

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ARAZİDE YÜKSEK SU MUHTEVASI İÇEREN BİR KİLİN
KİREÇ İLE STABİLİZASYONU**

ERDİ BOZKURT

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARAZİDE YÜKSEK SU MUHTEVASI İÇEREN BİR KİLİN
KİREÇ İLE STABİLİZASYONU

ERDİ BOZKURT

Doç. Dr. Aydın KAVAK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Utkan MUTMAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Gamze BİLGİN
Jüri Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üni.

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.01.2020


.....

.....

.....

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde zeminlerin zayıf mühendislik özelliklerini iyileştirilmek amacıyla kireç katkısıyla stabilize edilmesi inşaat altyapılarında başarıyla uygulanan bir yöntemdir. Bu çalışmada, Yalova Bölgesi'nde bulunan su muhtevası yüksek bir kile arazide ve laboratuvarında bir takım deneyler yaparak; zeminin parametrelerini tayin etmek ve zeminin zayıf geoteknik mühendislik özelliklerinin belirli bir orandaki kireç katkısı ile iyileşebileceğini ortaya koymak amaçlanmıştır.

Öncelikle çalışmalarım sırasında bana göstermiş olduğu her türlü destek ve yardımlarından dolayı saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Aydın KAVAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, laboratuvar çalışmalarım aşamasında yardımlarından dolayı sınıf arkadaşlarım Ensar AYAN, Yasin YILDIZ ve Deniz BOSTANCI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatım boyunca beni destekleyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan ailem; babam sınıf öğretmeni Nihat BOZKURT, canım annem Naciye BOZKURT ve kardeşim İngilizce Öğretmeni Ezgi BOZKURT'a en içten sevgilerimi, saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Nisan – 2020

Erdi BOZKURT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	4
1.1. Killer 4	
1.1.1. Kil minerali	4
1.1.2. Kilin mineralojik yapısı	5
1.1.3. Kil çeşitleri.....	6
1.1.4. Killerin özellikleri.....	10
1.2. Kireç 10	
1.2.1. Kirecin çeşitleri.....	11
1.2.1.1. Sönmemiş kireç.....	11
1.2.1.2. Sönmüş kireç.....	12
1.2.2. Kireç kullanımının avantajları	12
1.2.3. Kirecin kullanım alanları	13
1.3. Zemin Stabilizasyonu	14
1.4. Zemin Stabilizasyon Yöntemleri.....	16
1.4.1. Katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonu	19
1.4.1.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu	21
1.4.1.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu	24
1.4.1.3. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu	26
1.4.1.4. Bitüm ile zemin stabilizasyonu	26
2. KİREÇ STABİLİZASYONU	28
2.1. Kireç Türleri ve Uygulanabilirlikleri	30
2.2. Kireç Stabilizasyonu Mekanizması	31
2.3. Kireç Stabilizasyonunda Meydana Gelen Değişimler.....	34
2.4. Kireç Stabilizasyonun Geoteknik Özelliklerindeki Değişim	34
2.4.1. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası	34
2.4.2. Kıvam limitleri.....	35
2.4.3. Mukavemetteki değişimler.....	35
2.4.4. Permabilitedeki değişimler	36
2.4.5. Hacimsel değişimlere karşı davranış	36
2.5. Kireç Stabilizasyonu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	37
2.6. Kireç Stabilizasyonunda Uygulanan Deneyler.....	39
2.6.1. Yıkamalı elek analizi	39
2.6.2. Kıvam limitleri deneyi	40
2.6.3. Piknometre deneyi	41
2.6.4. Hidrometre deneyi	42
2.6.5. Kompaksiyon deneyi	42
2.6.6. Serbest basınç deneyi.....	43
2.6.7. CBR deneyi.....	44

2.6.8. Plaka yükleme deneyi	45
2.7. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	46
2.7.1. Killi zemin	46
2.7.2. Sönmüş kireç.....	47
2.7.3. Sönmemiş kireç.....	47
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	48
3.1. Killi zeminin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi	48
3.2. Doğal Su Muhtevası Tayini.....	49
3.3. Kıvam limiti deneyleri (LL, PL)	49
3.4. pH Deneyi.....	53
3.5. Yıkamalı Elek Analizi	54
3.6. Hidrometre Deneyi	56
3.7. Piknometre Deneyi	57
3.8. Kompaksiyon (Harvard Proktor) Deneyi	57
3.9. Serbest Basınç Deneyi.....	62
3.9.1. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin serbest basınç grafiği.....	65
3.9.2. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireç katkılı zeminin serbest basınç grafiği.....	68
3.9.3. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireç katkılı zeminin serbest basınç grafiği.....	71
3.9.4. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireç katkılı zeminin serbest basınç grafiği.....	75
3.10. CBR Deneyi	79
3.11. Plaka Yükleme Deneyi	82
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	87
EKLER.....	89
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	134
ÖZGEÇMİŞ	135

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Killerin mikroskopik görüntüleri	4
Şekil 1.2.	Kil minerallerinin yaprakçıklarında tetrahedron, oktahedron yapısı	5
Şekil 1.3.	Kaolinit grubu kil minerallerinin yapısı	7
Şekil 1.4.	İllit grubu kil minerallerinin yapısı	8
Şekil 1.5.	Montmorillonit grubu kil minerallerinin yapısı	9
Şekil 1.6.	Mikanın illite, illitten vermiküllit ve montmorillonite dönüşmesi.....	9
Şekil 1.7.	Kireçtaşının SEM görüntüsü	11
Şekil 1.8.	Sönmemiş kireçte hidrasyon hızının su miktarıyla değişimi.....	12
Şekil 1.9.	Türkiye’de kireçtaşı kullanımı	14
Şekil 1.10.	Zemin parametrelerinin kireç oranı ile değişimi	22
Şekil 2.1.	Farklı tip zeminlerde kireç içeriği ile mukavemet değişimi.....	30
Şekil 2.2.	Kasyon değişimi ve topaklanma reaksiyonu oluşumu.....	32
Şekil 2.3.	Puzzolanik reaksiyonlar ve zemin yapısındaki değişimler	33
Şekil 2.4.	Farklı kil tiplerinin kıvam limitleri.....	35
Şekil 2.5.	Elek analizi takımı.....	40
Şekil 2.6.	Casagrande aleti	40
Şekil 2.8.	Piknometre aleti.....	41
Şekil 2.9.	Hidrometre deneyi aleti	42
Şekil 2.10.	Kompaksiyon deneyi aletleri.....	43
Şekil 2.11.	Serbest basınç deneyinde numune kesiti ve grafiği	44
Şekil 2.12.	CBR düzeneği	45
Şekil 2.13.	Deneylerde kullanılan killi zemin	46
Şekil 3.1.	Su muhtevası deneyi.....	49
Şekil 3.2.	Likit limit deneyinin yapılışı	50
Şekil 3.3.	Killi zeminin likit limit grafiği	51
Şekil 3.4.	Plastik limit deneyi numunesi	52
Şekil 3.5.	Ph deneyi	53
Şekil 3.6.	Killi zeminin granülometre eğrisi	55
Şekil 3.7.	Hidrometre deneyi.....	56
Şekil 3.8.	Standart proktor deneyi	58
Şekil 3.9.	Killi zeminin su muhtevası.....	59
Şekil 3.10.	Minyatür proktor aleti ile numune hazırlanışı.....	59
Şekil 3.11.	%2 kireç katkılı zeminin su muhtevası	61
Şekil 3.12.	Serbest basınç deneyi	63
Şekil 3.13.	Numunelerin sarılması	64
Şekil 3.14.	%2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği	65
Şekil 3.15.	%2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği	66
Şekil 3.16.	%2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği	66
Şekil 3.17.	%2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafiği	67
Şekil 3.18.	%2 sönmüş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği	67
Şekil 3.19.	%3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği	68

Şekil 3.20. %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği	69
Şekil 3.21. %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği	69
Şekil 3.23. %3 sönmüş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği (kPa).....	70
Şekil 3.24. %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği	71
Şekil 3.25. %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği	72
Şekil 3.26. %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği	72
Şekil 3.28. %4 sönmüş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği (kPa).....	73
Şekil 3.29. Bütün deneylerin kür sürelerine göre ortalama mukavemet değerleri (kPa).....	74
Şekil 3.30. %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği	75
Şekil 3.31. %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği	76
Şekil 3.32. %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği	76
Şekil 3.33. %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafiği	77
Şekil 3.34. %3 sönmemiş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği	77
Şekil 3.35. %3 sönmüş ve %3 sönmemiş kireçli zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerlerinin karşılaştırılması	78
Şekil 3.36. Doğal zeminin CBR deneyi.....	79
Şekil 3.37. %2 kireçli zeminin CBR deneyi.....	79
Şekil 3.38. %3 kireçli zeminin CBR deneyi.....	80
Şekil 3.39. CBR deney Yükleme sonuçları (kgf).....	80
Şekil 3.40. Kireç oranına göre CBR değerleri (%).....	81
Şekil 3.41. CBR deneyi şişme değerleri(%).....	81
Şekil 3.42. Plaka test yükleme sonuçları-1	83
Şekil 3.43. Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği-1	83
Şekil 3.44. Plaka test yükleme sonuçları-2.....	84
Şekil 3.45. Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği-2.....	84
Şekil A.1. %2 kireç katkılı zeminin su muhtevası	90
Şekil A.2. %3 kireç katkılı zeminin su muhtevası	91
Şekil A.3. %4 kireç katkılı zeminin su muhtevası	92
Şekil B.1. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-1	93
Şekil B.2. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	93
Şekil B.3. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	94
Şekil B.4. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1günlük serbest basınç deneyi-1.....	94
Şekil B.5. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1günlük serbest basınç deneyi-2.....	95
Şekil B.6. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1günlük serbest basınç deneyi-3.....	95
Şekil B.7. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	96
Şekil B.8. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	96

Şekil B.9. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	97
Şekil B.10. %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafik kıyaslaması.....	97
Şekil B.11. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	98
Şekil B.12. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	98
Şekil B.13. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	99
Şekil B.14. %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri.....	99
Şekil B.15. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	100
Şekil B.16. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	100
Şekil B.17. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	101
Şekil B.18. %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri.....	101
Şekil B.19. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1.....	102
Şekil B.20. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2.....	102
Şekil B.21. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3.....	103
Şekil B.22. %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri.....	103
Şekil B.23. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	104
Şekil B.24. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	104
Şekil B.25. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	105
Şekil B.26. %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafikleri.....	105
Şekil B.27. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	106
Şekil B.28. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	106
Şekil B.29. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	107
Şekil B.30. %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri.....	107
Şekil B.31. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	108
Şekil B.32. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	108
Şekil B.33. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	109
Şekil B.34. %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri.....	109
Şekil B.35. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1.....	110

Şekil B.36. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2	110
Şekil B.37. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3	111
Şekil B.38. %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri.....	111
Şekil B.39. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	112
Şekil B.40. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	112
Şekil B.41. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	113
Şekil B.42. %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafikleri	113
Şekil B.43. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	114
Şekil B.44. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	114
Şekil B.45. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	115
Şekil B.46. %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri.....	115
Şekil B.47. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	116
Şekil B.48. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	116
Şekil B.49. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	117
Şekil B.50. %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri.....	117
Şekil B.51. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1	118
Şekil B.52. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2	118
Şekil B.53. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3	119
Şekil B.54. %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri.....	119
Şekil B.55. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	120
Şekil B.56. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	120
Şekil B.57. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	121
Şekil B.58. %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafikleri	121
Şekil B.59. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	122
Şekil B.60. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	122
Şekil B.61. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	123
Şekil B.62. %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri.....	123
Şekil B.63. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	124

Şekil B.64. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	124
Şekil B.65. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	125
Şekil B.66. %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri.....	125
Şekil B.67. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1.....	126
Şekil B.68. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2.....	126
Şekil B.69. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3.....	127
Şekil B.70. %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri.....	127
Şekil D.1. %2 kireç katkılı zeminin likit limit grafiği.....	131
Şekil D.2. %3 kireç katkılı zeminin likit limit grafiği.....	132
Şekil D.3. %4 kireç katkılı zeminin likit limit grafiği.....	133

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Kil minerallerinin ağırlığa göre kimyasal bileşimi (%)	6
Tablo 1.2. Stabilizasyon metotları	18
Tablo 1.3. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları	19
Tablo 1.4. Kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri	22
Tablo 1.5. Zemin cinsine göre yaklaşık kireç miktarı	23
Tablo 1.6. Zemin tiplerine göre optimum çimento oranları	25
Tablo 2.1. Ingles ve Metcalf tarafından önerilen kireç oranları	29
Tablo 2.2. İki farklı kil tipinin kompaksiyon değerleri	34
Tablo 2.3. CBR değerleri seviyesi	45
Tablo 2.4. Sönmüş kirecin fiziksel özellikleri	47
Tablo 2.5. Sönmüş kirecin kimyasal özellikleri	47
Tablo 2.6. Sönmemiş kirecin kimyasal özellikleri	47
Tablo 3.1. Zeminin doğal su muhtevası	49
Tablo 3.2. Killi zeminin plastik limit deneyi değerleri	52
Tablo 3.3. Katkısız ve katkılı zeminin kıvam limit değerleri	53
Tablo 3.4. pH deneyi sonuçları	54
Tablo 3.5. Killi zeminin elek analiz sonuçları	55
Tablo 3.6. Piknometre deneyi sonuçları	57
Tablo 3.7. Killi zeminin geoteknik özellikleri	60
Tablo 3.8. Katkısız ve katkılı kilin proktor deney sonuçları	62
Tablo 3.9. Serbest basınç deneyi için numune bilgileri	63
Tablo 3.10. Killi zeminin %2 kireç oranındaki serbest basınç değerleri	68
Tablo 3.11. Killi zeminin %3 kireç oranındaki serbest basınç değerleri	71
Tablo 3.12. Killi zeminin %4 kireç oranındaki serbest basınç değerleri	74
Tablo 3.13. Killi zeminin %3sönmemiş kireç oranındaki serbest basıncı	78
Tablo A.1. %2 kireç katkılı zeminin kompaksiyon deneyi	90
Tablo A.2. %3 kireç katkılı zeminin kompaksiyon deneyi	91
Tablo A.3. %4 kireç katkılı zeminin kompaksiyon deneyi	92
Tablo C.1. Doğal malzemenin CBR deneyi sonuçları	128
Tablo C.2. %2 kireçli malzemenin CBR deneyi sonuçları	129
Tablo C.3. %3 kireçli malzemenin CBR deneyi sonuçları	130
Tablo D.1. %2 kireç katkılı zeminin likit limit değeri	131
Tablo D.2. %2 kireç katkılı zeminin plastik limit değeri	131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
$Ca(OH)_2$: Kalsiyum hidroksit
q_u	: Serbest basınç dayanımı
Al	: Alüminyum
CaO	: Kalsiyum oksit
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
d	: Genişlik, (cm)
D	: Numune çapı, (cm)
Fe	: Demir
h	: Yükseklik
K	: Potasyum
kPa	: Kilopascal
Mg	: Magnezyum
MPa	: Megapascal
P	: Düzgün yayılı yük
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum oksit
t	: Kür süresi
W	: Su muhtevası, (%)
$W_{doğal}$: Doğal su muhtevası, (%)
W_L	: Likit limit
W_{opt}	: Optimum su muhtevası, (%)
W_P	: Plastik limit

Kısaltmalar

CBR	: California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
K.B.H.A.	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LL	: Likit Limit
M.K.B.H.A.	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
PÇ	: Portland Çimentosu
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu Kül

ARAZİDE YÜKSEK SU MUHTEVASI İÇEREN BİR KİLİN KİREÇ İLE STABİLİZASYONU

ÖZET

Zemin stabilizasyon yöntemleri geoteknik alanında gün geçtikçe değer kazanmaktadır. Kireç zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için yaygın bir şekilde kullanılan katkı malzemesidir. Literatür çalışması sonucunda, kireç ile zemin stabilizasyonu zemin iyileştirme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada, Yalova bölgesinden getirilen kilin %2, %3 ve %4 oranlarında sönmüş kireç katkılı ve %3 sönmemiş kireç numunelerin mukavemet değerlerine bakılmıştır. Sınıflandırma deneyleri sonucunda CH zemin sınıfına ait olduğu belirlenmiştir. Sonrasında katkısız ve %2, %3 ve %4 oranlarındaki kireç katkılı kilin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri bulunmuştur. Çalışmanın sonunda katkısız ve %2, %3, %4 oranlarında kireç eklenerek hazırlanan numuneler anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük süreler sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca serbest basınç deneyi sonucunda ortaya çıkan mukavemet değerleri yaş CBR deneyi ve arazide yapılan plaka yükleme deneyleriyle desteklenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda kireç katkılı kilin katkısız kile kıyasla maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. katkısız kile göre kireç katkılı kilin serbest basınç mukavemet değerlerinde artış olmuştur. Bu durum kirecin zemin stabilizasyonunda kullanılabilceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kireç, Kireç Stabilizasyonu, Serbest Basınç Deneyi, Stabilizasyon.

STABILIZATION OF A CLAY CONTAINING HIGH WATER CONTENT IN THE FIELD WITH LIME

ABSTRACT

Lime is a commonly used additive to improve the engineering properties of the soil. As a result of the literature, study, soil stabilization with lime is one of the most used methods among soil improvement methods. In this study, the strength values of 2%, 3% and 4% slaked lime added and 3% quicklime lime samples of clay brought from Yalova region were examined. As a result of the classification tests it was determined that it belongs to the CH soil class. Subsequently, maximum dry unit volume weight and optimum water content values of lime added clay at 2%, 3% and 4% were found. At the end of the study, samples which were prepared by adding lime with 2%, 3% and 4% of admixture were subjected to confined pressure test at the end of instant, 1 day, 7 day and 28 day periods. In addition, the strength values resulting from the free pressure test are supported by wet CBR test and plate loading tests in the field. As a result of the experimental studies, it was observed that the maximum dry unit volume weight values of lime doped clay were increased compared to unlead clay. In addition, there was an increase in the unconfined compressive strength values of lime-doped clay compared to no-clay. This shows that lime can be used for soil stabilization.

Keywords: Lime, Lime Stabilization, Unconfined Pressure Test, Stabilization.

GİRİŞ

Stabilizasyon, mühendislik özellikleri iyi olmayan zeminleri fiziksel, kimyasal ve mekanik iyileştirme yöntemlerini kullanarak gelecek dış kuvvetlere karşı daha dayanıklı ve kullanılabilir bir hale getirmektir. Son yıllarda hızla artan yapılaşma taleplerine paralel olarak yerleşim bölgelerinde yapılaşmaya açılabilir alanların kullanılma talebi de artmaktadır. Fakat zemin özellikleri elverişli ve kullanılabilir iyi özelliklere sahip temel zemini bulunduran arazilerin sayısı hiçbir şekilde ihtiyacı karşılayamamaktadır. Bu durum mühendislik özellikleri iyi olmayan arazilerin yapılaşmaya açılmasını zorunluluk haline getirmiştir. Buna bağlı olarak da gerek normal yapıların gerekse ulaşım yapılarının zayıf dayanım özelliklerine sahip araziler üzerinde yapılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca bu zorunluluk zeminlerin iyileştirilmesi düşüncesini beraberinde getirmiştir.

Zeminler mühendislik özellikleri bakımından birbirinden farklı özelliklere sahiptirler. Bu özellikler zeminin cinsine ve arazi koşullarına göre değişim gösterir. İnşaat sahasındaki zeminler istenilen özelliklerde olmayabilir ve kullanılmaya elverişli olmayan zeminlerin yerine daha elverişli bir zemin kullanılması ya da proje sahasının değiştirilmesi teknolojik, ekonomik ve uygulanabilirlik bakımından çoğu kere bir çözüm olarak kabul edilmemektedir. Bu gibi durumlarda, yapılaşmaya açılacak sorunlu zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirme ve iyileştirme çözümüne başvurulmaktadır. Bu nedenle zemin iyileştirme yöntemlerini kullanarak zeminin taşıma gücünü istenilen duruma getirebiliriz.

Literatüre baktığımızda birçok zemin iyileştirme yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de katkı ile zemin iyileştirme yöntemidir. Zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin birçok katkı maddesi ile farklı oranlarda karıştırılarak iyileştirilmesi yapılmaktadır. Son yıllarda sıkça tercih edilen bu yöntem maliyet ve kolay uygulanması açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Zemin stabilizasyonunda, 20. yy'den bugüne kadar birçok alternatif malzeme kullanılarak farklı uygulamalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları doğal yollarla elde edilirken bazıları da atık sonucu

ortaya çıkan malzemelerdir [1]. Kireç stabilizasyonu katkı maddesi eklenerek yapılan en iyi iyileştirme yöntemlerinden birisidir. 20.yy başlarından itibaren kireç modern inşaat uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kireç stabilizasyonu, günümüzde özellikle artan taşıma kapasitesi nedeniyle karayolları başta olmak üzere birçok alanda sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. En etkili ve en yaygın yöntem olarak kullanılan kireç stabilizasyonu killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmede çok etkilidir. Son yıllarda killi zeminlerin farklı kireç oranları kullanılarak iyileştirmesi çok yaygınlaşmıştır.

Bu çalışmada katkı maddesi ile stabilizasyon yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada Yalova bölgesinden getirilen killi bir zemin numunesi üzerinde laboratuvar deneyleri kapsamında farklı kireç oranları ile karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde su muhtevası yüksek olan bir kil kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan deneyler sonucunda kirecin killi zemin üzerindeki olumlu değişimler incelenmiştir.

Kireç stabilizasyonu ile iyileştirme yöntemi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada da en eski iyileştirme yöntemlerinden biri olarak bilinen kireç stabilizasyonu ile killi zeminin mühendislik özelliklerini kireç katarak değiştirip mukavemetine ve durabilitesindeki değişimine bakılması amaçlanmıştır.

Yapılan bu çalışma kapsamında Yalova bölgesinden getirilen kil numunesinin farklı oranlarda sönmüş ve sönmemiş kireç ilave edilerek oluşturulan malzemenin mühendislik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Kireç oranları %2, 3 ve 4 olarak öngörülmüştür. Bu amaçla kil numuneleri üzerinde laboratuvar ortamında sırasıyla elek analizi, Atterberg deneyleri, hidrometre, piknometre, ph deneyi ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Son olarak serbest basınç testi(UC), yaş CBR deneyi ve arazide de plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Kil ve kireç karışımında kil numunesinde yapılan deneylerin hepsi yapılmıştır. Ayrıca farklı kireç oranlarındaki karışımların proktor deneyleriyle optimum su oranlarıyla maksimum kuru birim hacim ağırlıkları elde edildikten sonra serbest basınç testi için bulunan bu parametrelere bakılarak numuneler hazırlanmıştır.

Serbest basınç deneylerinde zemin hem katkı malzemesi olmadan, hem de sönmüş ve sönmemiş kireç kullanılarak yapılmıştır. Aralarındaki sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Kireç katkılı deneyler kirecin uzun süreli reaksiyonlarından

dolayı anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük olarak test edilmiş ve her bir deney için en az 3 tane olmak üzere test yapılıp ortalaması alınmıştır [2].

Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar Türk Standartları Enstitüsü (TSE) verilerine uyumlu ve Karayolları Teknik şartnamesinin (KTş) değerlerine uygun olacak şekilde karşılaştırmalar yapılmıştır.

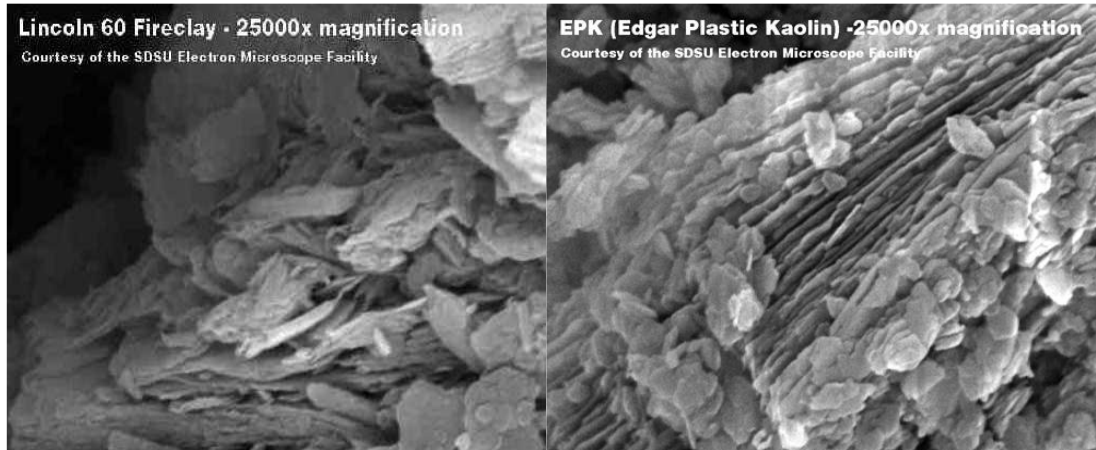


1. GENEL BİLGİLER

1.1. Killer

1.1.1. Kil minerali

Geoteknik mühendisliği açısından killerin özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşır. Çünkü hemen hemen mühendislik yapılarının uygulandığı her yerde killerle karşılaştığımızı söyleyebiliriz. Kil daneleri mikroskobik veya daha küçük daneler içeren, toprağın 0,002mm'den daha küçük daneleri içeren malzemelerdir. Kil mineralleri silikatların ayrışmasıyla alüminosilikat olarak kimyasal yapısını oluşturan ikincil bir zemin türüdür. Fiziksel yapıları bakımından killer, çok küçük danelere sahip olmaları nedeniyle küre ve küpe benzeyen danelerden daha büyük yüzeye sahiplerdir. Şekil 1.1'de mikroskop altında büyütülmüş kil zeminine ait görüntüler görülmektedir. Kil mineralleri düşük sıcaklıkta oluştuğu için pulcuklar halindedir. Ayrıca yapıları yaprakçıklıdır ve tabaka halindedir [3].



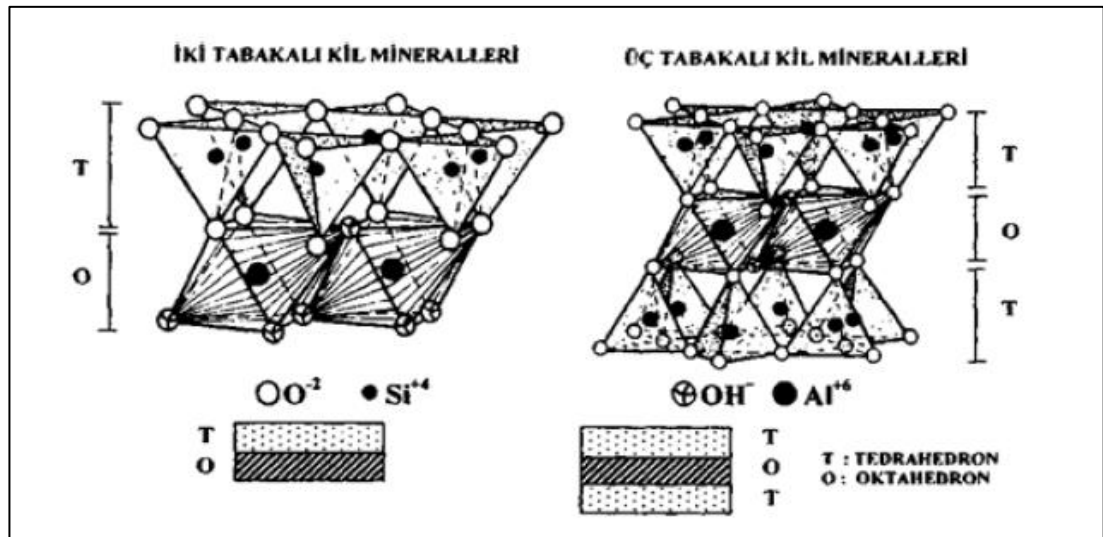
Şekil 1.1. Killerin mikroskobik görüntüleri [3]

Killer kimyasal bileşimi sulu alüminyum silis ve diğer elementlerden oluşan tane boyutu oldukça küçük olan plastik ve kohezif özelliklere sahip bir malzemedir. Mühendislikte plastik özeliğe sahip kil malzemesi ıslandığında şişen, kurduğunda büzülebilen ve sıkıştırma işlemine maruz kalınca suyunu dışarı atabilen ince taneli

bir malzemedir. Yapısı itibariyle sürekli nemli olduğundan dolayı su çeken bir malzemedir. Kil malzemesi doğada bol bulunmasına rağmen saf kil olarak oldukça az bulunmaktadır. Yapısında çoğunlukla mika, silis ve demir oksit mineralleri bulunur. Elektrokimyasal olarak aktif ve dane çapları küçüldükçe elektrik yükleri artmaktadır. Kil mineralleri kimyasal analiz, x-ray kırınım teknikleri ve optik metotlar ile kolay bir şekilde incelenebilir. Göletlerde suyun tutulması, barajlarda geçirimsizliği sağlaması ve kazı yapılan ayrıca kendini tutamayan zeminlere destek sağlaması amaçlarıyla kullanılan bir malzemedir. Fakat genelde kil minerali, mühendislik özelliklerinde önemli sorunlara sebep olduğu için karşılaşılması istenmeyen bir malzemedir. Diğer zeminlere göre daneler arasındaki boşluklar daha az olduğundan permeabilitesi de düşüktür. Plastisitesi yüksek olan kohezyonlu bir malzeme olduğu için zemin davranışını önemli oranda etkiler. Bir zemin içerisinde az miktarda kil olsa bile zeminin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kil miktarı arttıkça zemin davranışı kil tarafından kontrol edilmektedir. Bir zemine killi zemin diyebilmek için karışımda diğer bileşenlerin %25'i geçmeyecek şekilde olmalıdır [2,4].

1.1.2. Kilin mineralojik yapısı

Killer daneleri itibariyle çok küçük olduklarından dolayı elektron mikroskopuyla yapıları incelenmektedir. Mikroskopla incelenen kil danelerinin tabakamsı bir yapıya sahip oldukları Şekil 1.2'de görülmektedir.



Şekil 1.2. Kil minerallerinin yaprakçıklarında tetrahedron, oktahedron yapısı [5]

Kilin tabakamsı yapısı her biri iki, üç veya dört tetrahedron ve oktahedrondan meydana gelmişlerdir. Tetrahedron yapı tipinde merkezde silisyum katyonu bulunup etrafında da eşit uzaklıkta dört oksijen anyonu bulunmaktadır. Oktahedronda ise merkezde alüminyum katyonunun etrafında altı oksijenden oluşmaktadır [5].

Killerin sınıflandırılması, içerdiği kil minerallerine ve kristal yapılarına göre yapılmaktadır. Ayrıca kristal yapıları; kilin tabakamsı yapısının kalınlığını, şişme ve büzülme kabiliyetini, katyonların yer değiştirebilme yeteneklerini etkiler. Kil minerallerin yapısındaki elementler ve oksitlerin oranları farklı killer arasında ayırım yapılması için belirgin faktörler değildir. Kil minerallerinin ağırlıklara göre birleşimleri Tablo 1.1’de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Kil minerallerinin ağırlığa göre kimyasal bileşimi (%) [6]

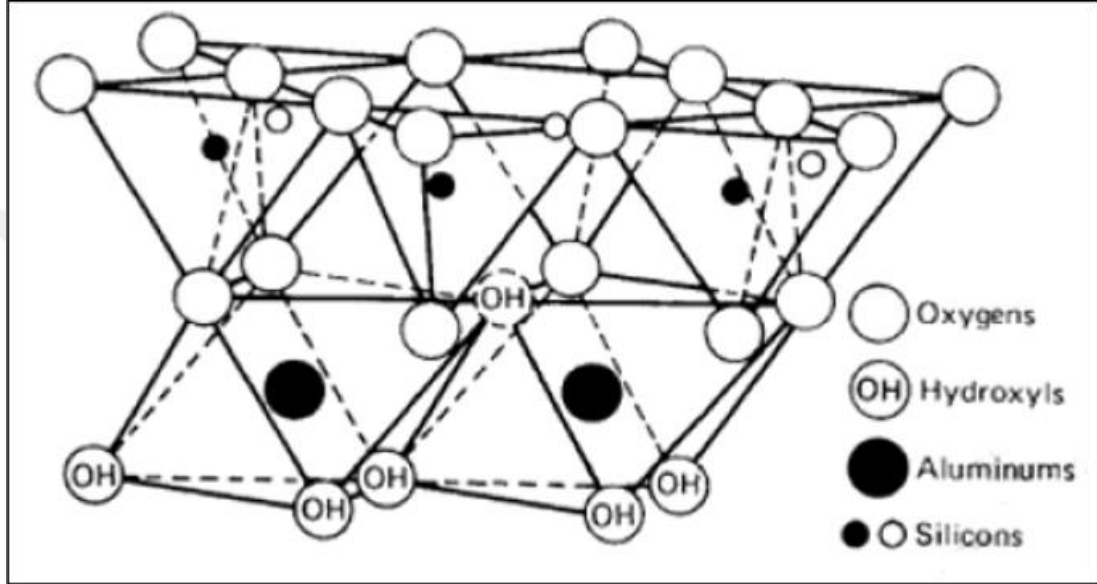
Kil Mineralleri	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Kaolinit	45-48	38-40	-	-	-	-	-	-
İllit	50-56	18-31	2-5	0-0,8	0-2	1-4	4-7	0-1
Klorit	22-35	12-24	0-15	-	0-2	12-34	0-1	0-1
Montmorillonit Nontronit	42-55	0-28	0-30	0-0,5	0-3	0-2,5	0-0,5	0-3
Vermikulit	33-37	7-18	3-12	0-0,6	0-2	20-28	0-2	0-0,04

1.1.3. Kil çeşitleri

Killer, minerallerin bileşimlerine ve içerdiği minerallere bağlı olarak; beyaz, kahverengi, yeşil, mavi ve sarı renklerinin çeşitli tonlarında bulunmaktadır. Killer çok küçük tanelere sahip olması ve buldukları kapta saf olmadıkları için rahat bir şekilde ayırt edilebilirler. Kil minerallerin tabakamsı yapısında bir tetrahedron bir de oktahedronun oksijen ile bağlanması sonucunda iki tabakalı kil mineralleri oluşur. Bunun da en yaygın örnekleri kaolinit ve halloysittir [2].

Kaolinit, tetrahedron yüzeyini oksijenin oktahedronların yüzeyini ise hidroksitlerin kapladığı iki tabakalı kil mineralidir. Tabakalar arasında elektriksel çekim kuvveti vardır. Bu sebeple tabakaları birbirine sıkıca bağlanmış bir yapıya sahiptirler ve iç ve dış yüzeyleri su almadıkları için tabakalar arasında bu elementlerin girmeleri önlenir.

Ayrıca tabakalar arasında su girmediklerinden bu zeminler ısladıklarında cıvık halde olurlar. Bu durum kaolinit mineralini stabil yapmaktadır. İçsel sürtünme açıları yüksek, kation değişim yetenekleri ise düşüktür. Kaolinit minerali içeren zeminler mühendislik açısından genellikle sorun çıkaran zeminler olarak bilinmektedir. Bu sebeple bu zeminler ancak organik maddelerin bol olmasıyla iyileştirilebilir. Şekil 1.3'de kaolinit kil mineralinin yapısı gösterilmektedir [5].

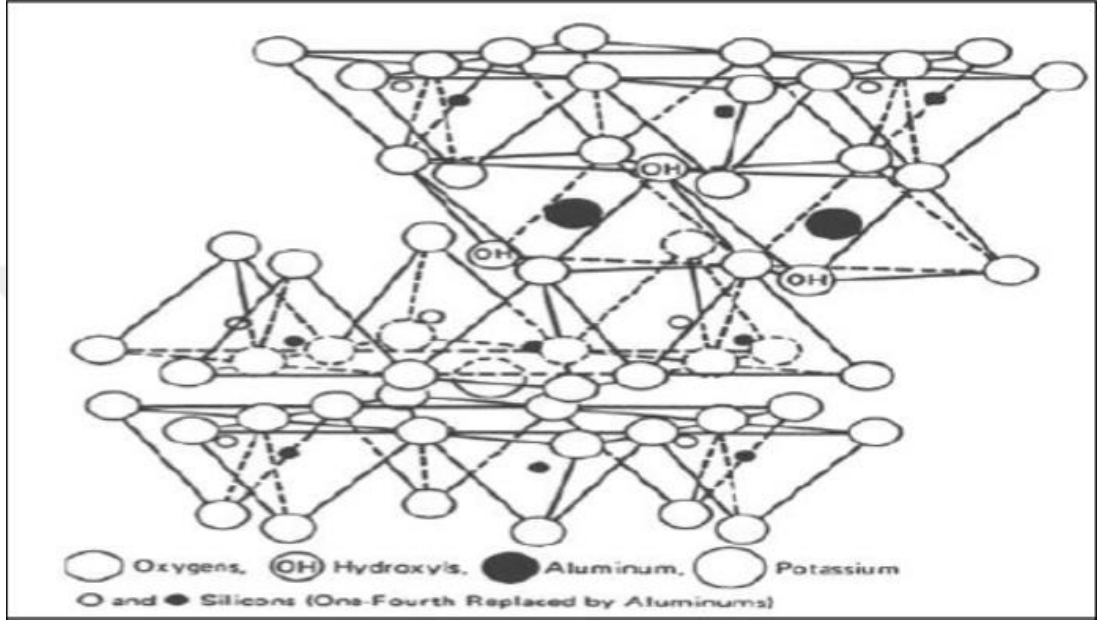


Şekil 1.3. Kaolinit grubu kil minerallerinin yapısı [7]

İki tabakalı kil mineralinin bir diğer örneği ise halloysittir. Tabakaları arasında suyun girmesi özelliği ile kaolinitten ayrılır. Halloysit grubu kil mineralleri su alınca şişen bir mineral çeşididir.

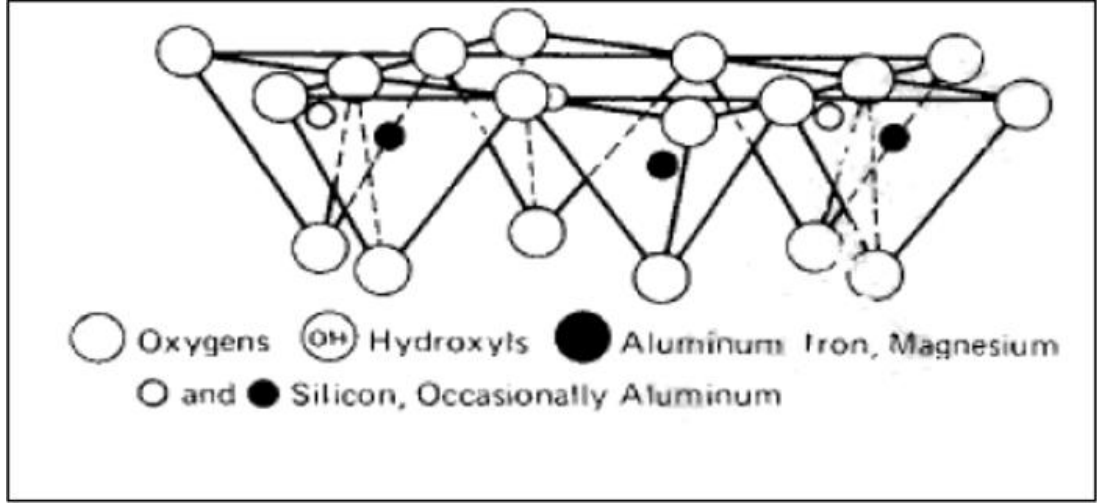
Üç tabakalı yapıya sahip killerin yapısında iki tetrahedron ve bir oktahedron tabakaları bulunmaktadır ve oktahedron tabakası iki tetrahedron tabakası arasında birleşmesiyle oluşmaktadır. Üç tabakalı yapıya sahip killer arasında en yaygın olanları illit, montmorillonit ve vermikulit olarak bilinmektedir. İllit mineralleri tabakaları arasında su alarak şişebilen bir mineraldir. Mineralleri birbirine bağlayan levhalar potasyum hidratlanması olayı ile bağlı kalırlar. Potasyum hidratlanması olayında tabakalar önce kenarlardan su alarak içe doğru ilerlerler. Bu olay sonucunda pulcuklar birbirinden ayrılır. Tabakalar arasında bulunan potasyum iyonları iç tabaka bağlarını çok kuvvetli yapmaktadır. İllit iki alüminyum hidroksit ve bir silika levhalarından oluşmaktadır. İllit mineralli kil grubu suyla temas ettiklerinde şişme

kabiliyetleri kaolinite göre daha fazladır ancak montmorillonite göre daha azdır. Bu sebeple montmorillonite göre genişleme özelliği daha azdır. İllit' in katyon değişim kabiliyeti az olsa bile içsel sürtünme açıları daha fazladır. İllit mineralleri, diğer minerallere göre daneleri çok daha küçük ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Şekil 1.4'de illit kil mineralinin yapısı gösterilmektedir [2,7].



Şekil 1.4. İllit grubu kil mineralinin yapısı [7]

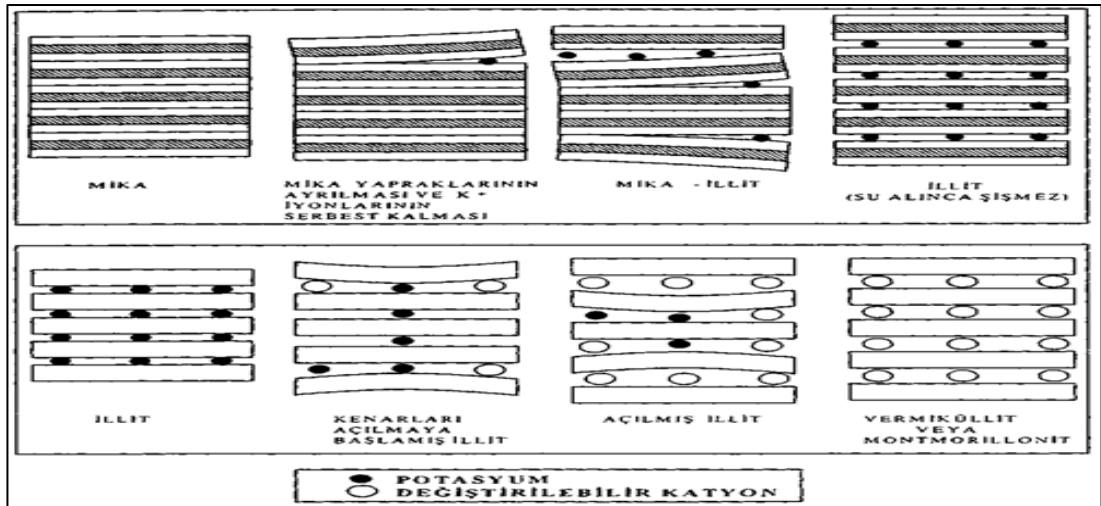
Bentonit yataklarında bulunabilen montmorillonit minerali, illit minerali ile benzer yapılara sahiptir. Yapısında alüminyum hidroksit ve silika içermektedir. Bu minerallerin içerisinde de alüminyum, demir ve magnezyum bulunmaktadır. Levhalar arasındaki boşluklarda su ve potasyum bulunmaktadır. Bu sebeple montmorillonit minerali ıslanınca şişme potansiyeli(hacimsel artış), kaolinit ve illite göre oldukça fazladır. Şişme potansiyeli yüksek olmasından dolayı stabil olmayan bir mineral halini almaktadır. Levhalar arasında bulunan potasyum katyonlarından oluşan bağlar yeterli derecede kuvvetli değildir. Yani tabakalar arasındaki çekim kuvveti oldukça zayıftır. Şekil 1.5'de Montmorillonit grubu kil mineralinin yapısı gösterilmektedir [7].



Şekil 1.5. Montmorillonit grubu kil minerallerinin yapısı [7]

Vermiküllit, illit minerali yapısında bulunan potasyumun yerine magnezyumun olduğu kil mineralidir. Vermiküllitler de şişme potansiyeli yüksek minerallerdir.

Dört tabakalı kil mineralleri tetrahedron ve oktahedron tabakalarının üst üste sıralanması ile oluşmaktadır. Tetrahedron tabakaları oksijen ile oktahedron tabakaları ise hidrojen ile sarılır. Dört tabakalı kil minerallerin en yaygın örneği klorittir. Şekil 1.6'da mineral dönüşümleri gösterilmiştir [5]. Klorit bir magnezyum silikat olup klorit şistlerinde (başkalaşım kayalarından) bulunur. Kloritlerin yaprakçıkları dört tabakalı yapıda olduğundan su alıp şişmezler ve sayede iç yüzey kısımları genişleyemez. Klorit mineralinin tabakasındaki tet/okt/tet/okt yapısı bozulduğunda yaprakçıklar su alıp şişebilmektedirler [2].



Şekil 1.6. Mikanın illite, illitten vermicüllit ve montmorillonite dönüşmesi [5]

1.1.4. Killerin özellikleri

Killerin başlıca dört özelliği bulunmaktadır. Bunlar; kohezyon, plastisite, rötre ve renktir.

Kohezyon özelliği kil malzemesinin kuruduktan sonra verilmiş son şekli koruma potansiyelidir. Kilin kohezyon özelliğine sahip olabilmesi için mutlaka su ile etkileşime girmelidir. Çünkü kil diğer sıvılarla kohezyon kazanamaz. Şekil olarak örneğin kum kil gibi şekil alamaz. Su ile temasa geçtikten sonra verilen şekli alması için kurumaya bırakıldığında çok küçük bir darbe ile dağılabilmektedir. Bunun sebebi de kumun kohezyon özelliğine sahip olmamasıdır [8].

Plastisite özelliği bütün killerde farklı potansiyelde bulunmaktadır. Bu özellik sayesinde kil malzemesine belirli miktarda su katıldığında kilin şekil alma özelliği ve işlenebilirliği kolay olur. Ancak kumun kil gibi su ile karıştırıldığında plastisite özelliği kazanma durumu yoktur. Kohezyon özelliğinde de olduğu gibi kil malzemesi su dışında diğer hiçbir sıvıyla plastisite özelliğini kazanamaz [8].

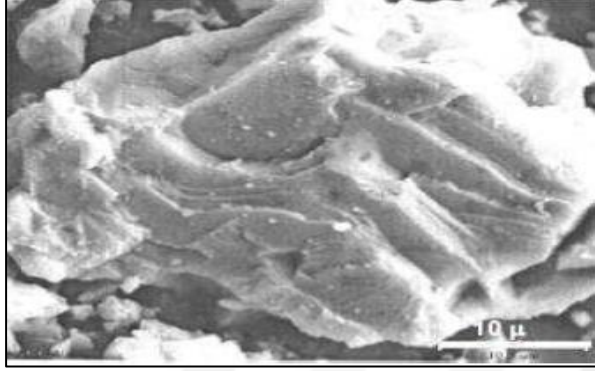
Rötre özelliğinde kile su katıp şekil verildikten sonra kurumaya bırakıldığında aldığı şeklin boyutlarında küçülme olmaktadır. Yani su katılan kil malzemesinde hacimce küçülme gerçekleşmektedir. Ayrıca kilin rötre özelliği kuruduğu zaman da devam etmektedir ve rötre kurduğunda plastisite özelliğine bağlı olarak gerçekleşir [8].

Son olarak renk özelliği sayesinde killer kolaylıkla ayırt edilebilir. Killer doğal halde renklenmiş bulunmaktadır. Kilin beyaz haline kaolin denir ve bu doğada saf halde bulunan killere denir. Bunun dışında killer mavimsi, sarı, pembe, kahverengi, yeşil vb. renklerde bulunabilir. Kilin pişmeden önceki rengiyle aynı olması beklenmez. Çünkü yapısında oksit bulunan malzemeler sıcaklık derecelerinde renk değiştirmektedir. Killerin rengi içerisindeki maddeler hakkında bilgi verir [8].

1.2. Kireç

Kireç, hammaddesi olarak bilinen kireç taşının yüksek sıcaklıklarda(900-1000°C) pişirilmesi sonucunda elde edilen inorganik bir maddedir. Aynı zamanda suyla karıştırıldığında, suyun içerisinde veya havada sertleşme özelliği gösteren bağlayıcı bir maddedir. Ayrıca beyaz renkli ve kalsiyum içerikli maddedir. Yapısında kalsiyum

karbonat ve magnezyum karbonat bileşenleri bulunmakla beraber alüminyum, demir, silisyum gibi elementler de bulunmaktadır. Şekil 1.7’de kireçtaşının SEM görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Kireçtaşının SEM görüntüsü [4]

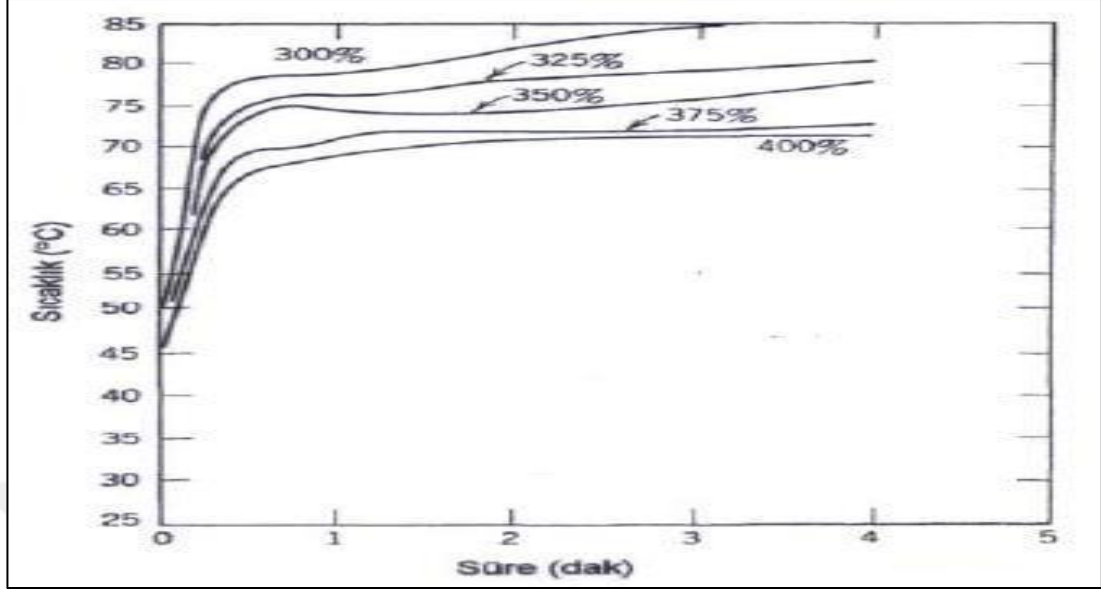
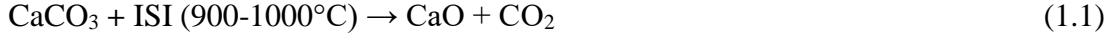
Kireç üretiminde kirecin hammaddesi olan kalker ve dolomitin boyutu ve saflık derecesi, kullanılan yakıt çeşidi ve fırının çeşidi en etkili faktörlerdir. Katkı maddeleri ile iyileştirme metodunda etkin rolü olmasıyla beraber arazide uygulanması kolay bir malzemedir. Fakat olumsuz çevre koşulları nedeniyle laboratuvaradaki kadar arazide yararı görülmemektedir. Bağlayıcı malzeme olarak bilinen en eski madde kireçtir. Kireçtaşı fırında pişirilirken pişirildiği derecelere göre farklı türde kireçler elde edilebilir.

1.2.1. Kirecin çeşitleri

Kireç, kireçtaşının özel fırınlarda pişirilmesiyle elde edilir ve kireçtaşının pişirilmesine de kalsinasyon denir. Kalsinasyon reaksiyonu sonucunda meydana gelen kireç sönmemiş kireçtir. Sönmemiş kirecin su ile reaksiyona girmesi sonucunda sönmüş kireç elde edilir.

1.2.1.1. Sönmemiş kireç

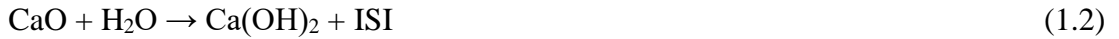
Ufaltılmış doğal kireçtaşının özel fırınlarda ve yaklaşık 1000°C’de yukardaki tepkime sonucunda sönmemiş kireç elde edilir. Bir bağlayıcı malzeme olarak meydana gelen kalsiyum oksite sönmemiş kireç denir. Birçok sektörde kullanılan kireç çeşidi, elde edildiği gibi kullanılabilir. Şekil 1.8’de Sönmemiş kireçte hidrasyon hızının su miktarıyla değişimi gösterilmiştir [5]. Sönmemiş kireç formülü Denklem (1.1)’de gösterilmiştir [2].



Şekil 1.8. Sönmemiş kireçte hidrasyon hızının su miktarıyla değişimi [5]

1.2.1.2. Sönmüş kireç

Kireçler CaO halinde kullanılmazlar. Kalsiyum oksit in su ile reaksiyona girerek söndürülmeleri gerekir. Hidrasyon olarak da bilinen bu olayda sönmemiş kirecin üzerine az miktarda su konularak yapılır. Sonrasında kireçtaşının kabardığı, çatlayarak dağıldığı görülmektedir. Sönmemiş kireç yani CaO'nun su ile tepkimeye sokulmasıyla ortaya çıkan kalsiyum hidroksit yani Ca(OH)₂'ye sönmüş kireç denilmektedir. Reaksiyonda suya ihtiyaç genelde kireç oranının 1/3 kadardır. Sönmüş kireç formülü Denklem (1.2)'de gösterilmiştir [4].



1.2.2. Kireç kullanımının avantajları

Kireç kullanımının farklı alanlarda avantajları aşağıda gösterilmektedir [5];

- Birçok kimyasal prosesin (nötralizasyon, absorpsiyon, kostikleştirme gibi) ana girdisi olması,
- Kimyasallarla çabuk reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırması,
- Pahalı kimyasalların geri kazanılmasındaki rolü,

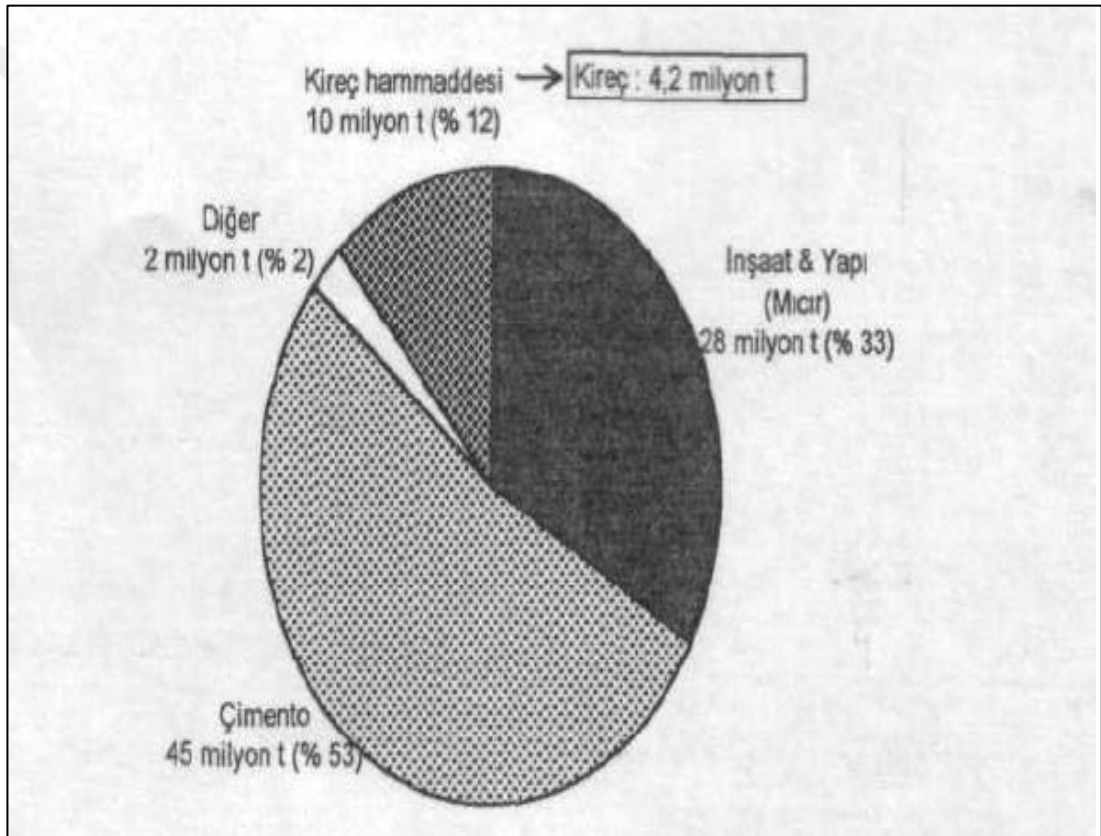
- Organik canlılar için besi maddesi olması,
- Ucuzluğu ve kolay bulunması gibi nedenler, bu malzemenin yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamıştır.

1.2.3. Kirecin kullanım alanları

- Alüminyum, krom ve manganın elde edilmesinde,
- Bazı metallerin(çinko, altın, kükürt, gümüş) ayrıştırılmasında,
- Çöplerin ıslahında ve çevre kirliliğinin önlenmesinde,
- Kimyasalların içerdiği yerlerin ve killi suların tekrar kazanılmasında,
- Harç ve sıvada bağlacı, tuğla ve gaz betonu üretiminde,
- Zemin stabilizasyonunda ve yolların dayanıklılığının artmasında,
- Zemin ve yol inşaatlarında katkı maddesi olarak,
- Demir-çelik endüstri dışındaki metal endüstrisinde bazı metallerin(nikel, bakır) saflaştırılmasında,
- Bakır metalindeki safsızlıkların giderilmesinde,
- Yapı malzemeleri ve kağıt endüstrisinde,
- Toprakların pH dengeleyicisinde,
- Atık suların arıtılmasında ve çevredeki zehirli gazların filtrelenmesinde vb. birçok alanda kullanılmaktadır.

Kirecin kullanımına bakıldığında birçok ülkede inşaat ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Kireç kullanımının inşaat sektöründeki oranı yaklaşık %50-60 civarındadır. Ulaşım yapılarında yol güvenliğinin sağlanması, kullanılan malzeme ve tercih edilen teknikler kadar zemininin stabilize olmasıyla da direkt olarak ilgilidir. Ulaşımında üst yapıların temelini zeminler oluşturur ve bu zeminler yolda oluşacak trafik yükleri gibi bütün gerilmelere karşı koyacak taşıma kapasitesine sahip olmalıdırlar. Karayollarında hem ekonomik olarak hem de emniyet açısından en iyi şekilde faydalanmak isteniyorsa iklim şartları ve olumsuz çevre koşulları zemini etkilememeli, farklı nedenlerden dolayı ilave gerilmeler oluşmamalı ve zeminin özelliklerini değiştirecek faktörler önlenmelidir. Kaplamalar bu olumsuz etkilerden korunmalıdır [5].

Ulaşım yapılarının en önemli kısmı zeminler elverişsiz oldukları durumlarda farklı çözüm önerileri sunulmaktadır. Bu önerilerden ilki elverişli olmayan zemini kaldırıp yerine yeni zeminden dolgu yapmaktır. Daha önce de belirttiğimiz gibi bu yöntem maliyet ve uygulanabilirlik açısından külfetli olmaktadır. Diğer öneri ise zeminin olumsuz yönünü kabul etmektir. Bu yöntem de uzun süre için bakımı konusunda maliyet sıkıntısı çıkarabilmektedir. Son olarak da zemin iyileştirme yöntemi önerilebilmektedir. Bu yöntem diğerlerine göre en uygun çözümdür. Katkı maddesi ile zemin stabilizasyon yönteminde ey yaygın kullanılanı kireçtir. Şekil 1.9'da Türkiye'de kireçtaşı kullanımını gösterilmektedir [5].



Şekil 1.9. Türkiye'de kireçtaşı kullanımı

1.3. Zemin Stabilizasyonu

Günümüzdeki yapılara bakıldığında üst yapıdan gelen yüklerin artması ve dış etkenlerin de etkisi göz önünde bulundurulsa zeminin mühendislik özellikleri, inşaat sahasında temellerin yapılaşmaya müsait olmadığı görülmektedir. Mühendislik özellikleri elverişli olmayan zeminlerin, taşıma gücünü arttırmak ve artırılan direncin her türlü hava koşullarında zararlı etkilere karşı dayanacak hale gelmesi için katkı

maddeleriyle karıştırılarak kararlılığı artırılması durumuna stabilizasyon denir. Özellikle yumuşak zemin olarak belirtilen killi zeminler, elverişsiz mühendislik özelliklerine sahiptirler ve buna benzer zeminlerin mukavemetini arttırmak, zeminin stabilizesini muhafaza etmek amacıyla farklı işlemlere tabi tutulmasına zemin stabilizasyonu denir.

Ülkemizde de zemini stabil duruma getirmek için bir çok stabilizasyon metodu uygulanmaktadır ve kireç en çok tercih edilen mekanik stabilizasyon metodudur. Mekanik stabilizasyonun uygulanması zor olan yerlerde kimyasal stabilizasyon metodu uygulanmaktadır. Ülkemizde çimento ve kireç miktarını fazla olması nedeniyle kireç ve çimento katkılı zemin stabilizasyonu, başta karayolları olmak üzere birçok yerde uygulanmaktadır.

Mühendislik özellikleri elverişli olmayan zeminlerin farklı stabilizasyon yöntemleri ile iyileştirilmesi mümkündür. Zemin stabilizasyonunda asıl amaç zeminin boşluk oranının, çeşitli karışımlar kullanılarak doldurulmasıdır. Zemin stabilizasyon yöntemlerinin başlıca amaçlarını şu şekilde belirtebiliriz [9];

- Taşıma kapasitesi düşük zeminin kapasitesini arttırmak,
- Zeminin deformasyonu azaltmak,
- Konsolidasyonu hızlandırmak,
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini arttırmak,
- Kayma mukavemetini arttırmak,
- Doğal afetler gibi dış etkenlere karşı önlem almak,
- Geçirimliliği azaltmak,
- Zeminin sıvılaşma riskini azaltmak,
- İklim ve çevre koşullarının olumsuz etkisini azaltmak,
- Boşluk suyu basıncını azaltmaktır,
- Dayanımı arttırmak,
- Boşluk oranlarını önemli ölçüde azaltmak.

Stabilizasyon yirminci yüzyılın başlarından itibaren yapılan bir mühendislik olayıdır. Özellikle son yıllarda sağlam zeminlerin azalmasıyla beraber çokça tercih edilen bir yöntemdir [9].

Zeminin cinsi(mühendislik özellikleri),tabakanın derinliği, zeminin temel probleminden olan maliyet ve uygulanabilirlik gibi faktörler zemine uygulanacak stabilizasyon yöntemini değiştirebilmektedir;

- Uygulama açısından zemin iyileştirme yöntemleri başlıca üç ana grupta toplanabilir
- Geçici iyileştirme yöntemleri(inşaat aşamasında),
- Malzeme katkısı olmadan uygulanan kalıcı iyileştirme yöntemleri,
- Malzeme katkısıyla uygulanan kalıcı iyileştirme yöntemleri.

1.4. Zemin Stabilizasyon Yöntemleri

İnsan nüfusundaki artış ve buna paralel olarak yapılaşma ihtiyacının artmasına bağlı olarak daha büyük yapıların yapılması yüklerin artmasına sebep olmuştur. Bu durumda problemlili zeminlerin inşası zorunlu hale gelmiştir. Zeminin üzerindeki yapıyı taşıyamayacak kapasitede olmaması durumunda yapabileceğimiz elverişsiz zeminini kabul edip devam etmek, inşaat sahası değiştirmek, problemlili zemini kaldırıp elverişli zeminle değiştirmek ya da katkı maddeleri ilave ederek zeminin ıslahını sağlamaktır. İlk üç yöntem hem teknolojik hem de ekonomik nedenlerden dolayı çoğu zaman uygun görülmemiştir. Özellikle son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle beraber zeminler iyileştirilerek, zeminin dayanımı artmakta, zeminlerdeki oturma problemleri ortadan kalkmakta ve deprem sırasında sınılaşma potansiyeline sahip zeminler sağlanmaktadır [10].

Zemin iyileştirmede kullanılacak birçok yöntem bulunmaktadır. Her yöntem bir özel koşula bağlı olarak uygulanmaktadır. Bu özel koşulları şu şekilde sıralayabiliriz [11];

- Ortamın türü: kil, toprak, çamur, tortul vb.
- Yapının türü ve yüklerin dağılımı
- İyileştirme uygulanacak alanın geometrik özellikleri
- Zeminin mühendislik özellikleri
- İşçi ve özel aletlerin varlığı
- Çevre şartları(erozyon, atık kullanımı)
- Ekonomik durum

Zemin stabilizasyonunda, mekanik ve kimyasal olmak üzere iki yöntem vardır. Mekanik stabilizasyon; zemine herhangi bir katkı maddesi (çimento, kireç, bitüm, reçine vb.) karıştırmadan ve zemin kitesinde herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşturmada sıkıştırmak (kompaksiyon), başka zeminlerle karıştırılarak uygun bir dane dağılımını elde etmek için uygulanan bir stabilizasyon yöntemidir.

Kimyasal stabilizasyon ise zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla zemin herhangi bir katkı maddesi ile karıştırılarak kitesi içerisinde oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda zeminin amaca uygun hale getirilmesidir [12].

Yüzeysel zemin iyileştirmede kullanılan yöntemler şu şekilde sıralanabilir [11];

Yüzeysel Stabilizasyonu;

1. Katkısız İyileştirme;

- Kompaksiyon
- Mekanik iyileştirme
- Drenaj

2. Katkılı İyileştirme;

- Kireç
- Çimento
- Bitüm
- Uçucu kül, jips vb.

Zeminler sınıflarına ve diğer birçok özelliklerine göre farklı bağlayıcılarla iyileştirilebilir. Stabilizasyon tipi seçilirken zeminin granülometrisine ve plasite indisine bakılır. Zeminin problem gösteren özelliği belirlendikten sonra uygun stabilizasyon yöntemine karar verilir. Böylece zeminin olumsuz yönleri iyileştirilmiş bulunmaktadır. Zemin cinsine göre farklı amaçlar için uygulanan stabilizasyonu metotları Tablo 1.2'de gösterilmiştir [12].

Tablo 1.2. Stabilizasyon metotları [12]

Amaç	Zemin cinsi	Stabilizasyon metodu
Yük taşıma ve deformasyon direnci arttırmak	İnce granüller	Asfalt, çimento, mekanik karıştırma, kompaksiyon
	Kaba granüller	Asfalt, çimento, mekanik karıştırma, kompaksiyon
	Düşük PI killer	Kompaksiyon, çimento, kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Don duyarlılığını azaltmak	İnce granüller	Çimento, asfalt, uçucu kül
	Düşük PI killer	Çimento, kireç
Su geçirimsizliği	Düşük PI killer	Çimento, asfalt, kireç
Kabarma büzülme kontrolü	Düşük PI killer	Çimento, kompaksiyon kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Esnekliği azaltmak	Yüksek PI killer	Kireç
	Elastik kil veya siltler	Çimento

Stabilizasyon metotlarının uygulanabilirlik durumu önceden ayrıntılı bir şekilde araştırılmalıdır. İyileştirme yöntemlerinin zemin cinsi ve özellikleri ile bağlantılı olduğu göz önünde tutulmalıdır. Özellikle zeminin cinsine ve yapılacak yapıların etki edeceği zeminlerde meydana getireceği gerilmelere uygun stabilizasyon metodu seçmek ekonomi, teknoloji ve zaman açısından büyük önem taşımaktadır [10].

Tablo 1.3'te görüldüğü gibi zeminin dane çapı da olarak nitelendireceğimiz zeminin içerdiği bileşenler ile stabilizasyon arasında önemli bir bağ vardır. Kum için hedeflenen amaçlar kil ve siltlerde aynı olmayabilir. Ayrıca uygulanan tekniklerde farklılık gözlemlenmektedir. Çünkü aynı teknikler aynı başarıyı sağlamaz. Bunun

temel nedeni kil ve siltlerde yüzeysel kuvvetler önemli faktör olmakla birlikte killerin düşük permabiliteye de sahip olmasıdır.

Tablo 1.3. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları [12]

Zemin içeriği	Tavsiye edilen stabilizasyon	Amaç
Kum	Mekanik stabilizasyon Çimento Asfalt	-İnce plastik olmayan malzeme karıştırarak stabiliteyi arttırmak -mukavemeti arttırmak -kohezyonu sağlamak
Silt	Mekanik ve kimyasal stabilizasyon	-Zemin özelliklerini iyileştirmek
Killer; -aolinler -kaolin -ilit -montmorillenit	Kireç veya kireç- uçucu kül karışımı Kum ile mekanik stabilizasyon Çimento Kireç Çimento Kireç	-mukavemeti arttırmak -stabiliteyi arttırmak -kısa süreli mukavemeti arttırmak -işlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak -kısa süreli mukavemet artışı -işlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak -işlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak

1.4.1. Katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonu

Mekanik stabilizasyonun uygulanmadığı veya yeterli olmadığı durumlarda zeminin içine değişik katkı malzemeleri katarak bazı fiziksel özelliklerini değiştirmek ve mühendislik özelliklerinin de belirli özelliklerini iyileştirmek için kullanılan alternatif iyileştirme metoduna kimyasal stabilizasyon (katkı maddeleri ile stabilizasyon) denir [13].

Kimyasal stabilizasyon da zemine katkı maddesi eklenerek zeminin özelliklerinin amaca uygun hale getirilmesidir. Daha önce birçok katkı maddesi veya bileşimler zeminin iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Yapılan uygulamalar sonrasında kazanılan

deneyimler, sayısı çok fazla olan maddelerden yalnızca birkaçının sürekli uygulanabilir olduğu göstermektedir. Maliyet ve gereksinime bağlı olarak kolayca bulunabilmeyi göz önünde bulundurursak yaygın olarak kullanılan katkı malzemeleri şunlardır; kireç, çimento, asfalt, uçucu kül, bitüm, reçine, polimer vb.

Zeminler farklı kil mineralleri içerdiği için doğru katkı maddesini seçmek önemlidir. Bunun için dikkate alınması gereken faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz [11];

- Seçilen katkı maddesi zemine kolayca nüfuz etmelidir. (kilde yüksek nem içeriği ve yüksek plastiklik bunu engeller)
- İyileştirme için seçilen katkı maddesi zemine düzgün şekilde eklenmelidir.
- Tüm iyileştirme uygulamaları ekonomik olmalıdır.
- İyileştirme için seçilen katkı maddesi miktarı maliyet açısından uygun olmalıdır.
- İyileştirme için kullanılacak katkı maddesi dış faktörlerden en az düzeyde etkilenmelidir.
- Kür zamanı faktörü dikkate alınmalıdır.
- Katkı maddesi zemine eşit şekilde ilave edilmelidir
- İyileştirilecek kilin minerolojik yapısındaki mineral oranlarına bakılmalıdır.

Ayrıca iyileştirmede kullanılacak katkı maddesi seçilirken dikkate alınması gereken hususlar şunlardır [14];

- İyileştirmenin amacı,
- Zeminin hangi mühendislik özelliğinin iyileştireceği,
- Özelliklerinin amaca uygun hale getirilecek olan zeminin cinsi,
- Maliyet ve uygulanabilirlik,
- Zeminden beklenen mukavemet ve deformasyon,
- Seçilecek maddenin işlenebilirliği.

Zemin iyileştirmede temel amaçlar zeminin mukavemetini ya da dayanımını arttırmak, plastisite indisini düşürmek, deformasyonları azaltmak, su geçirgenliği azaltmak, şişmeyi azaltmak ve sıkışabilirliğini azaltmaktır. Genel olarak kireç stabilizasyonu ve uçucu kül katkısı zeminin plastisite indisinde düşüş oluşturarak mukavemet artışına katkı sağlamaktadır. Çimentonun ise zeminin daneleri arasındaki boşlukların azalmasını sağlayarak mukavemet artışına katkı yapmaktadır [12].

1.4.1.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu

Kireç bilinen en eski malzemedir. Romalılar ve Çinliler tarafından yol yapımı uygulamalarında çokça kullanılmıştır. Aynı zamanda yaygın olarak en çok kullanılan malzemedir. Kireç stabilizasyonu daha yaygın olarak killi zemin olan yol inşaatlarında kullanılmaktadır [13].

Killi zeminlere kireç ilavesi ile birlikte kimyasal reaksiyon gerçekleşir. Killi bir zemine kirecin katılmasıyla kireçteki iki değerli kalsiyum iyonları ile kildeki tek değerli katyonların yer değiştirmesi olayına katyon değişimi denir. Reaksiyonların bazıları kısa süre içerisinde başlar. Puzzolonik reaksiyon gibileri ise uygun sıcaklıkta ve su muhtevasında uzun bir süre devam etmektedir. Katyon değişimi sonrasında çökmeyle kil parçacıkları birbirine doğru yönelmektedir. Kil minerallerinin kirece yapışmasıyla kilin yapısı değişir ve daha büyük parçacık haline gelerek killi zeminin yapısında değişiklikler meydana gelir. Kireçle iyileştirmede killi zemin suyu emme özelliğini kaybettiği için sertleşerek plastik kıvamdan katı kıvamına geçer. Kimyasal reaksiyonlar nemlilik ve sıcaklık gibi çevre koşullarının etkisinde zamana bağlı olarak ilerlerler. Bu sayede zemine katılan kireç, zeminin mukavemet değerini ve elastisite modülünü artırarak dayanıklılığın artırmasını sağlamaktadır [12,15].

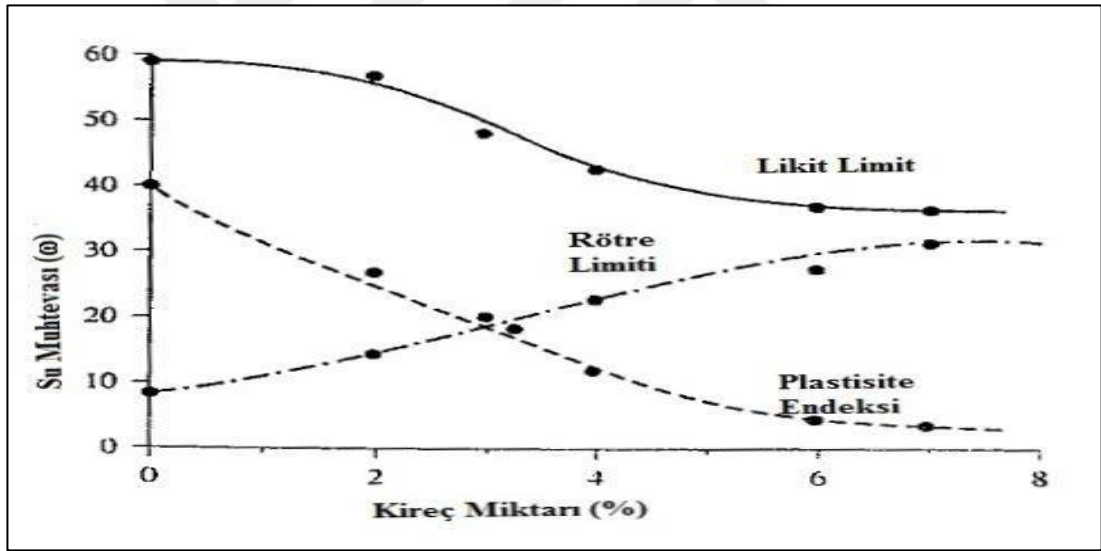
Puzzolonik reaksiyonlar killi zeminin mikro yapısında çeşitli değişikliklere sebep olmuştur. Bu reaksiyonlar sonucunda zeminde görülen değişiklikler şunlardır: Likit limit azalır, plastik limit artar, plastisite indisi azalır, elastisite modülü ve dayanıklılık artar, zeminin mukavemeti ve taşıma kapasitesi artar, işlenebilirlik artar. Zeminde organik madde bulunması puzzolonik reaksiyonları etkilemez ve yaklaşık %2'lik kireç katkısıyla organik malzemenin temel değişim kapasitesi doyurulabilir. Kireçle iyileştirme için hidrate kireç (sönmüş kireç, Ca(OH)_2 yani kalsiyum hidroksit) kullanılmaktadır. Sönmemiş kireç (CaO) ise yakıcı ve tehlikeli olması nedeniyle çoğunlukla kullanılmamaktadır [11,13].

Kara yolları şartnamesine göre iyileştirmede kullanılacak sönmüş ve sönmemiş kirecin özellikleri Tablo 1.4'te verilmiştir. Karayolları şartnamesine göre kireç stabilizasyonunda kullanılacak zeminin; CBR değeri >10 , serbest basınç mukavemeti (q_u) $> 5 \text{ kg/cm}^2$, plastisite indisi < 10 olmalıdır. Stabilizasyon yapılacak zeminin

içindeki kireç oranının artmasıyla zemin parametrelerindeki değişimler Şekil 1.10'da gösterilmektedir [12].

Tablo 1.4. Kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik(TS EN 459-2)	Sönmemiş kireç	Sönmüş kireç
CO ₂ , %	<7	<7
Toplam (CO ₂ + MgO), %	>80	>80
SO ₃ %	<2	<2
MgO, %	<10	<10
SOI ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +SO ₃ , %	<5	<5
Ağırlıkça elekte kalan, %		0,09mm<7 0,02mm<2



Şekil 1.10. Zemin parametrelerinin kireç oranı ile değişimi [1]

Kireç oranının %3'e kadar zeminin çalışabilirliğine ve mühendislik özelliklerinin değişimine etkisi şekilde görülmektedir.

Kireç genel olarak killi zeminlerde uygulanmaktadır. Kireç; orta, ince ve çok ince daneli zeminlerle reaksiyona girerek mukavemetin artmasına, plastisite indisinin azalmasına, çalışabilirliğin artmasına ve kabarma özelliğın azalmasına neden olmaktadır. Zemin sınıfı CH, CL, MH, ML, ML-CL, SC, SM-SC, SM, GC, GM-GC,

GM olan ve silt, kil içeren ince zeminler kireçle stabilize edilerek iyileştirme yapılması mümkündür [12].

Kireç stabilizasyonunda genellikle önerilen kireç oranı %5-10 aralığıdır. Bu stabilizasyonda genel olarak amaç; plastisite indisini azaltmak, daneler arasında boşlukları doldurmak, mukavemeti ve dayanıklılığı arttırmak ve şişme potansiyelini azaltmak olduğundan kohezyonlu zeminlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca zemin iyileştirmede zeminin cinsine göre kullanılacak kireç oranı Tablo 1.5'te belirtilmiştir.

Tablo 1.5. Zemin cinsine göre yaklaşık kireç miktarı [12]

Zemin cinsi	Kuru zemin ağırlıkça yüzdesi
İyi derecelenmiş killi çakıl	3
Kumlu kil	5
Kumlar	Tavsiye edilmez
Siltli kil	2-4
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10
Organik zeminler	Tavsiye edilmez

Kireç stabilizasyon sonucunda zeminde kısa dönemde; plastik limit, su muhtevasında, CBR ve mukavemet değerlerinde artışlar olmaktadır. Ayrıca likit limit, plastisite indisi, proktor yoğunlukları da düşmektedir. Uzun dönemde ise; serbest basınç mukavemet değerlerinde, çekme gerilmelerinde, şişmeye karşı stabilitede ve farklı çevre etkilerine karşı dirençte artışlar olmaktadır. CBR değerlerinde de kısa döneme kıyasla daha da artış gözlenmektedir [12].

Uygulama bakımından kireç stabilizasyonu oldukça kolay uygulanan yöntemlerden biridir. Arazi uygulamasından önce laboratuvarında uygun karışım oranları ve derinlik belirlenir. Stabilizasyonda önce mevcut zemin gevşetilir. Sonra kireç zemine

yüzeysel serilir. Ardından çeşitli iş makineleriyle killi zemin ve kireç karıştırılır. Sulama yapıldıktan sonra zemin silindir ile sıkıştırılır.

Kireç stabilizasyonlarında kimyasal reaksiyonlar sonucunda killi malzemenin mikro yapısı değişmekte ve tekrar eski haline gelememektedir. Kireç stabilizasyonu diğer zeminlere oranla killi zeminlerde çok daha etkili olmaktadır. Bu sebeple kireç ile iyileştirmenin etkili olabilmesi için zemine bir miktar kil eklenmelidir. Zeminin organik olma oranı ne kadar artarsa mukavemeti o derece azalma göstereceği unutulmamalıdır. Kireç stabilizasyonu diğer iyileştirme yöntemlerine kıyasen çok daha düşük maliyetlerle uygulanan bir yöntemdir. Bu nedenle kireç stabilizasyonu yol ve benzeri yapılarda en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Ayrıca elde edilen fayda ve ekonomik kazanç beraber göz önünde bulundurulmaktadır. Düşük maliyetlerle kolayca uygulanan bir yöntem olduğundan kısa vadede çok tercih edilmektedir. Kısa vadede gereksiz kazılar engellendiği için ve uzun vadede ise fazladan bakım maliyetinin düşürülmesinden dolayı kireç stabilizasyonu daha etkin olarak kullanılmaktadır.

1.4.1.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu

Çimento ile zemin stabilizasyonu son yıllarda kireç ile zemin stabilizasyonu gibi yaygın kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Mekanik iyileştirmenin uygulanması imkânsız durumlarda mevcut zemin çimento ile karıştırılarak iyileştirilebilir. Çimento su ile reaksiyona girdiğinde sertleşen bir maddedir. Çimento özellikle ulaşım yapılarında kireç gibi yaygın kullanılan malzemedir. Hareketli yüklerin yüksek olduğu demiryolları, karayolları ve hava alanı pistlerinde çimento ile zemin stabilizasyonu en çok tercih edilen yöntem olarak bilinmektedir [1,11].

Çimento ile iyileştirmede, zemine kuru birim hacim ağırlığının % 5-15'i kadar çimento katıp karıştırılır. İyileştirmenin amacına göre kompaksiyon uygulanır. Genellikle portland çimentosu kullanılır. Organik zeminler hariç diğer zeminler için uygulanabilir bir yöntemdir. İlave edilecek çimento oranını belirlemek için başlangıçtaki deneylerin sıklıkla yapılması gereklidir. Uygun miktarı belirlemek için yapılan deneyler optimum su muhtevasını ve dayanıklılığı belirlemektedir [6]. Çimento ile iyileştirme yapılan zeminlerde hacimde bir artış gözlemlenmekte ve çatlaklar oluşmaktadır. Genellikle plastisite indisi 30'dan az olan zeminlerde, 200

nolu elekten geçen kısım %10-35, 4 nolu elekten geçen %55 ve yukarısı, 10 nolu elekten geçen %37 ve 2,5 cm den daha büyük danesi olmayan zeminler, çimento ile iyileştirme için çok uygun olmaktadır [11].

Düşük plastisiteye sahip killi zeminler ve granüler zeminler çimento ile stabilizasyon için en uygun zeminlerdir. Ayrıca daha çok kalsiyum minerali içeren zeminler bu stabilizasyon için uygundur. Killi zeminlerde çimento kullanımı plastisite indisini, mukavemeti, işlenebilirliği artırır ve likit limiti düşürür. Zemin ile karıştırılması gereken zemin tipine göre kullanılacak çimento oranları Tablo 1.6'da gösterilmektedir [1].

Tablo 1.6. Zemin tiplerine göre optimum çimento oranları [1]

Zemin	Sınıflandırılması	
AASHTO	Birleşik Zemin Sınıflandırılması	Hacimsel Oran (%)
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

Arazide uygulanması kireç stabilizasyonundaki gibi oldukça kolay uygulanan bir yöntemdir ve kireç stabilizasyonundaki ile aynı prosedür uygulanır. Mevcut zemin istenilen derinliğe kadar gevşetilir ve laboratuvarında belirlenen oranda çimento katılarak karıştırılır. Ayrıca belirlenen optimum su miktarı da karışıma eklenir. Zeminin karışımı tam olarak gerçekleştikten sonra gerekli iş makinalarıyla yerleştirilir ve silindir ile sıkıştırılır [1].

Çimento ile zemin stabilizasyonunda, kireçte olduğu gibi ekonomik açıdan büyük tasarruf sağlanmaktadır. Öncelikle dolgu kalınlığı azalacağı için ek kazı ve dolgu masraflarının önüne geçilmiş olmaktadır. Bu ayrıca taşıma gücünü ve mukavemeti artırır. Çimento stabilizasyonu ile mevcut zayıf zemini kaldırıp yerine sağlam zemin

yerleştirme işlemi önüne geçildiğinden dolayı ciddi bir ekonomik katkı sağlanmış olmaktadır [1].

1.4.1.3. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu

Türkiye’de tüm termik santrallerde yıllık toplam 55 milyon ton kömür yakılmaktadır. Kömürler toz halinde yakıldıktan sonra filtrelerde toplanan, puzolanik özellik gösteren ince toz halindeki malzeme uçucu nitelikte olduğundan uçucu kül olarak adlandırılır. Termik santrallerde yakılan kömürden geriye kalan uçucu kül oranı %20’dir. Termik santrallerde yakıt olarak kullanılan kömürden yan ürün olarak cüruf ve kül farklı oranlarda çıkmaktadır. Yakılan kömürden %15 civarında arta kalan külün büyük bir kısmını ince taneli kül oluşturmaktadır. Filtrelerde tutulan bu ince taneli kül uçucu kül olarak bilinmektedir. Atık kül olarak da bilinen uçucu kül yıllık 13 milyon ton kadar üretilmektedir. Atık külün yaklaşık 25 milyon ton üretildiğini göz önünde bulundurursak, uçucu külün depolanmasının veya atılmasının çevreye verdiği zararlar ortaya çıkmaktadır [4,19].

Türkiye’de bulunan uçucu küllerin çoğunluğu kireçli uçucu kül sınıfına girmektedir. Bu nedenle uçucu kül özelliklerinden verilen imkânlar çeşitli alanlarda; sanayide, teknikte ve inşaat alanında kullanılmaktadır. Ayrıca uçucu küllerin bu alanlarda kullanılması endüstriyel sektörde ekonomik anlamda önemli tasarruflara yol açmaktadır [20]. Çimentolaşma özelliğine sahip malzemeden yüksek miktarda ihtiyaç duyulan stabilizasyonlarda uçucu kül maliyeti önemli oranda azalttığı için en çok tercih edilen malzemedir. Genellikle taşıma gücü zayıf granüler zeminlerde uygulanır. Ayrıca kireç stabilizasyonun elverişli olmadığı zeminlerde de uçucu külün ilavesi etkili olmaktadır [12].

1.4.1.4. Bitüm ile zemin stabilizasyonu

Bitüm ile zemin stabilizasyonunda asfalt veya katran gibi maddeler kullanılmaktadır. Kireç ve çimento stabilizasyonunda kimyasal reaksiyonlar sonucu zeminin mukavemetini ve taşıma gücünü artırırken, bitümlü stabilizasyonda zeminin suyun zararlı etkilerden korunması rol oynar. Ayrıca daneleri birbirine birleştirmesindeki rolü de su ve rüzgâr erozyonuna karşı direnci arttırmaktadır. Bitümle stabilizasyon karayollarında yüzey kaplamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bitüm, asfalt vb.

petrolden elde edilen siyah, yapışkan ve sıcakken sıvı olan bir malzemedir. Kireç ve çimento gibi maddelere oranla daha az tercih edilmesinin bir sebebi de pahalı malzeme olmasıdır. Literatür taramasına bakıldığında bitüm katkısı, miktar olarak genellikle %5-10 arasında değişir [21].

Bitümlü malzemelerle yapılan zemin stabilizasyonunda asfaltın bağlayıcı rolü mevcut zeminin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kohezyonsuz zemin olarak adlandırılan granüler zeminlerde bağlayıcı etkeni, zeminin geçirimsizliğini arttırmak ve zeminin taşıma gücünü artırma rolünde etkili olmaktadır. Bu nedenle kum ve granüler zeminlerde yani ince taneli zeminlerin iyileştirilmesinde bitümlü malzemenin kullanılmasının rolü büyüktür ve iyileştirilen zeminin geçirimsizliğini sağlamaktadır. Granüler zeminlerde bitümlü malzemelerle iyileştirme yönteminin tercih edilmesi başarılı sonuçlar verdiği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca ufalanması kolay olan ve bitümde eşit şekilde karışan zeminlerde de bitümlü iyileştirme yöntemi başarılı olmaktadır [15].

2. KİREÇ STABİLİZASYONU

Kireç stabilizasyonu, mevcut zemine kireç katılarak zayıf mühendislik özelliklerinin(fiziksel ve kimyasal) değiştirilip iyileştirilmesi ve taşıma gücü potansiyelinin artırılması işlemine denir. Kireç ile zemin stabilizasyonu, bilenen en eski iyileştirme yöntemidir. Eski Roma, Yunan ve Mezopotamya'dan bugüne kadar yaygın şekilde kullanılan yöntemdir. Bu yöntem daha çok karayollarında yolların stabilitesini arttırmak, sağlam kaplama ve zemin alt temelleri yapmak için kullanılmıştır. Bunun ilk örneği de 1924 yıllarında sönmüş kireç kullanılarak karayolları stabilizasyonunda uygulanmıştır. Devam eden yıllarda araç sayısındaki artış ile trafik yükünün de artmasıyla yolların taşıma gücü kapasitesi yetersiz kalmıştır. Bu sorun kireç stabilizasyonu kullanımının artışına sebep olmuştur [22].

Kireç stabilizasyonun kullanılması, özellikle havaalanı ve karayolları yol kaplamalarının durabilite ve dayanıklılık özelliklerinin artışında önemli katkısı olmuştur. Bu sebeple kireç malzemesi daha çok ince daneli zeminler için uygulanmaktadır. Kireç stabilizasyonu killi zeminler için uygun bir yöntemdir. Kireç stabilizasyonu killi zemin iyileştirmelerinde önemli ölçüde iyileştirme yapmaktadır. İnce daneli zeminlerde mevcut zeminin plastisitesinin azalmasına ve çevre koşullarına bağlı olarak da mukavemetinin artmasına neden olur. Kireç, şişme potansiyelli plastisitesi yüksek killerde şişmeyi azaltıp çalışabilirliği arttıran bir malzemedir [23].

Kireç stabilizasyonu için genellikle kalsiyum hidroksit olarak da bilinen sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kullanılır. Ayrıca sönmemiş kireç (CaO) ve kalsiyum oranı yüksek kireçler de kullanılmaktadır. Sönmemiş kireç (CaO), yakıcı özelliğinden dolayı genelde tercih edilmemektedir. Fakat son 25-30 yıl içerisinde kullanımında artış görülmektedir. Kireç miktarı, genellikle pH deneyi ve LL, PL limit deneyleri ile belirlenmektedir. Su ile karıştırılan kirecin pH değeri 12,4 olması beklenmektedir. PL ve LL deneylerinde ise önemli düşüslere sebep olmaktadır. Kireç, kullanılacak iyileştirme amacına göre farklı oranlarda olabilmektedir [3].

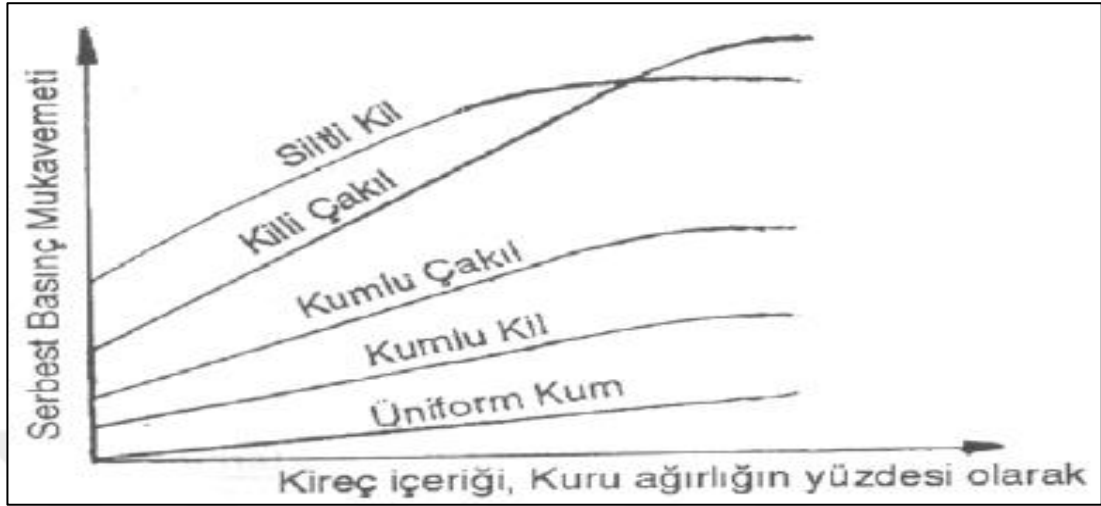
Geçici yol kaplamalarında düşük, kalıcı zeminlerde ise yüksek miktarda iyileştirme uygulanmaktadır. Literatür araştırmalarına bakıldığında bir kısım çalışmalarda zeminin iyileştirilmesinde en yüksek dayanımı kazanabilmek için katılacak kireç oranının %1 ile %3 arasında olması gerektiği savunulmaktadır. Ayrıca kireç oranında artış olması durumunda dayanımın ve mukavemetin arttığını fakat plastik limitte bir değişim olmadığını belirtilmektedir. Farklı çalışmalarda ise zemin iyileştirilmesinde kullanılacak kirecin oranının %3 ile %8 arasında olması gerektiği belirtilmektedir. 7 günlük kür sonunda serbest basınç mukavemet değeri en az 0,17 MPA olmalı ve 28 gün sonunda ise bunun 2 kat artış sağlanması beklenmektedir. Tablo 2.1’de zemin cinsine göre katılacak kireç oranları verilmiştir [2].

Tablo 2.1. Ingles ve Metcalf tarafından önerilen kireç oranları [24]

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

Plastisite indisi düşük ve plastik olmayan zeminlerin stabilizasyonunda kirecin tek başına kullanılması uygun olmamaktadır. Bu tür durumlarda kirece ilaveten başka bir katkı malzemesinin katılması gerekmektedir. Diğer katkı malzemelerinde yaygın tercih edilenler uçucu kül ve çimentodur. Çimento ve uçucu kül gibi malzemelerde alüminyum ve silisin bulunmasıyla kireç+su ile reaksiyona girdiğinde yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. Genellikle kil içermeyen ve organik zeminlerde kireç stabilizasyonu uygun değildir. Killi çakıllı zeminler de ise çimento iyileştirmesine göre daha yüksek mukavemetler elde edilmektedir. Kumlu killerde kireç stabilizasyonunun etkisi oldukça azdır. Ayrıca kireç miktarı %10’dan fazla olduğu

durumlarda mukavemet artışı durmaktadır. Şekil 2.1'de farklı tip zeminlerde kireç miktarı ile mukavemet değişimi gösterilmektedir [9].



Şekil 2.1. Farklı tip zeminlerde kireç içeriği ile mukavemet değişimi [9]

Kireç stabilizasyonun en önemli özelliğinden biri plastisite indisini (PI) düşürmektir. Ayrıca kireç stabilizasyonu mevcut zeminin birim hacim ağırlığını ve likit limitini de düşürmektedir. Zeminin plastik limitinde, su muhtevasında, dayanım ve mukavemet değerlerinde ise artış gözlenmektedir.

2.1. Kireç Türleri ve Uygulanabilirlikleri

Bu bölümde kireç stabilizasyonunda kullanılan kireç türleri ve bunların sağladığı avantajlardan bahsedilmiştir. Stabilizasyonda sıkça kullanılan kireç türleri; sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sönmemiş kireç (CaO), hidratlı kireç ve kireç bulamacıdır.

Zemin stabilizasyonunda daha çok kalsiyum oranı yüksek kireçler kullanılmaktadır. Kalsiyum oranı yüksek kireçlerde magnezyum oranı çok düşük olur. Bazen kireç yan ürün olarak bazen de tarımsal kireç şeklinde tanımlanabilmektedir. Yan ürün olarak tanımlanan kireç, genelde kirecin fırınlanmasından sonra oluşan toz halidir. Tarımsal kireç ise kimyasal aktifliği olmadığı için zemin stabilizasyonunda kullanılmamaktadır. Sönmemiş kireç (CaO), kireçtaşının kimyasal reaksiyonu sonucunda kalsiyum oksitini elde edilmesi ile gerçekleşir. Sönmemiş kireç son zamanlarda stabilizasyonda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sönmüş kirece nazaran daha ekonomiktir ve daha çok kireç oksidi içermektedir. Aynı zamanda daneleri daha

iridir ve depolanması kolay bir kireç çeşididir. İri daneleri sayesinde ince danelerin neden olduğu problemler olmaz [22].

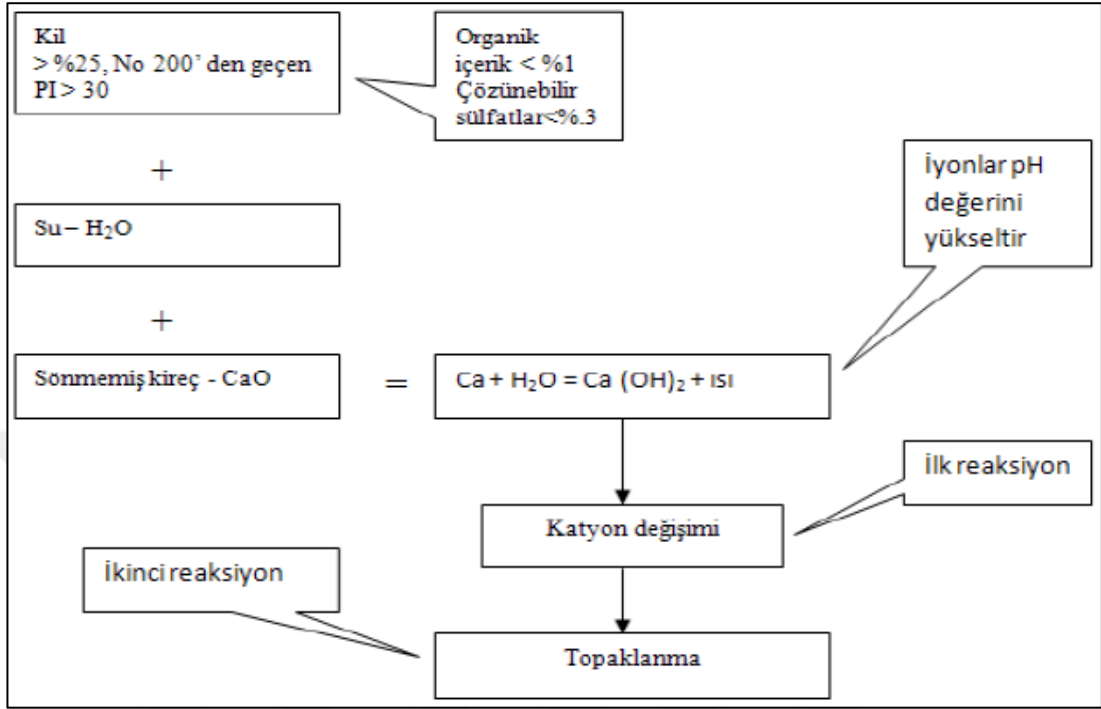
Sönmüş kirecin hidrasyon olayı ile söndürülmesi sonucunda ortaya çıkar. Daha çok kuru kil zeminlerde kullanılmaktadır. Eski zamandan beri sönmemiş kirece oranla daha çok tercih edilen bir kireç çeşididir. Ancak kuru kil zeminlerdeki etkisi sönmemiş kireçten azdır. İnce daneli olduğu için problemlere yol açar. Bu sebeple yerleşim alanlarında kullanılması uygun değildir [22].

Kireç ile zemin stabilizasyon yönteminde kullanılacak kirecin seçilmesinde birkaç etken bulunmaktadır; ilk olarak önceden yapılmış projelerdeki deneyimlere bakılarak seçilir. Bu en önemli etkidir. Ayrıca kullanılacak aletlere, stabilizasyonun uygulanacağı bölgeye ve uygulanacağı yapıya ve su kaynaklarının kullanılabilirliğine bakılarak seçilir [22].

2.2. Kireç Stabilizasyonu Mekanizması

Killi zeminler zayıf, sorunlu zeminler oldukları için hemen hemen bütün yapı tiplerinde problem oluşturmaktadırlar. Bu tür zeminlerin stabilitesinin artması şart olmaktadır. Mukavemetin de artması için killi zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi uygulanabilir yöntemdir. Kireç stabilizasyonu ile killi zeminlerde bir takım değişimler gerçekleşmektedir. Killi bir zemine kireç ilave edilmesinden sonra kireç iyonları ile kil zeminin iyonlarının yer değiştirmeleri sonucunda kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Kil zemini yüzeyindeki metal iyonları ile kireç malzemesindeki kalsiyum iyonları arasında katyon değişimi reaksiyonu oluşmaktadır. Killi zeminin kireç ile temasından sonra katyon değişimiyle birlikte karbonatlaşma ve topaklaşma reaksiyonları da başlamaktadır. Çimentolaşma ise zaman içinde gerçekleşmektedir. Uygun koşullarda çok uzun süre devam edebilmektedir. Katyon değişimi reaksiyonları kaolinit grubu killeri çok etkilememektedir. Bu yüzden katyon değişimi yetenekleri düşüktür. Fakat montmorillonit grubu killerde katyon değişiminin etkisi çok büyüktür ve bu tip killerde katyon değişim potansiyeli yüksektir [5]. Katyon değişimi ve topaklanma: Katyon değişimi reaksiyonu kireç stabilizasyonu yapılan ince daneli zeminlerde gerçekleşmektedir. Topaklanma reaksiyonu da aynı zeminlerde görülür. Bu

reaksiyonlar killi zemin ile kireç temas ettiği anda başlar. Şekil 2.2’de katyon değişimi ve topaklanma reaksiyonlarının oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Katyon değişimi ve topaklanma reaksiyonu oluşumu [5]

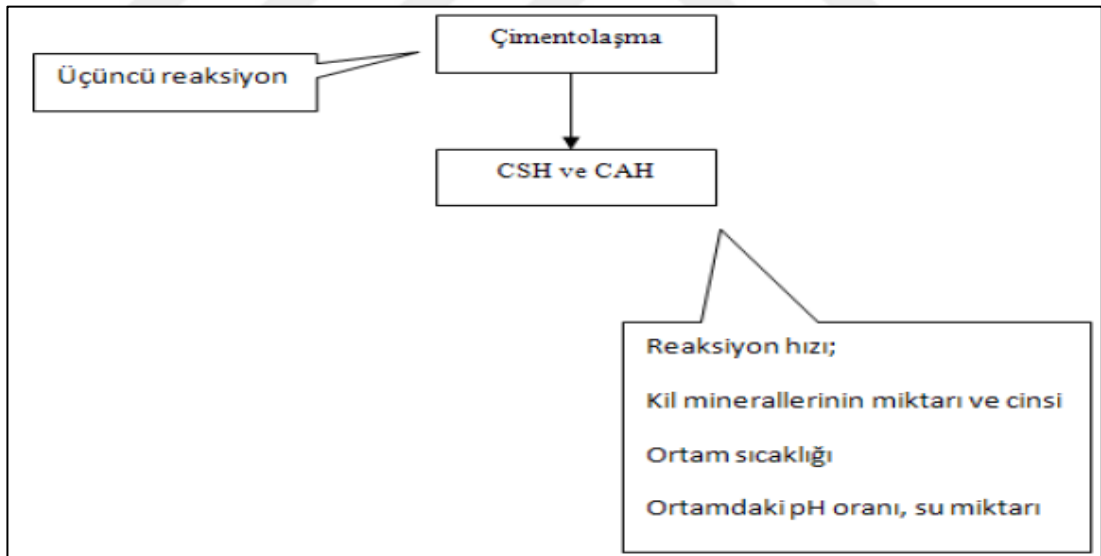
Kil mineralinde yaygın olarak kalsiyum, potasyum, magnezyum ve sodyum bulunmaktadır. Kireç malzemesinin kil zemini ile teması sonrasında kireç içerisindeki kalsiyum iyonları zemin içerisindeki zayıf katyonlarla yer değiştirmektedir. Bu katyon değişimi sonucunda kil mineralleri birbirine yaklaşır ve topaklanma oluşur. Değeri yüksek katyonlar değeri düşük katyonlarla yer değiştirir. Ayrıca katyon değişimi reaksiyonları ince kil minerallerinin kaba kil mineralleri ile çimentolaşmasını kapsar. Katyon değişimini önemli bir reaksiyon yapan en önemli sebep, zemindeki plastisite özelliklerindeki değişimin temel unsuru olmasıdır. Bu reaksiyonlarda kireç gerekli miktardan fazla eklenmemelidir. Gerektiğinden fazla eklenmesi halinde yumak halinde çimento bileşimleri oluşur [5].

Çimentolaşma: Çimentolaşma reaksiyonu, kireç içerisindeki kalsiyum ve zeminin içerisinde bulunan alüminat ve silis arasındaki reaksiyonla gerçekleşir. Bu reaksiyon kalsiyum-alüminat, kalsiyum-silikat veya kalsiyum-alüminat-silikat oluşturulmasıyla gelişir. Üretilen çimento yüksek mukavemet ve düşük hacimle karakterize edilir. Geçmişte bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda araştırmacılar kirecin ağırlıkça

yaklaşık %3-8 gibi küçük oranlarda eklenmesi; plastisite indisini, likit limiti, birim hacim ağırlığını ve şişme potansiyelini düşürdüğünü fakat serbest basınç mukavemet değerini, plastik limitini, dayanımını ve optimum su muhtevasını ise yükselttiğini belirlemişlerdir [2].

Kireç, su, aluminat, silis arasında gerçekleşen reaksiyonların sonucunda puzzolanik reaksiyonlar oluşur. Gerçekleşen reaksiyonlarda çimento bileşiminin içerisindeki mineraller puzzolan olarak adlandırılır. Kullanılacak puzzolan tipi ve miktarı reaksiyona girecek zemine göre değişmektedir [5].

Zemin kireç birleşiminin kabul edilebilir pH değeri 12,4 olarak belirlenmiştir. Kabul edilebilir değere ancak zemine gerekli kireç miktarı eklendiğinde çıkılabilir. Yeteri kadar su, kirecin içerisinde bulunan kalsiyumdan yeteri kadar zeminde bulunursa ve çözünürlüğü sağlayabilecek yüksek pH değeri de olursa reaksiyonlar yıllarca devam edebilmektedir. Şekil 2.3'te çimentolaşma, puzzolanik reaksiyonlar ve zemin yapısındaki değişimler gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Puzzolanik reaksiyonlar ve zemin yapısındaki değişimler [5]

Çimentolaşma reaksiyonu zemine kirecin katılmasıyla sonradan başlayan ve yavaş ilerleyen reaksiyonlardır. Çimentolaşma miktarı ise sıcaklık durumuna ve zemin içerisindeki kil minerallerin çeşidine bağlıdır.

Karbonatlaşma: Zemine kireç eklendiğinde gerçekleşen reaksiyona havadan karbondioksitin (CO_2) etki etmesiyle karbonatlaşma meydana gelir. Kireç

içerisindeki karbon hidroksit bileşimi ile karbon dioksit reaksiyonu sonucunda kalsiyum karbonat meydana gelir [5].

2.3. Kireç Stabilizasyonunda Meydana Gelen Değişimler

Kireç ile zemin stabilizasyonunda zeminde bir takım değişimler gerçekleşmektedir. Bu değişimleri kısa dönemde ve uzun dönemde meydana gelen değişimler şeklinde ayırabiliriz. Kısa dönemde meydana gelen değişimler: Plastik limit değeri artar. Serbest basınç mukavemet değerleri artar. CBR değerleri artar. Optimum su muhtevaları artar. Proktor eğrisinde düzleşmektedir. Plastisite indisi değeri azalır. Likit limit değeri azalma olmaktadır. Uzun dönemde meydana gelen değişimler: Mukavemet değerleri artar. CBR değerleri kısa döneme göre daha fazla artar. Kayma mukavemet değeri artar. Şişme ve büzölmeye karşı direnç artar. Don etkisine karşı dayanım artmaktadır [18].

2.4. Kireç Stabilizasyonun Geoteknik Özelliklerindeki Değişim

2.4.1. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası

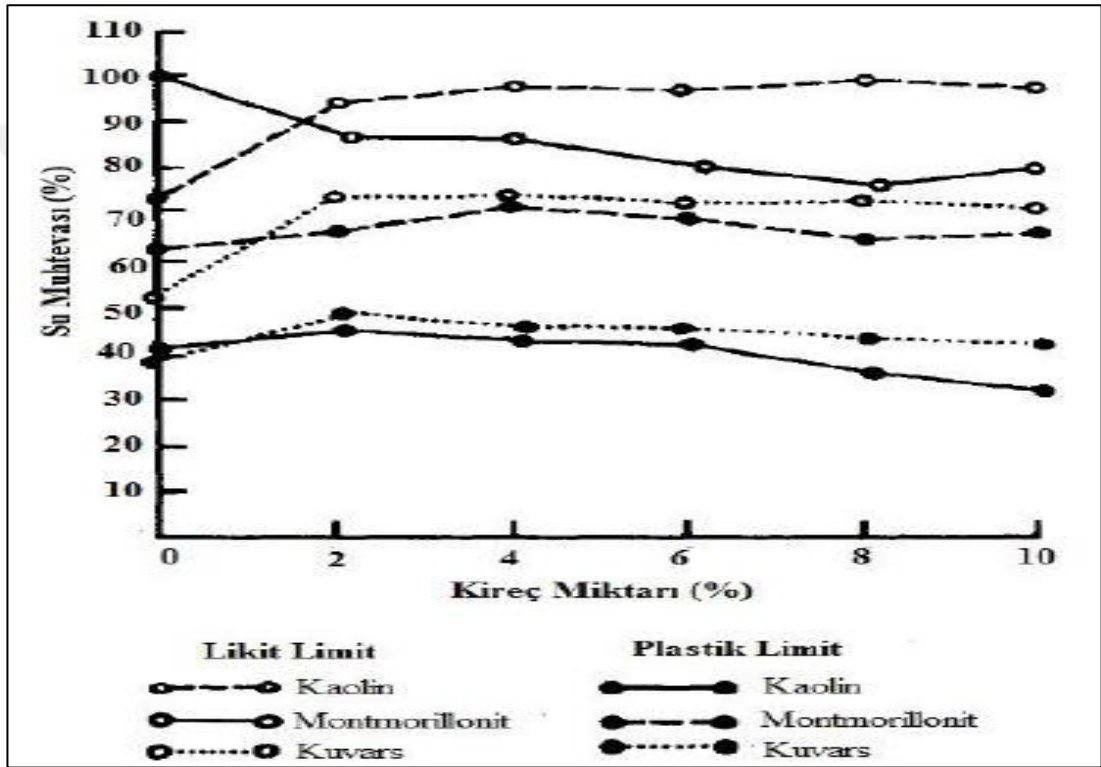
İnce daneli zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda maksimum kuru birim hacim değerlerinde azalma optimum su muhtevalarında ise bir artma görölmektedir. Zemine ilave edilen kireç ile M.K.B.H.A. değerinde düşüş olmasının nedeni oluşan çimentolaşma ürünleri zeminin sıkıştırılabilirliğinin azalmasıdır. Tablo 2.2’de İki farklı kil tipinin kompaksiyon değerleri gösterilmiştir [23].

Tablo 2.2. İki farklı kil tipinin kompaksiyon değerleri [23]

Zemin tipi	Kireç miktarı	Optimum su muhtevası	M.K.B.H.A.
Kaolin	0	29	1,40
Kaolin	6	30	1,33
Montmorillonit	0	20	1,29
Montmorillonit	4	21	1,15

2.4.2. Kıvam limitleri

Killi zeminlere kireç ilave edildiği andan itibaren kil ve kireç reaksiyona girmeye başlar. Zemine kireç eklendiği anda zeminin plastisitesi değişmektedir. Özellikle yüksek plastisiteli zeminlerde az miktarda kireç eklenmesi durumunda bile plastisite indisi düşmektedir. Aynı zamanda likit limitler de azalır, plastik limitler ise artar. Bell'in mineral tipleri farklı olan kil zeminler üzerinde farklı kireç yüzdeleri kullanarak yaptığı kıvam limitleri sonuçları Şekil 2.4'deki gibidir.



Şekil 2.4. Farklı kil tiplerinin kıvam limitleri [23]

2.4.3. Mukavemetteki değişimler

İnce daneli zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda puzzolanik reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan puzzolanlar mukavemet artışını sağlamaktadır. Killerin stabilize edilmesinde önemli miktarda mukavemet artışları görülmektedir. Killer altındaki konuda da bahsedildiği gibi bu reaksiyonların oluşması için silika ve alüminyum gereklidir. Zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda mukavemet parametresini etkileyen en önemli etken kür süresidir. Kür süreleri 7 ve 28 günlük olanların mukavemet artışları hızlı olmaktadır [22].

1940 yıllarında kireç stabilizasyonu yöntemi ile yapılan 4. Ordu Komuta Merkezi'nin yıllar içerisinde zeminindeki değişimini görebilmek için ve kireç stabilizasyonunun yolların stabilize edilmesindeki etkisini analiz edebilmek için Kelley tarafından kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Kireç stabilizasyonu yöntemi için kullanılacak kireç miktarı hakkında literatürde henüz çok bilgi bulunmadığından dolayı oran olarak %2-8 arasında alınmıştır. Kireç ile stabilize edilen zemine çok uzun bir süre sonra bakıldığında, zemin tabakalarında herhangi bir bozulma veya çökme görülmemiştir. Kireç ile stabilize edilen zeminin dayanımında önemli artışlar gözlemlenmiştir [5].

2.4.4. Permabilitedeki değişimler

Mevcut zeminin permeabilitesindeki değişimler; kil mineralleri partiküllerinin çözünmesi, suyun organik bileşenlerle yer değiştirmesi sonucunda kil malzemesinin kuruması ve reaksiyonlardaki katyon değişimi nedenlerinden kaynaklanmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda zemindeki sıvı akışının engellendiği ve bunun sonucunda kireç ile stabilize edilen zeminin permabilitesinde artış gözlemlenmiştir. Fakat başka bir çalışmada kireç katılarak hazırlanan numunelerin beklemeden dayanımları ölçülmesinden dolayı kireç ile stabilize edilen zeminin permabilitesinin düştüğü görülmüştür [2].

2.4.5. Hacimsel değişimlere karşı davranış

Kireç ile zemin stabilizasyonu hacimsel değişen zeminlerde önemli değişimlere sebep olmaktadır. Kireç ile iyileştirme özellikle şişme potansiyeli ve rötre özelliklerinin azalmasında etkili bir yöntemdir. Kalsiyum katyonun diğer katyonlarla yer değiştirmesi şişme potansiyelinin azalmasında en önemli etkidir. Ayrıca zeminin su emme miktarında azalma olması da zeminin şişme miktarında azalmalara sebep olacaktır. Bu şekilde şişme potansiyelinin azalması zeminin kireç ile stabilize edilmesine bağlanmaktadır.

Bazı çalışmalarda kireç ile stabilize edilmiş zeminin donma ve çözünme faktörleriyle karşılaşınca mukavemet değerlerindeki değişimler araştırılmıştır. Çalışmalarda kireç ile stabilize edilen zeminler soğuk hava koşullarında donmaya ardından çözünme

eylemlerine maruz kalmıştır. Bu çalışmalar neticesinde zor hava koşullarına rağmen zeminlerde herhangi bir bozulmaya rastlanmamıştır [5].

2.5. Kireç Stabilizasyonu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Kireç ile zemin stabilizasyon yöntemi bilinen en eski iyileştirme yöntemidir. Daha önce Romalılar Kral Yolu'nun yapımında kireç karıştırarak bu yöntemi uygulanmışlardır. Ayrıca Kireç ile zemin stabilizasyonu Çin Seddi yapımında da pirinç ununa kireç eklenerek uygulanan bir yöntemdir. Amerika, İtalya, Rusya gibi dünyanın birçok farklı ülkelerinde uygulanan bu yöntem bizim ülkemizde sıklıkla olmasa da örnekleri bulunmaktadır [2].

Uzun süren çalışmalar sonucunda Kavak Ankara'nın farklı iki bölgesinde ve Kırklareli bölgesinde bu yöntemle başarılı çalışmalar yapmıştır. Ankara bölgesinden birincisi olan Yukarı Yurtçu Köyü'nde 200 metrelik yolda kireç stabilizasyonu uygulanmıştır. İkinci bölgesi ise Bala-Kumru ayrımı arasında 360 metrelik karayolunda kireç stabilizasyonu uygulanmıştır. Ayrıca Kırklareli bölgesinde ise 650 metrelik yolda bu yöntem başarılı şekilde uygulanmıştır. Çalışmalar yeni yapılmakta olan bir yolda uygulanmıştır. Kavak, kireç stabilizasyonunda bentonit ve kaolin killeri kullanmıştır. Serbest basınç deneyleriyle mukavemet değerleri incelenmiştir. Değerler sonucunda killerde 6 kat ve 12 kat artışlar olduğu gözlenmiştir [2,25].

Dinçer, yüksek plastisiteli killi zemine birim hacim ağırlığına %4 ve %6,5 oranlarında kireç ekleyerek numuneler hazırlamıştır. Hazırlanan numuneler 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonrasında CBR deneyinde kullanılmıştır. Kireç stabilizasyonunda deneye tabi tutulan numunelerin sonucunda CBR değerlerinde yaklaşık %150 oranında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca zeminin kireç ile stabilize edilmesi sonucunda oturmalar ve deformasyonların azaldığı ve şişme potansiyelinde de önemli düşüşler olduğu belirlenmiştir [25].

Dinçer ve Berilgen, yüksek plastisiteli killi silt zeminlerin stabilizasyon sonucunda davranışlarını incelemiştir. Hacimce %4 ve %6,5 oranlarında kireç katarak oluşturulan zemin numuneleri, 7 gün ve 28 günlük kür süreleri sonunda CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, zemine kireç ile stabilizasyonu sonucunda, CBR değeri %11,63'den %29,75'e kadar yükseldiği ifade edilmiştir.

Zeminin kireç ile stabilizasyonu sonucunda, deformasyon özelliklerindeki değişimi göstermek amacıyla yapılan ödometre deney sonuçlarında, kireç yüzdesi arttıkça konsolidasyon oturmalarının azaldığı, şişme miktarlarında ise kayda değer azalmaların olduğu belirlenmiştir [28].

Yıldız ve arkadaşları, plastisiteleri farklı yüksek ve düşük plastisiteli iki çeşit kil zemin kullanılıp kireçle stabilizasyon yaparak, iki kil tipi için de mukavemet parametrelerindeki değişimleri gözlemişlerdir. Sonuçta, yüksek plastisiteli kil olan Aksaray kilinin serbest basınç mukavemeti 28 gün kür sonucunda yaklaşık olarak on beş kat arttığını, düşük plastisiteli kil olan Doğanhisar kilinde ise mukavemetin yirmi sekiz gün kür sonunda yaklaşık üç kat arttığını ifade etmişlerdir[28].

McCallister ve Petry (1990) yaptıkları çalışma Amerika'nın Teksas eyaletinde inceledikleri killi zemin numunelerinde kullandıkları çok az miktar kirecin stabilizasyonun getirisinde çok önemli kayıplar yarattığını ancak yeterli miktarda kirecin kullanılmasıyla optimum faydaları sağladığını gözlemişlerdir [2].

Goldberg ve Kelin (1952), Dempsey ve Thompson (1968), Thompson (1969), Little (1995) CBR ve konsolidasyon deneyleri gibi birkaç farklı deney ile kireç katkısız deney numunelerinin %8 ile %10 arasında değişen şişme potansiyellerinin, kireç stabilizasyonu ile %0,1'den daha az bir değere kadar düştüğünü ve aynı şekilde plastisite indisinde de azalmalar olduğunu göstermişlerdir. Şişme potansiyeli ve plastisite indisinde azalmalar hemen sonuç göstermiş olsa da özünde bu değerler kür süresine ve pozolanik reaksiyonlar sonucu gelişim göstermektedir [2].

Evans (1998) Queensland bölgesindeki yüksek plastisiteli siyah kil üzerinde yaptığı çalışmalara da %8 oranındaki kireç katkısı ile zeminin plastisite indisini 40'dan 8'e düşürmekle birlikte 28 günlük kür sonucunda ise serbest basınç dayanımı 0,1 MPa'dan 1,4 MPa'a çıkmıştır. 26 haftalık kür sonucunda ise bu değer 4,5 MPa'a kadar ulaşmıştır. Bu sonuç bize pozolanik reaksiyonları çok uzun bir süre boyunca dahi devam ettiğini göstermektedir [2]. Yapılan çalışmaların sonuçlarına bakılacak olursa laboratuvarında yapılan deneylerden alınan sonuçlar ile arazide yapılan deneylerde alınan sonuçlar paralellik göstermektedir. Kireçle stabilize edilen zeminlerde özellikle CBR değerlerinde keskin artışlar gözlemlenmiştir. Mukavemet değeri düşük zeminler kireç stabilizasyonu ile değerler kullanılabilir hale

getirilmiştir. Ayrıca bazı alanlarda dolguya gerek duyulmadan iyileştirme ile ekonomik olarak da kazançlar sağlanmıştır. Karayolları kaplamalarında, kireç stabilizasyonu ile kısa sürede yapılması ve zamanla artacak trafik yüklerine karşı deformasyonlarda azalma olması gibi önemli avantajlar sağlanmıştır [2].

2.6. Kireç Stabilizasyonunda Uygulanan Deneyler

Çalışmada öncelikle Yalova bölgesinden getirilen, iyileştirilecek zeminin sınıflandırmasını yapmak ve geoteknik özelliklerini belirlemek için bir takım deneyler yapılmıştır. Katkı malzemesi olarak kullanılan kireç türlerinin de optimum oranlarını belirlemek ve optimum su muhtevalarını belirlemek için de farklı deneyler yapılmıştır. Son olarak katkı numunelerinin doğal haldeki numunelere göre mukavemet değerlerindeki değişimi gözlemleyebilmek için de laboratuvar ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmalar kapsamında laboratuvar ve arazide uygulanan deneyler şunlardır;

- Su muhtevası deneyi
- Kıvam limitleri deneyi
- Yıkamalı elek analizi
- Hidrometre
- Piknometre
- pH deneyi
- Kompaksiyon deneyi
- Serbest basınç deneyi
- Yaş CBR deneyi
- Plaka yükleme deneyi

2.6.1. Yıkamalı elek analizi

Elek analizi zemin sınıflandırmasına dair en önemli deneylerden biridir. Kuru ve ıslak olmak üzere iki elek analizi vardır. Bu deneyin amacı zeminin danelerinin boyutlarını belirledikten sonra zemin sınıflandırmasını yapmaktır. Kuru elek analizi kum ve çakıl gibi iri danelilerde, ıslak elek analizi ise kil ve silt gibi ince danelilerin sınıflandırılması için uygulanır. Deneyde kullanılan elek takımı Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Elek analizi takımı

2.6.2. Kıvam limitleri deneyi

Likit limit akıcı durumdaki zeminin plastik duruma dönüştüğü andaki su muhtevasıdır. İnce deneli zeminlerde su muhtevası değerini bulabilmek için yapılan bu deneye likit limit deneyi denir. Bu deneyin uygulanması Casagrande yöntemi ile olur. Casagrande aletinin 1 cm yükseklikte bırakılarak yapılan deneyde 25 vuruşa tekabül eden değer deneyimizin likit limit değeri olmaktadır. Likit limit deneyinde kullanılan alet Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Casagrande aleti

Plastik limit, zeminin ıslak yüzeyindeki çatlak durumundaki su içeriğidir. Zeminin geçiş anındaki kıvamı plastik limit ile belirlenir. Yapılan deneyin düzeneği, kullanılan aletler Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Plastik limit deneyi aletleri [2]

Likit limit ve plastik limit değerlerine atterberg kıvam limitleri denir. Plastisite indisi değeri ise likit limit ile plastik limitin farkı ile bulunur. Bulunan değerler ile grafikteki yeri belirlenir.

2.6.3. Píknometre deneyi

Píknometre deneyinde amaç, ince daneli zeminlerin özgül ağırlıklarını bulmaktır. Bu deneyde de 40 numaralı elekten geçen zemin numunesinden píknometre şişesine göre belli bir miktarda alınır. Bu şişe Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Píknometre aleti

İnce daneli zeminlerin özgül ağırlığını bulmak için genelde 250 ml ve 500 ml’lik şişeler kullanılmaktadır. Bu deney elekten geçecek şekilde olursa iri daneliler için de uygulanması uygundur.

2.6.4. Hidrometre deneyi

Bu metot, 200 numaralı elekten geçen ince daneli zeminler (kil, silt) için uygulanır. Bu tür zeminlerin dane çapları belirlemek amacıyla kullanılır. Bu deney çalışmasında, belli bir ağırlıktaki zemin numunesi mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılarak suda bir süspansiyon haline getirilir. İyice karıştırılan süspansiyon çökmeye bırakılarak değişik zaman aralıkları ile yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilir. Bu sayede zemin içerisindeki danelerin çap dağılımları belirlenmiş olmaktadır. İnce daneli zeminleri tanımlama ve sınıflandırmada, dane çapı dağılımının saptanmasında kullanılır. Hidrometre deneyinde kullanılan aletler Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Hidrometre deneyi aleti

2.6.5. Kompaksiyon deneyi

Diğer adıyla da proktor deneyi olarak bilinen bu deney sıkıştırma deneyidir. 40 numaralı elekten geçen zemine en az 4 farklı su oranlarının ilave edilmesiyle gerçekleştirilen sıkıştırma işlemine kompaksiyon deneyi adı verilir. Bu deneyde amaç, en iyi sıkıştırma işleminin hangi su muhtevasında yapılabileceğini incelemektir.

Deneyde ilk olarak doğal zeminin su muhtevası belirlenir. Sonraki kompaksiyon deneylerinde kireç katkılı zeminlerin su muhtevaları belirlenir. Deney minyatür ve normal kompaksiyon aleti olacak şekilde iki farklı aletle gerçekleştirilebilir. Bu aletler Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

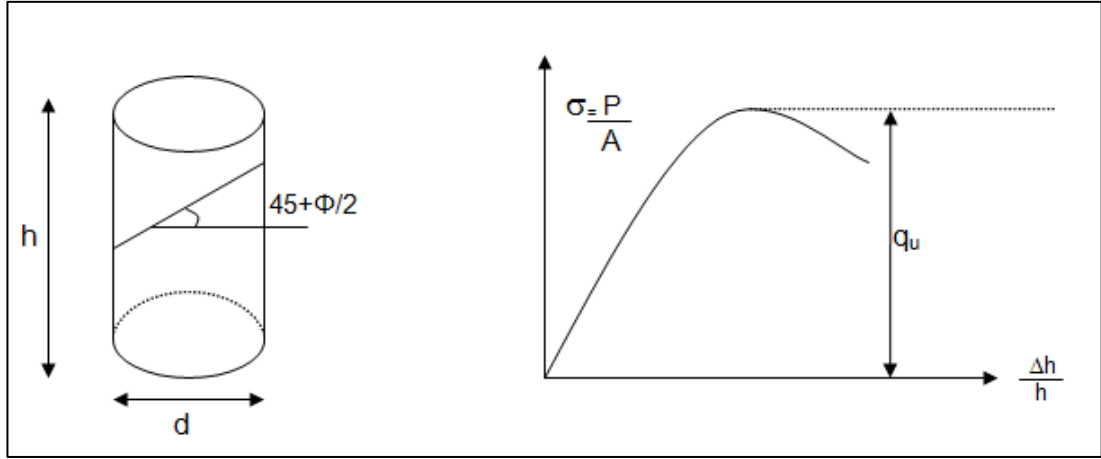


Şekil 2.10. Kompaksiyon deneyi aletleri

Killi zeminin ve kireç katkılı zeminlerin optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını tayin etmek için kompaksiyon deneyi yapılmaktadır. Şekilde gösterilen aletlerden minyatür olanı kireç katkılı numuneler için kullanılmıştır. Doğal zemin için ise normal kompaksiyon aleti kullanılmıştır. İki aletin en belirgin farkları sıkıştırma işlemi aşamalarında kullanılan su miktarlarıdır. Minyatür kompaksiyon aletinde su oranı maksimum %30 iken normal proktor aletinde ise bu değer 750 ml'ye kadar çıkabilmektedir.

2.6.6. Serbest basınç deneyi

Kompaksiyon deneyleri sonucunda bulunan su muhtevalarıyla hazırlanan ve boyu çapının yaklaşık 2,5 katı olan silindirik numunelere kuvvet uygulanarak birim deformasyona bağlı olarak elde edilen mukavemet değerleri serbest basınç deneyini tanımlar. Serbest basınç deneyinde asıl amaç, herhangi bir arazide yüklemeye maruz kalan zeminlerin gerilmeler karşı gösterdiği deformasyonları belirlemektir ve bu deformasyonlara karşılık gelen serbest basınç mukavemet değerlerini okumaktır. Buradan da numunenin en yüksek dayanımı bulunmaktadır. Deneyde hazırlanan numuneler laboratuvar ortamında işlem görmektedir. Numuneler eksenel olarak şekil değiştirmektedir. Boy kısalması ve serbest basınç mukavemet değerleri ile grafik çizilir. Şekil 2.11'de Serbest basınç deneyinde numune kesiti ve grafiği gösterilmiştir [2].

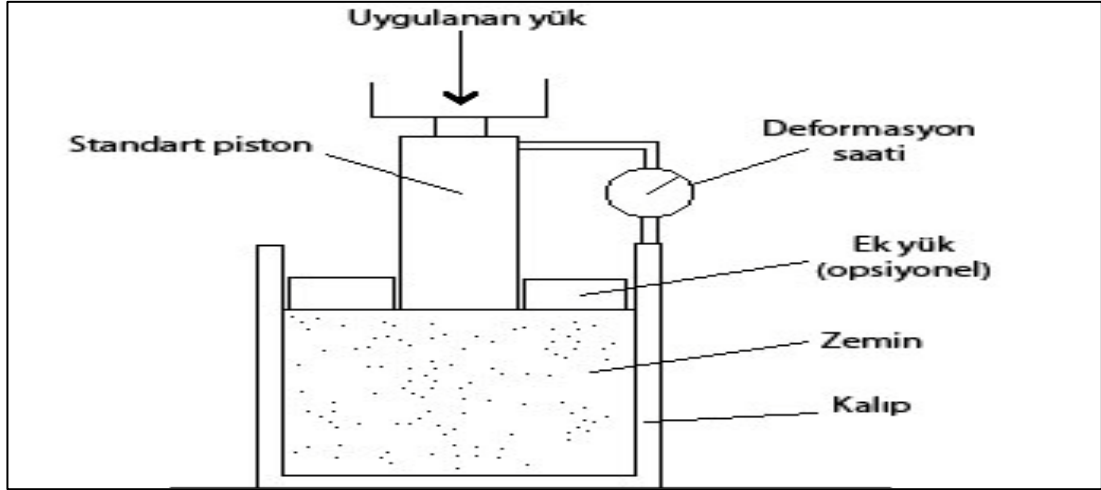


Şekil 2.11. Serbest basınç deneyinde numune kesiti ve grafiği [2]

Bu deney sadece ince daneli zeminlere uygulanabilir. Çünkü bu deneyde numunenin yanal bir kuvvet almadan dik durması önemlidir. Bu yüzden kumlu zeminlerde bu metot uygulanmamaktadır. Yükün artışı altında deformasyonlar ölçülür. Her 20 mm boy kısılmasında yüklenen kuvvet not edilir ve numunenin göçmesine neden olan en büyük gerilme değeri zeminin serbest basınç mukavemet değeri olarak kabul edilir. Deney sonunda gerilme-boy kısılması grafiği çizilir.

2.6.7. CBR deneyi

Serbest basınç deneyinde olduğu gibi CBR deneyinde de kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optimum su muhtevaları ile katkısız ve katkı olmak üzere bir çok numune hazırlanır. CBR deneyi kuru ve ıslak olmak üzere iki şekilde yapılır. Kuru CBR deneyinde numuneler sıkıştırılmadan önce 1 saat bekletilir. Yaş CBR deneylerinde ise hazırlanan numuneler 4 gün boyunca suyun içerisinde bekletilir ve bu süre içerisinde mikrometre ile numunelerin şişme oranları ölçülür. 4 günün sonunda sudan çıkarılan numuneler belirlenen kür süreleri sonunda kırılır ve okumalar alttan ve üstten olacak şekilde yapılır. Numunelere dikey şekilde kuvvet uygulanmaktadır. Uygulanan bu yükler altın boy kısılmasına karşılık gelen gerilmeler not edilir. CBR düzeneği Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. CBR düzeneği [2]

Zemine katılan kireç katkısı oranlarına göre yapılan CBR deneyleri sonucunda zemindeki seviye değişimleri Tablo 2.3’de gösterilmiştir [2].

Tablo 2.3. CBR değerleri seviyesi[2]

CBR (%)	Seviye
0-3	Çok Zayıf
3-7	Yetersiz
7-20	Orta
20-50	İyi
>50	Mükemmel

2.6.8. Plaka yükleme deneyi

Bu deney, zeminin taşıma gücünü tespit eden bir başka yöntem olup, dairesel bir plaka vasıtasıyla zemine tatbik edilen basınçla çökme (oturmalar) miktarının ölçülmesi esasına dayanır. Zeminin taşıma gücünün ölçülmesinde kullanılan diğer deneylerde olduğu gibi, plaka yükleme deneyinde kg/cm^2 veya ton/m^2 gibi doğrudan bir mukavemet değeri ile tanımlanamaz. Taşıma gücünün belirlenmesinde kullanılan diğer deneylerden farkı arazide yapılan tek deney olmasıdır. Bu deney, zeminin olduğu gibi alt temel, temel ve hatta kaplamanın taşıma gücünün ölçülmesinde kullanılabilir. Bu deneyin sonuçları, zeminin yoğunluk ve rutubet miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, deney sırasında zemin sıkışmış ve optimum su içeriğinde olmalıdır.

2.7. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Bu bölümde laboratuvar deneylerinde kullanılmış olan Yalova bölgesinden getirilen killi zemin ve katkı olarak kullanılan sönmüş ve sönmemiş kirecin kimyasal, fiziksel özellikleri verilmiştir.

2.7.1. Killi zemin

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan killi zemin, Yalova ili bölgesinden getirilmiştir. Deneyler Kocaeli Üniversitesi Geoteknik Laboratuvar'ında yapılmıştır. Deney için gerekli malzeme miktarı eksiksiz karşılanmıştır. Zemin Şekil 2.13'te gösterilmektedir.

Zemin, bölgeden çuvallar içerisinde getirilmiştir. Deneylerde kullanılacak dane boyutları için öncelikle en az 24 saat kalacak şekilde fırında 108°C'de kurumaya bekletilmiştir. Zemin kuruduktan sonra kırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Zemin, 40 no'lu elekten geçecek şekilde ufalanmıştır. Hidrometre ve elek analizi hariç tüm deneyler için 40 numaralı elekten geçen zemin kullanılmıştır.



Şekil 2.13. Deneylerde kullanılan killi zemin

Zemine bakıldığında mavimsi bir renge sahip olduğu görülmektedir. Killi zemin kırılıp ufalandıktan sonra başlangıç deneylere tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda zeminin geoteknik özellikleri elde edilmiştir.

2.7.2. Sönmüş kireç

Deneyleerde kullanılan sönmüş ve sönmemiş kireç fabrikadan tahsil edilmiştir. Sönmüş kirecin fiziksel özellikleri Tablo 2.4'te, kimyasal özellikleri de Tablo 2.5'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Sönmüş kirecin fiziksel özellikleri [5]

Sönmüş Kireç Fiziksel Analiz	
Kimyasal Adı	Kimyasal hidroksit
Fiziksel Görünüşü	Kuru beyaz toz
Kaynama Sıcaklığı °C	100
Erime Sıcaklığı °C	580
200 µ elek üstü (%)	Maks. 0,5
90 µ elek üstü (%)	Maks. 4,0
Birim Hacim Kütlesi (kg/dm ³)	Maks. 0,5

Tablo 2.5. Sönmüş kirecin kimyasal özellikleri [5]

Sönmüş Kirecin Kimyasal Analizi	
Ca(OH) ₂	80-86
CaO + MgO (%)	Min. 88
MgO	1-2
Çözünmeyen Madde (%)	Maks. 1,0
SO ₃	Maks. 1,5
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	Maks. 1,0

2.7.3. Sönmemiş kireç

Sönmemiş kirecin özellikleri Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Sönmemiş kirecin kimyasal özellikleri [5]

Sönmemiş Kirecin Kimyasal Analizi	
Aktif CaO	8389
CaO + MgO (%)	90-99
MgO	1-2
Çözünmeyen Madde (%)	0,5-2
SO ₃	Maks. 2
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	0,5-1,5

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Yalova ilinden getirilen maviye yakın bir renge sahip killi zemin laboratuvar ortamında çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Killi zeminler, genellikle sorunlu zeminler olduklarından iyileştirme yöntemi çok uygulanmaktadır. Bu deney çalışmalarında da killi zeminin kireç ile iyileştirilmesi üzerinde durulmuştur. Çalışma sonunda farklı kireçlerin killer üzerindeki etkisi ve killerin kireç ile dayanımındaki değişimlerine bakılmıştır.

Tüm stabilizasyon deneylerinin başlangıcında olduğu gibi bu çalışmada da öncelik olarak killi zeminin sınıflandırılması yapıp geoteknik özellikleri bulunmuştur. Özellikleri bulunan killi zeminin su muhtevası bulunarak serbest basınç mukavemet değerleri incelenmiştir. Daha sonra kireç ilavesi yapılarak da serbest basınç mukavemet değerleri bulunup kıyaslama yapılmıştır. Kıyaslamalar hem doğal zemin ile katkılı zemin arasında yapılmıştır hem de farklı katkı malzemeler arasındaki değerlerde yapılmıştır.

Deneysel çalışmalara doğal zeminin su muhtevasını bulmakla başlanmıştır. Ardından yıkamalı elek analizi ve kıvam limit değerleri bulunup zeminin sınıfı belirlenmiştir. Daha sonra uygun kireç oranı için pH deneyi yapılmış ve özgül ağırlığını belirlemek için de piknometre deneyi yapılmıştır. Daha sonra doğal zeminin ve sönmüş kireç katkılı zeminin optimum su muhtevaları proktor deneyi ile bulunup serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Son olarak da sönmemiş kireç katkısı ile optimum kireç oranı kullanılarak serbest basınç mukavemet değerleri bulunmuştur ve sönmemiş kireç ile kıyas edilmiştir.

3.1. Killi zeminin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi

Yalova' dan getirilen kilin geoteknik özelliklerini belirlemek için yıkamalı elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, piknometre ve standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Kıvam limitleri ve ph deneyleri ile kullanılacak kireç miktarı

belirlenmiştir. Standart kompaksiyon deneyleri ile de optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur.

3.2. Doğal Su Muhtevası Tayini

Killi zemin getirildiğinde doğal su muhtevasının değişmemesi için ilk olarak doğal su muhtevası bulunmuştur. Zemin getirildiğinde birkaç farklı noktadan numuneler alınıp tartıldıktan sonra etüve atılmıştır. 24 saat sonrasında etüvden çıkarılan numuneler tekrardan tartılmıştır ve doğal su muhtevaları bulunup ortalaması alınmıştır. Bulunan doğal su muhtevasının değeri %31,27 olarak bulunmuştur. Numunelerin fırındaki gösterimi Şekil 3.1’de ve alınan farklı numunelerin doğal su muhtevası değerleri de Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Zeminin doğal su muhtevası

Numune No	1	2	3	4	5
Su Muhtevası (%)	31,22	30,82	30,98	31,45	31,88



Şekil 3.1. Su muhtevası deneyi

3.3. Kıvam limiti deneyleri (LL, PL)

Doğal su muhtevası bulunan numuneler plastik limit ve likit limit değerlerini bulmak için bir miktar etüve atılmıştır. En az 24 saat etüvde kurutulan zemin 40 numaralı elekten geçmesine yardımcı olabilmek için killi zemin tokmakla ufalanmıştır. Her likit limit deneyi için yaklaşık 150 gr alınmıştır. Öncelikle katkısız zeminin likit limit

değeri bulunmuştur. Daha sonra belirli oranlarda kireç ilave edilerek katkıli zeminlerin de LL değerleri belirlenmiştir.

Elekten elenen zeminden yeterli miktarda elde edildikten sonra deneye başlanmıştır. Deney, 150 gr numuneye 5 aşamalı su ilavesi olacak şekilde yapılmıştır. Su katma işlemi en kurudan en yaşa doğru yapılmıştır. Her deneyden sonra su katılmış ve krema kıvamına gelinceye kadar homojen olacak şekilde güzelce karıştırılmıştır. Deney için hazır olan numune Casagrande aletine belirli miktarda konulmuştur ve alettaki numune zemine paralel olacak şekilde üstü düzeltilmiştir. 45 dereceli oluk açma aleti ile numune ortadan ikiye ayrılmıştır. Şekil 3.2’de deneyin yapılışı gösterilmiştir.

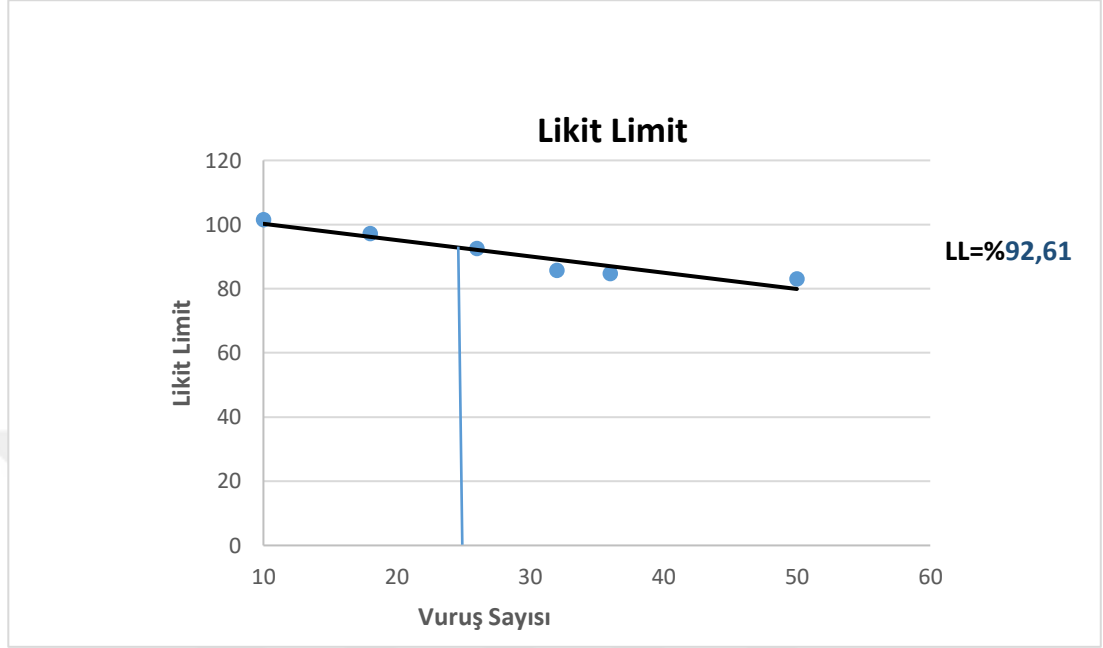


Şekil 3.2. Likit limit deneyinin yapılışı

Casagrande aleti artık deney için hazır vaziyette ve kıvama göre vuruş yapacak şekilde deneye başlanmıştır. Deneydeki her bir vuruş saniyede 2 vuruş olacak durumda ayarlanmıştır. Ortadan oluşturduğumuz yarığın yaklaşık 13 mm’ye geldiği zaman deney bitirilip vuruş sayısı not alınmıştır. Sonrasında 24 saat etüvde bekletilmek için alettin birleşen orta kısmından belli miktarda numune alınmıştır. Tartılan numune etüve atılmıştır.

Bu deney sıralaması 5 defa istenen vuruş değerleri alınacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Likit limit grafiğinde 25 vuruşa denk gelen değeri doğru bir şekilde bulabilmek için vuruş sayıları 10 ile 50 arasında ve her 10 vuruş aralığından olmasına dikkat edilmiştir. Numunenin kıvamı da, katılacak su miktarı da vuruş sayısına göre belirlenmiştir. Elde edilen değerler grafiğe geçirilmiş ve 25 vuruşa denk gelecek değer deneyimizin likit limit olarak belirlenmiştir. Tüm katkılılarda da

aynı şekilde çizilen grafiklerden sonra katkısız zemine göre kıyas yapılmıştır. Bu grafik Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Killi zeminin likit limit grafiği

Grafiğe bakıldığında likit limit değeri %92,61 olarak bulunmuştur. Birkaç likit limit deneyi daha yapılmıştır. Ayrıca kireç katkıları için de likit limit değeri bulunmuştur. Kireç katkılarında %2, %3, %4 oranları kullanılmıştır. Doğal zemin için de katkıları için birkaç defa bulunan likit limit değerleri karşılaştırılmıştır. Likit limit verileri elde edildikten sonra plastik limit deneyine başlanmıştır. Plastik limit deneyi ise likit limit deneyi gibi 40 numaralı elekten elenen malzeme ile yapılmıştır. Fakat likit limit deneyi gibi fazla malzeme kullanılmamıştır. Plastik limit yapılışında elde edilen numuneden bir örnek Şekil 3.4’te gösterilmiştir.

Her plastik limit deneyi için yaklaşık 30 gr kullanılmıştır. Her plastik limit değeri için ayrıca 3 deney yapılmıştır. Zemine azar azar su eklenmiştir. Deney cam tabakası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin 3 mm civarında çatlaması beklenmiştir. Eğer daha öncesinden çatlama durumu olursa su ilavesi gerçekleşmiştir. Fakat daha inceyken çatlama olur ise numune biraz daha kuru hale getirilmiştir. 3 mm çapındayken çatlayan numuneler 24 saat etüvde bekletmek için kaplara konmuştur.



Şekil 3.4. Plastik limit deneyi numunesi

Likit limitte olduğu gibi plastik limit deneyi de birkaç defa tekrarlanmıştır. Plastik limit deneyinin değerlerinin bir örneği Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Killi zeminin plastik limit deneyi değerleri

Plastik Limit							
Kap No	W_{kap}	$W_{yaş+kap}$	$W_{kuru+kap}$	W_{kuru}	$W_{yaş}$	W_w	W_p
98	33,93	38,59	37,69	3,76	4,66	0,90	23,94
138	34,07	38,10	37,31	3,24	4,03	0,79	24,38
228	35,26	39,65	38,80	3,54	4,39	0,85	24,01
						W_p	24,11

Doğal zeminin likit limit ve plastik limit değerleri belirlendikten sonra kireç katkılı zeminin de LL ve PL değerleri deneylerle bulunmuştur. Doğal zeminin likit limit(w_L) değeri %92,61, plastik limiti (w_p) %24,11 çıkmıştır ve böylelikle plastisite indisi değeri de %68,5 çıkmıştır.

Katkılılar için de plastisite indisi değerleri bulunmuştur. Killi zeminin katkısız ve %2, %3, %4 katkılı zeminin bulunan değerleri Tablo 3.3’te gösterilmiştir. Killi zeminin katkılı ve katkısız kıvam limit değerlerine bakıldığında katkılılarda katkısızlara göre likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma görülürken plastik limit değerlerinde ise artış gözlemlenmiştir.

Tablo 3.3. Katkısız ve katkılı zeminin kıvam limit değerleri

Kireç oranı(%)	LL(%)	PL(%)	PI(%)
0	92,61	24,11	68,5
%2	82,09	29,11	52,98
%3	80,37	30,71	49,66
%4	79,46	33,46	46,00

Doğal zeminin değerlerine bakıldığında zeminin sınıflandırması yapılabilmüş ve deneyde kullanılan zeminin birleşmiş zemin sınıflandırmasına göre yüksek plastisiteli bir zemin (CH) olarak belirlenmiştir.

3.4. pH Deneyi

PH deneyi, kullanılan katkı malzemesinin optimum katkı miktarını belirlemek için yapılmaktadır. Likit limit ve plastik limit değerleriyle optimum miktar belirlenebildiği gibi bu deneyde de optimum katkı miktarı belirlenebilmektedir. Bu çalışmada katkı malzeme daha önceki çalışmalara bakılarak belirlenmiştir ama çalışmaları teyit anlamında pH deneyi de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Ph deneyi

Yapılan deneyde pH aletindeki gösterge 12,4'ü gösteren katkı malzemesi oranı kullanılan katkı malzemesi olarak belirlenmiştir. Deney için 10 gr'lık malzeme kullanılmıştır ve her bir pet şişeye katkı oranları %1 artırarak gerekli su ilavesi yapılmıştır. Deneyin yapılışı Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

Pet şişelere gerekli malzemeler konulduktan sonra iyice karıştırılmıştır. Daha sonra 1 saat süre içerisinde her 10 dakikada bir karıştırma işlemi tekrarlanmıştır. 1 saat sonra numunenin durulmasının ardından ph aleti pet şişeye konulmuş ve okunan değer not alınmıştır. Okunan değerlerin sonuçları Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4. pH deneyi sonuçları

Kireç(%)	pH	C
1	12,2	20,4
2	12,3	20,4
3	12,4	20,5
4	12,5	20,4
5	12,6	20,4
6	12,6	20,6
7	12,6	20,7
8	12,7	20,8

Ph deneyi sonucunda 12,4 değeri %3 kireç katkılı pet şişesindeki numunede okunmuştur. Bu deney sonucunda diğer çalışmalarda da olduğu gibi optimum kireç oranının %3 olduğunu desteklemiştir.

3.5. Yıkamalı Elek Analizi

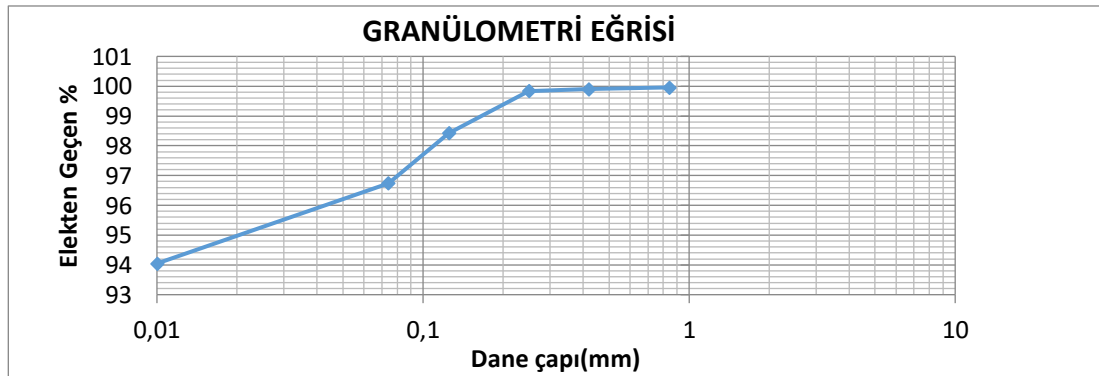
Elek analizi deneyi zeminin dane çapı dağılımını belirlemek için yapılmıştır. Killi zemin diğer deneylerdeki gibi ilk olarak etüve 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Daha sonra numune suyun içerisinde bırakılmıştır ve 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Son olarak karışım durulduktan sonra elek açıklığı 8 mm'den 0,074 mm'ye kadar olan elekler kullanılmıştır. Hidrometre deneyi sonucunda da kalan malzemeyi kurutarak elek analizinden geçirip yaklaşık aynı sonuçlar bulunması beklenmiştir. Deney için ayrılan numune su içerisinde 1 saat bekletildikten sonra 10 numaralı elekten (2 mm) geçirilmiş ve üste kalanlar tekrar suya konulup karıştırılmıştır. Bir müddet bu işlem tekrarlanır ve 2 mm'lik elekten geçirilip kalan numune farklı bir kaba alınır. Bu numune etüve atıldıktan sonra 24 saat bekletilir. Etüve bekletilen zemin belli bir elek serisinden geçirilmiş ve elekte kalanların ağırlıkları not

edilmiştir. Daha sonra elekten geçen ağırlık toplamdan kalanı çıkararak bulunmuştur. Tablo 3.5’de elek analizi sonuçları verilmiştir. Bu deney birkaç farklı numune için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.5. Killi zeminin elek analiz sonuçları

ELEK NO	ELEK AÇIKLIĞI	KALAN AĞIRLIK	GEÇEN AĞIRLIK	GEÇEN(%)
5/16"	8.000	0	48,21	100
No 4	4.760	0	48,21	100
No 10	2.000	0,02	48,19	99,96
No 18	1.000	0,03	48,16	99,89
No 40	0.425	0,03	48,13	99,83
No 60	0.250	0,68	47,45	98,42
No 120	0.125	0,81	46,64	96,74
No 200	0.074	1,3	45,34	94,04
PAN		45,34		

Yıkamalı elek analizi sonucuna göre kil+silt oranı %94,04 olarak bulunmuştur. Analiz sonucu zeminin ince daneli olduğunu yani kil veya silt olduğunu göstermektedir. ASHTO zemin sınıflandırmasına göre zemin, A-7-6 zemin sınıfında yer almaktadır. Ayrıca tabloda sonuçlardan yola çıkılarak dane çapı dağılımı grafiği çizilmiştir. Bu grafik Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Killi zeminin granülometre eğrisi

3.6. Hidrometre Deneyi

Yıkamalı elek analizi gibi ince daneli zeminlerin dane dağılımını bulabilmek için uygulanan deneylerden birisidir. Diğer temel deneylerin bütününden farklı olarak hidrometre deneyinde kullanılan malzeme 200 numaralı elekten geçtikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Şekil 3.7’de hidrometre deneyinin yapılışı gösterilmiştir.

Elekten geçirmek için malzeme kırımı gerçekleştirilmiştir daha önceden 40 numaralı elekten geçirilmiş malzemeleri kullanarak 200 numaralı elekten geçirmek daha kolay olmuştur. İlk olarak malzemedan az miktarda alındıktan sonra üzerine hidrojen peroksit dökülmüştür ve yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan numune üzerine ıslak bez koyulup 24 saat bekletilmiştir.



Şekil 3.7. Hidrometre deneyi

Numune bekletmeye alındıktan sonra çözelti hazırlanmıştır. Çözelti için 1 litre suya 40 gr sodyum hidroksit gelecek şekilde ayarlanmıştır. Her bir hidrometre kabı için 125 ml çözelti kullanılmıştır. 1 gün bekletilen numuneye istenilen seviyedeki karışım oluştuktan sonra 125 ml’lik çözelti ilave edilmiştir. Daha sonra çözelti ve numune bir kaptaki homojen şekilde karıştırılmıştır ve hidrometre kabına eklenmiştir. Bu çözelti ve numunenin üzerine 1 litreye tamamlayacak kadar su ilavesi gerçekleşmiştir.

Hidrometre içinde hazır bulunan numune kür odasında hidrometre kabının ağzı elle kapatılacak şekilde iyice çalkalanmıştır. Tamamen karışan çözelti durulduktan sonra 0,25 dakikan 48 saate kadar iki kat aralıklarla hidrometre okumaları yapılmıştır. 8 dakikadan sonra her ölçümün ardından alet damıtık suyla yıkanmıştır. Bu şekilde birkaç kez deney tekrarlanmıştır. Hidrometre sonucu da yıkamalı elek analize yakın sonuç bulunmuştur. Kil + silt oranı % 93 bulunmuştur.

3.7. Piknometre Deneyi

Bu deney numunenin özgül ağırlığı bulunması için yapılmıştır. Deneyde 250 ml'lik şişeler kullanılmıştır. İlk olarak deneyde kullanılacak şişe etüve atılıp kurutulmuştur. Daha sonra zemini örtecek şekilde havası alınmış damıtık su eklenmiş ve zemin ile suyun homojen karışımı sağlanmıştır. Hacim şişesi vakum desikatörüne konulup zemin içerisinde hava alınmıştır. Deney aşamaları, hacim kaybı olmaması için dikkatle yapılmıştır. Yapılan piknometre deney sonuçları Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Piknometre deneyi sonuçları

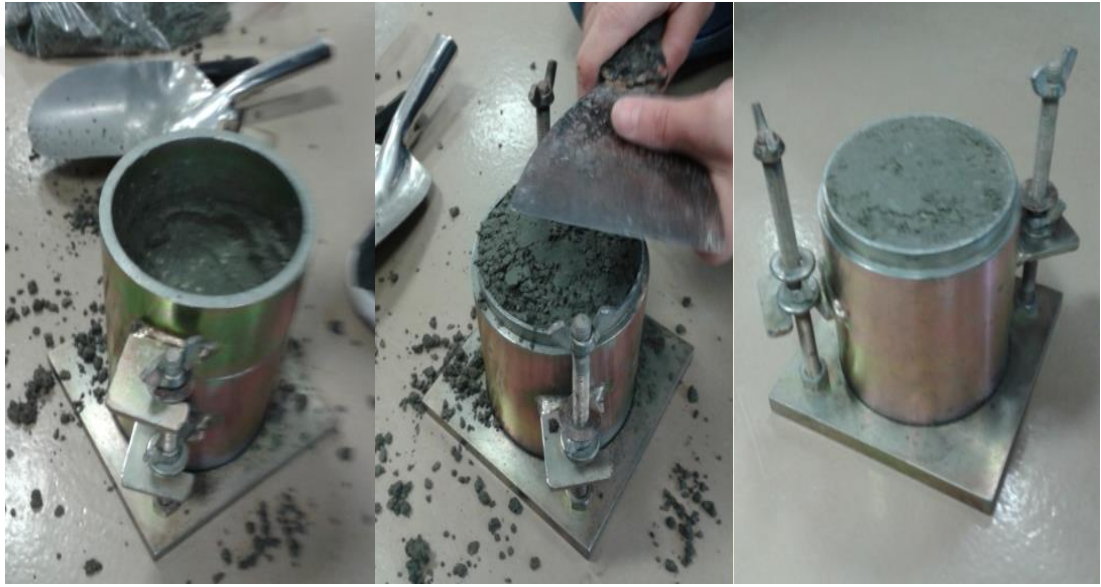
Piknometre ağırlığı (A)	gr	92,03	92,03	92,03	92,03	92,03
Piknometre + Numune ağırlığı (B)	gr	142,03	142,03	142,03	142,03	142,03
Piknometre + Numune + Su ağırlığı (C)	gr	373,58	373,57	373,57	373,59	373,53
Piknometre + Su ağırlığı (D)	gr	342,03	342,03	342,03	342,03	342,03
Numune ağırlığı	gr	50	50	50	50	50
Hesaplamalar	$\text{Özgül Ağırlık} = (B-A) / [(D-A)-(C-B)] \times \rho$					
Özgül Ağırlık		2,702	2,706	2,708	2,710	2,703
Özgül Ağırlık Aritmetik Ortalama				2,706		

Numunenin havası tamamen alındıktan sonra işaret çizgisine kadar su ile doldurulmuş ve tüpe konmuştur. Tüpte kaynama gerçekleşince su çıkışı yapılması beklenmiştir. Gözle görülecek derecede su çıkışı gerçekleştikten sonra tartılmıştır. Piknometre deneyinin uygulanması 5 defa tekrarlanmıştır. Killi zeminin özgül ağırlığı 2,706 olarak bulunmuştur.

3.8. Kompaksiyon (Harvard Proktor) Deneyi

Harvard proktor deneyi olarak da bilinen bu deneyde amaç hangi su oranında en iyi sıkıştırma gerçekleşeceğini bulabilmektir. Deneyin başlarında standart proktor aleti kullanılmıştır. Daha sonra minyatür kompaksiyon aleti ile devam edilmiştir. Killi zeminin standart su muhtevasını bulabilmek için etüvde kurutulan numune 40

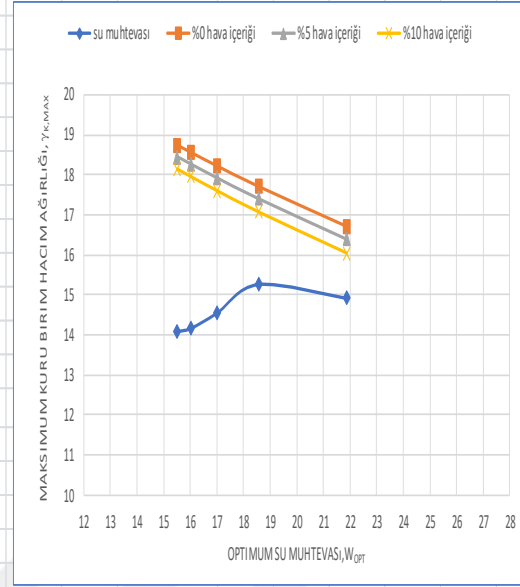
numaralı elekten geçirilmiştir. Deney için 2,5-3 kg arası zemin yeterli gelmiştir. Bu deneyin her biri için 3 kg kullanılmıştır. Toplamda 5 farklı su oranlarıyla deney tamamlanmıştır. Numunelere sırasıyla 350, 425, 500, 575, 650 ml'lik su ilavesi olmuştur. Numuneler kalıba konmadan homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra sıkıştırma kabına 3 adımda olacak şekilde konup 2,5 kg'lık tokmakla her seferinde 25 vuruş yaparak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi sonrasında kalıbın üstten 1/3 kısmı kaldırılmıştır ve numunenin üst kısmındaki fazlalıklar alınmıştır. Kompaksiyon deneyin bu aşamaya kadar yapılışı Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Standart proktor deneyi

Kalıplar her 5 deney için de aynı şekilde hazırlanmıştır. Numuneler kalıpla birlikte tartılmıştır. Daha sonra kalıptan çıkarılmış ve orta kısmında su muhtevasını belirlemek için örnek alınıp etüve atılmıştır. Etüvde 24 kalan numunenin kuru hali de tartıldıktan sonra gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar grafiğe yansıtılıp grafik çizimi gerçekleştirilmiştir. Killi zeminin hesaplamaları ve grafiği Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Deney No	1	2	3	4	5
Katılan Su Oranları (mL)	350	425	500	575	650
Kalıp Ağırlığı	4233	4233	4233	4233	4233
Sıkıştırılmış Zemin + Kalıp Ağırlığı	5799	5816	5871	5975	5983
Sıkıştırılmış Zemin	1566	1583	1638	1742	1750
Islak birim hacim ağırlık (kN/m ³)	1,658015	1,676014	1,734246	1,844357	1,852827
Kap No	243	132	155	48	555
Kap Ağırlığı (gr)	34,29	34,68	33,79	35,26	33,37
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı (gr)	85,97	91,99	90,58	98,88	89,69
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	79,03	84,07	82,33	88,92	79,58
Su Muhtevası (w) (%)	15,51185	16,03563	16,99629	18,56131	21,87838
Su Oranı (s) %	13,42879	13,81958	14,52721	15,65545	17,95099
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	14,08092	14,16953	14,54145	15,26058	14,91342
Kap Hacmi	944,5027	944,5027	944,5027	944,5027	944,5027
Su Muhtevası (w) (%)	15,51185	16,03563	16,99629	18,56131	21,87838
%0 Hava İçeriği	18,74617	18,56039	18,22907	17,71392	16,71288
%5 Hava İçeriği	18,4582	18,26868	17,93101	17,40687	16,39133
%10 Hava İçeriği	18,14844	17,95512	17,61106	17,07794	16,04825



Şekil 3.9. Killi zeminin su muhtevası

Killi zeminin optimum su muhtevası %18,56 maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 15,26 kN/m³ olarak bulunmuştur. Deneyin yapılış aşamaları Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Minyatür proktor aleti ile numune hazırlanışı

Doğal zeminin su muhtevası bulunduktan sonra kireç katkılı zemin deneyi için minyatür proktor aleti kullanılmıştır. Standart proktor deneyinde olduğu gibi minyatür proktorda da aynı şekilde su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur.

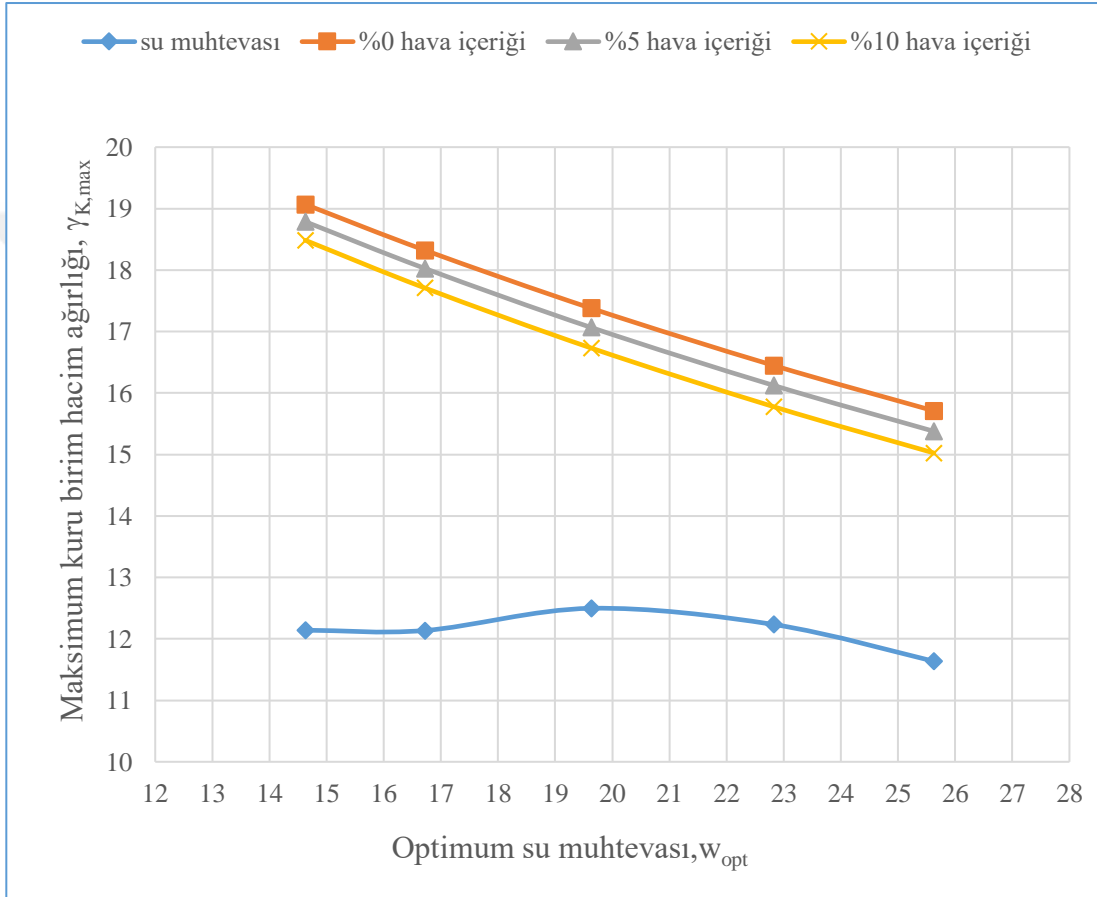
Yapılan deneyler sonucunda Yalova bölgesinden getirilmiş killi zeminin geoteknik özellikleri Tablo 3.7'de belirtilmiştir.

Tablo 3.7. Killi zeminin geoteknik özellikleri

Zemin sınıflandırma	
USCS	CH
AASHTO	A-7-6
Atterberg limit değerleri	
LL(%)	92,61
PL(%)	24,11
PI(%)	68,50
Elek analizi	
Kum (%) (4,76mm-0,074mm)	6,75
Kil ve Silt (%) (<0,074mm)	93,25
Özgül ağırlık (gr/ cm ³)	2,72
Standart proktor	
K.B.H.A (kN/m ³)	15,26
Doğal su muhtevası (%)	18,56
CBR yaş değeri (%)	2,94

Kalıbın iç hacmini bulabilmek için, iç çapı ve yüksekliği ölçülmüştür. Kabın hacmi bulunduktan sonra %2, %3, %4 kireç katkılı numuneler hazırlanmıştır. Minyatür kompaksiyon aletini alabileceği kadar numune ayarlanmıştır. Her bir deney için yaklaşık 110 gr kullanılmıştır. Her bir kireç oranı için de %13, %16, %19, %22, %25 olmak üzere beş farklı su oranı ile kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Killi zemin, belirlenen kireç oranı ile karıştırıldıktan sonra gerekli su ilavesi yapılmıştır. Homojen karışım olması için iyi bir şekilde karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kompaksiyon aletine 3 aşamalı şekilde hazırlanan numune sıkıştırılmıştır. Her aşamada kalıba koyulan numune tokmakla ilk 4 vuruşu dört köşeye vuracak şekilde ayarlanarak 25 vuruş yapılmıştır. Sıkıştırma işlemi bittikten sonra numune kalıpla birlikte tartılmıştır. Numune kompaksiyon aletinden çıkarılmış ve yeni numune için kompaksiyon aleti ve tokmak temiz bir şekilde silinmiştir. Sıkıştırma işlemleri yapılırken her seferinde tokmağın ucu silinmiştir. Çünkü kalıplardaki su muhtevaları farklı olduğu için tokmak temiz tutulmalıdır.

Standart kompaksiyon deneyinde yapılan işlemler tekrarlanmıştır. Şekil 3.11’de bulunan su muhtevaları içerisinde numune olarak %2 kireç katkıları olanı gösterilmiştir. Grafikte de okunduğu gibi optimum su muhtevası %19,62 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı 12,49 kN/m³ olarak bulunmuştur. Diğer kireç katkıları için optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının grafikleri eklerde mevcuttur.



Şekil 3.11. %2 kireç katkıları zeminin su muhtevası

Her deney bitiminde numunelerin orta kısmından bir miktar alınıp etüve atılmıştır. 24 saat sonunda etüvden çıkarılan numuneler de tatıldıktan sonra gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Kireç katkılarıyla birlikte tüm değerler Tablo 3.8’de gösterilmiştir.

Tablo 3.8. Katkısız ve katkılı kilin proktor deney sonuçları

	Optimum su muhtevası (%)	Maks. K.B.H.A. (kN/m ³)
Saf Kil	18,56	15,26
%2 kireç	19,62	12,49
%3 kireç	20,50	12,29
%4 kireç	21,82	12,73

Bütün kompaksiyon deneyi sonuçlarına bakıldığında kireç katkılılarda katkısızla göre optimum su muhtevası artmıştır fakat maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında azalma gerçekleşmiştir. Bu deneyler sonucundaki su muhtevalarına bakılarak serbest basınç deneyi için numuneler hazırlanmıştır.

3.9. Serbest Basınç Deneyi

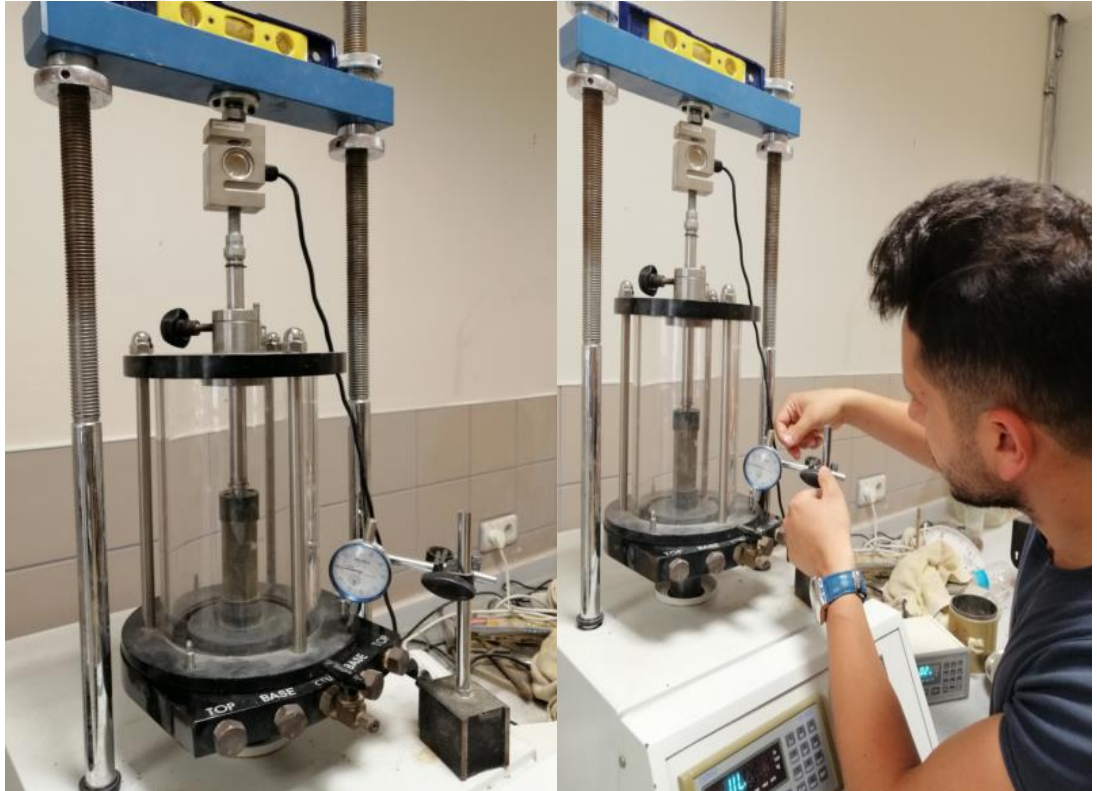
Serbest basınç deneyinde amaç, belirlenen su muhtevasıyla hazırlanan zemin numunesinin kırılmadan önceki en yüksek mukavemet, dayanım değerini bulmaktır. Deney numuneleri boyu çapının yaklaşık 2,5 katı olacak şekilde hazırlanmıştır. Deney numuneleri katkısız ve %2, %3, %4 kireç katkılılar için gerçekleştirilmiştir. Bu katkılılarda sönmüş kireç kullanılmıştır. Ayrıca sönmemiş kireç ile %3 katkı oranıyla da arazi koşullarından alınan zeminle serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

Numuneler, kompaksiyon deneyinde hazırlanan numunelerle aynı şekilde hazırlanmıştır. Kompaksiyon deneyinde belirlenen su muhtevaları %1-2 civarında artırılarak numunelere ilave edilmiştir. Sadece doğal zeminde su miktarında artış olmadan hazırlanmıştır. %2 kireç katkılılarda %20,5, %3 kireç katkılılarda %21,5, %4 kireç katkılılarda ise %23 su muhtevaları ile numuneler hazırlandı. Katkısız killi zeminde zamana bağlı olarak bir reaksiyon gerçekleşmeyeceğinden sadece anlık ve 1 günlük numuneler hazırlandı. Kireç katkılı zeminlerde ise katkı malzemesinin zamanla zemin ile reaksiyon vereceği için anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük numuneler hazırlanmıştır. Numuneler önce streç ile ardından alüminyum folyo ile sarılmıştır. Her bir deney için 3 numune hazırlanmıştır. Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

Tablo 3.9. Serbest basınç deneyi için numune bilgileri

Kullanılan malzeme	W(%)	Deney sayısı			
		Anlık	1 günlük	7 günlük	28 günlük
Doğal	18,56	3	3	-	-
%2 kireç katkılı	20,5	3	3	3	3
%3 kireç katkılı	21,5	3	3	3	3
%4 kireç katkılı	23	3	3	3	3

Deney için hazırlanan numunelerin bütünü minyatür kompaksiyon aletinde hazırlanmıştır. Her bir deney için 3'er numune hazırlanacağı için bir su muhtevası, kireç oranı ve kür süresi için yaklaşık 300 gr malzeme alınmıştır. Diğer deneylerde olduğu gibi kurutulmuş zemin 40 numaralı elekten geçirilerek deneyde kullanılmıştır. İlk olarak doğal zeminde anlık ve 1 günlük serbest basınç deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyinin yapılışı Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Serbest basınç deneyi

Zemine belirlenen su miktarı eklendikten sonra suyun bütün zemine nüfuz etmesi için iyice karıştırılmıştır. Kompaksiyon deneyindeki gibi üç aşamalı olacak şekilde numune kalıba konmuş ve hazırlandıktan sonra kalıpla birlikte tartılmıştır. Kalıptan çıkarıldıktan sonra bir dahaki deney için kalıplar temizlenmiştir. Sonra anlık

hazırlanan numuneler Şekil 3.12’de gösterildiği gibi deneye tabi tutulmuştur. Numune serbest basınç aletine dikkatlice yerleştirilmiştir. Deney hızı ve deformasyon aleti de ayarlandıktan sonra deney başlatılmıştır. Deney başladıktan sonra her %20 mm deformasyonda yüklenen gerilme değeri not alınmıştır. Bu şekilde devam eden yükleme, numune kırıldıktan sonra yani maksimum mukavemete ulaştığında deney bitirilmiştir. Daha sonra numunenin üst ve alt kısımlarından referans numuneler alınıp kaba konduktan sonra etüve atılmıştır. 24 saat sonra etüvden çıkarılan numuneler tartılmış ve hesaplamalar yapıldıktan sonra grafik çizimi gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar ve grafik çizimi ekler kısmında mevcuttur.

Doğal killi zemin için 1 günlük numuneler de hazırlanmıştır. 1 günlük numunelerde anlık numunelerde olduğu gibi aynı su muhtevası ile malzeme hazırlanmıştır. Kompaksiyon aletinden numunelerin çıkarılması kısmına kadar anlık hazırlanan numunelerde yapılan işlemler yapılmıştır. Numune kalıptan çıkarıldıktan sonra alüminyum folyoya sarılıp sıcaklığı yaklaşık 20°C olan bir kaptta 1 gün bekletilmiştir. Su muhtevasında kayıp olmaması için bu işlem yapılmıştır. Şekil 3.13’te numunelerin sarılması gösterilmiştir.

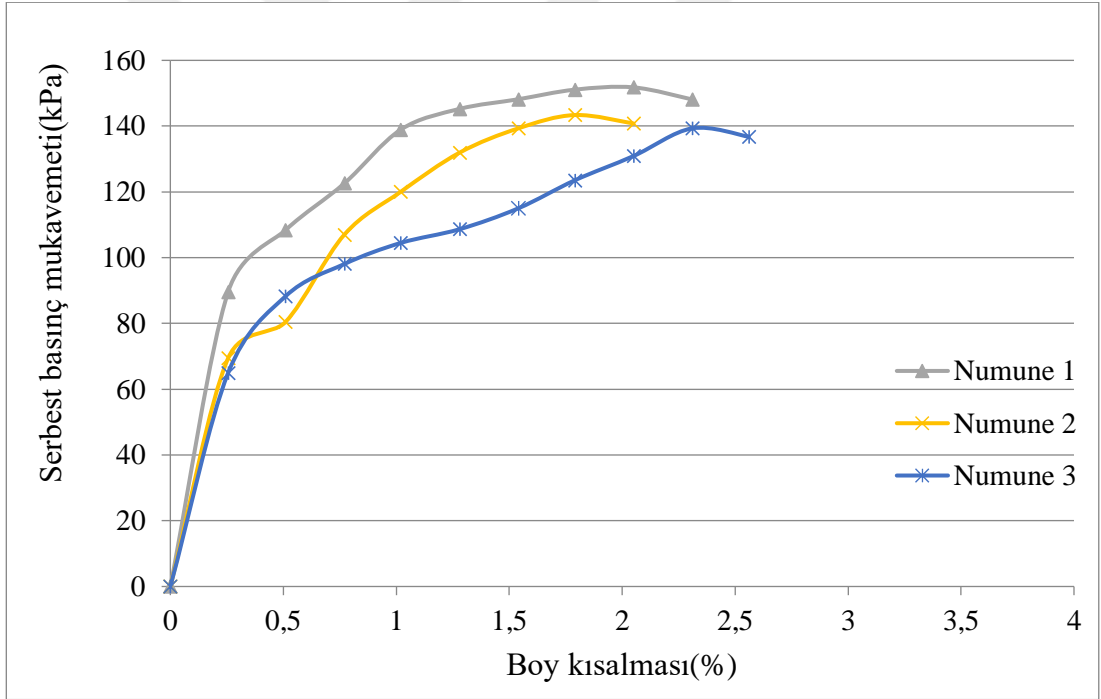


Şekil 3.13. Numunelerin sarılması

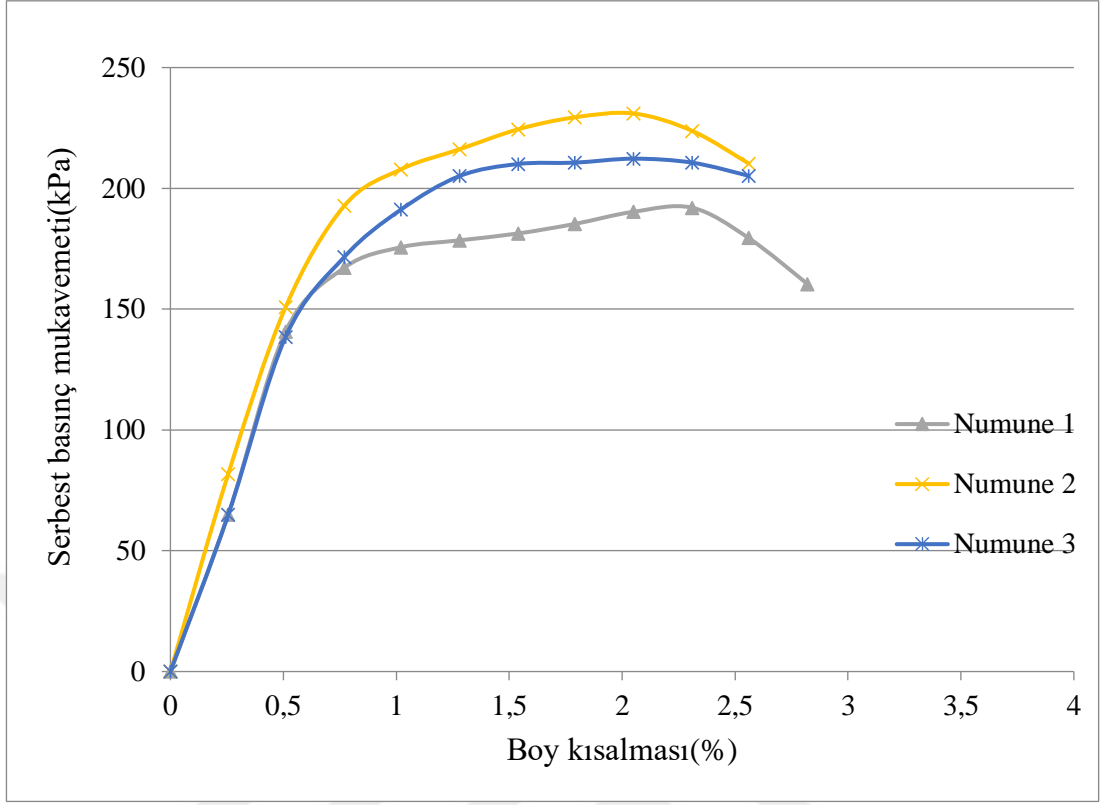
Katkısız zeminin serbest basınç deneyleri yapıldıktan sonra sönmüş ve sönmemiş kireç katkıları için serbest basınç deneyine geçilmiştir. Katkısız için anlık serbest basınç mukavemet değerinin ortalaması 121,1 kPa olarak bulunmuştur. 1 günlük mukavemet değerinin ortalaması ise 132,3 kPa olarak bulunmuştur.

3.9.1. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin serbest basınç grafiği

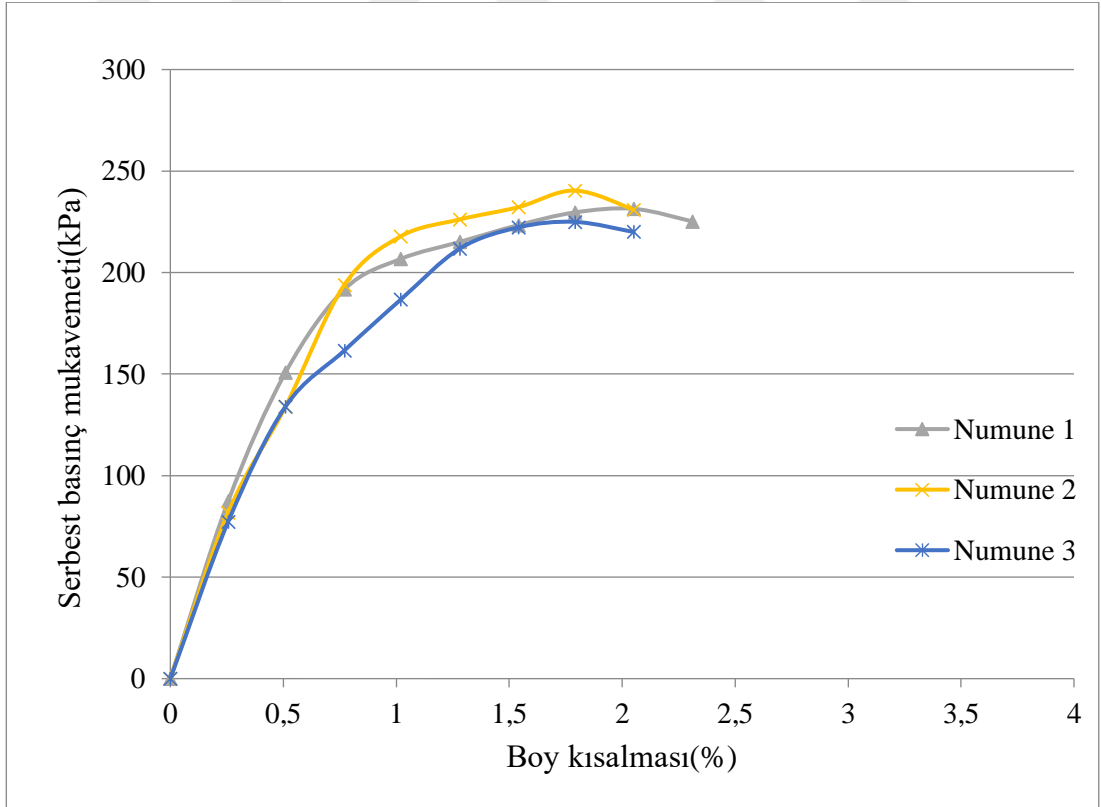
Deneyde kurutulmuş ve 40 numaralı elekten geçmiş malzeme ağırlığının %20,5 oranında su kullanılmıştır. Ayrıca sönmüş kireçten %2 oranında ve killi zeminden de yaklaşık 300 gr kullanılmıştır. Kompaksiyon deneyinde bulunan su muhtevasıyla anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Toplamda her birinden 3 numune hazırlanmıştır ve grafiğe geçirilmiştir. Farklı kür sürelerinde uygulanan serbest basınç deneyi; Şekil 3.14'de anlık, Şekil 3.15'de 1 günlük, Şekil 3.16'da 7 günlük, Şekil 3.17'de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kür sürelerinde değerlerin ortalaması da Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Tablo 3.10'da da killi zeminin %2 sönmüş kireç ilavesiyle 28 günlük kür sürelerinde mukavemet değerleri gösterilmiştir.



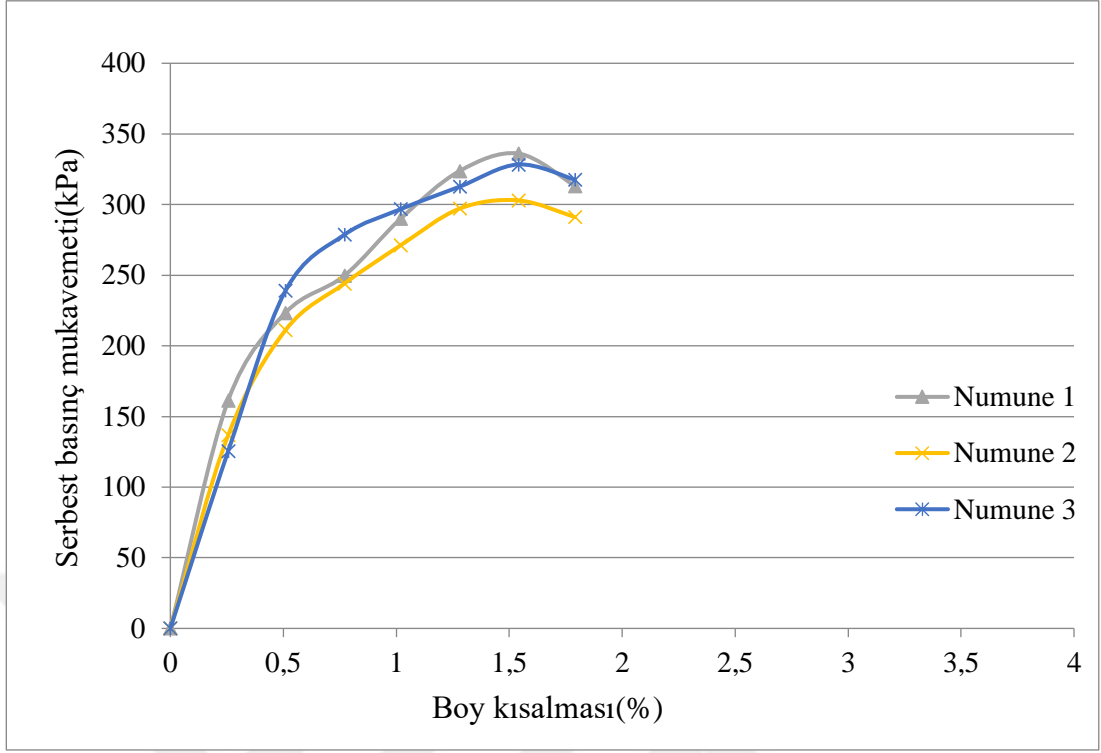
Şekil 3.14. %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği



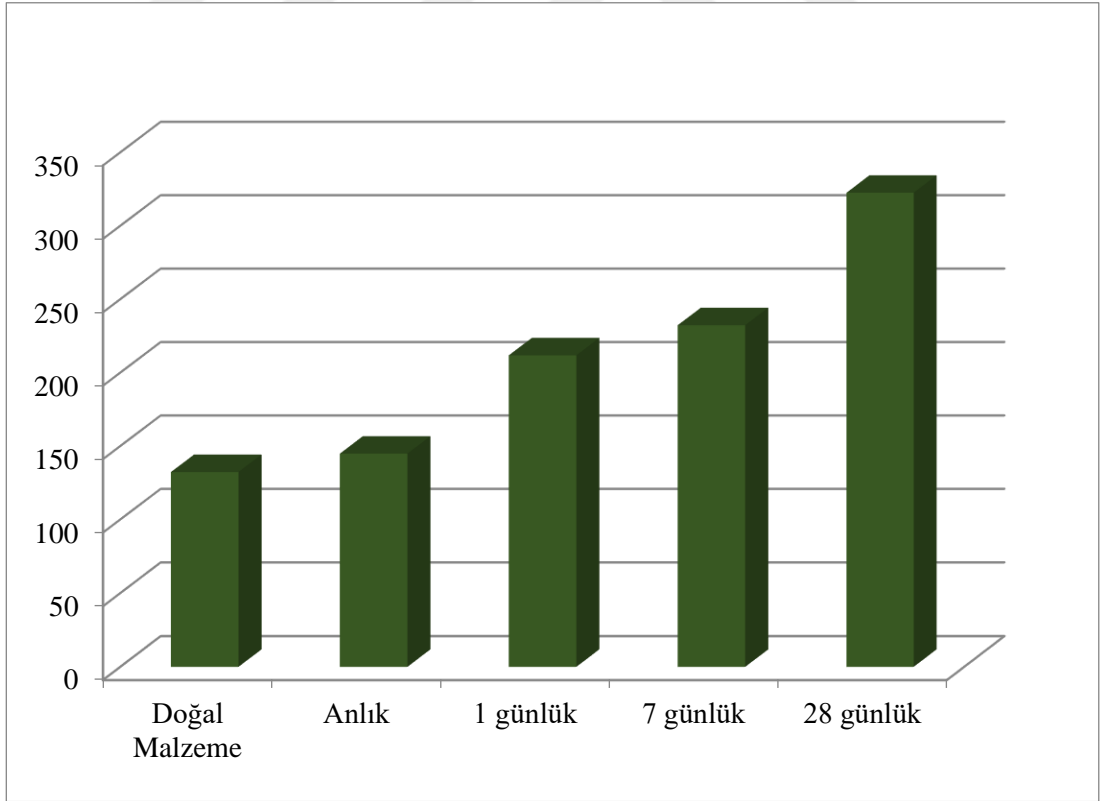
Şekil 3.15. %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.16. %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.17. %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.18. %2 sönmüş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği

Tablo 3.10. Killi zeminin %2 kireç oranındaki serbest basınç değerleri

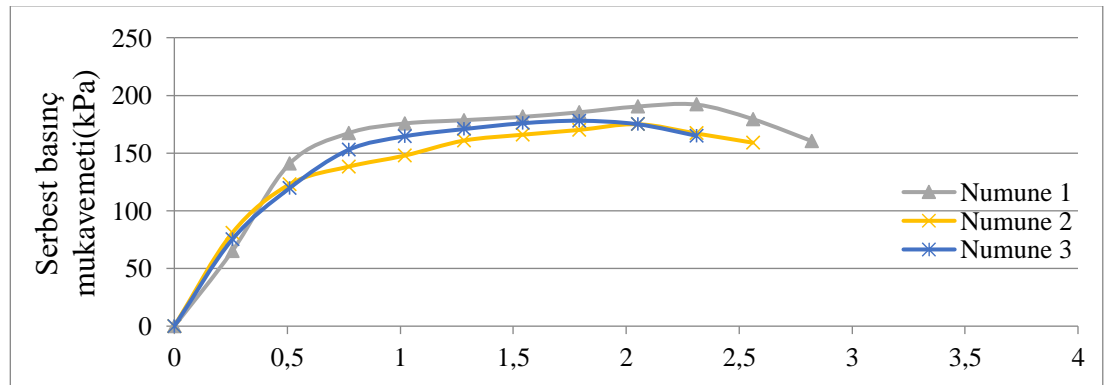
Kür süresi	Saf	Anlık	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Serbest basınç mukavemeti(kPa)	132,30	144,83	211,75	232,27	322,50

Şekil 3.18’de ve Tablo 3.10’da gösterildiği gibi killi zeminin %2 sönmüş kireç ilavesiyle mukavemet değeri 28 günlük kür süresi sonunda 132,3 kPa değerinden 322,5 kPa değerine yükselmiştir. 28 günlük sonunda mukavemet değeri yaklaşık 2,5 kat artmış ve boy kısalması da azalmıştır. Bu artış kirecin ilavesiyle zeminin dayanımlarında kür süresiyle doğru orantılı artışlar gözlemlenmektedir.

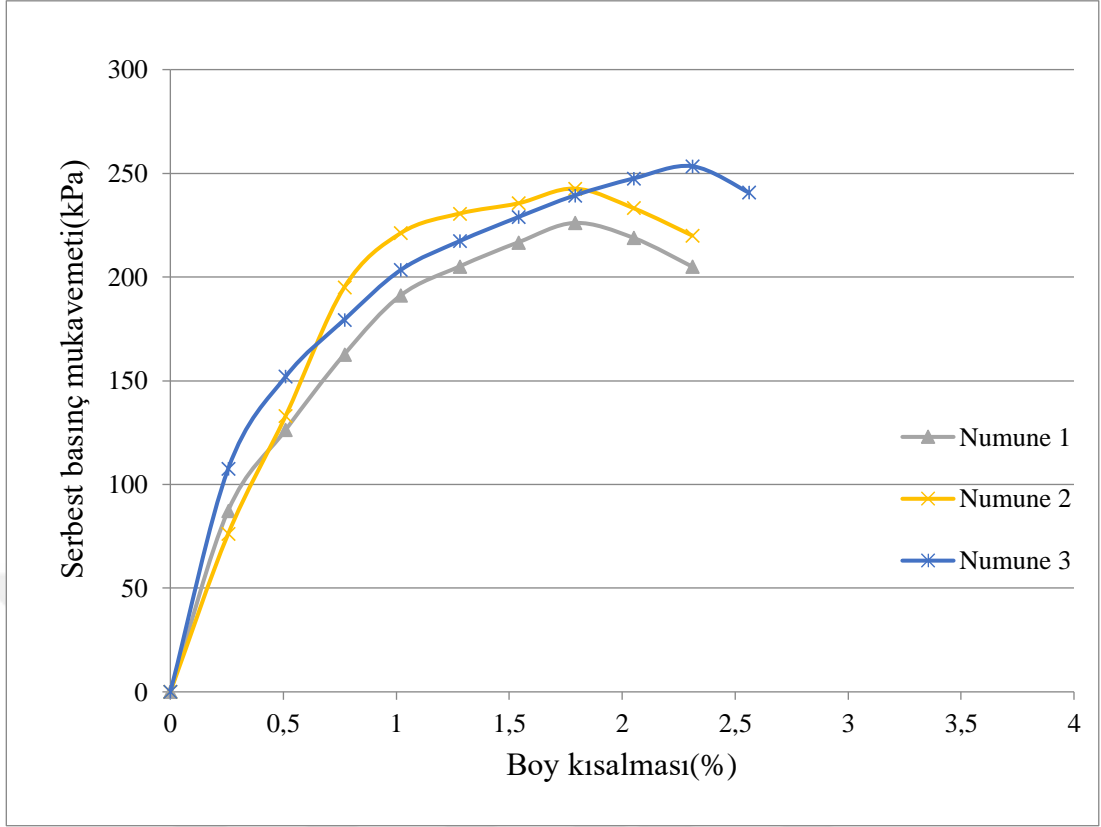
3.9.2. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireç katkıli zeminin serbest basınç grafiği

%2 kireç katkıli killi zeminin serbest basınç deneyine benzer şekilde kurutulmuş ve 40 numaralı elekten geçmiş malzeme ağırlığının %21,5 oranında su kullanılmıştır. Ayrıca sönmüş kireçten %3 oranında ve killi zeminden de yaklaşık 300 gr kullanılmıştır. Kompaksiyon deneyinde bulunan su muhtevasıyla anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Diğer deneylerde de olduğu gibi toplamda her birinden 3 numune hazırlanmıştır ve grafiğe geçirilmiştir.

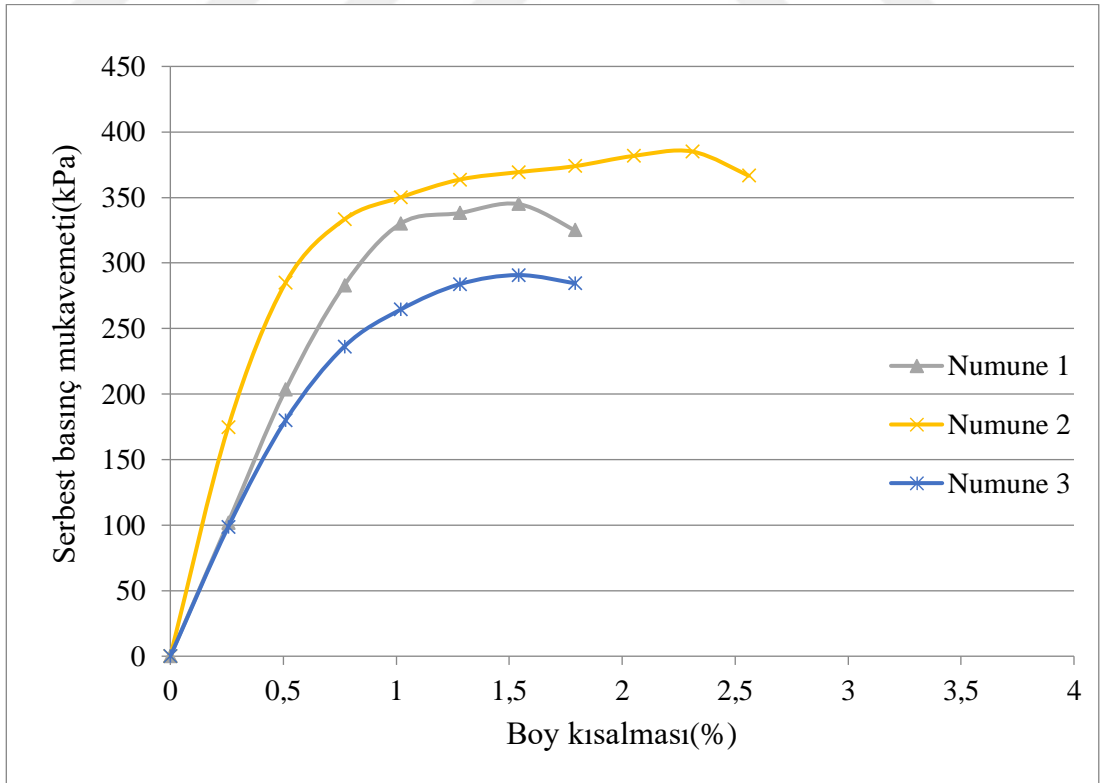
Farklı kür sürelerinde uygulanan serbest basınç deneyi; Şekil 3.19’da anlık, Şekil 3.20’de 1 günlük, Şekil 3.21’de 7 günlük, Şekil 3.22’de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kür sürelerinde değerlerin ortalaması da Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



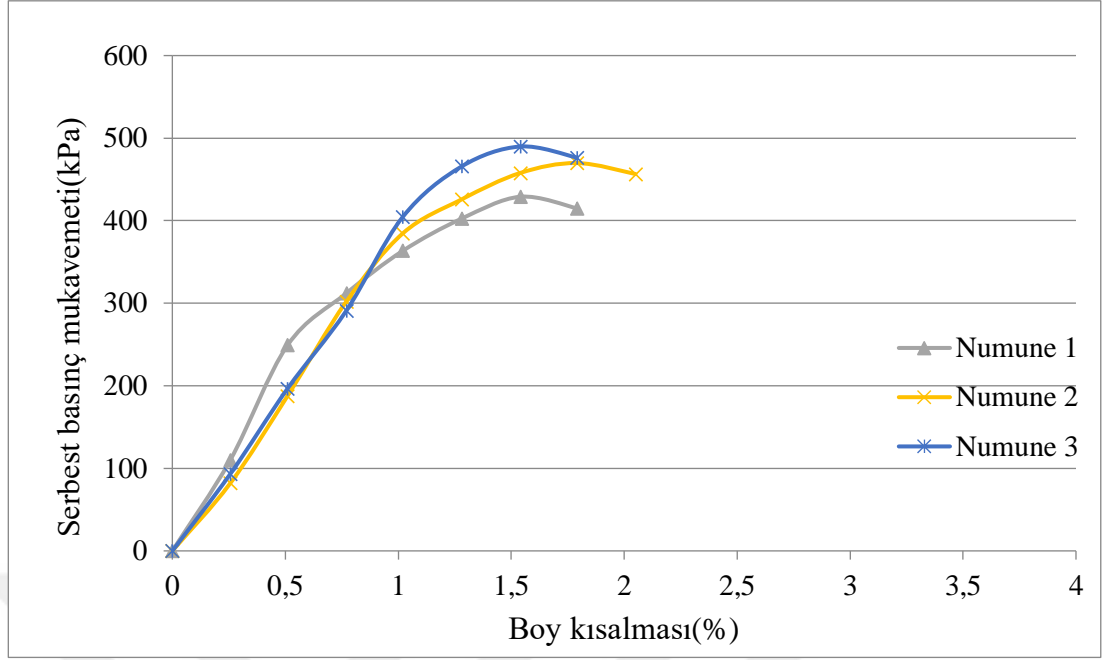
Şekil 3.19. %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği



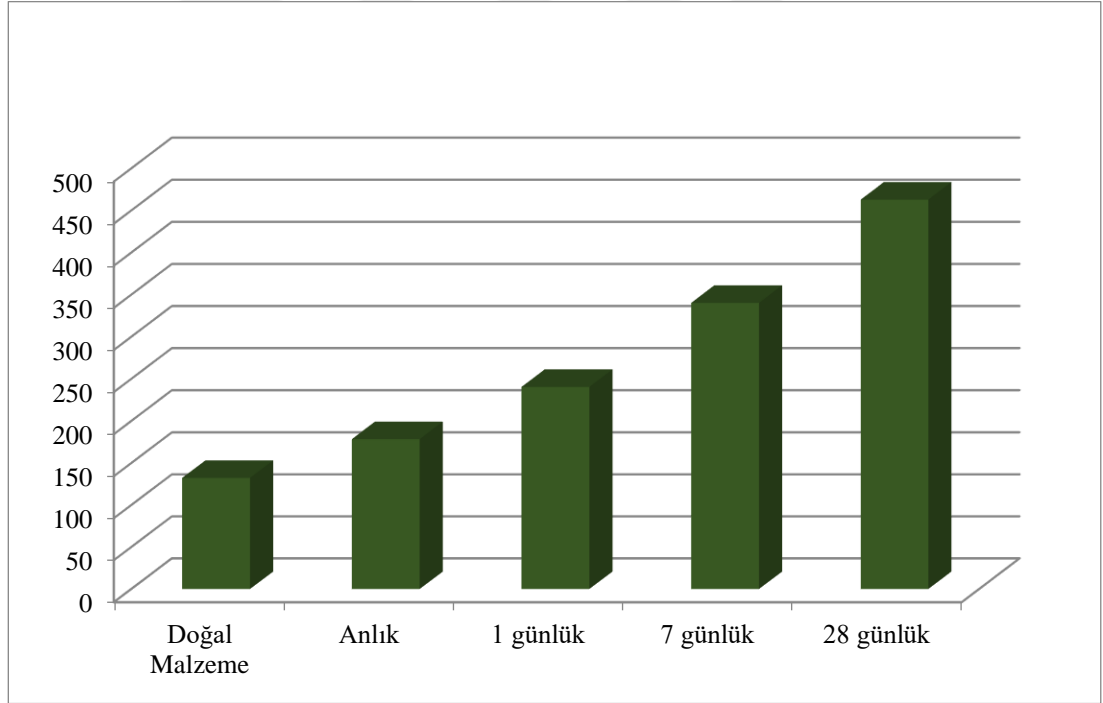
Şekil 3.20. %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.21. %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.22. %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.23. %3 sönmüş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği (kPa)

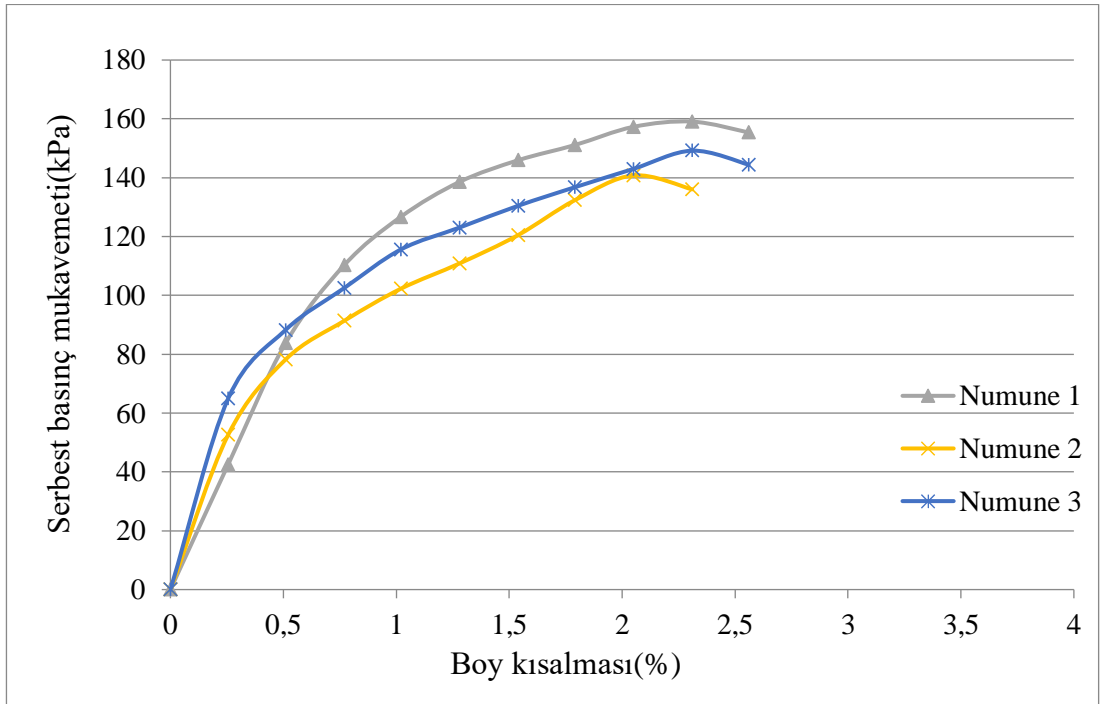
Tablo 3.11’de gösterildiği gibi killi zeminin %3 sönmüş kireç ilavesiyle mukavemet değeri 28 günlük kür süresi sonunda 132,3 kPa değerinden 462,88 kPa değerine yükselmiştir. 28 günlük sonunda mukavemet değeri yaklaşık 3,5 kat artmış ve boy kısalması da azalmıştır.

Tablo 3.11. Killi zeminin %3 kireç oranındaki serbest basınç değerleri

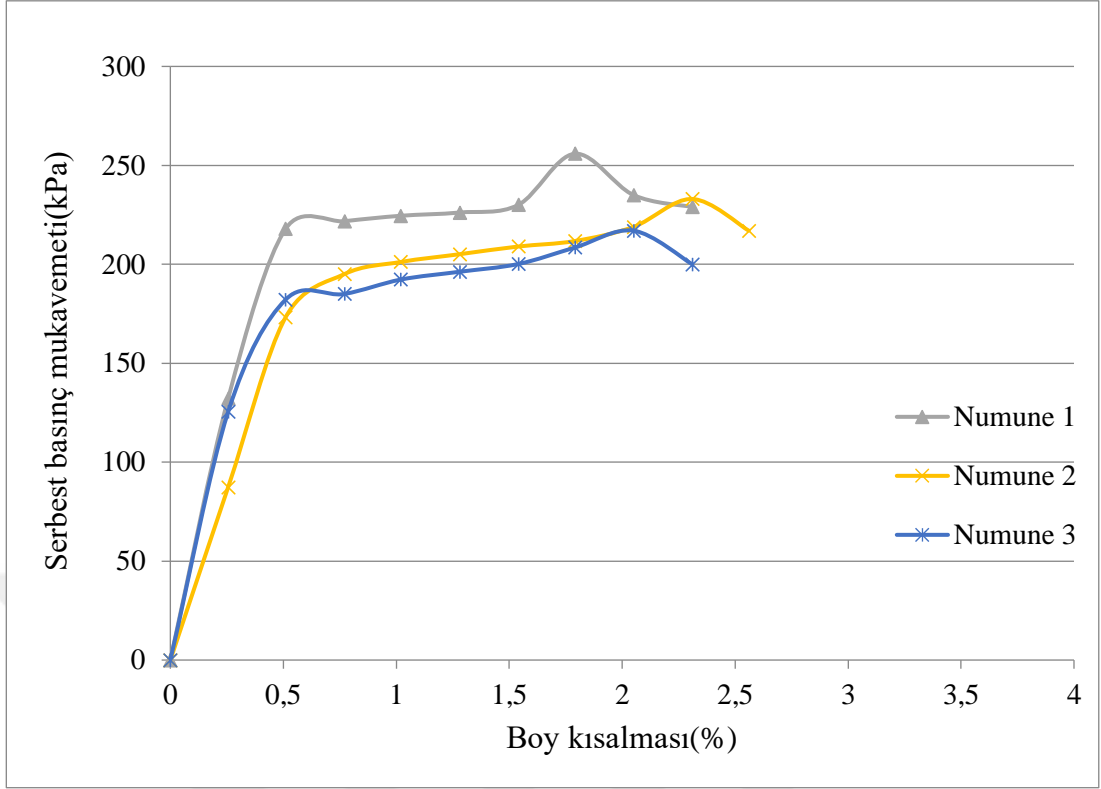
Kür süresi	Saf	Anlık	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Serbest basınç mukavemeti(kPa)	132,30	178,83	240,71	340,29	462,88

3.9.3. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireç katkılı zeminin serbest basınç grafiği

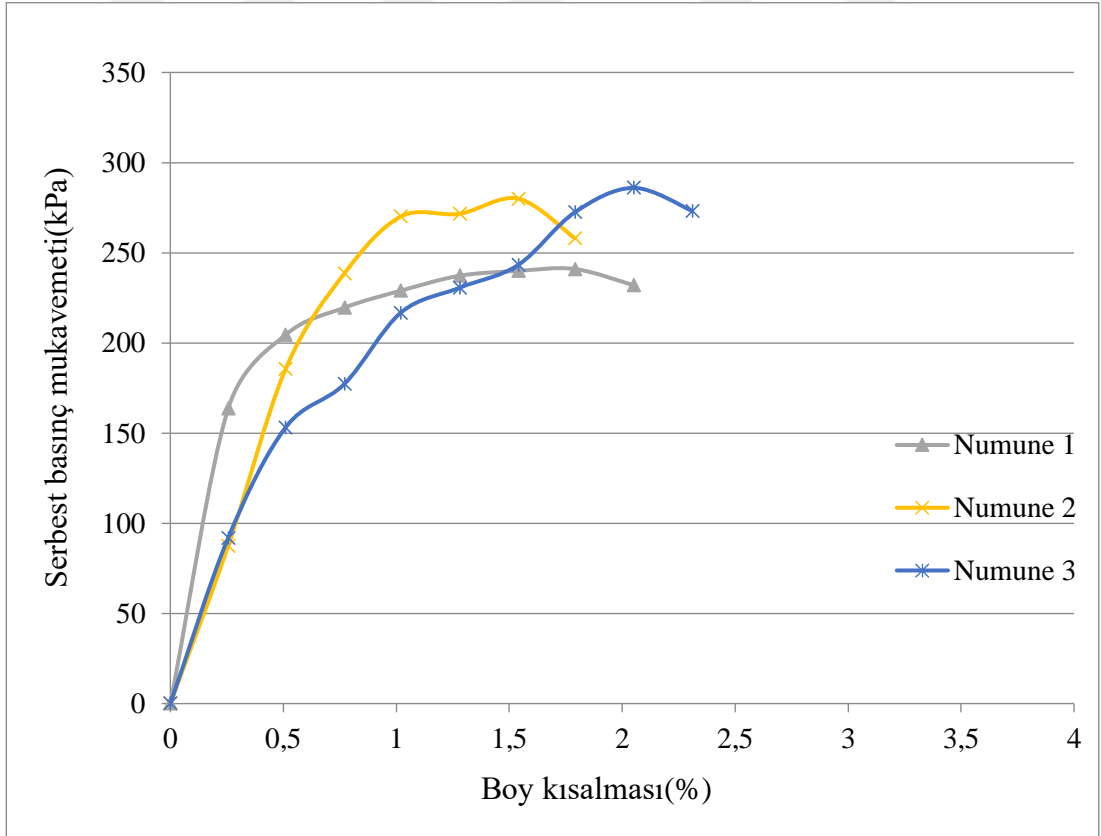
Kurutulmuş ve 40 numaralı elekten geçmiş malzeme ağırlığının %23 oranında su kullanılmıştır. Ayrıca sönmüş kireçten %4 oranında ve killi zeminden de yaklaşık 300 gr kullanılmıştır. Kompaksiyon deneyinde bulunan su muhtevasıyla anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Diğer deneylerde de olduğu gibi toplamda her birinden 3 numune hazırlanmıştır ve grafiğe geçirilmiştir. Farklı kür sürelerinde uygulanan serbest basınç deneyi; Şekil 3.24'te anlık, Şekil 3.25'de 1 günlük, Şekil 3.26'da 7 günlük, Şekil 3.27'de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kür sürelerinde değerlerin ortalaması da Şekil 3.28' de gösterilmiştir. Tablo 3.12'de de killi zeminin %4 sönmüş kireç ilavesiyle 28 günlük kür sürelerinde mukavemet değerleri gösterilmiştir.



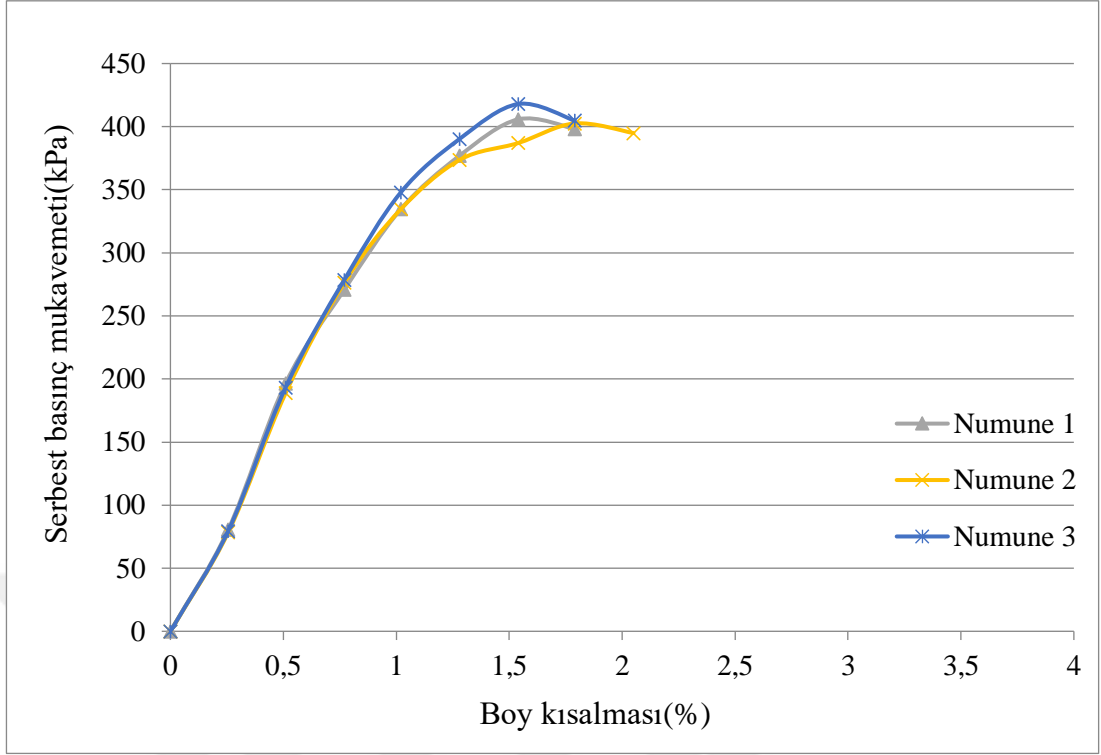
Şekil 3.24. %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği



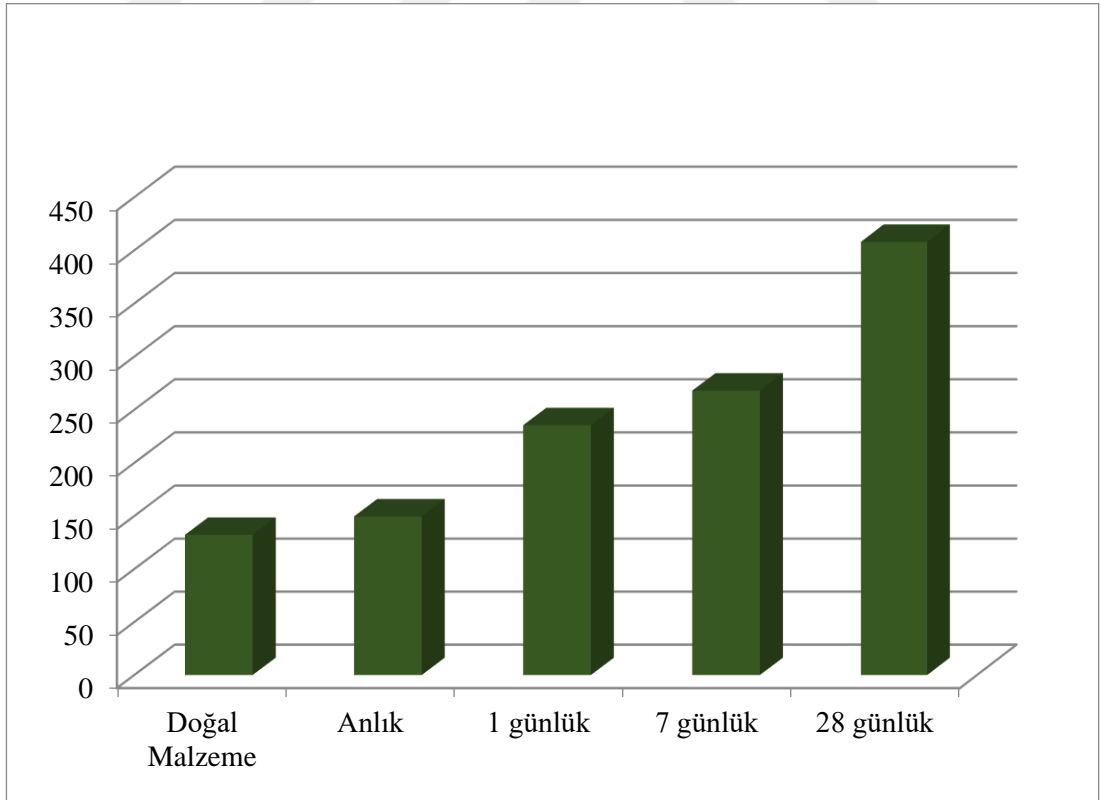
Şekil 3.25. %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.26. %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.27. %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafiği



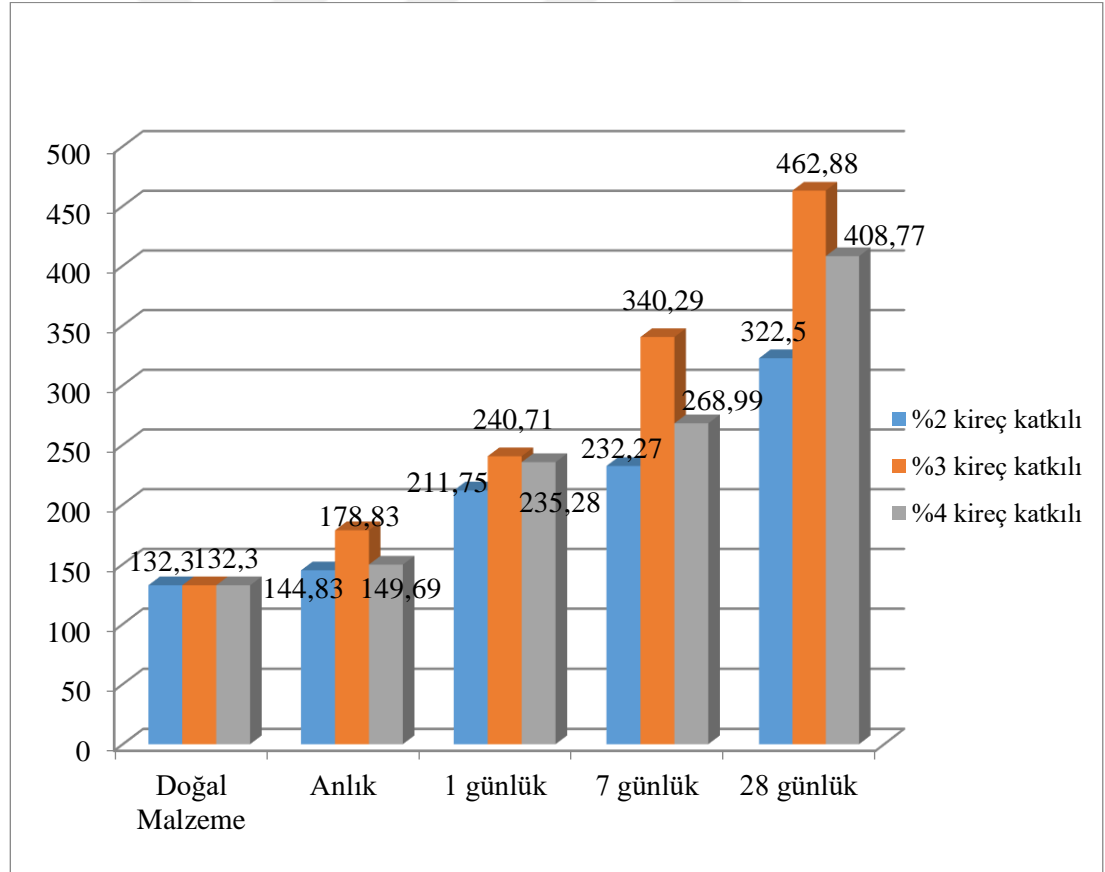
Şekil 3.28. %4 sönmüş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği (kPa)

Tablo 3.12. Killi zeminin %4 kireç oranındaki serbest basınç değerleri

Kür süresi	Saf	Anlık	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Serbest basınç mukavemeti(kPa)	132,30	149,69	235,28	268,99	408,77

Tablo 3.12’de gösterildiği gibi killi zeminin %4 sönmüş kireç ilavesiyle mukavemet değeri 28 günlük kür süresi sonunda 132,30 kPa değerinden 408,77 kPa değerine yükselmiştir. 28 günlük sonunda mukavemet değeri yaklaşık 3 kat artmış ve boy kısalması da azalmıştır. Bu artış kirecin ilavesiyle zeminin dayanımlarında kür süresiyle doğru orantılı artışlar gözlemlenmektedir.

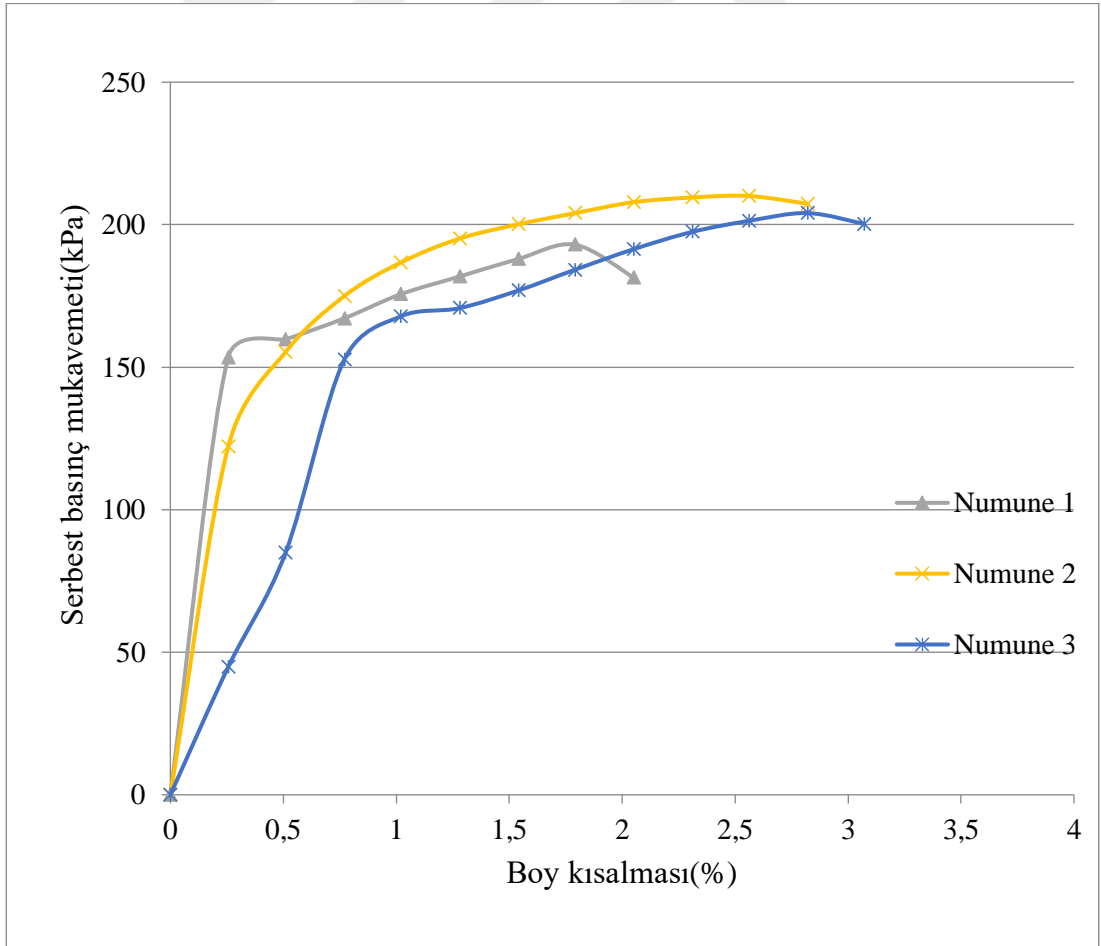
Şekil 3.29’da ise katkısız ve katkılı bütün serbest basınç deneylerin sonuçları grafik halinde gösterilmiştir. %2, %3, %4 kireç katkıların kür sürelerine göre stabilizasyona yaptığı etki grafikte gösterilmiştir.



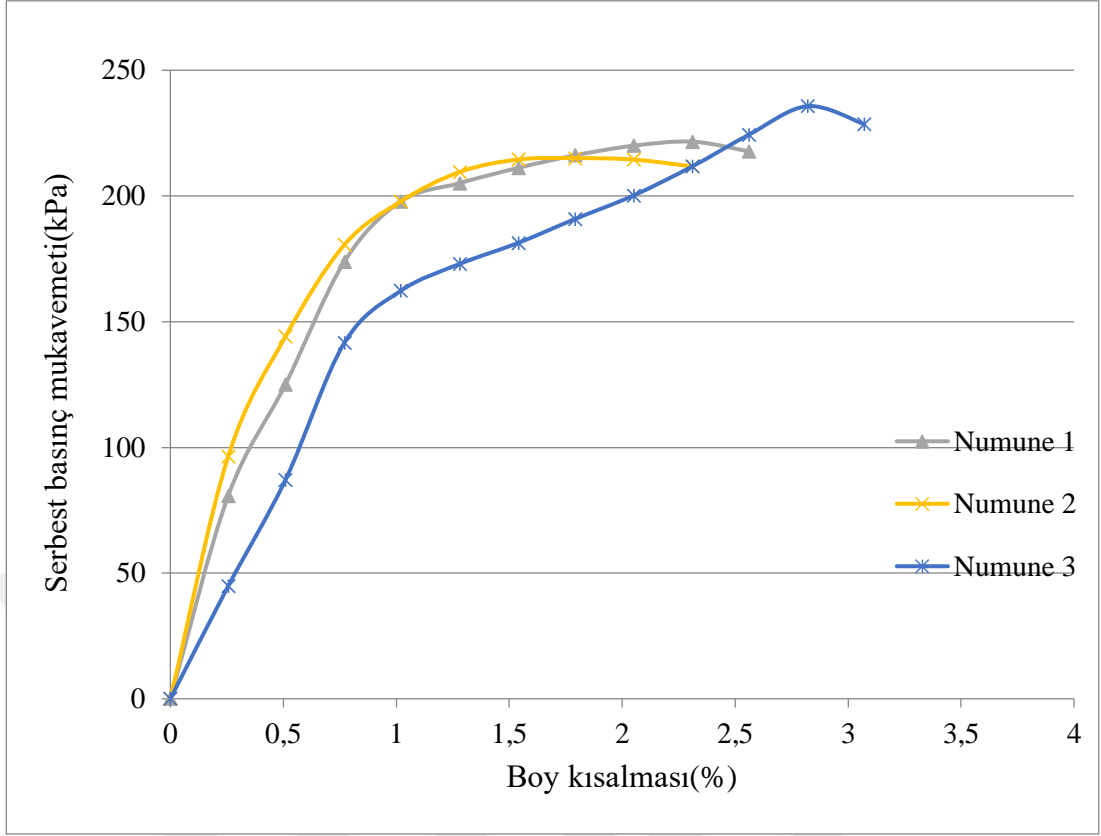
Şekil 3.29. Bütün deneylerin kür sürelerine göre ortalama mukavemet değerleri (kPa)

3.9.4. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireç katkı zeminin serbest basınç grafiği

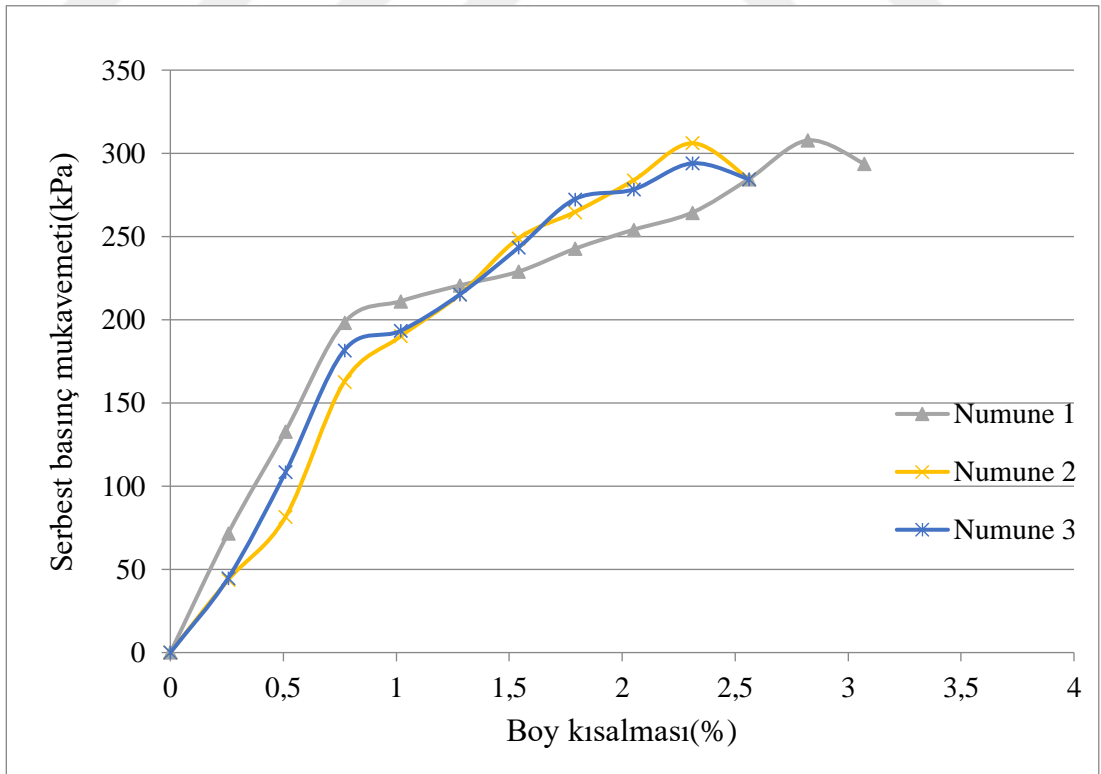
Deneyde, Yalova bölgesinden getirilen zeminin tamamen kurutulmuş hali kullanılmıştır. Zemine herhangi bir ufalama işlemi yapılmadan doğal su muhtevası eklenmiştir. Ayrıca sönmemiş kireçten %3 oranında ve killi zeminden de yaklaşık 400 gr kullanılmıştır. Baştaki deneylerde bulunan doğal su muhtevasıyla anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Toplamda her birinden 3 numune hazırlanmıştır ve grafiğe geçirilmiştir. Farklı kür sürelerinde uygulanan serbest basınç deneyi; Şekil 3.30'da anlık, Şekil 3.31'de 1 günlük, Şekil 3.32'de 7 günlük, Şekil 3.33'de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kür sürelerinde değerlerin ortalaması da Şekil 3.34'de gösterilmiştir. Tablo 3.13'de de killi zeminin %3 sönmemiş kireç ilavesiyle 28 günlük kür sürelerinde mukavemet değerleri gösterilmiştir.



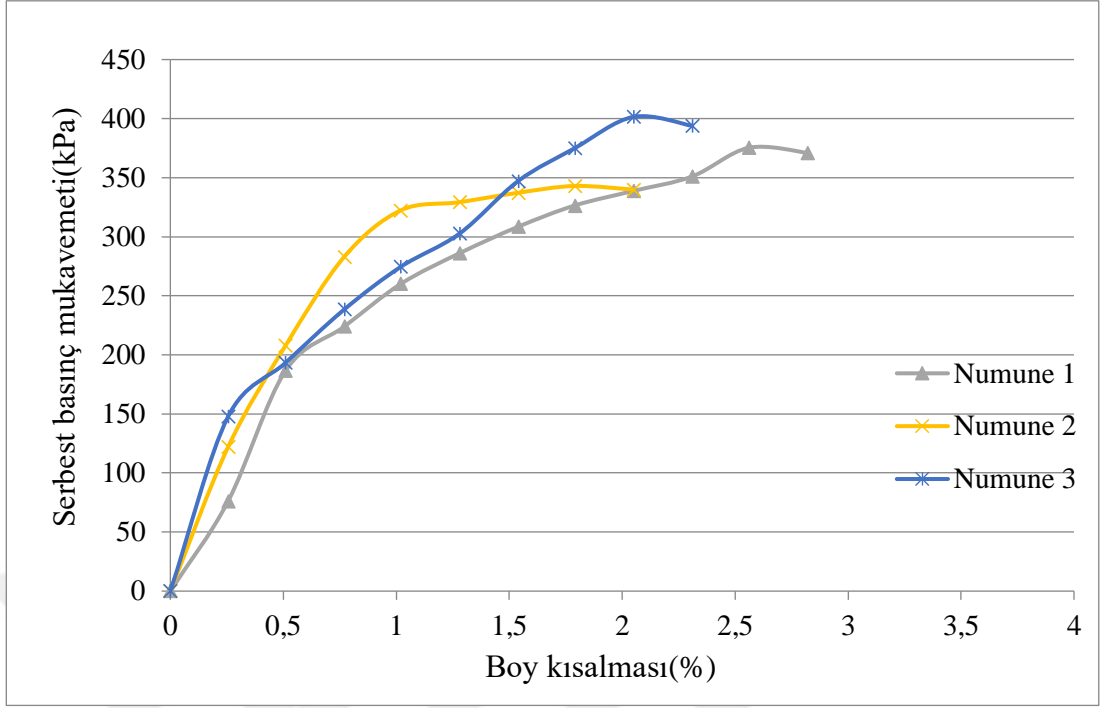
Şekil 3.30. %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafiği



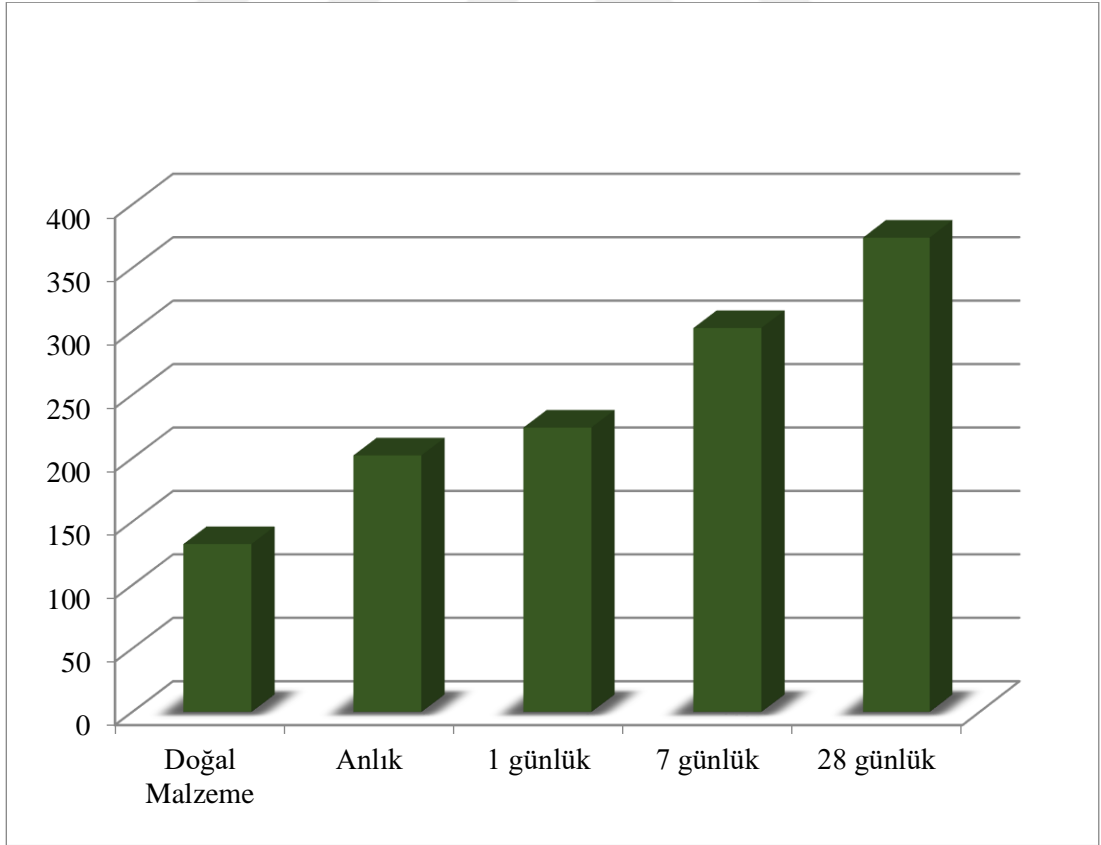
Şekil 3.31. %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.32. %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 3.33. %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafiği



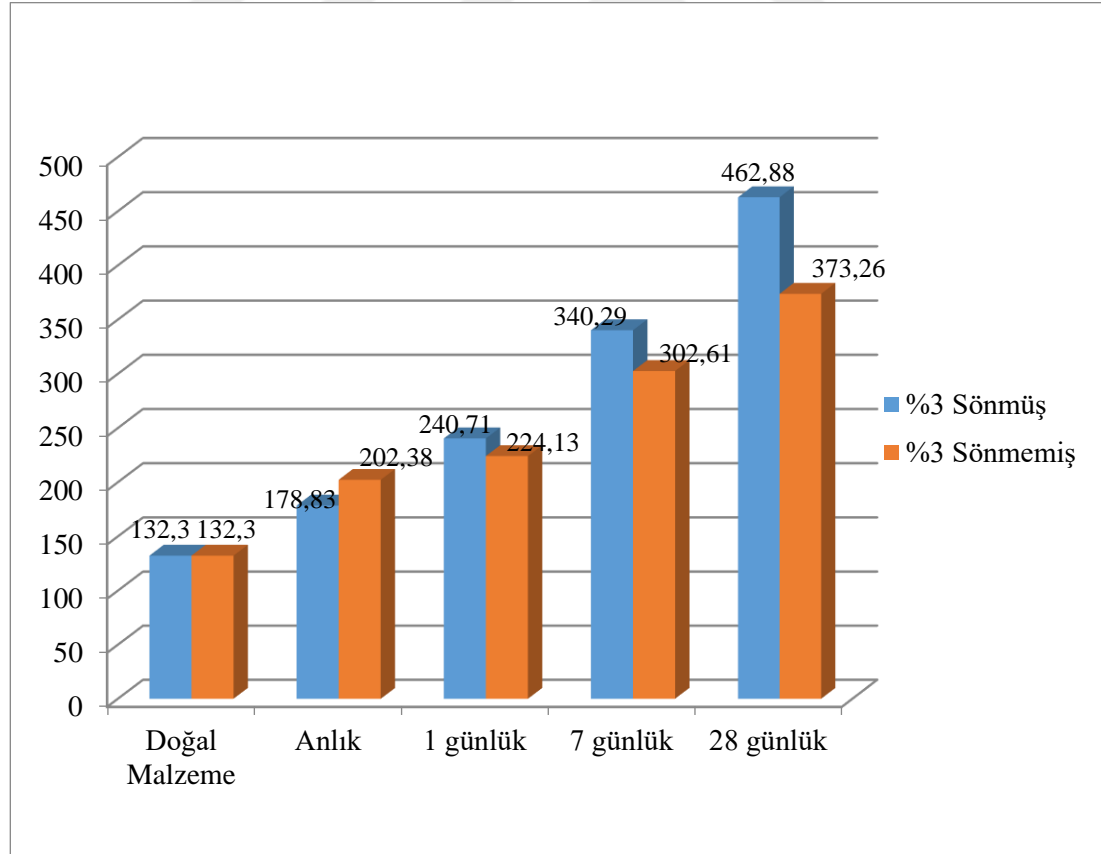
Şekil 3.34. %3 sönmemiş kireçli zeminin ortalama mukavemet değerlerin grafiği

Tablo 3.13. Killi zeminin %3sönmemiş kireç oranındaki serbest basıncı

Kür süresi	Saf	Anlık	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Serbest basınç mukavemeti(kPa)	132,30	202,38	224,13	302,61	373,26

Şekil 3.34'te ve Tablo 3.13'te gösterildiği gibi killi zeminin %2 sönmemiş kireç ilavesiyle mukavemet değeri 28 günlük kür süresi sonunda 132,3 kPa değerinden 373,26 kPa değerine yükselmiştir. 28 günlük sonunda mukavemet değeri yaklaşık 3 kat artmış ve boy kısalması da azalmıştır. Bu artış kirecin ilavesiyle zeminin dayanımlarında kür süresiyle doğru orantılı artışlar gözlemlenmektedir.

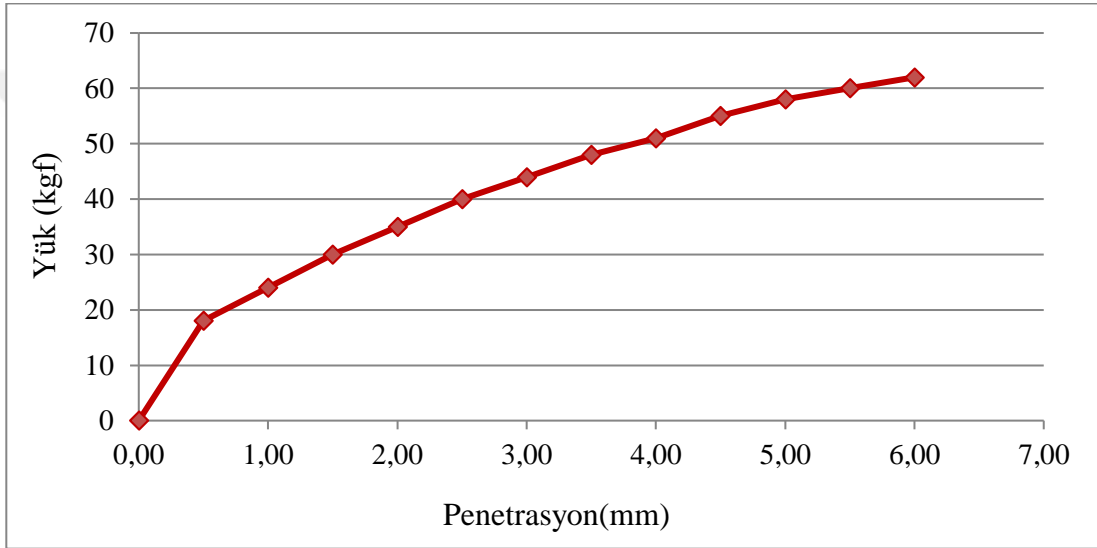
Sönmüş kireç ile yapılan deneylerde optimum kireç oranı belirlendikten sonra aynı oranda yani %3 oranında sönmemiş kireç ile de serbest basınç mukavemet değerlerine bakılmıştır. Daha sonra %3 oranındaki sönmüş ve sönmemiş kirecin serbest basınç mukavemet değerleri Şekil 3.35'teki gibi karşılaştırılmıştır.



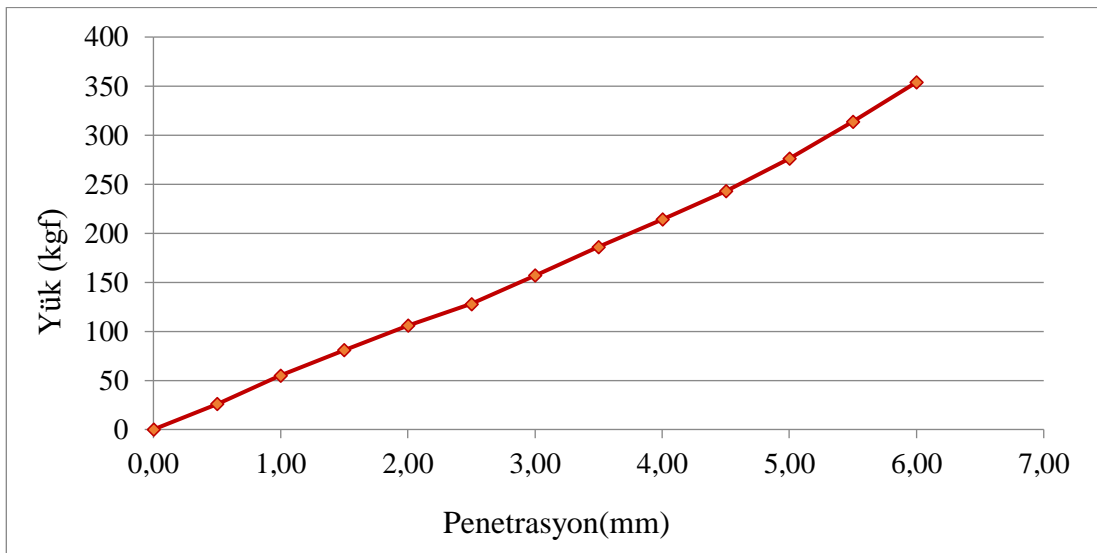
Şekil 3.35. %3 sönmüş ve %3 sönmemiş kireçli zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerlerinin karşılaştırılması

3.10. CBR Deneyi

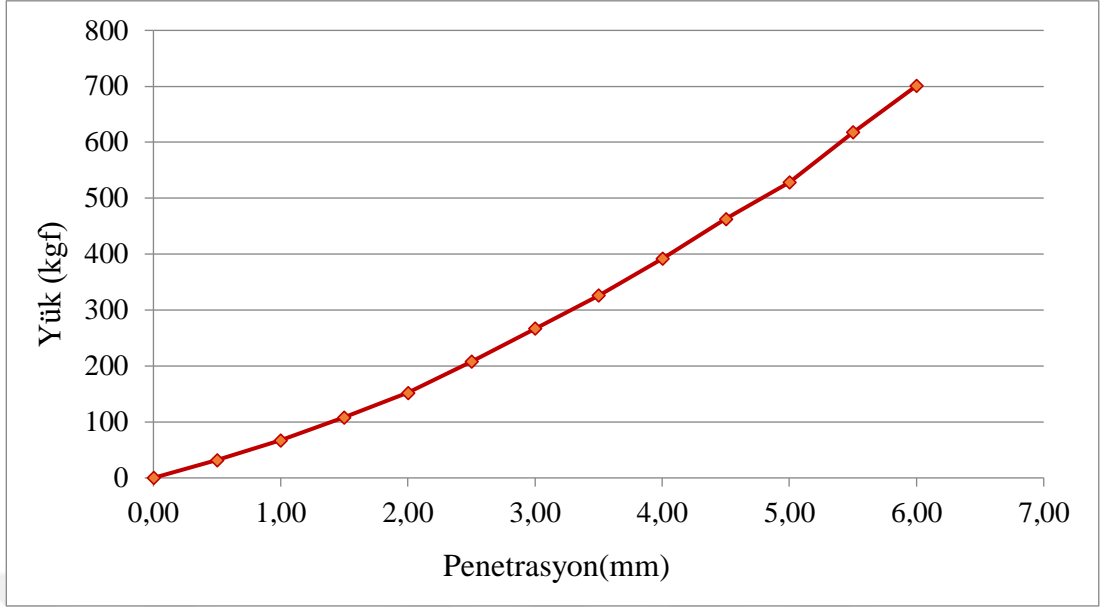
Yapılan serbest basınç deneyini teyit etmek için ve daha geçerli sonuçlar alabilmek için yaş CBR deneyi yapılmıştır. Deney doğal, %2 ve %3 sönmemiş kireçli numuneler için yapılmıştır. Deney eşit olacak şekilde 5 tabakada yapılmıştır ve 61 vuruşa denk gelecek şekilde ayarlanmıştır. Deney hem üst hem alt taraflarda her 0,5 mm'de bir okuma yapılmıştır. Doğal zeminin yaş CBR deneyi sonuçları Şekil 3.36'da, %2 kireçli zeminin Şekil 3.37'de ve %3 kireçli zeminin de Şekil 3.38'de gösterilmiştir. Yükleme kıyaslamaları da Şekil 3.39'da gösterilmiştir.



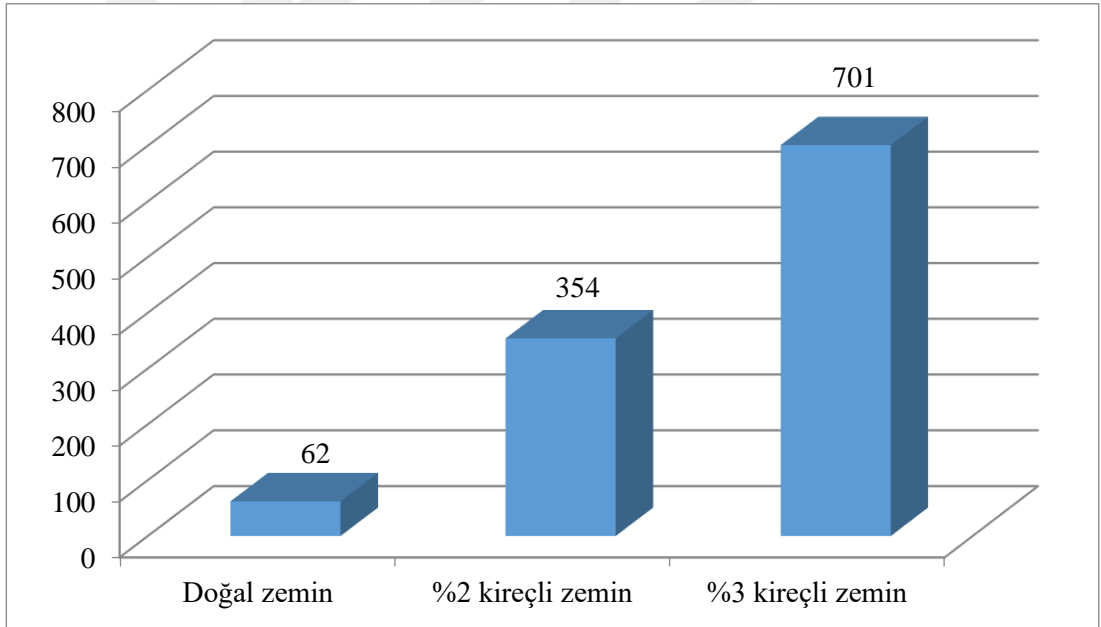
Şekil 3.36. Doğal zeminin CBR deneyi



Şekil 3.37. %2 kireçli zeminin CBR deneyi



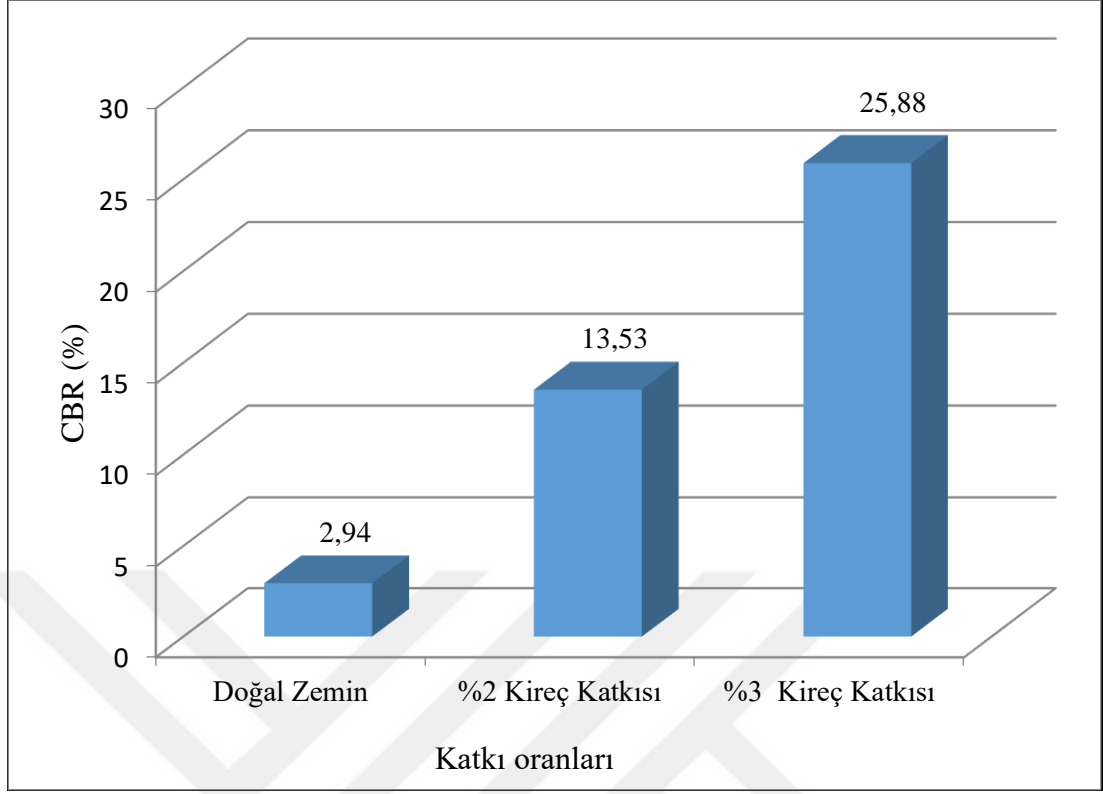
Şekil 3.38. %3 kireçli zeminin CBR deneyi



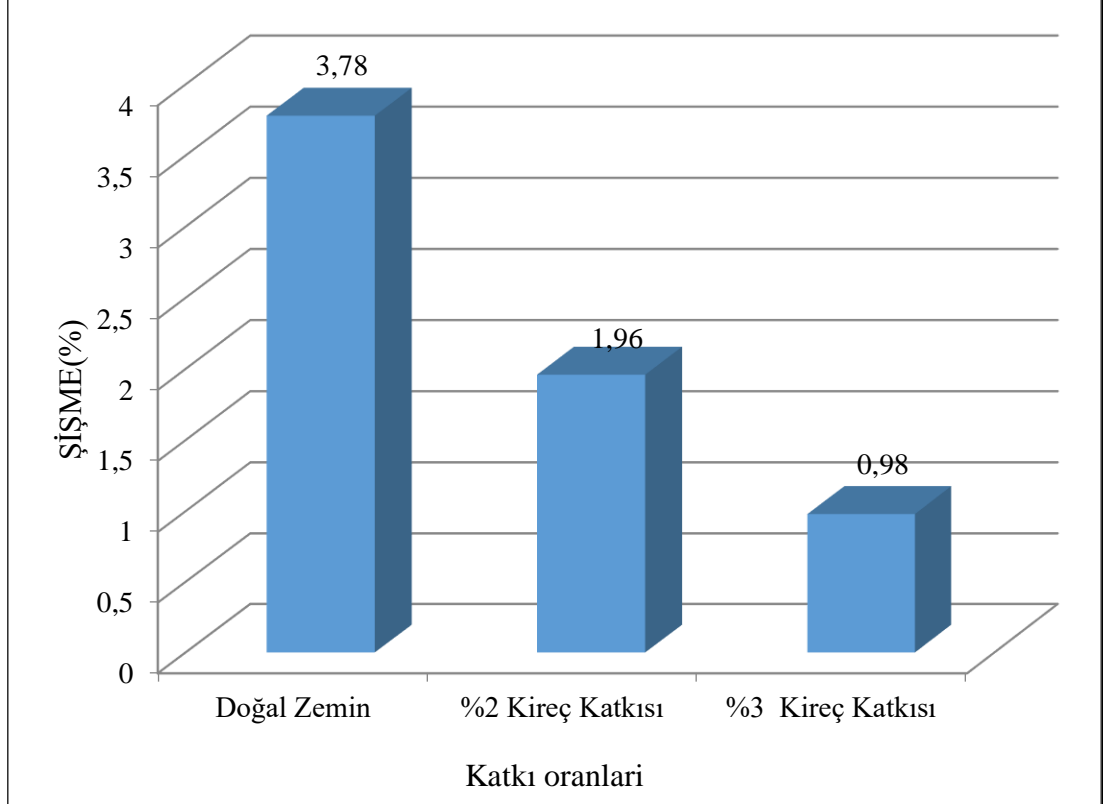
Şekil 3.39. CBR deney Yükleme sonuçları (kgf)

Doğal killi zemin için yaş CBR değeri 2,94 iken %3 kireç malzemesinin ilavesiyle bu değer 25,88'e yükselmiştir. Doğal malzeminin mukavemet değerinde 11 kat artış gözlemlenmiştir. Şişme miktarı ise % 3,78'den % 0,98'e düşmüştür.

Şekil 3.40'da CBR deneyin yaş değerleri sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.41'de ise deneyin şişme eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Kireç oranına göre CBR değerleri (%)



Şekil 3.41. CBR deneyi şişme değerleri(%)

3.11. Plaka Yükleme Deneyi

Plaka yükleme deneyi zeminin taşıma gücünü belirlemek amacıyla yapılan bir arazi deneyidir. Bu deney rijit bir plakaya uygulanan yük ile birlikte, plakanın yapacağı oturmanın ve göçmenin ölçülmesine dayanmaktadır. Deneyin uygulanması sırasında 30 cm çapında ve 2,5 cm kalınlığında dairesel formda çelik plaka kullanılmaktadır. Plaka, zemin yüzeyine düzgün bir biçimde yerleştirilir. Plaka oturmalardan etkilenmeyecek şekilde mesnetlenir.

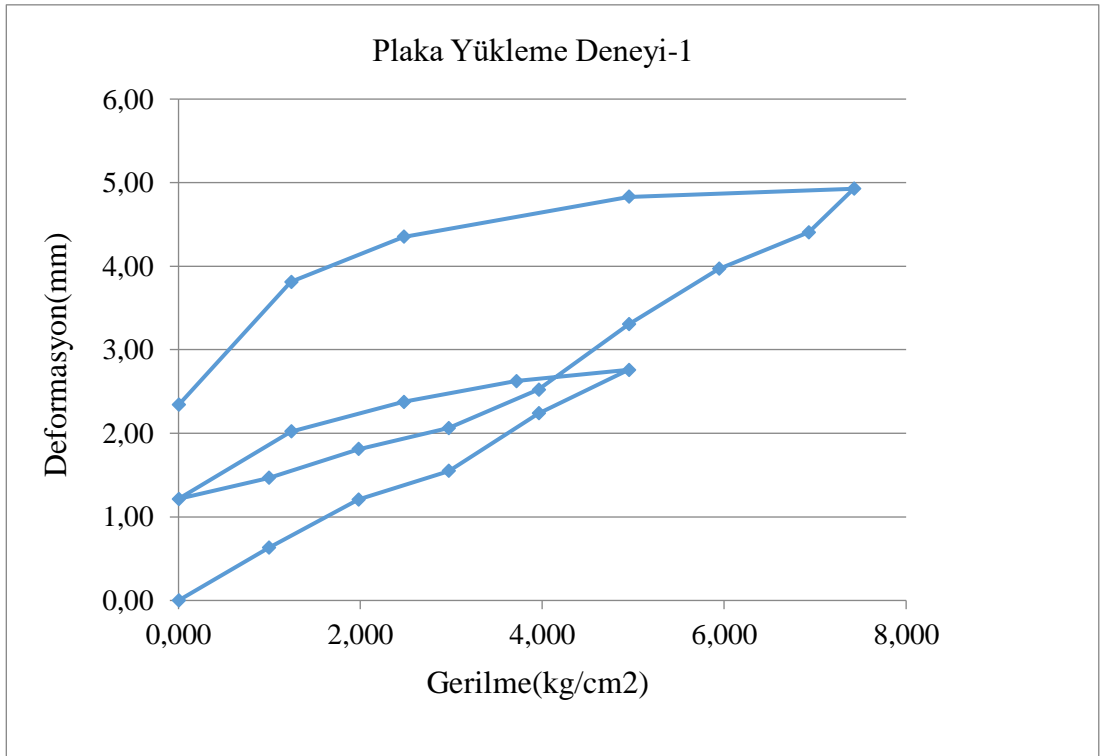
Deneyin uygulama aşamasında deplasman ölçen hassas saat plaka oturmalarının ölçülecek biçimde konumlandırılır. Daha sonra plakanın yüklenmesi işlemine geçilir. Burada plakaya ve dolaylı olarak da zemine kademeli bir şekilde yükler uygulanır. Uygulanan her yük kademesinde meydana gelen oturmalar sona erinceye kadar beklenir.

Deney istenilen gerilme seviyelerine veya sistemin ulaşabileceği değerlere yakalandığında son verilir. Bu deneyde yükler istenildiğinde kademeli olarak da uygulanabilmektedir. Deneyde seçilecek reaksiyonel kuvvet çalışmada kullanılan gerilme seviyelerine uygun seçilmektedir.

Deney sırasında plakanın yerinde oynamayacak şekilde ve uygulanan gerilmenin sabit kalması kontrol edilmelidir. Ölçüm cihazının kalibrasyonu yapılmış ve yükleme ve boşaltma sırasında oluşan deformasyonları doğru ölçülmelidir. Plaka yükleme deneyinde yük kademeleri için geçen süre zemin tabakalarının özelliklerine göre değişmektedir. Örneğin küçük yük kademeleri için oturmanın sabit hale gelmesi 10-15 dakika içerisinde gerçekleşirken bazı durumlarda ise bu süre 1 saatin üzerine çıkabilmektedir. Tabaka üzerinde yapılan plaka yükleme testinin sonuçları Şekil 3.42 ve Şekil 3.44'de verilmiştir. Şekil 3.43 ve Şekil 3.45'te plaka yükleme deneyine ait yük-oturma eğrileri verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi zemin tipi ve sıkılığının değişmesi plaka yükleme deneyinden farklı sonuçların elde edilmesine yol açtığı görülmektedir. Bu durum plaka yükleme deneyinden elde edilen sonuçların zeminin özelliklerine bağlı olduğunu doğrulamaktadır.

PLAKA YÜKLEME DENEYİ 1						
Çap (cm)			30	Alan (cm ²)		707,14
Basınç (Bar)	Kuvvet (Kg)	Deformasyon Okuması 1(mm)	Deformasyon Okuması 2(mm)	Deformasyon Okuması 3(mm)	Deformasyon Okuması Ortalama (mm)	Gerilme (kg/cm ²)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
20	700	0,60	0,66	0,63	0,63	0,990
40	1400	1,14	1,27	1,21	1,21	1,980
60	2100	1,50	1,60	1,55	1,55	2,970
80	2800	2,14	2,34	2,24	2,24	3,960
100	3500	2,67	2,79	2,82	2,76	4,950
75	2625	2,52	2,72	2,63	2,62	3,712
50	1750	2,25	2,52	2,36	2,38	2,475
25	875	2,01	2,02	2,03	2,02	1,237
0	0	1,27	1,14	1,23	1,21	0,000
20	700	1,50	1,42	1,48	1,47	0,990
40	1400	1,82	1,79	1,82	1,81	1,980
60	2100	2,08	2,03	2,08	2,06	2,970
80	2800	2,55	2,48	2,54	2,52	3,960
100	3500	3,34	3,26	3,31	3,30	4,950
120	4200	4,02	3,90	3,99	3,97	5,939
140	4900	4,45	4,35	4,42	4,41	6,929
150	5250	4,96	4,88	4,94	4,93	7,424
100	3500	4,87	4,78	4,84	4,83	4,950
50	1750	4,49	4,20	4,36	4,35	2,475
25	875	4,01	3,60	3,83	3,81	1,237
0	0	2,44	2,23	2,35	2,34	0,000

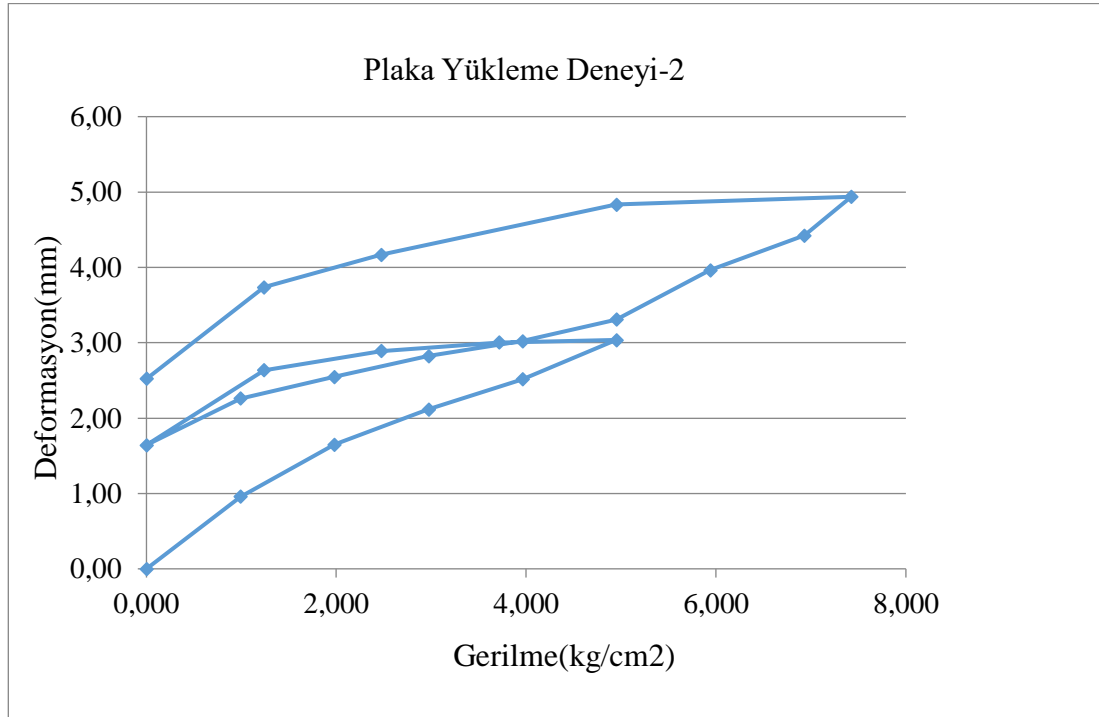
Şekil 3.42. Plaka test yükleme sonuçları-1



Şekil 3.42. Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği-1

PLAKA YÜKLEME DENEYİ 2						
Çap (cm)			30	Alan (cm ²)		707,14
Basınç (Bar)	Kuvvet (Kg)	Deformasyon Okuması 1(mm)	Deformasyon Okuması 2(mm)	Deformasyon Okuması 3(mm)	Deformasyon Okuması Ortalama (mm)	Gerilme (kg/cm ²)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
20	700	0,76	1,09	1,02	0,96	0,990
40	1400	1,09	2,42	1,44	1,65	1,980
60	2100	1,61	2,84	1,90	2,12	2,970
80	2800	2,05	3,29	2,21	2,52	3,960
100	3500	2,72	3,77	2,62	3,04	4,950
75	2625	2,69	3,73	2,59	3,00	3,712
50	1750	2,50	3,66	2,51	2,89	2,475
25	875	2,08	3,46	2,37	2,64	1,237
0	0	1,10	2,76	1,06	1,64	0,000
20	700	1,75	2,96	2,07	2,26	0,990
40	1400	2,03	3,34	2,27	2,55	1,980
60	2100	2,39	3,57	2,51	2,82	2,970
80	2800	2,63	3,78	2,65	3,02	3,960
100	3500	2,92	4,14	2,86	3,31	4,950
120	4200	3,95	4,65	3,29	3,96	5,939
140	4900	4,75	5,06	3,46	4,42	6,929
150	5250	5,10	6,16	3,55	4,94	7,424
100	3500	5,00	6,03	3,47	4,83	4,950
50	1750	4,54	4,76	3,20	4,17	2,475
25	875	4,10	4,26	2,85	3,74	1,237
0	0	2,91	2,99	1,67	2,52	0,000

Şekil 3.44. Plaka test yükleme sonuçları-2



Şekil 3.45. Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği-2

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmaları kapsamında, killi bir zemine farklı oranlarda sönmüş kireç katkısı yapılarak zemindeki iyileştirmeler araştırılmıştır. Ayrıca bulunan optimum sönmüş kireç oranıyla aynı oranda sönmemiş kireç ile de mukavemet değerlerine bakılmıştır. Çalışmaların yaş CBR deneyine kadar olan kısmı laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Plaka yükleme deneyleri de arazi ortamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sönmüş ve sönmemiş kirecin killi zeminlere mukavemet, taşıma gücü ve dayanım açısından etkilerine bakılmıştır ve mühendislik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir;

- Kireç katkılı killi zeminlerde yapılan kıvam limitleri deneyi sonucunda, doğal zemine göre likit limit ve plastisite indisinde azalma plastik limitte ise artma gözlemlenmiştir.
- Kireç katkılı killi zeminlerde doğal zemine göre optimum su muhtevasında artış, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında ise azalış olduğu gözlemlenmiştir.
- Sönmüş ve sönmemiş kireç katkılı olanlarda katkılı olmayanlara göre anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Zamana bağlı deformasyonlar da ise belirli oranda azalma görülmüştür.
- Sönmüş kireç numunelerinin serbest basınçlarında doğal malzemeye göre en iyi mukavemet artışı %3 oranındaki kireçli numunelerde görülmüştür. Yaklaşık 4 kat artmıştır. Bu nedenle iyileştirme için en uygun oranın %3 olduğu belirlenmiştir.
- %3 oranındaki sönmüş ve sönmemiş kireçle yapılan serbest basınç deneylerinde mukavemet değerlerinde uzun vadede sönmüş kireç daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Doğal kil malzeme için yaş CBR değeri %2,94'ten %3 sönmemiş kireç katkısıyla %25,88'e yükselmiştir. Doğal malzemenin yaş CBR değerinde yaklaşık 9 kat artış gözlemlenmiştir. Buradan dayanımda ciddi oranında artışlar elde edildiği görülmüştür. Şişme miktarı %3,78'den %0,98'e düşmüştür. Bu sonuçla, kirecin şişme miktarını azalttığı belirlenmiştir.

- Doğal malzemenin kıvam limitleri değerleri ve dane boyut analizlerine göre yüksek plastisite özelliğine sahip bir kil malzemesi olduğu ve herhangi bir inşaat temel altyapısı olarak kullanılamayacağı ve zeminin iyileştirilmesi gerektiği kanaatine varılmıştır.
- Yapılan çalışmalar sonucunda zayıf geoteknik mühendislik özelliklerine sahip bir zeminin %3 kireç katkıyla iyileştirmeler sonucunda inşaat sahası için kullanılabilir bir hale gelebileceği gözlemlenmiştir.
- Laboratuvar ortamında Serbest basınç deneyleri sonucunda her ne kadar uzun sürelerde sönmüş kireç sönmemiş kirece göre daha iyi mukavemet değerleri vermiş olsa da su muhtevası yüksek arazi şartlarında sönmemiş kirecin söndürme özelliğinden dolayı daha etkili olacağı kanaatine varılmıştır.
- Doğal zeminde sönmemiş kireçle yapılan söndürme işlemlerinde doğal su muhtevası değerlerinde yaklaşık %20-25 arasında kuruma meydana gelmiştir.
- İyileştirme yapılacak zeminin su muhtevası yüksek olmasına rağmen sönmemiş kireç ile yapılan iyileştirmelerde inşaat temel tabanı için istenilen CBR verileri sağlanmıştır. Daha yüksek sönmemiş kireç katkısıyla daha yüksek CBR değerlerine ulaşabileceği gözlemlenmiştir.
- Doğal zemin, yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevasına sahip olduğundan şişme potansiyeli yüksek bir malzeme olduğu görülmüştür. Ancak kireç katkı malzemesinin ilavesiyle şişme potansiyelin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Ayrıca petrol ürünlerinin pahalı olduğu ülkelerde inşaat imalat kalemlerinde nakliye masrafları ekonomik açıdan büyük önem arz ettiğinden; mekanik iyileştirmelerde yapılan zayıf zeminin kaldırılması, inşaat sahasından uzaklaştırılması, taş ocağından dolgu malzemesinin inşaat sahasına getirilmesi ve mekanik malzemenin serilmesi gibi birçok işlem yerinde kireç katkısı ile yapılan iyileştirmelerde yapılmayacağı için inşaat masrafları açısından ciddi bir ekonomik avantaj sağlayacağı ve yerinde yapılan iyileştirmelerde daha az makine kullanıldığı için düşük seviyede yakıt tüketimi olacağı ve bu sebepten çevrenin daha az kirleneceği kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Çetin A. Y., Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerinin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 295471.
- [2] Kızılcılık M. M., Yüksek Plastisiteli Kilin Kireç İle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 275771.
- [3] Kılıç G., Çimento ile Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 213300.
- [4] Kamal A.N., Kireç ve Uçucu Kül İle Stabilize Edilmiş Killerin Yol Üstyapı Malzemesi Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 325610.
- [5] Tüylüce F., deniz Killerinin Kireç Stabilizasyonu İle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 275774.
- [6] Scheffer F., Schachtschabel P., *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16th ed., Springer Spectrum, German, 1970.
- [7] Doru M. H., Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2014, 373892.
- [8] URL1: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kil> (Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2019).
- [9] Tumluer G., Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006, 6001.
- [10] Öntürk K., Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2011, 287312.
- [11] Küçükali Ö., Kireç ve Jipsin, Üst Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) Şişme ve Dayanım Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011, 299630.
- [12] Şengül E., Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu Ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010, 270694.

- [13] Özaydın K., *Zemin Mekaniği*, 1. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [14] Aytekin M., *Deneysel Zemin Mekaniği*, 1. Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara, 2004.
- [15] Çakılcıoğlu İ., Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007, 216270.
- [16] ASTM 1194-72, Standart Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings, *ASTM*, Philadelphia, 1987.
- [17] T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolu Teknik Şartnamesi 2006*, Yayın No: 267, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 2006.
- [18] Kavak A., The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996, 50492.
- [19] Sarsılmaz O. M., Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sınıflandırılması, İncelenmesi, Değerlendirilmesi Ve Anılan Yöntemlerin Seçilme Kriterleri Üzerine Kapsamlı Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2017, 498028.
- [20] Alkaya D., Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2002, 128256.
- [21] Uzuner B. A., *Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği*, 1. Baskı, Derya Yayınevi, Ankara, 2007.
- [22] Can B., Sülfat İçeriği ve Sıkıştırma Su Muhtevasının Killi Zeminlerin Kireç Stabilizasyonuna Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017, 485280.
- [23] Cömert A. T., Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonuna Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2005, 168014.
- [24] Ingles O. G., Metcalf J. B., *Soil Stabilization: Principles and Practice*, 7th ed., Ejge, Sydney, 1972.
- [25] Bağrıaçık B., Ulaşım Yapıları Temel/Alt Temel Zeminlerinin Kireçle Stabilizasyonu, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2017, 32(1), 39-47.
- [26] Yıldırım S., *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, 1. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2002.
- [27] Saitoh S., Experimental Study of Engineering Properties of Cement Improved Ground By The Deep Mixing Method, PhD Thesis, Nihon University, Faculty of Engineering, 1988.

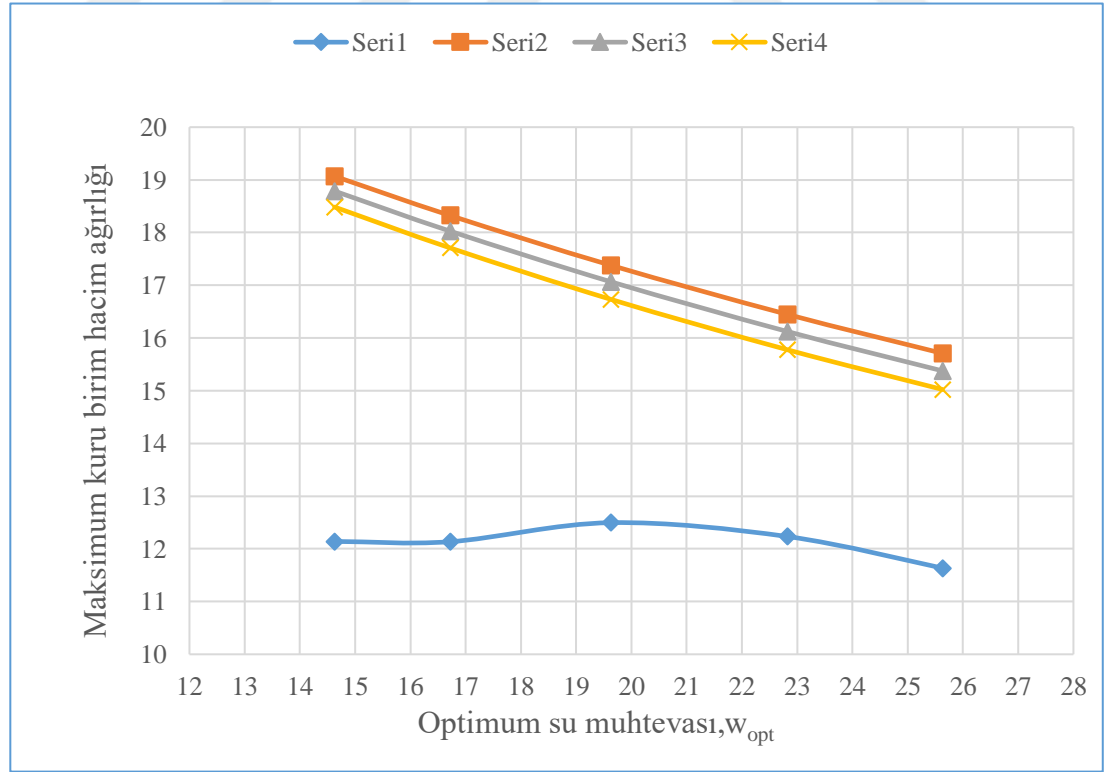


EKLER

Ek-A Kompaksiyon deneyleri

Tablo A.1. %2 kireç katkılı zeminin kompaksiyon deneyi

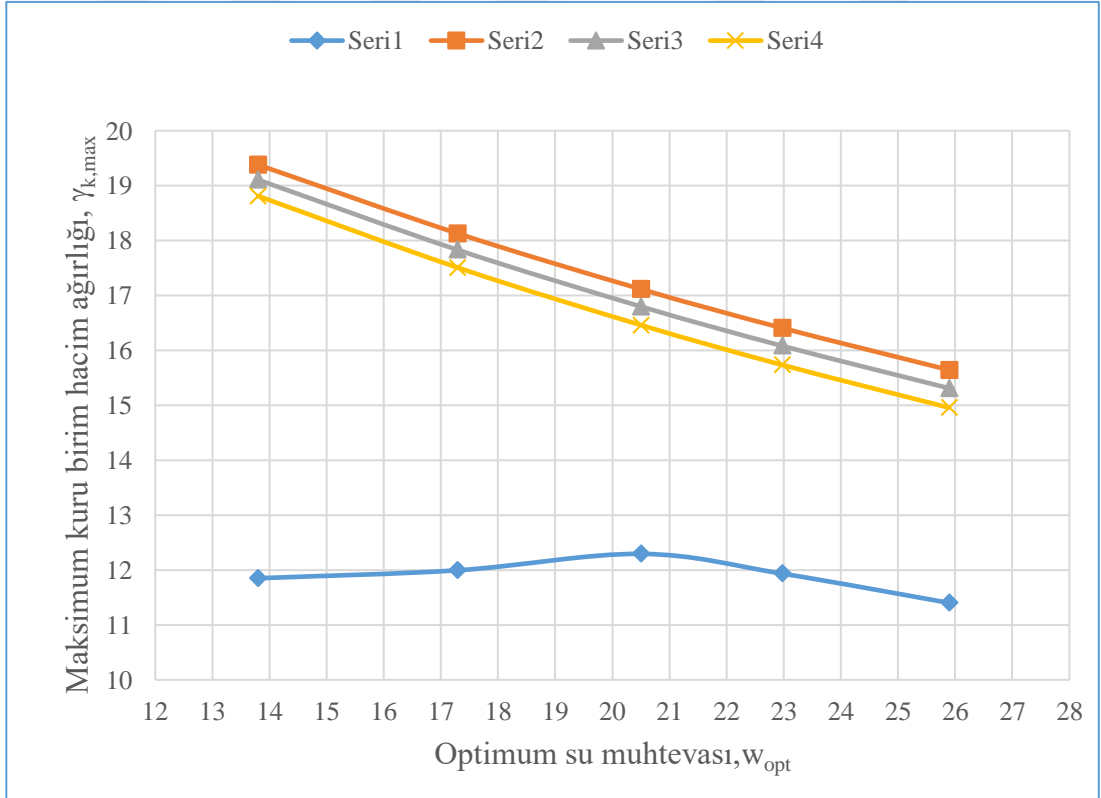
Deney No	1	2	3	4	5
Katılan Su Oranları (%ml)	13	16	19	22	25
Kalıp Ağırlığı (gr)	473,81	473,81	473,81	473,81	473,81
Sıkıştırılmış Zemin + Kalıp Ağırlığı	570,41	572,13	577,58	578,11	575,27
Sıkıştırılmış Zemin	96,6	98,32	103,77	104,3	101,46
Islak birim hacim ağırlık (kN/m ³)	1,419	1,444	1,524	1,532	1,490
Kap No	92	228	75	114	123
Kap Ağırlığı (gr)	36,25	33,83	37,62	35,39	33,77
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı (gr)	69,87	76,28	67,24	70,53	70,78
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	65,58	70,2	62,38	64	63,23
Su Muhtevası (w)(%)	14,63	16,72	19,63	22,82	25,63
Su Oranı (s) (%)	12,76	14,32	16,41	18,58	20,40
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	12,141	12,136	12,497	12,234	11,635
Kap Hacmi	68,092	68,092	68,092	68,092	68,092
Su Muhtevası (w) (%)	14,63	16,72	19,63	22,82	25,63
%0 Hava İçeriği	19,07	18,32	17,38	16,45	15,71
%5 Hava İçeriği	18,79	18,03	17,07	16,12	15,38
%10 Hava İçeriği	18,48	17,71	16,73	15,78	15,02



Şekil A.1. %2 kireç katkılı zeminin su muhtevası

Tablo A.2. %3 kireç katkılı zeminin kompaksiyon deneyi

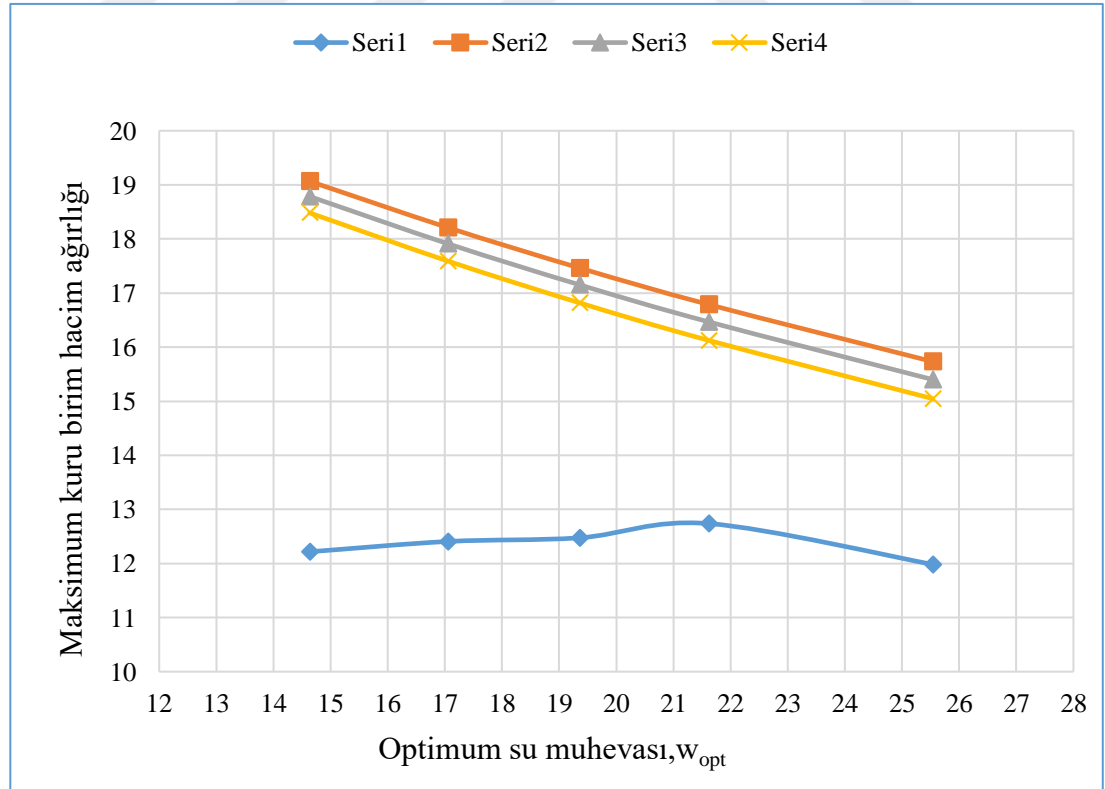
Deney No	1	2	3	4	5
Katılan Su Oranları (%ml)	13	16	19	22	25
Kalıp Ağırlığı (gr)	473,81	473,81	473,81	473,81	473,81
Sıkıştırılmış Zemin + Kalıp Ağırlığı	567,41	571,46	576,64	575,68	573,44
Sıkıştırılmış Zemin	93,6	97,65	102,83	101,87	99,63
Islak birim hacim ağırlık (kN/m ³)	1,375	1,434	1,510	1,496	1,463
Kap No	92	228	75	114	123
Kap Ağırlığı (gr)	34,86	35,22	34,82	34,93	37,33
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı (gr)	71,64	73,62	70,73	71,6	76,81
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	67,18	67,96	64,62	64,75	68,69
Su Muhtevası (w)(%)	13,80	17,29	20,50	22,97	25,89
Su Oranı (s)%	12,13	14,74	17,01	18,68	20,57
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	11,849	11,995	12,294	11,935	11,402
Kap Hacmi	68,092	68,092	68,092	68,092	68,092
Su Muhtevası (w) (%)	13,80	17,29	20,50	22,97	25,89
%0 Hava İçeriği	19,38	18,13	17,11	16,41	15,64
%5 Hava İçeriği	19,11	17,83	16,80	16,08	15,31
%10 Hava İçeriği	18,81	17,51	16,46	15,74	14,96



Şekil A.2. %3 kireç katkılı zeminin su muhtevası

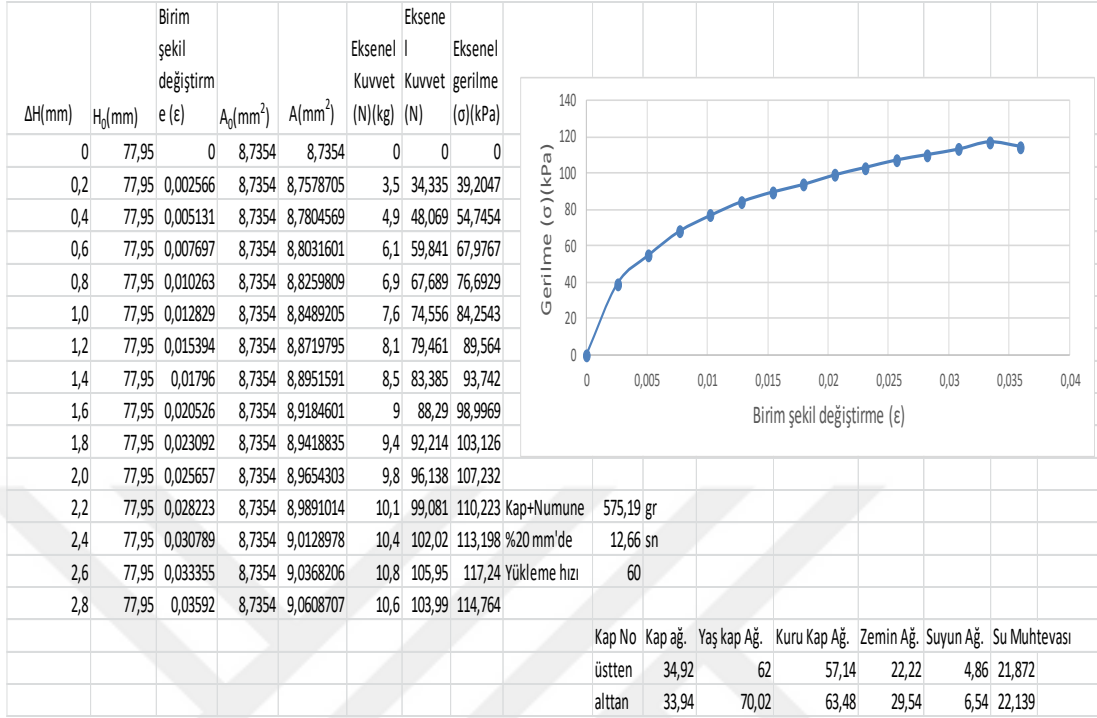
Tablo A.3. %4 kireç katkılı zeminin kompaksiyon deneyi

Deney No	1	2	3	4	5
Katılan Su Oranları (%ml)	13	16	19	22	25
Kalıp Ağırlığı (gr)	473,81	473,81	473,81	473,81	473,81
Sıkıştırılmış Zemin + Kalıp Ağırlığı	571,02	574,61	577,17	581,34	578,22
Sıkıştırılmış Zemin	97,21	100,8	103,36	107,53	104,41
Islak birim hacim ağırlık (kN/m ³)	1,428	1,480	1,518	1,579	1,533
Kap No	92	228	75	114	123
Kap Ağırlığı (gr)	35,82	35,85	35,34	34,08	35,18
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı (gr)	69,74	77,52	75,35	69,18	70,82
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	65,41	71,45	68,86	62,94	63,57
Su Muhtevası (w)(%)	14,63	17,05	19,36	21,62	25,54
Su Oranı (s)%	12,77	14,57	16,227	17,78	20,35
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	12,217	12,407	12,476	12,738	11,982
Kap Hacmi	68,092	68,092	68,092	68,092	68,092
Su Muhtevası (w) (%)	14,63	17,05	19,36	21,62	25,54
%0 Hava İçeriği	19,07	18,21	17,46	16,79	15,73
%5 Hava İçeriği	18,79	17,91	17,15	16,47	15,40
%10 Hava İçeriği	18,48	17,59	16,82	16,12	15,05

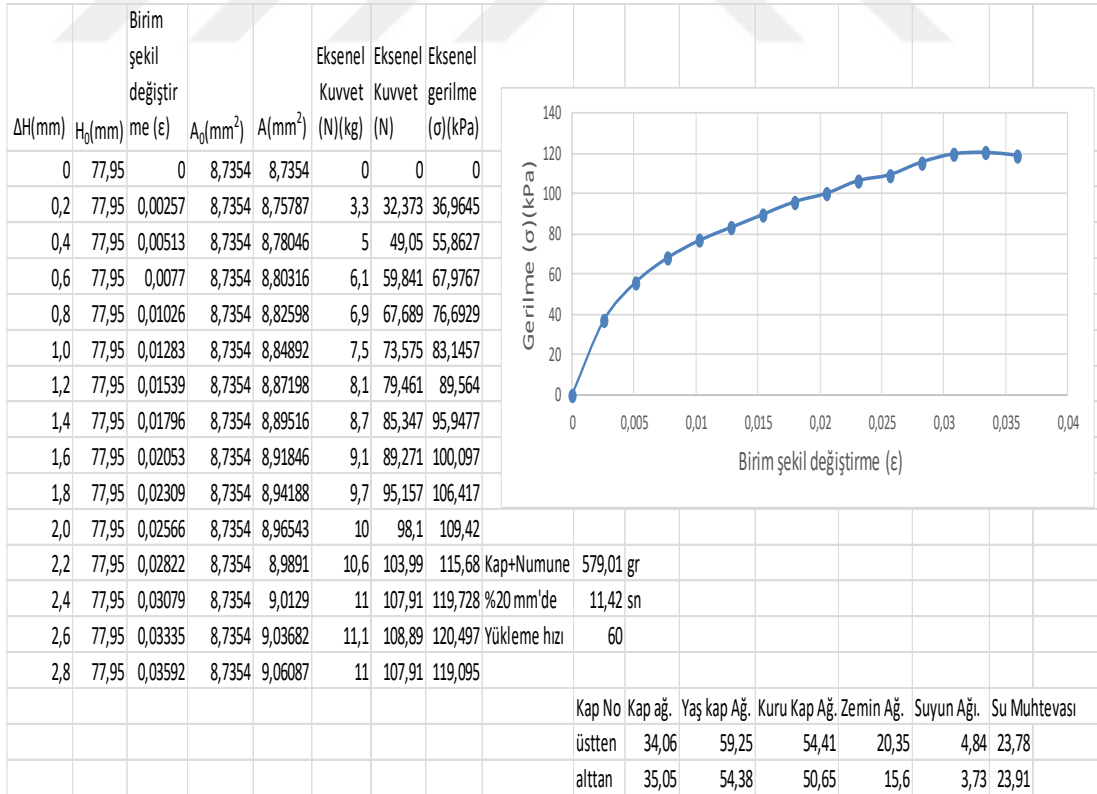


Şekil A.3. %4 kireç katkılı zeminin su muhtevası

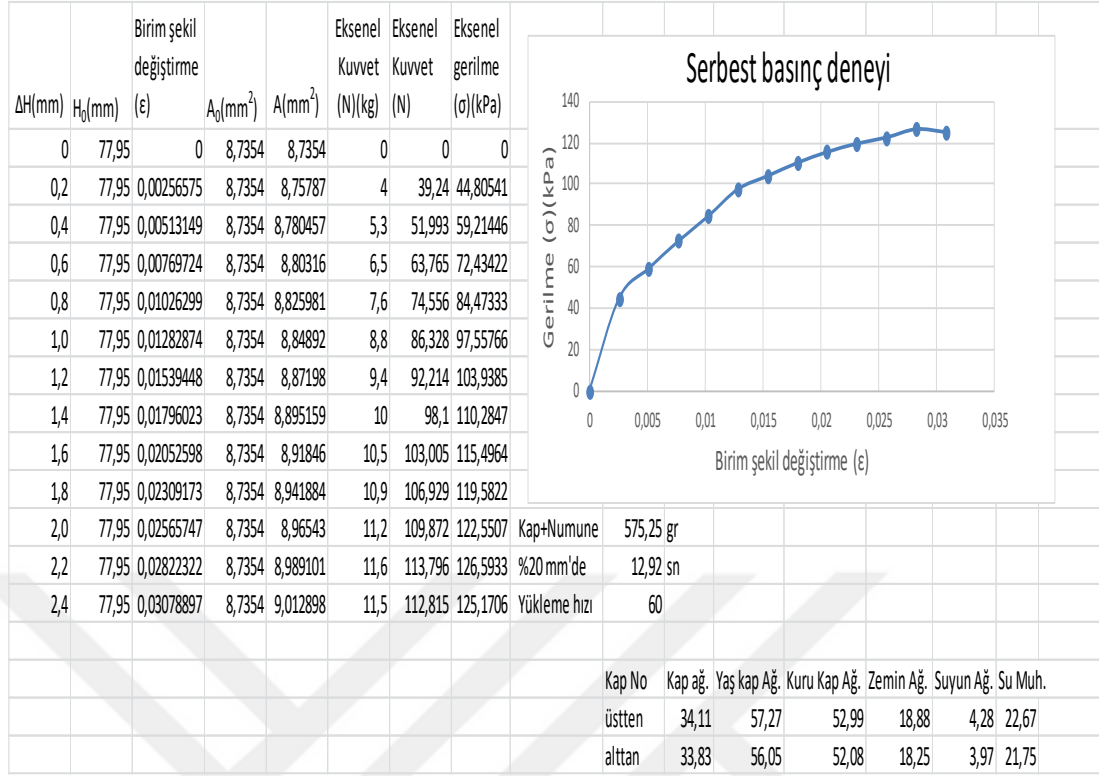
Ek-B Serbest basınç deneyi



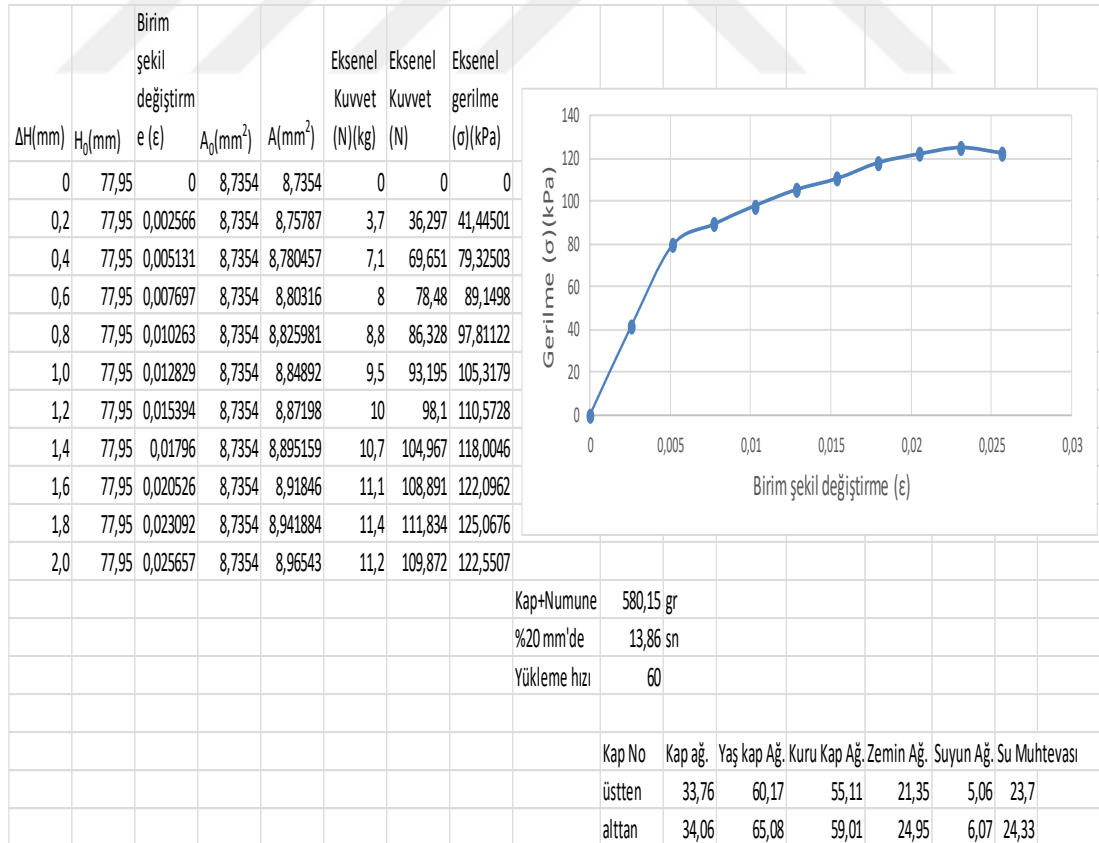
Şekil B.4. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



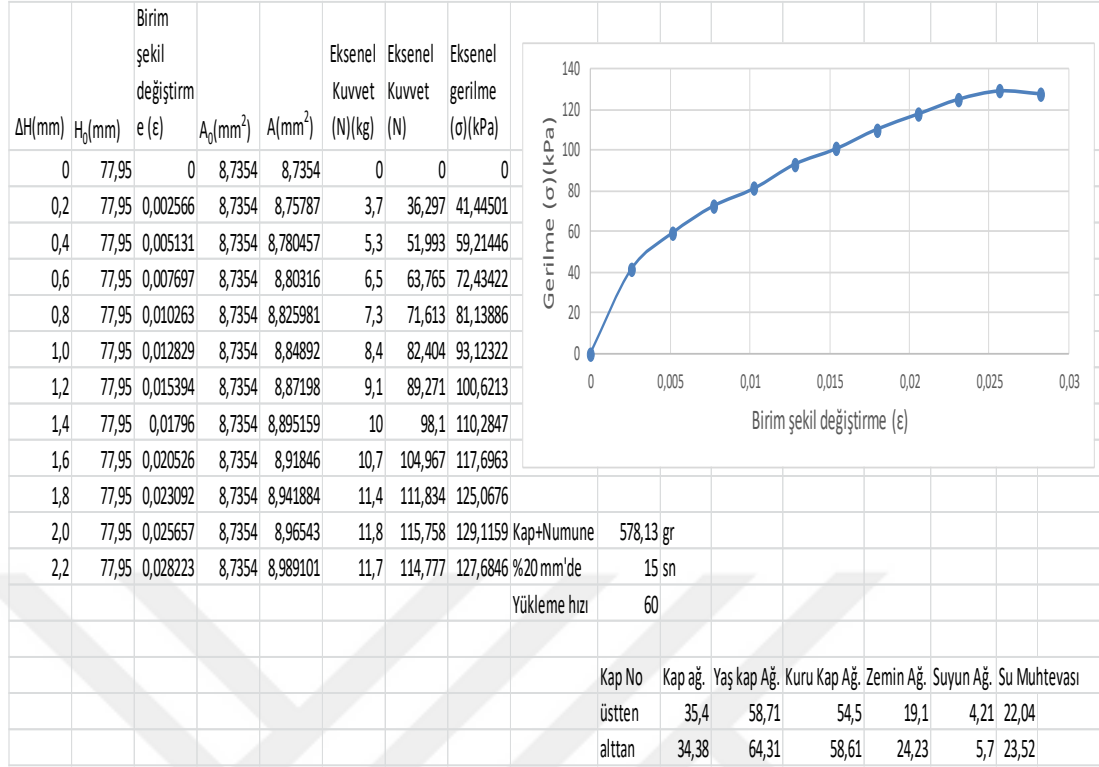
Şekil B.5. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



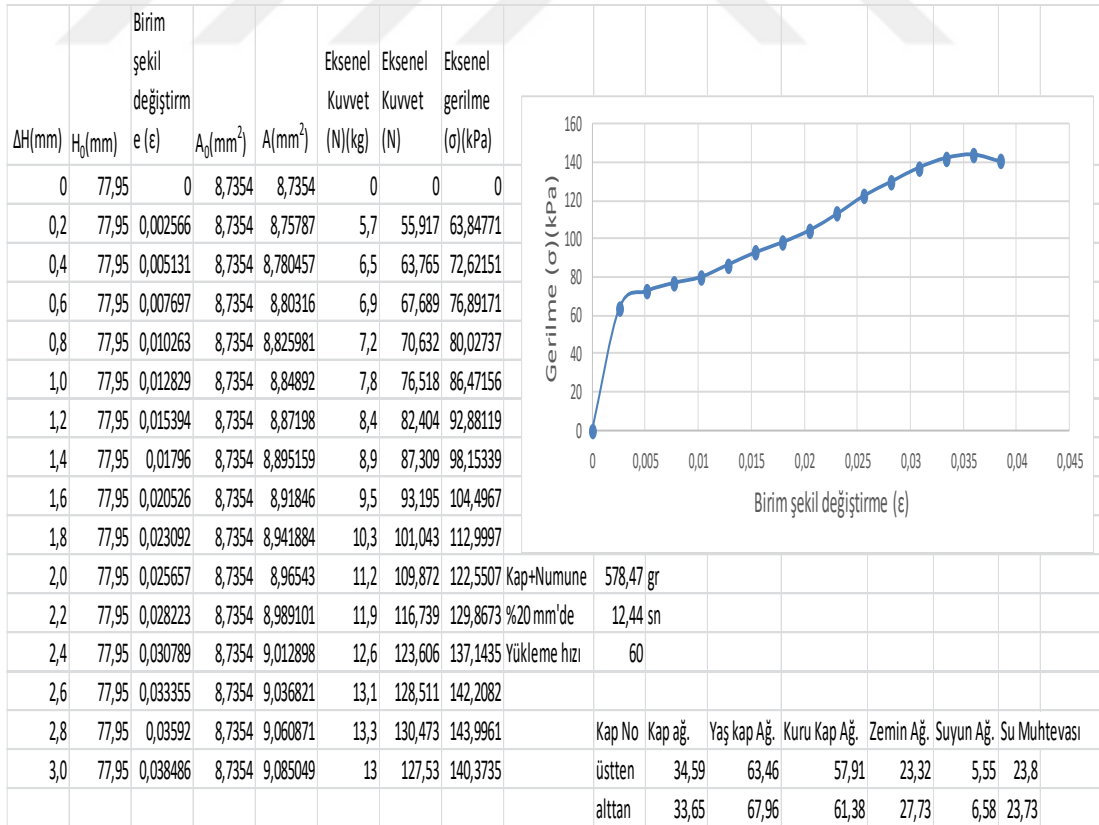
Şekil B.6. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



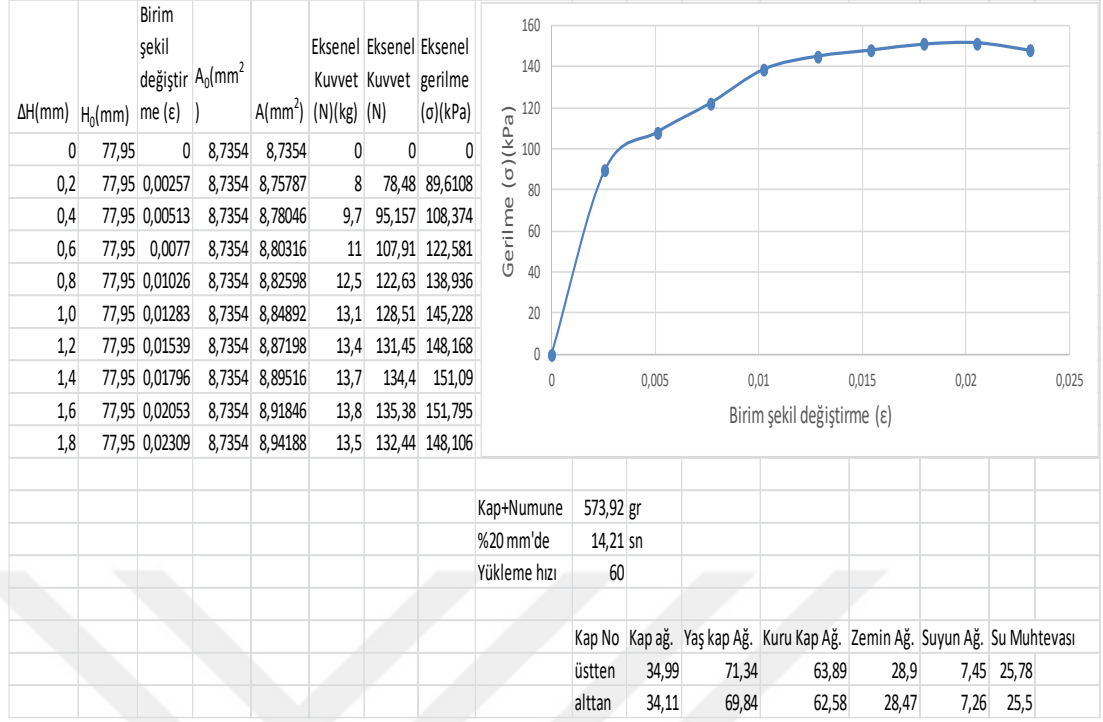
Şekil B.7. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



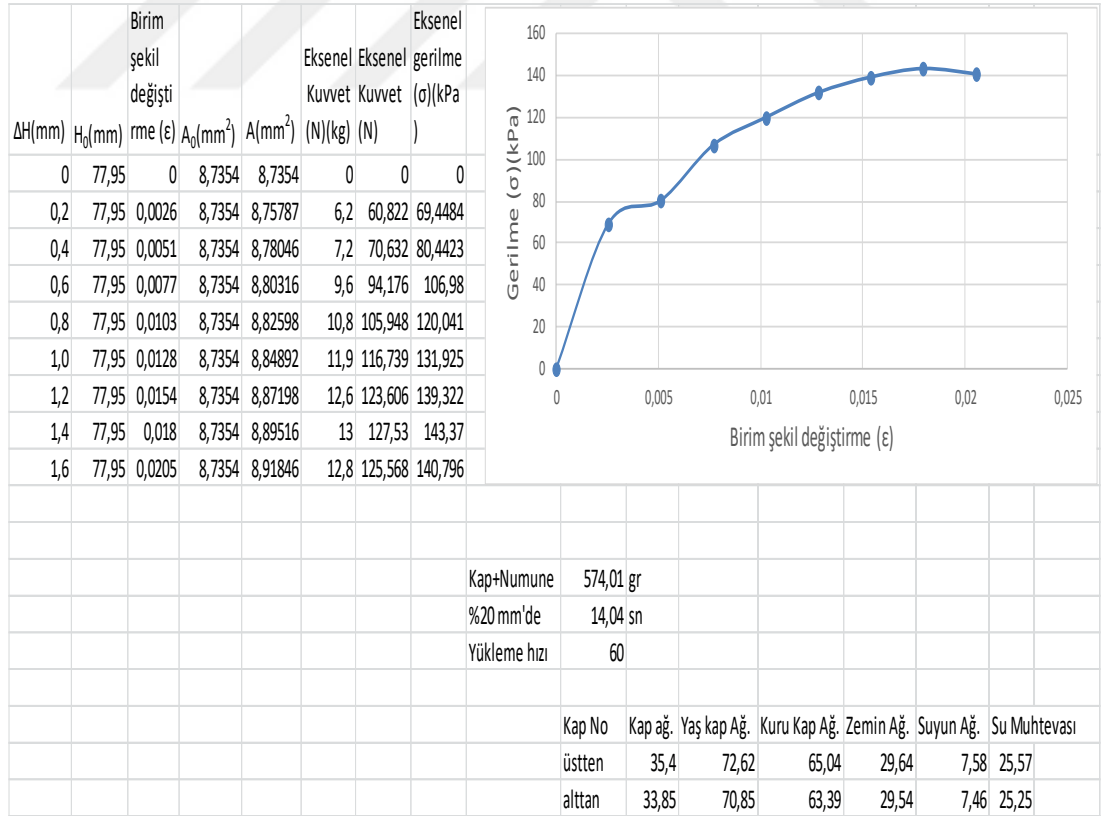
Şekil B.8. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1günlük serbest basınç deneyi-2



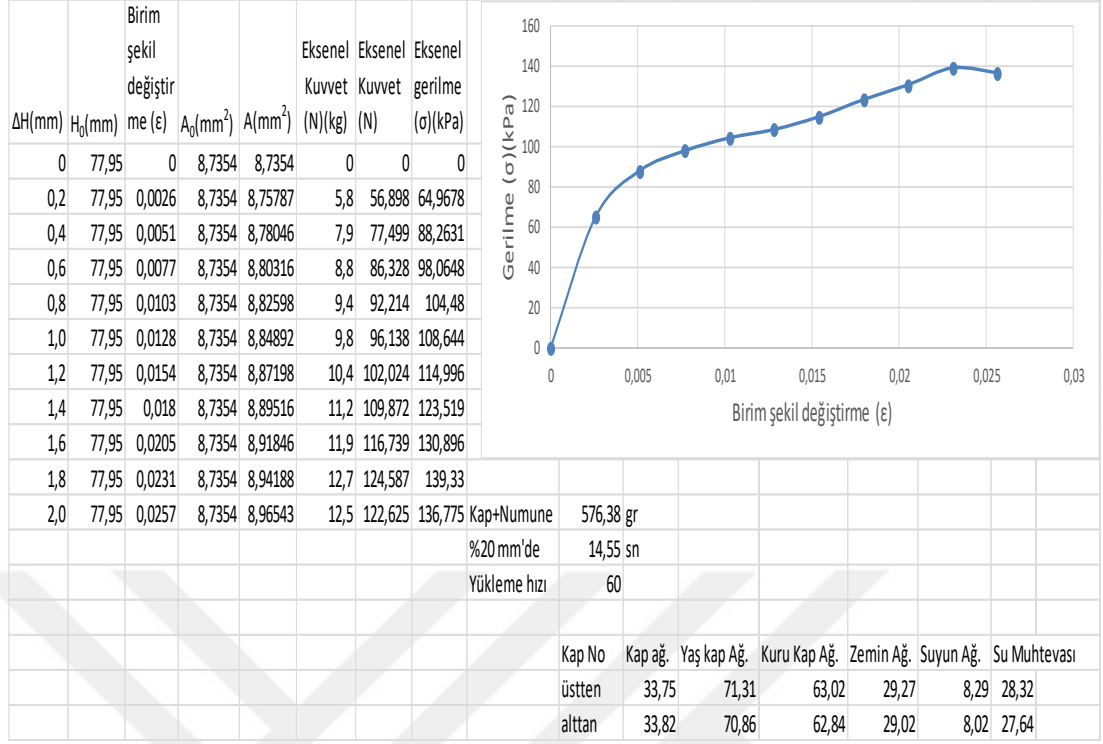
Şekil B.9. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1günlük serbest basınç deneyi-3



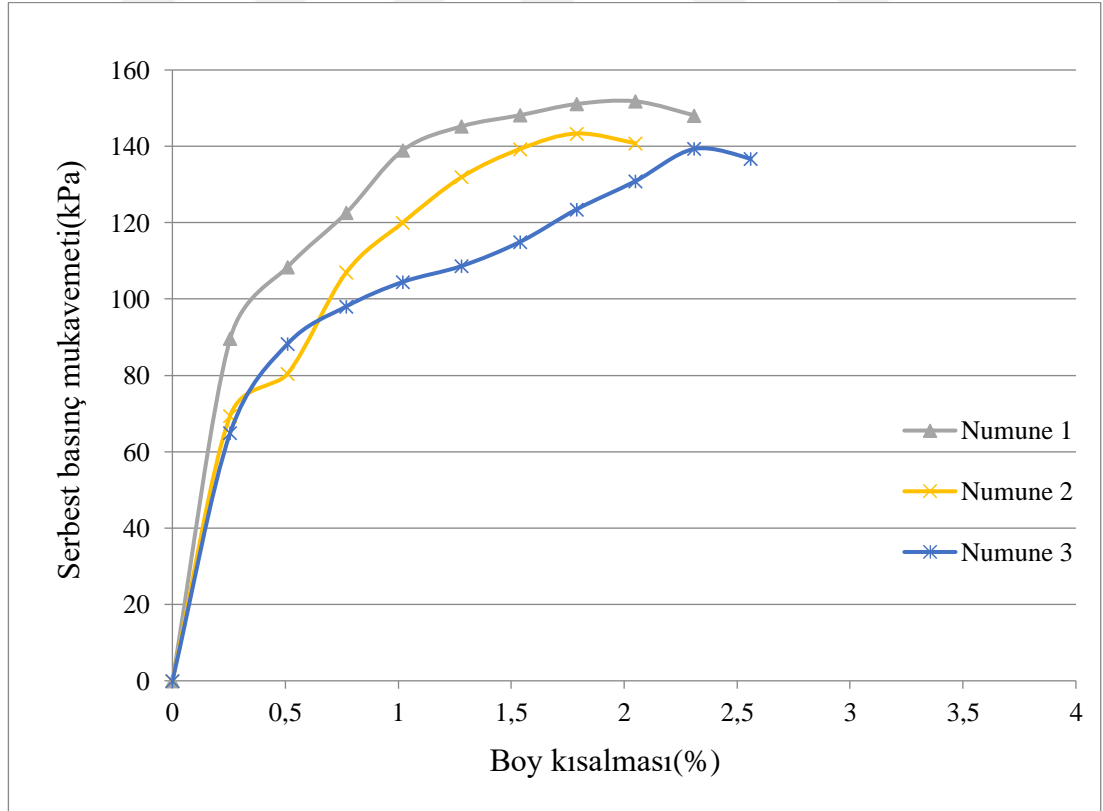
Şekil B.10. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



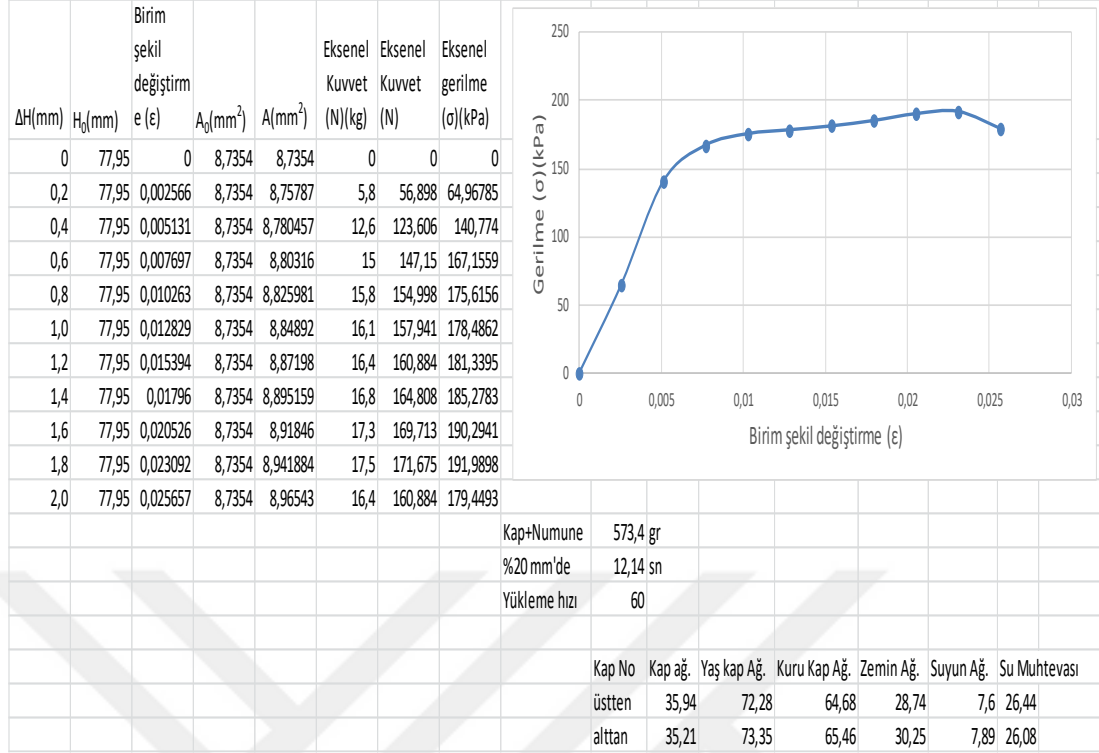
Şekil B.11. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



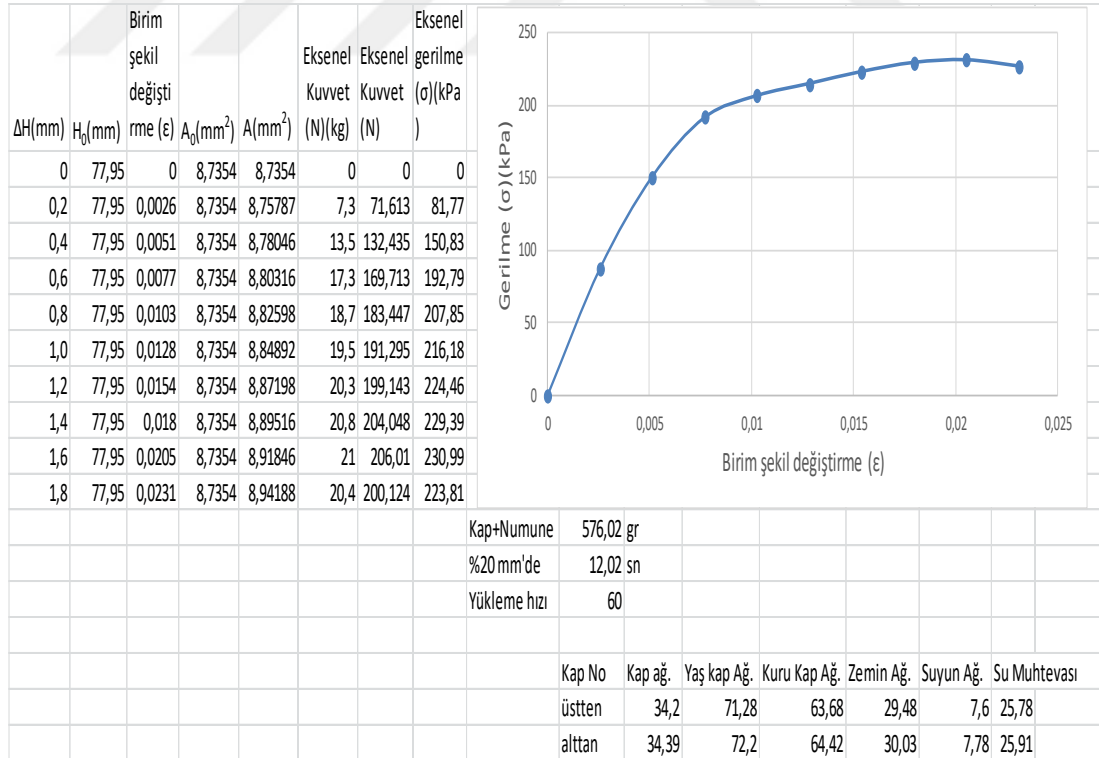
Şekil B.12. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



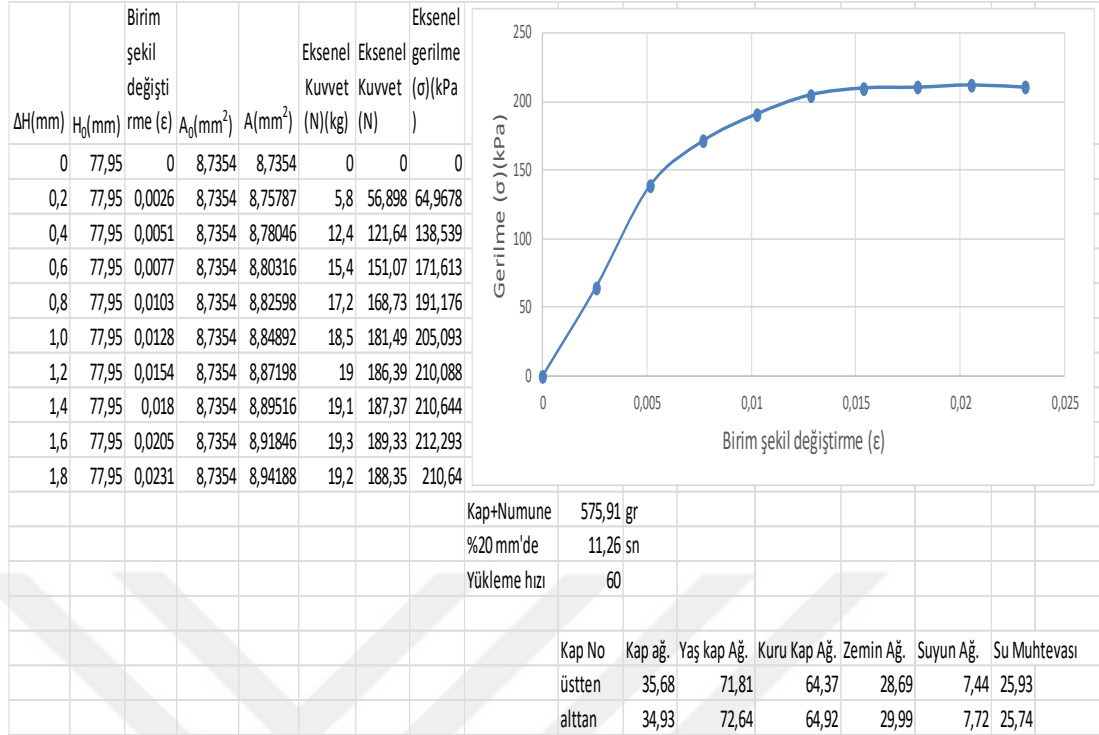
Şekil B.13. %2 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafik kıyaslaması



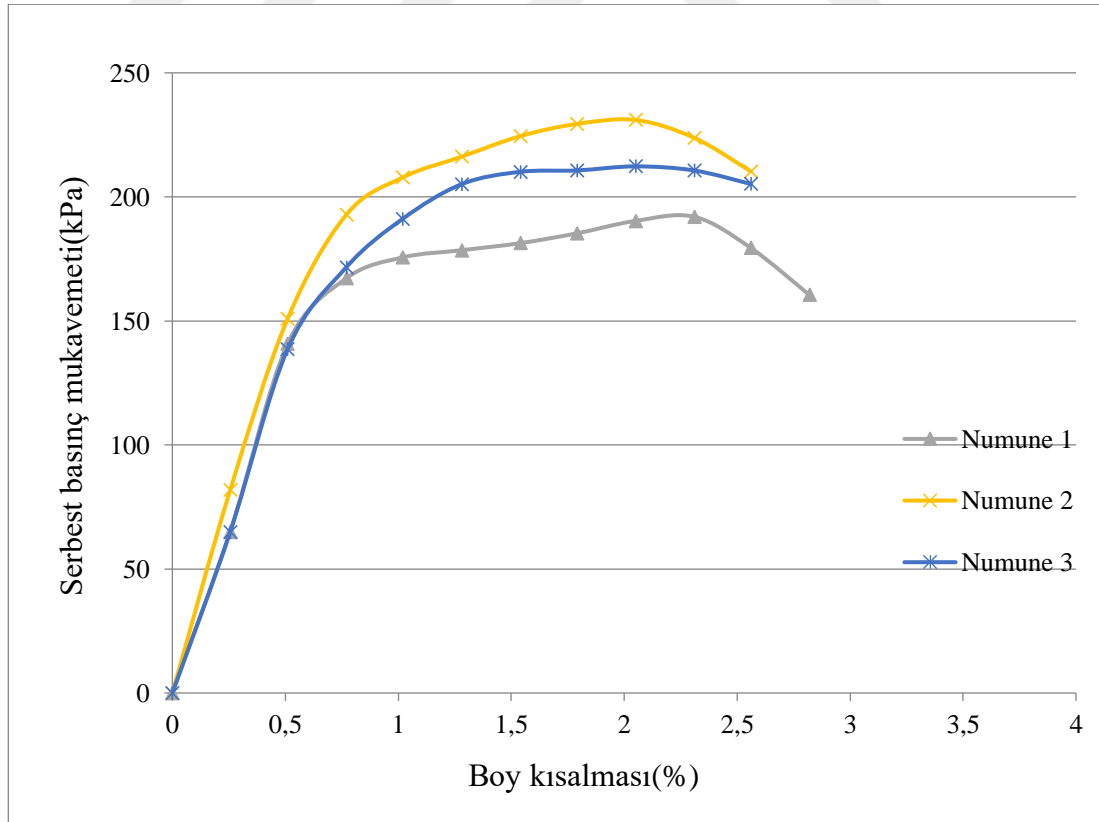
Şekil B.14. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



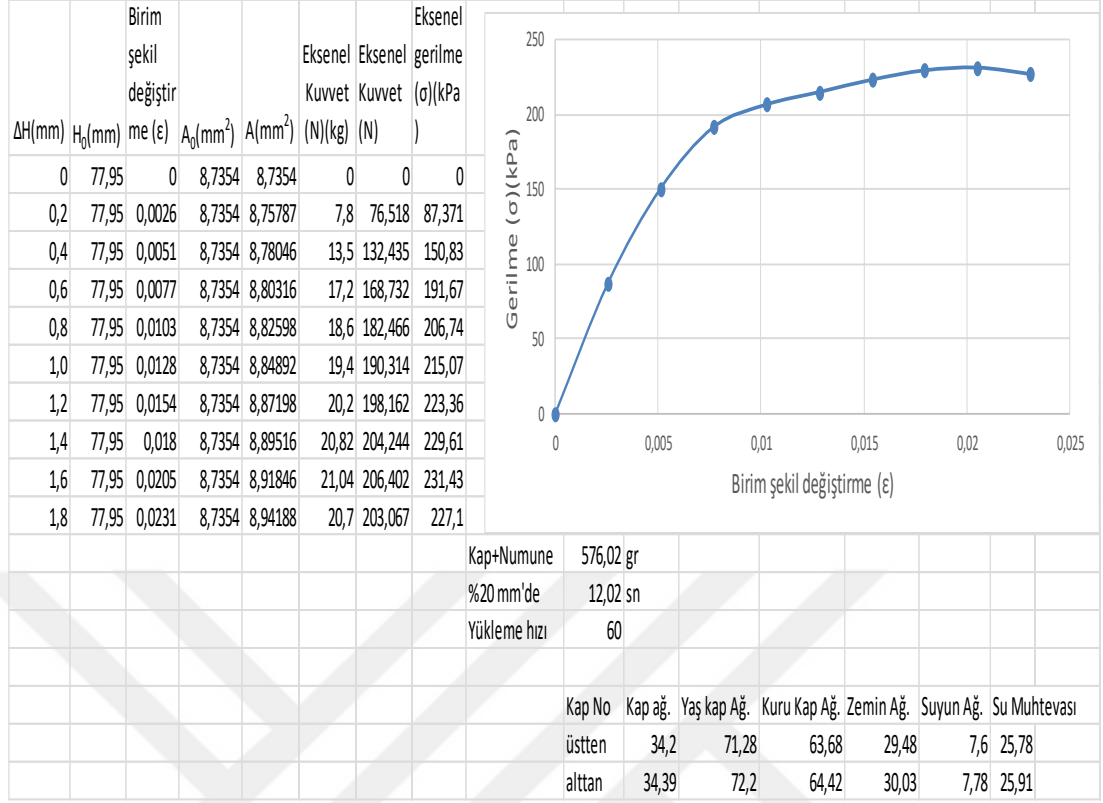
Şekil B.15. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



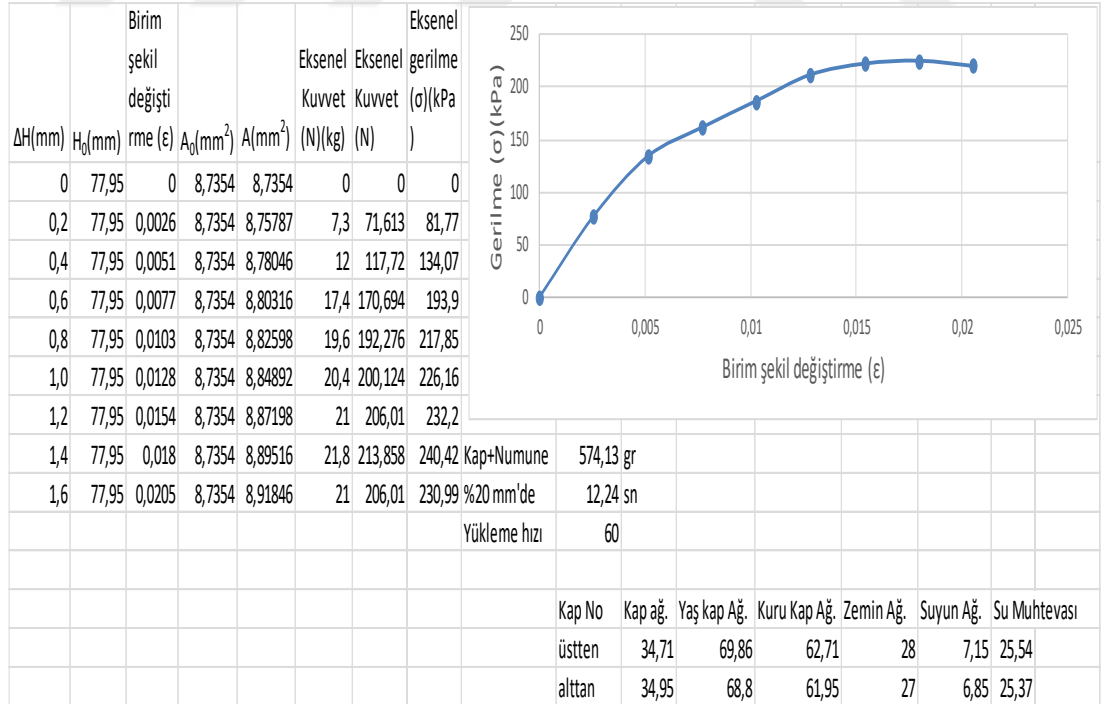
Şekil B.16. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



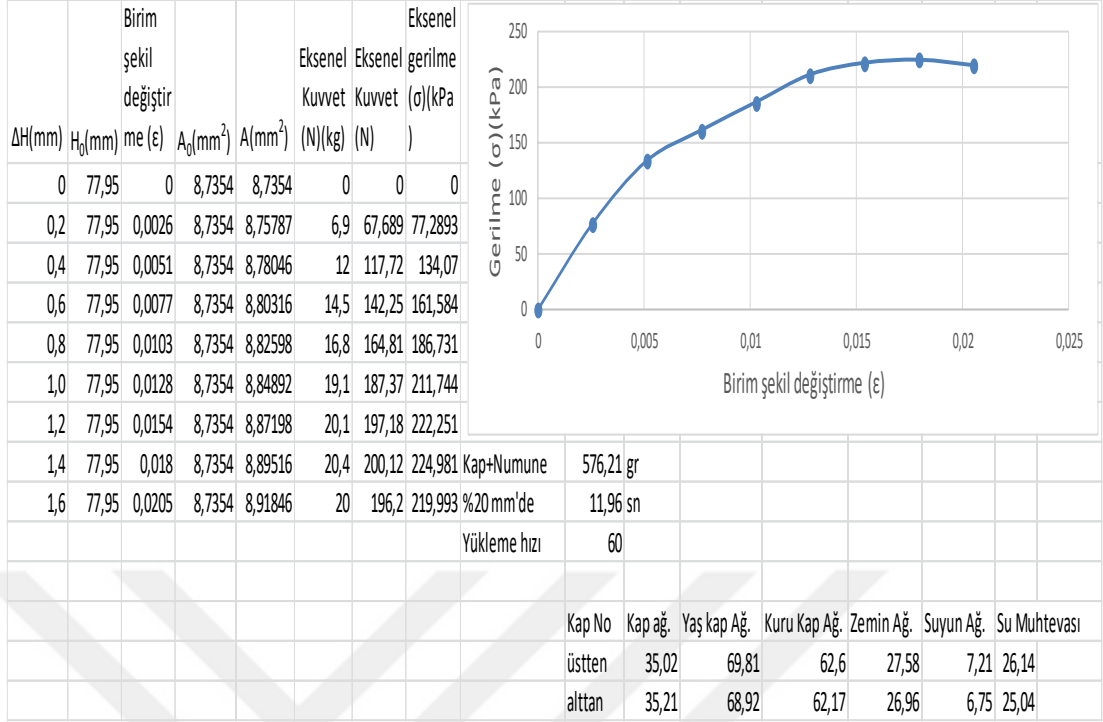
Şekil B.17. %2 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



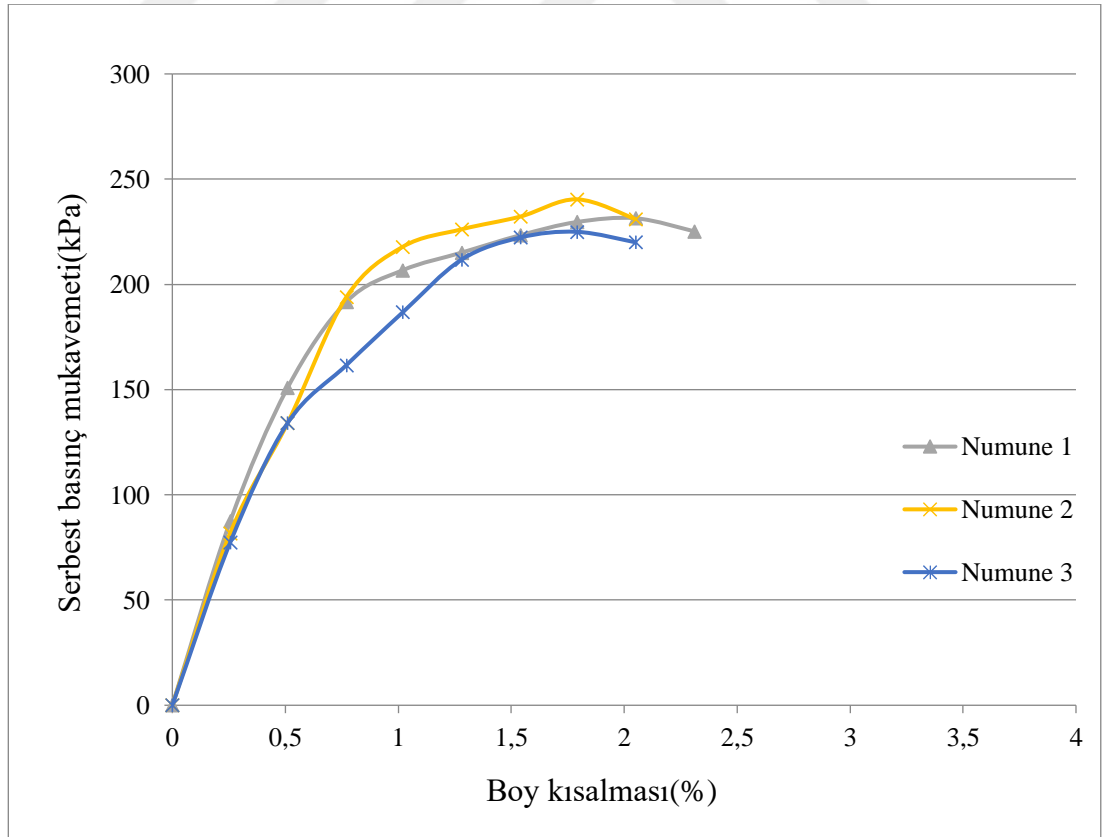
Şekil B.18. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



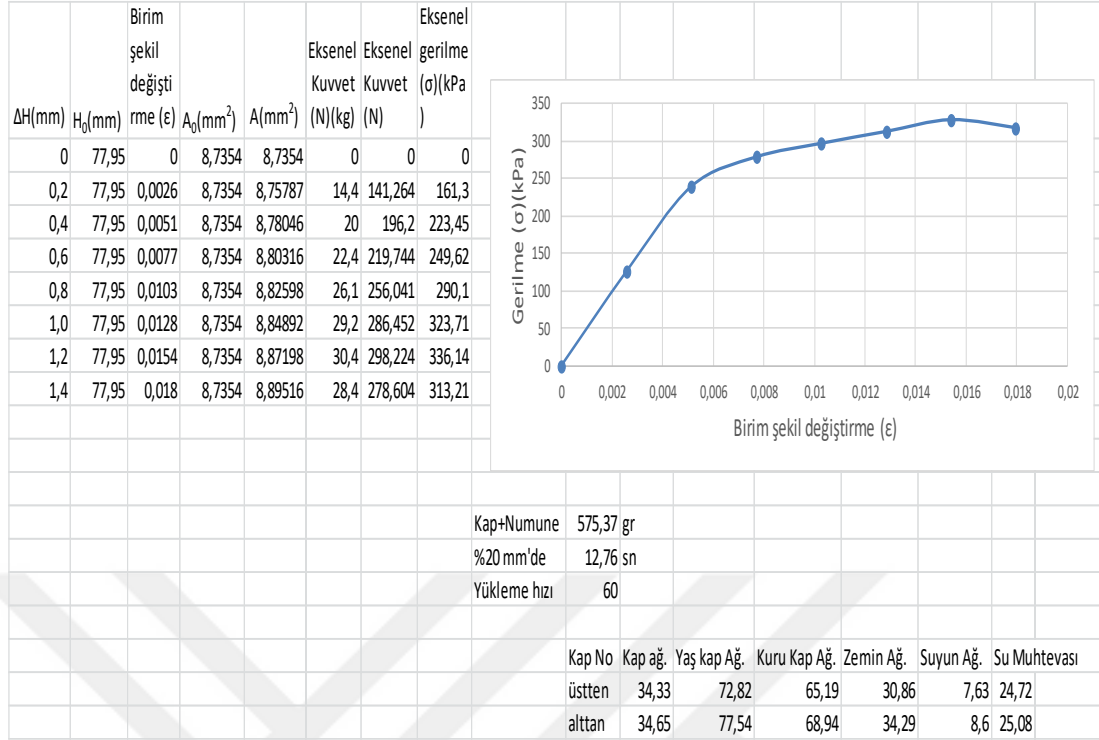
Şekil B.19. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



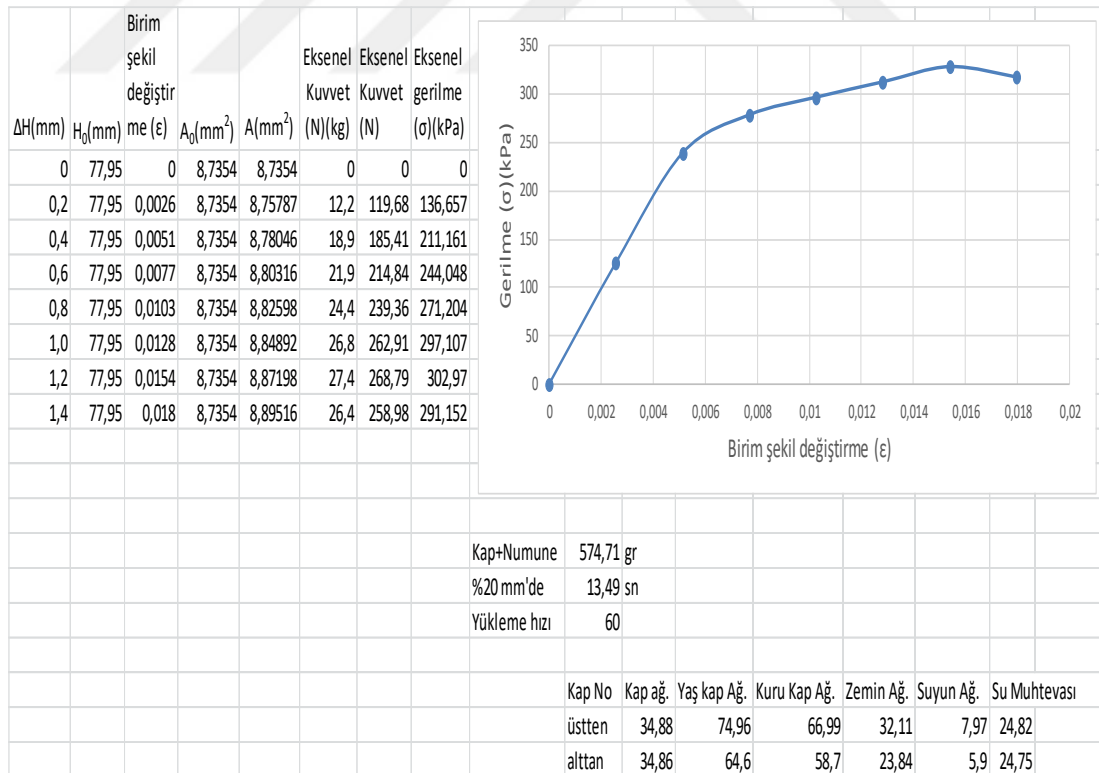
Şekil B.20. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



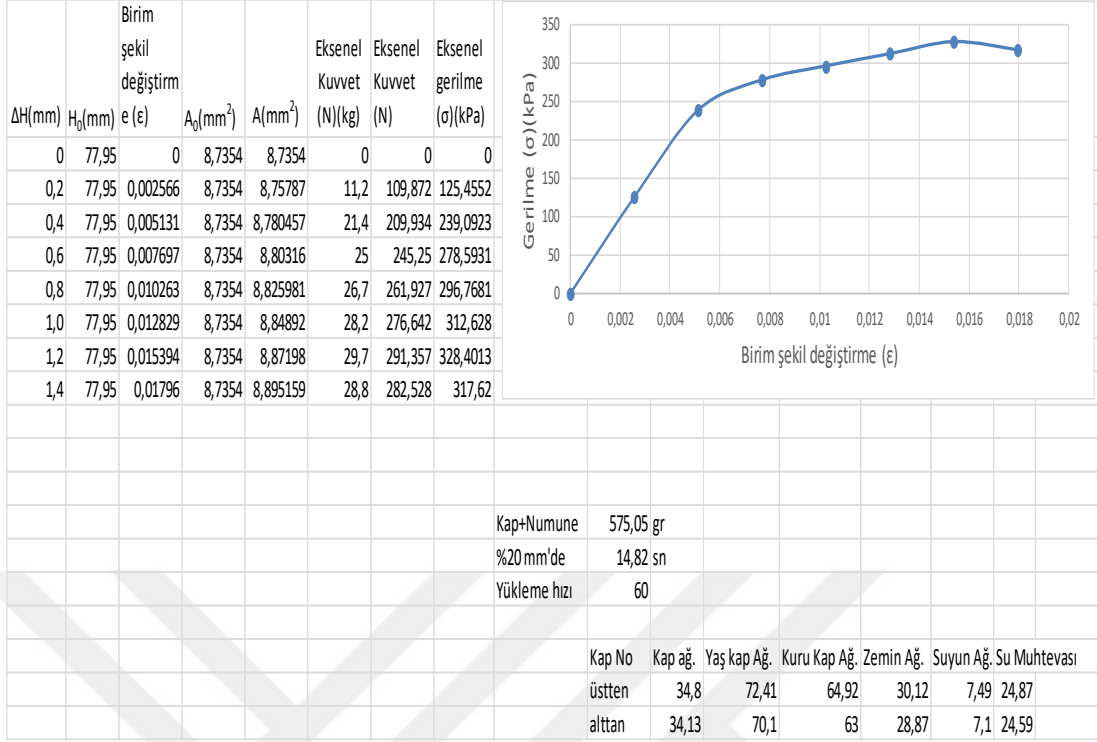
Şekil B.21. %2 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



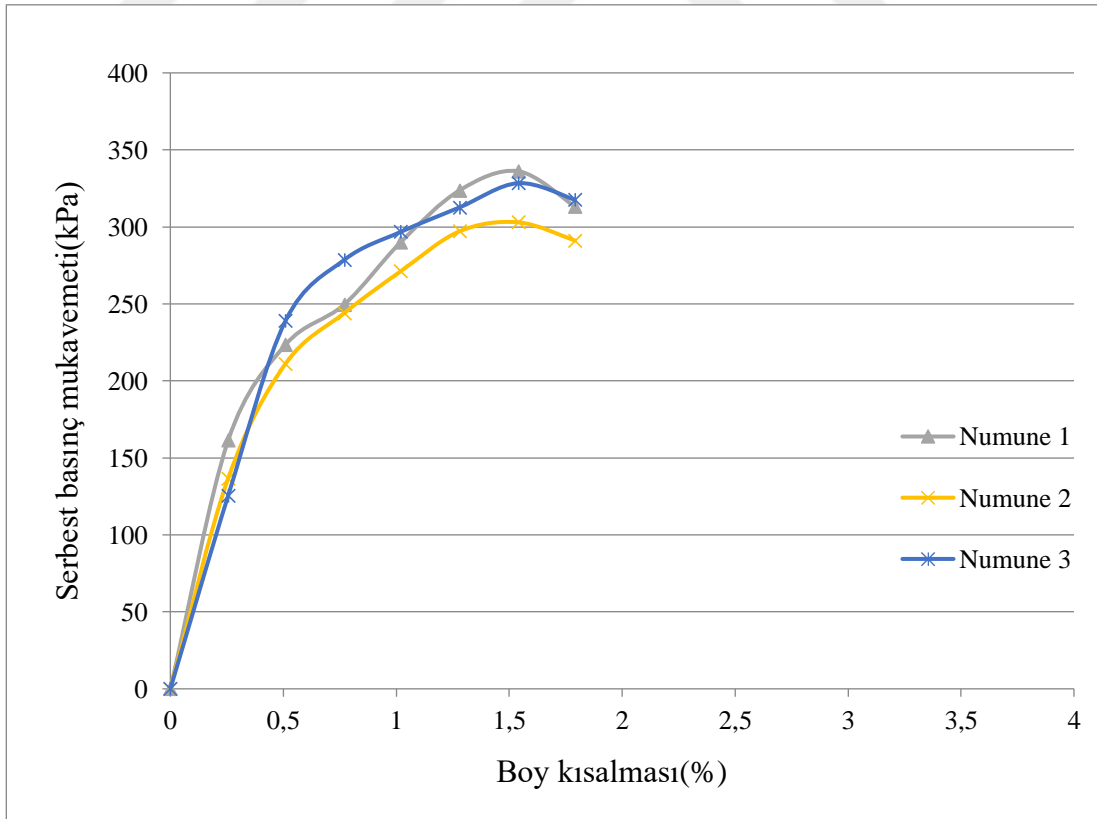
Şekil B.22. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



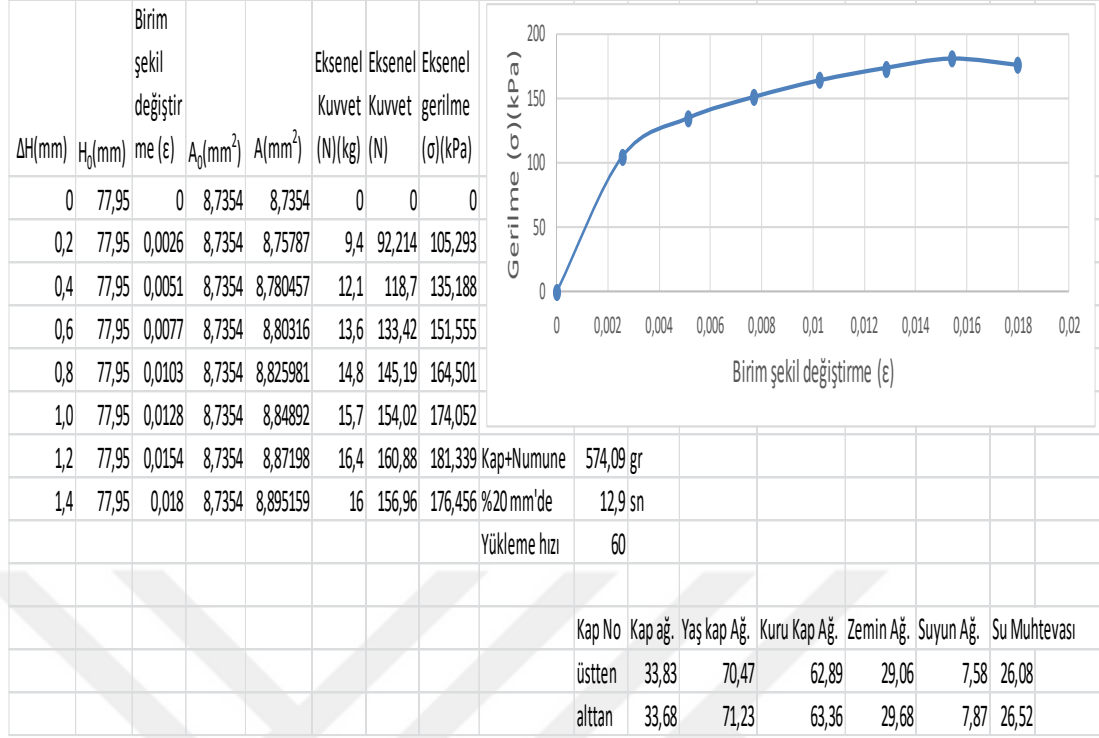
Şekil B.23. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



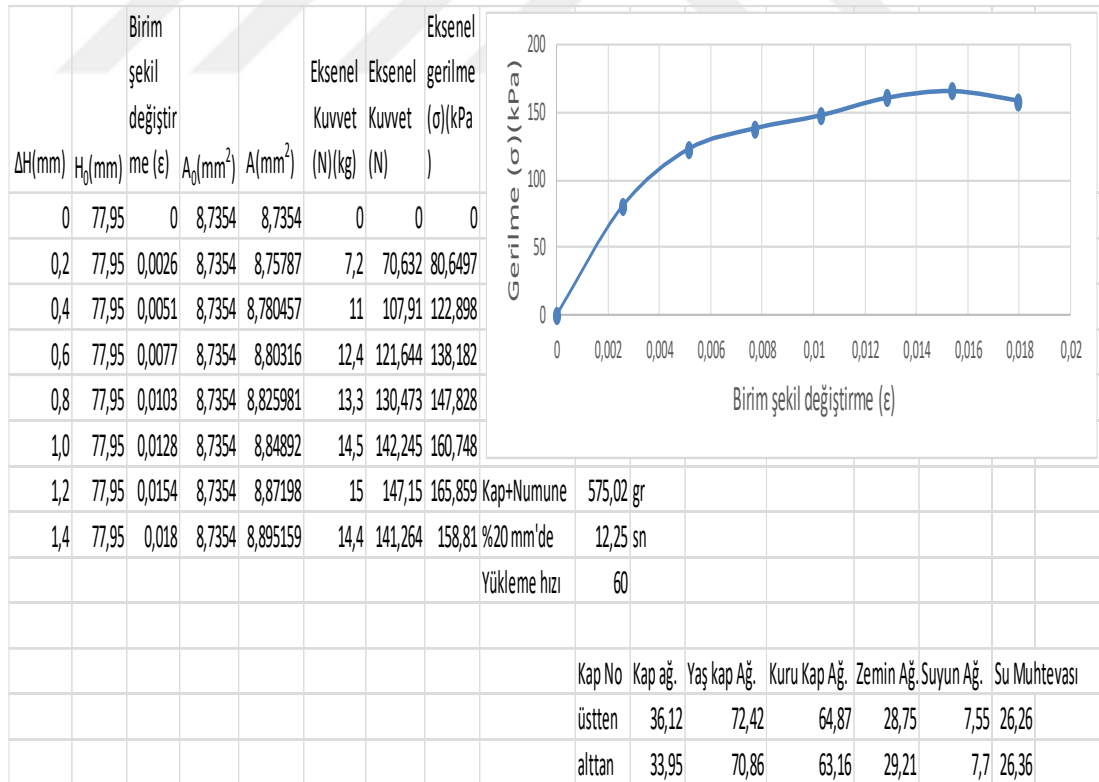
Şekil B.24. Optimum su muhtevasında %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3



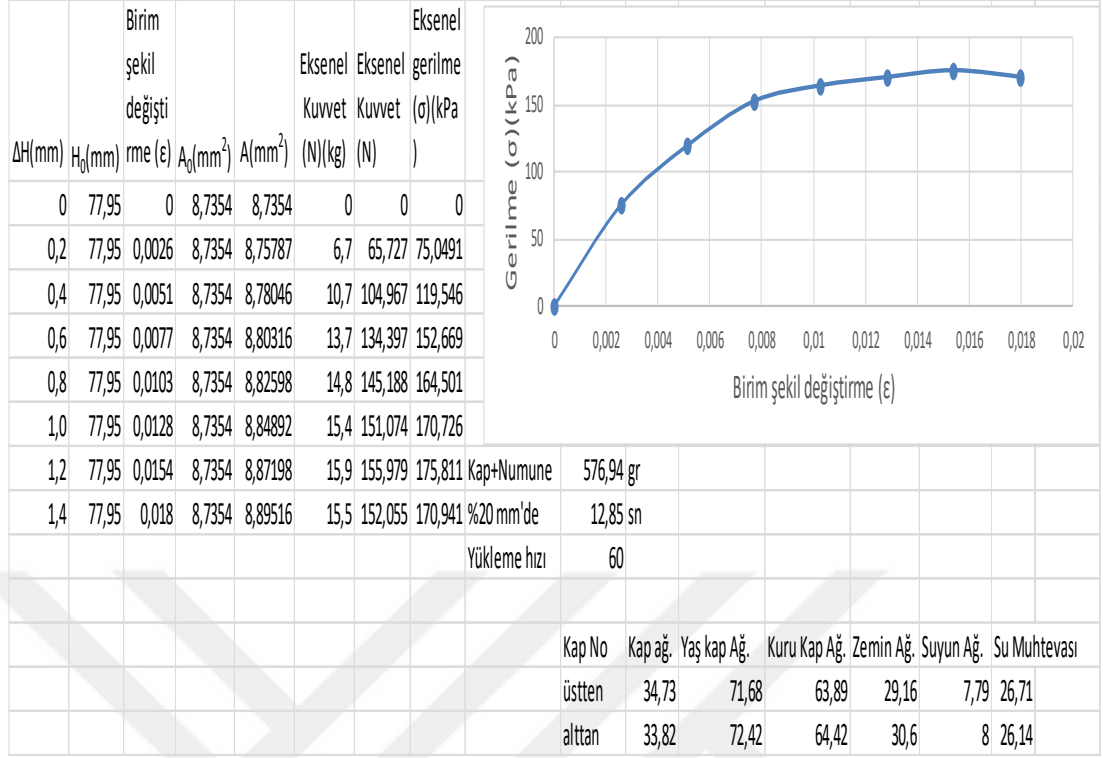
Şekil B.25. %2 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri



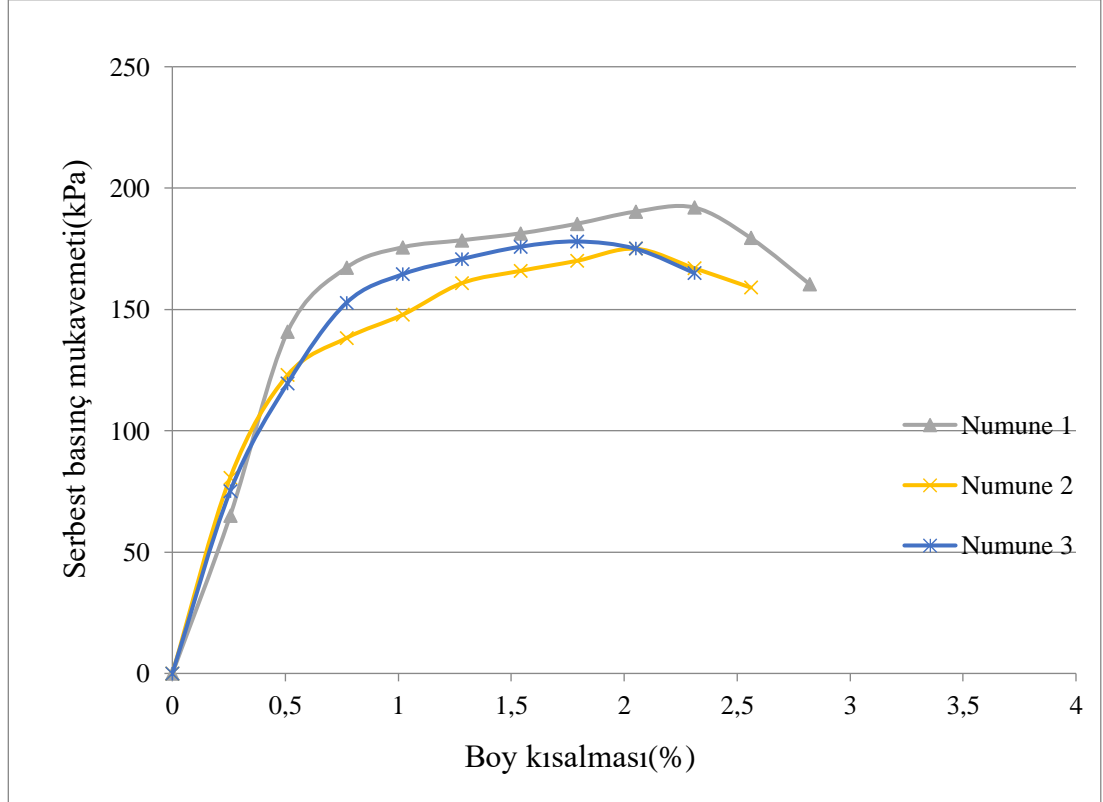
Şekil B.26. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



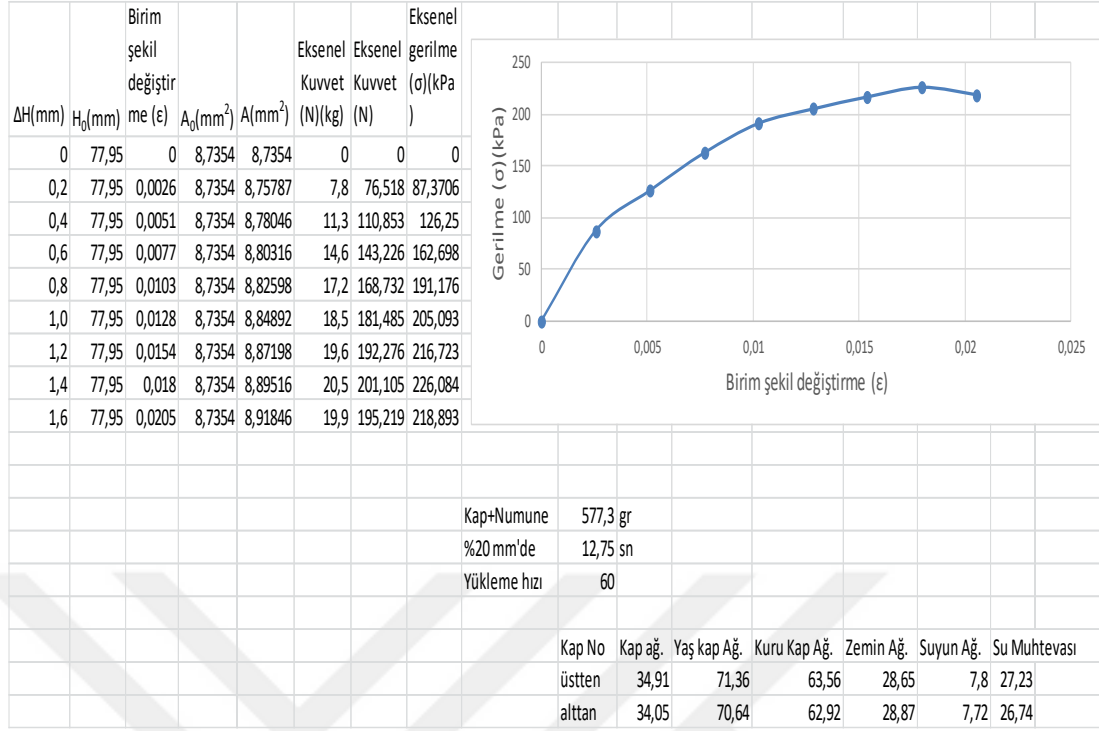
Şekil B.27. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



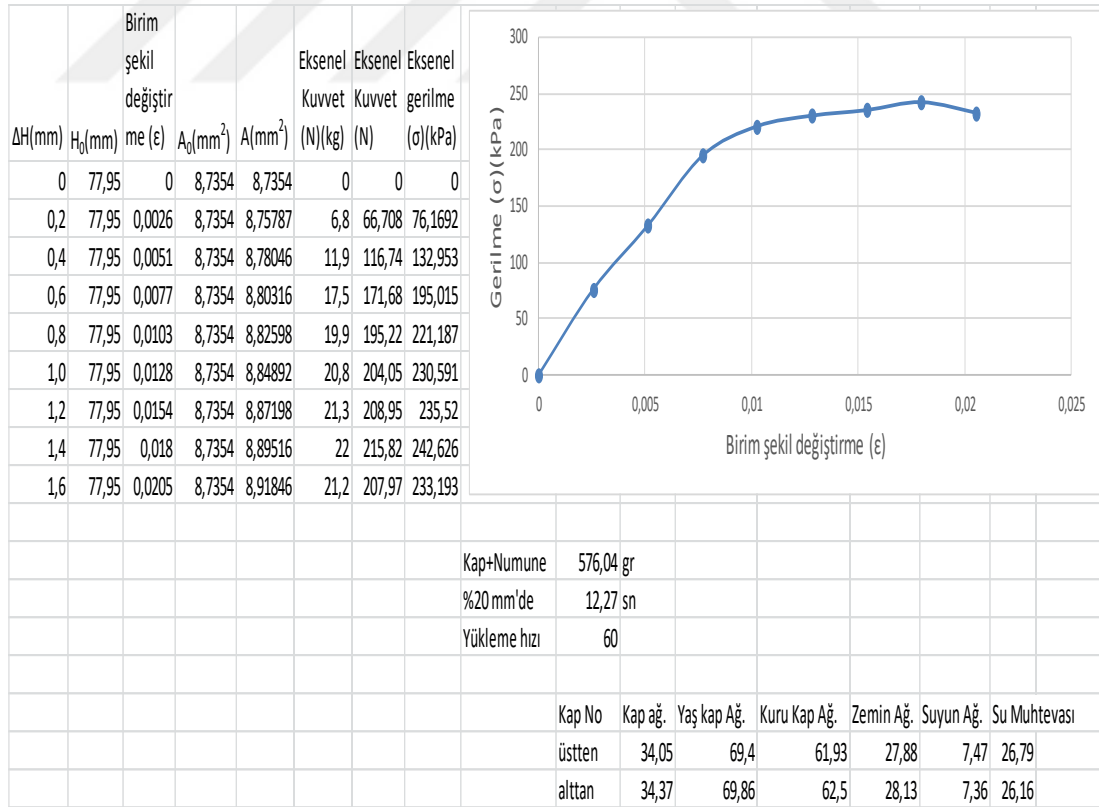
Şekil B.28. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



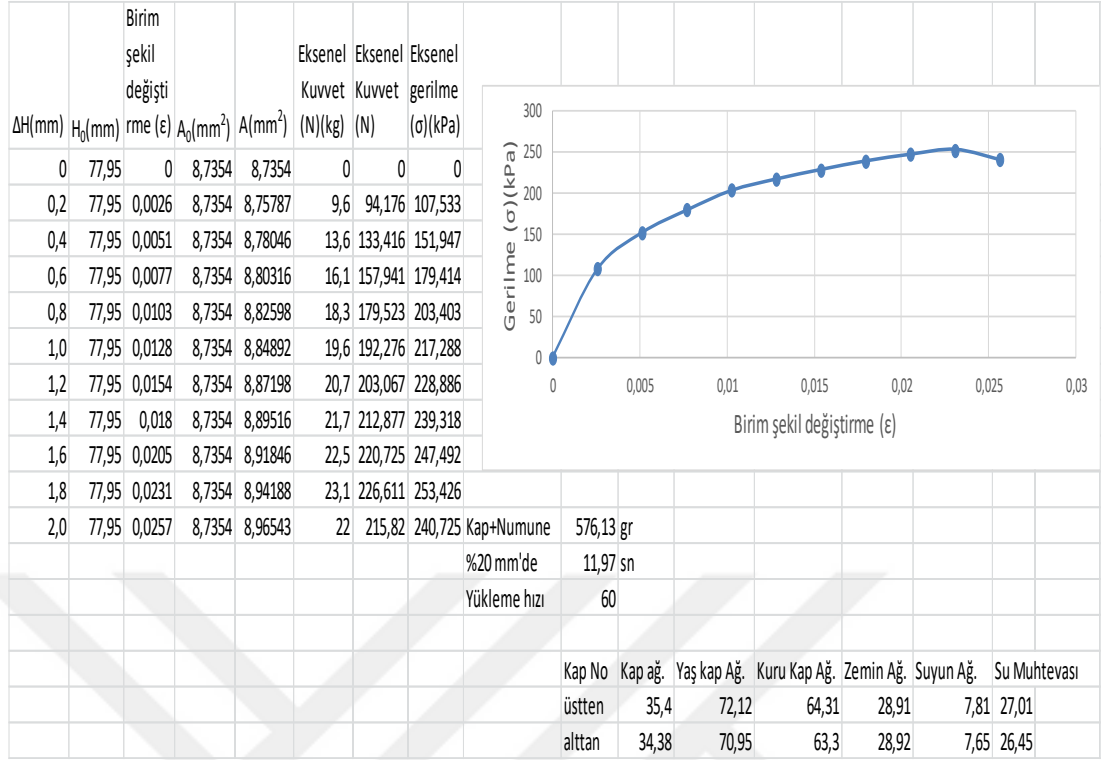
Şekil B.29. %3 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafikleri



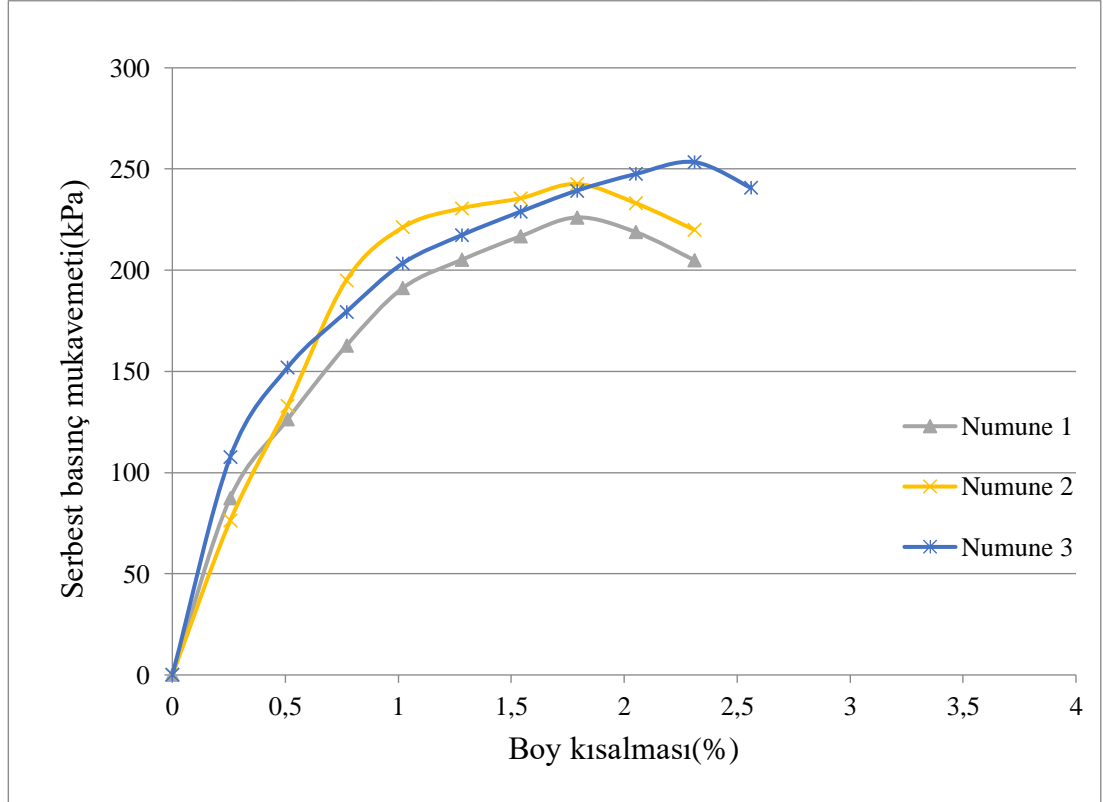
Şekil B.30. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



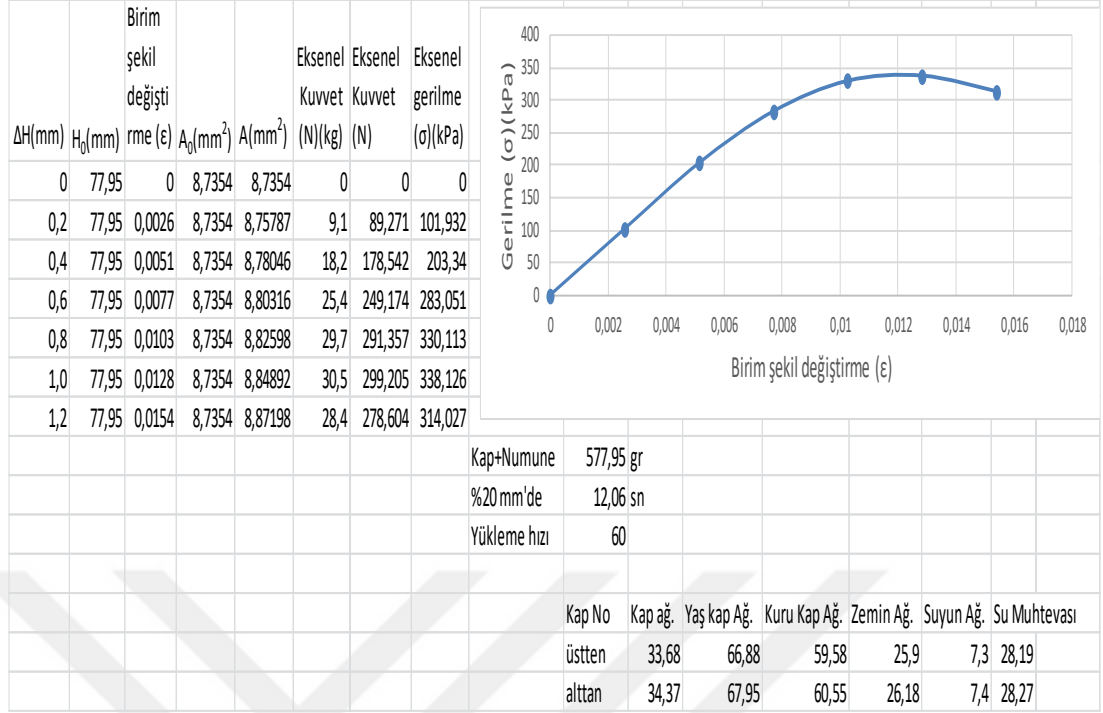
Şekil B.31. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



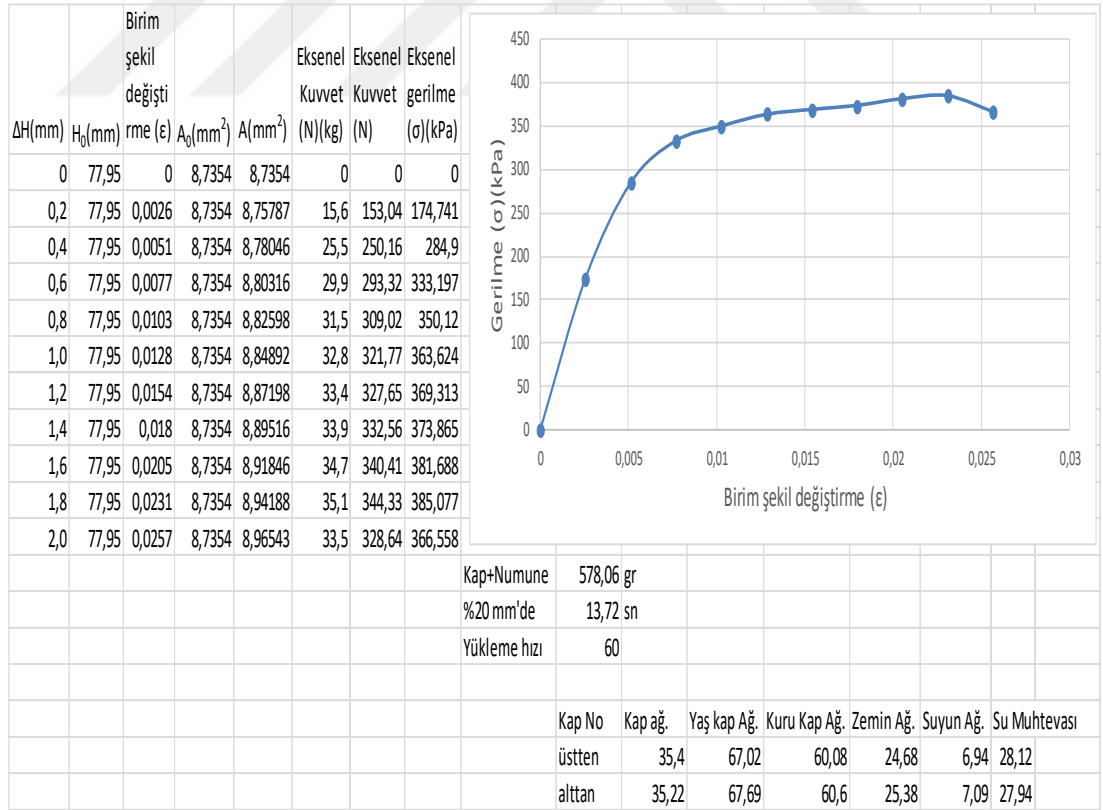
Şekil B.32. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



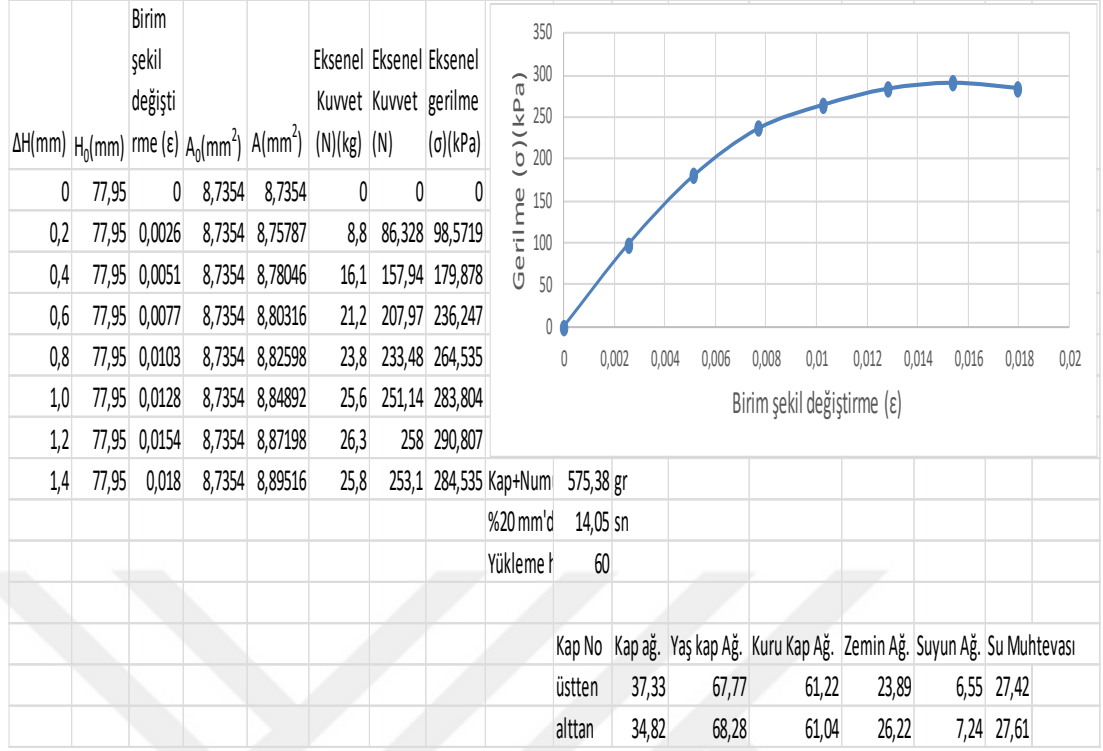
Şekil B.33. %3 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



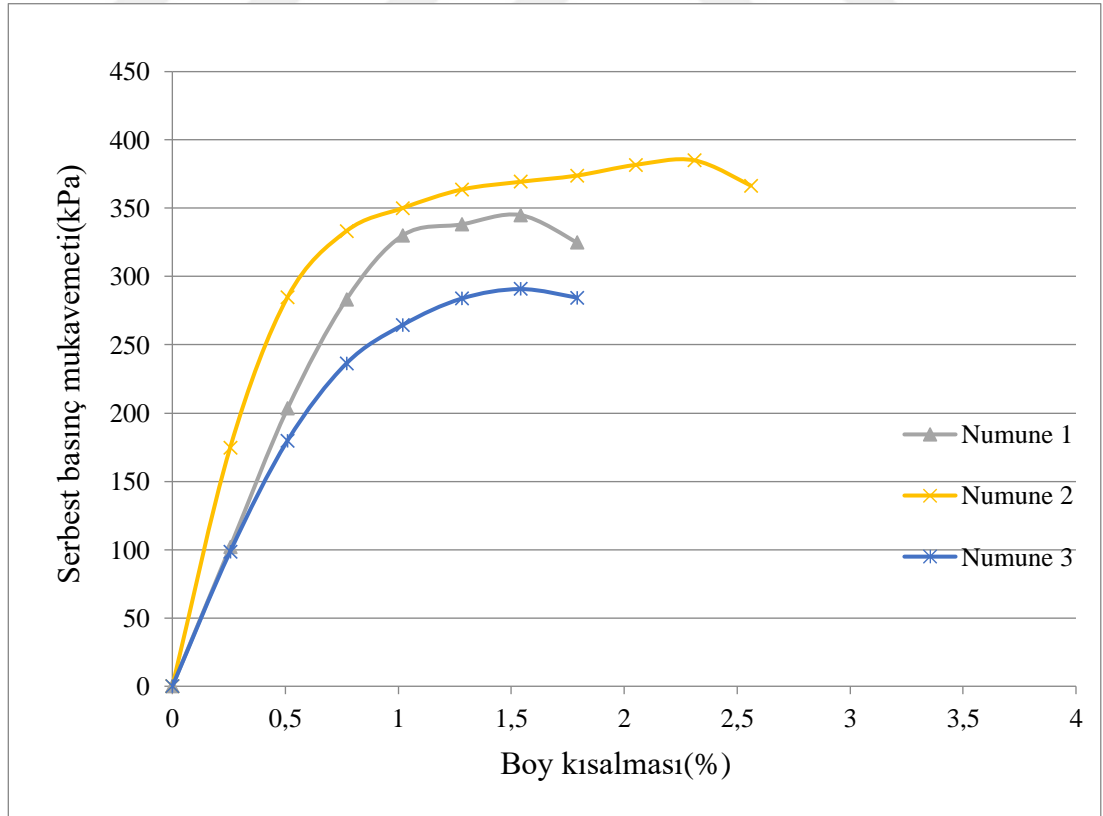
Şekil B. 34. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



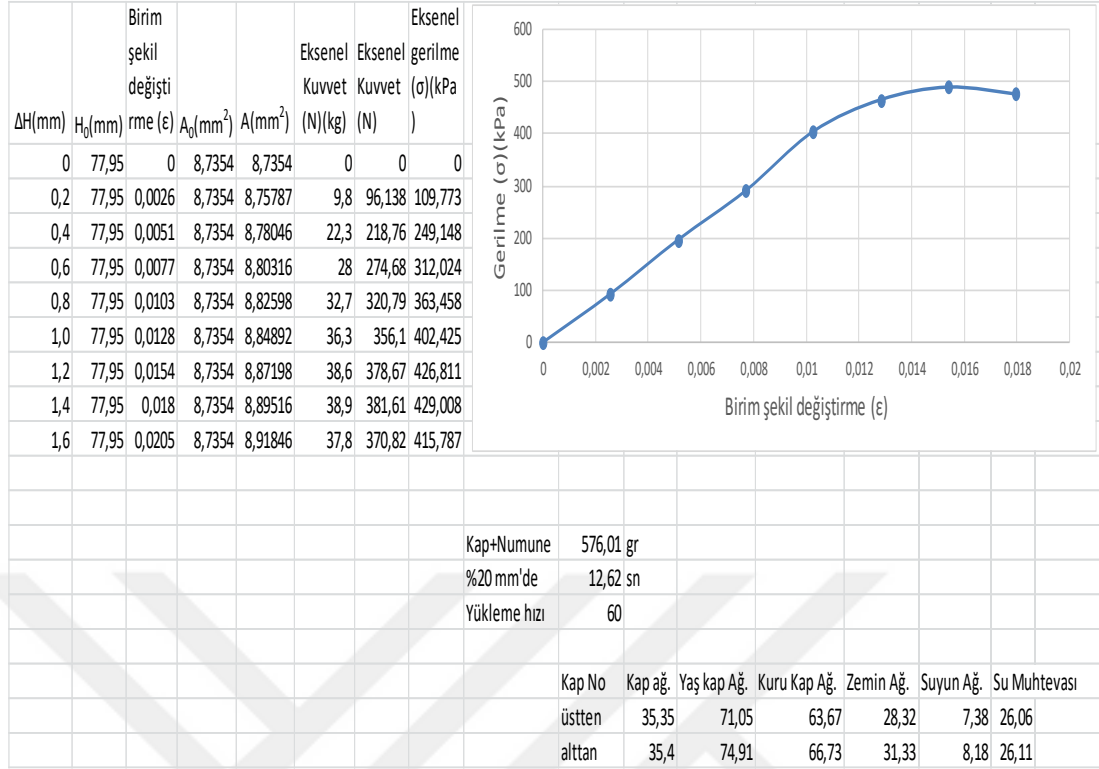
Şekil B. 35. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



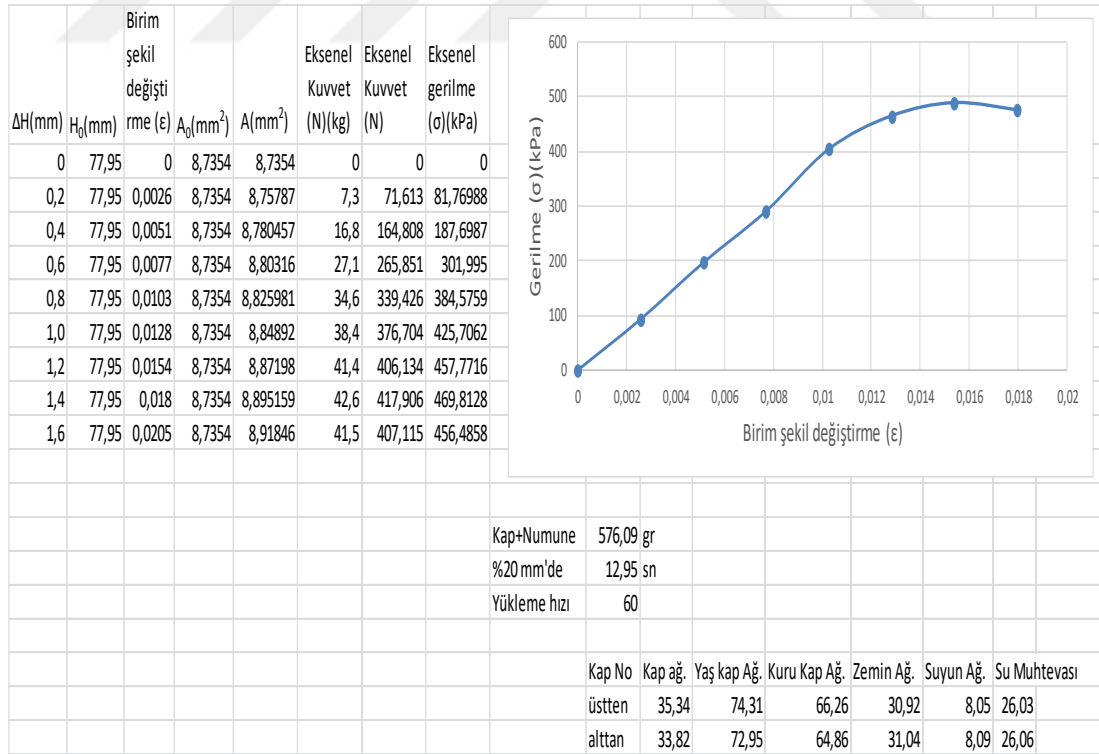
Şekil B.36. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



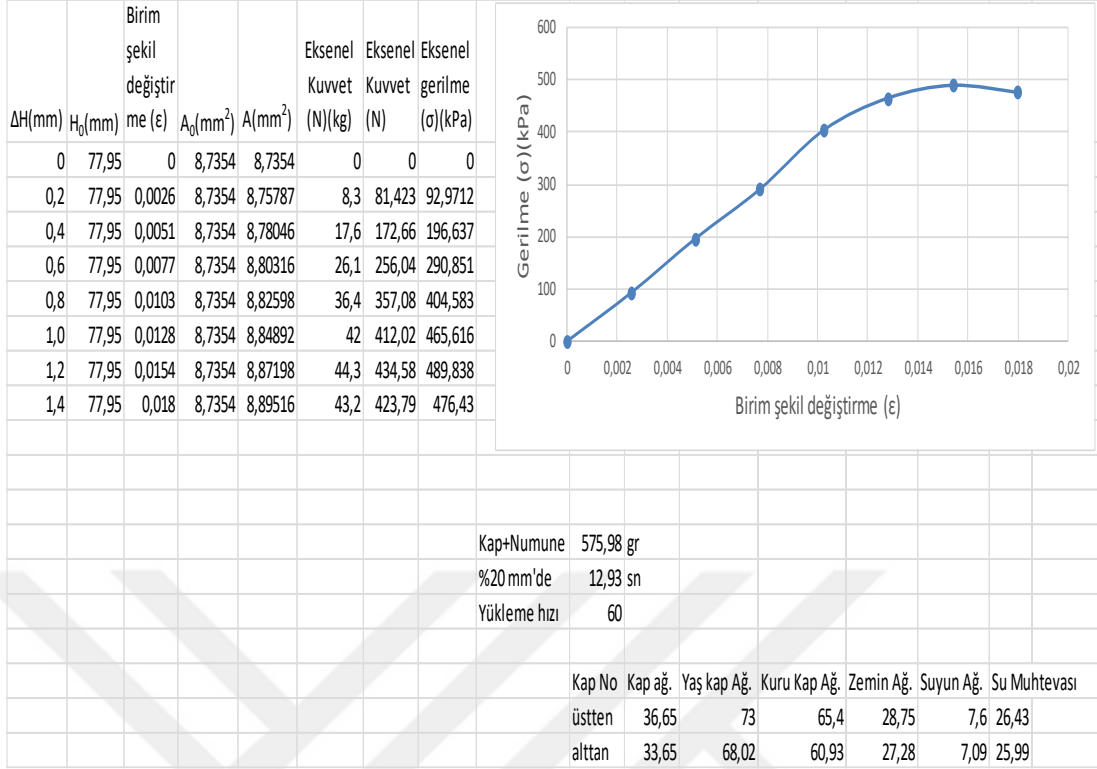
Şekil B.37. %3 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



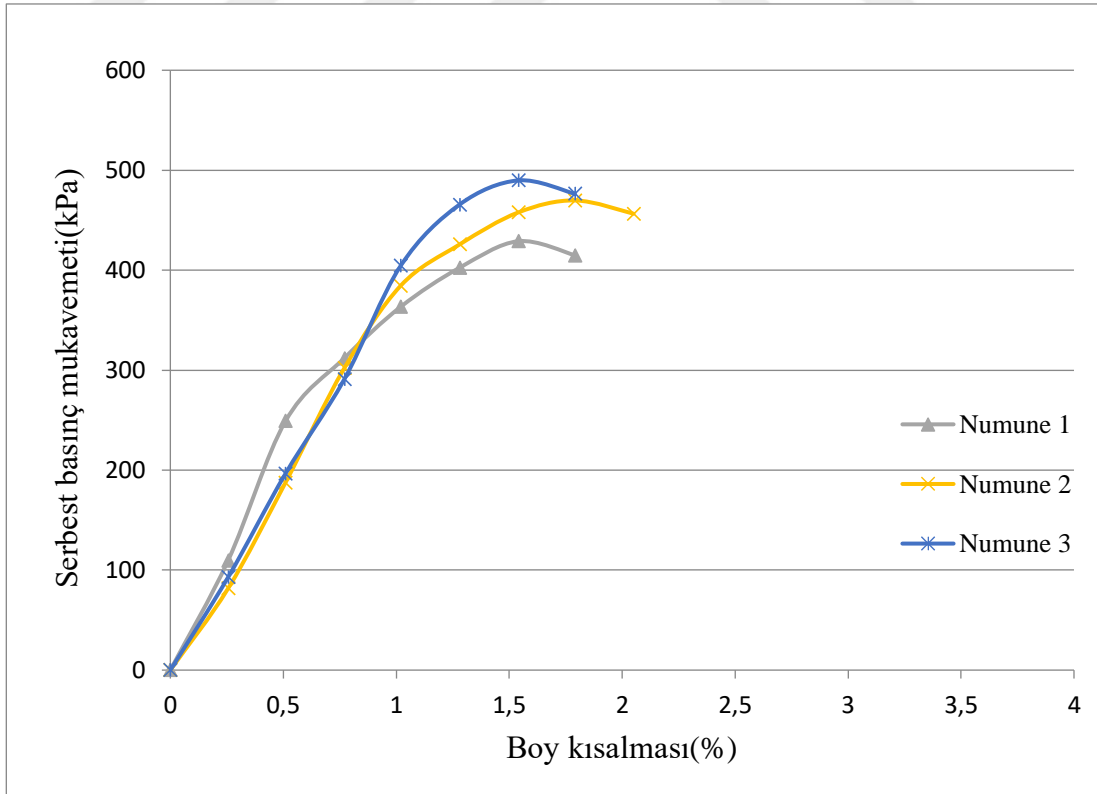
Şekil B.38. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



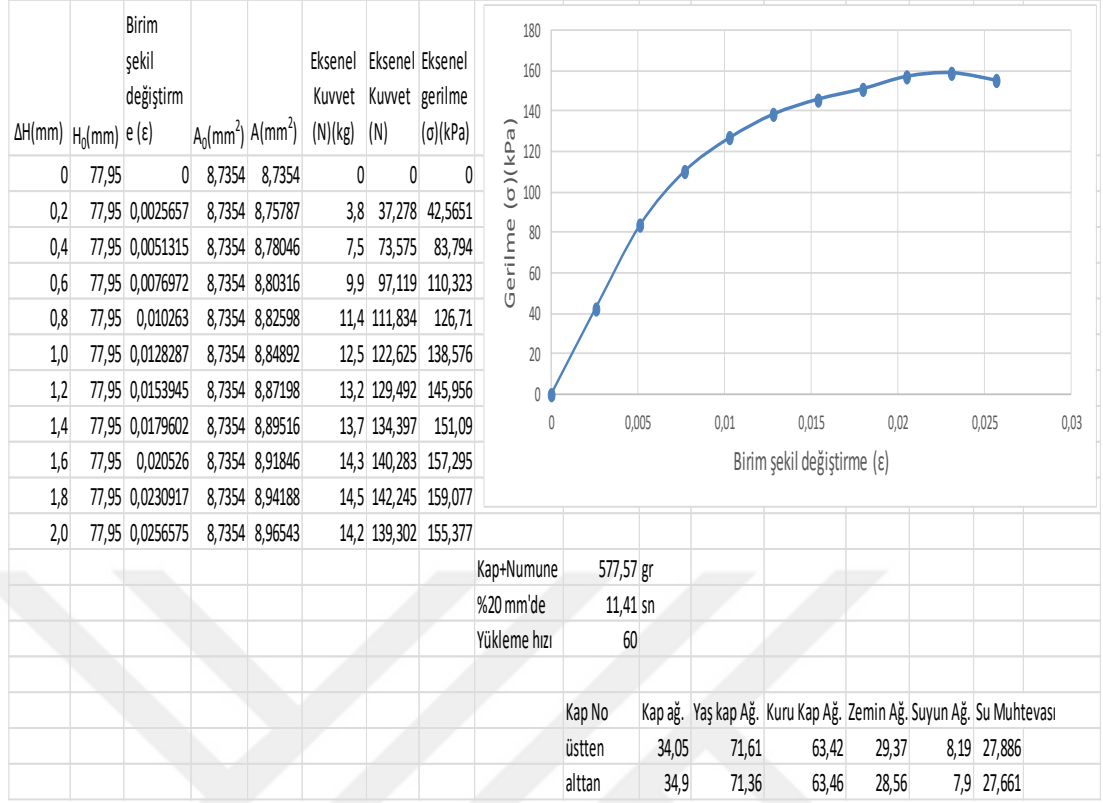
Şekil B.39. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



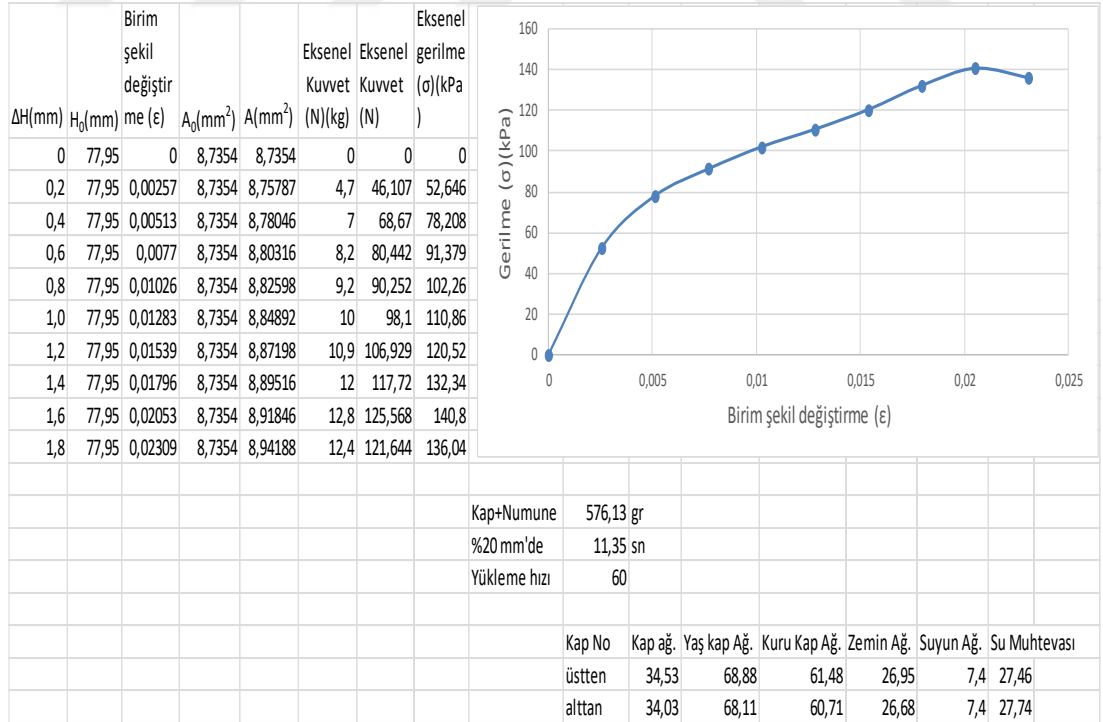
Şekil B.40. Optimum su muhtevasında %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3



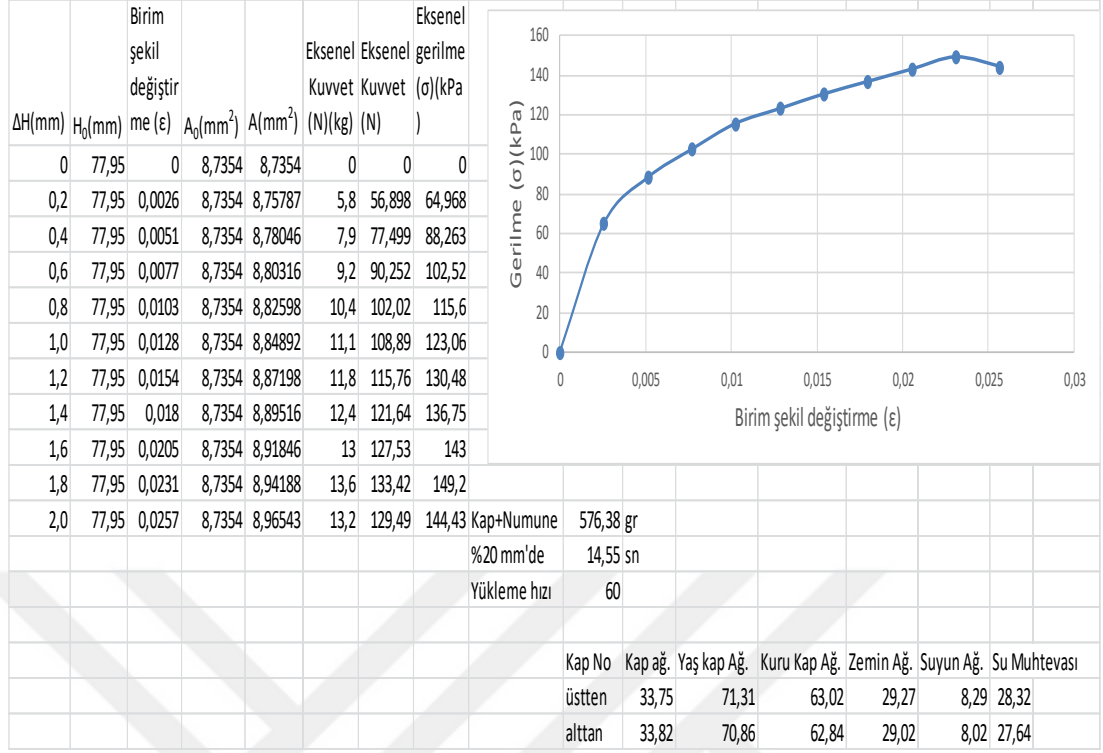
Şekil B.41. %3 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri



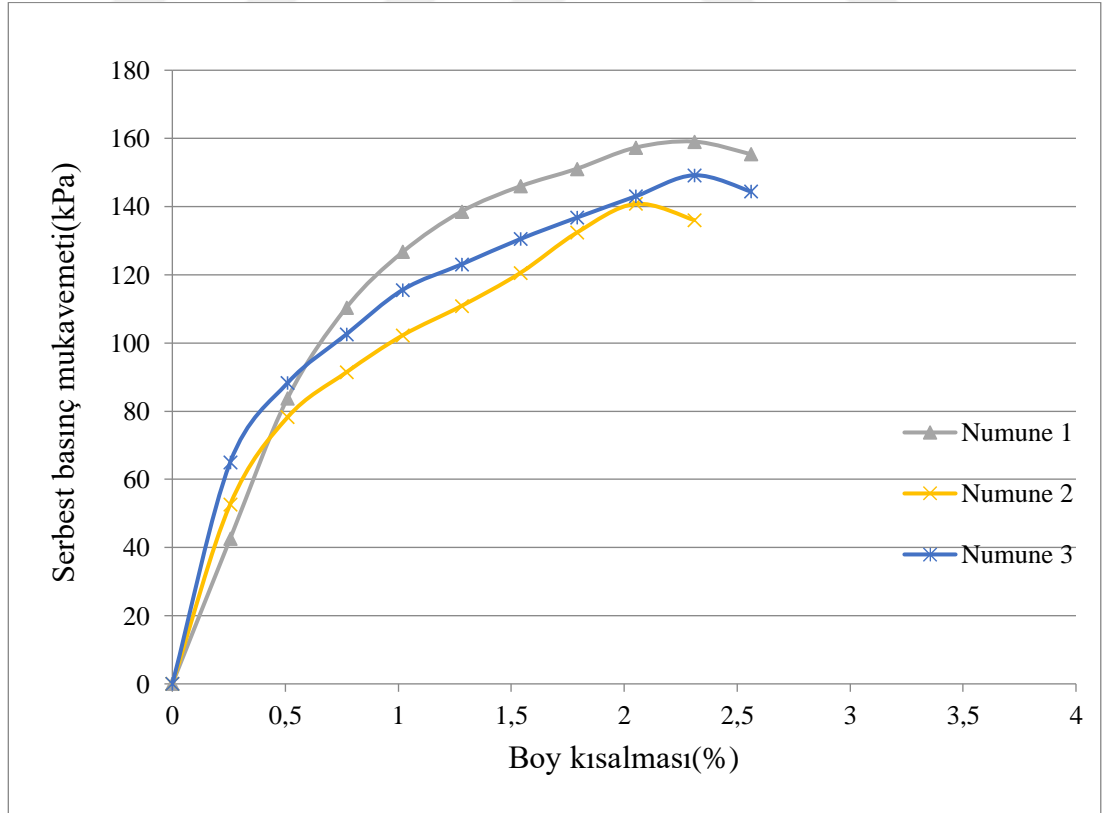
Şekil B.42. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



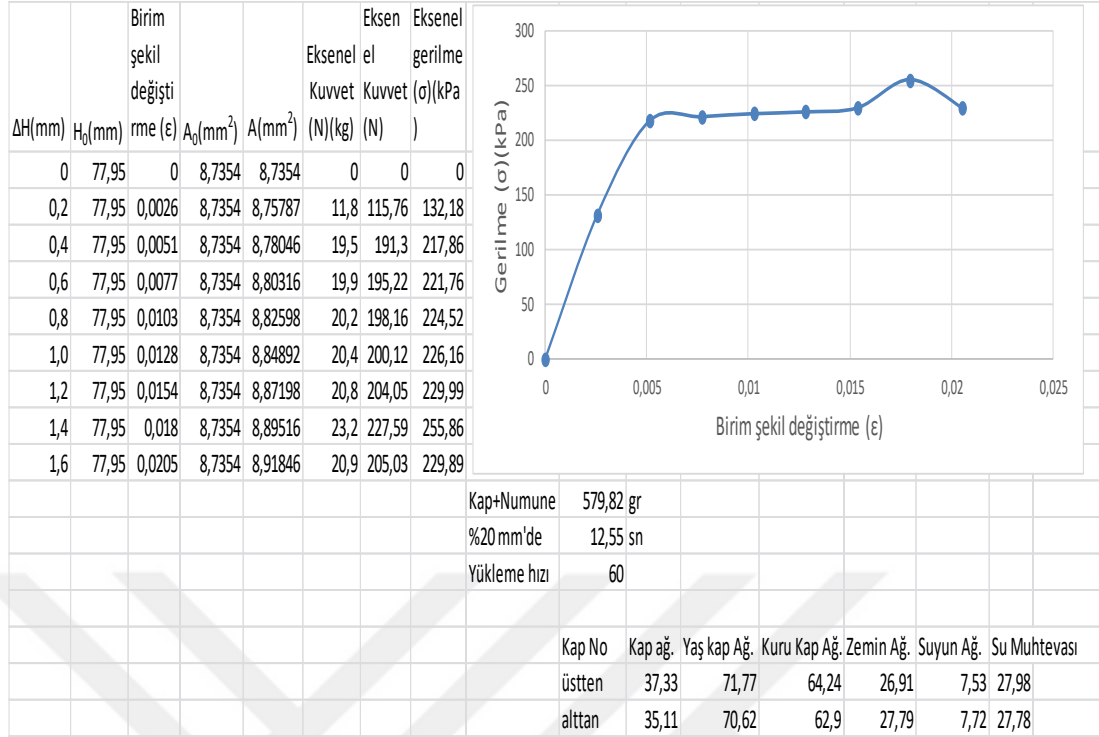
Şekil B.43. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



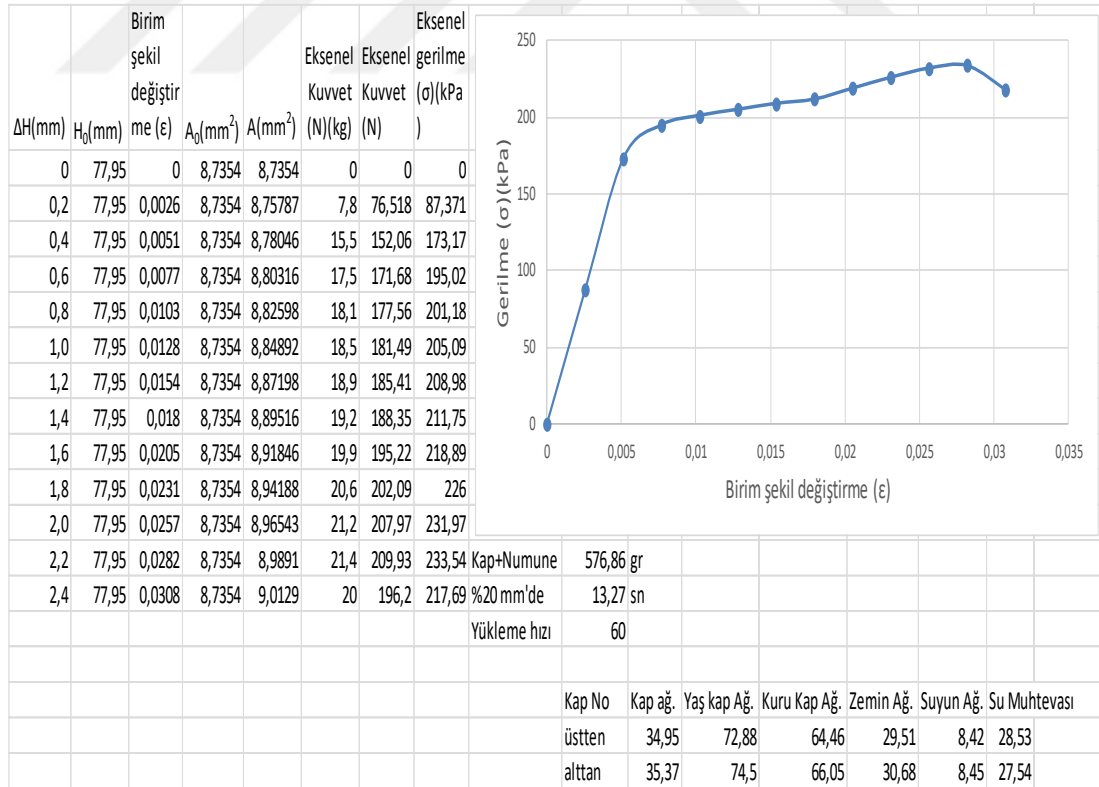
Şekil B.44. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



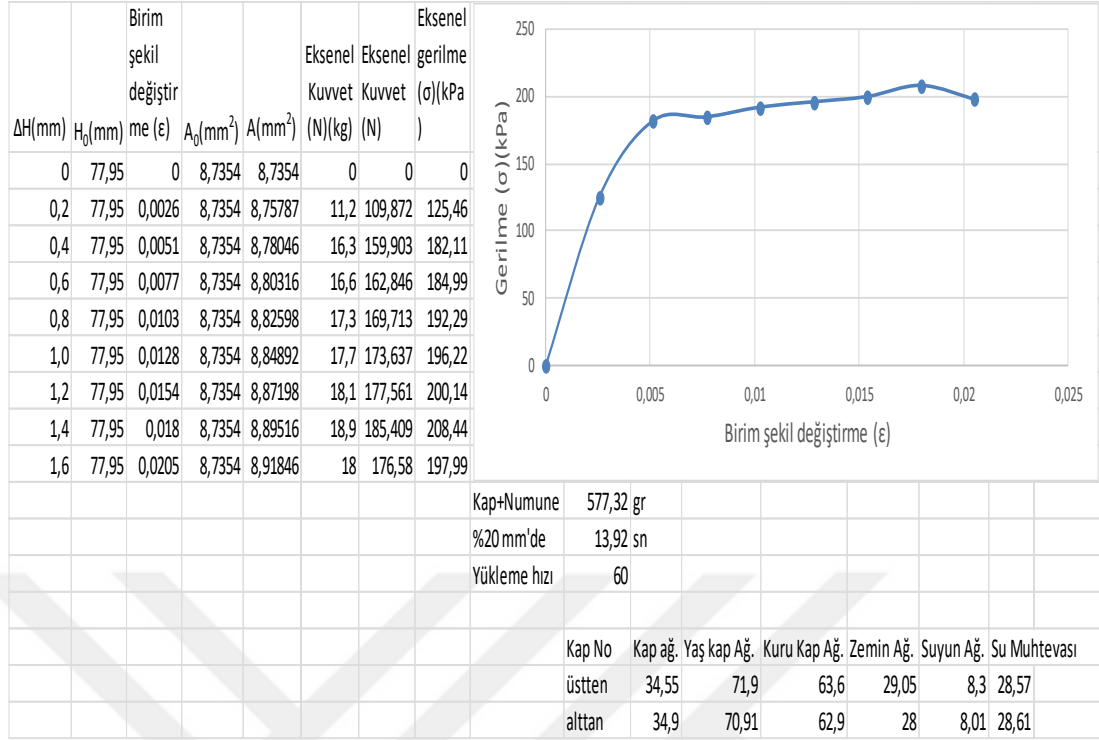
Şekil B.45. %4 sönmüş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafikleri



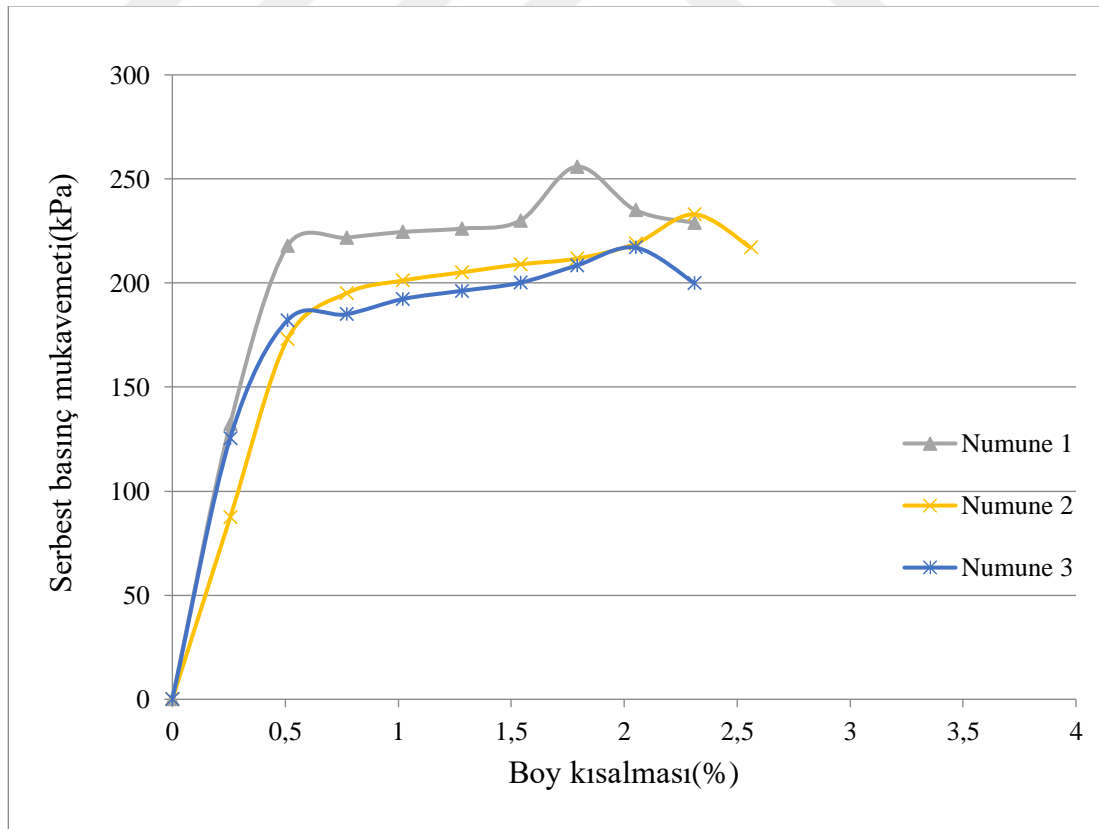
Şekil B.46. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



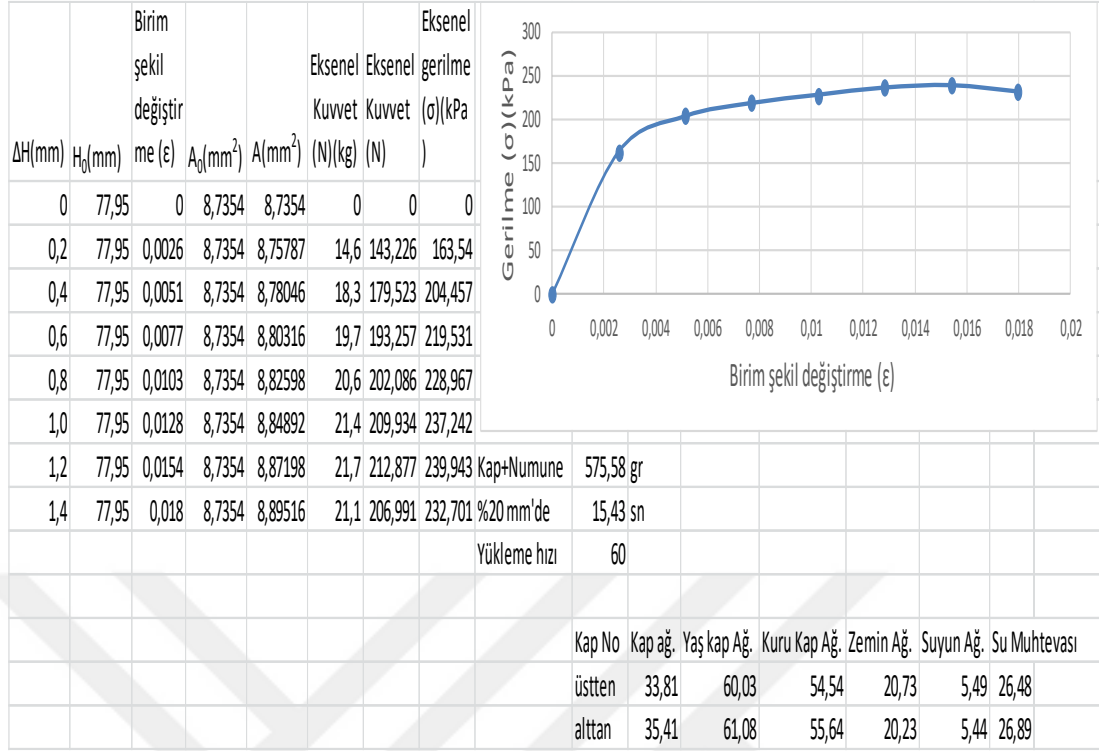
Şekil B.47. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



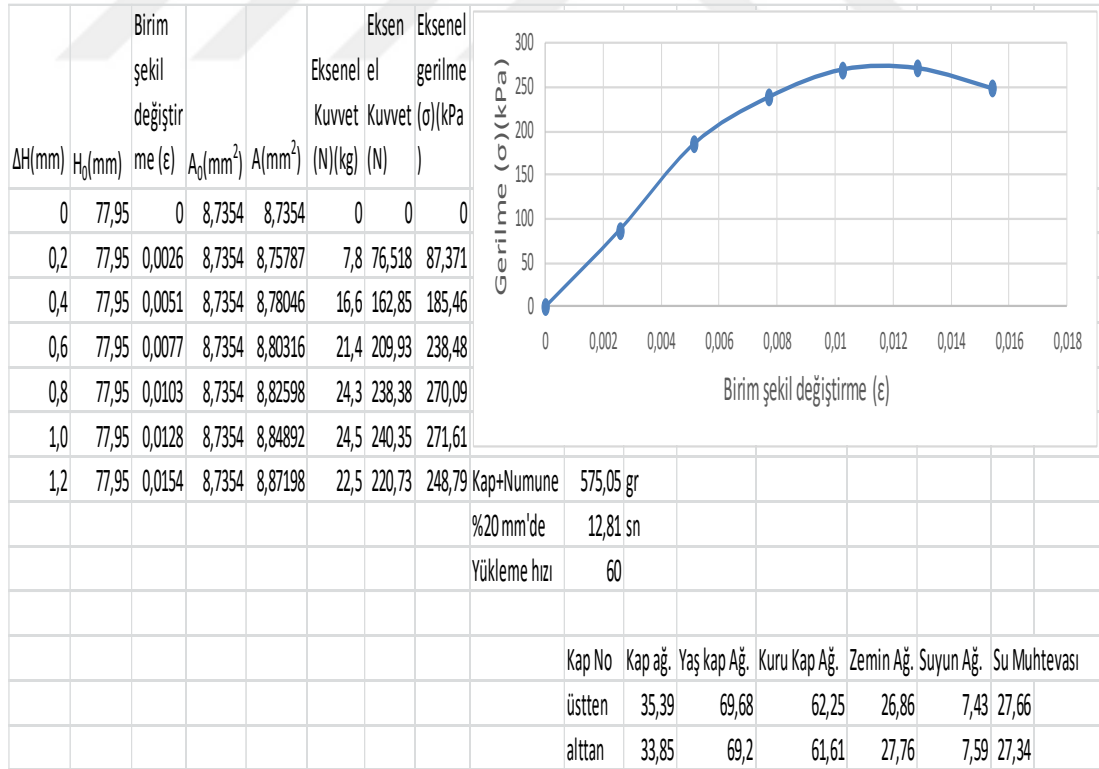
Şekil B.48. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



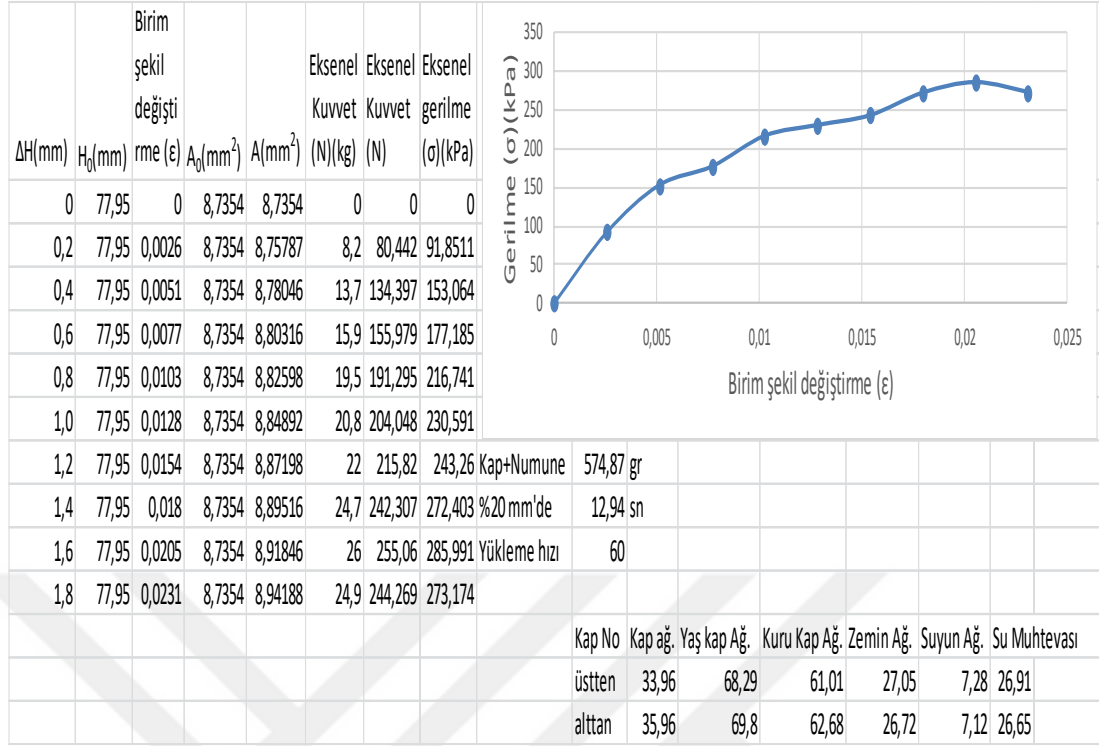
Şekil B.49. %4 sönmüş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



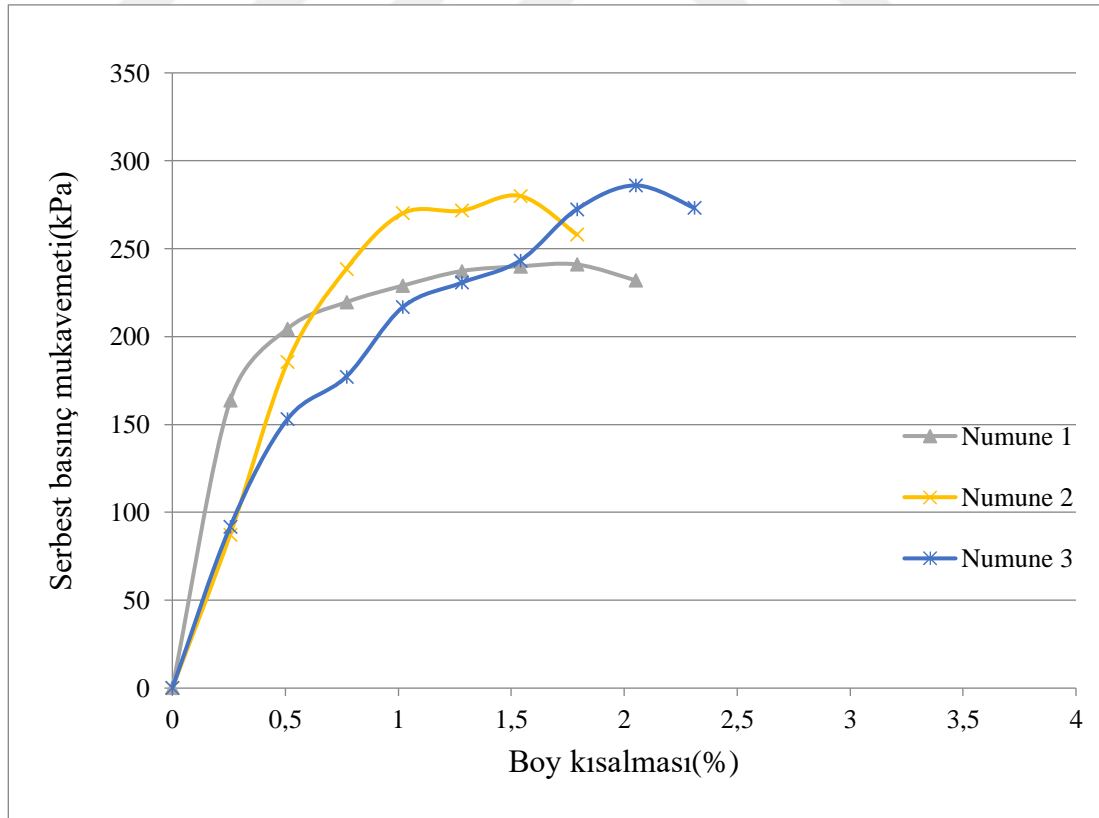
Şekil B.50. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



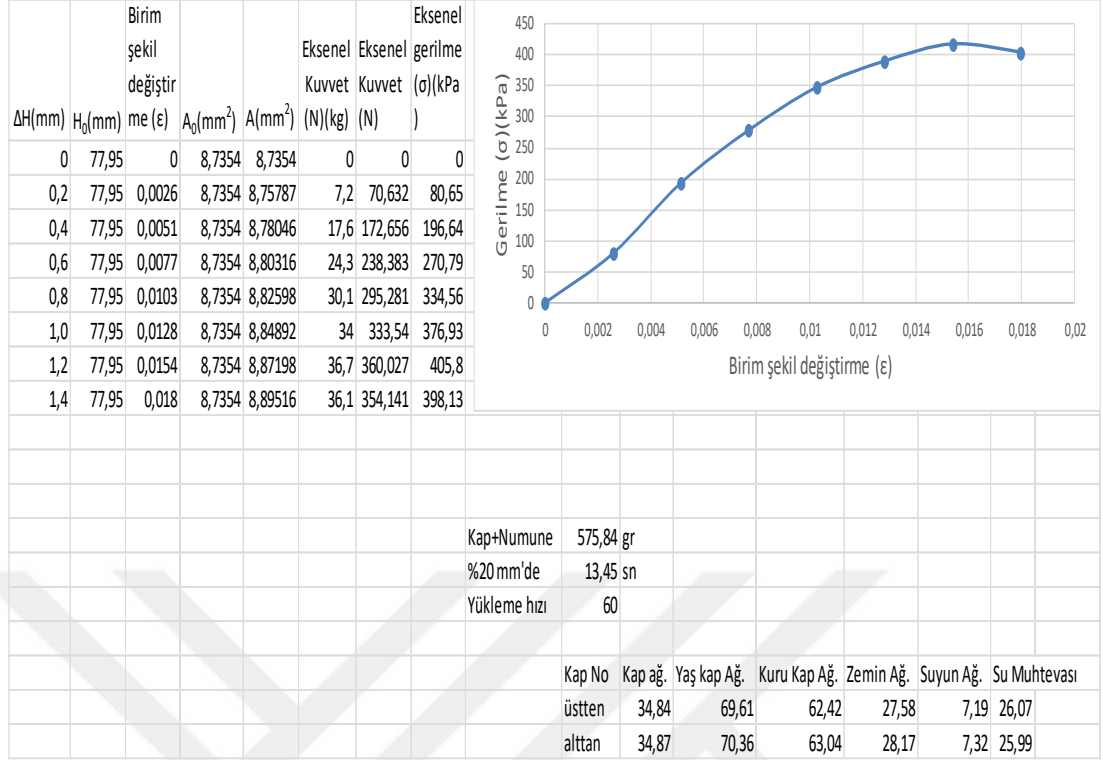
Şekil B.51. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



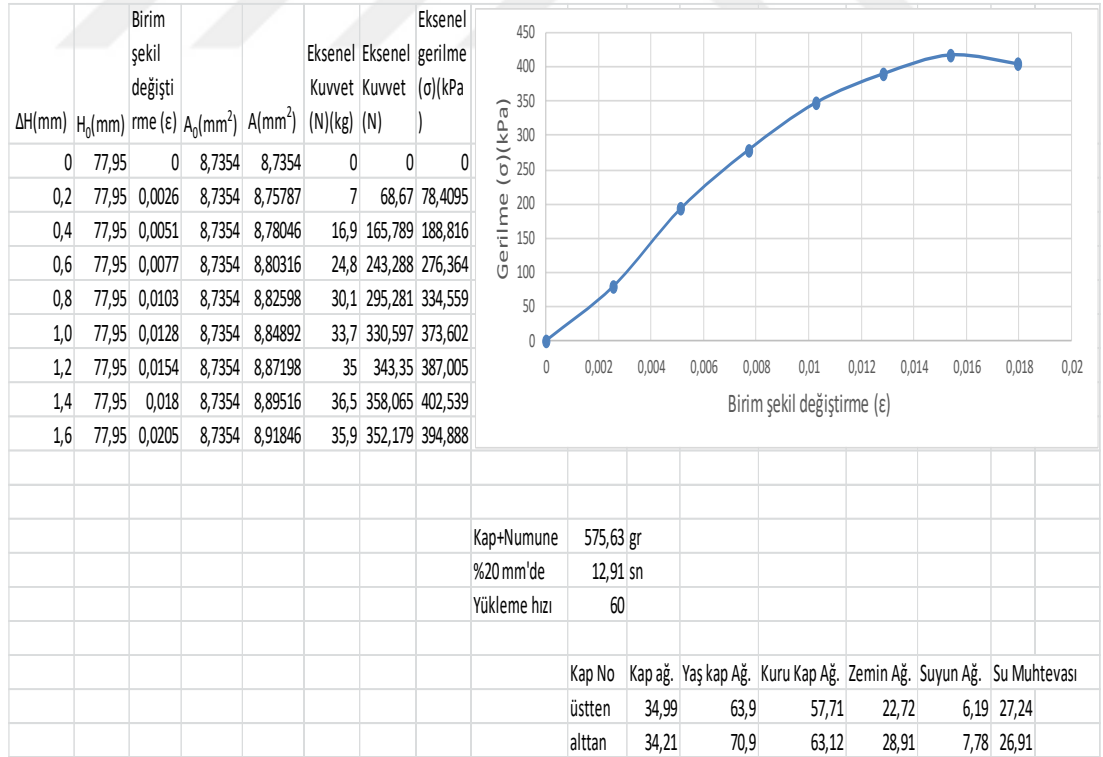
Şekil B.52. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



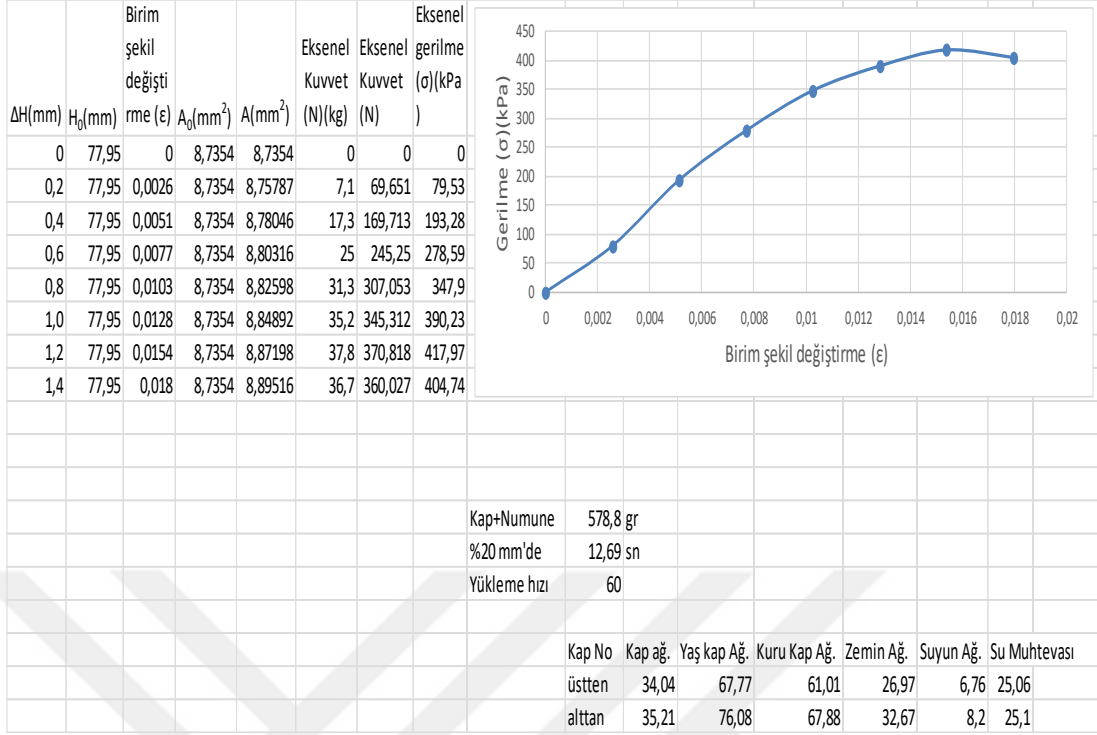
Şekil B.53. %4 sönmüş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



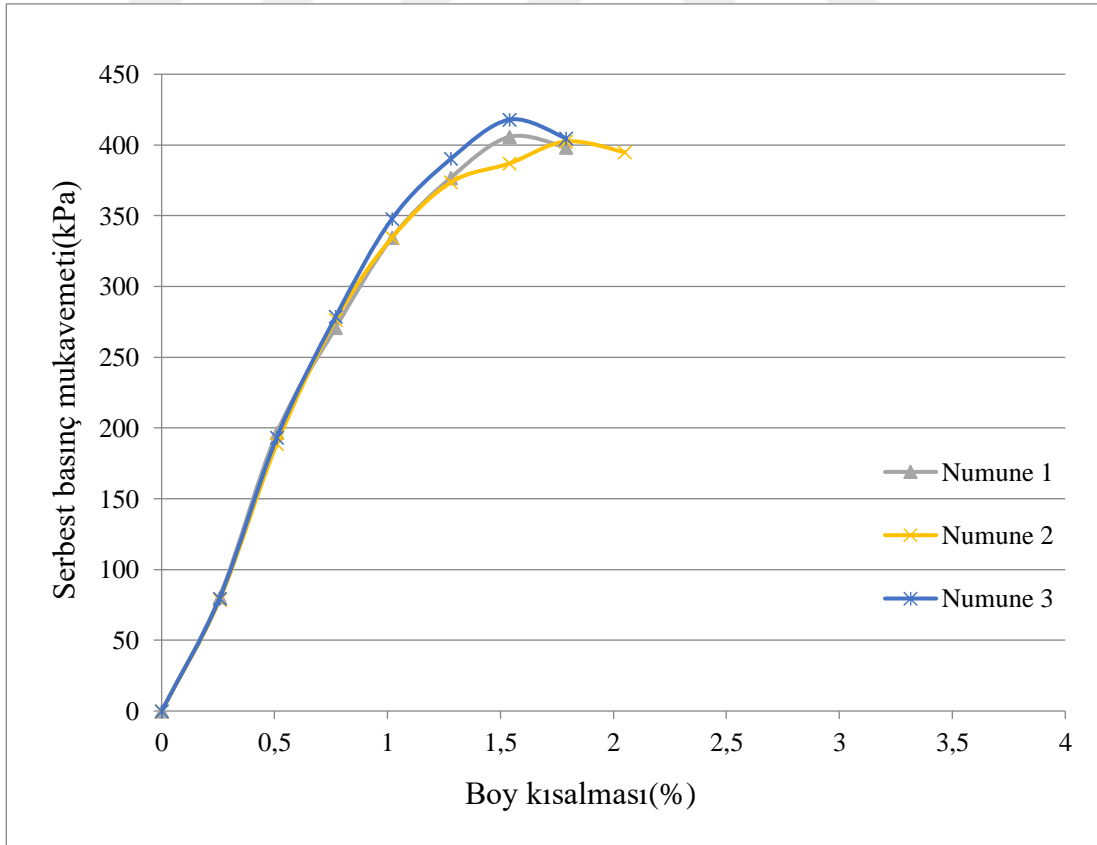
Şekil B.54. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



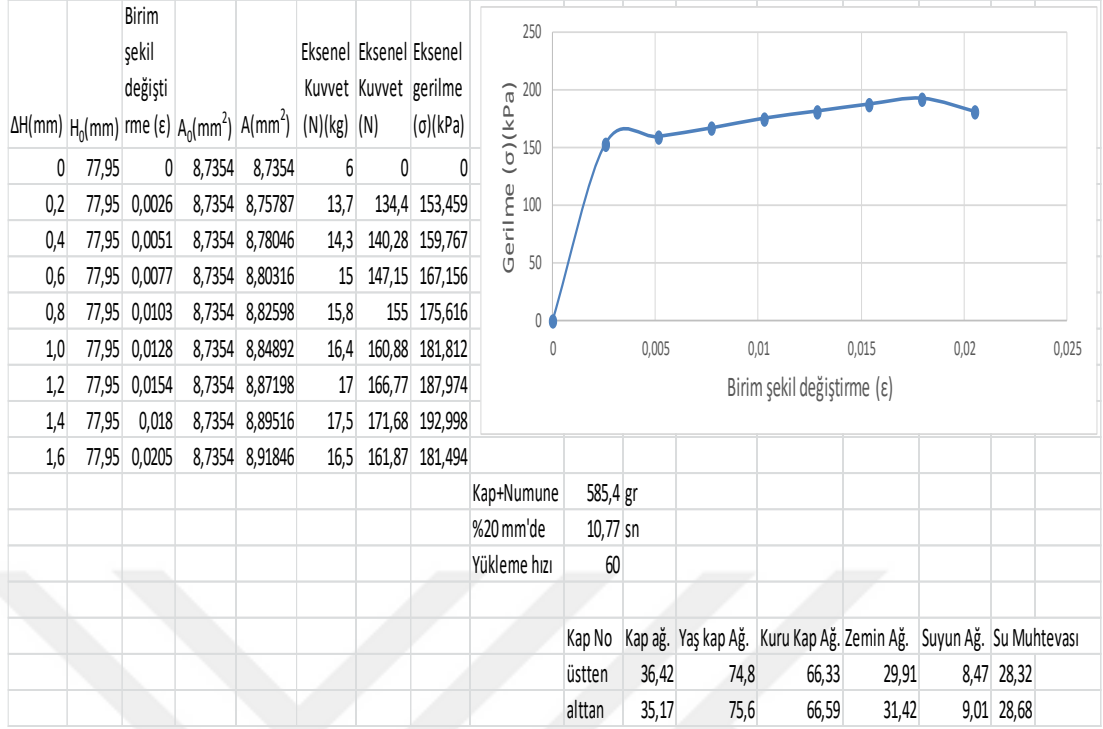
Şekil B.55. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



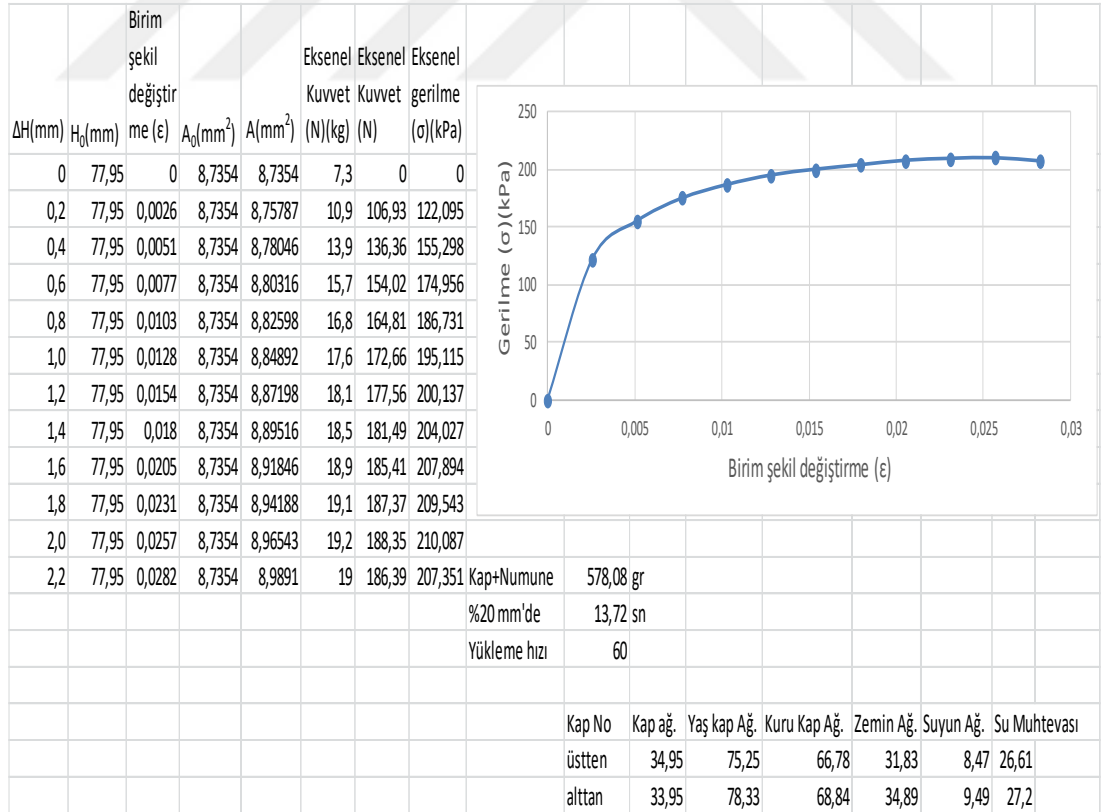
Şekil B.56. Optimum su muhtevasında %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3



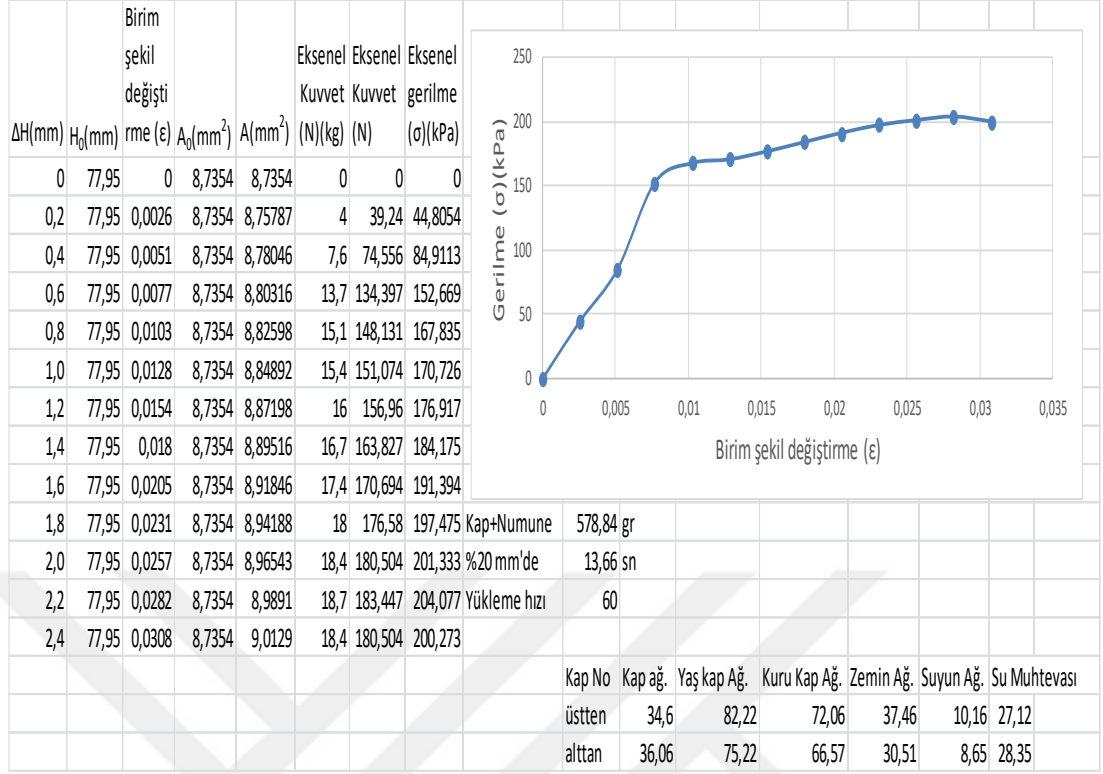
Şekil B.57. %4 sönmüş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri



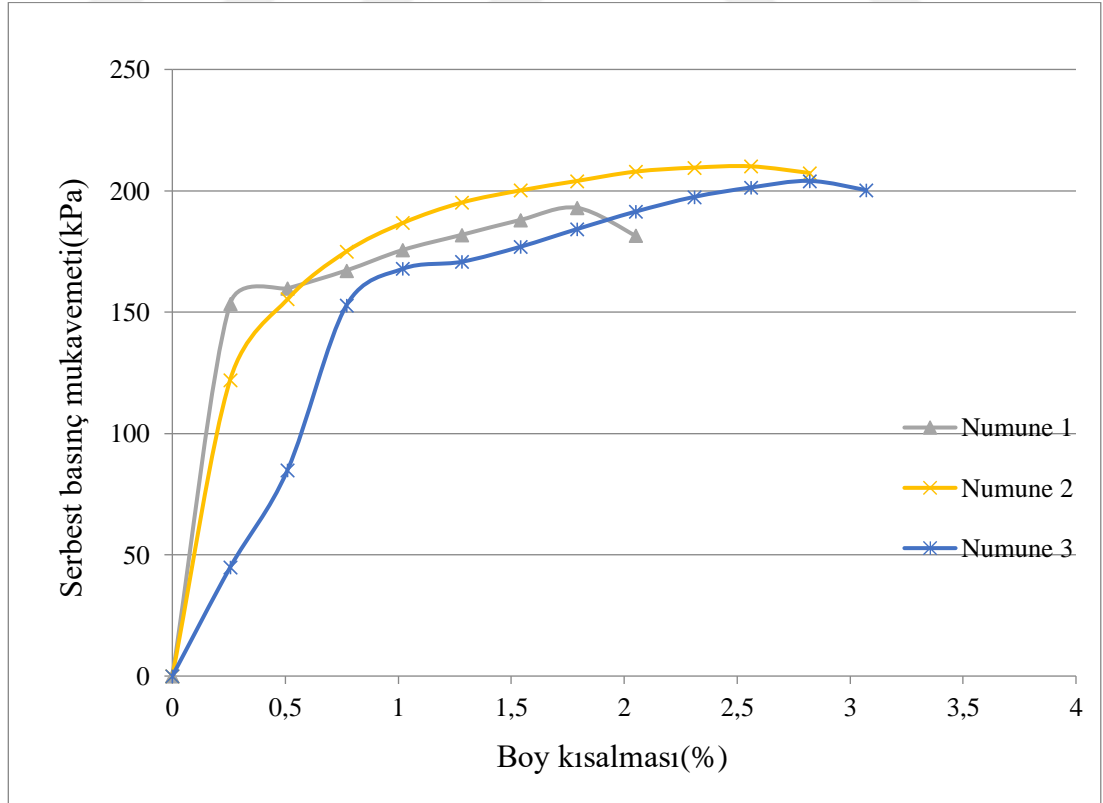
Şekil B.58. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



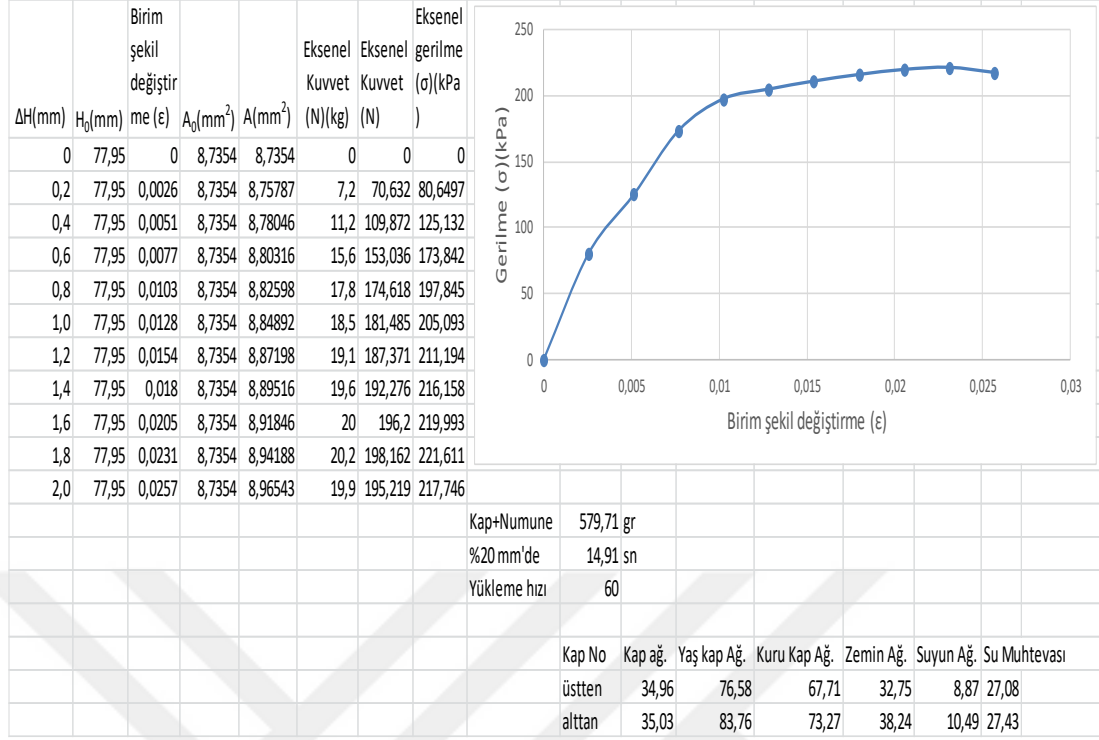
Şekil B.59. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



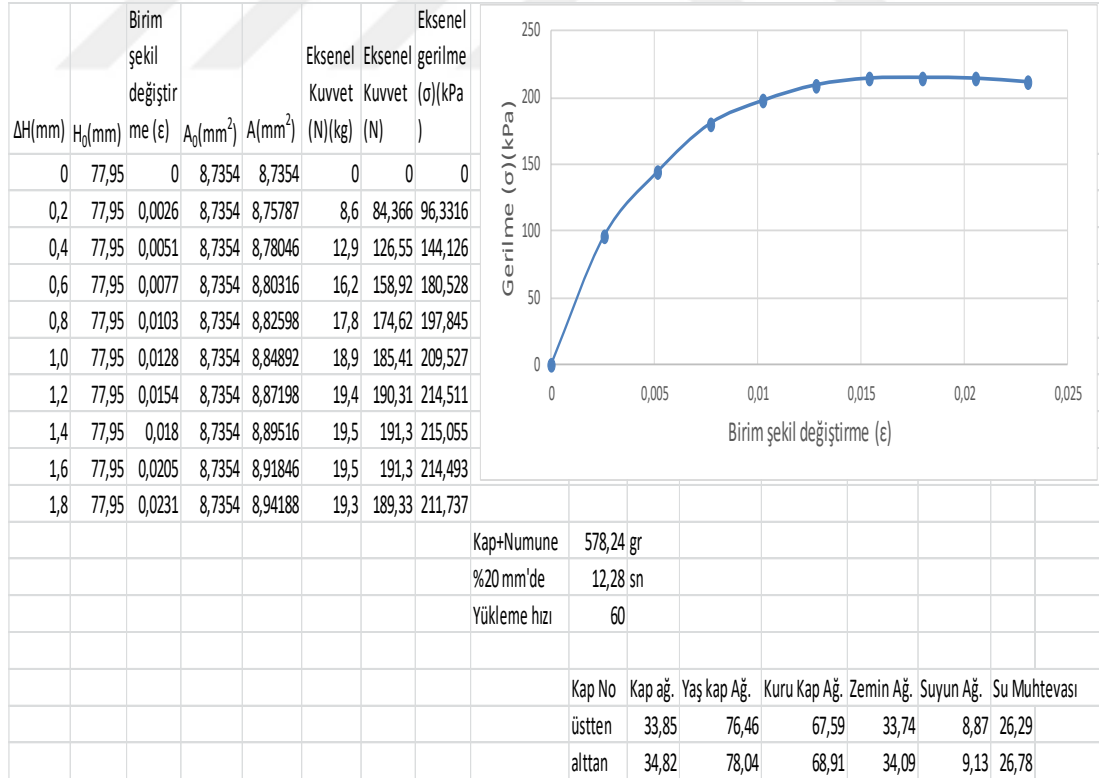
Şekil B.60. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



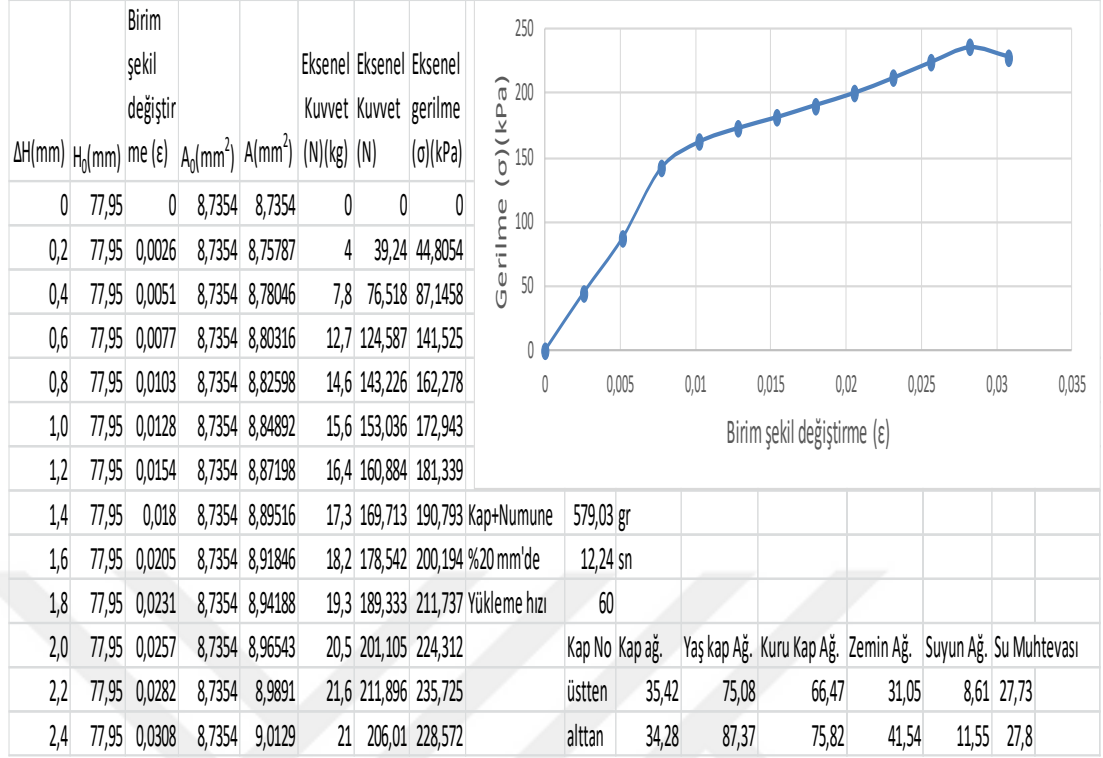
Şekil B.61. %3 sönmemiş kireçli zeminin anlık serbest basınç grafikleri



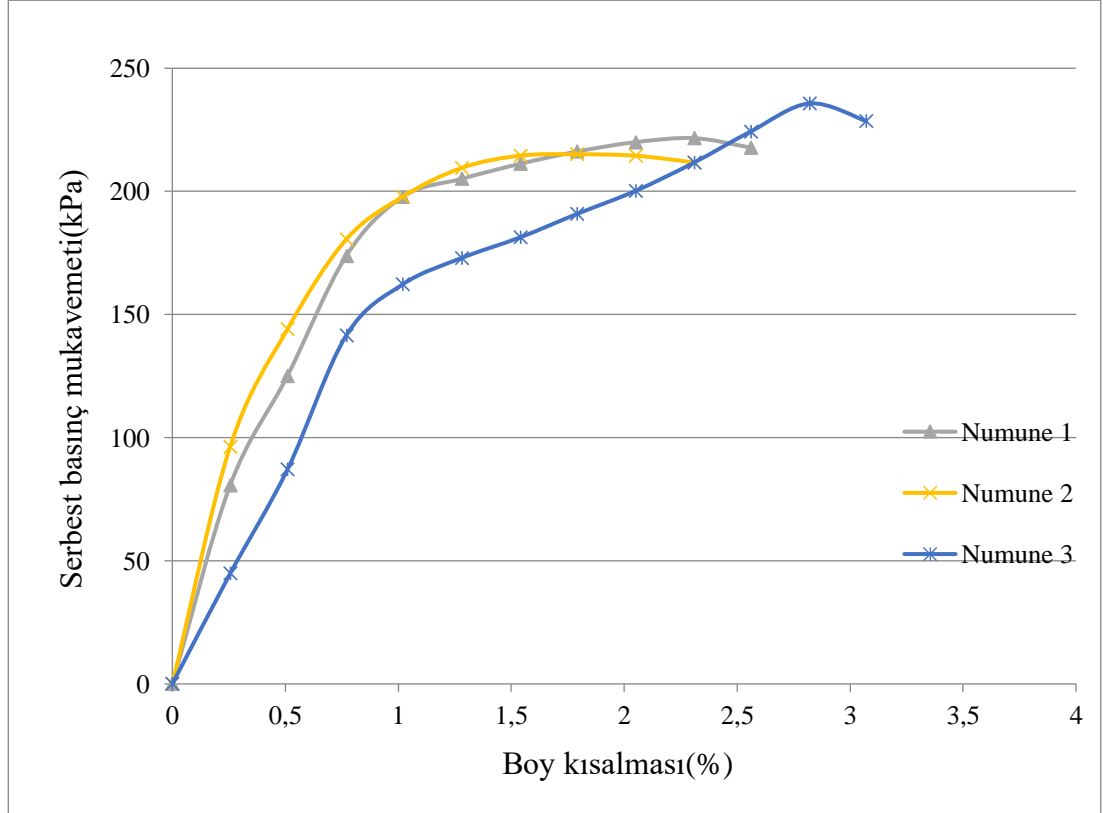
Şekil B.62. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



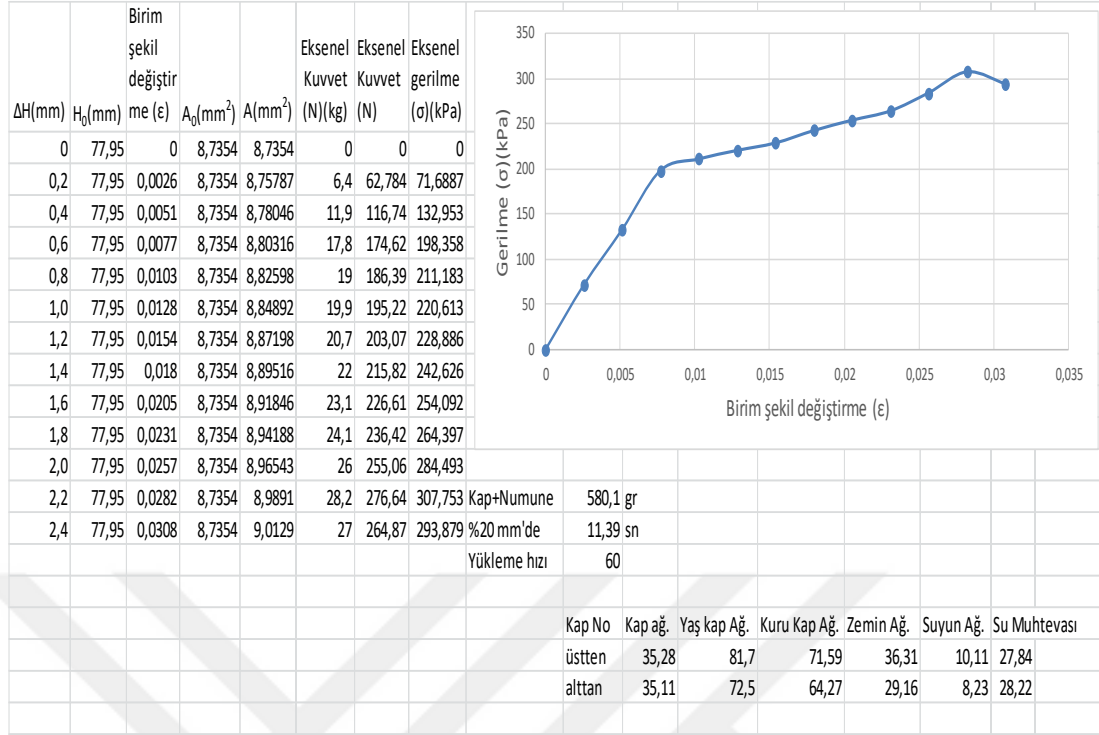
Şekil B.63. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



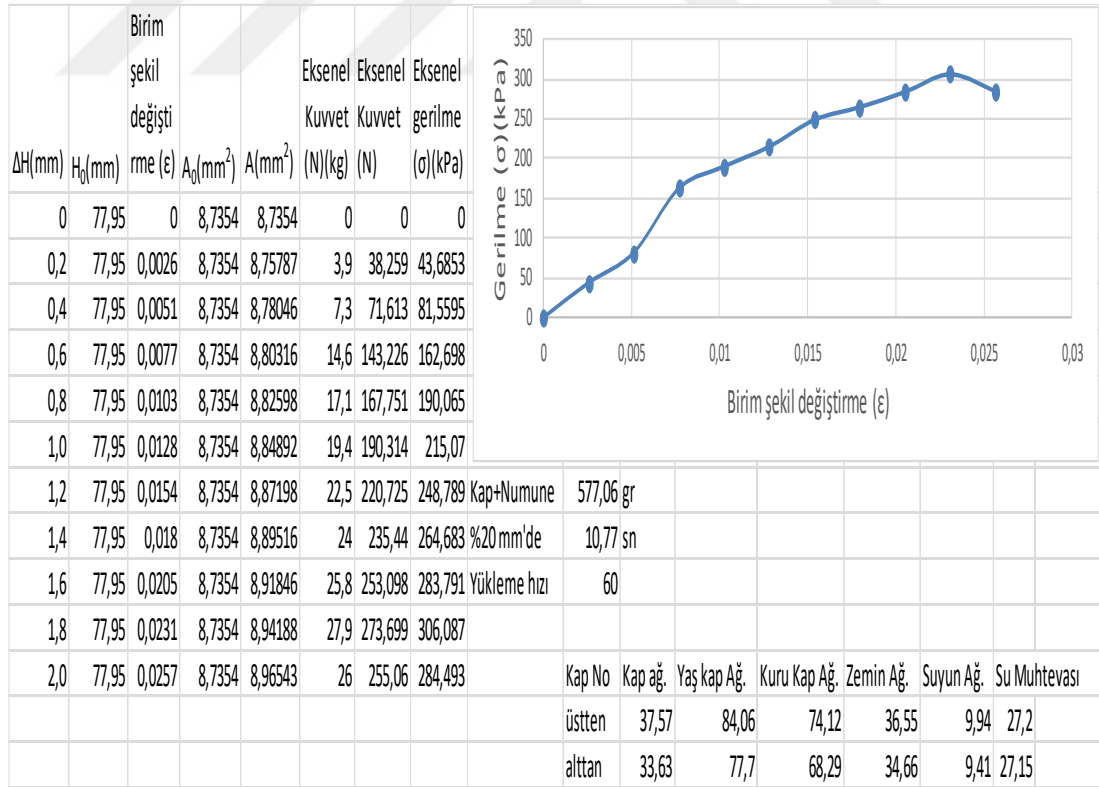
Şekil B.64. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



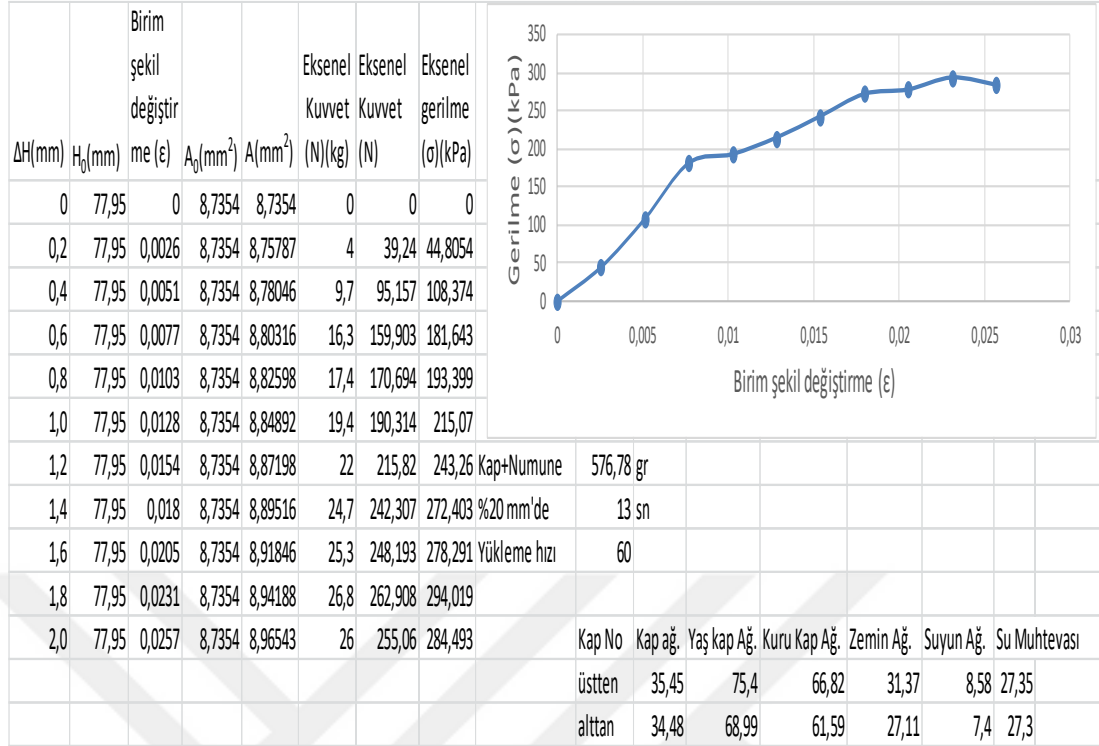
Şekil B.65. %3 sönmemiş kireçli zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



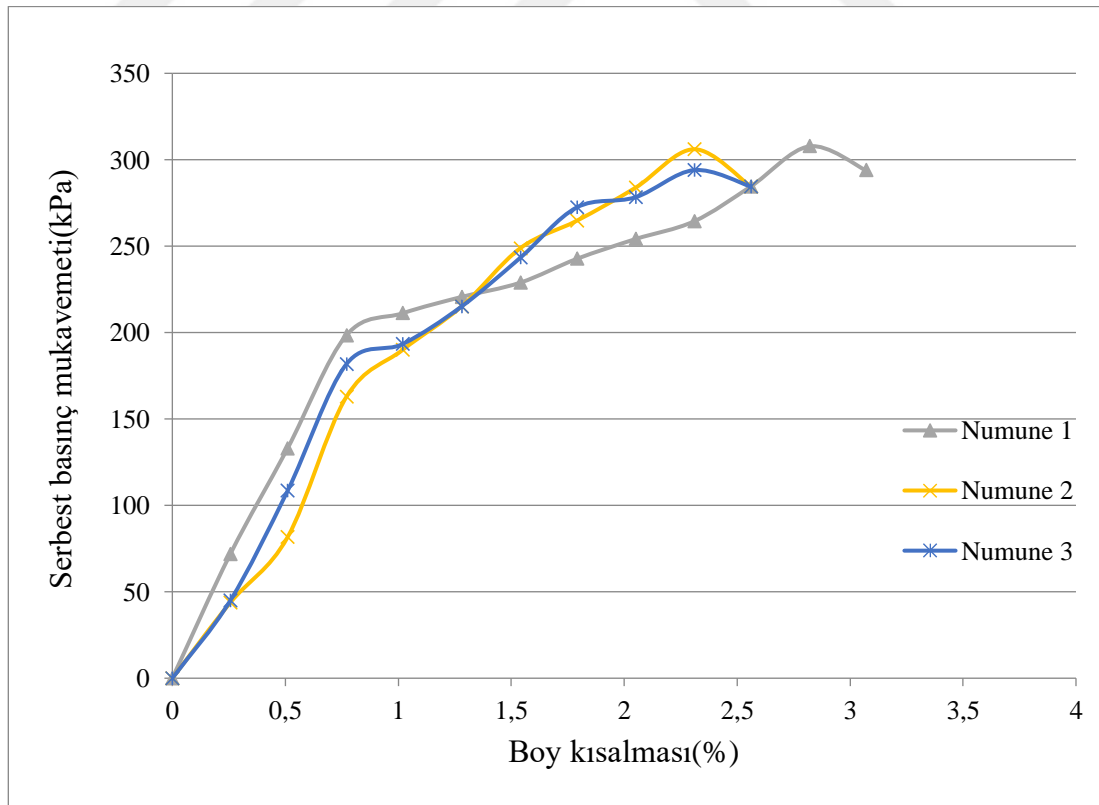
Şekil B.66. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



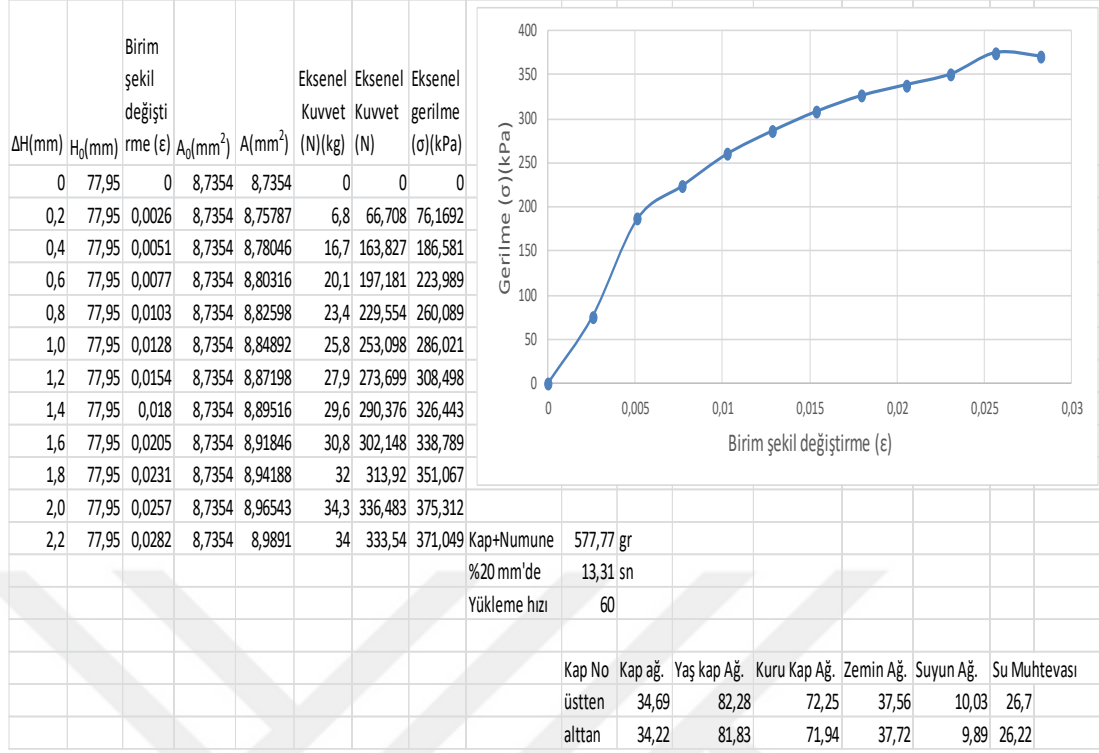
Şekil B.67. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



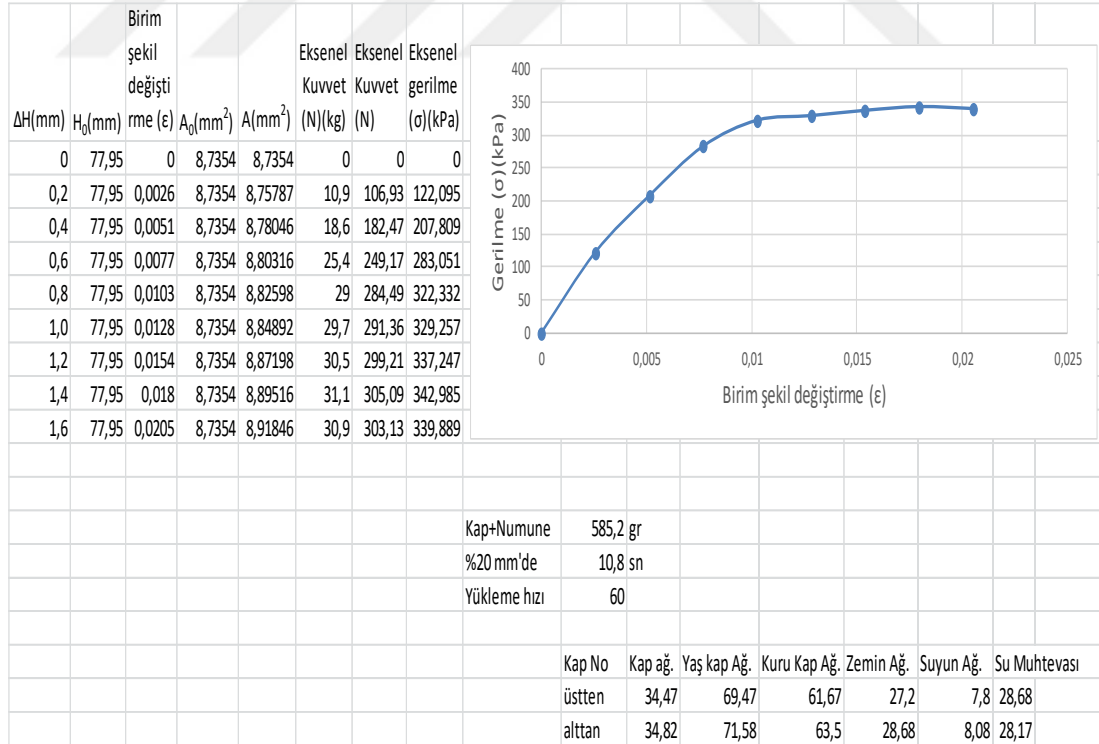
Şekil B.68. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



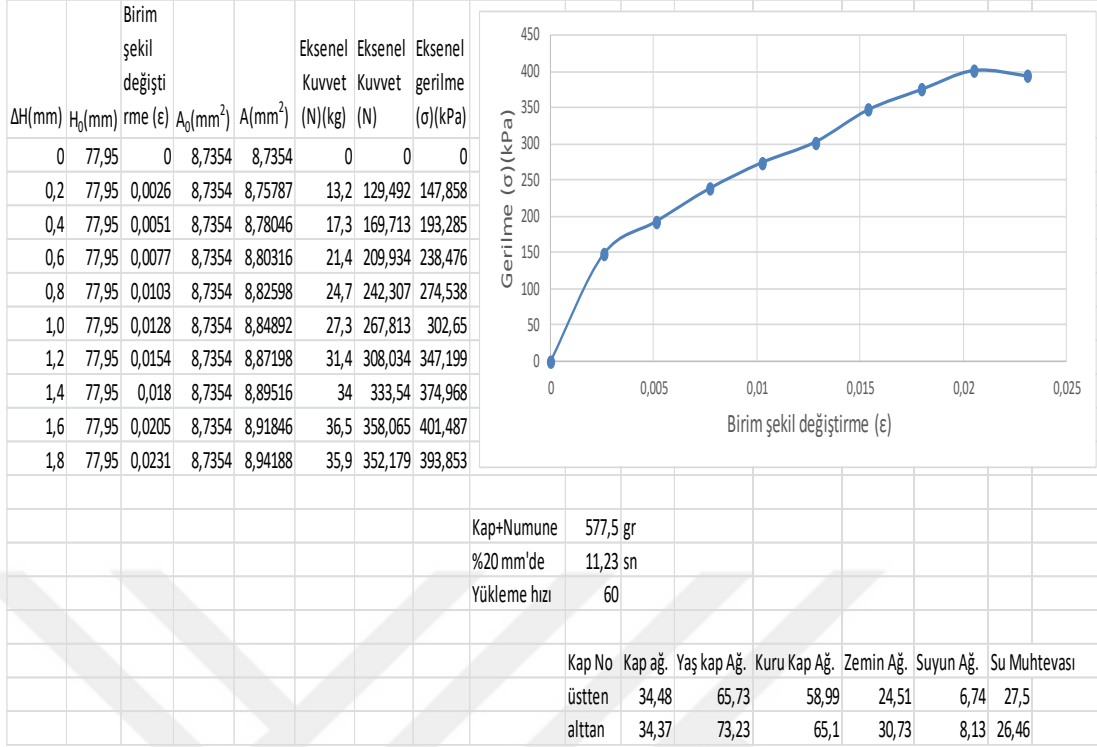
Şekil B.69. %3 sönmemiş kireçli zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



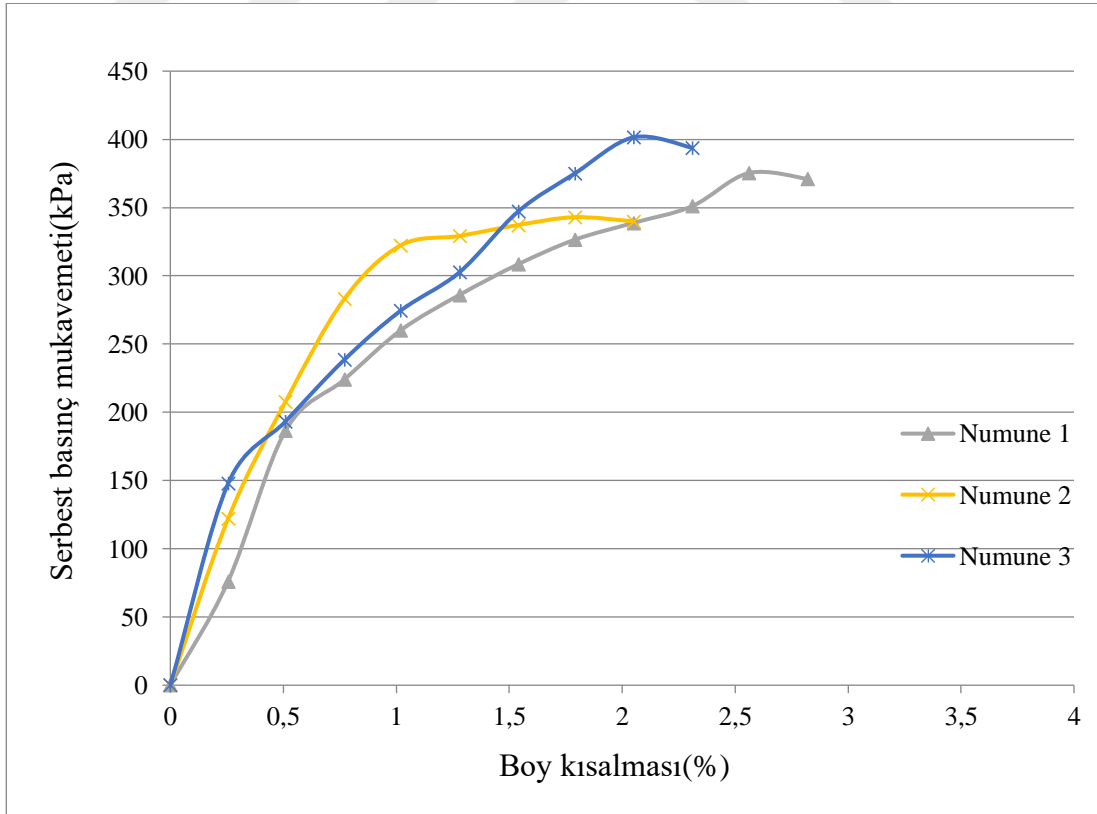
Şekil B.70. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



Şekil B.71. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



Şekil B.72. Doğal su muhtevasında %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3



Şekil B.73. %3 sönmemiş kireçli zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri

Ek-C CBR deneyleri

Tablo C.4. Doğal malzemenin CBR deneyi sonuçları

CBR DENEY TABLOSU (DOĞAL ZEMİN)					
Vuruş/Tabaka	61			Çap (cm)	15,2
Tabaka Sayısı	5			Yüks. (cm)	11,65
				Hacim(cm ³)	2113
	Kuru	Islak		Penetrasyon	Ters Yükleme(kgf)
Kap No	1	2		0,00	0
Kap Ağırlığı gr.	51,00	75,20		0,50	18
Islak Zemin+Kap Ağırlığı (gr)	281,20	246,20		1,00	24
Kuru Zemin+Kap Ağırlığı (gr)	243,00	206,00		1,50	30
Su ağırlığı (gr)	38,20	40,20		2,00	35
Zemin Ağırlığı (gr)	192,00	130,80		2,50	40
Su Muhtevası (w%gr)	19,90	30,73		3,00	44
				3,50	48
				4,00	51
Kalıp+Zemin (gr)	10330	10832		4,50	55
Kalıp Ağırlığı (gr)	6425	6425		5,00	58
Zemin (gr)	3905	4407		5,50	60
Doğal BHA (gr/cm ³ g)	1,848	2,086		6,00	62
Kuru (gr/cm ³ g kuru)	1,541	1,595			
Saat	Şişme (mm)			Düz Yükleme	
0	0,00		Penetrasyon (mm)	2,50	5,00
24	2,16		Standart Yük	1360	2040
48	3,72		Yük (kgf)	40	58
72	4,02		CBR Değerleri(%)	2,94	2,84
96	4,40				
Şişme (%)	3,78		CBR Değeri (%)	2,94	

Tablo C.5. %2 kireçli malzemenin CBR deneyi sonuçları

CBR DENEY TABLOSU (%2 KİREÇ KATKILI)					
Vuruş/Tabaka	61			Çap (cm)	15,2
Tabaka Sayısı	5			Yüks. (cm)	11,65
				Hacim(cm ³)	2113
	Kuru	Islak		Penetrasyon	Ters Yükleme(kgf)
Kap No	1	2		0,00	0
Kap Ağırlığı gr.	78,20	81,00		0,50	26
Islak Zemin+Kap Ağırlığı (gr)	294,20	324,20		1,00	55
Kuru Zemin+Kap Ağırlığı (gr)	254,40	266,00		1,50	81
Su ağırlığı (gr)	39,80	58,20		2,00	106
Zemin Ağırlığı (gr)	176,20	185,00		2,50	128
Su Muhtevası (w%gr)	22,59	31,46		3,00	157
				3,50	186
				4,00	214
Kalıp+Zemin (gr)	10710	11032		4,50	243
Kalıp Ağırlığı (gr)	6611	6611		5,00	276
Zemin (gr)	4099	4421		5,50	314
Doğal BHA (gr/cm ³ g)	1,940	2,092		6,00	354
Kuru (gr/cm ³ g kuru)	1,583	1,592			
Saat	Şişme (mm)			Düz Yüklemeye	
0	0,00		Penetrasyon (mm)	2,50	5,00
24	1,44		Standart Yük	1360	2040
48	1,95		Yük (kgf)	128	276
72	2,13		CBR Değerleri(%)	9,41	13,53
96	2,28				
Şişme (%)	1,96		CBR Değeri (%)	13,53	

Tablo C.6. %3 kireçli malzemenin CBR deneyi sonuçları

CBR DENEY TABLOSU (%3 KİREÇ KATKILI)					
Vuruş/Tabaka	61			Çap (cm)	15,2
Tabaka Sayısı	5			Yüks. (cm)	11,65
				Hacim(cm ³)	2113
	Kuru	Islak		Penetrasyon	Ters Yükleme(kgf)
Kap No	1	2		0,00	0
Kap Ağırlığı gr.	343,00	51,00		0,50	32
Islak Zemin+Kap Ağırlığı (gr)	758,00	228,20		1,00	67
Kuru Zemin+Kap Ağırlığı (gr)	685,00	190,20		1,50	108
Su ağırlığı (gr)	73,00	38,00		2,00	152
Zemin Ağırlığı (gr)	342,00	139,20		2,50	208
Su Muhtevası (w%gr)	21,35	27,30		3,00	267
				3,50	326
				4,00	392
Kalıp+Zemin (gr)	11204	11460		4,50	463
Kalıp Ağırlığı (gr)	7095	7095		5,00	528
Zemin (gr)	4109	4365		5,50	618
Doğal BHA (gr/cm ³ g)	1,945	2,066		6,00	701
Kuru (gr/cm ³ g kuru)	1,603	1,623			
Saat	Şişme (mm)			Düz Yüklemeye	
0	0,00		Penetrasyon (mm)	2,50	5,00
24	0,68		Standart Yük	1360	2040
48	1,97		Yük (kgf)	208	528
72	1,10		CBR Değerleri(%)	15,29	25,88
96	1,14				
Şişme (%)	0,98		CBR Değeri (%)	25,88	

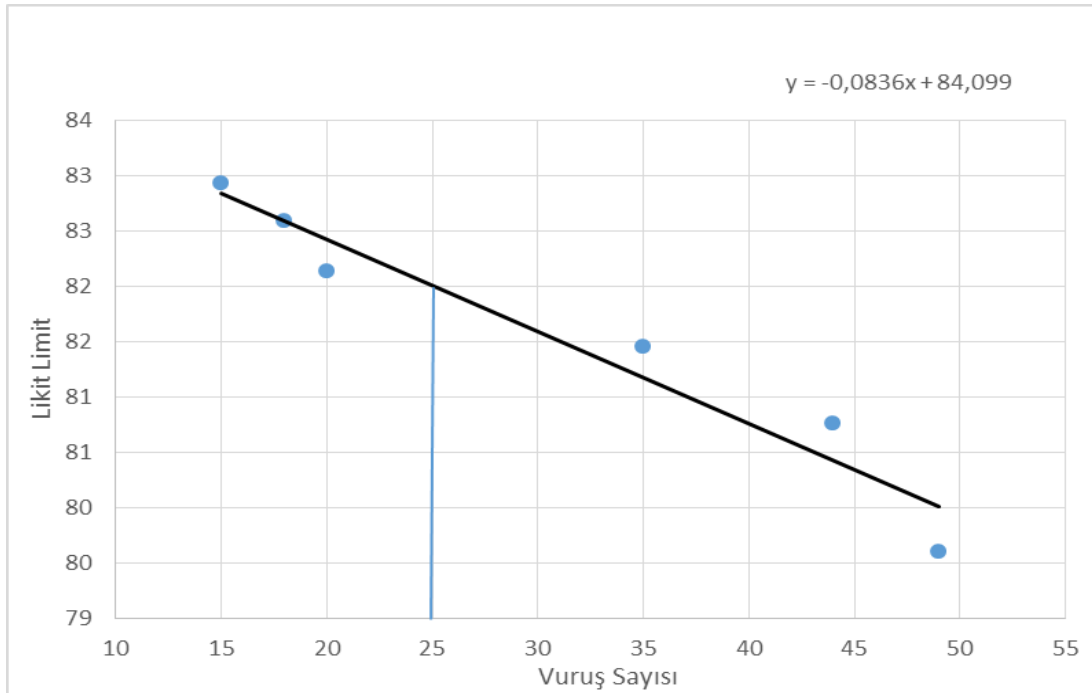
Ek-D Kıvam limitleri

Tablo D.7. %2 kireç katkılı zeminin likit limit değeri

Likit Limit								
Kap No	W _{kap}	Vuruş	W _{yaş+kap}	W _{kuru+kap}	W _{kuru}	W _{yaş}	W _w	W _L
68	34,99	49	43,00	39,45	4,46	8,01	3,55	79,60
92	34,86	44	41,53	38,55	3,69	6,67	2,98	80,76
152	35,96	35	43,98	40,38	4,42	8,02	3,60	81,45
82	33,85	20	42,21	38,44	4,59	8,36	3,77	82,14
162	35,85	18	41,20	38,78	2,93	5,35	2,42	82,59
102	34,99	15	44,10	39,97	4,98	9,11	4,13	82,93

Tablo D.8. %2 kireç katkılı zeminin plastik limit değeri

Plastik Limit							
Kap No	W _{kap}	W _{yaş+kap}	W _{kuru+kap}	W _{kuru}	W _{yaş}	W _w	W _p
195	34,64	39,85	38,72	4,08	5,21	1,13	27,70
97	34,48	39,96	38,66	4,18	5,48	1,30	31,10
142	35,37	40,87	39,65	4,28	5,50	1,22	28,50
						W _p	29,10



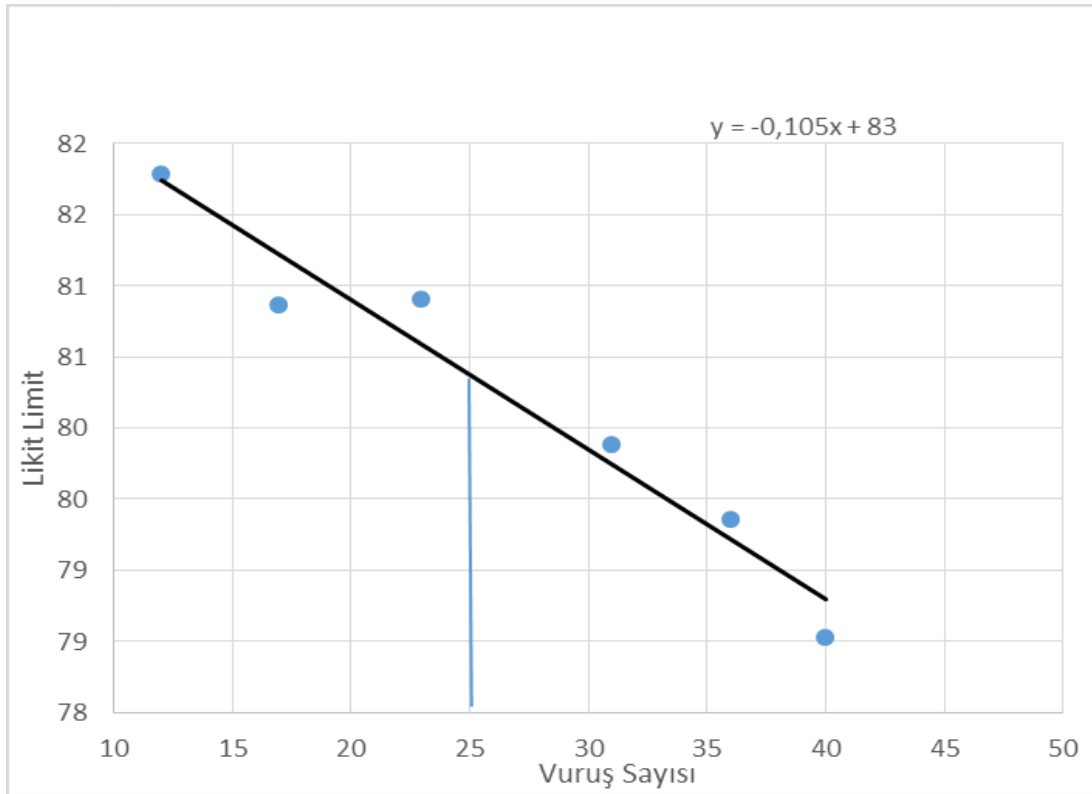
Şekil D.74. %2 kireç katkılı zeminin likit limit grafiği

Tablo D.9. %3 kireç katkılı zeminin likit limit değeri

Likit Limit								
Kap No	W _{kap}	Vuruş	W _{yaş+kap}	W _{kuru+kap}	W _{kuru}	W _{yaş}	W _w	W _L
113	34,42	40	48,72	42,43	8,01	14,30	6,29	78,53
291	34,49	36	42,83	39,14	4,65	8,34	3,69	79,35
148	33,68	31	42,80	38,75	5,07	9,12	4,05	79,88
362	35,54	23	43,59	39,99	4,45	8,05	3,60	80,90
122	36,28	17	44,31	40,72	4,44	8,03	3,59	80,86
192	33,88	12	46,15	40,63	6,75	12,27	5,52	81,78

Tablo D.10. %3 kireç katkılı zeminin plastik limit değeri

Plastik Limit							
Kap No	W _{kap}	W _{yaş+kap}	W _{kuru+kap}	W _{kuru}	W _{yaş}	W _w	W _p
130	33,96	37,25	36,51	2,55	3,29	0,74	29,02
193	34,97	38,19	37,44	2,47	3,22	0,75	30,36
227	34,13	37,82	36,91	2,78	3,69	0,91	32,73
						W _p	30,71



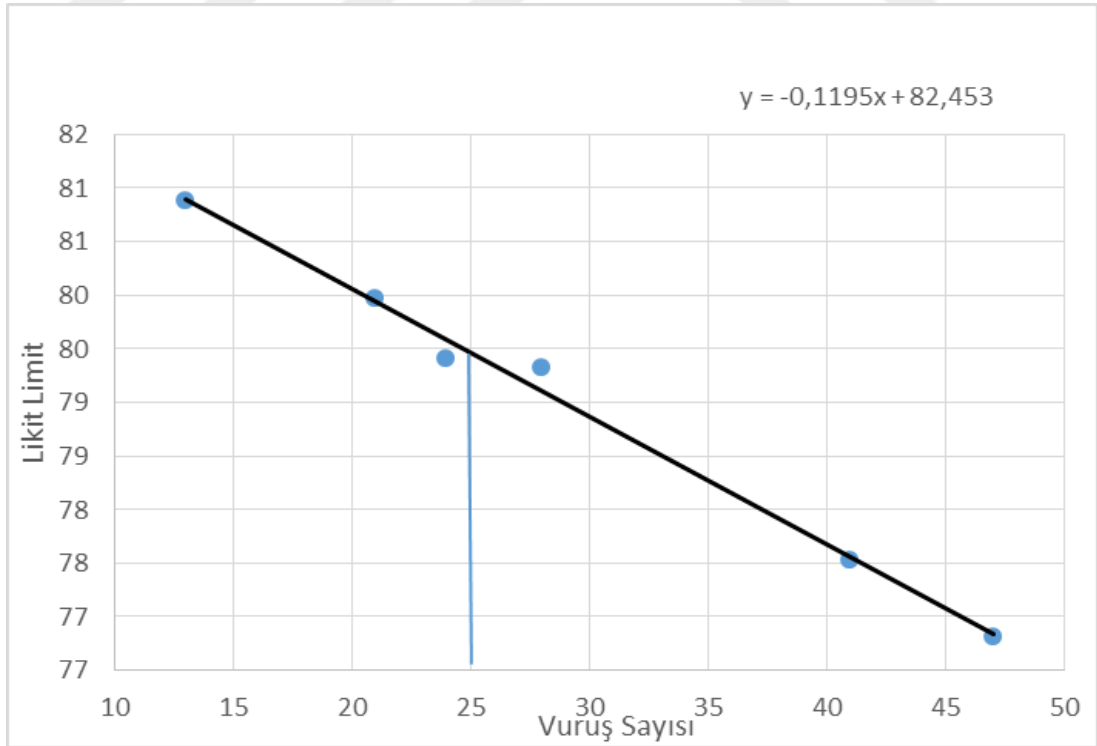
Şekil D.75. %3 kireç katkılı zeminin likit limit grafiği

Tablo D.11. %4 kireç katkılı zeminin likit limit değeri

Likit Limit								
Kap No	W _{kap}	Vuruş	W _{yaş+kap}	W _{kuru+kap}	W _{kuru}	W _{yaş}	W _w	W _L
231	34,87	47	41,96	38,88	4,01	7,09	3,08	76,81
142	35,36	41	43,26	39,81	4,45	7,90	3,45	77,53
193	34,97	28	46,07	41,16	6,19	11,10	4,91	79,32
227	34,13	24	43,28	39,23	5,10	9,15	4,05	79,41
114	34,94	21	46,44	41,33	6,39	11,50	5,11	79,97
138	35,40	13	42,40	39,27	3,87	7,00	3,13	80,88

Tablo D.12. %4 kireç katkılı zeminin plastik limit değeri

Plastik Limit							
Kap No	W _{kap}	W _{yaş+kap}	W _{kuru+kap}	W _{kuru}	W _{yaş}	W _w	W _p
126	35,05	38,82	37,88	2,83	3,77	0,94	33,22
134	34,49	37,42	36,71	2,22	2,93	0,71	31,98
236	34,25	37,67	36,78	2,53	3,42	0,89	35,18
						W _p	33,46



Şekil D.76. %4 kireç katkılı zeminin likit limit grafiği

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Bozkurt E., Arazide Yüksek Su Muhtevası İçeren Bir Kilin Kireç İle Stabilizasyonu, *Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi*, Kartepe Park Otel, Kocaeli, 2 Kasım 2019.



ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Malatya’da doğdu. İlkokul ve ortaokul eğitimimi Mustafa Kemal Atatürk İlköğretim Okulu’nda lise eğitimimi ise Turgut Özal Anadolu Lisesi’nde tamamladı. Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2013 yılında bitirerek İnşaat Mühendisi ünvanını aldı. Aynı yıl Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları’nda İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaya başladı. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Yüksek Lisans programına başladı.

