şekil 1.1.'de görülmektedir. Kireç oranının %2 ile %3 kısımlarında iyileştirmeye başladığı %6 ile %8 oranları arasında ise en iyi dereceye ulaştığı görülmektedir [9, 10].



Şekil 1.1. Zemin parametrelerinin kireç oranı ile değişimi

Şekil 1.2.'de görüldüğü üzere kireç stabilizasyonunda kireç oranının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir [11].



Şekil 1.2. Kireç oranının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi [11].

Kireç stabilizasyonu 3 farklı şekilde yapılabilir;

i. Laboratuvar deneyleri sonucunda karışıma katılacak olan kireç oranları belirlenerek sahada su katılır ve zemin sıkışması sağlanır.
ii. İyileştirme yapılacak zemin ve belirlenen kireç oranı ile birlikte su plentte hazırlanarak sahaya serilir ve daha sonra sıkışması sağlanır.
iii. 4m – 5m derinliğinde yapılacak iyileştirmeler için kireç ve su bulamaç haine getirilerek basınç ile birlikte zemine enjekte edilir. Daha sonra ise kireç enjekte edilen mevcut zemin çeşitli yöntemler ile sıkıştırılması sağlanır [9].

Kireç stabilizasyon uygulamaları oldukça kolaydır. Laboratuvarda yapılan deneyler sonucunda Atterberg limitleri ile uygun kireç oranları belirlenir. Daha sonra uygulanacak olan derinlik belirlenerek iş makinaları yardımıyla kireç serilir. Uygulanan zemin ile karıştırılarak silindirler yardımıyla sıkıştırılmadan önce daha önceden belirlenmiş derinliğe kadar uygulama yapılır.

Dövme (pulverizasyon) ve karıştırma işlemi kil ve kireç homojen olarak karışacak bir biçimde yapılmalıdır. Uygun karıştırma yöntemi sonucunda kür süresi ve sıkıştırmasının da mukavemet artışında büyük bir rolü bulunmaktadır. 24 veya 48 saat arasında yapılan kür uygulamaları sonucunda ikinci tabaka kireç serilerek tekrar aynı işlemler uygulanır. %3 'en fazla sülfat oranına sahip kireçlerde ise stabilizasyon sırasında farklı sıkıştırma ve yerleştirme işlemleri uygulanır.

Dünya üzerinde farklı örnekler verecek olursak eski Roma döneminde ünlü Kral yolunda volkanik toprakla kireç karışımları kullanılmıştır. Çin seddi yapımında ise kil ve kireç karışımına ek olarak pirinç ununun da eklendiği tespiti yapılmıştır. Bu tespitler sonucunda kireç stabilizasyonunun çok eski dönemlerde başladığı görülmektedir. Dünyada ise Rusya, Fransa ve İtalya gibi birçok ülkede hala uygulamaları görülmektedir. Ankara bölgesinde Bala ayrımı ile Kulu ayrımı arasında360 metrelik bir kısımda, Karaman – Mut yolunun 5 km'lik kısmında, Sorgun – Akdağ Madeni yolunun 5 km'lik kısmında ve Adana şehir içi geçiş yolunun 2km'lik kısmında kireç stabilizasyonu uygulamasının az da olsa örnekleri bulunabilmektedir [12].

1.1.1.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu

Çimento ile yapılan yüzeysel zemin stabilizasyonları kireç ile yapılan zemin stabilizasyonlar kadar yaygı olarak ülkemize yapılmaktadır. Çimento özellikle derin stabilizasyonlarda jet-grout gibi uygulamalarda zemin özelliklerini arttırarak mukavemet artışları amaçlanarak kullanılmaktadır.

Çimento karışımlarının kireç karışımları gibi zemin iyileştirici özellikleri aynı olmakla beraber iki önemli getirisi vardır.

i. Yumuşak alt temel malzemesini iyileştirerek zeminin taşıma gücünü arttırmak.
ii. Yapı temel alt malzemesini iyileştirerek planlanan tasarım kalınlığını azaltmak.

Çimento zemin stabilizasyonu hava alanları gibi hareketli yüklerin yüksek değerler alarak değişkenlik gösterdiği noktalarda tercih edilmektedir.

Zemin stabilizasyonunda çimento kullanılan diğer iyileştirme yöntemleri;

- Kayma mukavemetini arttırarak sev stabilitesini arttırmak.
- Derin stabilizasyon sağlamak.
- Kazık zemin iyileştirmelerinde oluşan ve oluşuz etkileyen negatif yüzey sürtünmesini düşürmek.
- Trafik yükleri, patlatma ve kazık çakma sırasında oluşan titreşimleri azaltarak çevre zararını en aza indirmek.
- Dolgu altında oluşan konsolidasyon oturmalarını hızlandırarak yapılarda bütünlüğü sağlamak [12].

Yüzeysel zemin stabilizasyonlarında heterojen bir yapıya sahip olan Portland çimentosu kullanılır. Portland çimentosu trikalsiyum silika (C_3S), dikalsiyum silika (C_2S), trikalsiyumalümin (C_3A), ve tetrakalsiyumalumino-ferrit (C_4A) gibi kimyasallar içermektedir. Bu dört bileşen, Portland çimentosunun temel parametreleridir. Çimentonun su ile birleşmesi sonucunda hızla hidrasyon başlayarak hidrate kalsiyum silika (C_2SH_x, $C_3S_2H_x$), hidrate kalsiyum alümin (C_3AHx, C_4AH_x) ve hidrate kireç ($Ca(OH)_2$) oluşumları meydana gelir. Hidrasyon reaksiyonunda kalsiyum silika ve hidrate kalsiyum alümin çimentolaşan ana parametreler olup, hidrate kireç, artık ürün olarak oluşur. Belirtilen çimento parçacıkları başka parçacıklara bağlanarak matriks form oluştururlar ve tüm zemin danalerini bu formu içine alarak birbirlerine bağlarlar. Silika alümin fazları hiçbir zaman tamamen kristalize hale gelemezler fakat birbirleri içerisinde karışırlar. Bunlara ek olarak hidrasyon reaksiyonu ortamda bulunan suyun pH'ını yükseltir, bu da hidrate olmuş kristalize kireç parçalarının ayrışmasına sebep olur. Hidrasyon işlemi sırasında mevcut zeminin kimyasal yapısında bozunmaya sebep olmaktadır. Hidrasyonun ikinci aşamasında ise hidroz silika ve alümin iyonları ile reaksiyona girer ve sertleşme meydana gelmektedir. Zemin stabilizasyonunda bu sertleşmenin oluştuğu zaman dilimi, kür zamanı ve hidrasyonun ikinci aşaması da puzolonik reaksiyon olarak adlandırılır. Yukarıda anlatılan su ilavesi ile başlayan hidrasyon işlemi aşağıdaki gibidir [12].

$$2(3Ca0.SiO_2) + 6H_2O = 3CaO.2Si0_2.3H_2O\ (TobermoritJel) + 3Ca(OH)_2 \quad (1.1)$$

$$2(2Ca0.SiO_2) + 4H_2O = 3CaO.2Si0_2.3H_2O\ (TobermoritJel) + Ca(OH)_2 \quad (1.2)$$

$$4Ca0.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 10H_2O + 2Ca(OH)_2 = 6CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3.12H_2O \quad (1.3)$$

$$3Ca0.Al_2O_3 + 12H_2O + 2Ca(OH)_2 = 3CaO.Al_2O_3.2Ca(OH)_2.12H_2O \quad (1.4)$$

$$3Ca0.Al_2O_3 + 10H_2O + CaSO_4.2H_2O = 3CaO.Al_2O_3.Ca(OH)_2.12H_2O \quad (1.5)$$

Yukarıda yer alan reaksiyonlar sonucunda zemin ve çimento arasında meydana gelen reaksiyonlar ise aşağında devam etmektedir. Yer alan reaksiyonlarda Porlat çimentosunun en önemli bileşeni trikalsiyum silika C_3S ile ilgili reaksiyonlardır.

$$C_3S + H_2O \rightarrow C_3S_2H_x + Ca(OH)_2 \quad (1.6)$$

$$Ca(OH)_2 \rightarrow C^{++} + 2(OH)^- \quad (1.7)$$

$$C^{++} + 2(OH)^- + SiO_2 \rightarrow CSH \quad (1.8)$$

$$C^{++} + 2(OH)^- + Al_2O_3 \rightarrow CAH \quad (1.9)$$

pH miktarı ortamda 12.6’ dan küçük olduğunda reaksiyon gerçekleşmektedir.

$$C_3S_2H_x \rightarrow C_3S_2H_x\ (HidrateJel) + Ca(OH)_2 \quad (1.10)$$

Tüm reaksiyonlar kontrol edildiğinde zemin iyileştirmelerinde zemin - çimento karışımları için en önemli reaksiyon ikici aşama olan puzolanik reaksiyondur. Puzolanik reaksiyonları süresine bakıldığında herhangi kesin bir kanıya varılamamakta ve aylarca devam edebilmektedir. Bu reaksiyon sonlana kadar mukavemetler artış meydana gelmektedir [12, 13].

3 şekilde zemin ve çimento karışımı bulunmaktadır.

- Plastik zemin ve çimento karışımı
- Çimento katkılı zemin karışımı
- Sıkıştırılmış çimento ve zemin karışımı

Şevlerde ve toprak kayması gibi erozyon etkisinde bulunan bölgelerde kullanılan ve sıvı harç şeklinde belirli oranlarda zemin, çimento ve su içeren karışımlara plastik zemin-çimento karışımları denilmektedir.

Çimento katkılı karışımlar ise, hidrotasyona uğrayarak tam katılaşmış veya yarı katılaşmış karışımlardır. Daha az Portland çimentosu karıştırılarak elde edilen karışımlar zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmekte rol oynarlar. Tüm çimento karışımları gibi zeminin plastisitesini düşürerek sus tutma kapasitesini düşürür. Bunun yanında mukavemet ve taşıma gücü kapasitesinde artışlar meydana gelmektedir. Çimento oranına göre yarattığı kimyasal ve fiziksel etkiler değişebilmektedir. Yol dolgularında, temel alt dolgularında ve iksa yapılarının arkasında imal edilen dolgularda kullanılmaktadır.

Öğütülmüş zemin, belirlenen çimento miktarı ve suyu karıştırılarak sıkışması sağlanarak sıkıştırılmış zemin-çimento karışımları meydana getirilir. Oluşturulan ve iyileştirmesi yapılan zeminin ıslanma, kuruma ve donma-çözünme etkilerine karşı dayanımı yüksektir.

Örnek olarak 2008 yılında AB'nin başkentinde bulunan Washington D.C.'de Dullas havaalanı için yapılan pist çalışmasında çimento ile yüzeysel zemin stabilizasyonu kullanılmıştır.

Bugüne kadar yapılan deneylere dayanarak zeminler ile karıştırılması gereken optimum çimento oranları Tablo 1.2.'de gösterilmiştir. Bu tür zeminlerde çimento kullanımı sonucunda likit limit düşer, plastisite indisi ve zemin işlenebilirliği artar [10].

Tablo 1.2. Zemin tiplerine göre optimum çimento oranları [10].

Zemin Sınıflandırması		Hacimsel Oran (%)
AASHTO	Birleşik Zemin Sınıflandırması	
A-2 ve A-3	GP, SP ve SW	6-10
A-4 ve A-5	CL,ML ve MH	8-12
A-6 ve A-7	CL ve CH	10-14

Çimento stabilizasyonu sonucunda da kireç stabilizasyonu olduğu için mukavemeti arttırmak olduğu gibi kür süresi ne kadar artarsa mukavemet artışı o kadar artmaktadır.

Çimento stabilizasyonu veya kireç stabilizasyonu uygulamaları için zemin özellikleri önemli ölçüde etkilidir. Örnek verecek olursak granüler zeminler ve düşük plastisiteye sahip killer ve kalsiyum minerali barındıran kil çeşitleri çimento stabilizasyonu için en uygun fakat içinde çok sodyum barındıran killer ise kireç stabilizasyonu için daha uygundur.

Çimento stabilizasyonunda saha uygulamaları aynı kireç stabilizasyonundaki gibi 3 şekilde yapılabilmektedir. Birinci yöntemde çimento zemin ile yerinde karıştırılarak sıkıştırılmaktadır. İkinci yöntem ise plentte uygun çimento ve su oranıyla hazırlanan zemin karışımları saha uygulamaları yapılarak uygun kür süresi sağlandıktan sonra sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilir. Son olarak çimento ve su ile hazırlanan çimento-su karışımları makine yardımıyla basınç ile daha önceden belirlenen zemin derinliklerin enjekte edilerek zeminin hidrolik iletkenliği düşürülerek mukavemetini ve taşıma gücünü arttırır [9, 10].

Kireç stabilzasyonunda olduğu gibi çimento stabilizasyonu da proje maliyetlerinde büyük ölçüde azalmalara sebep olur. Meydana gelen iyileştirmeler sonucunda dolgu kalınlıkları azalarak ek kazı ve dolgu maliyetleri ortadan kalkar. Bakım masraflarında ise %50'lere kadar tasarruf sağlanabilir.

1.1.1.3. Polimer ile zemin stabilizasyonu

Monomer adı verilen küçük moleküllerin birbirlerine kovalent bağ ile bağlanarak meydana gelen makro bileşiklere polimer veya polimer zincirleri adı verilmektedir. Üç farklı meydana gelme şekli ile farklılık gösteren polimerlerin, aynı tür polimerlerin birleşerek oluşturduğu zincire homopolimer, farklı tür monomerlerin birleşerek oluşturduğu zincire kopolimer, üç farklı türün oluşturduğu yapıya ise terpolimer adı verilmektedir. Polimerler günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır.

Protein ve enzimler gibi biyolojik kimyasallar insan vücudunda bulunan polimerlere, selüloz ve nişasta gibi moleküller ise bitkilerde bulunan polimerlere örnek olarak

verilebilir. Buda polimerlerin yaşamsal olarak değerini kanıtlamaktadır. Gündelik hayatta en çok kullanılan polimer ise plastik ve kauçuktur.

Hafif olmaları, kolay şekillendirilebilir olmaları, kimyasal ve atmosferik etkilere dayanıklı olmaları, mekanik dayanımlarının yüksek olması, optik özellikleri ve düşük maliyet gibi özellikleri göz önünde bulundurulduğunda polimerler yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

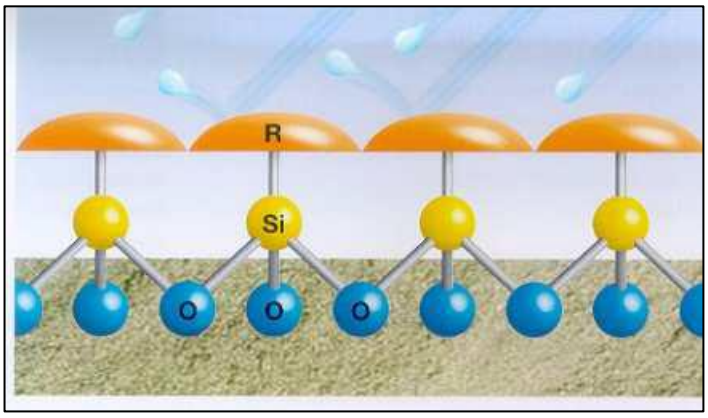
Doğal ve yapak olmak üzere elde edilmelerine göre ikiye ayrılmışlardır. Doğal polimerler elastikler, polisakkaritler, proteinler ve polinükleotidler olmak üzere çeşitlenirken, yapay polimerler ise termoplastikler, termosetler ve elastikler olmak üzere gruplara ayrılır [18].

1.1.1.4. Silikon ile zemin stabilizasyonu

Zemin iyileştirmeleri için birçok kimyasal madde kullanılmış fakat bu maddelerden en çok kullanılanı kireç ve çimentodur. Son 10 yıl içinde malzeme özelliklerini geliştirmede silikon nanopartiküler - nanokompozitler kullanılarak araştırmalara devam edilmiştir. Bu çalışmalarda dünyada birçok alanda kullanılan kimyasal bir malzeme olan temel yol malzemesi için geliştirilmiş silikon kullanılmıştır. Arumugam [14] sıvı silikon dioksit üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ile %4 silisyum dioksit katalizörünün zeminin esneklik modülünü iyileştirmede optimum konsantrasyon olduğu bulunmuştur. Ali [15] yaptığı çalışmalarda ise üç farklı zeminin kimyasal sıvılar ile karıştırılmasını incelemiştir. Yaptığı araştırmalarda optimum nem içeriğinde sıvı dengeleyicinin eklenmesi sonucunda büzülmeyi ve plastisiteyi azalttığı tespit edilmiştir. Daha sonra ise maksimum kuru birim ağırlık ve mukavemetinde arttığı tespit edilmiştir [16].

Günümüzde çeşitli silikon türleri geniş bir alanı iyileştirmek için çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. İnşaat faaliyetlerinde silikonların kullanımı hızla artmaktadır. Silikonların diğer alanlardaki yoğun kullanımına rağmen yol yapım malzemelerindeki kullanımı oldukça sınırlıdır. Özellikle toprak yolların su etkilerinden kaynaklanan felaketlerden korunmasını sağlamak için silikonlar geliştirildi. Silikonlar, her ne kadar malzemenin etrafındaki suyu dağıtırsa da

boşlukları ve gözenekleri doldurmayarak malzemenin olduğu gibi kalmasını sağlar. Şekil 1.3. de gösterildiği gibi parçacıklar üzerinde bir şemsiye gidi davranır.



Şekil 1.3. Toprak parçacıklarının sudan şemsiye gibi önlenmesi [16].



Şekil 1.4. Silikonlu ve silikonsuz toprağın su ile karıştırılması [16].

Suyun etkisi Şekil 1.4. te görülmektedir. Sağ kısımdaki toprak bloğunda $1m^3$ ' lük toprakta 4 lt miktarında silikon kullanılmıştır. Şeki 1.4. 'te bulunan sol kısımdaki toprak ise silikonsuz olarak sıkıştırılmıştır. Silikon kılcallığı arttırarak suyun toprağa girişi engellenmektedir.

Kavak ve Akyarlı [17] yaptığı bazı çalışmalarında yol zemininde bulunan toprakları su etkilerine karşı önlemek için özel silisyum kullanmışlardır. Türkiye' de Keşan – Uzunköprü (20 km) bölünmüş yol çalışmalarında bu uygulama görülmektedir. 50m'lik bir kısmında 1 m^3'lük toprak ile 4L ve 6L oranlarında silisyum karıştırılmıştır. Kavak ve Akyarlı tarafından kireç stabilizasyonuna benzer bir

uygulama gerçekleştirilmiştir. Sahadaki sıkışma değerleri ve zeminin su içeriği nükleer yoğunluk göstergesi Troxler ile tespit edilmiştir. Onay testleri kum konisi deneyi ve 105ºC fırında nem içeriği tayini ile belirlenmiştir. 6 ay içerisinde CBR testleri ve plaka yükleme deneyleri ile farklı zamanlarda testler yapılmış silikonun sıkışma değerinin 10 kg/cm^2 ' ye kadar çıktığı tespit edilmiştir. Testlerin hepsi doğal malzemelere ve karıştırılmış malzemelere göre iki şekilde yapılarak karşılaştırmaları yapılmıştır. Elek analizi, Proctor testleri ve suda CBR testleri ek olarak yapılmıştır [17].

Sonuç olarak suda CBR testlerinde silikonlu malzemelerin %24,7 oranında mukavemet artışı gösterdiği tespit edilmiştir. Troxler metodu kullanılarak sıkışma değerlerinin %96,2 - %99,4 aralığında, su içeriğinin ise %2,6 - %5,7 aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Projelerde ekonomik katkı sağlamak ve bakım maliyetleri azaltmak amaçlı silikon kullanılabilir.

1.2. Zemin Stabilizasyonunda Uygulanan Laboratuvar Deneyleri

Stabilizasyon yapılacak olan zeminlerin öncelikli olarak özeliklerini belirlemek karışım oranlarını, reaksiyon için gerekli olan suyun miktarını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Tüm oranların belirlenmesinde ve yapılan stabilizasyon sonucunda meydana gelen değişimlerin belirlemek amacıyla laboratuvar ve sahada bir çok test uygulanmaktadır. Bu testlerden bazıları şunlardır;

- Elek analizi (Yıkamalı)
- LL ve PL deneyleri
- pH deneyi
- Harvard Proctor (sıkışma) deneyleri
- Serbest basınç mukavemet deneyleri
- Kaliforniya taşıma oranı (CBR)
- Enerji dağılım spektroskopisi
- Taramalı elektron mikroskobu
- X ışını kırım deneyi

1.2.1. Yıkamalı elek analizi

İnce kum boyutundan yani 0,0075mm ve daha iri danelerin dağılımının belirlenmesi amacıyla kullanılan bir deney metodudur. Bu deney ile ince daneli zemin içerisinde bulunan kil ve siltlerin oranı bulunabilmektedir. Yıkamalı elek analizi dışında uygulanan kuru elek analizi ile birlikte zemin içerisinde bulunan kum ve çakıl oranları da tespit edilebilmektedir. En son olarak zeminlerdeki ince dane oranı toplam deney sonuçlarından tespit edilebilir. Elek analizi deneyi sonuçlarında bulduğumuz değerleri grafiğe yansıtarak zeminin D_{10}, D_{30}, D_{60} değerlerine ulaşabiliriz. Deney sonuçlarında tespit edilen D_{10}, D_{30} ve D_{60} değerlerine göre aşağıda yer alan formüller kullanıldığında uniformluk katsayısı (C_u), eğrilik katsayısı (C_c) değerlerini bularak zemin sınıflandırmada önemli bir adım atmış oluruz.

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (1.11)$$

$$C_c = D_{30} / (D_{60} \times D_{10}) \quad (1.12)$$

1.2.2. Atterberg kıvam limitleri (Plastik limit ve likit limit deneyleri)

İnce daneli zeminler belirli oranlar su karışımlarında plastik kıvamdan sıvı kıvama geçmektedir. Bu kıvam değerine likit limit denilmekte ve bu değeri bulmak için yaptığımı deneye ise likit limit deneyi denilmektedir. Bu deney sırasında Şekil 1.5.' te görüldüğü gibi Casagrande aleti kullanılmaktadır. Casagrande aletinde bir vuruşa denk gelen değer malzememizin likit limitin vermektedir.



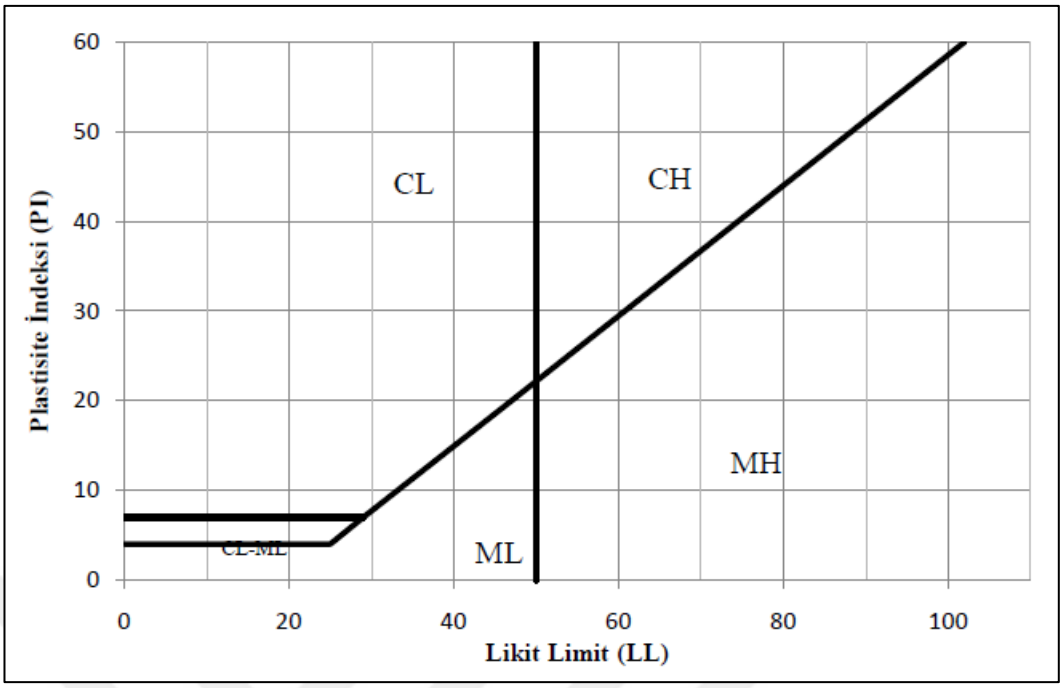
Şekil 1.5. Casagrande aleti

İnce daneli zeminlerde zemin numunesinde, elimizle veya mekanik yardım ile çatlama ve kırılma olmadan şekil değişikliğine neden olabiliyorsak bu durumdaki zeminlere plastik kıvamdaki zeminler diyebiliriz. Zeminin sahip olduğu en düşük su muhtevasında ve plastik özelliğini koruduğu bu kıvama plastik limit denir. Şekil 1.6.'da plastik limit tespit düzeneği görülmektedir.



Şekil 1.6. Plastik limit tespit düzeneği

Yapılan Casagrande deneyi ve plastik limit deneyi sonucunda elde edilen bilgiler ile zeminin plastisite indisi tespiti yapılabilmektedir. Likit limit ve plastik limit arasındaki fark bize plastisite indisini vermektedir. Tüm bu limit deneyleri sonucunda elde edilen bilgilerin Atterberg limit grafiğine işlenmesi ile zemin sınıflandırmaları yapılabilmektedir. Şekil 1.7. ile Atterberg limit grafikleri görülebilmektedir.



Şekil 1.7. Atterberg limit grafiği

1.2.3. pH deneyi

Bu yöntem Eades ve Grim tarafından geliştirmekle beraber, zeminlerde meydana gelen bağ tabakasını arttırmak, kısa dönem reaksiyonlarını ve puzolanik reaksiyonları sağlamak amaçlı kireç karıştırılması mantığına dayanmaktadır. pH deneyi uygulandıktan 1 sat içerisinde uygun kire oranı tespiti yapılabilmektedir. Zemini stabilize etmek için istenen yüzdenin bulunmasında deney uygulandıktan 1 saat içerisinde pH değerleri 12,40 değerine doğru yaklaşıyorsa en düşük kireç oranı tespit edilmiştir. Fakat pH değeri 12,30 değerini geçemiyor ve % 2'lik kireç aynı değeri veriyor ise zemin stabilitesi için istenen yüzdedir. pH ölçer kesinlikle Hyalk elektrotuyla donatılmış olmalıdır.



Şekil 1.8. pH metre

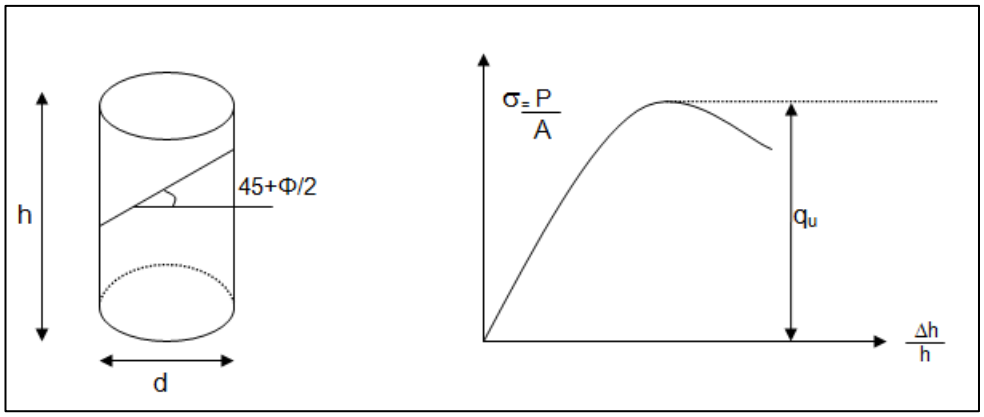
1.2.4. Harvard Proctor deneyi

Laboratuvarda belirli boyutlarda ve belirli su içeriğinde hazırlanan zemin numunelerine sıkıştırma enerji uygulanır ve daha sonra alınan zemin örnekleri tartılarak birim hacim ağırlıkları belirlenir. Zemin numuneleri farklı su içeriklerinde hazırlanır ve bu işlem zemin numunelerinde belirli bir değişiklik kaydedilene kadar devam edilir ve ağırlık ve su oranları incelendiğinde bir ilişki tespit edilir.

Harvard Proctor deneyi zemin içerisindeki optimum su muhtevasının bulmak amaçlı yapılmaktadır. Laboratuvarda deneyin kolay ve hızlı bir şekilde sonuçlandırması amaçlanarak tüm numuneler minyatür proctor düzeneğinde hazırlanarak elde edilmektedir.

1.2.5. Serbest basınç deneyi

Minyatür proctor düzeneğinde hazırlanan zemin numunelerinin eksenel yüke tabi tutularak tespit edilen serbest basınç mukavemetini vermektedir. Hazırlanan numunelerin teste tabi tutulmasıyla numunede eksenel bir şekil değiştirme meydana gelmektedir. Okunan deformasyon saati ile kontrol edilen boy kısalmaları ve gerilme grafiği çizilebilir. Meydana gelen grafikte görüleceği gibi en yüksek serbest basınç mukavemet değerini (q_u) verir. Şekil 1.9. ile numune kesiti ve serbest basınç grafiği gösterilmektedir.

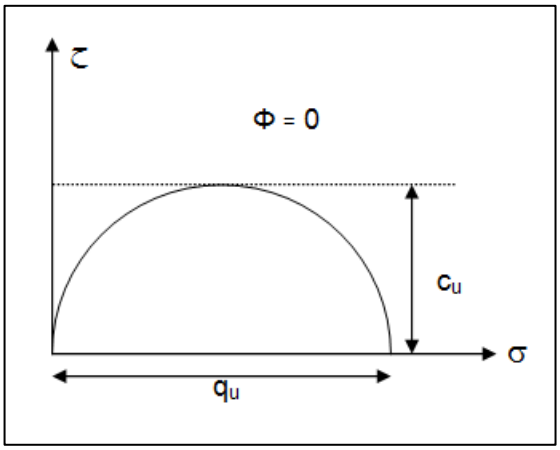


Şekil 1.9. Hazırlanan numune kesiti ve serbest basınç grafiği

Bu deney uygulandığında zeminde herhangi bir yanal destek verilmemelidir. Dolayısıyla kendini dik tutabilen zeminlerde bu deney uygulanabildiğinden kumlu zeminlerde bu deneyin uygulanması mümkün olmadığı gibi yalnızca killi ve ince daneli zeminlerde uygulanabilir.

Deney sırasında çevre basınç etkisi olmadığından drenajsız olarak kabul edilir ve c_u değeri bulunur. Bu değer Şekil 1.10.'da görülebilmektedir.

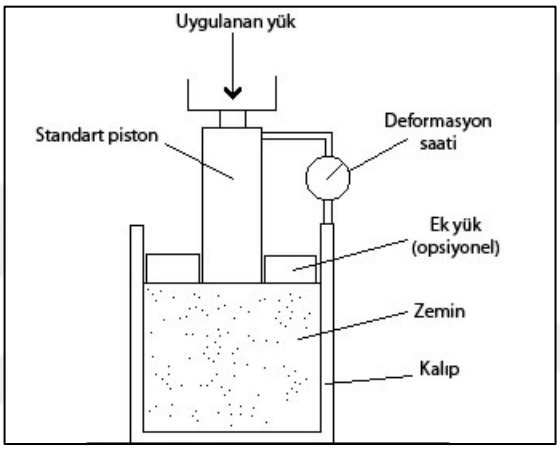
$$C_u = \frac{1}{2} \text{ x } q_u \qquad (1.13)$$



Şekil 1.10. Drenajsız serbest basınç grafiği

1.2.6. CBR deneyi

CBR deneyleri arazinin veya bir numunenin taşıma oranları bulunması amaçlanarak uygulanmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen sonuca CBR değeri denir. CBR deneyler kuru ve yaş olmak üzeri iki şekilde uygulaması yapılabilir. Kuru CBR uygulamasında numune veya zemine sadece üzerine yük uygulanırken yaş CBR' da zemin su içerisinde bırakılarak testler gerçekleştirilir. Elde edilen sonuca göre de mevcut zeminin kullanım amacı tespiti yapılabilir. Şekil 1.11. ile zemin numunesine uygulanan CBR düzeneği örneği görülmektedir.



Şekil 1.11. CBR düzeneği

1.2.7. Enerji dağılım spektroskopisi

Analitik tekniklerle önceden hazırlanan numuneye enerji dalgaları gönderilir ve zemin içerisinde bulunan maddelerin kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Bu deney E.D.S deneyi olarak bilinmektedir.

Bu sistemde, numuneye gönderilen enerji dalgalarının çarpması sonucunda meydana gelen x ışınlarının enerjilerine göre zemin ayrımları yapılabilir.

1.2.8. Taramalı elektron mikroskobu deneyi

Taramalı elektron mikroskobu hazırlanan numunenin çok küçük bir alanına odaklanan yüksek enerjili elektronlar ile yüzeyinin taranması prensibiyle çalışır. İlk olarak 1930 yıllarında uygulanarak Manfred von Ardenne liderliğinde ilk deneyler gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeyinden yayılan ikincil elektronlar kontrol edilerek yapılan ölçümler sonucunda yüzeyin topografik yapısı hakkında bilgi veren bir

görüntü elde edilir. Tüm bu görüntüler zemin numunesi hakkında bilgiler vermektedir.

Bir numunenin taramalı elektron mikroskobunda incelenebilmesi için sıvı olmaması ve sıvı özelliği taşımaması gerekmektedir. Aynı zamanda incelenen numunenin iletken olup olmamasının bir önemi yoktur fakat incelenecek olan malzemenin temiz olması gerekmektedir. Toz halinde bulunan numuneler ise palet haline getirilerek incelenebilir.

Yukarıdaki tüm özelliklerini sağlayan numunelerin boyutlarına değinecek olursak taramalı elektron mikroskobu ile analizi yapılacak olabilmesi için 7,5x7,5x1,5 cm boyutlarında olmalı, görüntüsü alınacak numunenin ise 7,5x7,5x2 cm boyutlarında olabilir.

1.2.9. X – ışını kırım deneyi

X ışını denilen ultraviyole ışınından daha kuvvetli, gama ışınında daha zayıf enerjili ışın kullanılarak yapılan analiz sistemine X.R.D yani x – ışını kırım deneyi ad verilmektedir.

Diffractometer aletleri ile yapılan bu deney analizinde değişik uygulamalar görülmektedir. Işın doğası ve kullanılan detektör ise önemli etkenlerdendir.

Çalışma şekli olarak aynı şekilde numunelere ışın gönderilerek kırılma ve dağılma verileri toplanır ve sonrasında mevcut zemin numuneleri bu ışınları kendi özelliklerine göre farklı şekilde ve farklı şiddete kırarlar. Bu değerler incelenerek numunelerin analizleri gerçekleştirilmektedir.

2. ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILAN MALZEMELER

2.1. Kireç

Kireç taşının yani diğer bir isimler kalker malzemesinin kalsine edilerek meydana gelen maddeye kireç denir. Kireç yapısında kalsiyum karbonat (CaCO3) veya magnezyum karbonat (MgCO3) bileşenlerini bulundururlar. Kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonat dışında yapısında alüminyum, silisyum, kükürt ve demir gibi elementlerde farklı oranlarda bulundurabilirler.

Pek çok farlı şekilde formasyon ve tiplerde kireç taşları bulunmaktadır. Tüm bu kireç taşları mineralojik yapılarına, kristal yapılarına, kimyasal bileşimlerine, renk ve sertlik özelliklerine göre sınıflandırılabilirler.

Katı, sıvı veya gaz gibi yakıtların özel kazanlarda 900^{o}C'den 1100^{o}C sıcaklığa kadar ısıtılmasıyla kireç elde edilmektedir [1].

2.1.1. Kirecin çeşitleri

Sönmemiş kireç kalsinasyon sonucunda elde edilmiştir. Su ile kontrollü bir şekilde söndürülmesi ile yani sönmüş kireç ($CaOH_2$) elde edilmektedir. Sönmüş ve sönmemiş kireçlerin kullanıldığı yerler farklılık göstermektedir.

2.1.1.1. Sönmemiş kireç özellikleri

$$CaCO_3 + ISI \Rightarrow CaO + CO_2 \qquad (2.1)$$

Yukarıdaki tepkime sonucunda sönmemiş kireç oluşmaktadır. Reaksiyonun sağ tarafında bulunan kalsiyum oksite (CaO) sönmemiş kireç adı verilmektedir. Reaksiyon sonucunda meydana gelen kalsiyum oksit direk olarak kullanılabilir. Çelik ve kimya endüstrilerinde kullanımı yaygın bir şekilde görülmektedir.

2.1.1.2. Sönmüş kireç özellikleri

$$CaO + H_2O \Rightarrow Ca(OH)_2 + ISI \quad (2.2)$$

Önceden de elde edilen sönmemiş kireç kalsiyum oksit u ile kontrollü bir şekilde tepkimeye sokularak meydana gelen reaksiyon sonucunda kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) meydana gelmekte ve sönmüş kireç adı verilmektedir. Su ile temas eden sönmemiş kireç parçacıkları yüksek bir sıcaklıkta yüzey gerilmelerine sebep olur. Bu nedenle sönmemiş kireç daha küçük parçacıklara parçalanarak sönmüş kireci oluşturur. Sönmüş kireç kullanım alanları sönmemiş kirece göre daha fazladır.

2.1.2. Kirecin kullanım alanları

Demir çelik endüstrisinde; demir cevherinin hazırlanmasında, çelik üretiminde, döküm kalıplarının hazırlanmasında ve çelik tel üretiminde kullanılmaktadır.

Demir dışı metal endüstrisinde; bakır metalindeki safsızlıkların giderilmesinde, alimünyum elde edilmesinde, nikelin saflaştırılmasında, düşük karbonlu krom üretimince, manganın geri kazanılmasında, çinkodan kükürt ayrıştırılmasında ve altın, gümüş üretiminde kullanılan zehirli bileşiklerin ayrıştırılmasında kullanılır.

Kimya endüstrisinde; çevre kirliliğinin önlenmesinde ve rehabilitasyonunun sağlanmasında, su artıma tesislerinde, kirli sulu ortamların geri kazanılmasında, kentsel atıkların ve çöplerin ıslahında ve tarım orman topraklarının geri kazanılmasında kullanılabilmektedir.

Kağıt endüstrisinde; kağıt üretiminde kullanılan bazı kimyasalların tekrar iade edilmesinde kullanılır.

Yapı malzemeleri endüstrisinde; harç ve sıva katkısı olarak, bağlayıcılık dayanıklılık ve esnekliğin arttırılmasında, gaz beton üretiminde, kireç - kum tuğlası üretiminde ve karo - seramik üretiminde kullanılmaktadır.

Cam endüstrisinde; cam üretiminde kireç taşları içerdiği metal oksitler nedeniyle hammadde olarak, cam fırınlarında ısıdan tasarruf etmek amaçlı ve camın sertliğini arttırmada kullanılır.

Çevre rehabilitasyonunun sağlanmasında; çöplerin ıslahı, atık suların arıtılması, fabrika bacalarından çıkan zehirli gazların filtrasyonu ve göl - bataklıkların ıslah çalışmalarında kullanılmaktadır.

Zemin stabilizasyonu ve karayolları yapımında ise; toprağın genleşme büzülme gibi fiziksel değişimleri sonucunda meydana gelen zararların ortadan kaldırılması amaçlı kullanılmaktadır.

2.1.2.1. Kirecin inşaat ve yapılardaki kullanımı

Dünyanın birçok ülkesinde kireç kullanımı inşaat sektöründe %70 oranlarına kadar ilerlemiştir. Beton harcında agrega ve yol yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılabilecek kireç taşları temiz, kuru, kübik formda, yüksek aşınma mukavemetine ve sertliğe sahip olmalıdır.

İlave olarak mevcut dane yapısının da altında bulunan yani 75 mikron ve 5mm arasında bulunan bazı kireç taşlarında beton içinde ev inşaat harcı gibi karışımlarda kullanılabilir. 1995 yılında yapılan istatistiklere göre tüm inşaat alanlarında kullanılan mıcır üretimi 28 milyon ton olduğu ve bunun sadece %33 kireç taşı üretimiyle aynı olduğu tespiti yapılmıştır.

2.1.3. Kireç kullanım avantajları

- Nötralizasyon ve absorpsiyon gibi birçok kimyasal işlemin ana girdisi olması
- İstenmeyen maddeleri kimyasallarla reaksiyona girerek uzaklaştırması
- Bazı ekonomik değeri olan kimyasalların geri kazanılmasındaki büyük rolü
- Bazı organik canlılar için besin kaynağı olması
- Ucuzluğu ve kolay bulunabilmesi

gibi sebepler kireç kullanımını ülkemizde ve dünyada daha yaygın bir hale getirmiştir.

2.2. Kil

Sıkıştırıldığında içerisindeki suyu dışarı atan, ıslatıldığı zaman şişme özelliği gösteren, kuruduğu zaman büzülebilen, kohezif özelliğe sahip sulu alüminyum silis ve diğer bazı elementlerden oluşan ince dokulu toprak malzemesine kil denir.

Killerin içinde kalkerler, silis, mika ve demir oksit bulunmasının yanı sıra doğada bulunmaları oldukça kolay olmasına rağmen saf kil bulmak ise bir o kadar zordur.

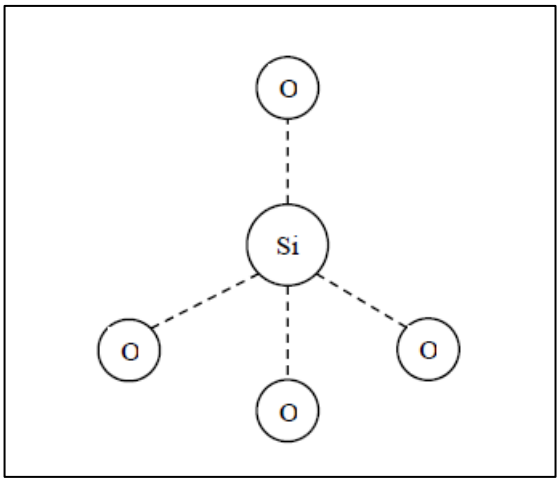
Sulu alüminyum silikatlar killeri meydana getirmelerinden sebep killer daima nemlidir ve yapısı nedeniyle su çekme özelliğine sahiptirler. Dane yapıları 2μm'dan daha küçüktür. Kil m Al_2O_3 , n SiO_2 , p H_2O genel kimyasal bileşim formülü ile ifade edilir. Alümine tabakalardan ve kristal silikalardan oluşan killerin elektro kimyasalları çok aktif olmasıyla beraber asitte erimeyen bir yapıları bulunmaktadır. Dane çapları 2μm'dan daha da azaldığında elektrik yükleri artmaktadır. Elektron mikroskobu, x-ray tekniği ve diferansiyel analiz tekniği ile kil numuneleri kolay bir şekilde incelenebilirler.

2.2.1. Killerin mineralojik yapıları

Killer keşfedildiklerinde ne kadar küre şeklinde olduğu düşünülse de daha sonra yapılan deneyler ve incelemelerden sonra levhamsı veya tabakamsı bir şekilde yapıya sahip olduklarının tespiti yapılmıştır. Tabakalı yapıda olması kanaatine varılmasındaki asıl sebep sıkı istiflenme özelliğine sahip olması ve hacimce genişleyip daralmasıdır.

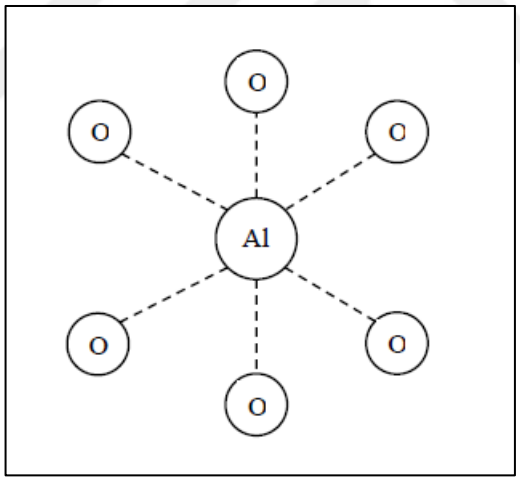
Daha öncede değindiğimiz gibi killer, silisyum ve alüminyumdan oluşmuştur. Kimyasal ve mineralojik yapılarına bakıldığında kristal sistemde tetrahedron ve oktahedron olarak iki strüktür yapı tipinde meydana gelmişlerdir.

Tetrahedron yapı tipi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir. Silisyum elementi merkezde olmak kaydı ile dört adet oksijen atomunun birleşmesinden meydana gelmektedir.



Şekil 2.1. Tetrahedron strüktür

Oktahedron yapı tipi Şekil 2.2.'de gösterilmektedir. Alüminyum elementi merkezde olmak kaydı ile altı adet oksijen atomunun ya da hidroksitin birleşmesinden meydana gelmektedir.



Şekil 2.2. Oktahedron strüktür

Genel olarak kil mineralleri ise yukarıda bahsettiğimiz gibi tetrahedron ve oktahedron gibi tabakaların üst üste veya yan yana gelmesiyle ve oksijen iyonlarının birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelmektedirler.

İki tabakalı kil mineralleri olduğu gibi tetrahedron - oktehedron – tetrahedron gibi periyodik tekrarlamalar sonucunda üç tabakalı killerin oluşumu meydana gelmektedir.

2.2.2. Kil çeşitleri

İçinde bulunan demir oksit, mika, silis gibi minerallerin kimyasal özellikleri sebebiyle beyaz, kahverengi, yeşil ve beyaz gibi farklı renklerde doğada bulunabilirler. Killer bulundukları kaplarda saf bir halde olmadıkları için kolayca ayırt edilebilirler. Dane boyutlarının çok küçük olması ve su içerisinde bulunduğunda kalıcı süspansiyonlarda bulunması ayırt edilebilmesi kolaylaştırmaktadır.

Alümin silikat killerin en saf olduğu zaman aldıkları isimdir. Tetradedron - oktahedron iki tabakalı killer ve tetrahedron - oktahedron - tetrahedron şeklindeki tabakalı killer ise üç tabakalı killerolarak adlandırılmaktadır. İki tabakalı killere kaolinit, üç tabakalı killere ise montmorilliont ve illit killeri örnek verilebilir. Tablo 2.1.' de kil minerallerinin ağırlıklarına göre kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Kil minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi (%) [19].

Kil mineralleri	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
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. Bentonit

Bir alümina oktahedral tabakası ile iki silika tetrahedral tabakası arasında sıkışması ile meydana gelerek oluşan ve $(OH)_4Al_4Si_8O_{20}$. n H_2O formülü ile gösterilen kil çeşidine montmorillonit kili denir. Tabakalar arasındaki çekim kuvveti iki aynı tabaka bir araya geldiği için oldukça azdır. Çekim kuvvetinin zayıf olması nedeniyle bu kil türü ıslak olduğunda stabil olmayan bir mineral türü oluşturmaktadır.

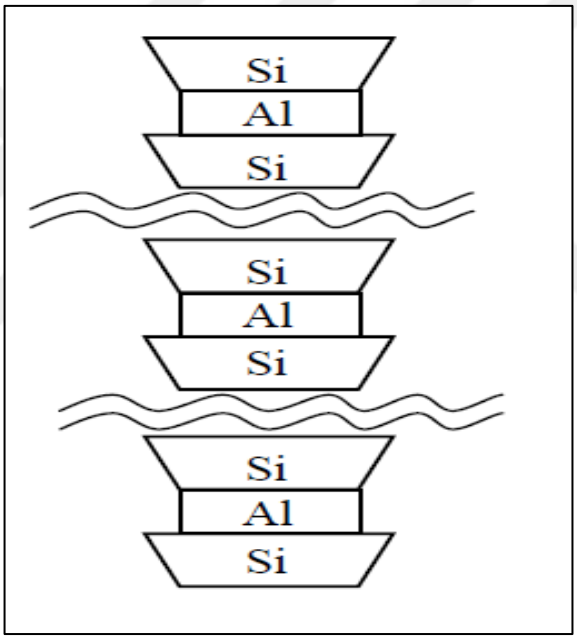
Montmorillonit minerali şişme ve genişleme özelliğine sahip olmasına karşın kuruduğunda problem teşkil etmektedir. Doygun halde kuru hale geçişi sırasında yapısında büzülmeler ve kırılmalar meydana gelmektedir.

Yüzey alanı kontrol edildiğinde yüzey alan değerleri $800m^3/gr$ ve $1150m^3/gr$ arasında yer almaktadır. Kalınlığı en az 10 Å, en fazla 50 Å olmakla beraber yatay

boyuları 1000 Å ile 5000 Å arasında yer almaktadır. İçinde su barındıran montmorillonit minerali tabaka uzaklıkları 14 Å ile 18 Å iken kuru halde tabakalar arası mesafe 3 Å ile 4 Å arasındadır.

Benzedin ile güzel renk reaksiyonları vererek montmorillonit minerali yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Yüksek plastisiteli bentonit kilinin esas minerali olduğundan bu çalışmada sadece monmorillonit ele alınmış ve Şekil 2.3 ile montmorillonit mineralinin kesiti gösterilmektedir. Aynı zamanda bentonit yataklarında da sıkça karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.3. Montmorillonit mineralinin kesiti

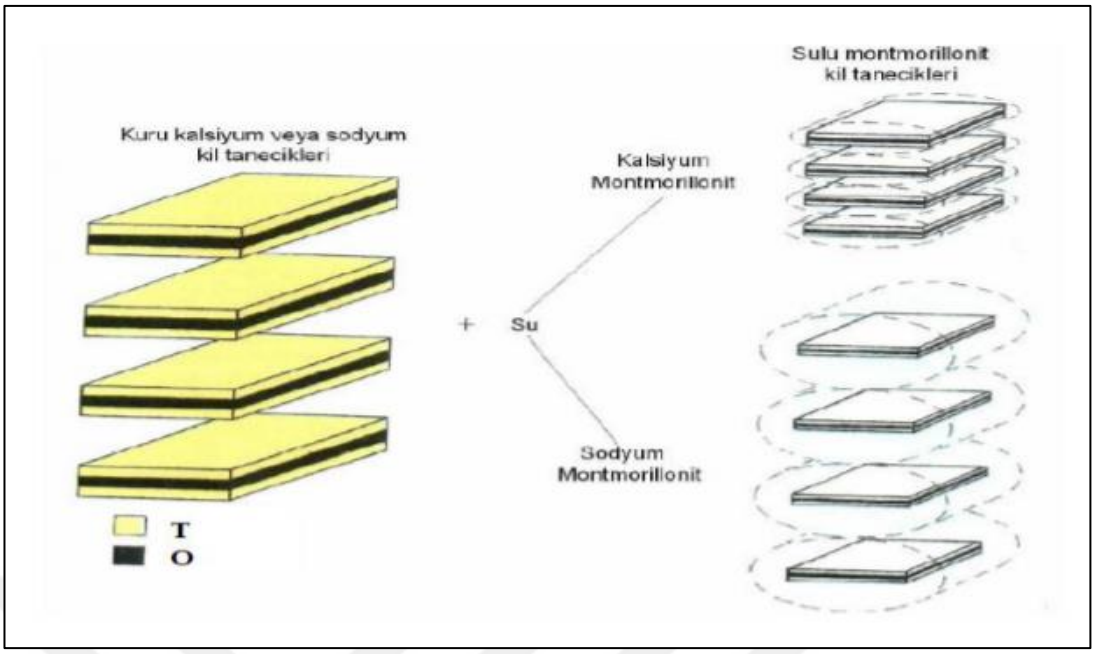
Volkanik küllerin, tüflerin ve lavların ayrışması sonucu oluşan, alüminyum ve magnezyumca zengin olan içerisinde büyük oranda montmorillonit minerali bulunan killere bentonit denilmektedir. Bentonit ilk defa 1888 yılında ABD'nin Wyoming eyaletinde Fort Benton yakınlarında bulunmuş ve 1898 yılında Knight tarafından bu isimle adlandırılmıştır [20]. Genel kimyasal formülü $Al_4Si_8O_{20}$ $(OH)_4$ .nH2O olup plastikliği yüksek, yumuşak, kuvvetli kolloidal özellik gösteren, kolaylıkla şekil verilebilen bir kildir [23, 22, 24]. Ticari tanımlama ise suyla temas ettiğinde şişme özelliği gösterebilen, asitle aktiflendirilmiş, yüzey alanı geniş olan bir kil mineralidir [22, 25]. Bentonitler doğada gri, beyaz, pembe, yeşil gibi çeşitli renklerde bulunurlar.

Ayrıca bentonit yerine sabun kil, ağartma kili, ağartma toprağı, volkanik kil, adsorplayıcı kil gibi isimler de kullanılmaktadır [26]. Bentonit içerisinde kaolin, illit gibi doğal katkı maddelerinin dışında jibs, dolomit, kalsit, kuars ve volkanik kül gibi kil dışı minerallerde yer almaktadır [27].

Bentonitler su ile etkileştiklerinde şişme özelliği gösterirler. Şişme özelliklerine göre ve iyon değişimlerine göre bentonitler üç ana grupta incelenebilirler. İlk olarak sodyum bentonit (Na-B), sonrasında sodyum-kalsiyum bentonit ve sonuncu olarak kalsiyum bentonit (Ca-B) şeklinde sıralanabilir. Şişme özelliklerine bakıldığında sodyum bentonitler en fazla tepkiyi gösterirken sodyum-kalsiyum bentonitler orta derecede ve kalsiyum bentonitler ise en az tepkiyi gösterirler. Sodyum-kalsiyum bentonitlere diğer literatürlerde karma veya ara bentonit olarakta karşımıza çıkmaktadırlar. Su ile çok şişen Na-B'lerin süspansiyonları uzun ömürlü olurken su ile az şişen Ca-B'lerin süspansiyonları kısa ömürlü olmaktadır [28]. Eğer ham bir bentonitin ticari olarak iyi bir bentonit olması kontrol edilmek isteniyorsa su ile temas ettiğinde en az kütlesinin 5 katı kadar şişmesi beklenmektedir. 10 ve 20 kata kadar şişebilen bentonitler bulunmaktadır. Belirli bir sıcaklık etkisi altınad kalan bentonitte su ile şişme özelliği kaybolarak bentoniti kuru haldeki özkütlesi 2,7-2,8 g/cm^3 olup iyonlaşma kapasitesi yüksektir. Bentonit toz haline getirildiği zaman yoğunluğu 1,6-1,8 g/cm^3 kadar olmaktadır.

Bentonitler asit, baz, tuz, organik maddelerle işlenerek özellikleri geliştirilebilmekte; adsorplama, ağartma ve katalitik etkinlikleri yükseltilebilmektedir [29, 30].

Bentonit mineralinin en önemli özelliği bünyesinde su tutabilmesidir. Bentonitin bünyesine su alıp kristal yapısının genişlemesine şişme denilmektedir. Bentonitlerin şişmesi kendi tabakaları arasında bulunan katyonların türü ve miktarı ile ilgilidir. 2:1 tabakalarında aralarında doğal olarak çoğunlukla Na + ve Ca_2 + katyonları bulunmaktadır ve $Na+ /Ca^{2}+$ eşmolar oranı arttıkça şişme de artmaktadır [31].



Şekil 2.4. Bentonitlerin su ile temas ettiklerinde yapılarında oluşan değişim [32].

Bentonitlerin yapısı bileşimleri endüstride kullanımı için oldukça önemlidir. Yüzey kimyası, tanecik boyutu, tanecik şekli, renk, viskozite, aşındırma, plastisite, yüzey alanı, absorpsiyon ve adsorpsiyon gibi çeşitli özellikleri endüstriyel alandaki kullanımını büyük ölçüde etkilemektedir [25]. Bentonitlerin oldukça 26 geniş kullanım alanı vardır ve en çok tüketildiği alan sondaj sektörüdür. Kullanım alanlarının bir kısmı aşağıda sıralanmıştır.

- Döküm kumu bağlayıcısı olarak kalıpların hazırlanmasında (1600°C'ye kadar dayanmakta);
- Demir çelik sanayisinde demir tozu pelletlemede;
- Su ve sıvı sızdırmazlığı özelliği ile inşaat mühendisliği yapılarında temel ve barajlarda;
- Sıvı yağların ağartılarak çevreye olan katkılarında;
- Gıda sanayisinde hayvan yemine katkı olarak;
- Şarap ve meyve suları gibi içeceklerin berraklaştırılmasında;
- Sağlık sektöründe, kağıt sektörünce ve lastik sanayinde dolgu malzemesi olarak kullanılmasında;
- Katkı maddesi olarak çimento ve seramik sanayinde kullanılmasında;
- Evcil hayvan atıklarının temizlenmesinde;

- Atık sularının arıtılmasında;
- Gübre üretimi ve toprak düzenlenmesinde;
- Kurşun kalem, renkli kalem, pastel boya, tutkal yapımında ara madde olarak;
- Boya sanayisinde, yangın söndürücülerde ve birçok kimya sanayisinde katalizör olarak kullanılabilmektedir.

2.3. Çimento

Çimentolar bağlayıcılık konusunda diğer yapı malzemelerinden üstün özelliklere sahip ve en önemli etkilerden birini veren malzemelerdir. Kil ve kireç karışımlarının yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile çimento malzemeleri meydana gelmektedir. Beton üretiminde su ve agrega ilavesiyle çimento malzemesinin de ilave edilmesiyle önemli rol oynamaktadır. Yapı inşaatında sektörde en çok kullanılan ve en eski malzeme olması yanında uzun yıllar boyunca bağlayıcılıktaki önemli rolünü koruyacaktır [33].

2.3.1. Çimentonun tarihi

İlk çimentonun doğal olarak üretimi 18.yy'da yapılmıştır. John Smeathon adında bir bilim adamı 1756 yılında kireç ve bazı puzolanları kullanarak deneyler yaparak bazı sonuçlar elde etmiş fakat buluşları fazla duyulmamıştır. Diğer yıllarda birçok deneyler yapılmış fakat hiçbir sonuca ulaşılamamıştır. 1796 yılında Joseph Parker ilk doğal çimento keşfini yaparak tarihe adını yazdırmıştır. İlk üretim safhasında keşfini yaptığı doğal çimento kendi ismini alsa da yıllar sonra Roma çimentosu olarak adlandırılmıştır [34]. Doğal çimentonun yanında 1824 yılında Josheph Aspdin adında bir İngiliz tarafından portland çimentosunun buluşu gerçekleştirildi. Bir duvar ustası olan Aspdin, 1800 yıllarda taş tozlarını toplayarak kil ile birleştirip yüksek sıcaklıkta pişirdiğinde ortaya çıkan malzeme ile bağlayıcı üretimine başladı. 1824 yılında ise pantentini alarak üretime devam etti [33]. 1911 yılında ilk çimento fabrikası Darıca'da kuruluştur 1911 yılında kurulan çimento fabrikası Türkiye'deki çimento kullanımının ne kadar geç kaldığını göstermektedir. Daha sonrasında Eskişehir'de Arslan çimento adında kurulan çimento fabrikası Türkiye'nin ilkleri arasında yer almaktadır. İki fabrika üretiminin ihtiyacı karşılayamamasından dolayı 1932–1933 yıllarında sırasıyla Zeytinburnu, Kartal ve Sivas'ta fabrikalar kurulmuştur.

Fabrikaların kurumları sonrasında ülkemizde de çimento kullanımı artmış bulunmaktadır [33].

2.3.2. Çimentonun bileşimi ve tipleri

Kil ve kalker çimentoyu oluşturan temel maddelerdir. Çimento ana malzemesini oluşturan maddelerden bir tanesi olan kil bileşiminin yapısının %90'ı kil minerali barındıran kayaçlardan meydana gelmektedir. Diğer birleşen olan kalker yapısında ise içerisinde %90 oranında kalsiyum karbonat veya kalsit bulunduran kayaçlardan meydana gelmektedir [35]. Tüm bu bileşenlerin içerisinde çimentoyu meydana getiren kalsiyum, alüminyum, demir ve silisyum oksit gibi birleşik ve elementler bu kayaçların içerisinde de mevcuttur. Çimentoyu meydana getiren kil ve kalker yapısında da bulunan silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksit kil kısmından, kireç, magnezyum oksit ise kalker taşı kısmından çimento yapısına katılmaktadır [36].

Çimento yapısı incelendiğinde çimentoyu meydana getiren ana ve diğer bileşenleri aşağıdaki sıralamak mümkündür:

Ana bileşenler:
Dikalsiyum silikat,
Trikalsiyum silikat,
Trikalsiyum alüminat,
Tetrakalsiyum alüminoferrit,

Diğer bileşenler ise:
Serbest halde bulunan Cao, MgO ve katı eriyikler

İlk olarak çimentoyu oluşturan ana bileşenlere değinecek olursak;

C_2S: C_2S oranı fazla olan çimentolarda hidratasyon oldukça yavaş gerçekleşmektedir. Mukavemet artışları hidrotasyonun yavaş gerçekleşmesi sebebiyle 14. gün ve 28. gün değerlerinde C_2S oranı önemli rol oynamaktadır. Ayrıca bu oranın fazla olması kimyasal dayanıklılığı da arttırdığı tespit edilmiştir.

C_3S: C_3S oranındaki fazlalık betonun erken dayanımında oldukça etkilidir. Karışımlarında yüksek miktarda ısı açığa çıkarak bileşen etkinliği erken safhalarda görülür.

C_3A: Hidratasyonun hızlı olması sebebiyle açığa çıkan ısı miktarlarında yükseklikler görülmektedir. Bileşen oranına göre hidratasyonnun hızlı olması sebebiyle ilk sertleşme bu bileşen tarafından sağlanmaktadır. Mukavemete katkısı incelendiğinde oldukça azdır ve kimyasal dayanıklılığı yoktur.

C_4AF: Diğer bileşenler göz önünde bulundurulduğunda çimento yapısındaki önemi oldukça azdır. Karışımı hazırlanmış ve mukavemetini almış çimento hamuruna sadece renk değişikliği yaparak katkı sağlamaktadır.

Aşağıda yer alan Şekil 2.5.'te tüm ana bileşenlerin reaksiyon hızları, bağlayıcı değerleri, hidratasyon ısısı ve mukavemete ilk günlerdeki ve son günlerdeki katkısı belirtilmiştir.

Bileşen	Reaksiyon Hızı	Bağlayıcı Değer	Hidratasyon Isısı	Dayanıma Katkısı (İlk Günlerde)	Dayanıma Katkısı (Sonunda)
C_2S	Yavaş	Kuvvetli	Az	Düşük	Yüksek
C_3S	Orta	Kuvvetli	Orta	Yüksek	Yüksek
C_3A	Hızlı	Zayıf	Yüksek	Düşük	Düşük
C_4AF	Orta	Zayıf	Orta	Düşük	Düşük

Şekil 2.5. Çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri [34].

Çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin farklı oranlarda kullanımı ile değişik özelliklere sahip çimento tipleri elde edilmektedir. Bunlar;

Tip I: Yapısında %50 oranında C_3S, %30 oranında C_2S ve %20'lik kalan kısmında ise C_3A ve C_4AF bulunduran portland çimentolarıdır.

Tip II: Sülfat dayanıklılığı ve hidratasyon ısısı ele alındığında orta seviyededir. İçerisinde C_3S oranı TipI yapısına göre daha fazla bulunmaktadır.

Tip III: Mukavemeti yüksek ve öğütme inceliği fazla olan bir çimento çeşididir. C_3S oranı diğerlerine göre fazla bulunmaktadır.

Tip IV: Hidratasyon ısısı az ve C_3S oranı fazla olan çimento çeşididir.

Tip V: Sülfata karşı en fazla dayanıklılığı olan çimento çeşididir. İçerisindeki C_3A oranı az olarak bulunur. Genelde sülfat etkisi yoğun olan inşaat yapılarında kullanılır.

2.3.3. Çimento türleri

Çimento üretim yöntemine veya karışım içerisinde kullanılan hammaddelerin özelliklerine göre çimento çeşitlerinde farklılıklar meydana gelmektedir. Ülkemizde de kullanılan ana başlıkta toplamda yedi adet çimento çeşiti bulunmaktadır.

2.3.3.1. Portland çimentosu

Portland çimento klinkerinin alçı taşı ile öğütülmesine ek alarak %10 doğal ya da yapay puzolanik maddeyle de öğütülmesi sonucunda meydana gelen hidrolik bağlayıcılara Portland çimentosu adı verilmektedir. Aynı zamanda doğal veya yapay puzolansız sadece %5 alçı taşı ile öğültülmesi ile de meydana gelebilir. Pç 32,5, Pç42,5 ve Pç 52,5 olmak üzere mukavemet dayanımlarına göre sınıflandırıldıklarında 3 çeşiti bulunmaktadır [37]. Portland çimentosunu;

- Portland silika füme çimento
- Portland kalkerli çimento
- Portland kompoze çimento
- Beyaz portland çimento

olmak üzere 4 gruba ayırabiliriz.

2.3.3.2. Yüksek fırın cüruflu çimentolar

Portland çimentosu klinkerinin ve alçı taşını fabrika atıkları olan yüksek fırın cüruflarıyla ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilen çimento çeşididir.

Yüksek fırın cüruflu çimentoların dayanımı ve bağlayıcılık özelliği arttırmada kullanılmasının asıl sebeplerinden biri kristalleşmenin iğnecikler şeklinde olmasıdır. Bu iğnecikli yapı bağlanma özelliğini arttırdığından mukavemetler artış meydana gelmektedir. Cürufsuz çimentoda ise etrenjit hekzagonal sistemde meydana geldiğinden dayanım biraz daha düşüktür [37].

2.3.3.3. Harç çimentosu

%40 oranında portland çimentosu, %50 oranında doğal puzolanlar ve ek olarak uçucu kül gibi maddelerin alçı taşı ile birlikte öğütülerek elde edilen bağlayıcı çeşitlerine harç çimentosu adı verilmektedir [37].

2.3.3.4. Uçucu küllü çimento

Karışımda yer alan klinker ile klinker kütlesinin %10 ve %30 'luk bir kısmı kadar uçucu kül ile karıştırılması ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı çeşididir. 28 günlük mukavemet değerlerine göre UKÇ 32,5 olmak üzere tek tiptedir. Enerji gereksinimlerinden dolayı birçok termik santral kurulmuştur ve çoğu termik santralin yakıtı kömürdür. Yapılan deneyler sonucunda uçucu kül kullanımının mukavemeti arttırdığı tespit edilmiştir. Tüm bu uygulamalar sonucunda kimyasal atık bertarafının sağlanmasına hem de karışımlarda dayanımın yükselmesine uçucu kül kullanımı imkan sağlamaktadır. Tek başlarına bağlayıcılık özellikleri bulunmamasına rağmen kireç ile kullanıldıklarında bağlayıcı özellik kazanırlar [37].

2.3.3.5. Sülfata dayanıklı çimento

Sülfata dayanıklı çimentoların yapısında % 5 oranından da az C3A bulunmaktadır. Trikalsiyum alüminat eksikliği sebebiyle bu çimento tipinde sülfata karşı dayanıklılık artmaktadır. Sülfatlı suların bulunduğu ve sülfat etkisinin fazla olduğu yerlerde kullanılan çimento tipleridir. Sülfata dayanıklı çimento ile oluşturulan betonlarda hiçbir şekilde etrenjit oluşmaması sebebiyle beton ömürleri uzundur. Doğal olarak C_3A oranının düşüklüğü, direk olarak hidratasyon ısısının düşüklüğüne ve priz sürelerinin daha uzun olmasında etkilidir. İskele yapılarında, yer altı sularının oluğu yerlerde, kanalizasyon borularında ve endüstriyel atıkların olduğu yerlerde SDÇ kullanımı oldukça uygundur [37].

2.3.3.6. Erken dayanımlı yüksek çimento

Dayanımı oldukça yükse kolan bu çimento çeşidi özel olarak elde edilmiş klinker ile çok miktardaki alçı taşının öğütülmesi ile meydana getirilmektedir. 28 günlük kür süresinde elde edilen deney sonuçlarına göre yüksek basınç dayanımına sahip olduğu için EYÇ 52,5 tipi tek tipidir [37].

2.3.3.7. Katkılı çimento

%19 doğal puzolanik maddeler ile birlikte klinkerin ve az miktarda alçı taşının beraber öğütülmesi ile meydana gelen hidrolik bağlayıcıdır. 28 günlük kür süresinde elde edilen deney sonuçlarına göre KÇ 32,5 olmak üzere tek tipi mevcuttur [37].

2.3.4. Çimento kullanımının avantajları

- Yüksek bağlayıcılık özelliğiyle beton karışımlarında kullanılarak mukavemeti arttırır.
- Zemin enjeksiyonlarında taşıma gücünü arttırır.

2.4. Polimer

Çok sayıda küçük moleküllerin birbirlerine kovalent bağlarla bağlanarak meydana getirdiği makro moleküllere polimer adı verilmektedir. Kovalent bağlarla bağlanarak polimeri oluşturan küçük mol kütleli bu kimyasal maddelere “monomer” adı verilir [38, 39]. Uygun koşullar sağlandığında polimerizasyon tepkimeleri sonucunda monomerler arası kimyasal bağ oluşur ve monomerler polimer moleküllerine halini alırlar.

Polimer moleküllerinin oluşmasında etkili olan tepkimelerin tümüne polimerleşme tepkimesi ya da sadece polimerleşme denir. Monomerlerin birleşerek oluşturdukları polimer moleküllü yapıyı zincire, bu yapıyı oluşturan monomer moleküllerini ise halkalara benzetebiliriz. U sebepten ötürü polimer molekülleri kavramının yerine zincir de kullanılabilmektedir. Bir polimer molekülü binlerce monomer biriminden oluşan tek yapıda bir zincir içeriyorsa böyle polimerlere doğrusal polimer denir. Diğer bir polimer şekli ise dallanmış yapıdır [38, 39].

Hafif olmalar, ucuz olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri, değişik amaçlara uygun olmaları, kimyasal açıdan inert ve korozyona uğramamaları sebebiyle endüstri, makine, kimya, tekstil ve fizik mühendisliği gibi alanlarda oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Biyokimya, biyofizik, tıp v moleküler biyoloji açısından da polimerlerin kullanımının büyük bir önemi bulunmaktadır.

Ayrıca polimerlerin heterojen karışımları kompozit malzemeler olarak adlandırılır [40]. Kimyasal olarak birbirlerinden ayrık bir biçimde bulunan fakat iki veya daha fazla bileşenlerinin arasında bir tabaka bulunduran malzemelerdir. Her bileşen kompozit içerisinde kendi özelliğini korumaktadır. En büyük avantajı ise bileşenlerin en iyi özelliklerinin bir araya getirilmesiyle oluşmasıdır.

Kompozit malzemeler matris elemanı, takviye elemanı ve katkı maddeleri olmak üzere üç ana elemandan oluşmaktadır. Matris elemanı, termoset ve termoplastik polimer malzeme olarak sürekli fazı oluşturur. Takviye elemanı, kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Katkı maddeleri ise, niteliklerine göre özelliklerin geliştirilmesi amacıyla matrise eklenmektedir.

Kompozit malzemelerin uçak , uzay, savunma sanayi, deniz ve kara taşıtlarında ve yapı inşaat alanlarında kullanımının başlıca nedenlerinden bazıları; yüksek mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği, yüksek dielektrik direnimi, korozyon dayanımı, yüzey uygulamaları, şeffaflık özelliği, yanmazlık özelliği, sıcaklıktan etkilenmemesi, içerisine farklı malzemelerin gömülebilmesi ve kesilip delinebilme gibi birçok özelliğe sahip olmalarıdır [41].

2.4.4. Polimer çeşitleri

Polimerler, çeşitli özellikleri bakımından farklı şekillerde sınıflandırılabilir.

2.4.1.1. Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması

Doğal ve sentetik olmak üzere iki çeşitte bulunabilirler. Doğal halde bulunan polimerlerin çeşitli işlemler sonucunda elde edilen yeni polimer çeşitleri yarı-sentetik polimerlerdir. Yarı-sentetik polimerlere örnek verecek olursak doğal selülozlardan elde edilen rejenere selüloz ve diğer selüloz türevleri yarı sentetik polimerlerdir [42].

Polimerler		
Doğal Polimerler	Sentetik Polimerler	Yarı-Sentetik Polimerler
DNA, RNA, Proteinler	Polietilen	Rejenere Selüloz ve türevleri
Selüloz ve türevleri	Polipropilen	Modifiye Nişasta
Nişasta	Poli(etilen tereftalat)	
Agaroz	Polistiren	
Doğal kauçuk	Poli(vinil klorür)	

Şekil 2.6. Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması

2.4.1.2. Polimerlerin davranışlarına göre sınıflandırılması

Polimerler, termoplastikler ve termosetler olarak ısıya ve çözücülere karşı göstermiş oldukları davranışlara göre iki ana grup altında değerlendirilirler.

Termoplastiklerin çeşitli formlarda şekillendirilebilmelerinin ana sebeplerinden bazıları ısı ve basınç altında yumuşayıp akmalarıdır. Doğrusal yapıda oldukları gibi tekrar tekrar basınç ve sıcaklık altında şekillendirilebilme özelliğine sahiptirler. Çeşitli yöntemlerle farklı formlara dönüştürülebildikleri gibi uygun çözücüde çözünebilirler [42].

Termosetler ise termoplastiklerin özelliklerinden tamamen farklıdır. Çapraz bağların sebebiyle çözünmez ve erimezler. Dolayısıyla bir kere şekillendirildikten sonra tekrar ısı ve basınç altında şekillendirilemezler [42].

2.4.1.3. Polimerlerin fiziksel yapılarına göre sınıflandırılması

Polimerik bir maddenin özellikleri sadece kimyasal yapısına değil aynı zamanda onun fiziksel yapısına da bağlıdır. Bir polimerin fiziksel yapısı, makroskopik içeriği meydana getiren ve uzaysal olarak birbirinden ayrılabilen elemanlardan meydana gelir. Fiziksel yapı bu elemanlarda bulunan makromoleküler zincirin paketlenme şeklini, bu elemanların şekli ve boyutları ile birçok elemanın birbirlerine göre aldığı uzaysal düzeni anlatır. Polimerlerin fiziksel yapıları küçük mol kütleli maddelerden farklıdır. Polimerlerin, uzun zincirler halinde farklı büyüklüklerde çok büyük mol kütleli moleküllere sahip olmasından dolayı katı, yumuşak ve eriyik halde bulunabilirler. Bunun nedeni, polimerlerin uzun zincirler halinde farklı büyüklüklerde çok büyük mol kütleli moleküllere sahip olmalarıdır. Örneğin, katı haldeki küçük mol kütleli bir madde ya kristal halde bulunur ya da amorf halde

bulunur. Polimer ise, her iki fiziksel hali birlikte içerir ancak bunların oranları farklı olabilir. Kristal oranı yüksek olan polimerlere kristalin, amorf oranı çok yüksek olan polimere ise amorf polimerler adı verilir.

2.5. Silikon

Silikon oksijen ile kolaylıkla bağlanır ve saf haliyle doğada çok nadiren bulunur. Genellikle kumun en yaygın bileşeni olan kuvartz yani silisyumdioksit (silika) olarak bulunur. Ayrıca doğada akik, ametist, çakmak taşı ve opal gibi minerallerde de oldukça saf silikondioksit mevcuttur.

İskelet yapısında karbon (C) atomu yerine ardışık olarak dizilmiş olan silisyum (Si) ve oksijen (O)atomları bulunduran polimerlere polisiloksan adı verilir. Metil ya da fenil grupları silisyum atomlarına bağlı olarak silikon yapılarında bulunabilir. En çok sıvı, reçine veya elastomer halde silikonlar bulunabilir.

2.5.1. Silikonun elde edilmesi

Silisyum 1924 yılında Berzelius tarafından ilk keşfi gerçekleştirilmiştir. Silisyum doğada siliksat asidi (mSiO2.nH2O) ve tuzları halinde bulunur. %25,7 doğada bulunma oranı ile oksijenden sonra bileşikler halinde en yüksek bulunma oranına sahiptir. Silisyum oksit doğada kum ve kuartz şeklinde bulunmaktadır.

Silisyum doğada iki allotrop halinde bulunmaktadır. İlki saf olarak bulunan saf kristal silisyumdur. Koyu gri renkli yapılı, parlak sert ve kırılgan en açık özelliklerindendir. Ayrıca örgü yapısı elmasa benzemektedir. Diğeri bir allotrop olan amorf silisyum ise koyu kahve renkli ve tane büyüklüğü nedeni ile kristal silisyumdan ayırt edilebilir. Amorf silisyum kolay reaksiyon verebilir [43].

Silikon kauçuklara değinecek olursak bildiğimiz kumdan yani inorganik silikalardan türetilmiştir. Silikonun ana yapı taşlarından biri olan oksijen atomunun kum ile işlem görmesi sonucunda silikon kauçuklar elde edilmektedir. Bu uygulanan işlemler yüksek ısıya dayanıklı kuartz ve camlara uygulanan işlemlerle aynıdır. Tüm bu sebeplerden ötürü bozucu etken olarak öngörülen ozon, UV ışınları, asit, baz, yağ ve yüksek ve düşük ısıya karşı direnç göstermektedirler.

Silikonun elde edilmesi aşağıdaki gibi bir dizi kimyasal reaksiyon sonucu olmaktadır.

$CH_3\text{-}Si\text{-}Cl_3 + {}_3H_2O \blacktriangleright CH_3\text{-}Si\text{-}(OH)_3 + {}_3HCl$ (2.3)

$(CH_3)_2\text{-}Si\text{-}Cl_2 + 2H_2O \blacktriangleright (CH_3)2\text{-}Si\text{-}(OH)_2 + 2HCl$ (2.4)

$(CH_3)_3\text{-}Si\text{-}Cl + H_2O \blacktriangleright (CH_3)3\text{-}Si\text{-}OH + HCl$ (2.5)

$(CH_3)_3\text{-}Si\text{-}O\text{-}H + O\text{-}H\text{-}Si\text{-}(CH_3)_3 \blacktriangleright (CH_3)_3\text{-}Si\text{-}O\text{-}Si\text{-}(CH_3)_3$ (Silikon) (2.6)

2.5.4. Silikonun teknik özellikleri

Su, ısı ve yükseltgenlerin etkisiyle bozunmamaları silikonların oldukça kararlı maddeler olduğunun birer kanıtıdır. Kağıt ve dokuma gibi çeşitli malzemelerin suya dayanıklılığını arttırarak geçirgenliği azaltmak amaçlı kullanılmalarının yanı sıra çok iyi elektrik yalıtkanlarıdır.

Silikon kauçukların koruyucu kılıflarda ve yalıtkan verniklerde kullanımının başlıca sebeplerden bazıları elektriği yalıtma, belirli sıcaklık aralıklarında esnekliği koruma ve kimyasallara dayanıklılık özellikleridir.

250°C 'ye kadar dayanıklı olmasına rağmen – 60 °C ve 200°C sıcaklık aralığında kullanılmaktadırlar. En çok krank keçelerinde kullanılmaktadır. Esneklik özelliği, hava direncinin ve ozon dayanımının yüksek olmasına rağmen yakıtlarda ve yüksek mekanik etkilere karşı direnç gösteren uygulamalarda kullanılmaz.

Silikonun başlıca özellikleri;

- Yüksek sıcaklıklarda ve düşük sıcaklıklarda fiziksel özellikleri değişmez.
- Hava şartlarına, ozona, oksijene karşı yüksek dirence sahiptir.
- Radyasyona, ultraviyole ışınlara karşı yüksek dirençlidir.
- Elektriksel yalıtıma sahiptir.
- Biyolojik inertliği mevcuttur.
- Diğer malzemelere kolaylıkla yapışmaz.
- Tek bileşenlidir.
- Hacim kaybına uğramadığı gibi çatlamaz ve içerisinde solvent içermez.

- Yaşlanmaya karşı sayanımı yüksektir.
- Küflenme ve sararma yapmadığı için antibakteriyeldir.
- Nemle sertleşme özelliğine sahiptir.
- Elastik özelliğini yitirmez.
- Silikonun yüzeyine diğer malzemelerin yapışması çok zordur.

Yukarıda bahsedilen tüm bu özelliklerine göre sağlık sektöründe, elektrik ve elektronik sistemlerde, otomotiv – uçak – gemi sanayisinde, tekstil, gıda ve kozmetik sanayisinde kullanımı yaygındır [43].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Yapılan deneysel çalışma, zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan stabilizasyon yöntemi ile yüksek plastisiteli bentonit kilinin kireç stabilizasyonu sonucu ile iyileştirilmesine müteakip fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bir adım daha iyileştirilmesinde farklı oranlarda çimento, polimer ve silikon kullanımının, mukavemet ve durabilite üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Kireç stabilizasyonundaki en önemli amaç yüksek plastisiteli bir killi zeminin su muhtevasını azaltarak aynı zamanda mukavemeti arttırmaktır.

Piyasadan elde edilen bentonit numune örnekleri üzerinde birçok laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda mevcut bentonit numunesinin tüm özellikleri ortaya çıkartılarak zeminin yapısı, mukavemet özellikleri ve içeriği belirlenmiştir. Daha sonrasında ise kireç, çimento, polimer ve silikon kullanarak yapısındaki, içeriğindeki ve mukavemetindeki değişimler incelenmiştir.

Yalın bentonit numunesi ile yapılan deneyler sonucunda zemin özelliklerinden sıkışabilirlik ve mukavemet değerleri kontrol edilmiştir. Ardından alternatif bir malzeme olarak karışıma katılan kireç, katkısız bentonit kiline, kuru zemin ağırlığının %7,5 oranında ilave edilerek serbest basınç deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Bentonit kili ve %7,5 kireç homojen karışımlarına daha sonra optimum su muhtevasında kuru zemin ağırlığının %5 çimento, %7,5 çimento, %4 silikon ve %2 polimer gibi ayrı oranlarda katkı maddesi karıştırılarak serbest basınç deneyleri için yeni numuneler hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyleri yapılırken alınan numunelerdeki hata payını en aza indirmek için en az 3 kere numune alınmış ve deneyler yapılmıştır. Tüm numunelerin anlık, 7 günlük ve 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemetleri tespit edilmiştir.

3.1. Doğal Su Muhtevasının ($W_{doğal}$) Bulunması

Bentonit kili temin edildiğinde mevcut numunenin farklı yerlerinden alınan 12 adet numune cam kaplara konularak etüv içerisine yerleştirilmiştir. 24 saat kür süresi sonunda çıkarılan tüm numunelerin ağırlık ölçümleri yapılarak ortalama su oranları %8.6 olarak belirlenmiştir.

3.2. Özgül Kütle Tayini

Deneylere özgül kütle değerlerinin tayini ile başlanmıştır. Deneyler TS 1900' e uygun olarak yapılmıştır. Özgül kütle sonuçlarına bakıldığında doğal bentonit için 2,5 olarak bulunmuştur. Kireç ilavesinden sonra ise 28 gün kürde bekletilerek deneyler tekrarlanmış ve bentonit için 2,6 olarak bulunmuştur. Artımlar çok küçük olduğu için değerler sonucu etkilememiştir.

3.3. Atterberg Kıvam Limitleri İle Optimum Kireç Değerinin Bulunması

Etüvde kurutulmuş olan doğal bentonit malzemesinin öncelikle likit limit ve plastik limit deneyleri uygulayarak değerleri tespit edilmiştir. Likit limitlerinin bulunması amaçlı yapılan deneylerde kuru halde bulunan bentonit numunesi su ilavesi sonucunda krema kıvamı elde edilene kadar karıştırılmaktadır. Daha sonra krema kıvamında elde edilen bu numune Casagrande aletine yaklaşık haznenin 1/3 'ünü dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Casagrande deney aletlerinden biri ola kesme bıçağı ile hazneye yerleştirdiğimiz numune ortasında bir yarın açılmıştır. Casagrande deney düzeyinin saniyede 2 vuruşa tekabül edecek şekilde çalıştırılmasıyla, kesme bıçağı ile oluşturduğumuz yarığın 13mm'lik bir kısmının kapanmasına müteakip o kısımdan alınan bir deney örneği ile deney tamamlanmıştır. Düzgün bir deney sonucu elde edebilmek amaçlı en az 3 adet numune, tam anlamıyla 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevasını bulmak için 10-20, 20-30 ve 30-40 vuruş sayınlarında alınmalıdır.

Aynı deney her defasında bentonit numunesine kuru ağırlığının 0-2,5-5-7,5 ve 10 % oranlarında kireç ilave edilerek deneyler yapılmıştır.

Plastik limit deneyinde likit limit için hazırlanan numune örnekleri de kullanılabilmektedir. Likit limit için hazırlanan numuneler cam yüzeye yerleştirilerek

el yardımıyla yuvarlanmalı ve 3mm kalınlığında silindir şekline gelene kadar devam edilmelidir. Yapılan deneyler 3mm çapına ulaştığında çatlamalar başlamış olmalıdır. 3mm çapına ulaşmadan çatlamalar meydana gelmesi durumda zemin numunelerine ilave su eklenecektir. Tam tersi bir şekilde 3mm kalınlığına ulaştığında hala çatlamalar meydana gelmezse kuru malzeme ilavesi yapılmalıdır. 3 mm çapına ulaşan çatlamaların başladığı numunelerde örnekler alınarak etüve yerleştirilir.

Likit limit ve plastik limit deneyleri sonucunda (w_L) %193, plastik limit (w_P) %28 ve likit limit ve plastik limit arasındaki fark olan plastisite indisi %165 çıkmıştır.

Doğal haldeki bentonit için likit limit değeri 193 iken bu değerde artan kireç yüzdesine bağlı olarak düşüş gözlemlenmiştir. % 7,5 kireç yüzdesinde en küçük değerine ulaşmış ve 92 bulunmuştur. % 10 kireç ilavesinde ise tekrar bir artma olmuş ve 101 bulunmuştur. Plastik limit değerleri ise doğal durumda 28 iken artan kireç yüzdelerinde artmış ve % 7,5 için en yüksek değerine 60 ye ulaşmıştır. % 10 kireç yüzdesinde ise 58' e düşmüştür. Plastisite indisleri incelendiğinde doğal durumda 165 olan değer % 7,5' te 32 ye düşmüş son olarak % 10 da 43' a çıkmıştır.

Tablo 3.1. Bentonit için değişik kireç oranlarındaki Atterberg kıvam limit değerleri

Kireç Oranı %	LL, %	PL, %	PI, %
0	193	28	165
2,5	133	41	92
5	105	55	50
7,5	92	60	32
10	101	58	43

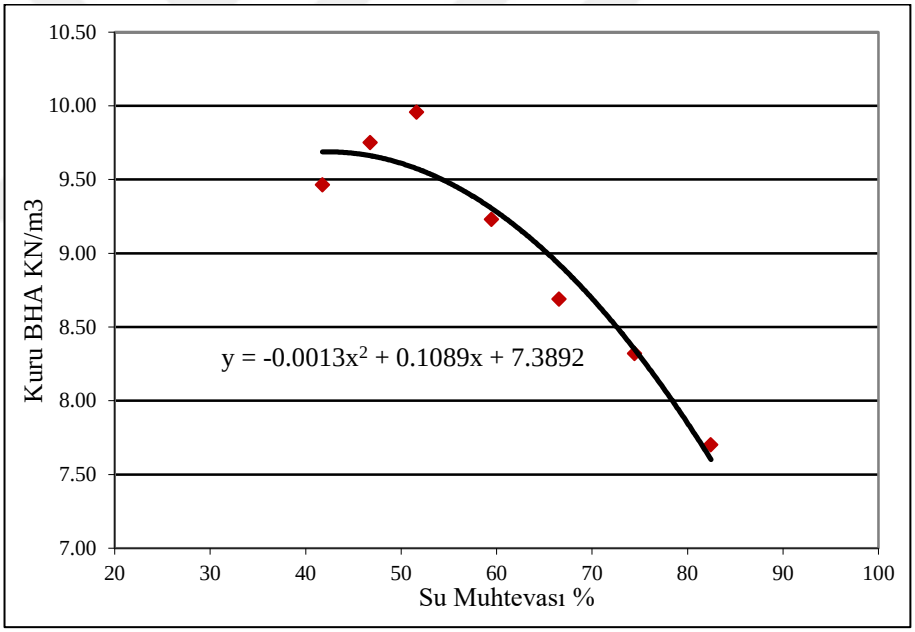
Bulunan bu sonuçlar neticesinde bentonit için Plastisite indisi değeri % 7,5 kireç miktarında en az değerine ulaşmıştır. Bu nedenle optimum kireç miktarının % 7,5 olması kararlaştırılmıştır.

3.4. Harvard Proctor İle Su Muhtevasının Bulunması

Harvard Proctor deneyi ile zeminin optimum su muhtevası bulunmaktadır. Harvard Proctor deneyleri standart ve modifiye sistem olmak üzere iki şekilde bulunabilir. Modifiye Harvard Proctor deneylerinin gerçeğe daha uygun sonuçlar vermesi ve

standart Proctor deneylerinde meydana gelen hata payının yüksekliği nedeniyle yapılan bu çalışmada modifiye proctor metodu kullanılmıştır.

Deney düzeneğinde kullandığımız özel olarak üretimi yapılan kalıbın iç hacmi 62,27 m^3 'tür. Modifiye proctor uygulamasında zeminler kalıp içerisine özel bir çekiç yardımı ile 5 tabaka halinde ver her bir tabakada 57 vuruş olmak kaydı ile sıkıştırılarak yerleştirilmektedir. Her deney sonunda oluşturulan silindir numunelerin ağırlıkları kayda alınmıştır. Deneylerin tamamlanabilmesi için her bir su oranı için ayrı ayrı bulunan kalıp ve zemin ağırlık değerlerinin artan su oranına göre azaldığı noktayı tespit edilmiş ve bu verilere göre hazırlanan grafikler sonucunda meydana getirilen eğrinin tepe noktası y ekseninde kuru birim hacim ağırlığını, x ekseninde ise optimum su muhtevasını vermektedir. Sonuç olarak meydana gelen tabloda %7,5 oranında bentonit ve kireç karışımının optimum su muhtevası bulunmuştur.



Şekil 3.1. Bentonit + %7,5 kireç karışımının modifiye proctor eğrileri

Doğal bentonit esas alındığında, optimum su muhtevası % 34,5, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 16,5 kN/m^3 iken %7,5 kireç ilave edildiğinde değerler değişmiş ve optimum su muhtevası % 41,88 maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 10,9 kN/m^3 olmuştur.

3.5. Serbest Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneylerimiz kireçsiz W_{opt} 'nda doğal bentonit, optimum su muhtevasında %7,5 kireç ve bentonit karışımlı, optimum su muhtevasında %7,5 kireç ve bentonit karışımına ek olarak ve %5 çimento ilaveli, optimum su muhtevasında %7,5 kireç ve bentonit karışımına ek olarak %7,5 çimento ilaveli, optimum su muhtevasında %7,5 kireç ve bentonit karışımına ek olarak %4 silikon ilaveli, optimum su muhtevasında %7,5 kireç ve bentonit karışımına ek olarak %2 polimer ilaveli olmak üzere 6 farklı şekilde deney örnekleri hazırlanmıştır. Her bir deney için en az 2 adet numune hazırlanmıştır. Tüm deneyler modifiye proctor metodu kullanarak hazırlanmıştır. Toplamda 58 adet numune hazırlanmış ve serbest basınç kırımları yapılmıştır.

Tablo 3.2. Serbest basınç numuneleri için hazırlanan numune bilgileri

	Deney Sayısı			
Kullanılan Malzeme	Anlık	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Doğal Bentonit	3	-	3	3
Bentonit + %7,5 Kireç	3	-	3	3
Bentonit + %7,5 Kireç + %5 Çimento	2	2	2	2
Bentonit + %7,5 Kireç + %7,5 Çimento	2	2	2	2
Bentonit + %7,5 Kireç + %4 Silikon	3	3	3	3
Bentonit + %7,5 Kireç + %2 Polimer	3	3	3	3

Tüm numuneler minyatür proctor düzeneği kullanılarak hazırlanmıştır. 5 tabaka halinde her tabakada 57 vuruş ile sıkıştırılarak hazırlanan numunelerin numune kabından çıkarılması Şekil 3.2. 'de görüldüğü gibi bir düzenek yardımıyla yapılmaktadır. Hazırlanan numuneler kür sürelerini tamamlaması ve dış şartlardan etkilenerek su oranlarında herhangi bir kayıp yaşanmaması amaçlı alüminyum folyo ve streç film tabakasına sarılarak muhafaza edilmiştir. Muhafazası yapılan deney numuneleri daha sonra nem kabı adını verdiğimiz içinde su bulunan ve nem oranını sabit tutan numune ile herhangi bir su teması olmayan kapaklı bir kapta saklanmış, kür sürelerinin tamamladıktan sonra serbest basınç düzeneğinde kırımları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kalıp, çekiç ve numune çıkarıcı Şekil 3.2. 'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Minyatür Proctor Düzeneği

3.6. Serbest Basınç Deneyi Numunelerinin Deney Sonuçları

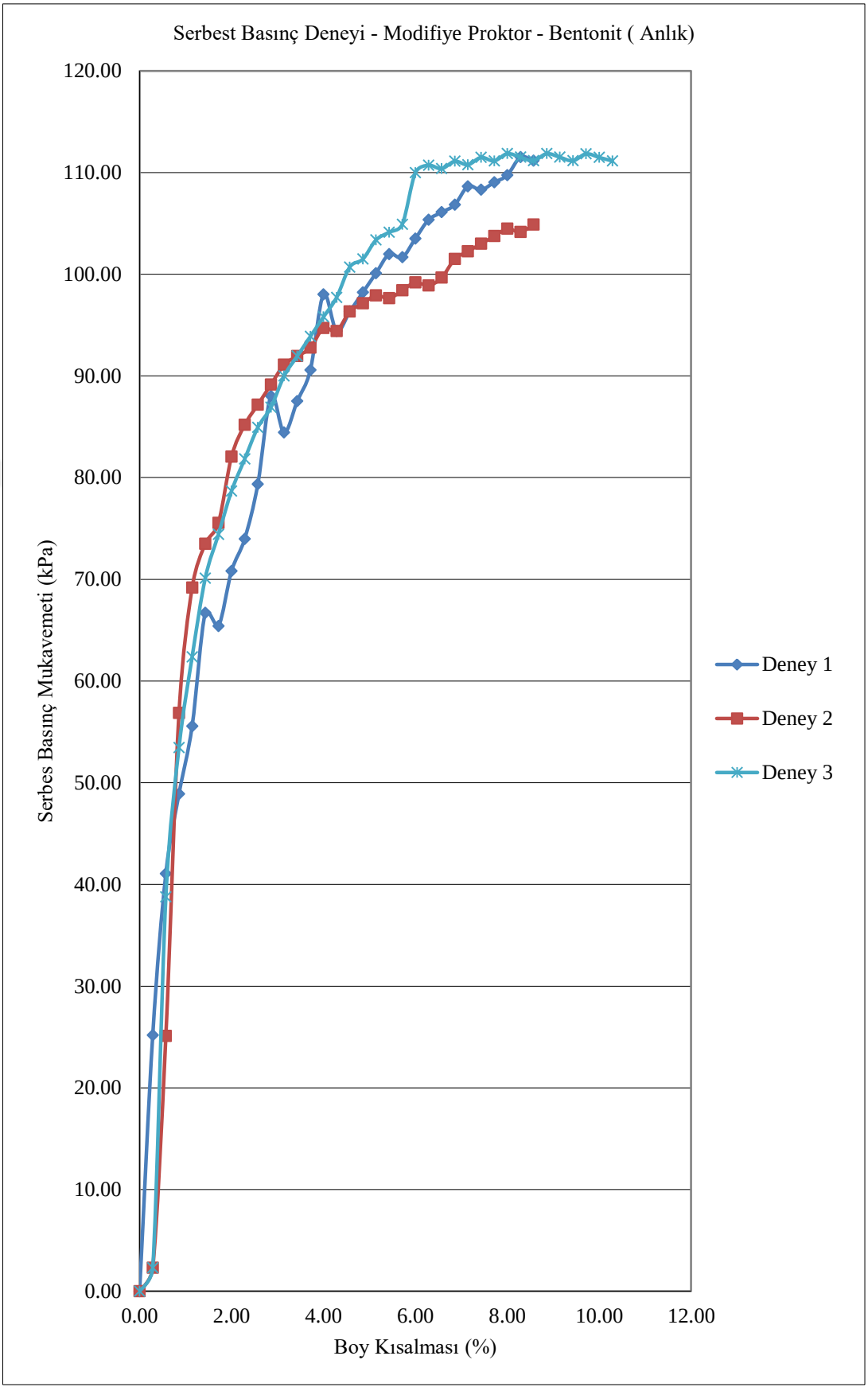
Minyatür Harvard Proctor düzeneği ile hazırlanan ve kür süresini tamamlayan tüm numuneler Şekil 3.3.' te görülen serbest basın düzeyine kapağı kapatılarak yerleştirilmiştir. Numune başlıkları doğru bir şekilde yerleştirilmiş ve numuneye deney başlamadan yük gelmeyecek şekilde ayarlanmıştır. Son olarak deformasyon saati yerleştirilerek düzenek hazır hale getirilmiştir. Kullanılan serbest basınç düzeneğinde üst taraf sabit olmakla beraber alt tarafta bulunan belirli deformasyon saatinden de okunacağı üzere belirli bir hız ile hareket ederek zemin numunesine yük uygulamaktadır. Piston ne kadar yukarı çıkarsa uygulanan yük kg cinsinden düzenekten okunabilmektedir. Hazırlanan zemin numunesinin özelliğine göre her 0,1 mm ya da 0,2mm 'de bir okuma uzunluğu alınmış olup deney zemin numunesi gözle görülür bir şekilde kırılması ile deney tamamlanmış olur. Aynı zamanda zemin numunesinin kırıldığı nokta yük okumalarındaki düşüşten de tespit edilebilir.



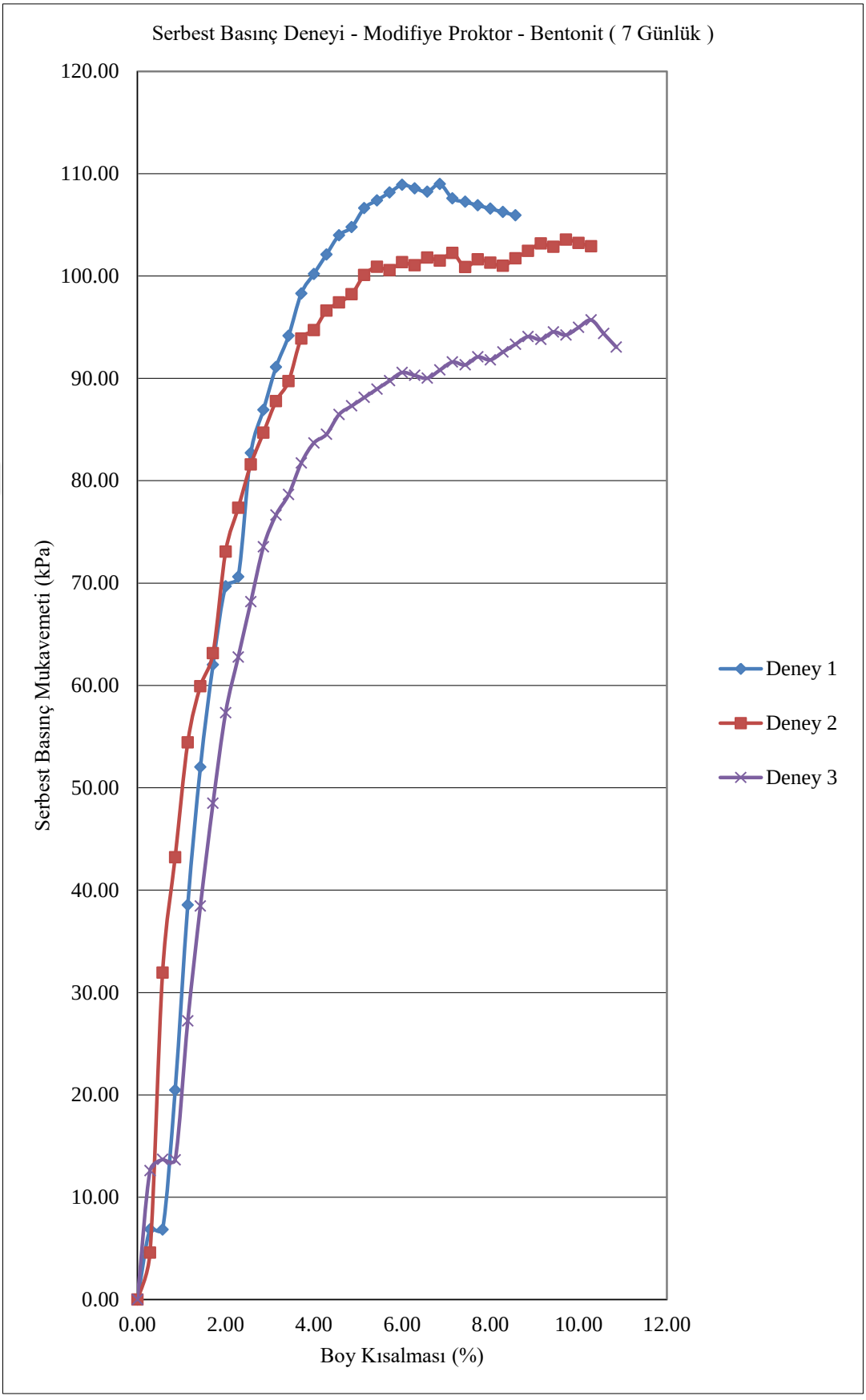
Şekil 3.3. Serbest basınç düzeneği

3.6.1. W_{opt}' da bentonit malzemesinin serbest basınç grafiği

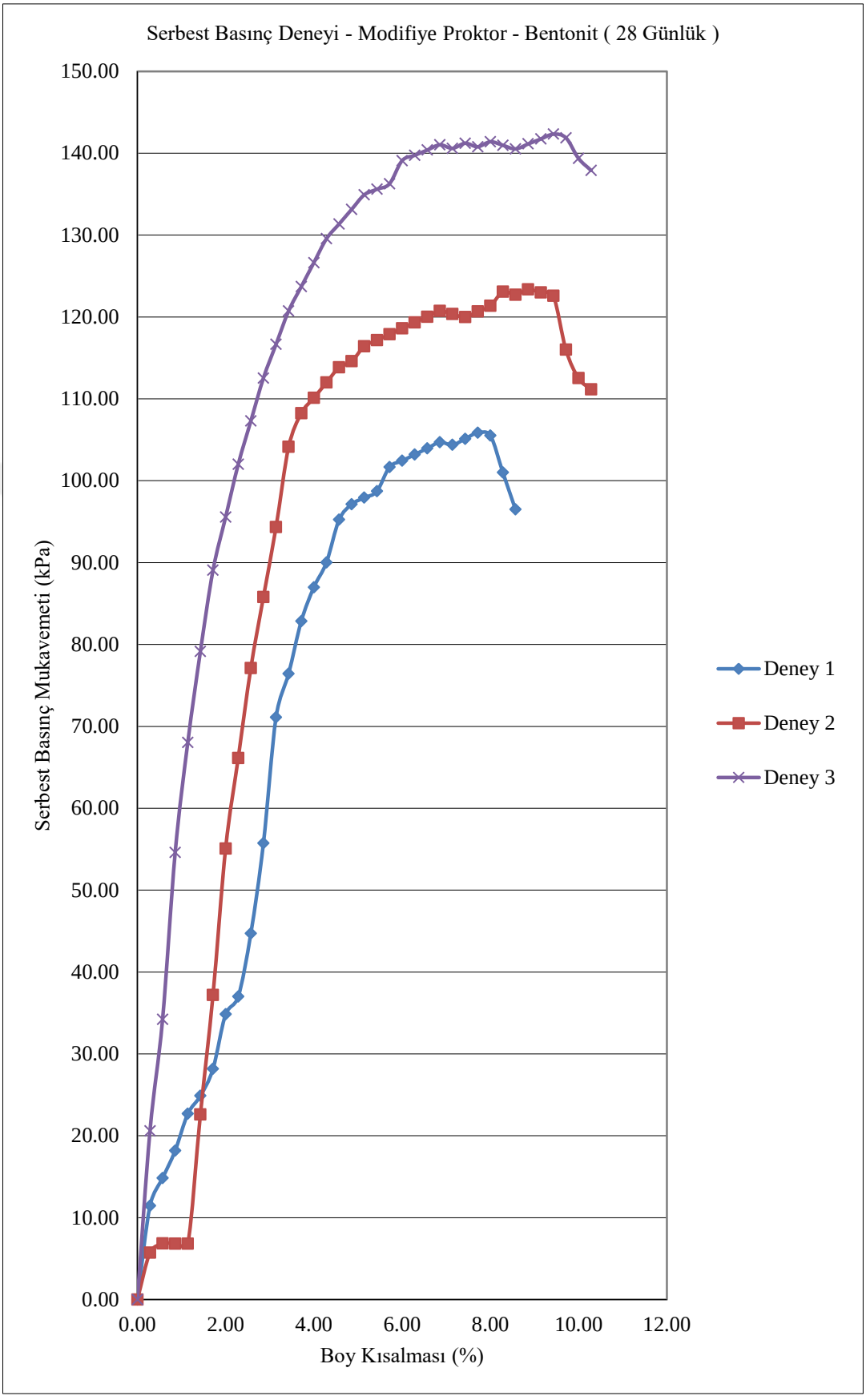
Toplamda 9 adet optimum su muhtevasında bentonit numunesinin deney sonuçları incelenmiştir. Hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemet değerleri (q_u) ile boy kısalma oranları grafiklerde gösterilmektedir. Bu grafiklerden Şekil 3.4.'te anlık, Şekil 3.5.'te 7 günlük ve Şekilde 3.6.'da 28 günlük serbest basınç deney sonuç grafikleri görülebilmektedir. Ek olarak tüm kür sürelerinde deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerlerini Şekil 3.7.'de görmek mümkündür.



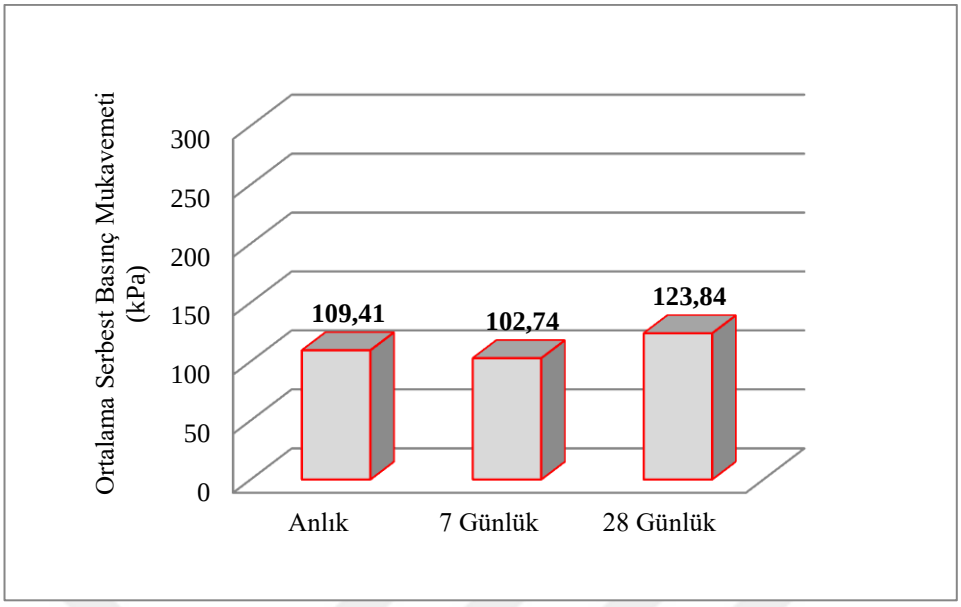
Şekil 3.4. W_{opt} 'daki bentonit malzemesinin anlık deney grafiği



Şekil 3.5. W_{opt} 'daki bentonit malzemesinin 7 günlük deney grafiği



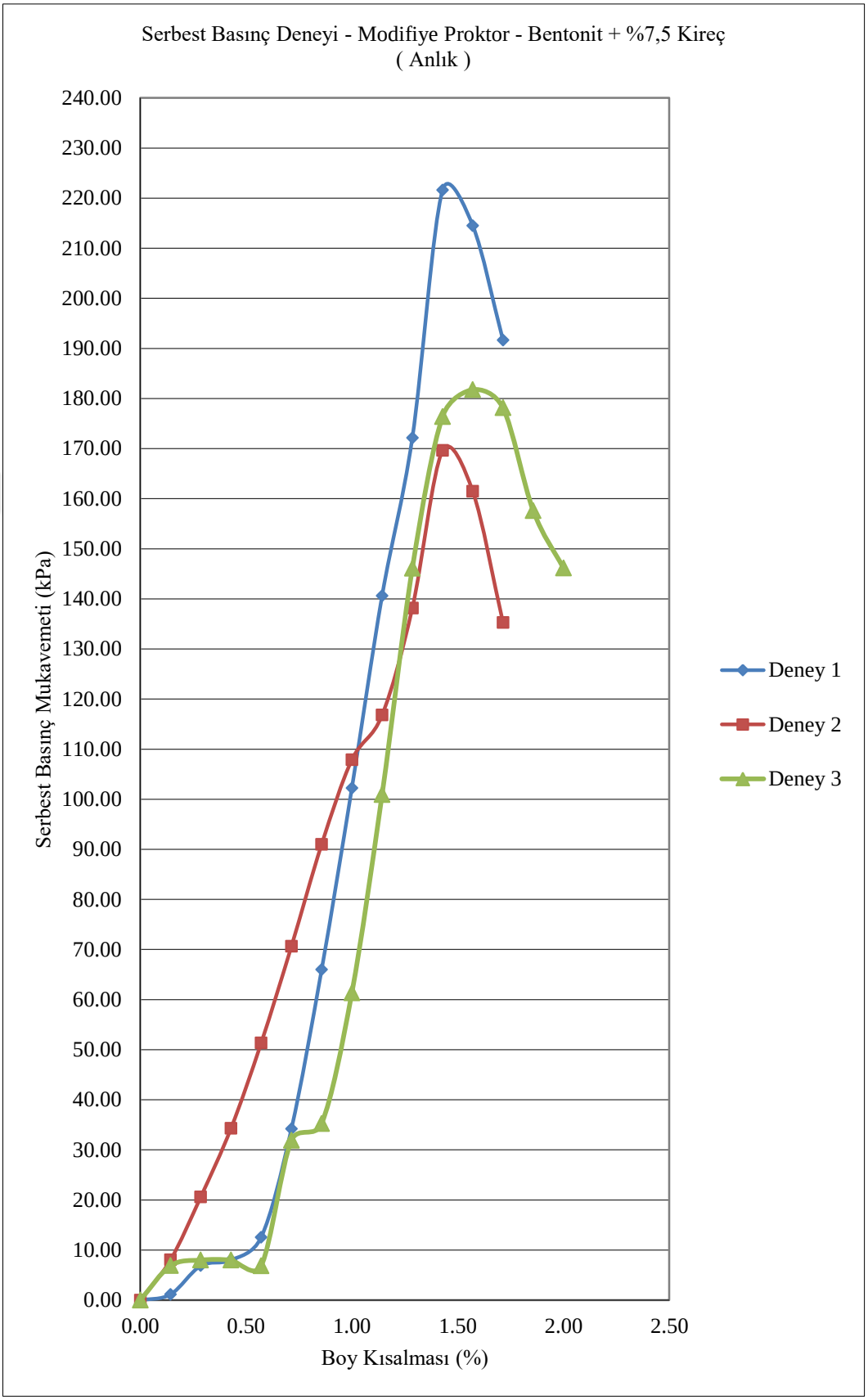
Şekil 3.6. W_{opt}'daki bentonit malzemesinin 28 günlük deney grafiği



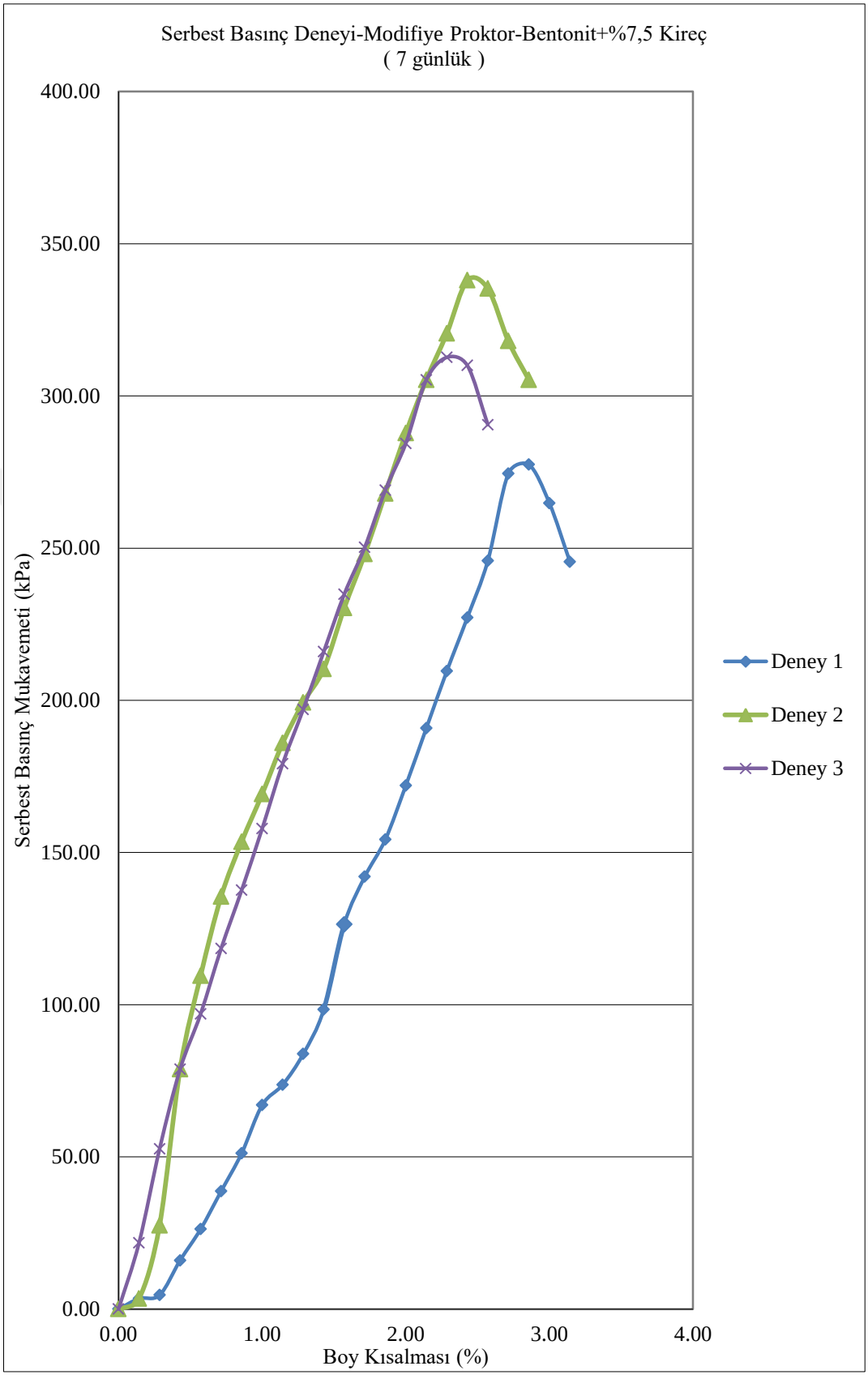
Şekil 3.7. W_{opt}'daki bentonit malzemesinin kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri

3.6.2. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesinin serbest basınç grafiği

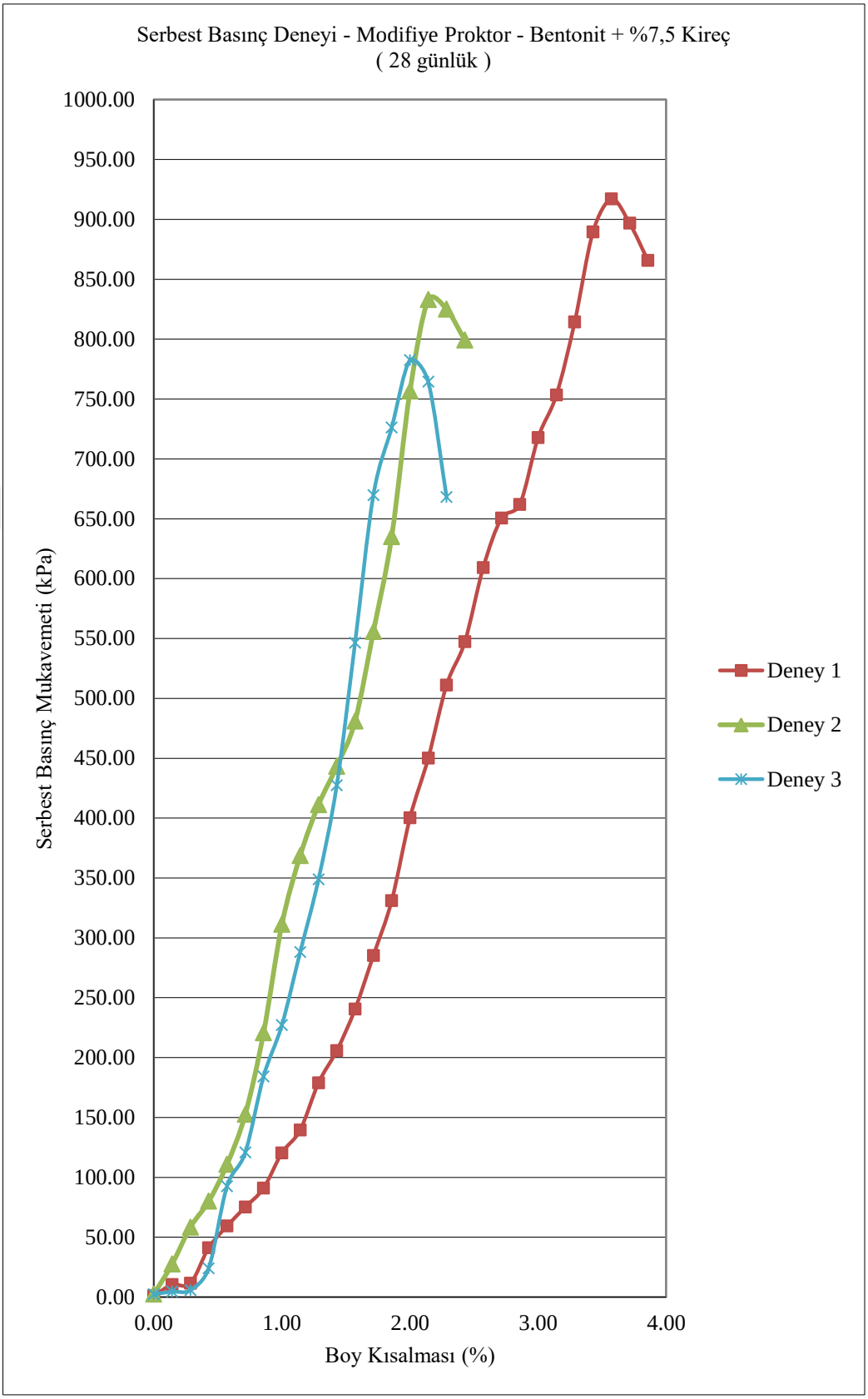
Toplamda 9 adet numune, su miktarı optimum su muhtevası %41.88 alınarak bentonit ve %7,5 kireç karışım numuneleri incelenmiştir. Hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemet değerleri (q_u) ile boy kısalma oranları grafiklerde gösterilmektedir. Bu grafiklerden Şekil 3.8.'de anlık, Şekil 3.9.'da 7 günlük ve Şekilde 3.10.'da 28 günlük serbest basınç deney sonuç grafikleri görülebilmektedir. Ek olarak tüm kür sürelerinde deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerlerini Şekil 3.11.'de görmek mümkündür.



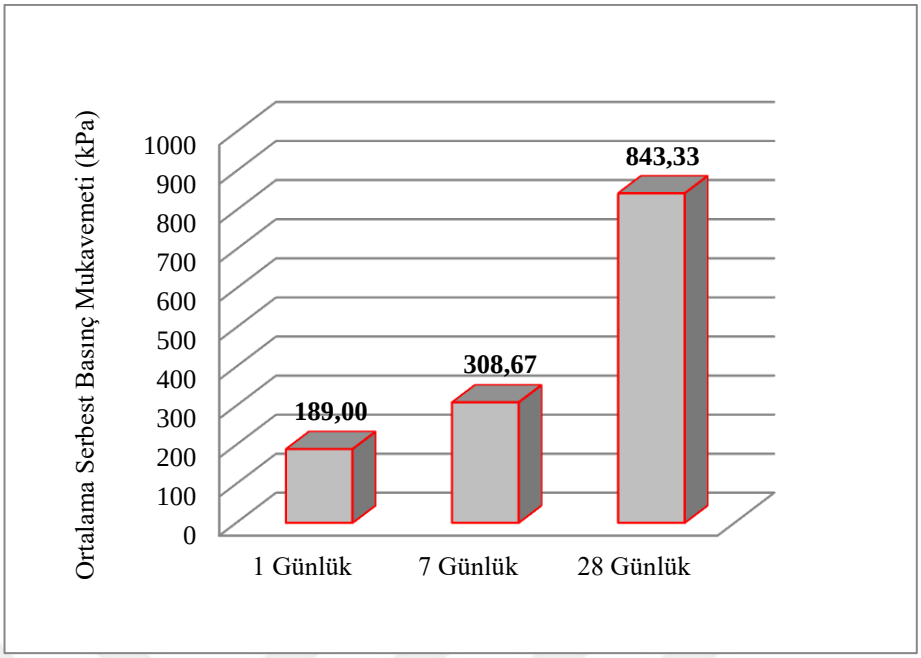
Şekil 3.8. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışım malzemesinin anlık deney grafiği



Şekil 3.9. W_{opt} 'daki bentonit ve %7,5 kireç karışım malzemesinin 7 günlük deney grafiği



Şekil 3.10. W_{opt}' daki bentonit ve %7,5 kireç karışım malzemesinin 28 günlük deney grafiği

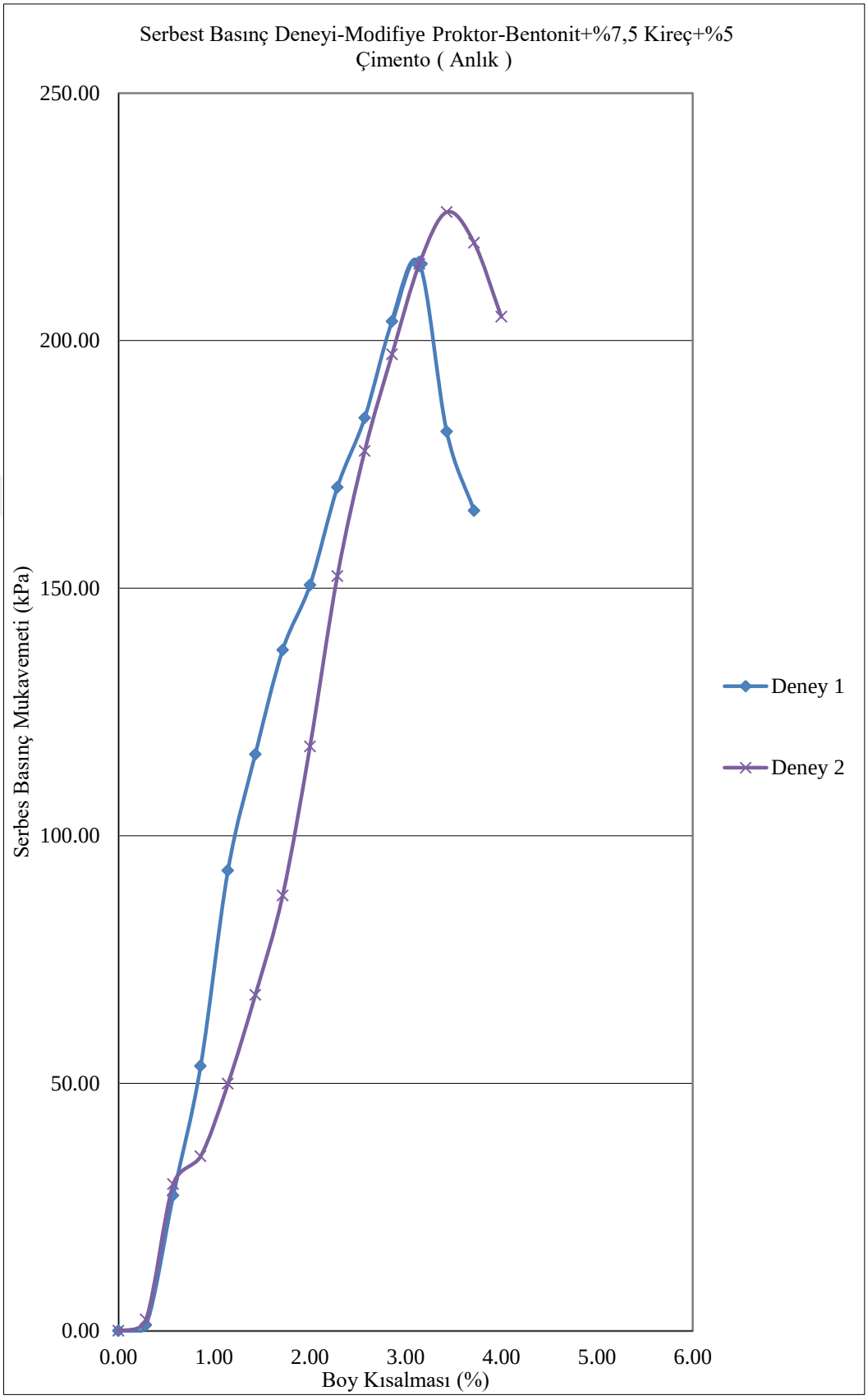


Şekil 3.11. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri

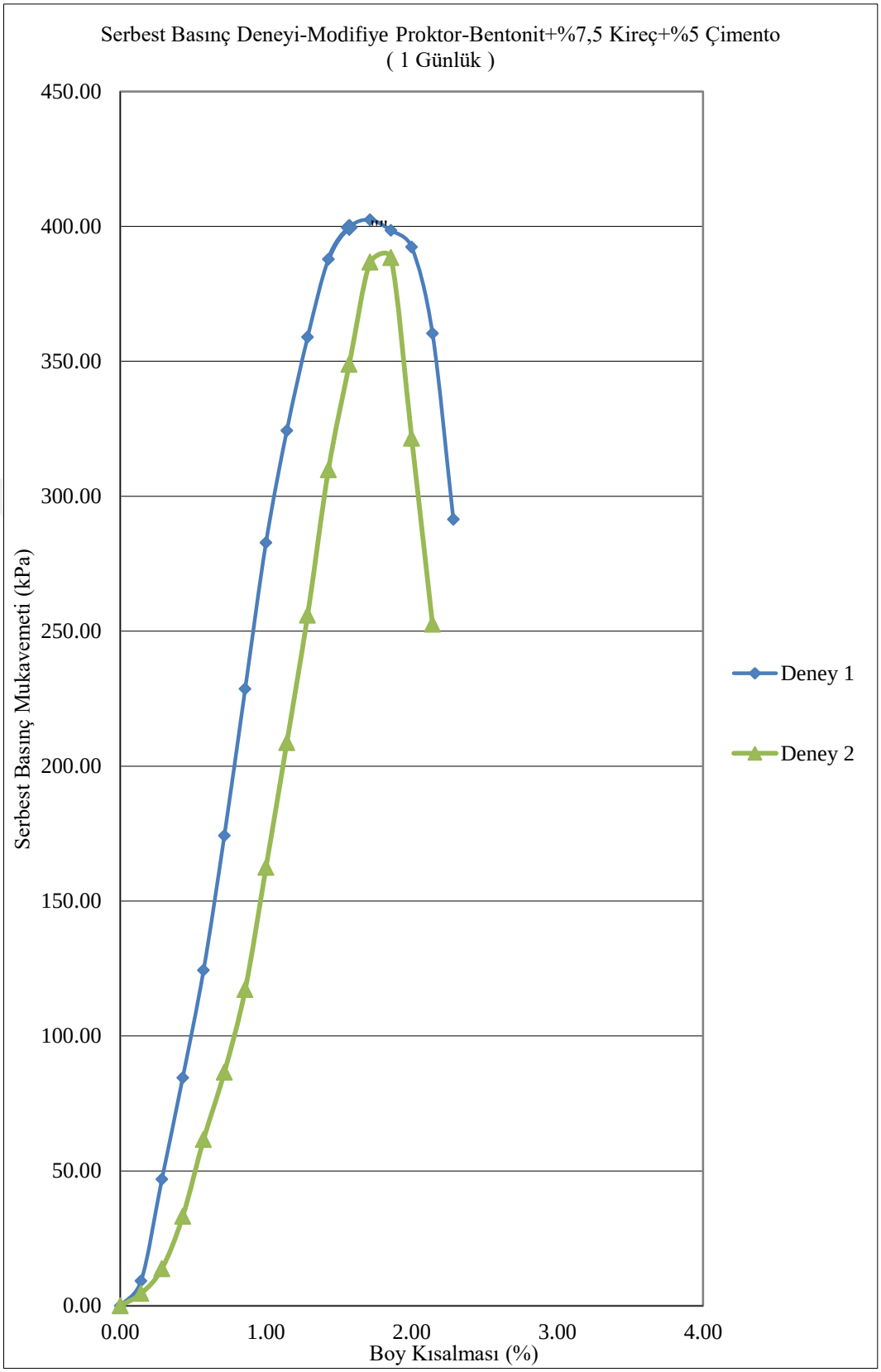
Deney sonuçları ele alındığında optimum su muhtevasında bulunan bentonit ve kireç karışımları yalnız bentonit numunesi ile karşılaştırıldığında 28 günün sonunda yaklaşık % 680 oranında mukavemetlerde artış görülmüştür. Aynı şekilde bentonit ve %7,5 kireç karışımları, boy kısalma değerleri (%) kontrol edildiğinde %10 değerinden %2 değerine kadar gerileyerek çok daha az deforme olduğunu kanıtlamıştır.

3.6.3. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %5 çimento karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği

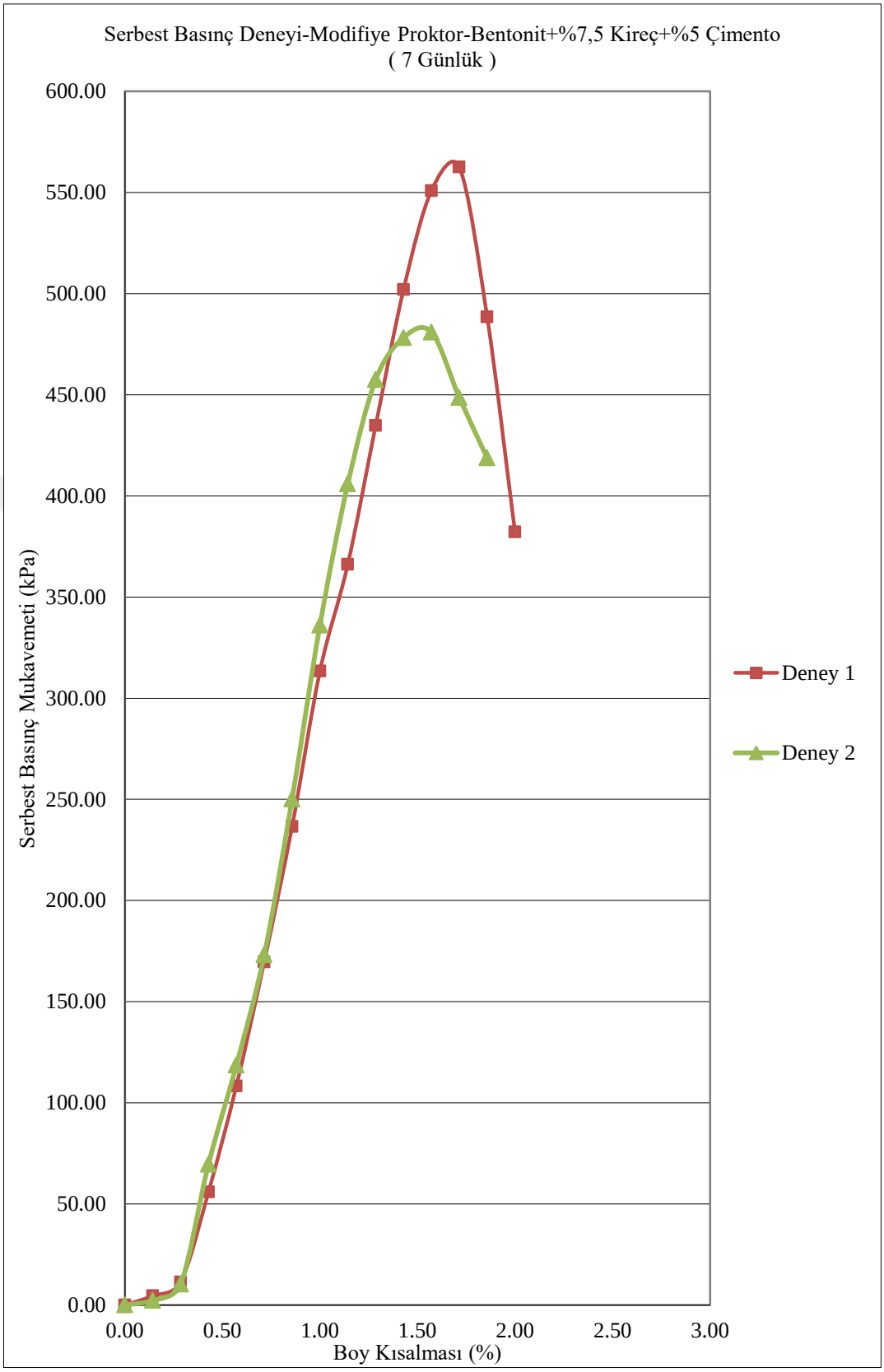
Toplamda 8 adet numune, su miktarı optimum su muhtevası %41,88 alınarak bentonit ve %7,5 kireç karışım numunesine ek olarak %5 çimento karıştırılarak incelenmiştir. Hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemet değerleri (q_u) ile boy kısalma oranları grafiklerde gösterilmektedir. Bu grafiklerden Şekil 3.12.'de anlık, Şekil 3.13.'te 1 günlük, Şekil 3.14.'te 7 günlük ve Şekil 3.15.'te 28 günlük serbest basınç deney sonuç grafikleri görülebilmektedir. Ek olarak tüm kür sürelerinde deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerlerini Şekil 3.16.'da görmek mümkündür.



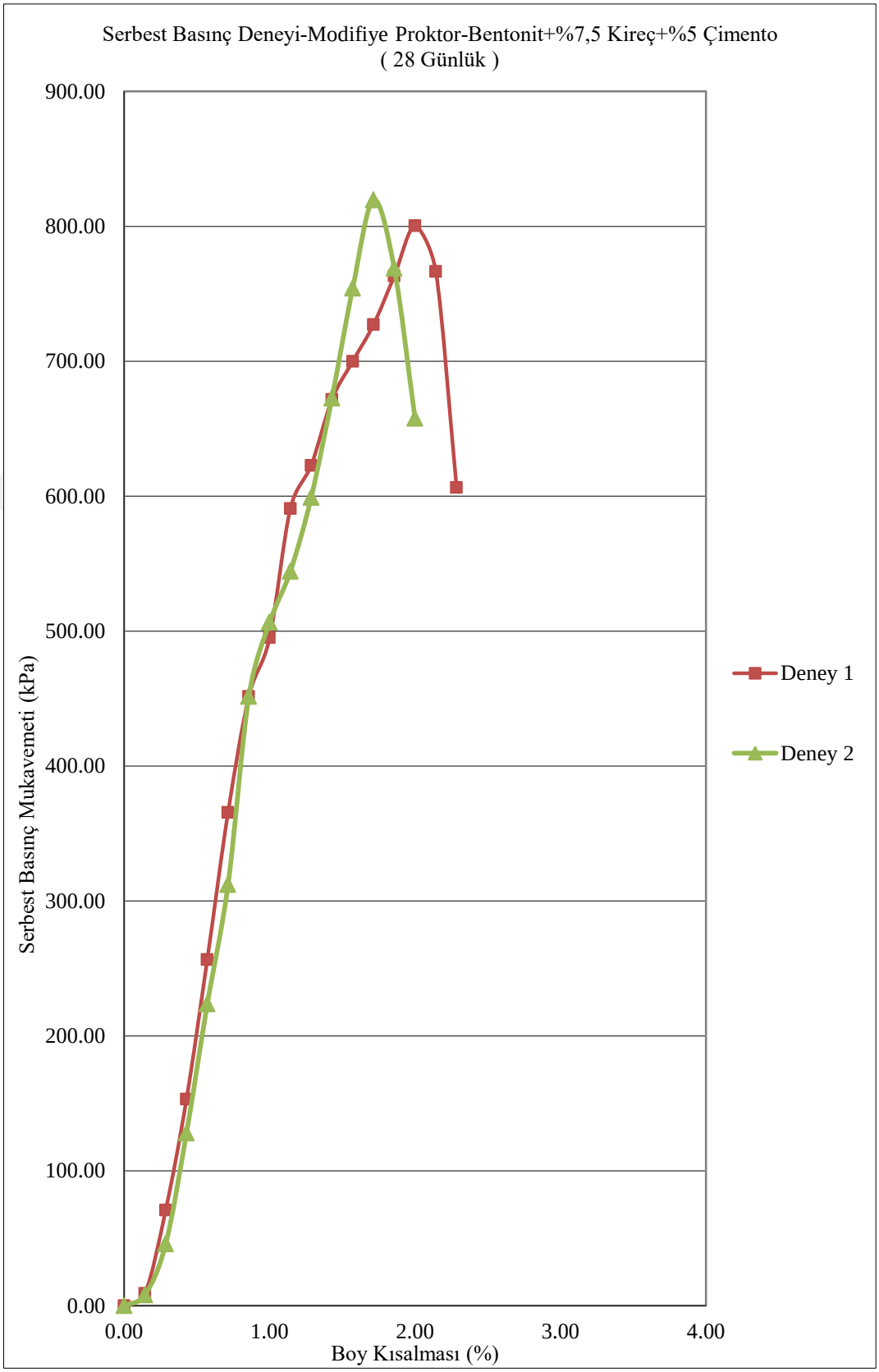
Şekil 3.12. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin anlık deney grafiği



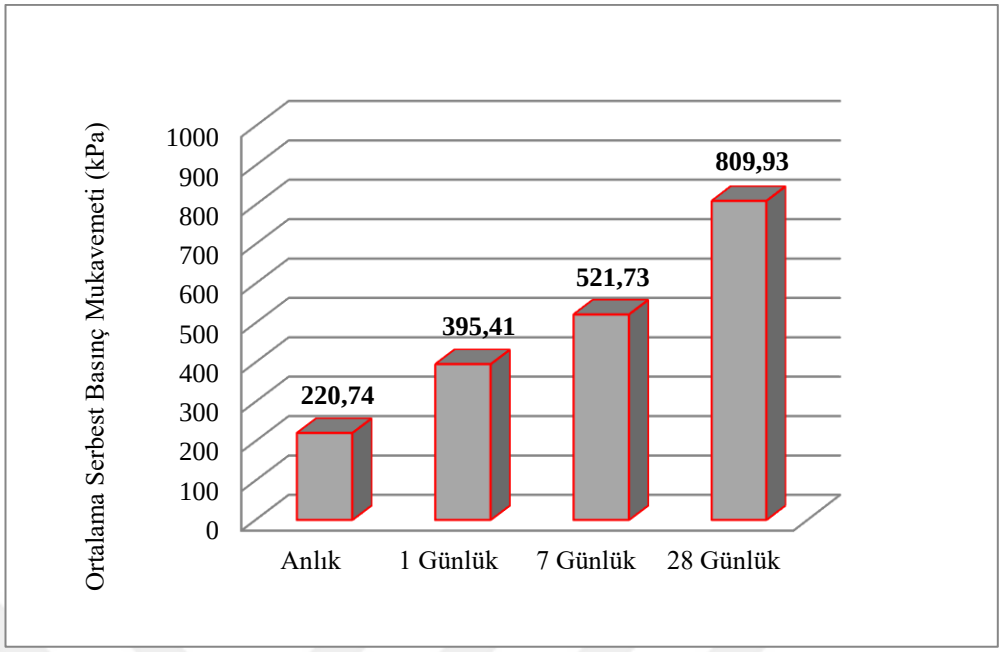
Şekil 3.13. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği



Şekil 3.14. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği



Şekil 3.15. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği

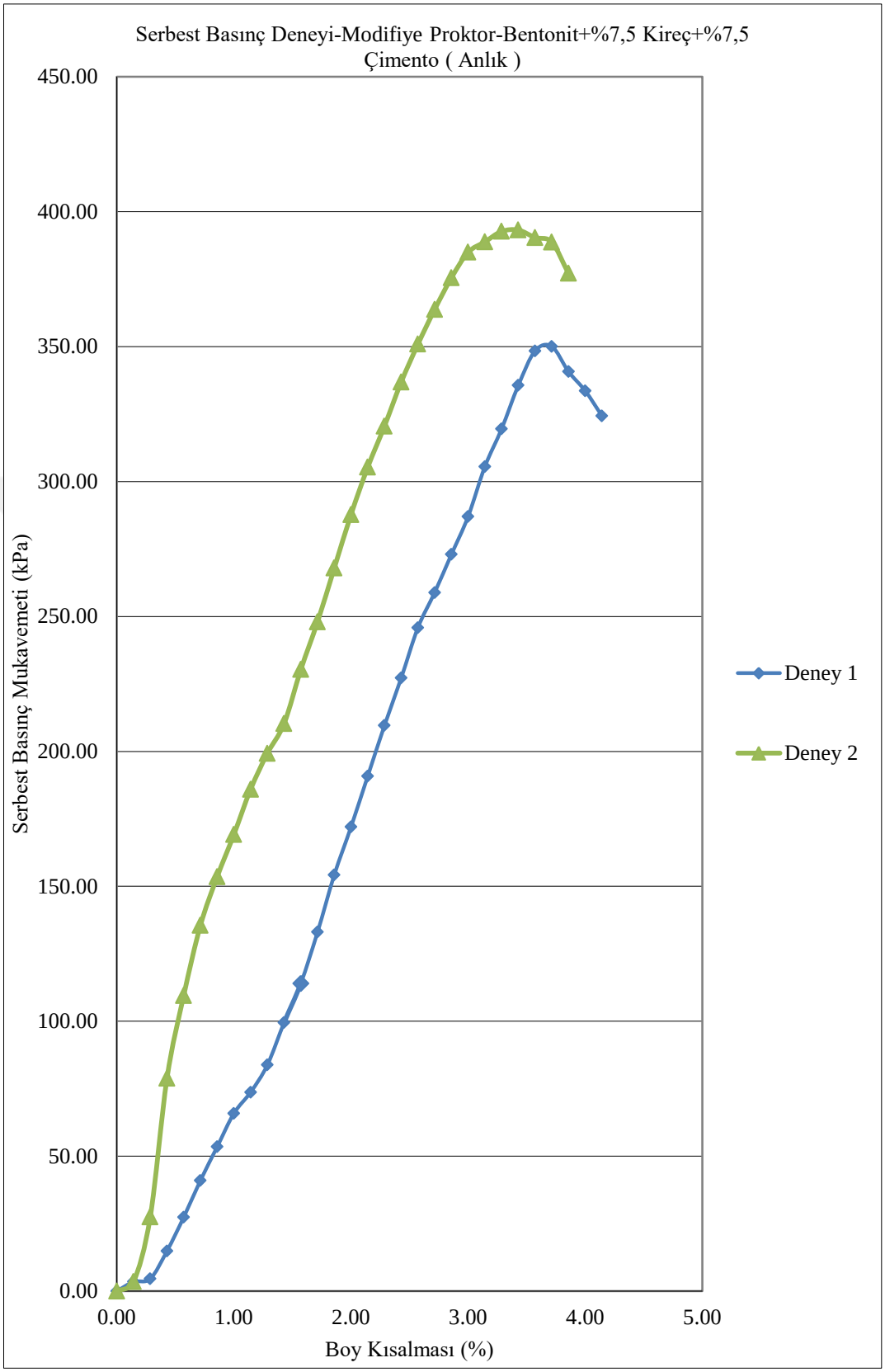


Şekil 3.16. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç ve %5 çimento karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri

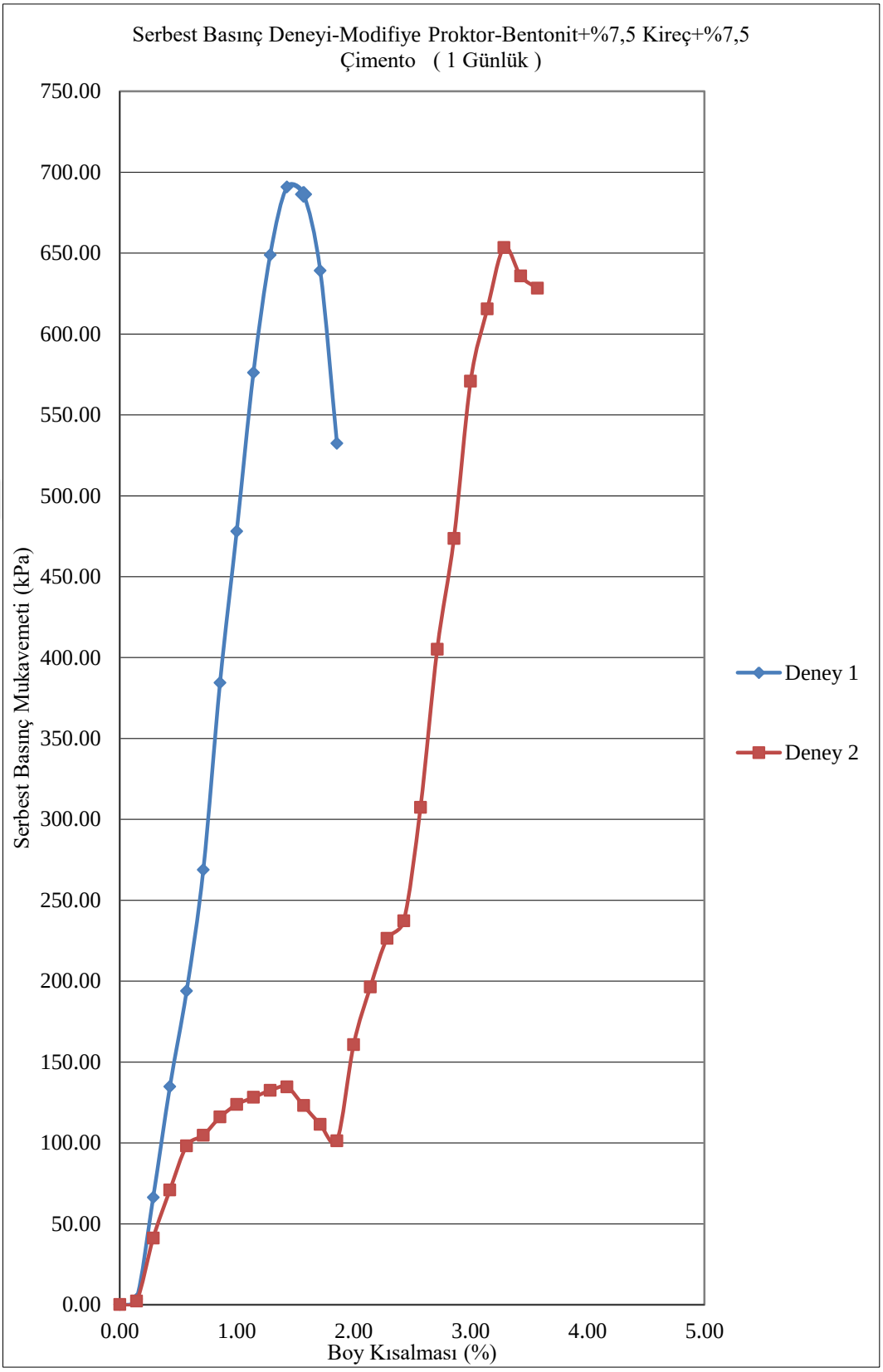
Deney sonuçları ele alındığında optimum su muhtevasında bulunan bentonit, %7,5 kireç ve %5 çimento karışımlı numunelerimiz, yalnız %7,5 oranındaki kireçli numunelere göre 28 gün kür süresi sonunda yaklaşık %4 daha kötü bir sonuç vererek dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.

3.6.4. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %7,5 çimento karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği

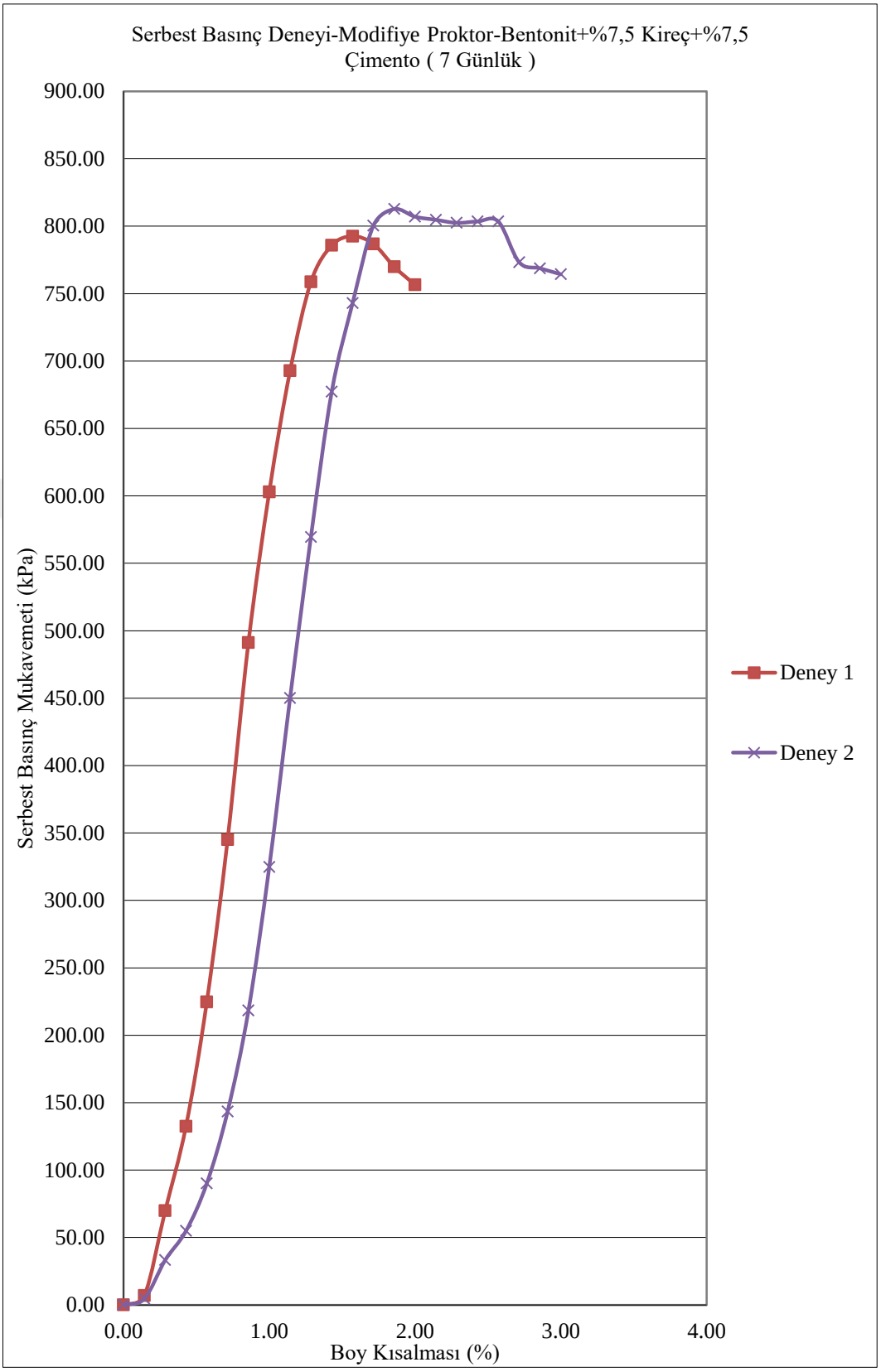
Toplamda 8 adet numune, su miktarı optimum su muhtevası %41,88 alınarak bentonit ve %7,5 kireç karışım numunesine ek olarak %7,5 çimento karıştırılarak incelenmiştir. Hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemet değerleri (q_u) ile boy kısalma oranları grafiklerde gösterilmektedir. Bu grafiklerden Şekil 3.17.'de anlık, Şekil 3.18.'de 1 günlük, Şekil 3.19.'da 7 günlük ve Şekil 3.20.'de 28 günlük serbest basınç deney sonuç grafikleri görülebilmektedir. Ek olarak tüm kür sürelerinde deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerlerini Şekil 3.21.'de görmek mümkündür.



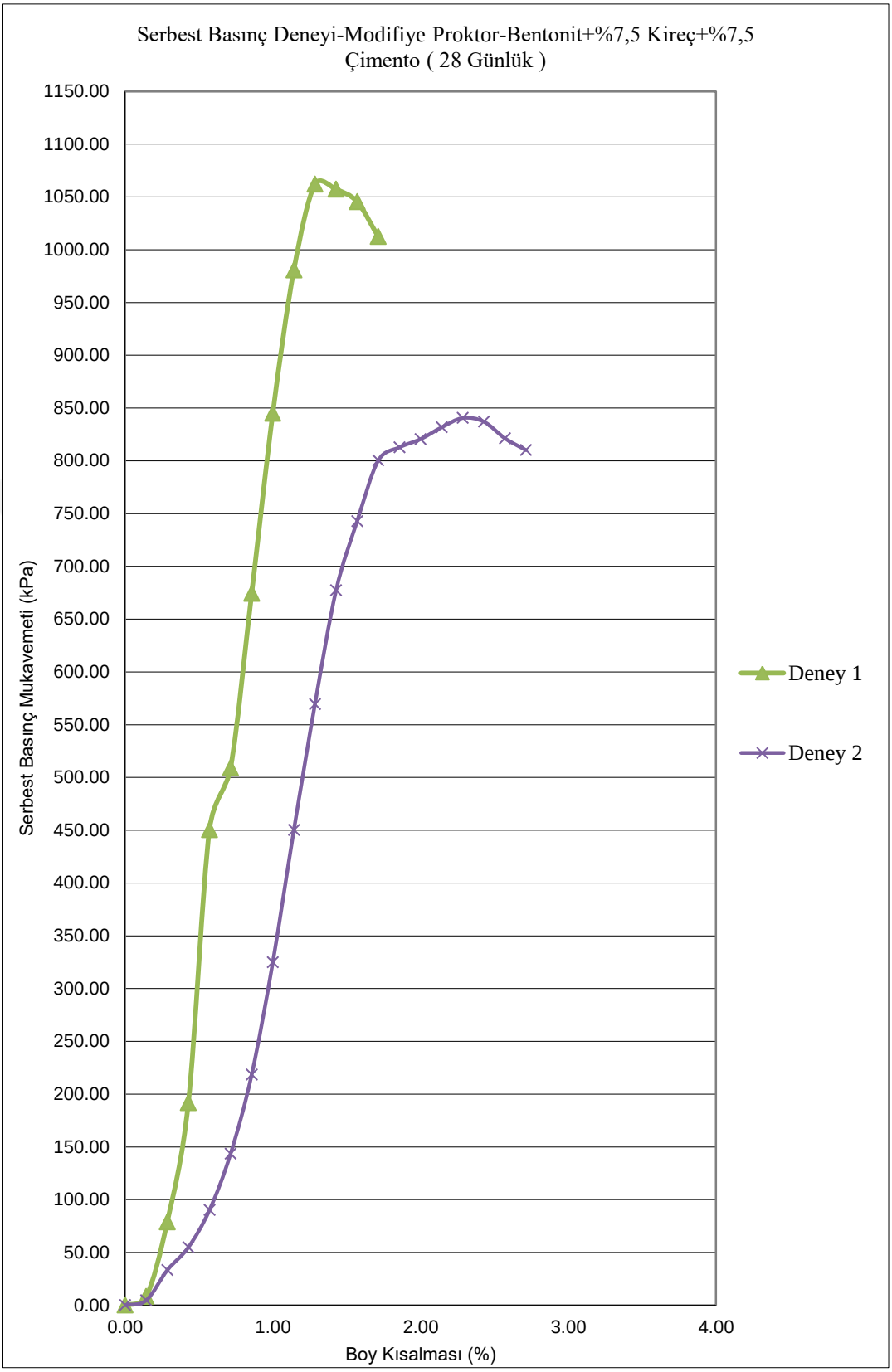
Şekil 3.17. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin anlık deney grafiği



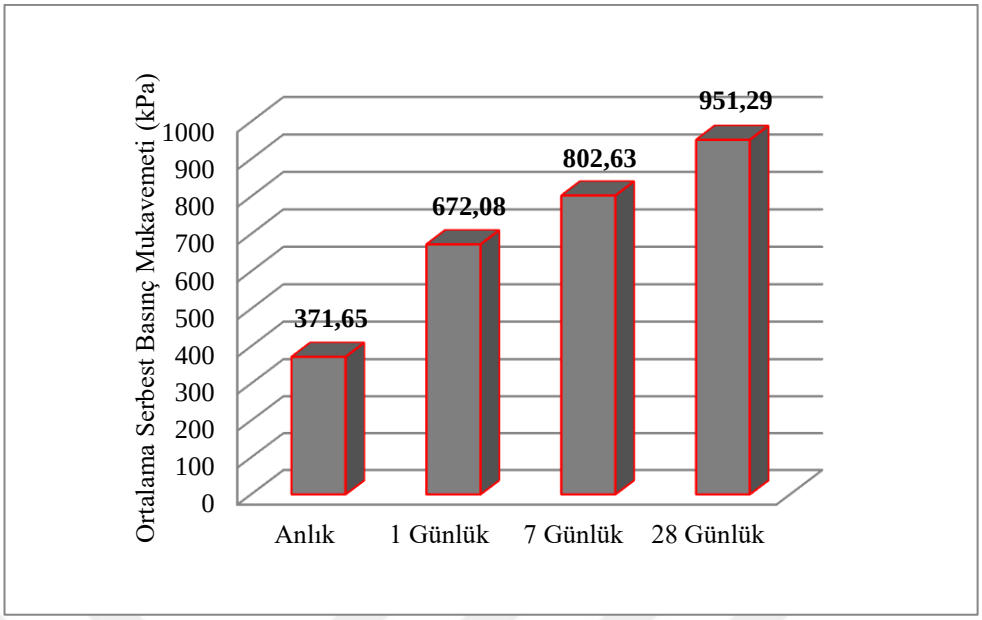
Şekil 3.18. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği



Şekil 3.19. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği



Şekil 3.20. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %7,5 çimento eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği

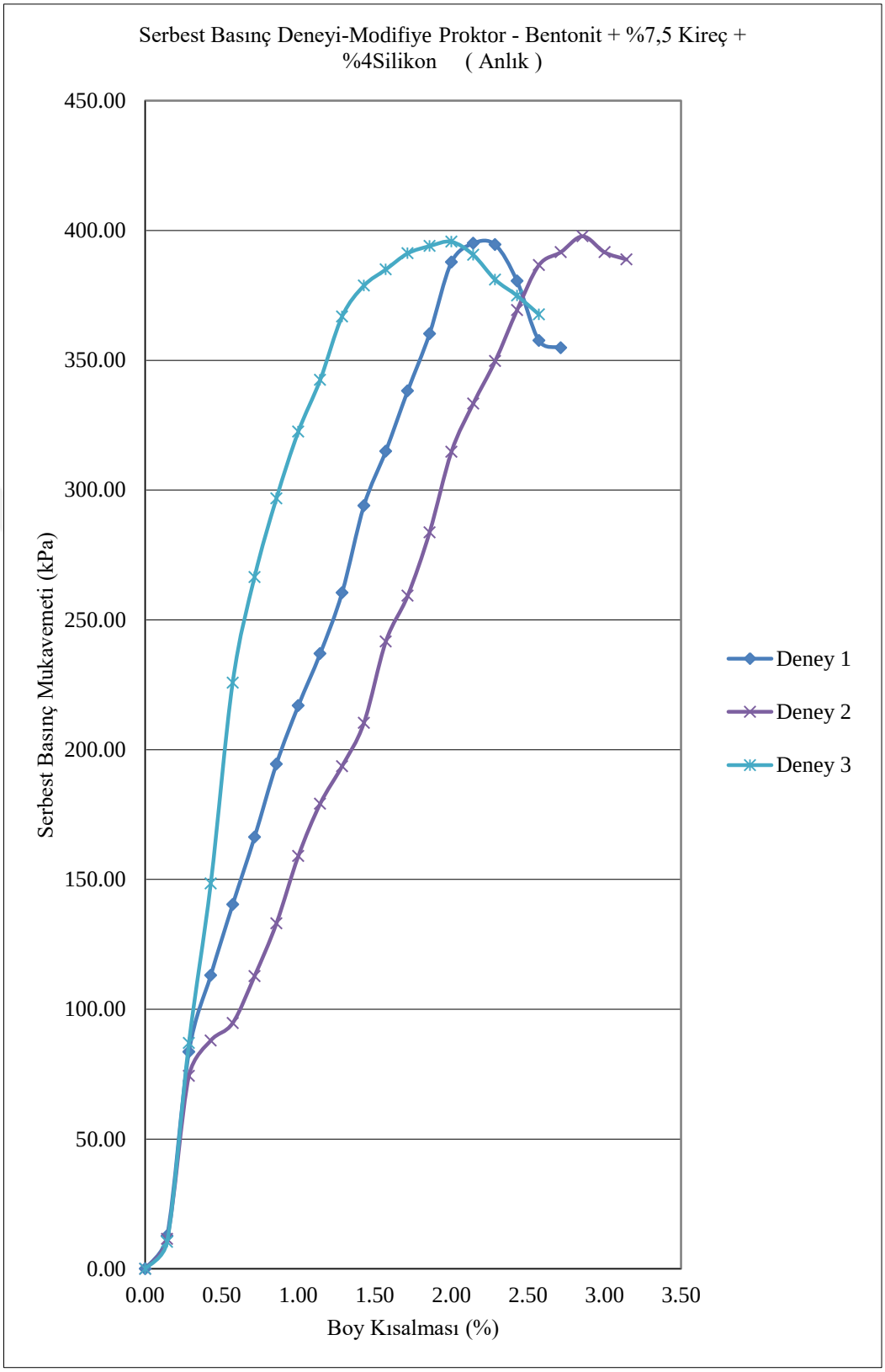


Şekil 3.21. W_{opt}'daki bentonit, %7,5 kireç ve %7,5 çimento karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri

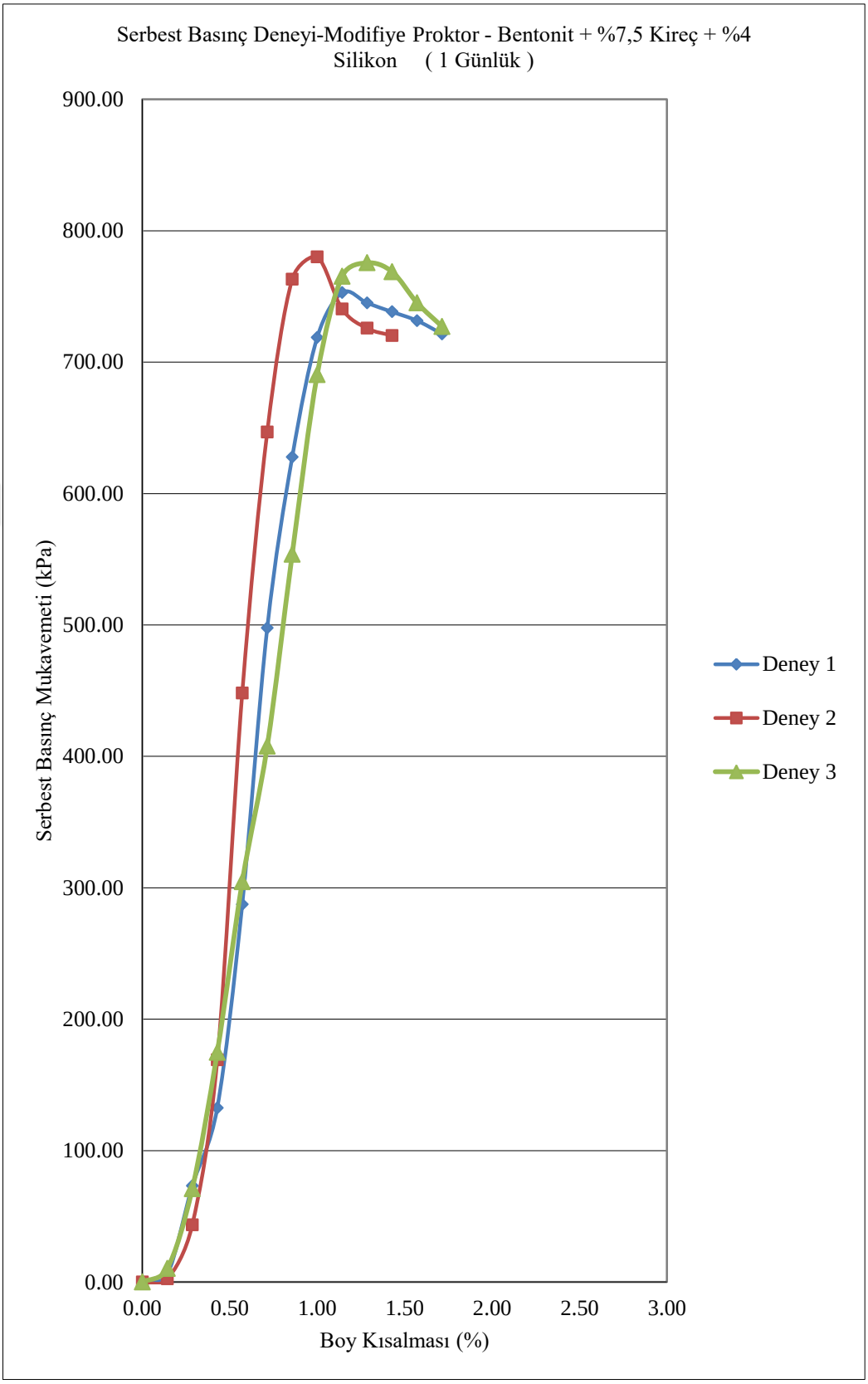
Deney sonuçları kontrol edildiğinde optimum su muhtevasındaki bentonit, %7,5 kireç ve %7,5 çimento karışımlı numunemiz, yalnız %7,5 oranındaki kireçli numunelere göre 28 gün kür süresi sonunda yaklaşık %12 daha iyi bir sonuç vererek dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

3.6.5. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %4 silikon karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği

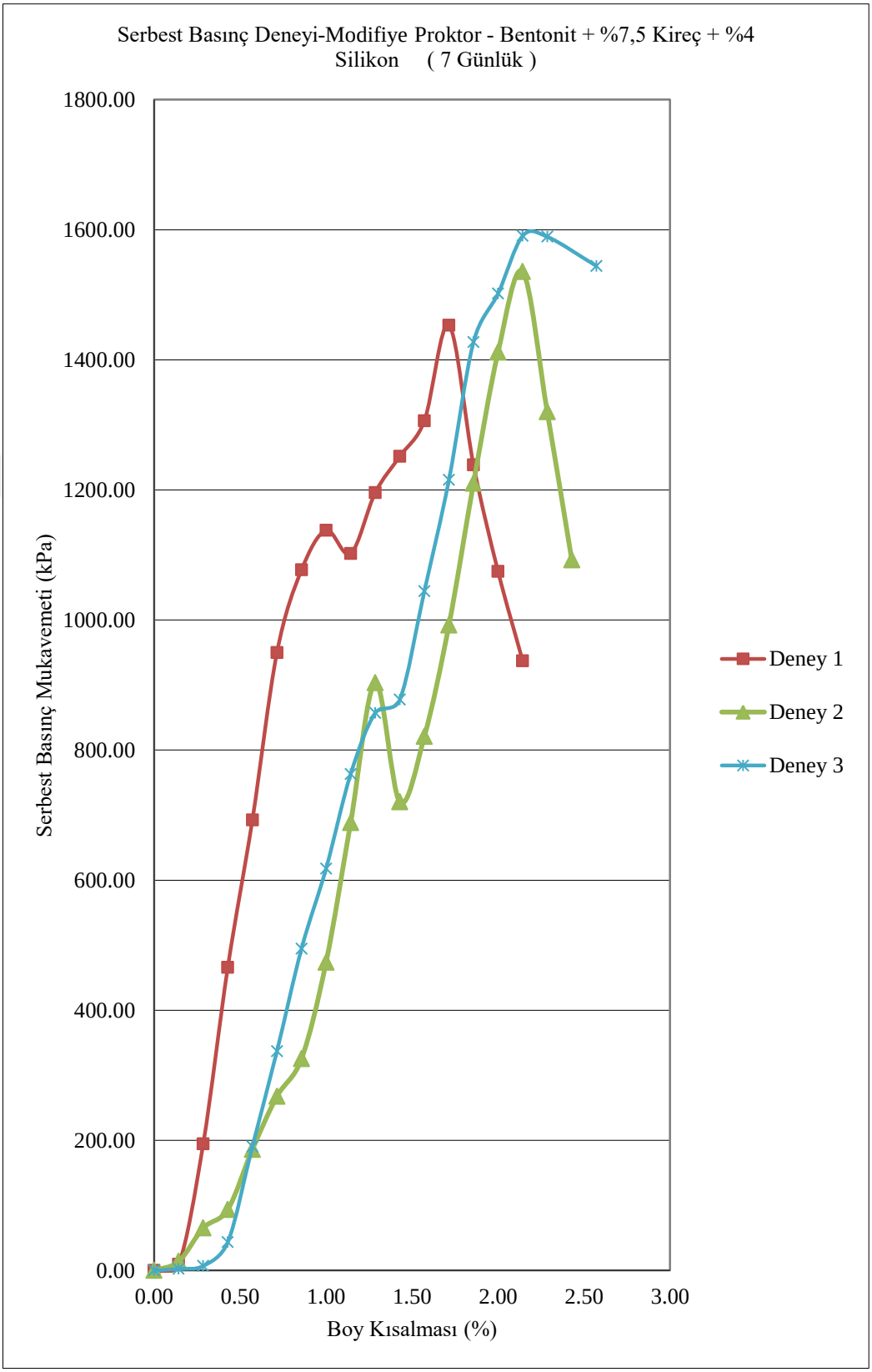
Toplamda 12 adet numune, su miktarı optimum su muhtevası %41,88 alınarak bentonit ve %7,5 kireç karışım numunesine ek olarak %4 silikon karıştırılarak incelenmiştir. Hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemet değerleri (q_u) ile boy kısalma oranları grafiklerde gösterilmektedir. Bu grafiklerden Şekil 3.22.'de anlık, Şekil 3.23.'de 1 günlük, Şekil 3.24.'te 7 günlük ve Şekil 3.25.'te 28 günlük serbest basınç deney sonuç grafikleri görülebilmektedir. Ek olarak tüm kür sürelerinde deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerlerini Şekil 3.26.'da görmek mümkündür.



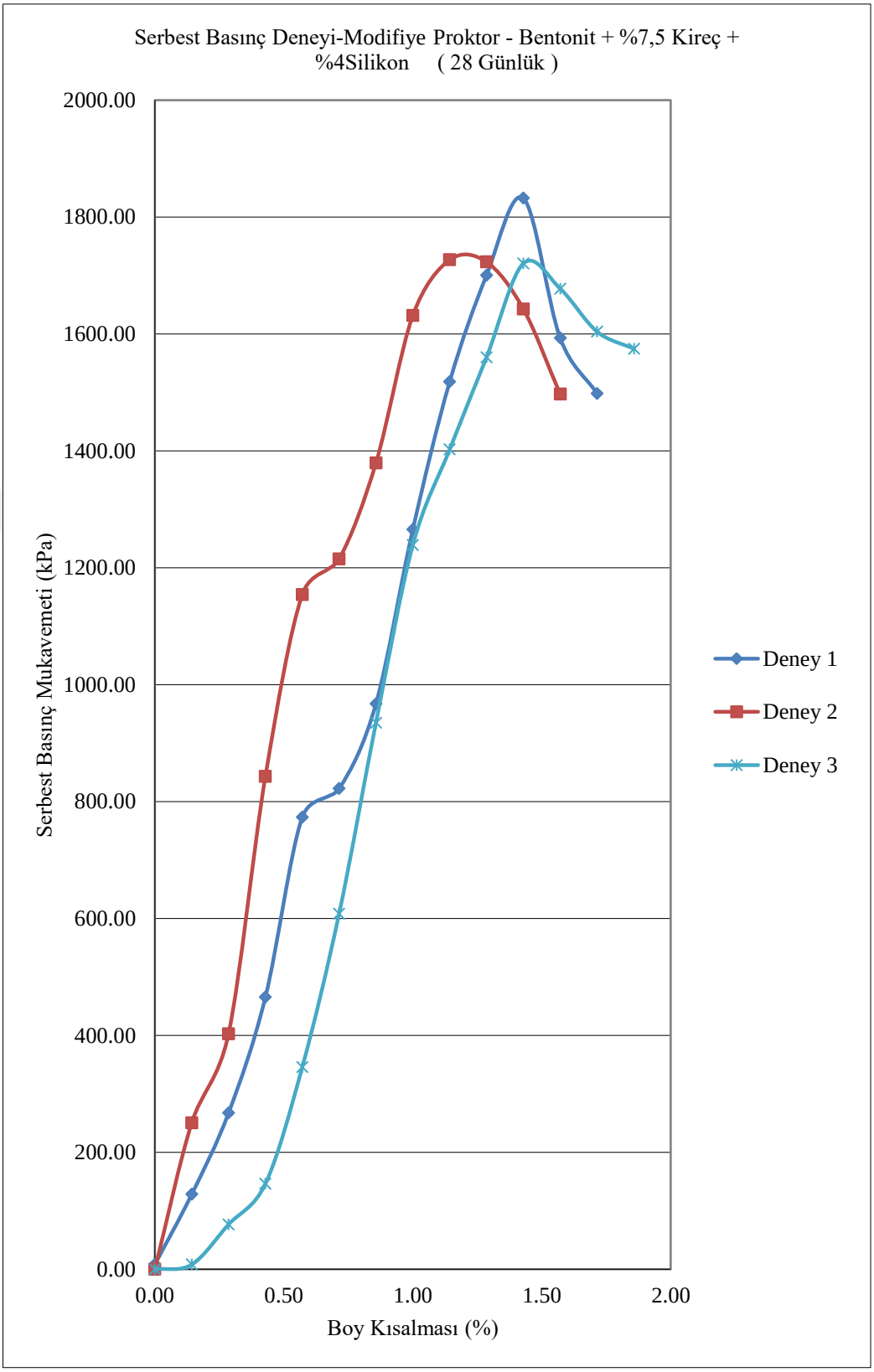
Şekil 3.22. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin anlık deney grafiği



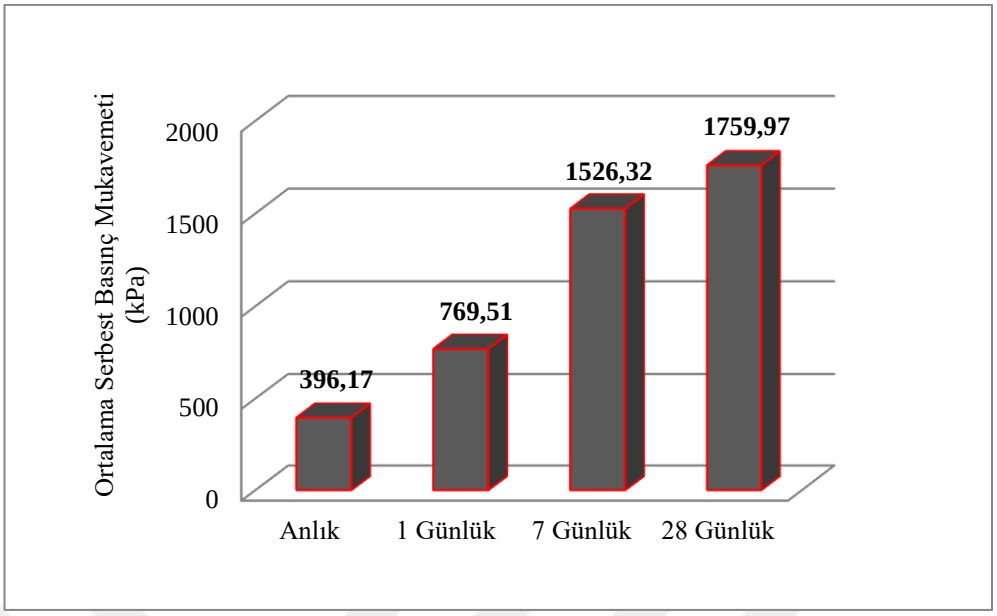
Şekil 3.23. W_{opt}'daki bentonit ve %7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği



Şekil 3.24. W_{opt}'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği



Şekil 3.25. W_{opt}'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %4 silikon eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği

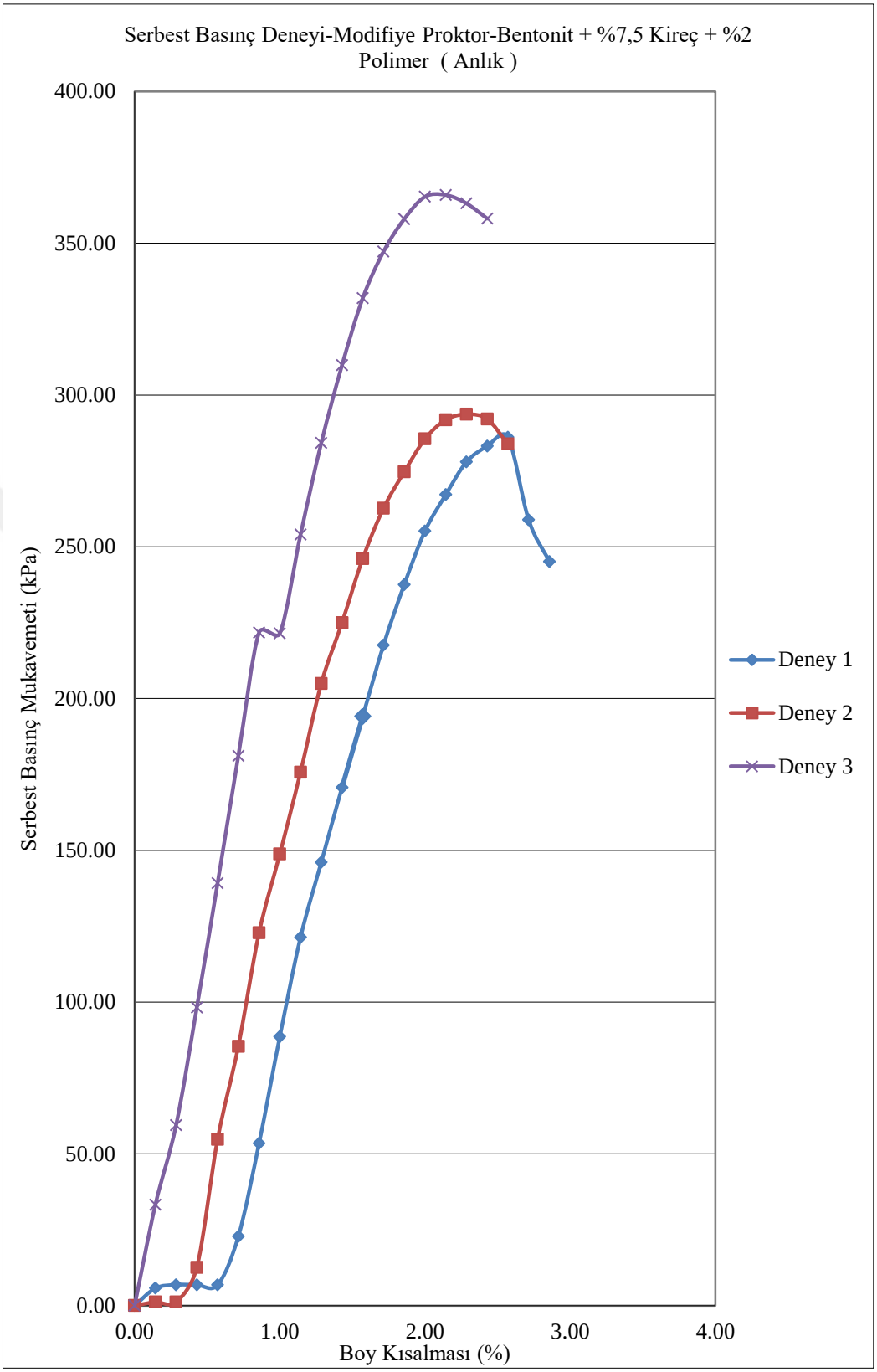


Şekil 3.26. W_{opt}'daki bentonit, %7,5 kireç ve %4 silikon karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri

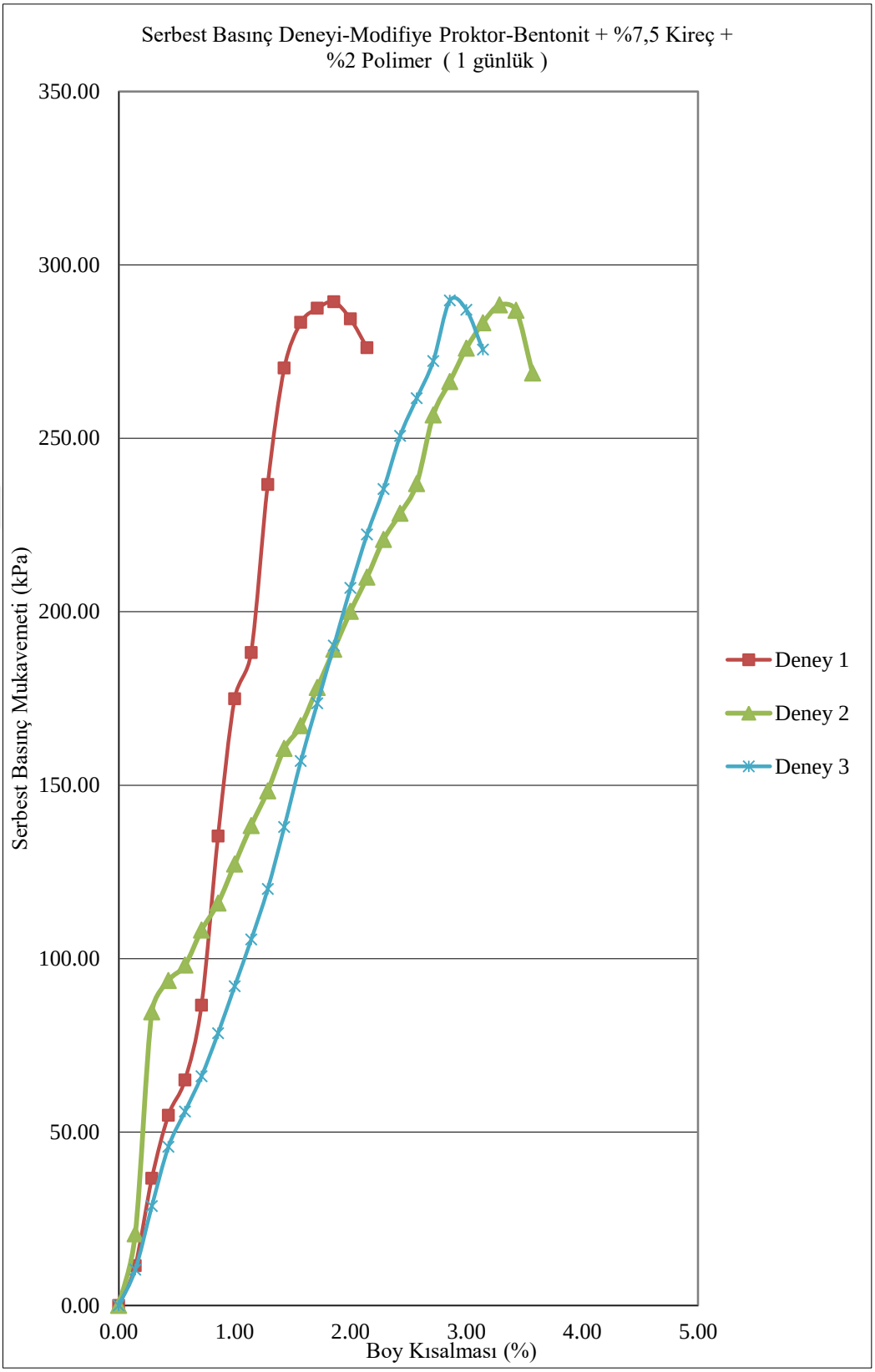
Deney sonuçları kontrol edildiğinde optimum su muhtevasındaki bentonit, %7,5 kireç ve %4 silikon karışımlı numunemiz, yalnız %7,5 oranındaki kireçli numunelere göre 28 gün kür süresi sonunda yaklaşık %208 daha iyi bir sonuç vererek dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

3.6.6. W_{opt}' da %7,5 kireçli bentonit malzemesine %2 polimer karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç grafiği

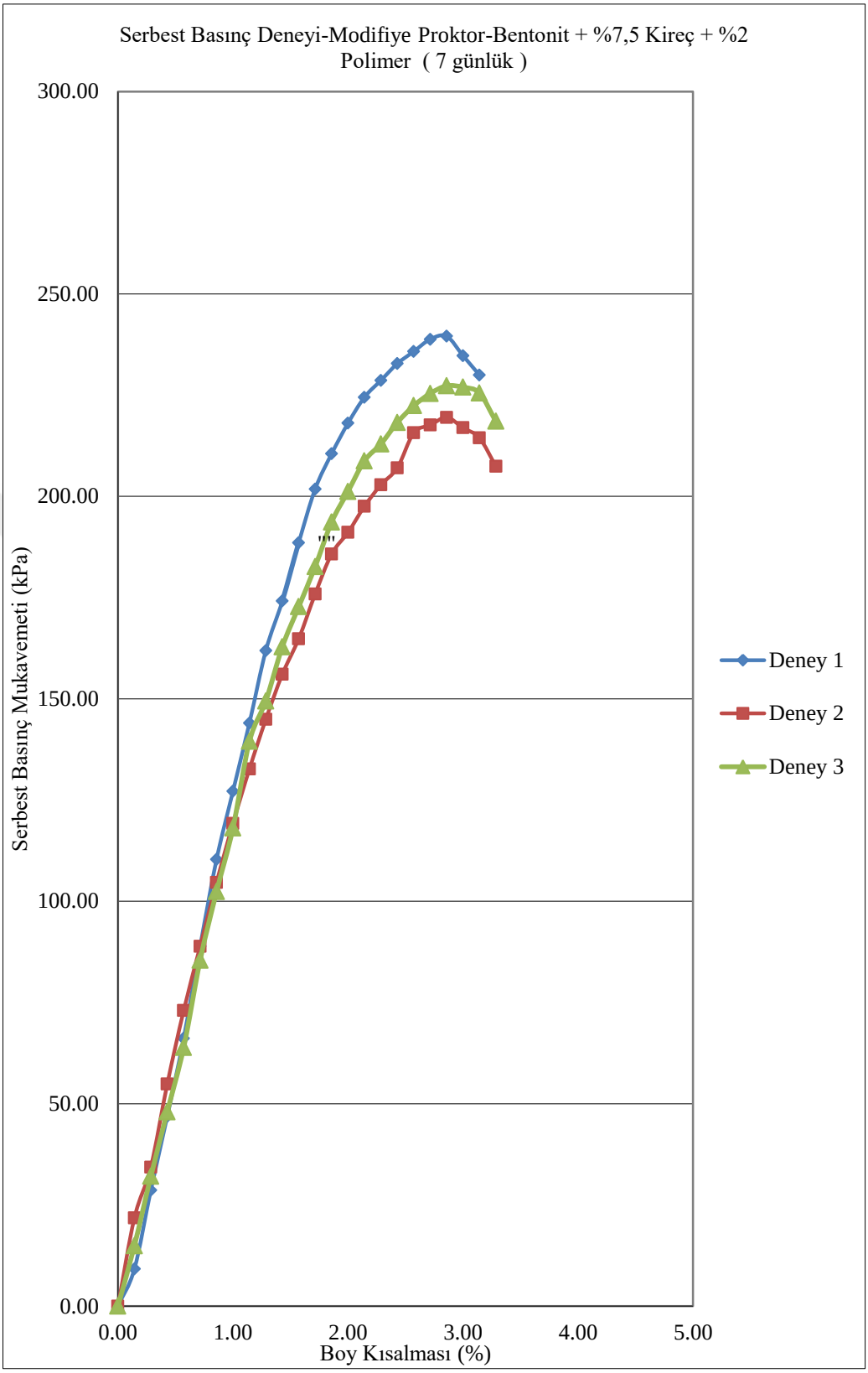
Toplamda 12 adet numune, su miktarı optimum su muhtevası %41,88 alınarak bentonit ve %7,5 kireç karışım numunesine ek olarak %2 oranında polimer karıştırılarak incelenmiştir. Hazırlanan numunelere ait serbest basınç mukavemet değerleri (q_u) ile boy kısalma oranları grafiklerde gösterilmektedir. Bu grafiklerden Şekil 3.27.'de anlık, Şekil 3.28.'de 1 günlük, Şekil 3.29.'da 7 günlük ve Şekil 3.30.'da 28 günlük serbest basınç deney sonuç grafikleri görülebilmektedir. Ek olarak tüm kür sürelerinde deneylerin ortalama serbest basınç mukavemet değerlerini Şekil 3.31.'de görmek mümkündür.



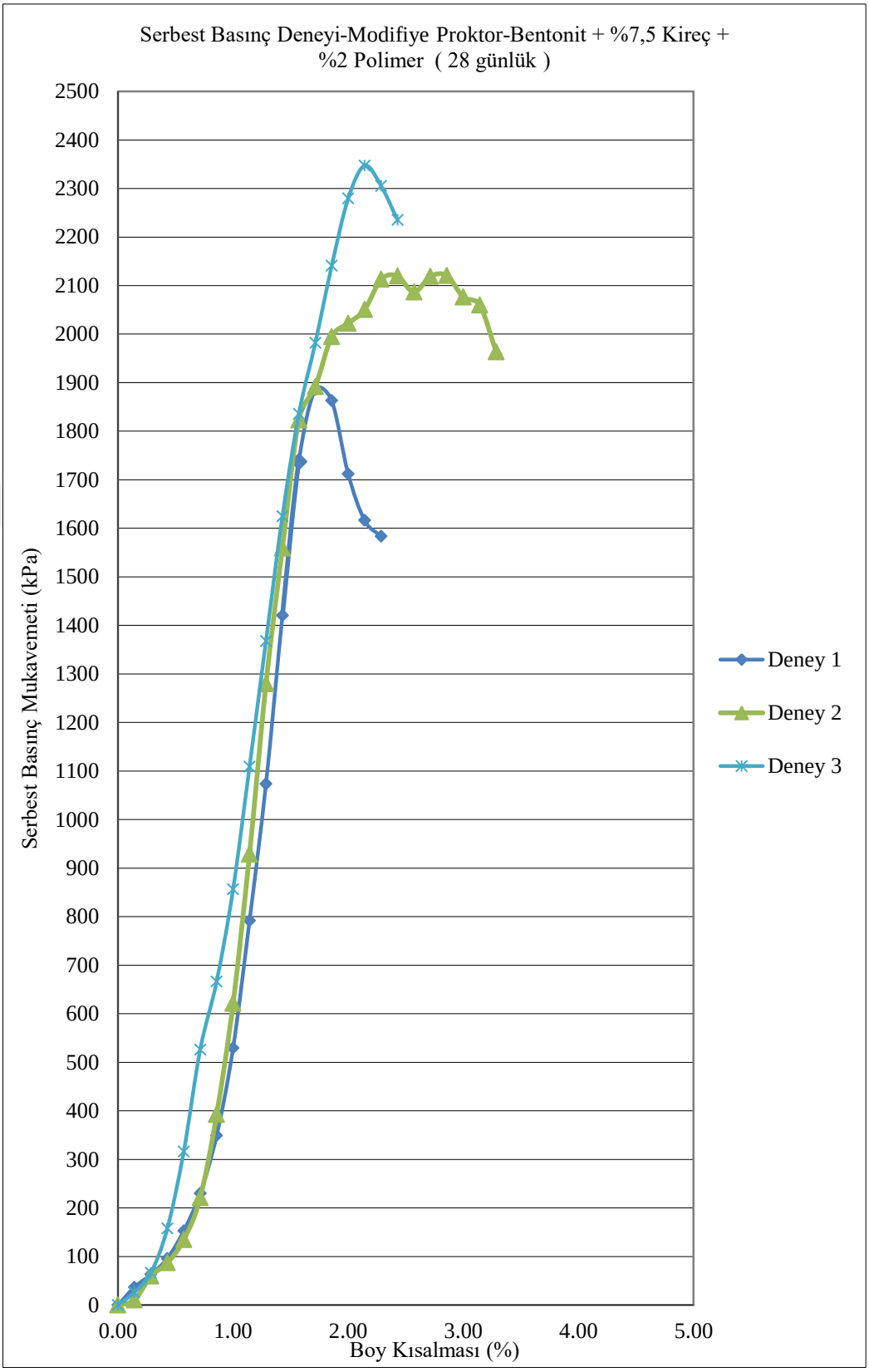
Şekil 3.27. W_{opt}'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin anlık deney grafiği



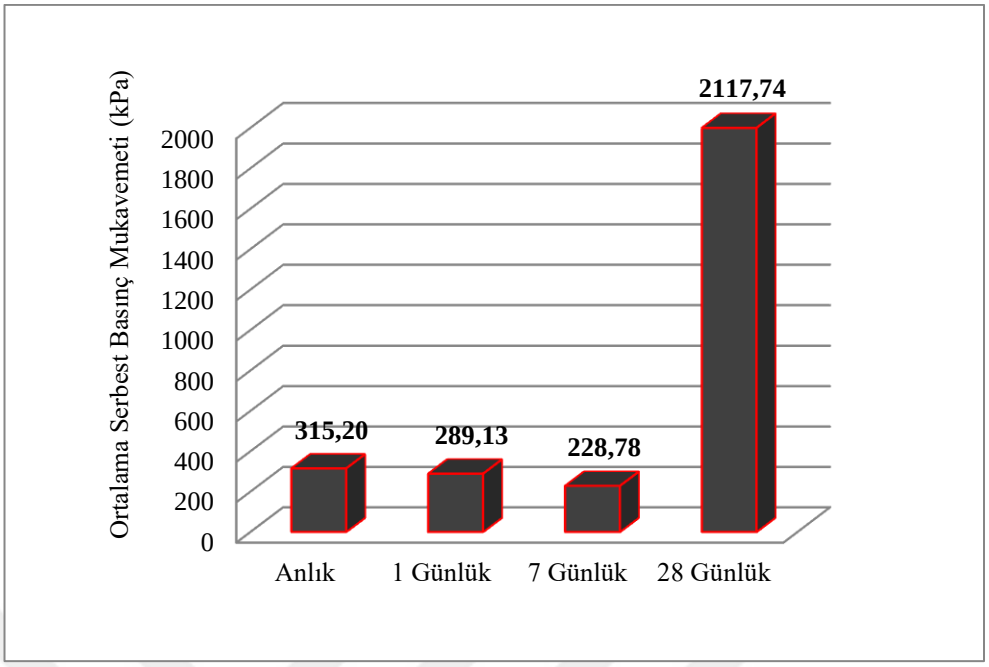
Şekil 3.28. W_{opt}'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin 1 günlük deney grafiği



Şekil 3.29. W_{opt}'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin 7 günlük deney grafiği



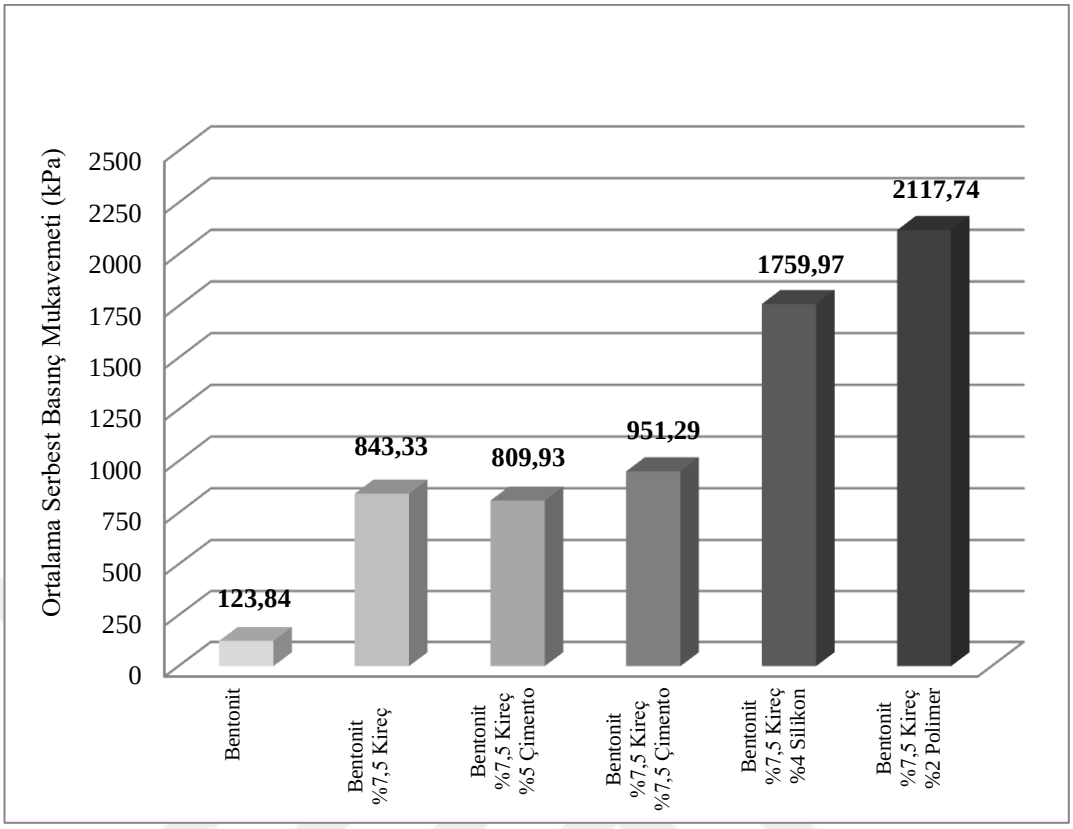
Şekil 3.30. W_{opt}'daki bentonit ve % 7,5 kireç karışımına %2 polimer eklenilerek hazırlanan numunelerin 28 günlük deney grafiği



Şekil 3.31. W_{opt}'daki bentonit, %7,5 kireç ve %2 polimer karışımının kür süresine göre serbest basınç mukavemetleri

Deney sonuçları kontrol edildiğinde optimum su muhtevasındaki bentonit, %7,5 kireç ve %2 polimer karışımlı numunemiz, yalnız %7,5 oranındaki kireçli numunelere göre 28 gün kür süresi sonunda yaklaşık %251 daha iyi bir sonuç vererek dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 3.32.'de tüm deney sonuçlarının görülebildiği bir grafikle kireç ile yapılan stabilizasyon ve diğer malzemelerin kireç ile beraber kullanımı sonucunda serbest basınç mukavemetine yaptığı olumlu sonuçlar görülmektedir.



Şekil 3.32. Tüm deney sonuçlarının 28 günlük kür süresince bulunan serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dünya ve Türkiye genelinde karşılaşılan en büyük problemlerden bir tanesi yapı inşaatı sırasında yapının bulunduğu zemin özelliklerinin yeterince iyi olmamasıdır. Bu problem karışışında geliştirilen en etkili yöntemlerden kireç stabilizasyonu ve çimento stabilizasyonu en sık kullanılanlardan bazılarıdır. Çimento ve kireç stabilizasyonları sonucunda zemin özelliklerindeki artışlar sonucunda daha çok laboratuvar ve sahada deneyler yapılmış ve elde edilen veriler dayanımı artıracak alternatif malzemeler deneme yolunu açmıştır. Yapılan bu çalışmada; mevcut kireç stabilizasyonu yapılmış zeminlerde çimento, silikon ve polimer gibi malzemelerin kullanılarak zaten dayanımı arttırılmış bir zeminin biraz daha iyileştirmesini amaçlayan deneyler yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar ışığında hazırlanan bu çalışmada zemin stabilizasyon teknikleri hakkında bilgiler, neler olduğu, çeşitleri, amaçları ve faydaları gibi konulara değinilmiş olup ilerleyen kısımlarda ise kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü kısmında yapılan deneyler ve sonuçları hakkında bilgiler verilmiştir.

Bentonite Atterberg deneyleri doğrultusunda deneme yöntemiyle kireç ilaveleri yapılıp likit limit ve plastik limitlerindeki değişimler tespit edilip en uygun kireç oranı belirlenmiştir. Kireç ilaveleri sonucunda likit limit değerlerinde düşüş, plastik limit değerlerinde artışlar ve dolayısıyla plastisite indis değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Elde edilen bu verilere göre yüksek bir plastisiteye sahip bentonit kili kireç ilaveleri sonucunda katı bir kıvam almış ve mühendislik açısında işlenebilirliği artmıştır.

Sonuç olarak yüksek plastisite özelliğine sahip olan bir bentonit kilinin kireç ile stabilizasyonunun yapılabildiği ve zemin özelliklerinin iyileştirilebildiği tespiti yapılmıştır.

Katkısız bentonit, %2,5 - %5 - %7,5 - % 10 oranlarıyla kireç karışımları yapılarak Atterberg limit deneyleri ile optimum kireç oranının %7,5 olduğu tespiti yapılmıştır.

Optimum su muhtevasında yapılan deneyler sonucunda kireç stabilizasyonu yapılan zeminde 28 günlük kırımlar sonucunda sadece bentonit kilinin serbest basınç değerine göre %680 oranında mukavemet artışı gerçekleşmiştir.

Arazi çalışmaları sırasında karşılaşılan yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde, mevcut zeminin değiştirilmesinin ve su oranının azaltılmasının oldukça güç olacağı genel bir gerçektir. Bu durumlarda yapılan bu deney çalışmalarının sonucunda da görüldüğü üzere killi zeminlerde kireç karışımları zeminlerdeki su oranının değişmesine yani optimum su muhtevası değerine kadar gerilemesine yol açmaktadır. Dolayısıyla optimum su muhtevasına yaklaşan zeminlerde mukavemet artışları görülmektedir. Ekonomik açıdan da kontrol edildiğinde en uygun yöntem kireç ile yapılan iyileştirme yöntemidir. Hem maliyetin azalmasında hemde mukavemet artışlarında kirecin rolü büyüktür.

Bentonit ve kireç karışımına ilave olarak aynı su muhtevasında yapılan %5 oranında çimento katkısı 1 günlük serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında yüksek değer vermesine rağmen 28 günlük mukavemetlerinde %4 oranında daha düşük sonuç vermiştir. %7,5 çimento oranındaki karışım numunelerini kontrol edersek 7 günlük serbest basınç mukavemeti neredeyse 28 günlük %7,5 kireç karışımlarına oranla daha iyi sonuçlar vermektedir. Burada da uygun çimento oranının serbest basınç mukavemetlerindeki etkisi görülebilmektedir.

%4 silikon karışımı ile hazırlanan numunelerde ise serbest basınç mukavemetlerinde %208 oranında artış meydana gelmiştir. %7,5 çimento karışımları ile karşılaştırıldığında %185 oranında mukavemetinde artış görülmektedir. Bentonit ve kireç karışımlarına yapılan ilave silikon stabilizasyonunun çimento stabilizasyonuna göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Doğada bulunma oranlarına ve fiyat analizleri kontrol edildiğinde ise silikon malzemesi ile stabilizasyon yapılmasının daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tüm deneylerin 28 günlük kür süresi sonunda mukavemet değerleri karşılaştırıldığında en yüksek mukavemet değerini %2 karışım oranı ve 2117,74 kPa

mukavemet değeri ile polimer vermektedir. Anlık, 1 günlük ve 7 günlük değeri düşük olmasına rağmen uzun vadede en elverişli çözüm kireç ve polimer stabilizasyonun beraber yapılmasıdır. Fakat polimer malzemesinin ekonomik açıdan elverişsizliği bu durumu zorlaştırmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, kireç, çimento, silikon ve polimer malzemeleri ile yapılan zemin stabilizasyonu çalışmalarında, tüm kullanılan malzemelerin kireç ve çimentoya alternatif olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Zemin iyileştirmelerinde silikon ve kirecin beraber kullanımı, ekonomik ve mühendislik açısında getirilerinin fazla olması sebebiyle uygun olacaktır. Laboratuvar ortamında yapılan deney sonuçlarına göre kireç, çimento, silikon ve polimer gibi malzemelerin yüksek plastisite özelliğine sahip bir kil ile karıştırılması sonucunda serbest basınç deneylerinden de görüldüğü üzere mukavemetlerinde ciddi artışlar gözlemlenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Kızılçelik M., Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç İle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 27571.

[2] Tumluer G., Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006, 183645.

[3] Çıragöz M., Yol İnşaatında Kireç Stabilizasyonu, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 1962, **86**, 13-15.

[4] URL-1: https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2012).

[5] Bell F.G., Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, *Engineering Geology*, 1996, **42**(4), 223-237.

[6] Ingles O.G., Metcalf J.B., *Soil Stabilization: Principles and Practice*, 2nd ed., Pty Limited., Australia, 1972.

[7] Raj P.P., *Geotecnical engineering*, 1st ed., Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1995.

[8] Kavak A., The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996, 50492.

[9] DAS B., *Soil Mechanics Laboratory Manual*, 6th ed., Oxford University Press, UK, 1997.

[10] DAS B., *Principles of Foundation Engineering*, 7th ed., Cengage Learnng, USA, 2007.

[11] Neubauer C. H., Thompson M. R., Stability Properties of Uncured Lime-Treated Fine-Grained Soil, *Highway Research Record*, 1972, 381, 20-26.

[12] Çetin A., Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 295471.

[13] Bergado D. T., Anderson, L. R., *Soft Ground Improvement in Low Land and Other Environments*, 1st ed., ASCE Press, NY, USA, 1996.

[14] Arumugam T., Experimental Study on Resilient Modulus of Liquid Silicon Dioxide (Si02) Stabilized Subgrade Soil, Master Thesis, University Tun

Husscin Onn Malaysia, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Malaysia, 2009, 120485.

[15] Faisal A., Stabilization of Residual Soils Using Liquid Chemical, *EJGE*, 2012, **17**, 115-126.

[16] Kavak A., Improvement in Place of a Road Material Using a Special Silicon, *ACCMES Asian Conference On Civil*, Macau, 7-9 Kasım 2013.

[17] Kavak A., Akyarlı A., A Field Application For Lime Stabilization, *Environmental Geology*, 2007, **51**(6), 987- 997.

[18] Uzluk E., Bazı Polimerlerin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 233907.

[19] Scheffer F., Schachtschabel P., *Lehrbuch der Bodenkund*, 16th ed., SSSAJ, Deutschland**,** 1970.

[20] Grim R.E., *Applied Clay Mineralogy*, 1st ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1962.

[21] Grim R.E., *Clay Minerology: 2.*, 1st ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.

[22] Grim, R.E. The History of the Development of Clay Mineralogy, *The Clay Minerals Society*, Jackson, Mississippi, 13 October 1986.

[23] Gillson J.L., *Industrial Minerals and Rocks*, 1st ed., Blue Mountain Books, United States, 1960.

[24] Murray H.H., Overview-Clay Mineral Applications, *Applied Clay Science*, 1991, **5**(6), 379-395.

[25] İpekoğlu B., Kurşun İ., Bilge Y., Barut A., Türkiye Bentonit Potansiyeline Genel Bir Bakış, *2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 16-17 Ekim 1997.

[26] Clarke G., *Industrial Clays: A Special Review*, 1st ed., Industrial Minerals, London, 1989.

[27] Grim R.E., Güven N., *Developments in Sedimentology*, 1st ed., Elsevier Science, New York, 1978.

[28] Mingelgrin U., Kliger L., Gal M., Saltzman S., The effect of grinding on the structure and behaviour of bentonites, *Clays and Clay Minerals*, 1978, **26**(4), 299-307.

[29] Bayram H., Bentonitik Bir Kilin Fizikokimyasal Özeliklerinin Asit-Isıl Aktivasyon İle Değişimi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 1991, 19515.

[30] Noyan H., Isıl İşlem ve Asit Aktivasyonu İle Çankırı Bentonitinin Gözenekli Yapısının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2001, 104362.

[31] Laird D.A., Shang C., Relationship Between Cation Exchange Selectivity and Crystalline Swelling in Expanding 2:1 Phyllosilicates, *Clays and Clay Minerals*, **45**(5), 681-689.

[32] Özdemir A., Özcan E., Bentonitin Sondaj Mühendisliği Özelikleri, *Jeofizik Bülteni*, 2007, **54**, 352-357.

[33] Kocataşkın F., *Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz?*, 1st ed., İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 1965.

[34] Erdoğan T.S., Erdoğan Y.T., *Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun On bin Yıllık Tarihi*, 1st ed., ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2007.

[35] İncesu Y., Çimento Sektörü Raporu, *T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı Orta Anadolu İhracatçıları Birlikleri Genel Sekreterliği Raporu*, 2000, **15**, 4-12.

[36] Artel T., *Yapı Malzemesi*, 1st ed., İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, Türkiye, 1961.

[37] Göktepe M., C3A Oranı Farklı Çimentolarla Üretilmiş Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klorür Geçirimliliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 252447.

[38] Saçak M., *Polimer Kimyası*, 5th ed., Gazi Kitapevi, Ankara, Türkiye, 2002.

[39] Rempp P., Merril E.W., *Polymer Synthesis*, Hutting&Wepf., New York, USA, 1991.

[40] Atkins P., Jones L., *Chemistry*, 3rd ed., W. H. Freeman and Company, New York, USA, 1999.

[41] Kalaycı G., Polianilin / Aktif Karbon Kompozit Maddesinin Sentezi, Karakterizasyonu ve İletken Film Yapımı, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2008, 237875.

[42] Pişkin E., *Polimer Teknolojisine Giriş*, 1st ed., İnkılap Kitapevi, Ankara, 1987.

[43] Erdem Y., Çelik Talaşı / Silikon Kompozit Malzeme Üretimi ve Düşük Hızlı Darbe Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010, 276330.

[44] Kavak A., The Effect of Compaction for a Lime Stabilization Application, *International Conference on Civil*, Hon Kong, Çin, 20 March 2015.

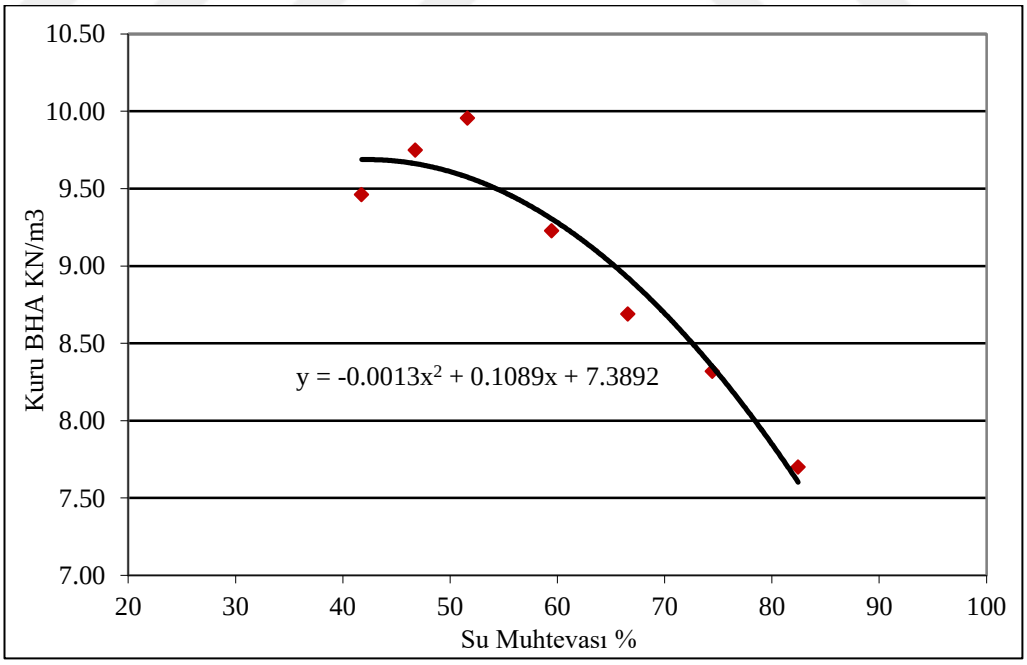
EKLER

EK-A

Harvard Proctor Deneyi İle Bentonit + %7,5 Kireç Karışımının Optimum Su Muhtevasının Bulunması:

Tablo A. 1. Bentonit + %7,5 kireç karışımının modifiye Harvard Proctor deneyi için hazırlanan numuneler

PROJE			Kimyasal Stabilizasyon				
ÖRNEĞİN ALINDIĞI YER							
ÖRNEĞİN TANIMI			BENTONİT + %7,5 KİREÇ				
TARİH		26.12.2011		DENEYİ YAPAN		Kubilay KARACA	
DENEY ÖZELLİĞİ		Optimum su muhtevası		KALIBIN İÇ HACMİ (cm.^{3})		62.27	
Ör.Numune No	1	2	3	4	5	6	7
Kap No	182	142	92	154	143	215	142
Kap Ağırlığı (gr)	34.83	35.37	34.87	34.55	33.99	34.06	35.37
Kap+Yaş zemin (gr)	53.43	50.09	50.58	54.18	51.18	55.50	58.76
Kap+Kuru zemin (gr)	47.95	45.40	45.23	46.86	44.31	46.35	48.19
Su Ağırlığı (gr)	5.48	4.69	5.35	7.32	6.87	9.15	10.57
Zemin Ağırlığı (gr)	13.12	10.03	10.36	12.31	10.32	12.29	12.82
Su muhtevası w (%)	41.77	46.76	51.64	59.46	66.57	74.45	82.45
Tahm. Su Muhtev.%	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00	55.00	60.00
Su muhtevası w (%)	41.77	46.76	51.64	59.46	66.57	74.45	82.45
Kalıp+Zemin ağr. (gr)	506.11	511.79	516.79	514.37	512.83	513.08	510.14
Kalıp Ağırlığı (gr)	420.96	420.96	420.96	420.96	420.96	420.96	420.96
Zemin Ağırlığı (gr)	85.15	90.83	95.83	93.41	91.87	92.12	89.18
Doğ.BHA kN/m3	13.41	14.31	15.10	14.72	14.47	14.51	14.05
Kuru BHA kN/m3	9.46	9.75	9.96	9.23	8.69	8.32	7.70



Şekil A. 1. Bentonit ve %7,5 kireç karışımının Harvard Proctor grafiği

EK-B

Serbest Basınç Deneyleri

Tablo B. 1. Optimum su muhtevasında bentonit numunesinin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
25.16	2.29	2.29
41.05	25.09	38.77
48.90	56.86	53.45
55.56	69.17	62.36
66.70	73.49	70.10
65.38	75.53	74.40
70.81	82.05	78.68
73.97	85.18	81.81
79.34	87.16	84.93
88.02	89.14	86.91
84.43	91.10	89.98
87.50	91.93	91.93
90.56	92.77	93.87
98.00	94.69	95.79
94.41	94.41	97.71
96.32	96.32	100.70
98.21	97.12	101.49
100.09	97.92	103.36
101.96	97.62	104.13
101.65	98.41	104.90
103.50	99.19	109.97
105.34	98.89	110.71
106.09	99.66	110.37
106.83	101.49	111.11
108.63	102.24	110.76
108.30	102.99	111.49
109.02	103.73	111.14
109.74	104.47	111.85
111.50	104.14	111.50
111.16	104.87	111.16
	94.08	111.86
	85.45	111.50
		111.15
		111.84

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	109,41
c (kPa)	54,71

Tablo B. 2.Optimum su muhtevasında bentonit numunesinin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
6.86	4.57	12.58
6.84	31.93	13.68
20.47	43.21	13.65
38.55	54.43	27.21
52.01	59.92	38.44
62.00	63.13	48.47
69.69	73.06	57.33
70.61	77.33	62.76
82.69	81.58	68.17
86.91	84.68	73.54
91.10	87.76	76.65
94.15	89.72	78.64
98.29	93.87	81.72
100.20	94.69	83.68
102.10	96.61	84.53
103.98	97.41	86.47
104.76	98.21	87.30
106.62	100.09	88.13
107.39	100.88	88.95
108.14	100.57	89.76
108.89	101.35	90.56
108.56	101.04	90.29
108.23	101.80	90.01
108.97	101.49	90.81
107.57	102.24	91.59
107.24	100.87	91.31
106.91	101.61	92.09
106.58	101.30	91.80
106.25	100.99	92.57
105.91	101.72	93.33
	102.45	94.08
	103.17	93.79
	102.84	94.53
	103.55	94.23
	103.23	94.97
	102.90	95.70
		94.37
		93.04

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	102,74
c (kPa)	51,37

Tablo B. 3. Optimum su muhtevasında bentonit numunesinin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
11.44	5.72	20.59
14.83	6.84	34.21
18.19	6.82	54.58
22.68	6.80	68.03
24.87	22.61	79.14
28.18	37.20	89.06
34.84	55.08	95.54
36.98	66.12	101.99
44.70	77.11	107.28
55.71	85.79	112.53
71.10	94.32	116.65
76.43	104.12	120.73
82.83	108.23	123.69
86.99	110.11	126.63
90.02	111.98	129.54
95.22	113.83	131.34
97.12	114.58	133.13
97.92	116.41	134.91
98.71	117.15	135.59
101.65	117.88	136.26
102.42	118.60	139.08
103.19	119.31	139.73
103.94	120.02	140.38
104.70	120.72	141.02
104.37	120.35	140.59
105.11	119.98	141.21
105.85	120.67	140.78
105.52	121.35	141.40
100.99	123.08	140.96
96.48	122.69	140.52
	123.35	141.13
	122.97	141.73
	122.58	142.32
	115.98	141.87
	112.52	139.36
	111.13	137.89

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	123,84
c (kPa)	61,92

Tablo B. 4.Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışım numunesinin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
1.14	8.02	6.87
6.84	20.59	8.01
7.96	34.26	7.99
12.47	51.32	6.84
33.92	70.60	31.89
65.38	90.97	35.25
101.16	107.87	61.32
138.97	116.79	100.91
169.86	138.13	146.06
194.98	169.59	176.37
217.74	161.44	181.76
217.10	135.28	178.11
204.31		157.59
181.68		146.12

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	189,70
c (kPa)	94,89

Tablo B. 5. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışım numunesinin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
3.44	3.44	21.76
4.57	27.45	52.61
15.99	78.80	78.80
26.23	109.48	96.94
38.72	135.51	118.43
51.17	153.51	137.59
66.99	169.19	157.83
73.70	185.95	179.15
83.78	199.27	197.01
98.36	210.29	215.94
126.44	230.30	234.82
142.04	248.01	250.26
154.22	267.91	269.03
171.98	287.75	284.38
190.81	305.29	305.29
209.58	320.53	312.69
227.18	337.97	309.99
245.84	335.24	290.54
274.50	318.01	
277.44	305.29	
264.79		
245.51		

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	309,37
c (kPa)	154,69

Tablo B. 6. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışım numunesinin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
1.15	2.29	2.29
10.31	27.49	4.58
11.44	58.33	5.72
41.11	79.94	23.98
59.30	110.62	92.37
75.16	152.60	120.71
90.97	220.60	184.22
120.36	311.13	227.10
139.46	368.50	288.00
178.89	411.00	348.72
205.77	443.19	427.36
240.47	480.93	546.41
285.21	555.76	669.62
330.95	634.88	726.06
400.15	756.47	782.32
450.08	832.81	764.35
511.06	824.87	667.97
547.25	799.05	
609.02		
650.53		
661.83		
717.60		
753.20		
814.21		
889.44		
916.88		
896.75		

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	844,00
c (kPa)	422,00

Tablo B. 7. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Boy Kısalması (%)	Numune-1	Numune-2
0.00	0.00	0.00
0.29	1.14	2.29
0.57	27.37	29.65
0.86	53.45	35.25
1.14	92.98	49.89
1.43	116.45	67.83
1.71	137.53	87.93
2.00	150.62	118.02
2.29	170.35	152.42
2.57	184.38	177.68
2.86	203.90	197.21
3.14	215.52	215.52
3.43	181.65	225.96
3.71	165.65	219.77
4.00		204.80

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	220,74
c (kPa)	110,37

Tablo B. 8. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Boy Kısalması (%)	Numune-1	Numune-2
0.00	0.00	0.00
0.29	9.16	4.58
0.57	46.89	13.72
0.86	84.51	33.12
1.14	124.31	61.58
1.43	174.23	86.55
1.71	228.56	117.13
2.00	282.74	162.38
2.29	324.28	208.63
2.57	358.91	255.88
2.86	387.79	309.78
3.14	399.65	348.84
3.43	402.45	386.67
3.71	398.49	388.36
4.00	392.29	321.47
4.29	360.29	252.54
4.57	291.40	

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	395,41
c (kPa)	197,71

Tablo B. 9. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetileri (kPa)	
Numune-1	Numune-2
0.00	0.00
4.58	2.29
11.44	10.29
55.96	69.67
108.34	118.60
169.68	173.09
236.52	250.17
313.40	336.11
366.24	405.92
434.77	457.42
501.98	478.24
550.92	480.93
562.53	448.67
488.54	418.75
382.17	
ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	395,41
c (kPa)	197,71

Tablo B. 10. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %5 çimento ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)	
Numune 1	Numune 2
0.00	0.00
9.16	8.02
70.91	45.75
153.04	127.91
256.59	223.52
365.55	312.02
451.44	451.44
495.08	506.43
590.85	544.25
622.72	598.94
671.57	672.70
699.95	754.13
727.11	819.55
763.20	768.83
800.31	657.56
766.59	
606.33	

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	809,93
c (kPa)	404,97

Tablo B. 11. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)	
Numune-1	Numune-2
0.00	0.00
3.44	3.44
4.57	27.45
14.85	78.80
27.37	109.48
41.00	135.51
53.45	153.51
65.86	169.19
73.70	185.95
83.78	199.27
99.49	210.29
114.02	230.30
133.02	248.01
154.22	267.91
171.98	287.75
190.81	305.29
209.58	320.53
227.18	336.85
245.84	350.89
258.87	363.76
272.98	375.48
287.04	384.95
305.50	388.82
319.47	392.69
335.62	393.21
348.39	390.42
350.08	388.74
340.74	377.13
333.63	
324.34	

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	371,65
c (kPa)	185,83

Tablo B. 12. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)	
Numune-1	Numune-2
0.00	0.00
3.44	2.29
66.33	41.17
134.76	70.81
193.87	98.08
268.75	104.77
384.35	115.99
478.04	123.77
576.00	128.13
648.76	132.47
690.79	134.54
686.40	123.05
639.18	111.49
532.44	101.31
	160.74
	196.42
	226.39
	237.25
	307.31
	405.05
	473.53
	570.74
	615.45
	653.37
	635.79
	628.21

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	672,08
c (kPa)	336,04

Tablo B. 13. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)	
Numune-1	Numune-2
0.00	0.00
6.87	4.58
69.77	33.17
132.48	54.82
224.66	90.09
345.05	143.49
491.24	218.33
602.95	324.75
692.79	450.14
758.59	569.51
785.75	677.22
792.52	742.85
786.86	800.39
769.96	812.73
756.47	807.05
	804.75
	802.46
	803.52
	803.46
	773.27
	768.80
	764.33

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	802,63
c (kPa)	401,32

Tablo B. 14. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %7,5 çimento ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)	
Numune-1	Numune-2
0.00	0.00
8.02	4.58
78.91	33.17
191.86	54.82
450.46	90.09
509.03	143.49
674.32	218.33
844.81	324.75
980.79	450.14
1062.02	569.51
1057.09	677.22
1045.40	742.85
1012.32	800.39
	812.73
	820.54
	831.69
	840.56
	837.10
	821.34
	810.10

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	851,29
c (kPa)	425,65

Tablo B. 15. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
12.60	11.45	10.31
83.49	74.34	86.92
113.06	87.94	148.47
140.27	94.65	225.80
166.26	112.74	266.47
194.45	133.04	296.79
216.88	158.97	322.48
236.98	179.15	342.43
260.41	193.61	366.84
293.95	210.29	378.75
314.98	241.59	384.97
338.19	259.28	391.18
360.21	283.67	393.98
387.79	314.73	395.66
395.08	333.35	390.59
394.50	349.67	381.06
380.50	369.31	374.90
357.59	386.65	367.65
354.84	391.66	
	397.77	
	391.62	
	388.82	

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	396,17
c (kPa)	198,09

Tablo B. 16. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
5.73	2.29	10.31
73.20	43.46	70.91
132.48	169.02	174.73
287.38	448.18	304.49
497.64	646.82	407.68
627.70	763.02	553.79
718.77	780.09	690.38
752.88	740.41	765.36
745.00	725.75	775.57
738.27	720.18	768.80
731.56		745.10
721.48		727.11

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	769,51
c (kPa)	384,76

Tablo B. 17. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
9.16	13.74	2.29
194.43	65.19	6.86
465.96	93.65	43.40
692.23	185.89	190.45
949.74	267.61	337.08
1076.87	325.22	494.65
1137.77	473.50	617.71
1102.11	688.25	763.09
1195.63	903.51	857.09
1251.55	720.18	877.33
1306.19	820.74	1044.27
1453.10	992.03	1215.24
1238.23	1210.09	1427.35
1074.57	1411.78	1501.70
937.20	1535.43	1590.43
	1320.25	1589.23
	1092.25	1544.35

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	1526,32
c (kPa)	763,16

Tablo B. 18. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %4 silikon ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
8.02	250.30	8.02
128.09	402.58	76.63
267.24	842.83	146.18
465.29	1154.10	345.55
773.23	1215.07	608.11
822.15	1379.35	934.73
967.44	1631.71	1238.83
1265.39	1726.87	1402.58
1518.31	1723.24	1560.20
1700.40	1642.74	1720.75
1832.28	1496.98	1677.61
1592.88		1604.16
1498.26		1574.81

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	1759,97
c (kPa)	879,99

Tablo B. 19. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin anlık modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
5.73	1.15	33.21
6.86	1.14	59.47
6.85	12.56	98.22
6.84	54.74	139.13
22.78	85.41	181.07
53.45	122.81	221.74
88.57	148.75	221.42
121.32	175.75	253.98
146.06	204.93	284.19
170.72	224.99	309.78
194.18	246.11	331.91
217.57	262.66	347.21
237.52	274.66	357.96
255.15	285.50	365.31
267.13	291.82	365.90
277.95	293.64	363.12
283.14	292.09	358.12
286.07	283.84	
258.87		
245.12		

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	315,20
c (kPa)	157,60

Tablo B. 20. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin 1 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
11.45	20.62	10.31
36.60	84.63	28.59
54.82	93.65	45.68
65.00	98.08	55.88
86.55	108.18	66.05
135.32	115.99	78.46
174.87	127.18	91.98
188.22	138.33	105.45
236.63	148.32	120.02
270.21	160.54	137.93
283.36	167.08	156.92
287.46	178.11	173.61
289.30	189.11	190.24
284.38	200.08	206.82
276.11	209.89	222.23
	220.79	235.36
	228.30	250.68
	236.90	261.49
	256.64	272.26
	266.29	289.69
	275.91	287.04
	283.28	275.51
	288.41	
	286.88	
	268.76	

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	289,13
c (kPa)	144,56

Tablo B. 21. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin 7 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
9.16	21.76	14.89
28.59	34.31	32.02
46.82	54.82	47.97
66.14	72.99	63.86
88.82	88.82	85.41
110.30	104.62	102.34
127.18	119.23	118.09
144.00	132.66	139.46
161.91	144.92	149.45
174.11	156.02	162.80
188.53	164.83	172.73
201.79	175.86	182.62
210.50	185.74	193.61
218.06	191.08	201.20
224.48	197.54	208.76
228.63	202.86	212.94
232.78	207.04	218.23
235.79	215.67	222.38
238.79	217.59	225.40
239.55	219.50	227.30
234.75	216.95	226.96
229.96	214.41	225.52
	207.44	218.53

ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	228,78
c (kPa)	114,39

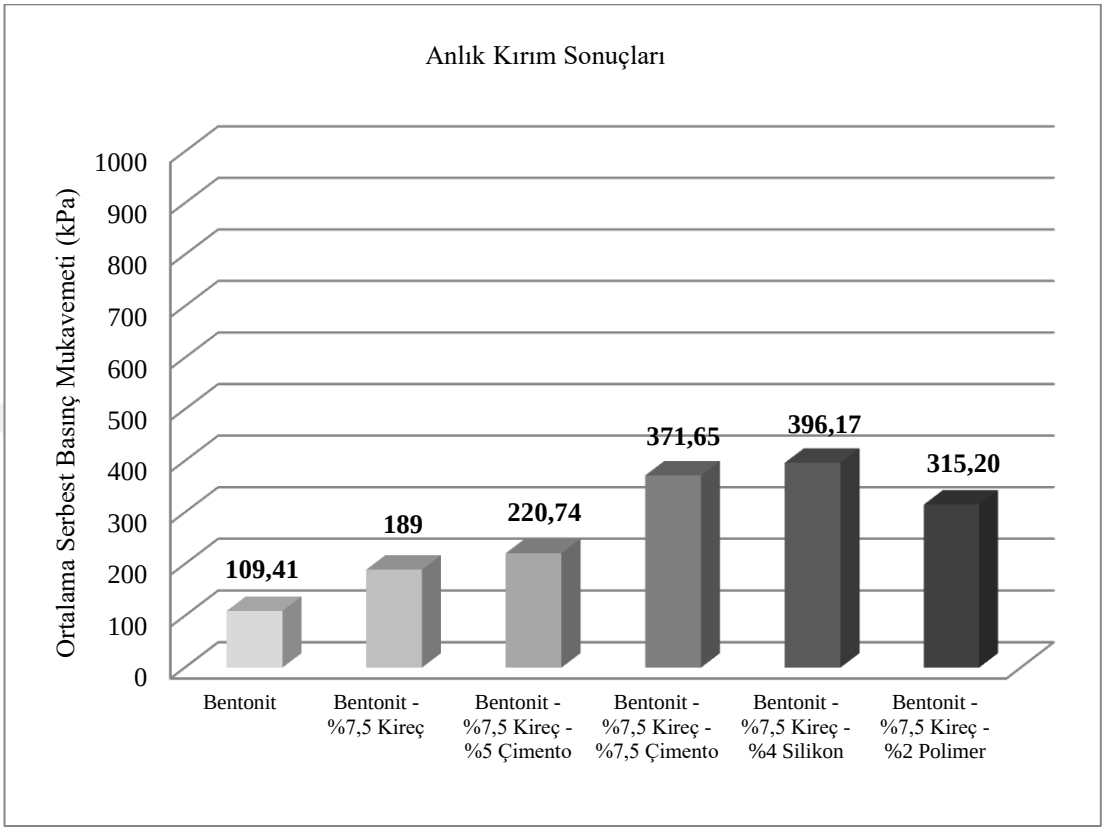
Tablo B. 22. Optimum su muhtevasında bentonit ve % 7,5 kireç karışımına ilave olarak %2 polimer ile hazırlanan numunelerin 28 günlük modifiye proctor serbest basınç deneyi

Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)		
Numune-1	Numune-2	Numune-3
0.00	0.00	0.00
36.65	10.31	26.34
62.90	59.47	66.33
95.93	86.80	157.60
152.82	134.57	315.89
230.03	220.92	526.11
349.10	392.31	666.36
529.14	621.12	856.17
791.43	928.63	1108.91
1073.35	1279.41	1367.72
1420.01	1559.07	1624.65
1737.44	1823.24	1835.66
1885.98	1891.62	1981.80
1862.98	1994.68	2141.02
1711.90	2022.13	2279.53
1616.24	2050.61	2346.92
1583.62	2112.62	2305.39
	2119.60	2234.87
	2086.32	
	2118.97	
	2120.32	
	2076.03	
	2059.65	
	1963.43	

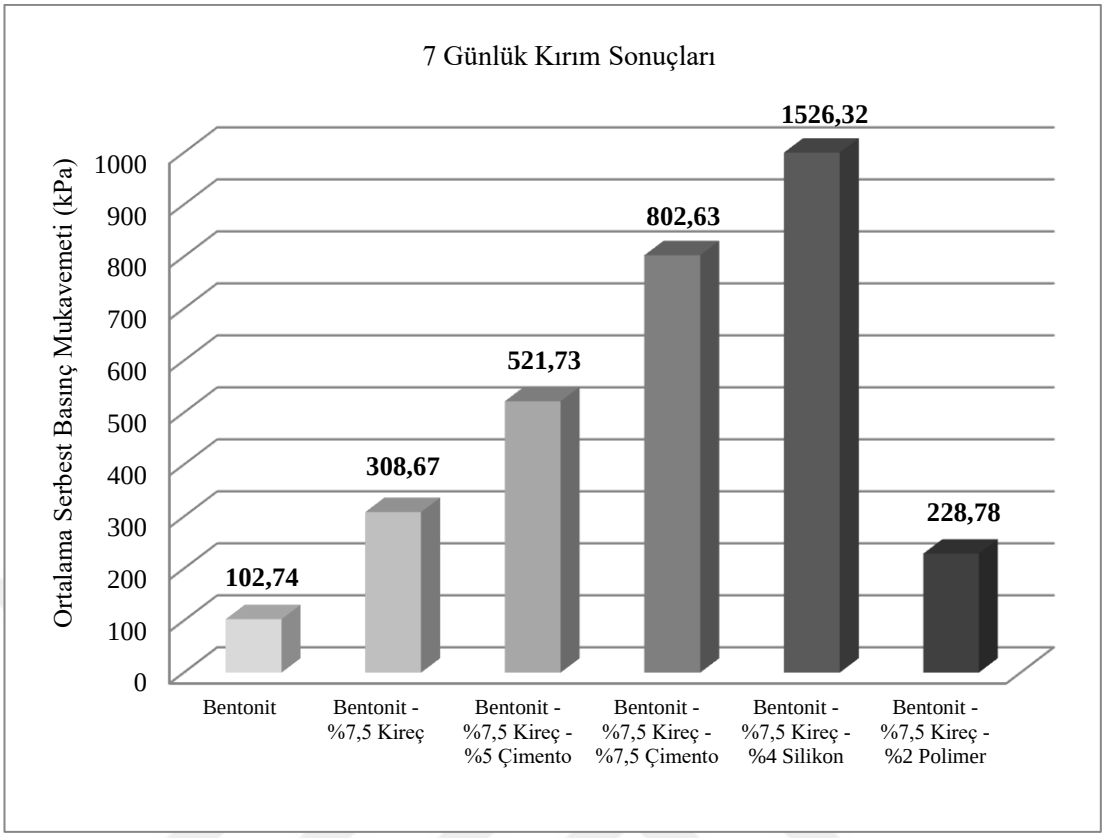
ORTALAMALAR	
q_u(kPa)	2117,74
c (kPa)	1108,87

EK-C

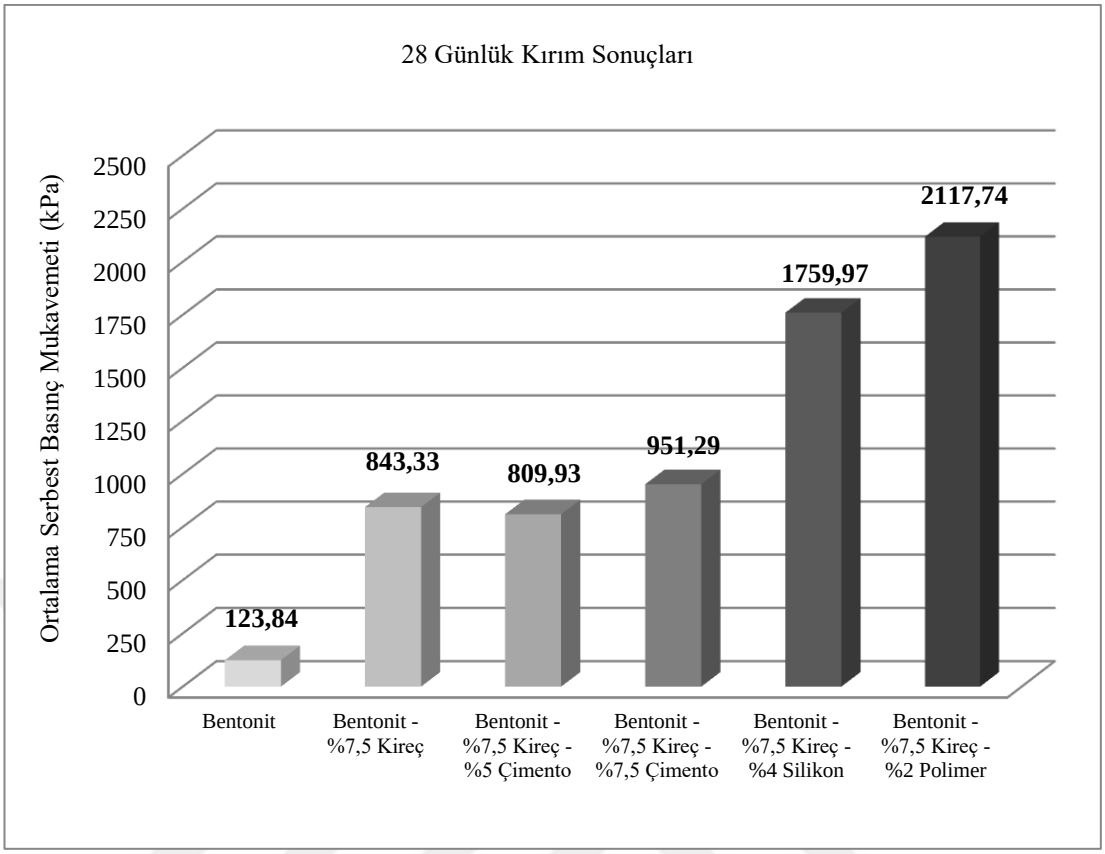
Karşılaştırmalı Kür Sürelerine Göre Serbest Basınç Mukavemetleri



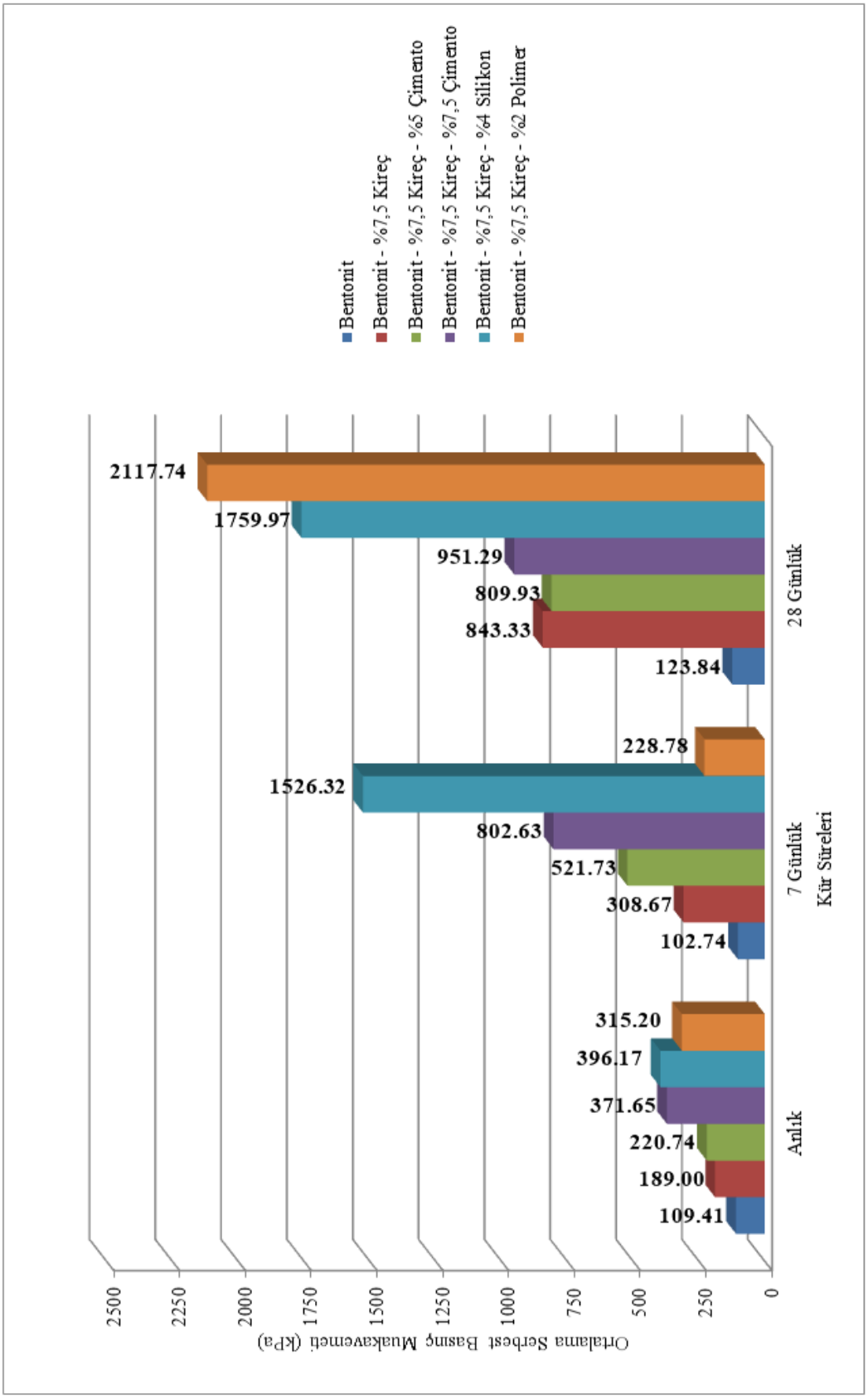
Şekil B. 1. Deney türlerinin anlık kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması



Şekil B. 2. Deney türlerinin 7 günlük kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması



Şekil B. 3. Deney türlerinin 28 günlük kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması



Şekil B. 4.Deney türlerinin 28 günlük kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Karaca K., Kavak A**.**, Kimyasal Stabilizasyon Tekniklerinin Bentonit Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, *3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, İzmit, Türkiye, 04-05 Mayıs 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Kubilay Karaca 1986 yılında İzmit' te doğdu. İlk öğrenimini İzmit' te orta ve lise öğrenimini ise Yalova'da tamamladı. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazanarak 4 yıllık öğrenimi sonucunda 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde kireç, çimento, silikon ve polimer malzemeleriyle yüzeysel stabilizasyonlar konusunda çalışmaları bulunmaktadır. 2010 – 2012 yılları arasında AKSA Akrilik ve Kimya Sanayisinde, 2012 – 2013 tarihleri arasında Tüpraş RUP projesinde, 2013 – 2015 yılları arasında STFA Holding İzmit-Yalova Körfez Geçiş Köprüsü'nde saha mühendisliği yaptı. Ayrıca 2015 yılından itibaren Altınova Belediyesi Fen İşleri Müdürü olarak görevini halen sürdürmektedir.