

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİLLİ BİR ZEMİNİN ÇİMENTO İLE STABİLİZASYONU

YASİN YILDIZ

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİLLİ BİR ZEMİNİN ÇİMENTO İLE STABİLİZASYONU

YASİN YILDIZ

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

Yalova Bölgesi'nden getirilen kil örneğinin öncelikle labaratuvar deneyleri vasıtasıyla özellikleri belirlenmiştir. İlgili kilin çimento kullanılarak iyileştirilip iyileştirilemeyeceği Geoteknik deneylerle irdelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çimentonun kil mukavemetinde çok iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı ise kilin çimento ile iyileştirilebilirliği durumunu deneysel verilerden faydalanarak ortaya koymaktır.

Çalışmalarında bana her zaman destek olan ve tecrübelerini benden esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Aydın KAVAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni destekleyen babam, annem ve kardeşlerim ile tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak – 2020

Yasin YILDIZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xii
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
1.1. Zemin Stabilizasyonuna Genel Bakış	3
1.2. Çimento.....	4
1.2.1. Portland çimentosu.....	5
1.2.2. Çimento ile stabilizasyon	7
1.2.3. Çimento stabilizasyonun mekanizması	8
1.2.4. Çimento stabilizasyonunu etkileyen faktörler.....	10
1.3. Killerin Genel Yapısı ve Özellikleri	14
1.3.1. Giriş.....	14
1.3.2. Killerin özellikleri	16
1.3.3. Killerin yapısı ve sınıflandırılması.....	17
1.3.4. Killi zeminlerin kayma dayanımı	18
1.3.5. Başlıca kil mineralleri	19
1.3.5.1. İki tabakalı kil mineralleri.....	19
1.3.5.2. Üç tabakalı kil mineralleri	21
1.3.5.3. Dört tabakalı kil mineralleri.....	23
2. ZEMİN STABİLİZASYONU VE KİMYASAL STABİLİZASYON YÖNTEMİ.....	25
2.1. Stabilizasyon Yöntemleri.....	26
2.2. Kimyasal Stabilizasyon.....	30
2.2.1. Stabilizör seçimi.....	31
2.2.2. Katkı maddesi ile zemin stabilizasyonu	32
2.2.2.1. Çimento stabilizasyonu	33
2.2.2.2. Kireç stabilizasyonu	36
2.2.2.3. Bitüm stabilizasyonu.....	40
2.2.2.4. Uçucu kül stabilizasyonu	41
3. MATERYAL VE METHOD	43
3.1. Materyal	43
3.1.1. Çimento	43
3.1.2. Zemin	43
3.2. Deneyler.....	45
3.1.3. Zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi	45
3.1.4. Atterbeg kıvam limitleri.....	45
3.1.5. Yıkamalı elek analizi.....	47
3.1.6. Hidrometre deneyi.....	47

3.1.7. Piknometre deneyi.....	48
3.1.8. Kompaksiyon deneyi.....	49
3.1.9. Serbest basınç deneyi	49
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	51
4.1. Doğal Su Muhtevası Tayini	51
4.2. Piknometre Deneyi.....	52
4.3. Hidrometre Deneyi.....	53
4.4. Yıkamalı Elek Analizi.....	54
4.5. Atterberg Kıvam Limitleri	55
4.6. Ph Deneyi.....	57
4.7. Kompaksiyon Deneyi.....	59
4.8. Serbest Basınç Deneyi	62
4.8.1. %8 çimento katkılı zeminin serbest basınç grafiği	65
4.8.2. %10 çimento katkılı zeminin serbest basınç grafiği	68
4.8.3. %12 çimento katkılı zeminin serbest basınç grafiği	71
4.8.4. Doğal su muhtevasında %10 çimento katkılı zeminin serbest basınç grafiği.....	75
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81
EKLER	83
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	125
ÖZGEÇMİŞ	126

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Stabilizasyon yöntemlerine genel bakış	4
Şekil 1.2.	Portland çimentosunun şeması ve mikroskopik görüntüsü	6
Şekil 1.3.	Zemin-çimento reaksiyon mekanizması.....	7
Şekil 1.4.	Serbest basınç dayanımı-çimento oranı ilişkisi.....	8
Şekil 1.5.	Çimento stabilizasyonu mekanizması	9
Şekil 1.6.	Çimento stabilizasyonunda zemini etkileyen faktörler	10
Şekil 1.7.	Stabilize edilmiş killerin sıcaklığının serbest basınç dayanımına etkisi	12
Şekil 1.8.	Farklı zemin türlerinin iyileştirme sonucunda dayanıma etkisi	13
Şekil 1.9.	Killerin mikroskopik görüntüleri	14
Şekil 1.10.	Killerin çatlaklı ve doymuş haldeki görüntüleri	15
Şekil 1.11.	Kilin tetrahedron yapısı.....	17
Şekil 1.12.	Kilin Kilin oktahedron yapısı.....	18
Şekil 1.13.	Toplam ve efektif gerilme zarfları	19
Şekil 1.14.	Kaolinit grubu kil minerallerin yapısı	20
Şekil 1.15.	İllit mineralinin kesiti	21
Şekil 1.16.	Montmorillonit kil mineralleri grubunun yapısı.....	22
Şekil 1.17.	Mikanın illite, illitten vermiküllit ve montmorillonite dönüşmesi.....	23
Şekil 2.1.	Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması.....	27
Şekil 2.2.	Zemin gradasyon üçgeni	31
Şekil 2.3.	Serbest basınç mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi	35
Şekil 2.4.	Kireç içeriğinin zemin tiplerine etkisi	39
Şekil 3.1.	Deneylerde kullanılan zemin.....	44
Şekil 3.2.	Casagrande aleti	45
Şekil 3.3.	Plastik limit aletleri	46
Şekil 3.4.	UCSC sınıflandırma sistemi.....	46
Şekil 3.5.	Elek düzeneği ve elek açıklıkları(mm).....	47
Şekil 3.6.	Hidrometre deneyi aletleri.....	48
Şekil 3.7.	Piknometre(hacim şişesi)	48
Şekil 3.8.	Proktor deneyi aletleri	49
Şekil 3.9.	Serbest basınç aleti	50
Şekil 4.1.	Piknometre deneyi için numune hazırlanışı	52
Şekil 4.3.	Likit limitin grafik gösterimi.....	56
Şekil 4.4.	Plastik limit numuneleri	57
Şekil 4.5.	Ph deneyi için hazırlanan numuneler	58
Şekil 4.6.	Killi zeminin optimum su muhtevası ve mak. kuru birim hacim ağırlığı	59
Şekil 4.7.	Standart proktor deneyin yapılışı	60
Şekil 4.8.	Minyatür proktor aleti ile numune hazırlanışı.....	60
Şekil 4.9.	%8 çimento katkılı kilin optimum su muhtevası.....	61
Şekil 4.10.	Kompaksiyon deneylerin grafik hali	62
Şekil 4.11.	Serbest basınç deneyi	63
Şekil 4.12.	Killi zeminin anlık serbest basınç deneyi sonuçları	64

Şekil 4.1. Numunelerin alüminyum folyoyla sarılması.....	65
Şekil 4.14. %8 çimento katkılı malzemenin anlık serbest basınç grafiği.....	66
Şekil 4.15. %8 çimento katkılı malzemenin 1 günlük serbest basınç grafiği.....	66
Şekil 4.16. %8 çimento katkılı malzemenin 7 günlük serbest basınç grafiği.....	67
Şekil 4.17. %8 çimento katkılı malzemenin 28 günlük serbest basınç grafiği.....	67
Şekil 4.18. %8 çimentolu zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerleri.....	68
Şekil 4.19. %10 çimento katkılı malzemenin anlık serbest basınç grafiği.....	69
Şekil 4.20. %10 çimento katkılı malzemenin 1 günlük serbest basınç grafiği.....	69
Şekil 4.21. %10 çimento katkılı malzemenin 7 günlük serbest basınç grafiği.....	70
Şekil 4.22. %10 çimento katkılı malzemenin 28 günlük serbest basınç grafiği.....	70
Şekil 4.23. %10 çimentolu zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerleri.....	71
Şekil 4.24. %12 çimento katkılı malzemenin anlık serbest basınç grafiği.....	72
Şekil 4.25. %12 çimento katkılı malzemenin 1 günlük serbest basınç grafiği.....	72
Şekil 4.26. %12 çimento katkılı malzemenin 7 günlük serbest basınç grafiği.....	73
Şekil 4.27. %12 çimento katkılı malzemenin 28 günlük serbest basınç grafiği.....	73
Şekil 4.28. %12 çimentolu zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerleri.....	74
Şekil 4.29. Bütün deneylerin kür süresine göre mukavemet değerleri(kpa).....	74
Şekil 4.30. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki anlık serbest basınç grafiği.....	75
Şekil 4.31. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki 1 günlük serbest basınç grafiği.....	76
Şekil 4.32. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki 7 günlük serbest basınç grafiği.....	76
Şekil 4.33. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki 28 günlük serbest basınç grafiği.....	77
Şekil 4.34. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki ortalama mukavemet değerleri.....	77
Şekil 4.35. %10 çimentolu malzemenin optimum ve doğal su muhtevsındaki ortalama mukavemet değerlerinin karşılaştırılması (kpa).....	78
Şekil A.1. %8 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği.....	84
Şekil A.2. %10 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği.....	85
Şekil A.3. %12 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği.....	86
Şekil B.1. Optimum su muhtevsında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	87
Şekil B.2. Optimum su muhtevsında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	87
Şekil B.3. Optimum su muhtevsında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	88
Şekil B.4. Optimum su muhtevsında doğal zeminin 1günlük serbest basınç deneyi-1.....	88
Şekil B.5. Optimum su muhtevsında doğal zeminin 1günlük serbest basınç deneyi-2.....	89

Şekil B.6. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	89
Şekil B.7. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	90
Şekil B.8. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	90
Şekil B.9. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	91
Şekil B.10. %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafik kıyaslaması	91
Şekil B.11. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	92
Şekil B.12. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	92
Şekil B.13. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	93
Şekil B.14. %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri	93
Şekil B.15. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	94
Şekil B.16. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	94
Şekil B.17. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	95
Şekil B.18. %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri	95
Şekil B.19. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1.....	96
Şekil B.20. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2.....	96
Şekil B.21. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3.....	97
Şekil B.22. %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri	97
Şekil B.23. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	98
Şekil B.24. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	98
Şekil B.25. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	99
Şekil B.26. %12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafikleri	99
Şekil B.27. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	100
Şekil B.28. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	100
Şekil B.29. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	101
Şekil B.30. %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri	101
Şekil B.31. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	102
Şekil B.32. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	102

Şekil B.33. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	103
Şekil B.34. %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri	103
Şekil B.35. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1.....	104
Şekil B.36. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2.....	104
Şekil B.37. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3.....	105
Şekil B.38. %12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri	105
Şekil B.39. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1	106
Şekil B.40. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	106
Şekil B.41. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	107
Şekil B.42. %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafikleri	107
Şekil B.43. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	108
Şekil B.44. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	108
Şekil B.45. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	109
Şekil B.46. %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri	109
Şekil B.47. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	110
Şekil B.48. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	110
Şekil B.49. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	111
Şekil B.50. %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri	111
Şekil B.51. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1.....	112
Şekil B.52. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2.....	112
Şekil B.53. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3.....	113
Şekil B.54. %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri	113
Şekil B.55. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1.....	114
Şekil B.56. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2.....	114
Şekil B.57. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3.....	115
Şekil B.58. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafikleri.....	115
Şekil B.59. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1.....	116

Şekil B.60. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2.....	116
Şekil B.61. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3.....	117
Şekil B.62. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri.....	117
Şekil B.63. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1.....	118
Şekil B.64. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2.....	118
Şekil B.65. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3.....	119
Şekil B.66. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri.....	119
Şekil B.67. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1.....	120
Şekil B.68. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2.....	120
Şekil B.69. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3.....	121
Şekil B.70. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri.....	121
Şekil C.1. %8 çimento katkılı zeminin su muhtevası.....	122
Şekil C.2. %10 çimento katkılı zeminin su muhtevası.....	123

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Portland çimentosunun kimyasal bileşenleri.....	6
Tablo 2.1. Zemin cinsine göre stabilizasyon metotları.....	28
Tablo 2.2. Tavsiye edilen stabilizasyon metotları	29
Tablo 2.3. İnorganik ve organik maddelerin karşılaştırılması.....	32
Tablo 2.4. Zemin tiplerine göre optimum çimento oranları	36
Tablo 2.5. Ingles ve Metcalf tarafından önerilen kireç oranları	38
Tablo 3.1. Kullanılan kilin geoteknik özellikleri.....	44
Tablo 4.1. Yalova kilinin doğal su muhtevası	51
Tablo 4.2. Piknometre deneyi sonuçları	52
Tablo 4.3. Hidrometre okuma sonuçları.....	54
Tablo 4.4. Elek analizi sonuçları	55
Tablo 4.5. Kıvam limiti değerleri	57
Tablo 4.6. Kıvam limiti değerleri	58
Tablo 4.7. Katkısız ve katkılıların kompaksiyon deney sonuçları	61
Tablo 4.8. Serbest basınç deneyi için numune bilgileri.....	63
Tablo A.1. %8 çimento katkılı zeminin likit limit değeri.....	84
Tablo A.2. %8 çimento katkılı zeminin plastik limit değeri	84
Tablo A.3. %10 çimento katkılı zeminin likit limit değeri.....	85
Tablo A.4. %10 çimento katkılı zeminin plastik limit değeri	85
Tablo A.5. %12 çimento katkılı zeminin likit limit değeri.....	86
Tablo A.6. %12 çimento katkılı zeminin plastik limit değeri	86
Tablo C.1. %8 çimento katkılı zeminin kompaksiyon deneyi	122
Tablo C.2. %10 çimento katkılı zeminin kompaksiyon deneyi	123
Tablo C.3. %12 çimento katkılı zeminin kompaksiyon deneyi	124

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	: Sönmüş kireç
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
d	: Genişlik (cm)
D	: Numune çapı
D ₁₀	: %10 yüzdeye karşılık gelen çap, (m)
D ₃₀	: %30 yüzdeye karşılık gelen çap,(m)
D ₆₀	: %60 yüzdeye karşılık gelen çap, (m)
Fe	: Demir
h	: Yükseklik
K	: Potasyum
kPa	: Kilopascal
Mg	: Magnezyum
MPa	: Megapascal
P	: Düzgün yayılı yük
q _u	: Serbest basınç dayanımı
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum oksit
t	: Kür süresi
W	: Su muhtevası, (%)
W _{doğal}	: Doğal su muhtevası, (%)
W _{opt}	: Optimum su muhtevası, (%)
w _L	: Likit limit
w _P	: Plastik limit

Kısaltmalar

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

KİLLİ BİR ZEMİNİN ÇİMENTO İLE STABİLİZASYONU

ÖZET

Günümüzde, inşaat mühendisliği alanında zemin iyileştirme yöntemleri gittikçe önem arz etmektedir. Birçok iyileştirme yöntemleri içerisinde çimento ile stabilizasyon en çok tercih edilen yöntemler arasında gelmektedir. Literatüre baktığımızda, çimento stabilizasyonu zemin mukavemetini arttırmak için iyi bir seçenek oluşturduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, Yalova bölgesinden getirilen kilin, farklı ve yüksek oranlarda çimento ile karıştırılıp serbest basınç deneyine tabi tutularak kilin mukavemetine katkısı incelenmiştir. Bu amaçla kilin sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Daha sonra katkısız ve farklı çimento oranlarındaki kilin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Çalışmanın sonunda katkısız ve %8, %10, %12 oranlarında çimento eklenerek hazırlanan numuneler anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük süreler sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Laboratuvar deneyleri sonucunda çimento katkılı kilin katkısız kile göre su muhtevasında artış olduğu görülmüştür. Ayrıca çimento katkılı killi zemin numunelerinde zamana bağlı olarak mukavemet artışı olduğu gözlemlenmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda %10 çimento oranının mukavemet değerlerinde daha iyi sonuçlar vermiştir ve %12 çimento oranına göre daha ekonomiktir. Bu durum çimentonun zeminin mukavemetini artırması bakımından, zemin iyileştirmesinde kullanılabileceği ortaya konmuştur.

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

STABILIZATION OF A CLAY SOIL WITH CEMENT

ABSTRACT

Today, soil improvement methods are very important in the field of civil engineering. Among many improvement methods, cement stabilization is one of the most preferred methods. When we look at the literature, it is seen that cement stabilization is a good option to increase soil strength. In this study, the clay brought from Yalova region mixed with different and high rates of cement and subjected to unconfined compressive test, the contribution of clay to strength was investigated. For this purpose, clay classification tests were performed. Then, the optimum water content and maximum dry unit volume weight values of the pure clay and different cement ratios clay were determined. At the end of the study, samples were prepared by adding 8%, 10%, 12% cement and without additives were subjected to unconfined compressive test at the end of instant, 1 day, 7 day and 28 day periods. As a result of the laboratory tests, it was observed that the water content of the cement-added clay increased compared to the clay without additives. In addition, it was observed that the strength increase in cementitious clayey soil samples by the time. At the end of the 28-day curing period, it gave better results in the strength values of 10% cement rate and is more economical than 12% cement rate. It has been shown that cement can be used in soil improvement in terms of increasing the strength of the soil.

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

GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusuna bağlı olarak, ihtiyaca binaen yapı alanları azalmıştır. Bununla birlikte şehirlerde bazı bölgelerin yapılaşmaya açılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu gereklilik, mühendisliği zemin özellikleri iyi olmayan alanlarda yapılaşma zorunluluğu ile karşı karşıya getirmiştir. Kullanılabilir arazilerin azalmasıyla beraber yapılaşmaya açık bölgelerin değeri artmış ve bu bölgelerin verimli hale getirilmesi bir ön şart haline gelmiştir. Ortaya çıkan bu durum ulaşım yapıları başta olmak üzere diğer tüm yapıların kullanılacağı zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi gerektiği düşüncesini beraberinde getirmektedir.

Yapılacak yapılar için inşaat sahasında gösterilen zeminler her zaman beklenen özelliklere sahip olmayabilirler. Buna benzer durumlarda inşaat sahasını değiştirmek ya da mevcut zemini yerinden kaldırıp yerine daha elverişli zemin koymak günümüz şartlarına göre hem ekonomik hem de teknolojik nedenlerden dolayı çoğu kere öngörülen çözüm olarak kabul edilmemektedir. Böylelikle son yıllarda ülkemizde de çok tercih edilen yöntemlerden, inşaat sahasındaki zeminlerin mühendislik özelliklerinin değiştirilmesi veya iyileştirilmesi yoluna başvurulmaktadır.

Literatüre bakıldığında zemin iyileştirilmesi için birçok yöntem uygulanmıştır. Uygulanacak zemin iyileştirme yöntemini seçmek için çeşitli faktörler vardır. Bu çalışmada da tüm faktörler göz önünde bulundurularak zemin iyileştirme yöntemlerinden katkı maddeleri ile zemin iyileştirme yöntemi seçilmiştir. Ayrıca bu yönteme örnek olarak çimento ile zemin stabilizasyonu üzerine bir deneysel çalışma sunulmaktadır. Yapılan deneysel çalışma, killi zeminin farklı oranlarda çimento kullanılarak iyileştirilmesidir.

Çimento ile zemin stabilizasyonu, çok etkili bir yöntem olmakla beraber özellikle son yıllarda zemin özelliklerini iyileştirmede en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Ayrıca bu yöntem zeminlerin mühendislik özelliklerinin değişmesinde büyük bir paya sahiptir. Zeminin hacimsel stabilitesinin artışına katkı sağladığı gibi dayanımın artmasında ve geçirimsizliğin de azalmasında da etkili olmuştur [1].

Çimento ile zemin stabilizasyonunda oluşan çeşitli kimyasal reaksiyonlar, zeminin dayanımını arttırmakla beraber bu reaksiyonlar zemin içerisindeki boşlukları azaltıp geçirimsizliği düşürmektedir [2].

Günümüzde yapılaşmanın artmasından dolayı mühendislik özellikleri zayıf birçok yerleşim bölgelerinin yapılaşmaya açılması gerekmektedir. Mühendislik özellikleri yönünden yetersiz olan bu yerleşim bölgelerinin iyileştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu nedenle çimento stabilizasyonu, zemin stabilizasyonu açısından ekonomik ve uygulanabilirlik bakımından sürekli tercih edilmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan çimento stabilizasyonun sıklıkla tercih edilmesinin yanında sağladığı faydalar bilinmektedir. Ayrıca zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmesi bakımından da birçok çalışma kapsamında incelenmiştir. Ancak literatür araştırmasına bakıldığında kullanılan killerin birçoğu farklı bölgelerden getirilmiştir. Bu çalışma ile birlikte daha önce çalışması yok denecek kadar az olan bir kilin yüksek oranlarda çimento ile stabilizasyonu yapılmaktadır. Çalışmanın amaçlarına bakıldığında çalışma kapsamı yeni sayılan bir kile, özellikle yüksek oranda çimento ile stabilizasyonunda kür süresinin, çimento oranının ve kullanılan optimum su muhtevalarının malzemenin dayanımına, geçirimsizliğine ve mukavemet artışına etkisi bakılması amaçlanmıştır.

Yapılan yüksek lisans tez çalışması kapsamında Yalova bölgesinden getirilen kil numunesinin farklı oranlarda Portland çimentosu ilave edilerek oluşturulan malzemenin mühendislik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Çimento içeriği %8, 10 ve 12 olarak öngörülmüştür. Bu amaçla kil numuneleri üzerinde sırasıyla Atterberg deneyleri, hidrometre, piknometre, ph deneyi ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Son olarak serbest basınç testi (UC), yapılarak karşılaştırma. Kil ve çimento karışımıyla kil numunesinde yapılan deneylerin hepsi yapılmıştır. Ayrıca farklı çimento 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. Elde edilen deney sonuçlarında mühendislik özellikleri belirlenen killi zeminin yüksek oranda çimento katkısıyla mukavemet oranındaki değişimlere bakılmıştır. Bununla beraber çimento oranlarının ve kür süresinin dayanıma katkısı incelenmiştir.

1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Zemin Stabilizasyonuna Genel Bakış

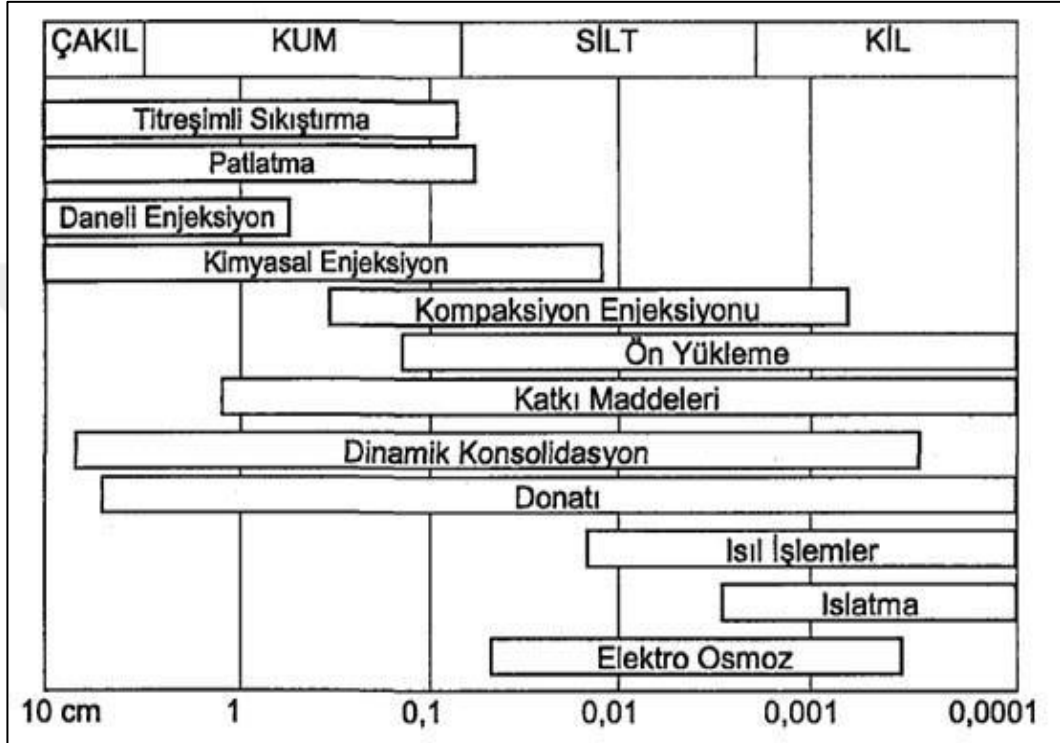
Zeminlere katkı maddeleri katarak zeminlerin, mukavemetlerini ve dayanımlarını arttırarak ve kazandıkları dayanımları her türlü kötü hava koşullarında korumak ve artan trafik yüklerine karşı uzun süre dayanabilecek duruma getirerek ve en kararlı hale getirilmesi işlemine stabilizasyon denir [3].

Yapılaşma yapılan arazilerin zeminleri istediğimiz özelliklere sahip olmayabilirler. Bu nedenle elverişli olmayan zeminlerin mühendislik özellikleri değiştirilmelidir. Bu probleme çözüm olarak proje yerinin değiştirilmesi veya kullanılacak zeminin değiştirilmesi ekonomik ve uygulanabilirlik açısından doğru olmayabilir. Bu nedenle problemlili zeminlerde iyileştirme tekniğini kullanarak kullanılabilir hale getirmek en doğru yöntem olarak görülebilmektedir. Daha çok ince daneli zeminlerin mukavemetini arttırmak, zeminin stabilizesini muhafaza etmek amacıyla farklı işlemlere tabi tutulmasına zemin stabilizasyonu denir.

Zeminlerin farklı mühendislik özelliklerine sahip olması çeşitli stabilizasyon yöntemlerini ortaya çıkarmaktadır. Zemin stabilizasyonu sonucunda genel olarak mukavemetin artması, taşıma gücünün ve dayanımın artması, daneler arasındaki boşlukların doldurulmasıyla hacim değişikliğinin azalması beklenir. İri daneli zeminlerde uygulanan yöntem ile ince daneliler için uygulanma yöntemler aynı olmamaktadır. İri daneli zeminlerde genelde sıkıştırma yöntemi uygulanmakta fakat ince danelilerde yani killi ve siltli zeminlerde katkı maddeleri ile stabilizasyon yöntemi uygulanmaktadır. Zemin çeşitlerine göre stabilizasyon yöntemlerine genel bakış Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Zeminin mühendislik özelliklerini stabil hale getirmek için birçok stabilizasyon metodu bulunmaktadır. Bunların başında mekanik stabilizasyon gelmektedir. Mekanik stabilizasyonun uygulanması uygun olmayan yerlerde kullanılan stabilizasyon yöntemi ise kimyasal stabilizasyondur. Kimyasal stabilizasyon

içerisinde katkı maddesi kullanılarak yapılan stabilizasyonlar son yıllarda tercih edilmektedir. Ülkemizde de çimento ve kirecin fazla olması nedeniyle en çok tercih edilen katkı maddeleri olarak bilinmektedir. Stabilizasyon tekniğinin son yıllarda artarak tercih edilmesinin en önemli nedeni sağlam zeminlerin azalması etkeni olmaktadır.



Şekil 1.1. Stabilizasyon yöntemlerine genel bakış [4]

Çeşitli katkı maddelerini kullanılarak uygulanan kimyasal stabilizasyon yöntemi zeminin mühendislik özelliklerinde iyileştirme yapılırken güvenli ve ekonomik yapılması amaçlanmaktadır.

1.2. Çimento

Çimento betonun ana maddesi olarak bilinmektedir. Çimento tarihi, büyük boyutlardaki kayalardan alınıp toz haline getirildikten sonra erimiş lavda pişirilir. Elde edilen malzeme dünyayı inşa eder. Dünyadaki en çok amaçlı yapı malzemesi olarak kullanılır. Bu yüzden birçok fabrika üretimi için durmadan çalışmaktadırlar. Çimento yapmak için parçalanmış kireçtaşı, kil, kum ve demir kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklardaki (1400-1500°C) fırınlarda pişirilir ve klinker adlı bir ürün ortaya çıkar. Bu ürüne alçı taşı eklenerek toz haline getirildiğinde çimento

elde edilir. Çimento, hammaddesi kalkerli kil olan ve yapısında kum, tıgla, çakıl gibi parçaları yapıştırmada kullanılan bir malzemedir. Suyla etkinleşen süper güçlü yapıştırıcı bir malzemedir. Bu nedenle yapıştırıcı özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka su ile reaksiyona girmelidir. Çimento, su ile reaksiyona girdiği zaman sertleşen bir bağlayıcıdır [5].

Çimento katkı malzemesi olarak da iyileştirmede kullanılmaktadır. Çimento kullanımında zeminin cinsi ve su miktarı faktörlerine dikkat edilmesi gerekir. Su/çimento oranlarının gereğinden az veya fazla olması mukavemet değerlerini ve plastisiteyi önemli oranda etkilemektedir. Su miktarının fazla olması durumunda mukavemet değerleri düşmektedir. Fakat tersi durumda ise yüksek mukavemet değerleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bazı katkı malzemeleri de farklı geoteknik özellikleri iyileştirmektedir. Bu katkı malzemelerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [6];

- Su tutucu malzemeler.
- Priz önleyici malzemeler.
- Priz geciktirici malzemeler.
- Akışkanlaştırıcı malzemeler.
- Büzülme önleyici malzemeler.

Çimento çok etkili katkı maddesidir. Özellikle su sızıntılarını önlemek için en çok tercih edilen enjeksiyon malzemesi olarak bilinmektedir. Örneğin kil benzeri ince malzemelerin iyileştirilmesinde çimentonun kullanılmasının temel amaçlarından birisi su geçirgenliğini azaltmaktır. Çimentonun kil ile karışımının sertleşmesi farklı bileşenlerin (kalsiyum klorit vb.) katılmasıyla hızlandırılabilir. Bu tür iyileştirme yöntemlerinde ince daneli malzemelerin dane büyüklükleri çok önemlidir [6].

1.2.1. Portland çimentosu

Çimento, zeminlerin iyileştirilmesinde 18. yüzyılın sonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir. Yüz seneden beri kullanılan çimento içerisinde en çok kullanılan Portland çimentosudur.

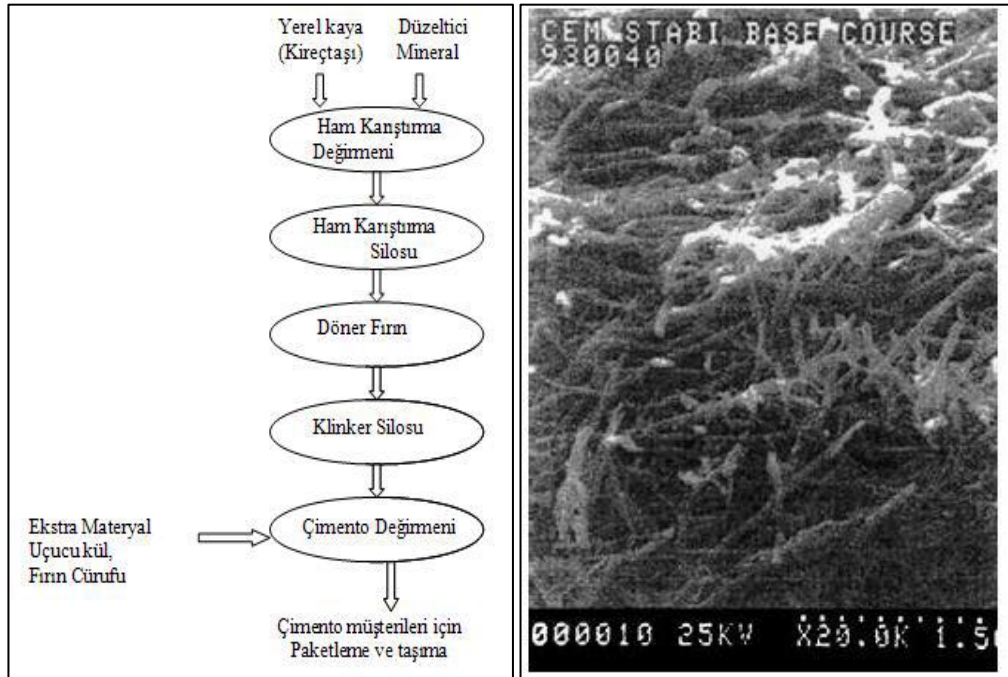
Daha önce bahsettiğimiz klinker ürününün alçı taşı ile toz haline getirilerek Portland çimentosu elde edilir. Bu işlem saf çimentonun kuru haliyle toz haline getirilip belli

bir sıcaklığa kadar soğutulurken Portland çimentosunun elde edilmesidir. İçerisinde alçı taşı haricinde anhidrit gibi malzemelerde bulunmaktadır. Portland çimentosunun kimyasal bileşimi Tablo 1.1’de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Portland çimentosunun kimyasal bileşenleri [6]

Oksit	Ağırlık %
CaO	61-67
SiO ₂	17-24
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	1-6
MgO	0,1-4
Na ₂ O+K ₂ O	0,5-1,5
SO ₃	1-3

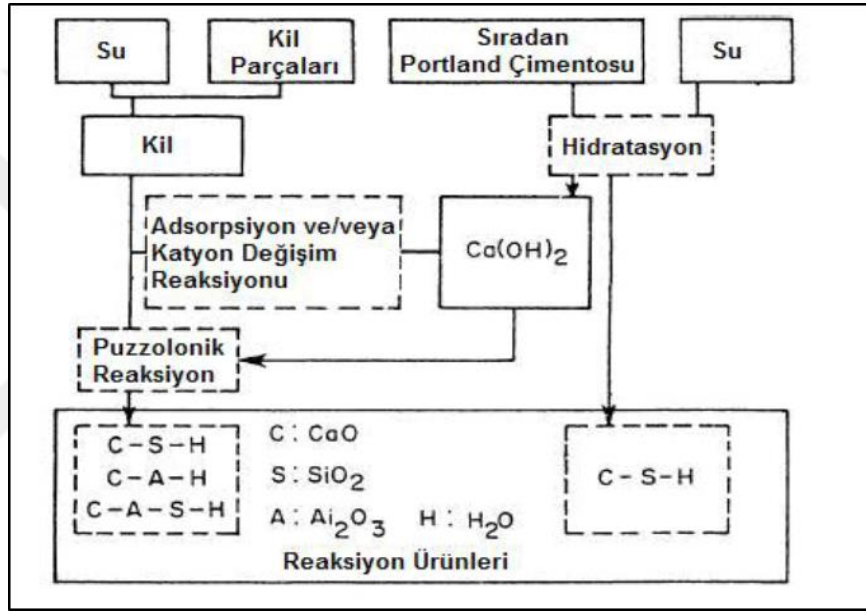
Portland çimentosunun oluşumunun şeması ve mikroskopik görüntüsü de Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Portland çimentosunun şeması ve mikroskopik görüntüsü [6]

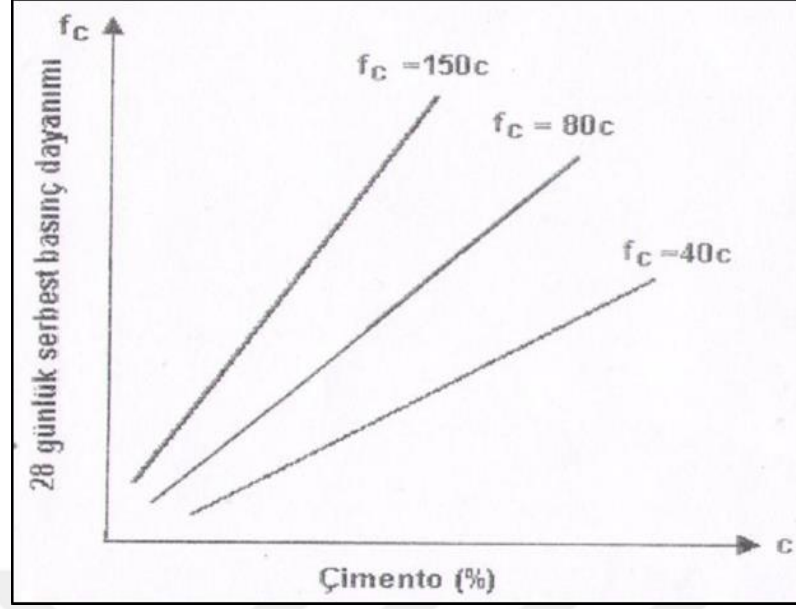
1.2.2. Çimento ile stabilizasyon

Yapısında fazla miktarda silis bulunduran çimento ve yoğun şekilde bulundurduğu kalsiyum sayesinde killi zeminlerin stabilizasyonunda çokça kullanılan bir malzemedir. Çimento ile stabilizasyon daha çok hava alanı ve karayolları gibi ulaşım yapılarında kullanılmaktadır. Çimento ile zemin etkileşime girdiklerinde ilk olarak çimentonun hidratlaşması meydana gelir. Daha sonra kation değişimleriyle beraber puzzolanik reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Şekil 1.3'te zeminin çimento ile etkileşimi sonucu oluşan reaksiyonun mekanizması gösterilmiştir [6].



Şekil 1.3. Zemin-çimento reaksiyon mekanizması [6]

Çimento stabilizasyonu, zeminin kurutulup toz haline getirilmesinden sonra yeterli oranda çimento ve gerekli miktarda suyun eklenmesi ve karıştırılmasıyla gerçekleşmektedir. Çimentonun zemine eklenmesiyle likit limit ve plastik limit azalırken plastisite indisi, mukavemeti ve dayanımı artmaktadır. İnce daneli zeminlerde plastisite indisi %25'den, likit limiti ise %45'den az olması durumunda bu yöntemin uygulanması etkilidir. Çimento stabilizasyonunda, Portland Çimentosu, Cürüflü ve Katkılı Çimento en çok kullanılan çimento tipleridir. Kireçte kür süresine bağlı olarak mukavemetin ve işlenebilirliğin artması durumu çimentoda da olmaktadır. Çimento ile stabilize edilen zeminlerin mukavemet değerleri genellikle serbest basınç deneyleri bilinmektedir. Çimento ile iyileştirilen zeminlerde çimento oranına bağlı olarak değişmekte olan dayanımlar Şekil 1.4'te gösterilmektedir [6].



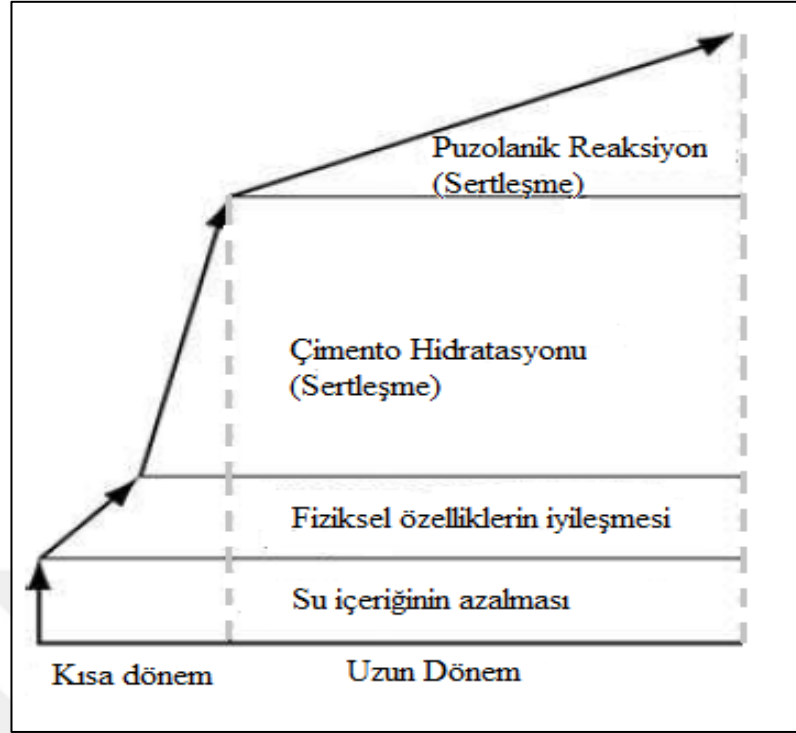
Şekil 1.4. Serbest basınç dayanımı-çimento oranı ilişkisi [7]

Serbest basınç dayanımı değerleri, çimento içerisindeki bileşenlere, çimento miktarı, zeminin cinsi ve kür sürelerine bağlı olarak değişebilmektedir.

1.2.3. Çimento stabilizasyonun mekanizması

Çimento stabilizasyonu ile zeminlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine yapılmış birçok çalışma vardır. Aynı zamanda çimento stabilizasyonun mekanizması ile ilgili de birçok araştırma yapılmıştır. Çimento ile stabilize edilen zeminlerin mekanizması 4 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada bağlayıcının hidroliz edilmesi sonra iyonların yer değiştirmesi daha sonra çimentonun hidratlaşması rol alırken son aşamada ise puzzolanik reaksiyonların gerçekleşmesiyle ürünler oluşmuş olmaktadır. Stabilize edilmiş zeminin mekanizması Şekil 1.5'te gösterilmektedir [2].

Çimento stabilizasyonu ile stabilize edilmiş zeminlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişim mekanizmasında da görüldüğü gibi çimento ile zemin etkileşiminde ürünlerin oluşması çimento-zemin reaksiyonları ile açıklanmaktadır. Çimentonun içeriğinde mukavemeti ve dayanımı arttıran farklı bileşenler bulunmaktadır. Bu bileşenler; kalsiyum hidratin üç bileşeni ve kalsiyum ferritden oluşmaktadır. Zeminin içerisindeki su ile çimento reaksiyona girdiği zaman ilk adım diyebileceğimiz hidratasyon gerçekleşmektedir [2].



Şekil 1.5. Çimento stabilizasyonu mekanizması [2]

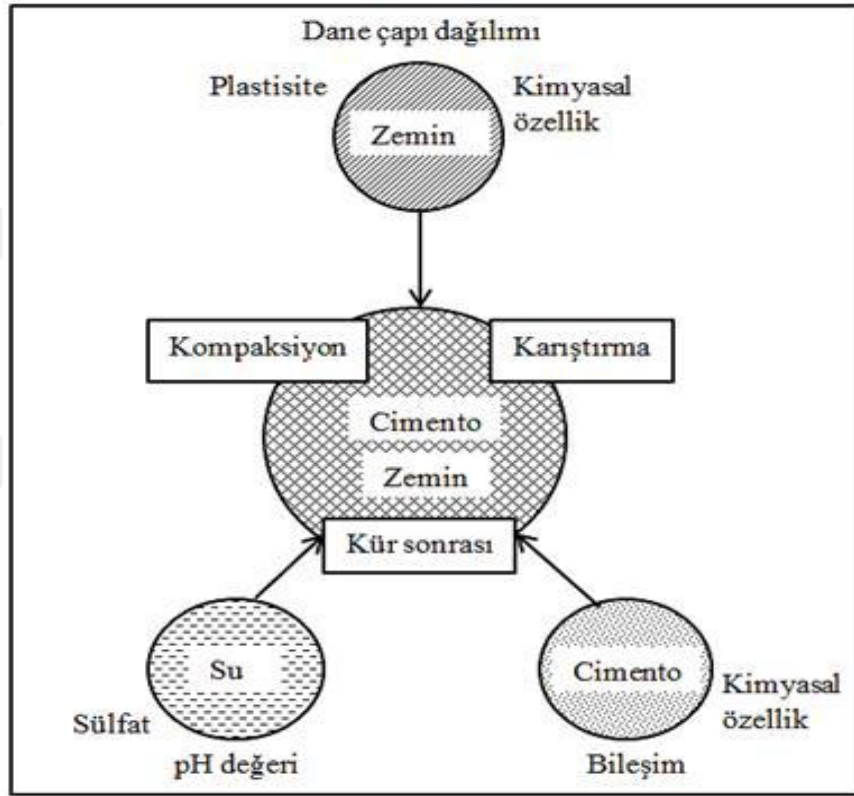
Hidratasyonun gerçekleşmesiyle birlikte hidrate edilmiş kalsiyum alüminat ve kalsiyum silikat ayrıca sönmüş kireç oluşmaktadır. Kil içerisinde bulunan mineraller (silis, alümin) ile sönmüş kireç arasında gerçekleşen reaksiyonlar yukardaki ürünlerin oluşumunda da etkili olmaktadır. Daha önce de belirttiğimiz gibi zeminin dayanımı çimento ile zemin arasında gerçekleşen reaksiyonlara bağlıdır. Bu reaksiyonlar Denklem (1.1) ve (1.2)'de belirtilmiştir [2].

Bu bölümde çimentolu zeminlerde çimento stabilizasyonu sonucunda oluşan reaksiyonlar ve mekanizmalar açıklanmıştır. Reaksiyonlarda özellikle dayanım artmaktadır. Denklem (1.1) ve (1.2)'de gösterilen, birincil ürünleri; Denklem (1.3) ve (1.4) ise ikincil ürünleri belirtmektedir [2];



1.2.4. Çimento stabilizasyonunu etkileyen faktörler

Çimento stabilizasyonunda zeminlerin özellikleri genellikle dayanım, mukavemet, işlenilebilirlik, geçirimsizlik, plastisite, deformasyon, şişme-büzülmede değişim, taşıma gücü ile değerlendirilmektedir. Bu özellikler stabilize edilen zemin cinsine, çimento oranına, stabilizasyon yöntemine, kür sürelerine, sıkıştırma gibi şartlardan etkilenmektedirler. Çimento stabilizasyonunu etkileyen faktörlerin özet hali Şekil 1.6' da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Çimento stabilizasyonunda zemini etkileyen faktörler

Stabilize edilecek zeminler için kullanılacak çimentonun türü ve şekilde de gösterildiği gibi içerisindeki bileşimler, dayanımı büyük ölçüde etkilemektedir. Kireç stabilizasyonlarında kireç miktarının yaklaşık %3-5 olması daha etkili olmaktadır. Fakat kirece ters olarak çimentoda bu oranlar %5'in üzerinde olması daha etkili olduğu literatür araştırmalarında belirtilmektedir. Ayrıca çalışmalarda çimento oranının artışı dayanımı arttırdığı görülmektedir. Bunlara ilaveten kil minerallerin dane büyüklüğü, ince daneli zeminin tipi, likit limit, plastik limit, su oranı vb. faktörler de zeminin özelliklerini belirlemektedir.

Çimento ile stabilize edilmiş zeminlerde kür süresinin etkisi serbest basınç deneylerinde gözlemlenebilir. Kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemet değerleri de artmaktadır. Bu da dayanımda artış olduğunu göstermektedir. Zemin stabilizasyonunda kullanılan çimento oranı arttıkça, meydana gelen reaksiyonlarda miktarca daha fazla çimento içerikli ürünlerden oluşmaktadır. Bu nedenle çimento miktarının fazla olduğu zeminlerde dayanım artışı, az olana göre kür süresine bağlı olarak daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Fakat kür sürelerine bağlı olarak dayanım artışıdaki kıyaslama, çimento miktarları aynı olan zemin için yapılabilen bir faktör olmaktadır. 1900'lü yılların sonuna doğru Mitchell bir çalışmasında serbest basınç dayanımı (q_u) ve kür süresi (t), çimento içeriği (C) arasındaki ilişkiyi Denklem (1.5)'teki formülle belirlemiştir [2].

$$q_u(t) = q_u(t_0) + K \log(t/t_0) \quad (1.5)$$

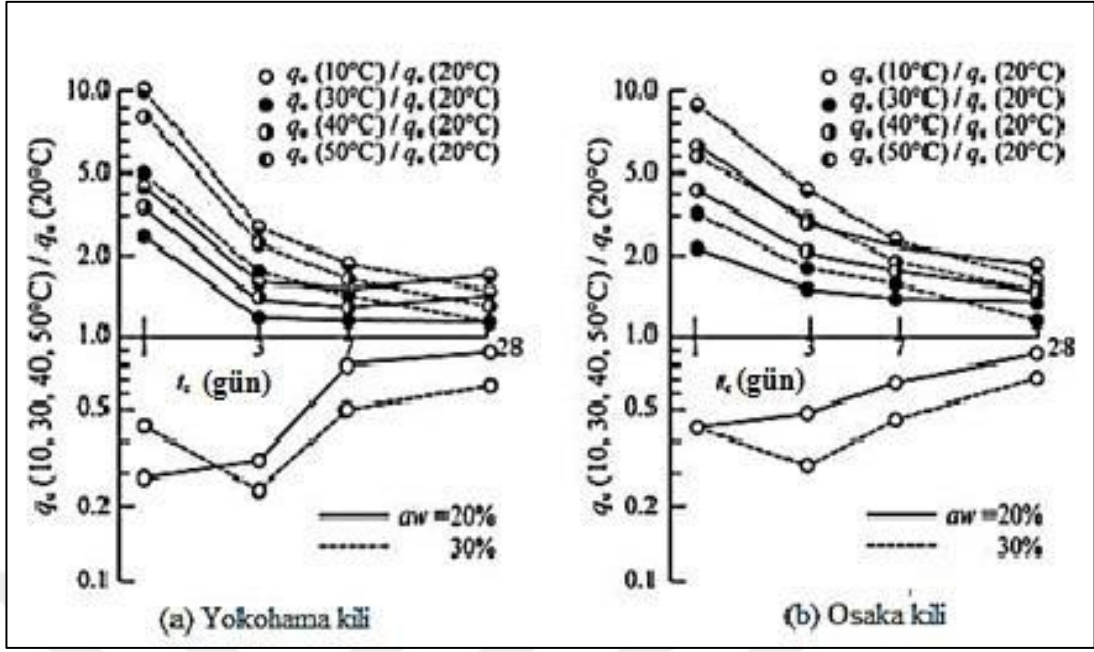
$q_u(t)$: t gündeki serbest basınç dayanımı, kPa

$q_u(t_0)$: t_0 gündeki serbest basınç dayanımı, kPa

K: granüler zeminler için $480 \times C$ ve ince daneli zeminler için $70 \times C$

C: kütlece % cinsinden çimento içeriğini ifade etmektedir.

Çimento ile zemin stabilizasyonunda kür süresinin dayanım üzerindeki etkisi kısaca belirtilmiştir. Kür süresi gibi kür koşulları da çimento ile stabilize edilmiş zeminlerin dayanımını etkileyen önemli bir faktördür. Kür koşullarının çimento stabilizasyonu üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılıp çalışmalar yapılmıştır. Kür koşulları içerisinde dayanımını etkileyen en önemli faktör sıcaklıktır. Farklı sıcaklıklarda ve farklı kür süreleriyle birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin; Saitoh ve diğerleri iki farklı killer ile (Yokohoma ve Osaki kili) çimento stabilizasyonu yaptıktan sonra yaklaşık 1 ay boyunca farklı sıcaklıklarda bekletmiştir. Çalışmaların sonunda 20°C sıcaklıktaki numuneler ile farklı sıcaklıktaki numunelerin serbest basınç dayanımlarına göre kıyaslama yapılmıştır. Şekil 1.7'de sıcaklığın serbest basınç dayanımına etkisi gösterilmiştir [2].

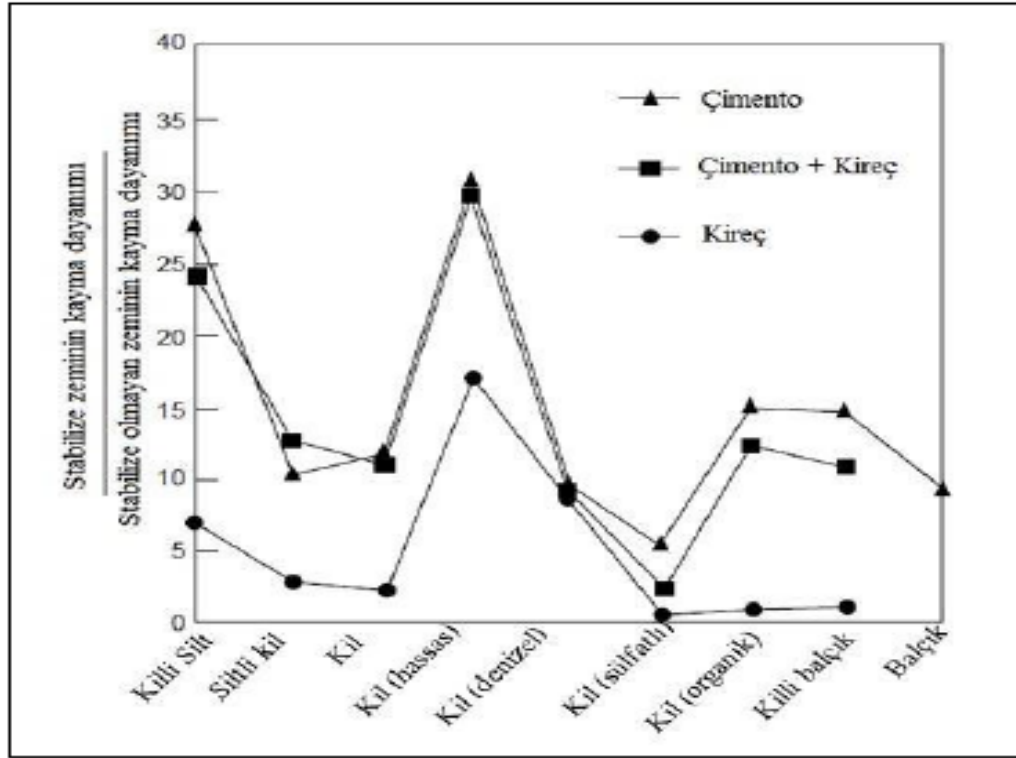


Şekil 1.7. Stabilize edilmiş killerin sıcaklığının serbest basınç dayanımına etkisi [8]

Şekilde de gösterildiği gibi yüksek sıcaklıklarda 20°C'ye kıyasen daha yüksek dayanımlara sahip olunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kısa süreli uzun sürelilere göre daha domine edilmiş durumda olduğu görülmektedir [2].

Kil minerallerin dane büyüklüğü, ince daneli zeminin tipi, likit limit, plastik limit, su oranı vb. faktörler de zeminin özelliklerinin etkisi olarak özetleyebiliriz. Bu fiziksel ve kimyasal özellikler çimento ile stabilize edilmiş zeminlerin iyileştirme sonrası özelliklerine etki etmektedir. Ahnberg ve diğerleri yaklaşık on farklı ince daneli zemin türüne çimento ve kireç ekleyerek dayanımlardaki değişimleri araştırmak için stabilizasyon yapmışlar. Çalışmaların sonunda farklı kil çeşitlerinin dayanımları karşılaştırılmıştır ve ayrıca aynı zemin tipinde elde edilen dayanımlarda da artış gözlemlenmektedir. Farklı tip zeminlerde dayanımı en yüksek killerin hassas olanında olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 1.8'te deney sonuçları gösterilmektedir. Aynı zamanda Ahnberg gibi birçok araştırmacı zemin özelliklerin etkisi hakkında araştırmalar yapmışlar. Bunların başında Taki ve diğerleri, Sariosseri ve arkadaşları gelmektedir. Taki ve arkadaşları zemin özelliklerinden dane çapının dayanım üzerindeki etkisini öğrenmek için deneyler yapmıştır. Sonuç olarak yüzey alanı arttıkça dayanımın azaldığı belirlenmiştir. Sariosseri ve arkadaşları ise içerdiği çimento miktarına göre dayanıma etkisi üzerinde çalışmalar yapmışlar. Deney

çalışmalarının sonucunda çimento içeriği arttıkça dayanımın arttığı gözlemlenmektedir [2].



Şekil 1.8. Farklı zemin türlerinin iyileştirme sonucunda dayanıma etkisi

Çimento ile stabilize edilen zeminlerin donma ve çözülmenin etkisine bakıldığında zeminlere daha çok soğuk bölgelerde etkisi görülmektedir. Zemin ile katkı maddesinin karıştırıldığında iyi nüfuz olmadığı veya katkı maddesinin gerekli olmadığı durumlarda zemin daneleri arasında boşluklar olmaktadır. Daneler arasındaki boşluklara suyun girmesi ve devamında soğuk bölgelerde suyun donarak buz kristallerine dönüşmesiyle hacim artışına neden olmaktadır. Bu bölgeler buzun çözülerek tekrardan suya dönüşmesi halinde hacim oranlarında azalmalar görülmektedir.

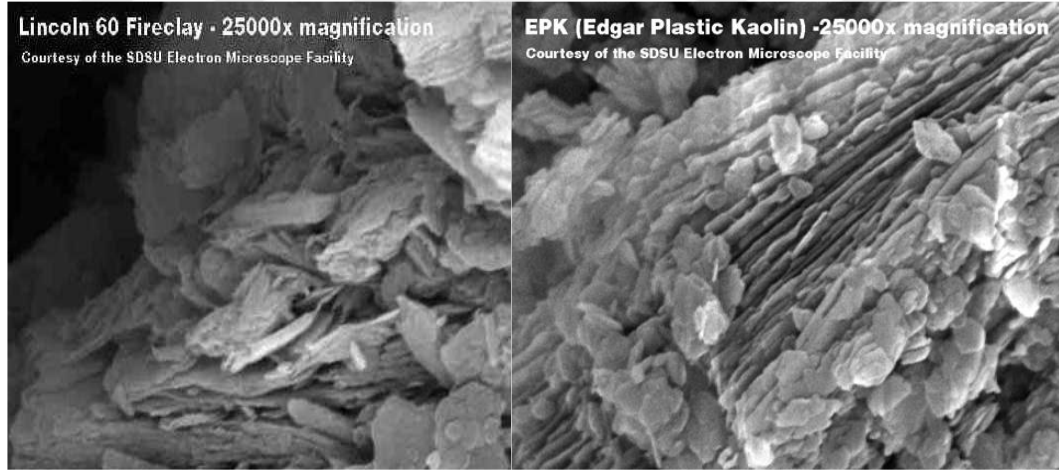
Bu durumun tekrar edilmesi stabilize edilen zeminlerin yapısında bozulmalara sebep olmaktadır. Literatür çalışmalarında genellikle kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin donma veya büzülmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çimento ile ilgili olarak da kırmızı çamurla yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Stabilize edilmiş zemin ile yapılmış incelemeler sonucunda stabilize edilmemişlere göre donma ve çözülmenin durabilitelerin daha iyi olduğu belirlenmiştir [2].

1.3. Killerin Genel Yapısı ve Özellikleri

1.3.1. Giriş

Dünyadaki mühendislik uygulamaların neredeyse hepsinde killere karşılaşılmak mümkündür. Bu yüzden zemin mühendisliği açısından killerin özelliklerini bilmek çok önemlidir. Kil daneleri mikroskobik veya daha küçük daneler içeren, toprağın 0,002mm'den daha küçük daneleri içeren malzemedir. Çok küçük danelere sahip oldukları için özellikleri bakımından diğer zemin çeşitlerinden ayrılırlar. Kil mineralleri silikatların ayrışmasıyla alüminosilikat olarak kimyasal yapısını oluşturan ikincil bir zemin türüdür [6].

Fiziksel özellikleri açısından killeri incelediğimizde ince daneli yapıya sahip olmaları nedeniyle iri danelilerinden kolaylıkla ayırt edilebilirler. Çok küçük daneli olduklarından dolayı küre ve küpe benzeyen danelerden daha büyük yüzeye sahiptirler. Şekil 1.9'da mikroskop altında büyütülmüş kil zeminine ait görüntüler gösterilmektedir [6].



Şekil 1.9. Killerin mikroskobik görüntüleri [6]

Şekilde de gösterildiği gibi düşük sıcaklıklarda oluştuğu için kil mineralleri pulcuklu halde olurlar ve tabakalı bir şekilde sahiptirler. Kimyasal özellikleri itibarıyla killi zeminler kimyasal bileşimi sulu alüminyum silis ve diğer elementlerden oluşan tane boyutu oldukça küçük olan plastik ve kohezif özelliklere sahip bir malzemedir.

Yaprakçıklı ve tabakamsı yapıları itibarıyla sürekli nemli maddelerdir. Ayrıca mühendislik özelliklerinden dolayı su ile etkileşime girdiklerinde ciddi anlamda

etkilenirler. Mühendislikte plastik özeliğe sahip kil malzemesi ıslanıldığında şişen, kurduğunda büzülebilen ve sıkıştırma işlemine maruz kalınca suyunu dışarı atabilen ince taneli bir malzemedir. Suyu kaybetmeleri durumunda sertleşmeleri ve su içerdiklerinde çamur gibi cıvık bir hal alması kaçınılmazdır. Suyu kaybetmelerindeki ve doymun haldeki görüntüleri Şekil 1.10'da gösterilmektedir [6,10].



Şekil 1.10. Killerin çatlaklı ve doymun haldeki görüntüleri

Killer içerdikleri minerallerinin değişimleri durumlarında ve yapısı itibariyle su içeriğinden dolayı plastik davranma özelliğine de sahiptir. 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.

Killer kıvam olarak su muhtevasına bağlı olarak farklı durumlarda olabiliyorlar. Kıvamındaki değişimler killer yapısal durumuna ve daneler arasındaki boşluklarla bağlantılıdır. 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. Bunun nedeni ise kili zeminlerin daneleri arasındaki boşlukların çak azalmasıdır. Ayrıca killerin permabilitesi çok düşük olduğundan doymun halde suyu dışarı atmaları oldukça zorlaşır [6,10].

Plastisitesi 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. Stabilize edilmiş zeminin özellikleri ile plastisite özellikleri arasında önemli bir bağ bulunmaktadır. Kil miktarı arttıkça zemin davranışı kil tarafından kontrol edilmektedir. Bir zemine killi zemin diyebilmek için karışımında diğer bileşenlerin %25'i geçmeyecek şekilde olmalıdır [6,10].

1.3.2. Killerin özellikleri

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

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 [11].

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 malzeme su dışında diğer hiçbir sıvıyla plastisite özelliğini kazanamaz [11].

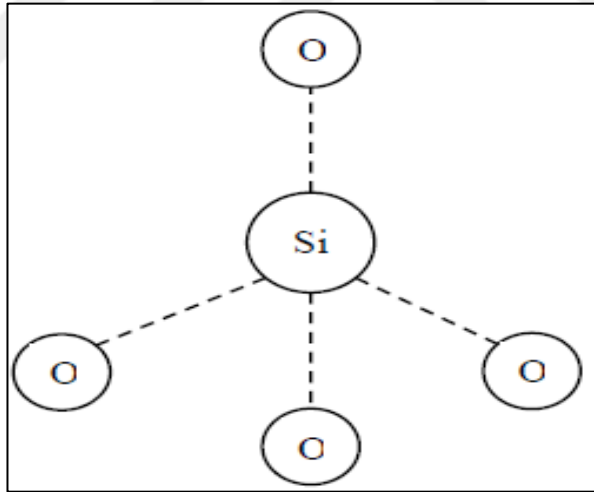
Renk özelliği sayesinde killer kolaylıkla ayırt edilebilir. Killer doğal halde renklenmiş bulunmaktadır. Kilin beyaz haline kaolin denir ve bu doğada saf halde bulunan killere denir. Bunun dışında killer mavimsi, sarı, pembe, kahverengi, yeşil vb. renklerde bulunabilir. Kilin pişmeden önceki rengiyle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

Son olarak rötredir 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 [11].

1.3.3. Killerin yapısı ve sınıflandırılması

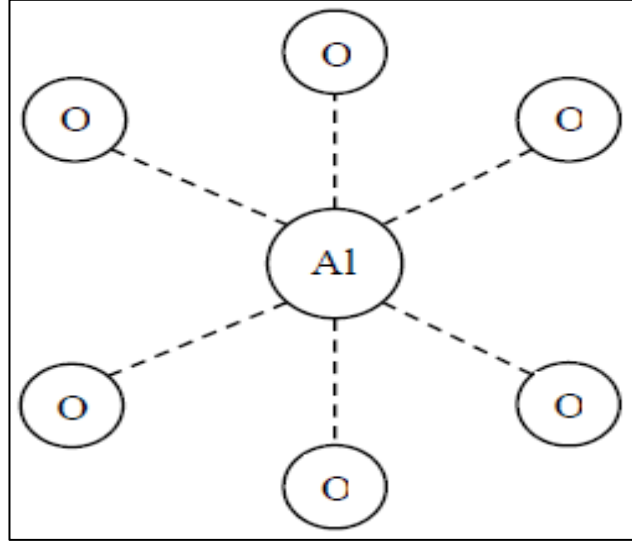
Killer temelinde kayaların parçalanıp ayrışmasıyla ince daneli haline gelmesiyle oluşan bir maddedir. İlk başlarda küre şeklinde olduğu tahayyül edilse de yapılan mikroskopik araştırmalarda sonunda tabakamsı bir yapıya yani yaprakçıklı yapıya sahip olduğu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda levhamsı yapıya sahip ince daneli zemindir. Çok küçük danelere sahip olmaları nedeniyle ancak mikroskop ile inceleyebilirler. Kil danelerinin yüzey alanlarının hacimlerine oranları ve dane boyutları sahip olduğu yapıya göre değişmektedir. Kilin tabakamsı yapısını oluşturan alüminyum ve silisyum mineralleridir. Şekil 1.11’de tetrahedron yapı tipinde, merkezde silisyum katyonu bulunup etrafında da eşit uzaklıkta dört oksijen anyonu bulunan bir yapı çeşididir.



Şekil 1.11. Kilin tetrahedron yapısı [10]

Şekil 1.12’de gösterilen yapı tipi oktahedronda ise merkezde alüminyum katyonunun etrafında altı oksijen anyonundan oluşmaktadır.

Kil minerallerinin meydana gelen yaprakçıklı yapının oktahedronlar ve tetrahedronların üst üste gelerek oksijen aracılığıyla birbirlerine bağlanmaları sonucunda oluşmaktadır [12].



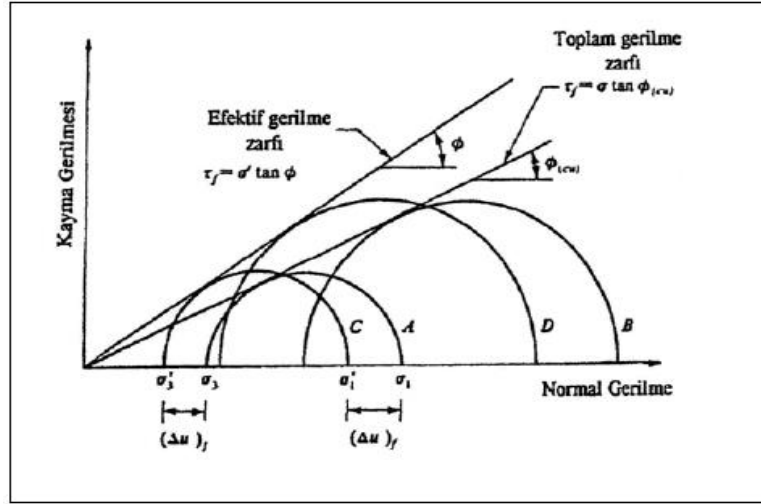
Şekil 1.12. Kilin Kilin oktahedron yapısı [10]

Killerin sınıflandırılması, tabakaların düzenine yani kristal yapılarına ve içerdiği kil minerallerine göre yapılmaktadır. Ayrıca kristal yapıları; kilin tabakamsı yapının 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 [12].

1.3.4. Killi zeminlerin kayma dayanımı

Killi zeminlerde göçme gerçekleşebilmesi için düzlemde aşılması gereken bir kayma direnci bulunmaktadır. Fakat en büyük kayma düzlemini bulamayabiliriz. Göçme, gerilmelerin ortak etkisiyle meydana gelmektedir. Zeminlerde kayma dayanımı ise göçmeye engel olan en yüksek gerilmedir.

Şekil 1.13'te konsolidasyonlu drenajsız zeminlerde elde edilen Mohr çemberleri görülmektedir. A ve B toplam gerilmeleri, C ve D ise efektif gerilmeleri ifade etmektedirler. Kayma mukavemet dayanımları farklı parametrelere bağlı olarak gerilmeler cinsinden bulunmaktadır. Toplam gerilmeler ve efektif gerilmeler şekilde gösterilmiştir [6].



Şekil 1.13. Toplam ve efektif gerilme zarfları [6]

1.3.5. Başlıca kil mineralleri

Kil mineralleri bileşimler ve içerdikleri minerallere bağlı olarak farklı renklerde bulunabilirler; sarı, kahverengimsi, beyaz, yeşil, mavi ve bu renklere yakın tondaki renklerde bulunmaktadır. Daha öncede belirttiğimiz gibi killer, çok küçük daneli yapıya sahip olmalarından dolayı rahatlıkla ayırt edilebilir malzemelerdir. Kil minerallerinin bileşimleri Tablo 1.2'de gösterilmektedir. Başlıca üç önemli kil mineralleri; iki tabakalı, üç tabakalı ve dört tabakalı bulunmaktadır.

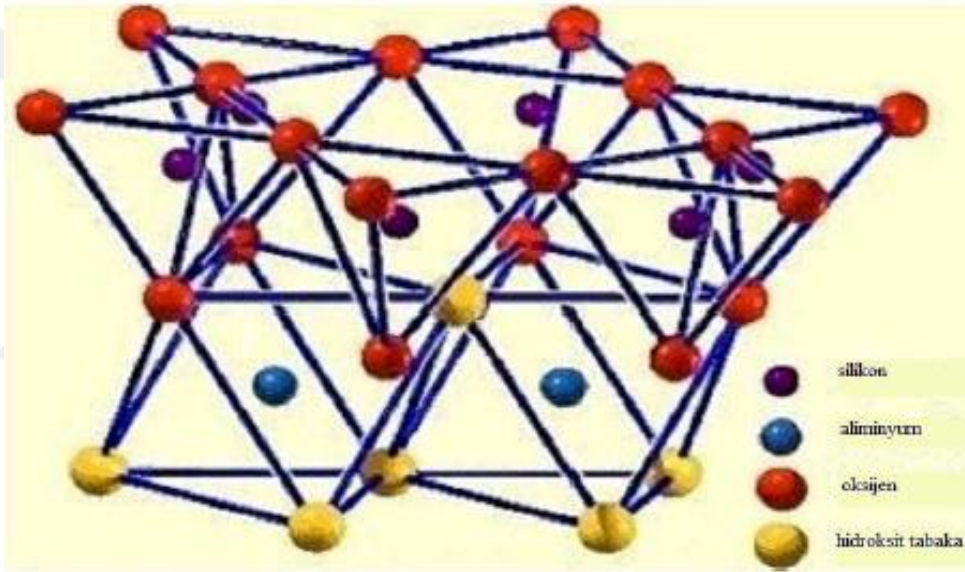
Tablo 1.2. Kil minerallerinin ağırlığa göre kimyasal bileşimi (%) [10]

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	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

1.3.5.1. İki tabakalı kil mineralleri

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 [10].

Kaolinit, killerin en çok ve en saf halde bulunan tipidir. İki tabakalı minerallerin en önemlisi kaolinit, tetrahedron yüzeyini oksijenin oktahedronların yüzeyinin de hidroksitlerin kapladığı bir yapıya sahip mineral grubudur. Bu kil grupları tabakaları birbirine çok sıkı hidrojen bağlarıyla bağlanmış vaziyette olmalarından dolayı aralarındaki elektriksel çekim kuvvetleri güçlüdür. Güçlü kuvvetler sayesinde tabakalar arasına su ve besin gibi ürünlerin girmesi önlenerek kaolinit killeri stabil hale getirmektedir. Bu nedenle tabakalar arasına su girmediğinden bu zeminler ıslandıklarında çamurumsu bir hal alırlar. İçsel sürtünme açıları yüksek, kation değişim yetenekleri ise düşüktür. Şekil 1.14'te kaolinit mineralinin yapısı gösterilmektedir [10,12].



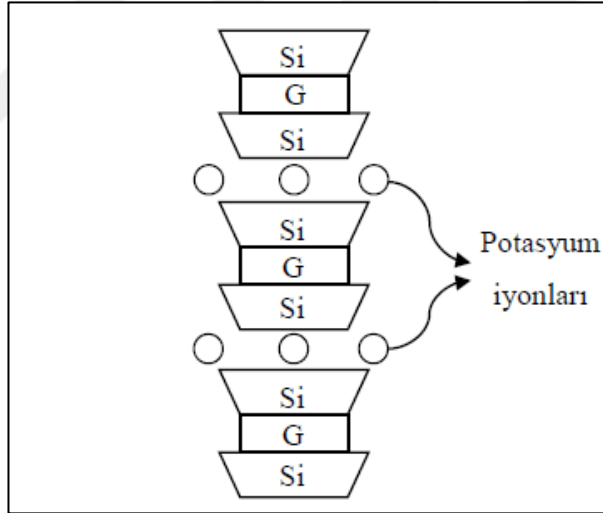
Şekil 1.14. Kaolinit grubu kil minerallerin yapısı [12]

Düşük kation değişim yeteneklerine sahip olmaları ve ancak yüksek oranda organik maddelerle iyileştirilebilen mineral grubu oldukları için sorunlu zemin türleri olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden karşılığın istenmeyen mineral grubudur. İki tabakalı kil mineralinin bir diğer örneği ise halloysittir. Halloysitler de kaolinitler gibi tetrahedron yüzeyini oksijenin oktahedronların yüzeyinin de hidroksitlerin kapladığı bir yapıya sahip mineral grubudur. Fakat tabakaları arasına su alma özelliği ile kaolinit grubu kil minerallerden ayrılırlar. Su alma özellikleri olmasından dolayı şişerler. Su alınca şişmeleri topraktaki suyun alınması açısından faydalı bir kil grubu olarak kabul edilmektedir. Kation değişim kapasiteleri kaolinit grubu gibi düşük olduğu bilinmektedir.

1.3.5.2. Üç tabakalı kil mineralleri

Üç tabakalı yapıya sahip killerin yapısında iki tetrahedron ve bir oktahedron tabakaları bulunmaktadır ve oktahedron tabakası iki tetrahedron tabakası arasında birleşmesiyle oluşmaktadır. Tetrahedronların dış yüzünü oksijen kaplamış olması nedeniyle tabakalar arasında oksijeni bağlayan katyonlar bulunmamaktadır. Üç tabakalı kil mineralleri su aldıkları zaman şişerler. Yaprakçıkların açılmasıyla aralarına katyonlar girmektedir ve elektriksel bağı oluşturmaktadırlar. Üç tabakalı yapıya sahip killer arasında yaygın olarak illit, montmorillonit ve vermikuliti örnek olarak verebiliriz.

Üç tabakalı kil minerallerine ilk örnek illit, yapısal olarak montmorillonite benziyor gibi bilinse de kimyasal yapıları farklılık göstermektedir. Ana yapısı olarak bir oktahedron iki tetrahedron arasında birleşmesiyle belirtilmektedir. Şekil 1.15'te illit mineralinin kesiti gösterilmektedir [10].



Şekil 1.15. İllit mineralinin kesiti [10]

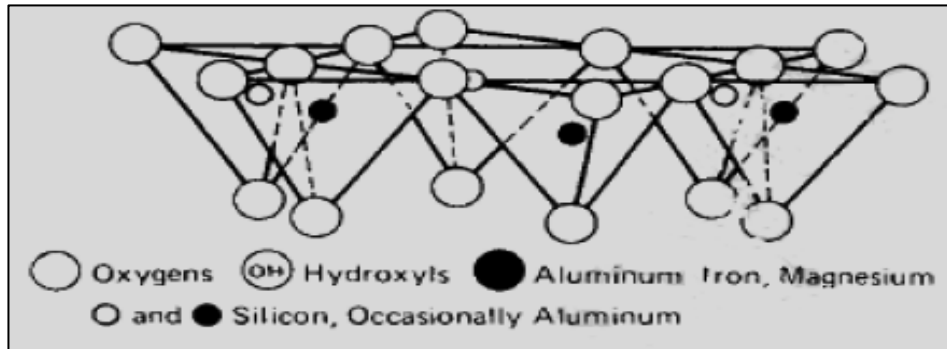
Tabakalar birbirine potasyum bağı ile bağlanmaktadır. Potasyum bağı nedeniyle tabakalar arasındaki bağlar çok kuvvetlidir. Bu olaya potasyum hidratlanması denir. Montmorillonit minerallerine göre biraz daha büyüktür. Ayrıca su alıp şişme potansiyeli açısından montmorillonite göre daha az olsa bile kaolinit grubuna göre daha fazladır. Potasyum hidratlanması olayında su alarak şişen tabakalar önce içeri doğru ilerlerler. Bu olay sonunda tabakalar birbirinden uzaklaşır.

İllit minerallerin montmorillonitlere göre şişme kabiliyeti daha az olması nedeniyle genişleme özellikleri de daha azdır. Aynı zamanda katyon değişim kapasiteleri de daha azdır. Fakat montmorillonit minerallerine göre içsel sürtünme açıları daha fazladır. İllit mineralleri, diğer minerallere göre daneleri çok daha küçük ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Daha fazla su tutmaları, daha küçük dane çapına sahip olmaları ve yapılarında daha az potasyum bulunmaları nedeniyle mikalardan ayrılırlar. Fakat diğer kil mineralleri gruplarına nazaran daha fazla potasyum bulundurmaları ve aralarında geçişlerin olmasından dolayı illitler mikaya benzetilmektedir. İllitlerin oluşması süreçleri çok farklı olduğundan bileşimlerin de çok farklı olmasına da sebep olmaktadır [10,12].

Uzun süre mika minerali olarak bilinen vermikülit, oluşumu bakımından illit grubuna benzemektedir. Sadece illit levhaları arasındaki potasyum yerine magnezyum yer almaktadır. Bu olay da illitin fazla miktarda potasyum kaybetmesiyle gerçekleşmektedir. Doğada dört farklı şekilde bulunabilmektedir ve şekil olarak da küçük kurtçuklara benzemektedirler. İllitlere göre şişme potansiyeli çok yüksek mineral türüdür [10].

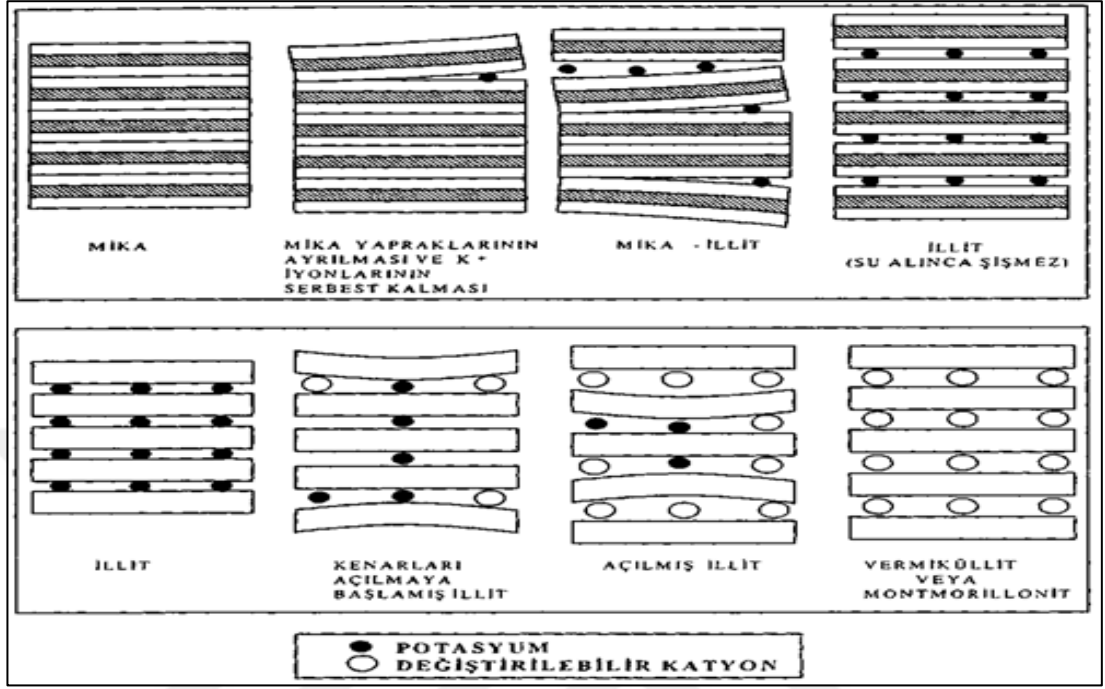
Sahip olduğu yapısı bakımından illit ve vermikülite benzeyen diğer üç tabakalı kil minerali montmorillonittir. Yapısında alüminyum hidroksit ve silika içermektedir. Bu minerallerin içerisinde de alüminyum, demir ve magnezyum bulunmaktadır. Yaprakçıklar arası mesafeler çok artması ortamda gereğinden fazla sodyum bulunmasıyla olmaktadır. Montmorillonit kil minerallerin tabakaları bir daha bir araya gelmeyecek kadar uzaklaşabilmektedirler [12,13].

Montmorillonit kil mineralleri grubunun yapısı Şekil 1.16'da gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Montmorillonit kil mineralleri grubunun yapısı [13]

Üç tabakalı kil mineralleri grubunun birbirine dönüşümleri olmaktadır. Bu dönüşümün şekil hali Şekil 1.17’de gösterilmektedir.



Şekil 1.17. Mikanın illite, illitten vermiküllit ve montmorillonite dönüşmesi [12]

Tabakalar arasında su ve potasyum bulunmaktadır. Potasyumun çekim kuvveti yeterli kadar kuvvetli değildir. Su olarak şişme potansiyeli bakımından illit ve vertikülite göre daha fazladır. Şişme potansiyeli yüksek olmasından dolayı stabil olmayan bir mineral halini almaktadır. Bu mineral grubu şişme özellikleri nedeniyle su ile benzerlik göstermektedir. Bu yüzden doymun haldeki mineraller kurduğunda büzülüp kırılabilirler.

1.3.5.3. Dört tabakalı kil mineralleri

Üç tabakalı yapıya sahip killerin yapısında iki tetrahedron ve bir oktahedron tabakaları bulunmaktadır ve oktahedron tabakası iki tetrahedron tabakası arasına birleşmesiyle oluşmaktadır. Tetrahedronlara ait oksijen tabakası tabakamsı yapının alt yüzeyinde, oktahedronlara ait hidroksilli tabaka ise tabakamsı yapının üst yüzeyinde yer almaktadır [12].

Dört tabakalı kil minerallerinin en iyi örneği kloritlerdir. 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 [12].



2. ZEMİN STABİLİZASYONU VE KİMYASAL STABİLİZASYON YÖNTEMİ

Elverişsiz mühendislik özelliklerine sahip yumuşak ve ince daneli olarak belirtilen killi zeminler ve buna benzer zeminlerin mukavemetini arttırmak, zeminin stabilizesini muhafaza etmek amacıyla farklı işlemlere tabi tutulmasına zemin stabilizasyonu denir. Artan dünya nüfusu ile birlikte yerleşime duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Bu ihtiyaç kullanılmayan alanların yapılaşmaya açılma zorunluluğu getirmektedir. Fakat bütün zeminler yapılaşma yapmak için uygun olmayabilirler. 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. Zemin iyileştirmesi veya zemin stabilizasyonu denen bu olayda zeminlerin belirli özelliklerinde kimyasal veya fiziksel değişimlere gidilmesi ile gerçekleşir.

Zeminlerin mühendislik özellikleri farklılıklar göstermesi iyileştirme yöntemlerinde de çeşitliliğe yol açmaktadır. Zeminleri stabil duruma getirmek için uygulanan birçok stabilizasyon yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerin başında mekanik stabilizasyon gelmektedir. Mekanik stabilizasyonun uygulanması doğru olmayan arazilerde kimyasal stabilizasyon yöntemi tercih edilmektedir.

Zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminlerde iyileştirme yöntemlerinin uygulanması ile istenilen birçok amaca ulaşılmıştır. Zemin stabilizasyonu sonucunda genel olarak beklenen; zeminin boşluk oranlarının doldurulması, dayanımın veya taşıma gücünün artırılması temel amaçlar olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca stabilize edilen zeminlerde gözetilen amaçları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [1];

- Dolgu ve şevlerin stabilitesini arttırmak,
- Konsolidasyonu hızlandırmak,
- Boşluk suyu basıncını azaltmak,
- Geçirimsizliği azaltmak,

- Kayma mukavemetini arttırmak,
- Taşıma kapasitesi düşük zeminin kapasitesini arttırmak,
- Zeminin sıvılaşma riskini azaltmak,
- Zeminin deformasyonu azaltmak,
- Doğal afetler gibi dış etkenlere karşı önlem almak,
- Geçirimliliği azaltmak,
- İklim ve çevre koşullarının olumsuz etkisini azaltmaktır.

Yapılaşmanın artmasıyla beraber elverişli zeminler azalmaktadır. Bu da zayıf zeminleri temel olarak kullanmakta ve gittikçe artan yapı büyüklükleri ve yapıdan gelen ekstra yükleri taşımakta mühendisliği zor duruma koymaktadır. Bu nedenle elverişli zeminlerin kullanılabilir hale getirmek için yirminci yüzyılın başlarından itibaren birçok yöntem önerilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır [1].

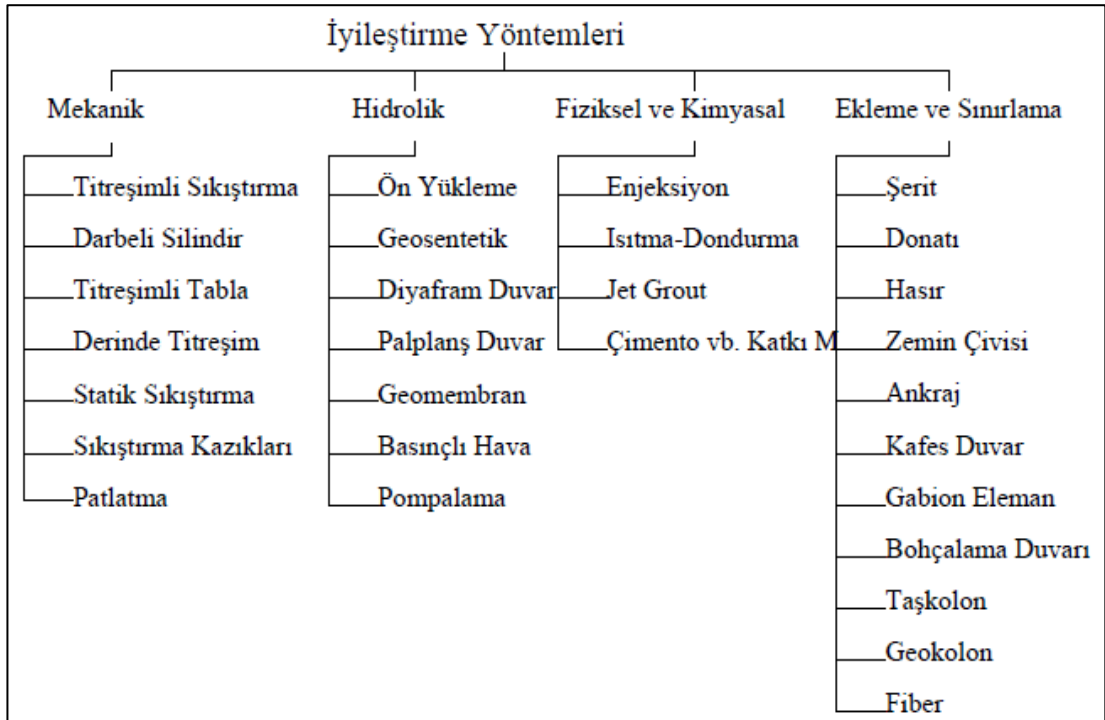
Organik zeminlerde uygulanması doğru bulunan stabilizasyon yönteminin ince daneli ve iri daneli zeminlerde uygulanması doğru olmayabilir. İri daneli zeminlerde genellikle sıkıştırma yönteme uygulanmaktayken ince daneli olarak bilinen killi ve siltli zeminlerde katkı maddesi ile zemin stabilizasyonu daha uygun olduğu daha önceki çalışmalarda da belirtilmiştir [4].

2.1. Stabilizasyon Yöntemleri

Günümüzde barınma ihtiyacının arttığını daha önce de belirtmiştik. Bu nedenle sorunlu zeminlerin kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Yapılaşmanın olduğu araziler veya yolların yapıldığı alanlar her zaman üzerindeki yükü taşıyabilecek zemine sahip olmalıdır. Fakat problemlili arazilerin çoğu mühendislik özellikleri bakımından yapılaşmaya uygun değildir. Bu durumda yapılaşma alanlarının değiştirilmesi ve zeminin tamamen kaldırılıp yerine yeni bir zeminin yerleştirilmesi hem ekonomik hem de uygulanabilir açıdan uygun görülmemektedir. Bu nedenle zemini istenilen özelliklere getirmek yani zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi en uygun çözüm olarak görülmektedir. Elverişli olmayan zeminlerin iyileştirilmesinde genel olarak dört yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler; mekanik, kimyasal, fiziksel ve hidrolik yöntemler olduğu belirtilmiştir. Bu yöntemlerle beraber zeminin bazı özellikleri iyileştirilecek, dayanım ve taşıma kapasitesi artacak, oturmalar ve su

sızıntıları azalacak. Mekanik stabilizasyon, bazı kuvvetlerin etkisiyle zeminler derinden titreşim vererek sıkıştırılması olayına denir. Ayrıca bu yöntemle zeminin yoğunluğu da artmaktadır. Patlama ile sıkıştırma veya sıkıştırma kazıkları ile sıkıştırma mekanik stabilizasyona örnek verilebilir. Hidrolik iyileştirme ise drenler ve kuyular yardımıyla boşluk suyu basıncını düşürerek dayanımın artırılması amaçlanan bir yöntemdir. Fiziksel ve kimyasal yöntemlerde çoğunluk zeminin yüzeyinde katkı maddeleri ile karıştırılarak yapılan yöntemlerdir. Enjeksiyon, jet grout ve katkı maddesi ile iyileştirme bu yöneme örnek verilebilir [1].

Zemin stabilizasyonunda zeminlerin mühendislik özelliklerin birçoğu iyileştirilir. Bu yüzden zemin iyileştirme yöntemlerini tek başlık altında toplamak veya yalnızca tek sınıflandırma yapmak mümkün değildir. Daha önce belirttiğimiz gibi iyileştirme yöntemleri dört başlık altında toplanır. Stabilizasyon yöntemlerinin en genel hali kimyasal ve mekanik stabilizasyon olarak belirtilmektedir. Mekanik stabilizasyon daha çok dane çapı büyük olduğunda tercih edilmektedir. Kimyasal stabilizasyon ise mekanik stabilizasyonun uygulanması uygun bulunmayan yerlerde tercih edilmektedir. İyileştirme yöntemlerinin kapsamlı hali Şekil 2.1’de gösterilmektedir [14].



Şekil 2.1. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması [14]

Zemin iyileştirmede kullanılacak birçok yöntem bulunmaktadır. Her yöntem; ortamın türü: kil, toprak, çamur, tortul vb., yapının türü ve yüklerin dağılımı, iyileştirme uygulanacak alanın geometrik özellikleri, zeminin mühendislik özellikleri, işçi ve özel aletlerin varlığı, çevre şartları (erozyon, atık kullanımı), ekonomik durum gibi özel koşullara bağlı olarak uygulanmaktadır[15].

Zeminler birçok farklı özelliklerine çeşitli katkı maddeleri ile iyileştirilebilir. Tablo 2.1’de de zeminin cinsi faktörüne bağlı olarak farklı bağlayıcılarla iyileştirildiği gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Zemin cinsine göre stabilizasyon metotları [1]

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

İyileştirme tipi seçilirken zeminin granülometrisine ve plasite indisine bakılır ve zeminin sorunlu özelliği belirlendikten sonra seçilen stabilizasyon tipi uygulanır. Zeminin cinsi faktörü, uygulanacak iyileştirme yöntemi araştırılırken gözden kaçmamalıdır. Çünkü zeminin cinsine göre uygulanacak stabilizasyon seçilmezse zemine gelen aşırı yüklerden dolayı iyileştirme yöntemi uzun ömürlü olmayabilir. Bu da tekrardan iyileştirmeye gitmesine neden olacağı için ekonomik açıdan da önem kazanmaktadır. Tablo 2.2’ de zeminlerin içeriğine bağlı olarak önerilen stabilizasyon yöntemleri gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Tavsiye edilen stabilizasyon metotları [1]

Zemin içeriği	Tavsiye edilen stabilizasyon	Amaç
✓ Kum	Mekanik stabilizasyon Çimento Asfalt	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ince plastik olmayan malzeme karıştırarak stabiliteyi arttırmak ➤ mukavemeti arttırmak ➤ kohezyonu sağlamak
✓ Silt	Mekanik ve kimyasal stabilizasyon	<ul style="list-style-type: none"> ➤ zemin özelliklerini iyileştirmek
Killer; ✓ alofenler ✓ kaolin	Kireç veya kireç- uçucu kül karışımı Kum ile mekanik stabilizasyon Çimento Kireç	<ul style="list-style-type: none"> ➤ mukavemeti arttırmak ➤ stabiliteyi arttırmak ➤ kısa süreli mukavemeti arttırmak ➤ işlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak ➤ kısa süreli mukavemet artışı ➤ işlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak
✓ ilit	Çimento Kireç	<ul style="list-style-type: none"> ➤ işlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak
✓ montmorillonit	Kireç	<ul style="list-style-type: none"> ➤ işlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak

Genel olarak tablolardan da görüldüğü gibi zeminin taşıma gücünü, mukavemetini, stabilitesini arttırmak ve deformasyonları, esnekliği azaltmak için birçok stabilizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca iyileştirilecek özelliklere göre uygulanan yöntemler araştırılıp seçmek için sınıflara bölünmüştür.

2.2. Kimyasal Stabilizasyon

Zemine çeşitli katkı maddeleri eklenerek farklı yöntemlerle karıştırılıp reaksiyon sağlayarak iyileştirme yapılması mümkündür. 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 kitlesinde herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşturmaktan 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 kitlesi içerisinde oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda zeminin amaca uygun hale getirilmesidir. Bu stabilizasyonda en yaygın olarak kullanılan malzemeler; kireç, çimento, uçucu kül, bitümdür. Bu maddeler ile yapılan iyileştirmede temel amaç, zemindeki daneler arasındaki boşluğu kapatıp aralarında sağlam bir bağ kurmaktır [15].

Kimyasal stabilizasyon yönteminde kullanılan maddeler iki şekilde zemine katılır. Birincisi, zemin yapısının stabil kalması için kimyasal maddeleri zeminin çatlaklarına veya danelerin arasına enjekte edilerek yapılan bir yöntemdir. Bu tekniğe enjeksiyon tekniği denir. İkincisi ise katkı maddelerini zemine katarak yüzeysel bir şekilde karıştırılarak uygulanan bir yöntemdir. Bu da katkı maddesi ile stabilizasyon olarak bilinmektedir. Yapılaşma zeminden olması halinde stabilizasyon önemlidir. Bu durumlarda kompaksiyon stabilizasyon kadar önemlidir [16].

1900'lü yılların ortalarına kadar yol stabilizasyonlarında belirli araçlardan boşaltma yapılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmekteydi. Bu şekilde yapılan kompaksiyon işleminde harcanan enerjinin az olması nedeniyle daha sonra ciddi yenilmeler olmuştur. Aynı şekilde eski toprak yapılarında da insan gücüyle taşınan malzemeler ile yapılaşmaya gidilmiştir. Sıkıştırma işlemi ise insanları veya fillerin işlem uygulanan zemin üzerinde yürümesiyle gerçekleşmiştir. Her iki yöntemde de

2.2.2. Katkı maddesi ile zemin stabilizasyonu

Yapılaşmanın yapıldığı sorunlu zeminlerde farklı oturmalar veya deformasyonlar gösterebilmektedir ve zeminin sıkışılabilirliği yüksek olabilir. Daha önce de belirtildiği gibi temel yapısı zeminin mühendislik özelliklerine bağlıdır ve buna bağlı olarak değişmektedir. Zeminin karakteristik özellikleri zayıf bir zemine yapılaşma söz konusu olduğunda zemin yapıyı taşıyamaz veya sorunlu bir zeminde yol yapılması durumunda kısa süre içerisinde dayanımda ciddi yenilmeler olabilir. Buna benzer durumlarda zeminin taşıma kapasitesinin veya dayanımının iyileştirilmesi zemin iyileştirme yöntemi ile sağlanabilir. Zemin iyileştirme tekniklerine bakıldığında katkı maddesi eklenerek yapılan iyileştirme tekniği, özellikle zemin uyumu açısından ve birçok faktörden dolayı iyileştirmek için büyük bir etkiye sahiptir [1].

Zeminin iyileştirilecek özelliğine, zemin cinsine ve iyileştirmenin amacına bağlı olarak çeşitli katkı malzemesi kullanılarak zeminin mühendislik özelliklerinde iyileştirmeler yapılabilir. 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. Bunlar uygulanabilirlikleri yanında, maliyeti düşük ve bulunması kolay olan çimento, kireç, uçucu kül, asfalt, jips, reçine ve polimer olarak sıralanabilir. Bu yöntemle esas amaç zemin içerisindeki daneler arasındaki boşlukları minimize ederek daneler arasındaki bağları kuvvetlendirerek zemin stabilizasyonuna fayda sağlamaktır. Katkı malzemelerin bazıları organik olarak bulunurken bazıları da inorganiktir. Tablo 2.3’de organik ve inorganik malzemelerin üstünlük ve sakıncaları gösterilmektedir [16].

Tablo 2.3. İnorganik ve organik maddelerin karşılaştırılması [16]

Metot	Üstünlük ve Sakıncaları
İnorganik malzemeler; kireç, çimento, uçucu kül vb.	Uygulama alanı geniş, maliyeti düşüktür.
	Kimyasal açıdan zehirli değildir.
	İşlenebilirliği kolay ve özel alet gerekmez.
	Radyasyon etkisi ve ultraviyole tehlikesi yoktur.
	Stabilizasyonda permabiliteyi düşürür, mukavemeti arttırmaları.

Tablo 2.3. (Devam) İnorganik ve organik maddelerin karşılaştırılması [16]

Organik malzemeler; organik polimer, biyolojik yöntemler vb.	Maliyeti çok yüksektir.
	Ultraviyole ışınları tam olarak önleyemezler.
	Uygulanması çok zordur ve özel alet gerekir.
	Uzun süre stabilite sağlayamazlar.

Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirmesi genelde çalışılabilirlik, dayanım kazanmak, geçirimsizliği azaltmak gibi nedenlerden dolayı yapılmaktadır. Zeminler farklı kil mineralleri içerdiği için doğru katkı maddesini seçmek önemlidir. Bunun için dikkate alınması gereken etkenler aşağıda verilmektedir [15];

- İyileştirmede kullanılacak katkı malzemesi kolay nüfuz etmelidir.
- Seçilen katkı maddesi miktarı ekonomi açısından uygun olmalıdır.
- İyileştirilecek kilin minerolojik yapısındaki mineral oranlarına bakılmalıdır.
- Kür süresi dikkate alınmalı ve kür zamanının stabilizasyonda olumsuz etkiler olmamalıdır.
- Kullanılacak katkı malzemelerinin herhangi bir olumsuz faktörü bulunmamalıdır.
- İyileştirme için seçilen katkı maddesi zemine eşit şekilde eklenmelidir.

Katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonunun etkisi arazide koşullarında laboratuvarlardaki koşullar kadar etkili olmayabiliyor. Çünkü arazide farklı çevre şartları nedeniyle yöntemin uygulanması zorlaşıyor. Katkı maddeleri en çok ulaşım alanlarında tercih edilmektedir. Binaların temellerinde ve su yapılarında da uygulanması giderek artmaktadır. Ayrıca katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonunda asıl amaçlar plastisite indisini düşürmek, taşıma gücünü ve mukavemeti arttırmak, su sızıntısını azaltmak, oturmaları azaltmak ve şişmeleri azaltmak diyebiliriz. Genel olarak çimento, zeminin daneleri arasındaki boşlukların azalmasını sağlayarak mukavemet artışına katkı yapmaktadır.

2.2.2.1. Çimento stabilizasyonu

Çimento ile zemin stabilizasyonu uygulamaları 1920'lerde karayollarında başlamıştır. Son yıllarda iyileştirmede kireç ile birlikte yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ekonomi olması nedeniyle de dünyanın birçok ülkesinde kullanımı artmaktadır. Endüstriyel sektörün ilerlemesiyle birlikte ülkemizde de kullanımı uygun görülen malzemelerin başında gelmektedir [3].

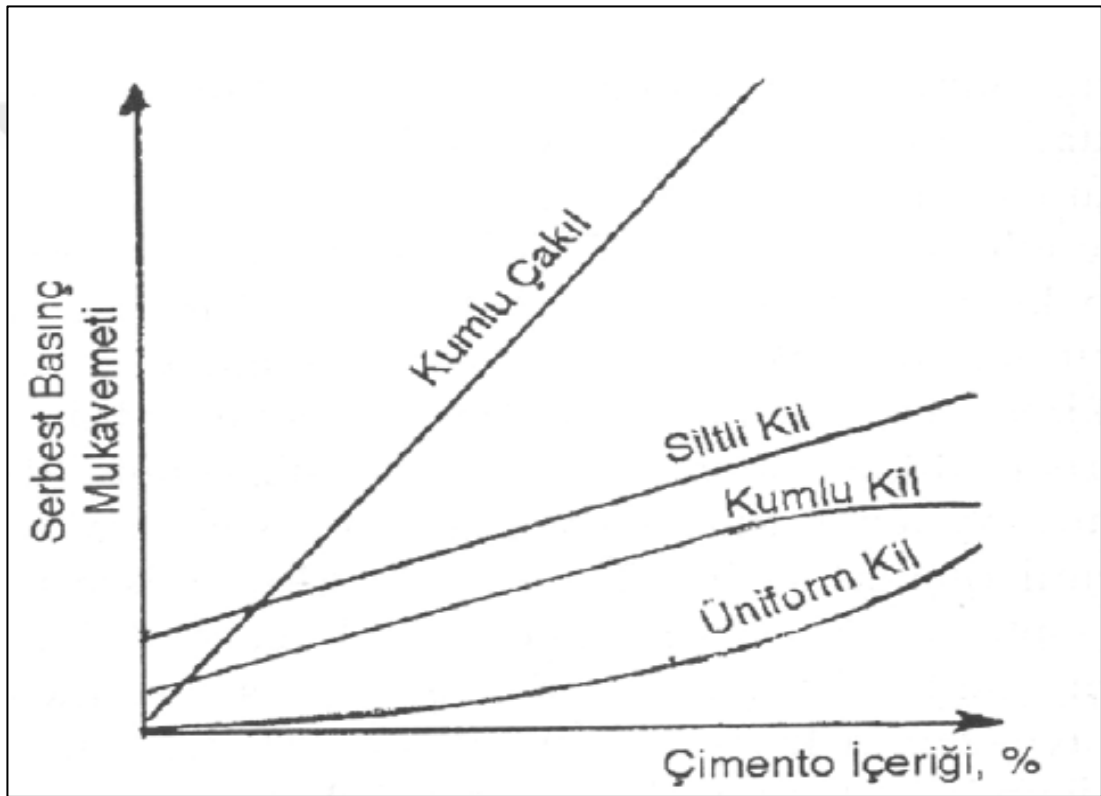
Ham maddesi kalker ve alçı taşından olan çimento, iyi bir yapıştırıcı malzemesidir. Ayrıca su ile tepkimeye girdiğinde kireç gibi serleşen bir malzemedir. Mekanik iyileştirmenin uygulanması imkansız durumlarda mevcut zemin çimento ile karıştırılarak iyileştirilebilir. Çimento ile stabilizasyon farklı alanlarda farklı amaçlar için kullanılabilir. Özellikle ulaşım yapılarında ve hareketli yüklerin büyük ve devamlı olduğu havaalanı pistleri gibi alanlarda uygulanmaktadır. Hatta bazı ülkelerde trafikte yüklerin artmasıyla beraber çimento stabilizasyonu, yolların temellerinde zorunlu hale getirmektedir [1].

Zemin stabilizasyonunda gerçekleşen puzzolanik reaksiyonlar için gerekli silika maddesi çimentonun bünyesinde mevcuttur. Bu nedenle çimento, içerisinde puzzolanik reaksiyon maddesi bulunmayan zeminler için etkili bir stabilizasyon malzemesidir. Bağlayıcı özelliğinden dolayı beton için önemli bir faktördür. Aynı zamanda diğer zeminler için de daneler arasındaki bağı kuvvetlendirmesi için büyük önem taşır. Betondan avantaj olarak farkı çimento oranının çok az olmasıdır. Zemin ile çimento karışımına düşük mukavemetli beton da söylenebilir. Çünkü zemindeki mukavemet artışı ile betondaki mukavemet artışları benzerdir [17].

Çimento ile stabilize edilen zeminlere eklenecek ideal çimento miktarı en baştaki Atterberg deneyleriyle veya ph deneyi ile belirlenebilmektedir. Yapılan çalışmalara bakıldığında zemin iyileştirmelerinde kullanılan çimento oranı genellikle %5-15 arasında değişmektedir. Organik zeminler dışında diğer tüm zeminlerde uygulanması etkili bir yöntemdir. Yaygın olarak Portland çimentosu kullanılır. Çimento ile iyileştirme yapılan zeminlerde hacimde bir artış gözlemlenmekte ve çatlaklar oluşmaktadır. Genellikle plastisite indisi 30'dan az olan zeminlerde uygulanmaktadır ve dane çapı 2,5 cm den büyük olmayan zeminler için uygulanması çok doğru değildir. Uygun miktarı belirlemek için yapılan deneyler optimum su muhtevasını da belirleyebilmektedir. Stabilizasyonda katılacak su miktarı çimentonun sertleşmesi için önemlidir. İnce daneli zeminler için su miktarı, optimum su muhtevasından biraz fazla olması çimentonun etkinliğini artırmaktadır. Bazen çimento miktarını azaltıp ilaveten başka katkı maddesi de eklenebilir [3].

Zemin cinsine göre çimento oranındaki artış ile serbest basınç mukavemetindeki değişim Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Şekilde de anlaşılacağı gibi çimento ile

iyileştirme yöntemi en iyi mukavemet artışını granüler zeminlerde vermektedir. Mukavemetteki artışlar zemin cinsine ve çimento oranına bağlı olduğu kadar kür süresine ve sıkıştırma miktarına da bağlı olmaktadır. Bu faktörler bir arada değerlendirilmesi gerekir. Çimento stabilizasyonu için çimento ihtiyacı zemin cinsine ve ıslatma-kurutma ile donma çözülme direncine bağlı olarak değişir. Örneğin iyi derecelenmiş ve ince (silt ve kil) içermeyen bir zemin için %5'den daha az, az veya normal plastik zeminler için yaklaşık %10 ve plastik killer için %1'den daha fazla çimento içeriği gerekebilir [1,3].



Şekil 2.3. Serbest basınç mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi [3]

Yapısında kalsiyum minerali içeren zeminler bu stabilizasyon için uygundur, ayrıca iyi derecelenmiş granüler zeminler, düşük plastisiteye sahip killi zeminler ve granüler zeminler çimento ile stabilizasyon için en uygun zeminlerdir. İri daneli zeminlerde çimento oranının artışı geçirgenliği azaltırken ince daneli zeminlerde ise arttırmaktadır. Killi zeminlerde çimento kullanımı plastisite indisini, mukavemeti, işlenilebilirliği artırır ve likit limiti düşürür. Zemin ile karıştırılması gereken zemin tipine göre kullanılacak çimento oranları Tablo 2.4' te gösterilmektedir [18].

Tablo 2.4. Zemin tiplerine göre optimum çimento oranları [1]

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

Çimento yüzeysel zemin stabilizasyon dışında birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlar; şevlerin dayanımını ve durabilitesini arttırmak, yollardaki aşırı yükler altındaki titreşimleri azaltmak, sorunlu yüzeylerin sürtünmesini önlemek, konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak için kullanılmaktadır. arazideki uygulamaları oldukça kolay ve hızlıdır.

Kireç stabilizasyonunda uygulan prosedür ile aynıdır. Öncelikle laboratuvar çalışmalarında uygun çimento oranı ve optimum su muhtevaları belirlenir. Uygulanacak alandaki zemin stabilize edilecek derinlik kadar gevşetilir. Daha sonra belirlenen çimento oranı serpilir. Bu işlemden sonra reaksiyonun başlaması için gerekli su miktarı da ilave edildikten sonra iş makinalarıyla karıştırılır. Son adımda tam olarak karıştırıldıktan sonra yerleştirilen zemin, silindir ile sıkıştırılır [18].

Çimento, malzeme olarak kireçten pahalı olabilir ama çimento ile stabilize edilmiş zeminler diğer yöntemlere nazaran kireç stabilizasyonu gibi büyük tasarruflar sağlamaktadır. Öncelikle dolgu kalınlığı azalacağı için ek kazı ve dolgu masraflarının önüne geçilmiş olmaktadır. Bu ayrıca taşıma gücünü ve mukavemeti artırır. Ayrıca mevcut zemin kullanılarak iyileştirme yapıldığından bakımı konusunda da ciddi tasarrufa gideceğini göstermektedir.

2.2.2.2. Kireç stabilizasyonu

Kireç stabilizasyonu bilinen en eski iyileştirme yöntemidir. Zemine kireç katılarak mühendislik özelliklerin iyileştirilmesi bunun sonucunda mukavemetin veya taşıma gücünün artırılması için yapılan işleme kireç stabilizasyonu denir. Kireç stabilizasyonu daha çok ince daneli zeminlere sahip karayolların iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Bunun ilk örneği de 1924 yıllarında sönmüş kireç kullanılarak

uygulanmıştır. Artan trafik ile birlikte yollardaki yük de artmaktadır ve taşıma gücünün de artması gerekmektedir. Bu durum yollardaki kireç stabilizasyonu kullanımını arttırmıştır [19].

Killi zeminlere kireç ilavesi ile birlikte kimyasal reaksiyon gerçekleşir. Bu reaksiyonlardan ilki katyon değişimidir. Katyon değişiminde kirecin killi zemine ilavesiyle, kilin yapısındaki sodyum ve potasyum iyonları ile kirecin yapısındaki kalsiyum ve magnezyum iyonları ile yer değiştirirler. Reaksiyonların bazıları hemen başlarken bazıları da kısa zamanda başlayıp uzun süre devam etmektedir. Bunlardan puzzolanik reaksiyonlar zaman içinde başlayıp uzun süre devam eden reaksiyonlardandır. 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 getirir. Puzzolanik reaksiyonlar killi zeminin yapısında bir takım değişikliklere neden olmaktadır. Zeminin likit limit ve plastisite indisi azalırken plastik limit, elastisite modülü, işlenebilirliği, dayanım, suya dayanım ve mukavemetlerinde artışlar gözlemlenmektedir [20].

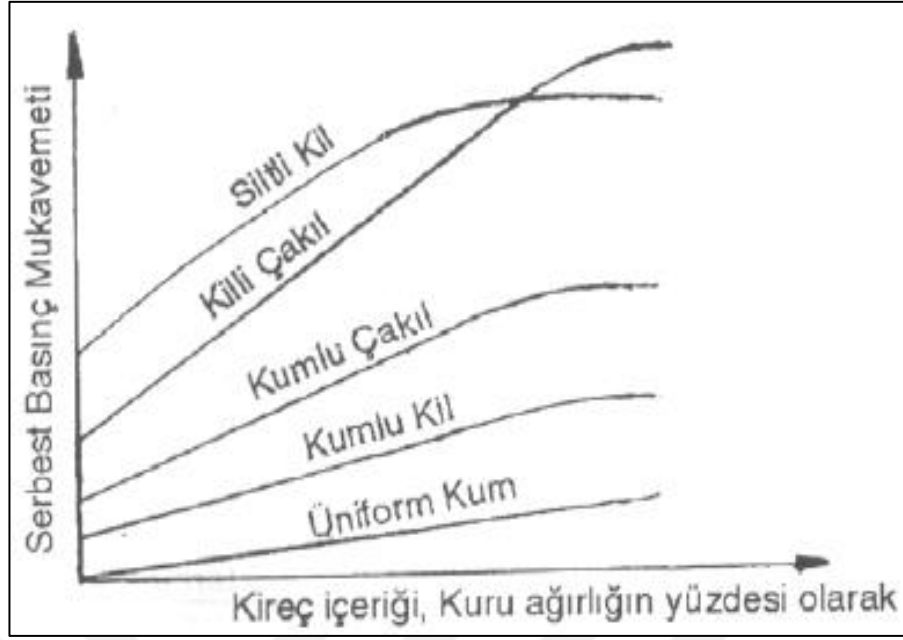
Kireç stabilizasyonu için yaygın olarak sönmüş kireç kullanılmaktadır. son zamanlarda sönmemiş kirecin kullanımı her ne kadar artmış olsa da yakıcılığı bakımından tehlike arz ettiği için genellikle tercih edilmemektedir. Kireç, kullanılacak iyileştirme amacına göre farklı oranlarda olabilmektedir. Geçici yol kaplamalarında düşük, kalıcı zeminlerde ise yüksek miktarda iyileştirme uygulanmaktadır. Kullanılacak kireç oranı baştaki deneylerde belirlenmektedir. Plastik limit, likit limit deneylerinde genellikle en az artışı gösteren oran alınmaktadır. Ph deneyinde ise değeri 12,4 gösteren oran stabilizasyon için uygun değer olarak kabul görülmektedir. Dolayısıyla kireç oranı PL, LL ve ph deneyleriyle belirlenebilir. Bunlar dışında zemin cinsine göre daha önce belirlenmiş tablodan da tahmini oranlar alınabilir. Tablo 2.5'te zemin cinsine göre katılacak kireç oranları verilmiştir [1].

Tablo 2.5. Ingles ve Metcalf tarafından önerilen kireç oranları [21]

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

Plastik kabul edilmeyen ve plastisite indisi düşük zeminlerin stabilizasyonunda kireci tek başına kullanılması dayanımı arttırmada yeterli gelmemektedir. Bu durumda kirece ilaveten başka katkı maddelerin kullanılması daha iyi sonuç vermektedir. İnce daneli malzemelerin az alan zeminlerde kireç ve uçucu küle çimento eklenmesi daha uygundur. Fakat ince daneli zeminlerde uçucu külün kirece katılmasıyla istenilen sonuç alınabilir. Çimento ve uçucu külün yapısında bulunun silis ve alüminyum sayesinde reaksiyonlar kolaylıkla gerçekleşmektedir [1].

Kireç genel olarak killi zeminlerde uygulanmaktadır. Kireç; orta, ince ve çok ince daneli zeminlerle reaksiyona girerek mukavemet değerlerinde artış göstermektedir. Kil içermeyen ve organik zeminlerde kireç stabilizasyonu uygun değildir. Kumlu killerde ise kireç stabilizasyonunun etkisi oldukça azdır. Killi çakıllı zeminler de bakıldığında çimentoya kıyasen daha yüksek mukavemetler elde edilmektedir. Ayrıca yüksek oranda kireç kullanımı çimento kadar etkili olamamaktadır. Şekil 2.4'de farklı tip zeminlerde kireç miktarı ile mukavemet değişimi gösterilmektedir [1].



Şekil 2.4. Kireç içeriğinin zemin tiplerine etkisi [1]

Kireç ile zemin stabilizasyonunda zeminde bir takım değişimler gerçekleşmektedir. Bu değişimleri kısa dönemde ve uzun dönemde meydana gelen değişimler şeklinde ayırabiliriz. Kısa dönemde; serbest basınç değerleri, CBR değerleri, plastik limit değerleri ve su muhtevaları artmaktadır. Likit limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş görülmektedir. Ayrıca proktor eğrileri de düzleşmektedir. Uzun dönemde ise; CBR değerlerinde kısa döneme göre daha fazla artışlar görülmektedir. Ayrıca mukavemet değerlerinde, şişme ve büzölmeye karşı dirençte ve dona karşı dayanımda artışlar gözlemlenmektedir [22].

Kireç stabilizasyonunun arazi uygulaması iki şekilde gerçekleşmektedir. Laboratuvar ortamında belirlenen kireç ve su miktarları stabilize edilecek zemine ya inşaat sahasında karışım yapıp uygulanır ya da başka yerde karıştırılarak uygulanacak arazide sıkıştırılır. Arazide uygulanması kolay bir yöntemdir. Çimento stabilizasyonunda olduğu gibi önce mevcut zemin gevşetilir. Daha sonra belirlenen kireç oranı yüzeysel serpilir. Gerekli su miktarı da ilave edildikten sonra iş makinalarıyla karıştırılır. Son adımda tam olarak karıştırıldıktan sonra yerleştirilen zemin, silindir ile sıkıştırılır.

Kireç stabilizasyonu maliyet bakımından diğer iyileştirme yöntemlerinden daha düşük maliyetle uygulanan bir yöntemdir. Kısa vadede gereksiz kazılar engellendiği

için ve uzun vadede ise fazladan bakım maliyetinin düşürülmesinden dolayı kireç stabilizasyonu daha etkin olarak kullanılmaktadır. Kısa sürede etkili olması ve ekonomik açıdan kazançlı bir stabilizasyon yöntemi olduğundan özellikle yollarda daha yaygın olarak tercih edilmektedir.

2.2.2.3. Bitüm stabilizasyonu

Çimento ve kireç ile zemin iyileştirmelerinde mukavemetin artması rol oynarken bitüm ile zemin iyileştirmelerinde zeminin suyun zararlı etkilerden korunması rol oynar. Bitümlü zemin stabilizasyonlarında katran ve asfalt kullanılmaktadır. Zeminin özelliklerine ve iklim koşullarına göre bitüm malzemesi seçilmektedir. Danelerin birleştirilmesinde de etkilidir. Bunun sonucunda su ve rüzgâr erozyonuna karşı direnç artmaktadır. Ayrıca su oranı yüksek bölgelerde tercih edilir. Bitümlü stabilizasyon karayollarında yaygın olarak kullanılmaktadır [23].

Bitüm, asfalt vb. petrolden elde edilen siyah, yapışkan ve sıcakken sıvı olan bir malzemedir. Zeminlerin boşluk oranları çok yüksek değerlerde olduğundan geçirimsizliği arttırmak için pratik ve tasarruflu olan kimyasal bir katkı kullanmak pek mümkün değildir. Ancak bitümlü zemin stabilizasyonunda geçirimsizlik önemli ölçüde arttırma mümkündür. Böylelikle kaplamalarda sağlam bir alt temel oluşturulmaktadır. Kireç ve çimento gibi maddelere oranla daha az tercih edilmesinin bir sebebi de pahalı malzeme olmasıdır. Fakat kumun bulunduğu zeminlerin kaplamaların temellerin ideal bir malzemedir. Hem kaplama kalınlığı azalacağından ekonomik olarak da tasarruf sağlamaktadır. Bitümlü stabilizasyonda başka maddeler içermeyen kumlu zeminlerde daha iyi sonuç alınmaktadır. Ayrıca ufalanması kolay olan ve bitümde eşit şekilde karışan zeminlerde de bitümlü iyileştirme yöntemi başarılı olmaktadır. Bunlardan dolayı plastisite indisi 10'dan fazla olmaması, 200 no'lu elekten geçmesi en fazla %18 olması ve likit limit de 40' dan fazla olmaması gerektiği şartları getirilmiştir. Kullanılacak tahmini asfaltoranları ise ince daneli zemin içerenlerde %4-7 arasında, kumlu zeminlerde ise bu oran %2-4 arasında olmaktadır. Ayrıca en iyi sonucu da granüler zeminlerde %1 ile %3 bitüm katkısı ile elde edilmiştir [1].

Bitümle stabilize edilen zeminlerde başarı sağlamak için zeminin bütününe asfalt ile kaplamaya gerek yoktur. Bitümlü zemin stabilizasyonu ile daneler arasındaki

boşlukların bir kısmı asfalt ile doldurularak su geçirimsiz bir tabaka sağlanır. Asfaltın bağlayıcılık özelliğinden dolayı da kohezyonu yüksek bir zemin elde edilebilir [1].

2.2.2.4. Uçucu kül stabilizasyonu

Uçucu küller içerdiği bileşiklere göre üçe ayrılır. Bunlardan birincisi, C sınıfı uçucu kül belirli miktarda kireç içerir ve bunlar linyit veya kömürün yanmasından elde edilir. Az miktarda da olsa kireç içerdiği için reaksiyona girmesi kolaydır. F sınıfı uçucu küller asfaltlı kömürün yanması ile elde edilir. Bu tip uçucu küller çok az oranda kireç içerir. Bu yüzden ortama kireç ilavesi olmalı ki reaksiyonu başlatmak mümkün olsun. Alümina ve silis içermektedirler. Kireç ile reaksiyona girdiklerinde çimentolaşma gerçekleşebilir. İki sınıfa da girmeyen üçüncü bir uçucu kül sınıfı daha vardır. Yapılan çalışmalarda farklı bir katkı kullanmadan C sınıfı uçucu küller ile yapılan iyileştirmede çok iyi sonuçlar alınmıştır. Zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirildiği gözlemlenmektedir. Özellikle yollarda alt temel iyileştirmelerinde normal bir iyileştirmeye göre çok daha iyi sonuçlarla karşılaşılmıştır [1].

Uçucu küller, yapay yöntemlerle elde edilen bir yapay puzolan malzemesidir. Kömürler toz halinde yakıldıktan sonra filtrelerde toplanan, puzolanik özellik gösteren ince toz halindeki malzeme uçucu nitelikte olduğundan uçucu kül olarak adlandırılır. Kömür yakılmasından sonra geriye kalan uçucu kül oranı 1/5' tir.

Yakılan kömürden arta kalan külün büyük kısmı uçucu kül olarak adlandırılan ince taneli külden oluşturmaktadır. Uçucu küller aynı zamanda atık kül olarak ta bilinmektedir. Yıllık atık kül üretiminin oranları çok yüksek olduğundan çevreye verdiği zararları ortaya çıkarmaktadır [24].

Uçucu kül (UK) zemin stabilizasyonunda önemli bir kimyasal etkiye sahiptir. Kimyasal reaksiyonlar genellikle tek yönlüdür. Reaksiyon sonucunda elde edilen ürünler fonksiyonları kaybetmeleri çok görülmez. Kil ve silt grubu stabilize edilecek zeminler arasında en sıkıntılı olanlarıdır. Bu tip zeminler su ile temas ettiklerinde yumuşak bir duruma geçerler. Killi ve siltli zeminlerin uçucu kül ile stabilize edildiklerinde katyon değişimi ve sonrasında topaklanma işlemleri kalsiyum

hidroksit sayesinde hızlı gerçekleşir. Reaksiyon kısa süre içerisinde başlar ve uçucu kül yapısındaki kireç oranına göre birkaç gün devam eder [3].

Uçucu kül ile zemin stabilizasyonunun, likit limit, plastik limit, mukavemet değerleri, permabilite, kompaksiyon gibi mühendislik özellikler üzerinde olumlu etkisi olmuştur.



3. MATERYAL VE METHOD

Yapılan deneysel çalışmalarda, kil zemininin katkı malzemesi ile iyileştirilmesi araştırılmıştır. Tez çalışmaları için Yalova bölgesinden getirilen killi numuneler üzerinde laboratuvarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan katkı malzemesi ise Portland çimentosudur. Bu malzeme Nuh Çimento fabrikasından tahsil edilmiştir.

Su muhtevalarını bulmak için kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Ardından o değerler ile maksimum mukavemet değerleri için numuneler hazırlanmıştır. Numuneler anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük şekilde bekletildikten sonra serbest basınç mukavemet değerlerine bakılmıştır.

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Deneysel çalışmalarda, Nuh Çimento fabrikasından tahsil edilen CEM 1 42,5 R Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Genellikle yüksek dayanım gerektiren yapılarda, soğuk havada dökülen betonlarda, tünel uygulamalarında ve temel beton uygulamalarında kullanılır. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3.15'tir. Ayrıca özgül yüzey alanı ise $418\text{cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenmektedir. Portland çimentosunun kimyasal özelliklerine bakıldığında kızdırma oranı %2,87, çözünmeyen kalıntı ise maksimum %5 olarak verilmiştir. Kimyasal bileşenlerden SO_3 bileşenin oranı %2,81 ve MgO bileşenin oranı ise %2,05 verilmiştir.

3.1.2. Zemin

Gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan zemin, Yalova ili bölgesinden getirilmiştir. Deneyler Kocaeli Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Zemin, bölgeden çuvallar içerisinde getirilmiştir. Deneylerde kullanılacak dane boyutları için öncelikle en az 24 saat kalacak şekilde fırında 108°C 'de kurumaya bekletilmiştir. Zemin kurduktan sonra kırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Zemin, 40

nolu elekten geçecek şekilde ufalanmıştır. Hidrometre ve elek analizi hariç tüm deneyler için 40 numaralı elekten geçen zemin kullanılmıştır. Zemin Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan zemin

Gerekli ufalama işlemi yapıldıktan sonra Yalova’dan getirilen kilin geoteknik özelliklerini belirlemek için başta kıvam limitleri olmak üzere temel deneyler yapılmıştır. Tablo 3.1’de kilin geoteknik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan kilin geoteknik özellikleri

Zemin sınıflandırma	
USCS	CH
AASHTO	A-7-6
Atterberg limit değerleri	
LL(%)	85,6
PL(%)	23,05
PI(%)	62,55
Elek analizi	
Kum (%) (4,76mm-0,074mm)	8,53
Kil ve Silt (%) (<0,074mm)	91,37
Özgül ağırlık	2,706
Standart proktor	
K.B.H.A(kN/m ³)	15,18
Doğal su muhtevası(%)	19,12

3.2. Deneyler

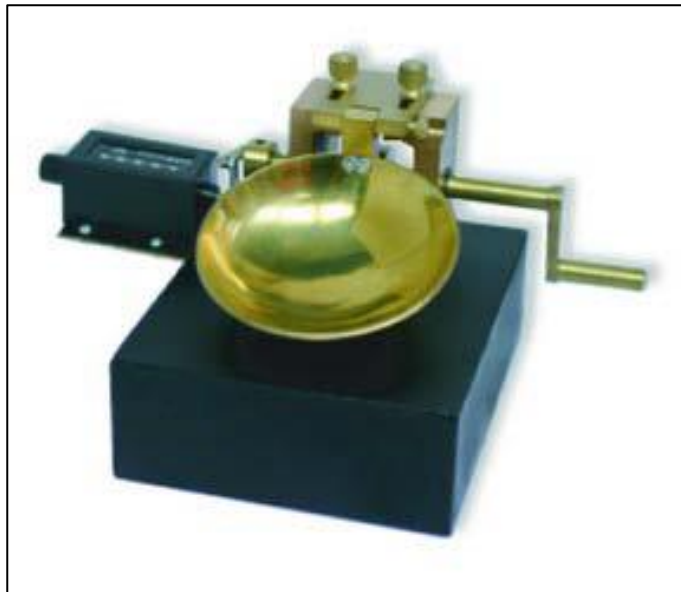
3.1.3. Zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi

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

3.1.4. Atterbeg kıvam limitleri

Likit limit, akıcı durumdaki zeminin plastik duruma geldiği su muhtevalarına denir. Plastik limit, zeminin ıslak yüzeyindeki çatlak durumundaki su içeriğidir. Kıvam limitlerini belirlemek için iki yöntem vardır. Bunlardan Casagrande yöntemini kullanarak plastik limit, likit limit ve plastisite indisi değerleri belirlenmiştir. Likit limitte amaç, 25 vuruşa tekabül eden su muhtevalarındaki likit limit değerini belirlemektir. İlk olarak saf kilin daha sonra çimento katkılıların kıvam limitleri belirlenmiştir. Şekil 3.2'de likit limiti belirlemede kullanılan Casagrande aleti gösterilmiştir. Şekil 3.3'te ise plastik limitin deney aletleri gösterilmiştir.

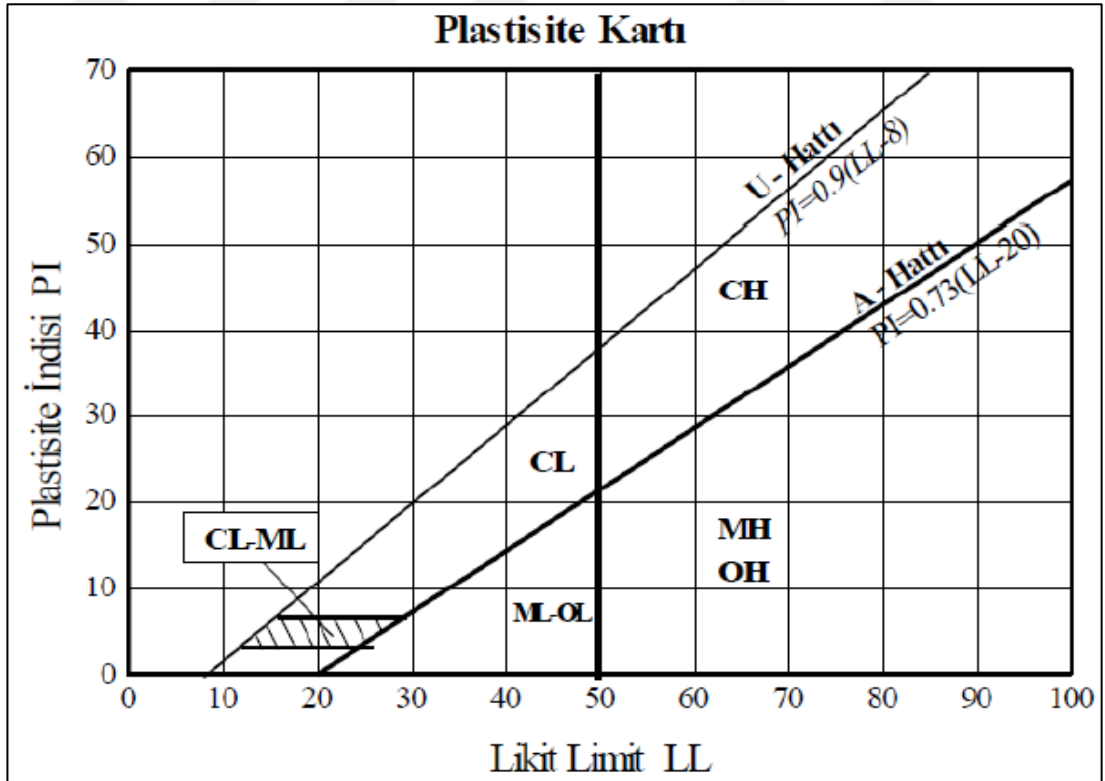


Şekil 3.2. Casagrande aleti [10]



Şekil 3.3. Plastik limit aletleri [10]

Deneysel sonuçlarda likit limit ile plastik limitin farkında plastisite indisi değeri bulunmuştur. Elde edilen likit limit ve plastisite indisi değerleri ile Atterberg grafiğine bakılarak zemin sınıfı belirlenmiştir. Grafik Şekil 3.4'te gösterilmiştir.




Şekil 3.4. UCSC sınıflandırma sistemi

3.1.5. Yıkamalı elek analizi

Elek analizi zeminlerin sınıflandırılmasında yapılan deneyler içerisinde en önemlisidir. Çünkü TS1500'e göre granülometre dağılımı zemin sınıflandırmada ana etkenlerden birisidir. Deneyin amacı, zeminin tane büyüklüğünü belirleyerek ağırlıkça yüzdelerini bulmaktır.

İnce daneli zeminlerde hidrometre deneyi yapılmaktadır. Hidrometre deneyi sonrasında numune 5/16" no'lu elekten 200 no'lu eleğe kadar sıralanmış eleklerden geçirildi. Yıkamalı elek analizinde kullanılan elek düzeneği Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



U.S. Standard Sieve No.	Sieve Opening (mm)
3	6.35
4	4.75
6	3.35
8	2.38
10	2.00
12	1.68
16	1.20
20	0.85
30	0.60
40	0.425
50	0.30
60	0.25
70	0.21
100	0.15
140	0.106
200	0.075

Şekil 3.5. Elek düzeneği ve elek açıklıkları(mm)

3.1.6. Hidrometre deneyi

Bu deneyde zemin 200 numaralı elekten geçecek şekilde ufalanmıştır. 200 nolu elekten geçen ince daneli zeminlerin (siltler ve killeri) dane çaplarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Bu deney çalışmasında, belli bir ağırlıktaki zemin numunesi mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılarak suda bir süspansiyon haline getirilir. İyiye karıştırılan süspansiyon çökmeye bırakılarak değişik zaman aralıkları ile yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilir. Bu sayede zemin içerisindeki danelerin çap dağılımları belirlenmiştir. İnce daneli zeminleri tanımlama ve sınıflandırmada, dane çapı

dağılımının saptanmasında kullanılır. Hidrometre deneyinde kullanılan aletler Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Hidrometre deneyi aletleri

3.1.7. Piknometre deneyi

Piknometre deneyinde amaç, ince daneli zeminlerin özgül ağırlıklarını bulmaktır. Bu deneyde de 40 numaralı elekten geçen zemin numunesinden piknometre şişesine göre belli bir miktarda alınır. İnce daneli zeminlerin özgül ağırlığını bulmak için genelde 250 ml ve 500 ml'lik şişeler kullanılmaktadır. Bu şişe Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Piknometre(hacim şişesi)

3.1.8. Kompaksiyon deneyi

Doğal haldeki zeminin 40 numaralı elekten geçirilerek yapıldığı bir deneydir. Bu deneyde amaç, en iyi sıkıştırma işleminin hangi su muhtevasında yapılabileceğini incelemektir. Ayrıca kilin ve çimento katkılı zeminlerin optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını tayin etmek için kompaksiyon deneyi yapılmaktadır.

Saf zeminin deneylerinde normal proktor aleti kullanılmıştır ama çimento katkılı zeminlerin deneyleri minyatür proktor aleti ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca minyatür proktor aleti ile serbest basınç numuneleri de hazırlanmıştır. Minyatür proktor aleti ve normal proktor aleti Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Proktor deneyi aletleri

Normal proktor deneyi ile minyatür proktor deneyinde kullanılan su miktarları farklılık göstermektedir. Minyatür proktor deneyinde su miktarı maksimum 30 ml alınırken standart proktor deneyinde bu miktar 750 ml'ye kadar çıkabilmektedir.

3.1.9. Serbest basınç deneyi

Kompaksiyon deneyi sonucunda bulunan optimum su muhtevaları ile numuneler hazırlanmaktadır. Deneyin amacı, herhangi bir arazide yüklemeye maruz kalan zeminlerin gerilmeler karşı gösterdiği deformasyonları belirlemektir. Numuneler

öncelikle laboratuvar ortamında deneye tabi tutulur. Serbest basınç aleti ile maksimum serbest basınç mukavemet değerleri bulunur.

Deneyde numuneler aksenal kuvvete maruz kalırlar ve boy kısalması gerçekleşir. Yükün artışı altında deformasyonlar ölçülür. Son olarak gerilme-şekil değiştirme grafiği elde edilir. Numunenin göçmesine neden olan en büyük gerilme değeri zeminin serbest basınç mukavemet değeri olarak kabul edilir. Numunelerin deneye tabi tutulduğu alet Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Serbest basınç aleti

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Laboratuvar deneylerinde Yalova ilinin bir bölgesinden getirilen mavimsi renge sahip kil üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Killer sorunlu zeminler olması nedeniyle bu çalışmada kilin yüksek çimento oranı ile iyileştirilmesi irdelenmiştir. Bu çalışma sonunda yüksek oranda kullanılan çimentonun kilin mukavemetine ve su muhtevsındaki değişimlerine olan etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda ilk olarak killi zeminin özellikleri bulunmuş ve mukavemet değerlerine bakılmıştır. Daha sonra çimento katkılı zeminin mukavemet değerleri bulunup kıyaslama yapılmıştır. Deneylerde birincisi, zeminin su muhtevsını bulmak olmuştur. Ardından yıkamalı elek analizi ve kıvam limit değerleri bulunup zeminin sınıfı belirlenmiştir. Daha sonra uygun çimento oranı için ph deneyi yapılmış ve özgül ağırlığını belirlemek için de piknometre deneyi yapılmıştır. Daha sonra zeminin ve katkılı zeminin optimum su muhtevaları proktor deneyi ile bulunup serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

4.1. Doğal Su Muhtevası Tayini

Yalova bölgesinden çuvallarda getirilen kil numunesinin, 5 farklı noktasından alınan zemin su kaybı olmadan tartılıp hemen etüve atılmıştır. 24 saat beklettikten sonra numuneler çıkarılıp tekrardan tartılmıştır. Her bir numunenin doğal su muhtevaları bulunup ortalaması alınmıştır. Sonuç olarak mavimsi kilin doğal su muhtevası yaklaşık %31,08 çıkmıştır. Alınan 5 farklı numunenin ortalaması Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Yalova kilinin doğal su muhtevası

Numune No	1	2	3	4	5
Su Muhtevası (%)	30,27	31,2	30,85	31,72	31,36

4.2. Piknometre Deneyi

Piknometre deneyi ince daneli zeminlerin özgül ağırlığını bulmak için yapılır. Bu deney TS 1900-1 standartlarına göre yapılmıştır. Zemin numunesinden en az 10 gr kullanılmalıdır. Daha önce etüvde kurutulan malzeme deney için 40 numaralı elekten geçen malzeme haline getirilmiştir ve numuneden 50 gr kullanılmıştır. İnce daneli zeminler için uygun bir ağırlık olduğu görülmüştür.

Deneye başlarken öncelikle hacim şişesi yaklaşık 1 saat etüvde 108°C'de kurutulmuştur. Hacim şişesi ve hacim şişesi ile birlikte zemin tartılmıştır. Daha sonra zemini örtecek şekilde havası alınmış damıtık su eklenmiştir. Zemin ile suyun homojen karışımı sağlanmıştır. Hacim şişesi vakum desikatörüne konulup zemin içerisinde hava alınmıştır. Bu işlem yapılırken malzeme kaybı olmamasına özen gösterilmiştir. Havası tamamen alınan numuneye işaret çizgisine kadar su ile doldurulmuştur. Gözle görülecek kadar su çıkışı beklenir ve sonrasında tartılır. Deneyin yapılışı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Piknometre deneyi için numune hazırlanışı

Özgül ağırlığını bulmak için 5 deney yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçlarının tamamı Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Zeminin özgül ağırlığı 2,65-2,75 arası olması beklenmektedir. Tablodaki sonuçlara bakıldığında killi zeminin özgül ağırlığı 2,706 olarak tayin edilmiştir.

Tablo 4.2. 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
ometre + Su ağırlığı (D)	gr	342,03	342,03	342,03	342,03	342,03
Numune ağırlığı	gr	50	50	50	50	50
Hesaplamalar	Özgül Ağırlık= (B-A)/ [(D-A)-(C-B)]x ρ					
Özgül Ağırlık		2,702	2,706	2,708	2,710	2,703
Özgül Ağırlık Aritmetik Ortalama				2,706		

4.3. Hidrometre Deneyi

Kil ve silt gibi ince daneli zeminlerin dane dağılımını bulmak için yapılmış bir deneydir. Bu deneyde diğer deneylerden farklı olarak 200 numaralı elekten elenen zemin numunesi kullanılmıştır. Elekten geçirmeden önce zemin kurutulur ve yapısı bozulmayacak derecede kırılır. Hidrometre deneyi için çözücü malzemeler Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Hidrometre deneyi için çözücü malzemeler

Deney ince daneli zeminler için uygulandığından 50 gr numuneden alınmıştır. Bu numunenin üzerine belirli oranda hidrojen peroksit dökülüp yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hidrojen peroksitle yakıldıktan sonra 24 saat boyunca etüvde bırakılmıştır. 1 litreye 40 gr sodyum hidroksit gelecek şekilde çözelti hazırlanmıştır. 125 ml’lik çözelti hazırlanıp bir gün bekletilen numune ile birlikte hidrometre kabına konulmuştur. Karışımın tamamen homojen olması sağlandıktan sonra hidrometre kabının değeri 1 litreyi gösterecek şekilde su ilavesi yapılmıştır.

Sonra hidrometre kabının ağzı elle kapatılıp iyice çalkalanır ve çalkalama durulduktan sonra 0,25 0,5 1 2 dakika şeklinde 48 saate kadar aralıklarla hidrometre okumaları yapılmıştır. 8 dakikadan sonra her ölçümün ardından alet damıtık suyla yıkanmıştır. Oda sıcaklığının 2°C'den fazla değişmemesi deneyin daha güvenilir olduğunu göstermektedir. Deneydeki oda sıcaklığına bakıldığında 22°C ile 23,5°C arasında değişmiştir. Bu değişim deney için olumlu olduğu görülmüştür. Hidrometre aletinde yapılan okumalar Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Hidrometre okuma sonuçları

Süre (dk)	Okuma	Sıcaklık	Sıcaklık düzeltmesi	Düzeltilmiş hidrometre okuması	k	Efektif derinlik	Eşdeğer çap	%P	%K
0,25	1,031	23,5	0,00069713	1,032197125	0,016224	7,778065	0,090492	99,34824	99,34824
0,5	1,03	23,5	0,00069713	1,031197125	0,016224	8,042745	0,065067	96,05825	96,05825
1	1,0296	23,4	0,00067536	1,03077536	0,016225	8,154378	0,046332	94,67065	94,67065
2	1,0293	23,3	0,00065371	1,030453705	0,016227	8,239513	0,032936	93,61241	93,61241
4	1,0289	23,3	0,00065371	1,030053705	0,016227	8,345385	0,023438	92,29641	92,29641
8	1,0282	23,1	0,00061073	1,029310725	0,01623	8,542037	0,016771	89,85202	89,85202
15	1,0271	23	0,0005894	1,0281894	0,016231	8,83883	0,01246	86,16287	86,16287
30	1,0252	22,8	0,00054708	1,02624708	0,016234	9,352923	0,009065	79,77266	79,77266
60	1,0236	22,5	0,00048443	1,024584425	0,016239	9,792994	0,006561	74,30254	74,30254
120	1,022	22,2	0,00042276	1,02292276	0,016244	10,2328	0,004743	68,83567	68,83567
240	1,0186	22	0,0003822	1,0194822	0,016247	11,14345	0,003501	57,51627	57,51627
2880	1,0149	22,1	0,00040243	1,015802425	0,016245	12,11741	0,001054	45,40984	45,40984
4320	1,0115	22,2	0,00042276	1,01242276	0,016244	13,01194	0,000891	34,29078	34,29078

4.4. Yıkamalı Elek Analizi

Bu deney zeminin dane çapı dağılımını belirlemek için yapılmıştır. Deneyde standartların belirlediği şekilde elekler kullanılmıştır. Killi zemin ilk olarak etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Daha sonra numune suyun içerisine bırakılmıştır ve 1 saat boyunca karıştırılmıştır.

Numune iyice su içerisinde ıslandıktan sonra 10 numaralı elekten (2 mm) geçirilmiştir ve üste kalanları tekrar suya koyup 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. Etüvde bekletilen zemin belli bir elek serisinden geçirilir ve elekte kalan ağırlıklar not edilir. Daha sonra elekten geçen ağırlığı da toplamdan kalanı çıkararak bulunur. Tablo 4.4'te elek analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.4'teki elek analizi sonuçlarına bakıldığında zeminin kil+silt oranı %91,37 olduğu görülmektedir. Bu yüzdelik zeminin ince daneli zemin olduğunu göstermektedir. Sınıflandırma sonunda zemin AASHTO sınıflandırmasına göre A-7-6 grubu killi zemin grubuna girmektedir.

Tablo 4.4. Elek analizi sonuçları

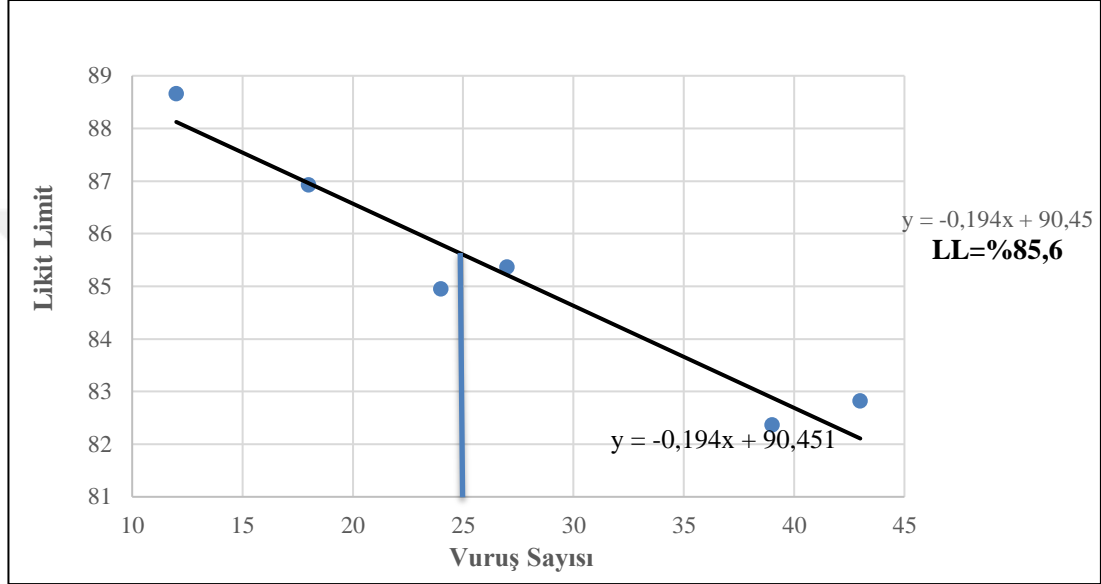
ELEK NO	ELEK AÇIKLIĞI	KALAN AĞIRLIK	GEÇEN AĞIRLIK	GEÇEN(%)
5/16"	8.000	0	48,21	100
No 4	4.760	0	48,21	100
No 10	2.000	0,02	48,19	99,96
No 18	1.000	0,36	47,83	99,21
No 40	0,425	0,54	47,29	98,09
No 120	0,250	0,78	46,51	96,47
No 200	0,125	1,02	45,49	94,36
PAN	0,074	1,44	44,05	91,37
PAN		44,05		

4.5. Atterberg Kıvam Limitleri

Etüvde kurutulan killi zemin çok sert darbe vurmamak şartıyla iyice ufalanır. Kırılan zemin 40 numaralı elekten elenir. Her bir likit limit deneyi için yaklaşık 120 gr kullanılmıştır. İlk önce çimento katkısı olmadan saf zeminin likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır.

Likit limit deneyi için 40 nolu elekten geçen numuneye dört aşamalı şekilde su katılır. Su katma işlemi en kurudan en yaşa doğru yapılmıştır. Her deneyden sonra su katılır. Krema kıvamına gelince homojen olacak şekilde güzelce karıştırılmıştır. Daha sonra Casagrande aletine konulmuş ve üzeri paralel olacak şekilde düzleştirilmiştir. 45 dereceli oluk açma bıçağı ile numune ortadan ikiye ayrılır. Artık Casagrande aleti saniyede 2 devir yapacak şekilde çevrilmiştir. Ortadan oluşturduğumuz yarığın yaklaşık 13 mm'ye geldiği zaman deney bitirilip vuruş sayısı not alınmıştır. Daha sonra numunenin birleşen kısmından örnek alınmış ve 1

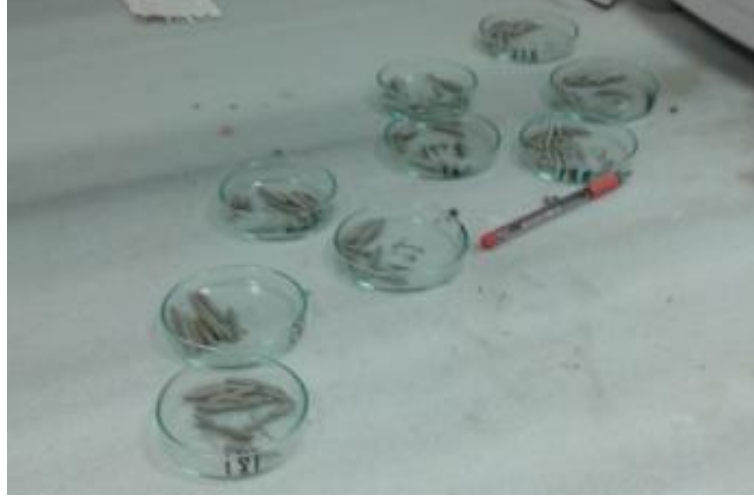
gün süre ile etüvde bekletilmiştir. Doğru bir likit limit değerini bulmak için çizilecek grafikte 25 vuruşa karşılık gelen değer alınmaktadır. Bunu elde etmek için de her deneyde 6 farklı vuruş değeri alacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu vuruşlar sayısı 10 ile 50 arasında olmasına dikkat edilmiştir. Katılan su miktarı da vuruş sayısına göre artırılmıştır. Daha sonra likit limiti belirleyen grafik çizilir. Bu grafiğin apsisi 25'i ordinatı ise likit limiti vermektedir. Bu grafik Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Likit limitin grafik gösterimi

Şekilde görüldüğü gibi doğal zeminin likit limit değeri %85,6 çıkmıştır. Ayrıca aynı deney çimento katkıları içinde gerçekleştirilmiştir. Çimento katkıları %8, %10, %12 olmak üzere üç deneyden oluşmuştur. Hem doğal zeminde hem de katılarda likit limit deneyi birkaç kere tekrarlanmıştır.

Plastik limit deneyi ise likit limit deneyi gibi 40 numaralı elekten elenen malzeme ile yapılmıştır. Fakat likit limit deneyi gibi fazla malzeme kullanılmamıştır. Zemine belirli miktarda su eklenerek cam tabakası üzerinde deney yapılmıştır. 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. Kaptaki numuneler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Plastik limit numuneleri

Likit limitte olduğu gibi plastik limit de tüm katkılılarda yapılmıştır. Doğal zeminin likit limit(w_L) değeri %85,6, plastik limiti(w_P) %23,05 çıkmıştır ve böylelikle plastisite indisi değeri de %62,55 çıkmıştır. Katkılılarla birlikte bu değerler Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Kıvam limiti değerleri

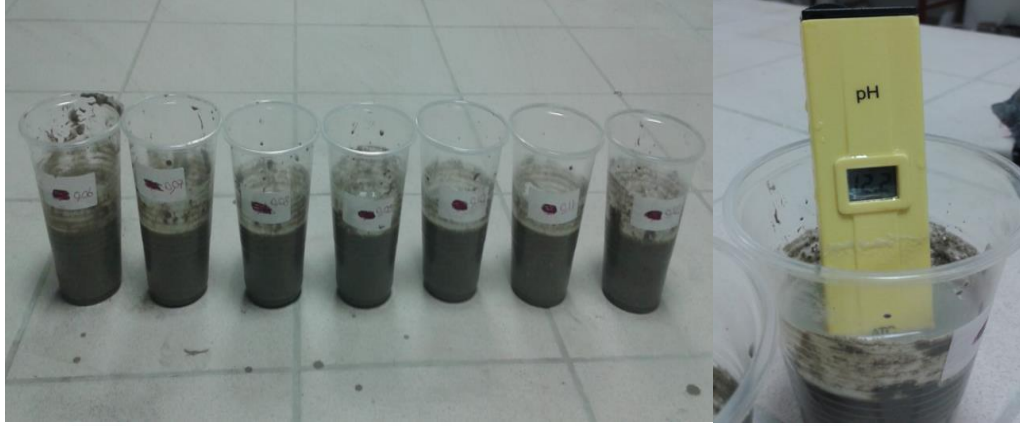
Çimento oranı(%)	LL(%)	PL(%)	PI(%)
0	85,6	23,05	62,55
%8	81,35	34,52	46,83
%10	84,1	31,6	52,5
%12	79,1	36,12	42,98

Doğal zemin ve katkılılarda Atterberg kıvam limiti değerlerine bakıldığında likit limit ve plastisite indisi değerlerinin azaldığı, plastik limit değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Çimento katkılılarda en yüksek likit limit ve plastisite indisi değeri, en düşük plastik limit değeri %10 oranında görülmüştür. Kıvam limitleri deneylerinde doğal zeminin değerlerine bakıldığı zaman zeminin yüksek plastisiteli bir kil olduğu belirlenmiştir. Yani CH grubu killerindedir.

4.6. Ph Deneyi

Kıvam limitlerinde bulunan optimum çimento oranı ph deneyi ile de bulunabilmektedir. Deneyin sonunda ph aletinde 12,4 değerini gösteren katkı numune optimum çimento oranı olarak belirlenmiştir. 40 numaralı elekten geçen

zeminden her bir numune için 10 gr alınmıştır. Deneyin numuneleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Ph deneyi için hazırlanan numuneler

Çimento katkısı ile %1 artırılarak hazırlanan numuneler pet şişelere konulmuştur ve gerekli su ilave edildikten sonra 1 saat boyunca bekletilmiştir. Bu süre içerisinde her 10 dakikada bir numuneler karıştırılmıştır ve sonunda ph aleti kaba konup değerler okunmuştur. Okunan değerlerin sonuçları Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Kıvam limiti değerleri

Çimento(%)	pH	C
6	12,1	20,3
7	12,2	20,6
8	12,3	20,4
9	12,3	20,4
10	12,4	20,6
11	12,5	20,7
12	12,5	20,5
13	12,6	20,8

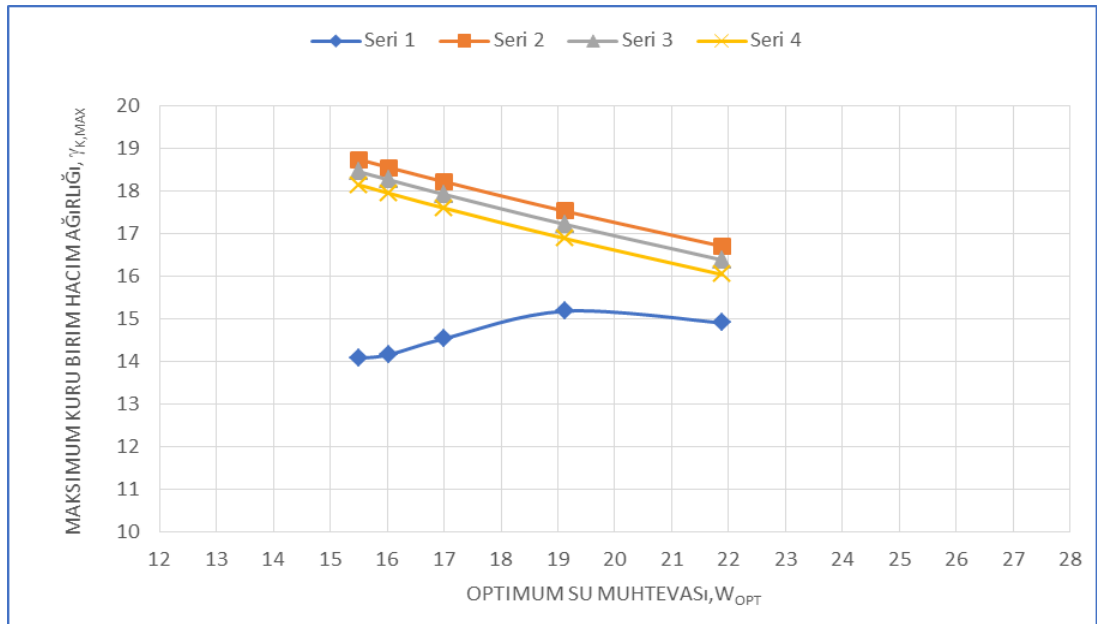
Ph deneyi sonucunda 12,4 değeri %10 oranındaki çimento katkılı pet şişesindeki numunede okunmuştur. Bu deney sonucunun Atterberg kıvam limiti değerleri sonuçları ile örtüşmektedir.

4.7. Kompaksiyon Deneyi

Proktor deneyi de olarak bilinen kompaksiyon deneyi en iyi sıkışmanın hangi su muhtevasında yapıldığını belirlemek için yapılır. İlk olarak doğal zeminin su muhtevasını bulmak için standart proktor deneyi yapılmıştır. Deney için 40 numaralı elekten geçen zeminden her bir numune için yaklaşık 3 kg alınmıştır. Toplamda 5 deney yapılmıştır. Numuneler ve yapılışı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Sıkıştırma kapları tahmini 2 ile 3 kg arası almaktadır. Bu yüzden her bir numune için 3 kg alınmıştır. Numunelere sırasıyla 350, 425, 500, 575, 650 ml’ lik su ilavesi olmuştur. Su ilavesi yapılan numuneler iyice karıştırılmıştır. Daha sonra sıkıştırma kabına 3 adımda olacak şekilde konup 2,5 kg’lık tokmakla her seferinde 25 vuruş yaparak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıplar bu şekilde hazırlanır. Kalıbın iç hacmini bulabilmek için, iç çapı ve yüksekliği ölçülür. Sıkıştırma işlemleri yapılırken her seferinde tokmağın ucu silinir. Çünkü kalıplardaki su muhtevaları farklı olduğu için tokmak temiz tutulmalıdır.

Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra Şekil 4.6’daki gibi grafik çizimi gerçekleştirilmiştir. Killi zeminin optimum su muhtevası %19,12 maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 15,18 kN/m³ gelmiştir. Diğer hesaplamalar ekler kısmında mevcuttur.



Şekil 4.6. Killi zeminin optimum su muhtevası ve mak. kuru birim hacim ağırlığı

Tüm numuneler 3 aşamalı sıkıştırma işlemi sonrasında kalıp ile birlikte tartılmıştır. Daha sonra numuneler kalıptan çıkarılmış ve farklı iki noktadan numuneler alınıp etüvde 24 saat beklemeye alınmıştır.



Şekil 4.7. Standart proktor deneyin yapılışı

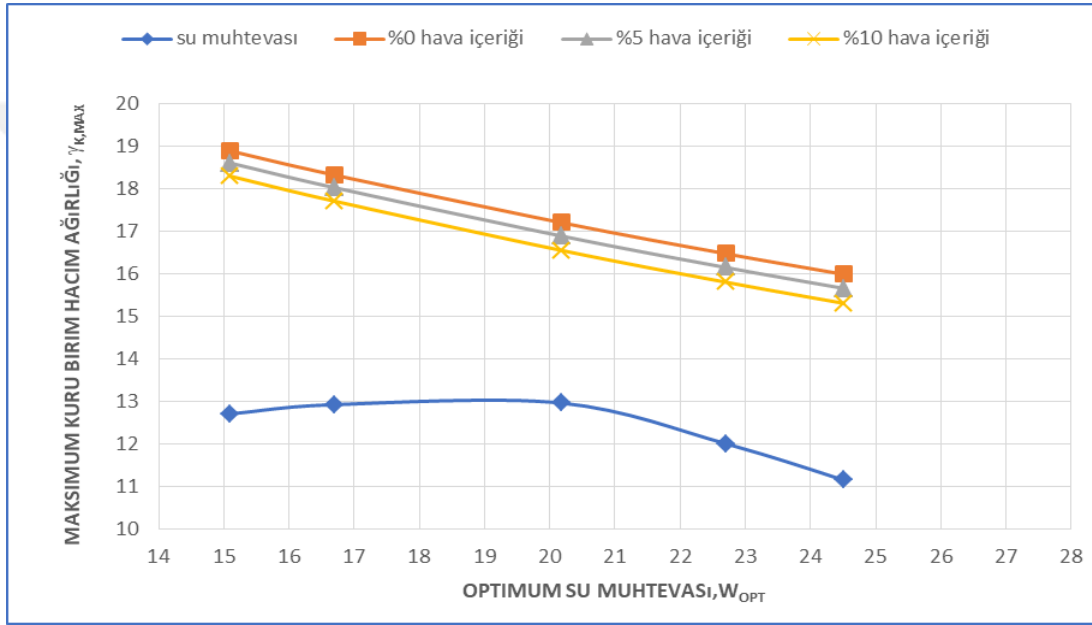
Killi zeminin su muhtevası bulunduğundan sonra çimento katkılı zeminin su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları için deneyler yapılmıştır. Çimento katkıları için minyatür proktor aleti kullanılmıştır. Alettaki numune hazırlanışı ve kalıbından çıkarılması Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Minyatür proktor aleti ile numune hazırlanışı

Katkılılarda %8, %10, %12 için numuneler hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanmadan önce kabın iç hacmi belirlenmiştir. Her bir numune için yaklaşık 110 gr zeminden alınmıştır. Katkı yüzdesi oranında çimento katıldıktan sonra 5 farklı su oranlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu oranlar %3 kadar artırılacak şekilde %11, %14, %17,

%20, %23 olarak alınmıştır. Numune hazırlandıktan sonra normal proktor aletindeki gibi 3 adımda sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıba koyulan numune tekrar tokmakla ilk 4 vuruşu dört köşeye vuracak şekilde ayarlanarak 25 vuruş yapılmıştır. Daha sonra numune kalıpla birlikte tartılmıştır ve yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi kalıptan çıkarılmıştır. Numunenin orta kısımlarında temsili olarak bir miktar alınıp kaba konduktan sonra etüve atılmıştır. 24 saat sonra çıkarılan numuneler tartılmış ve gerekli bilgiler deney föyüne işlenmiştir. Örnek olarak %8 çimento katkıli killi zeminin optimum su muhtevası Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



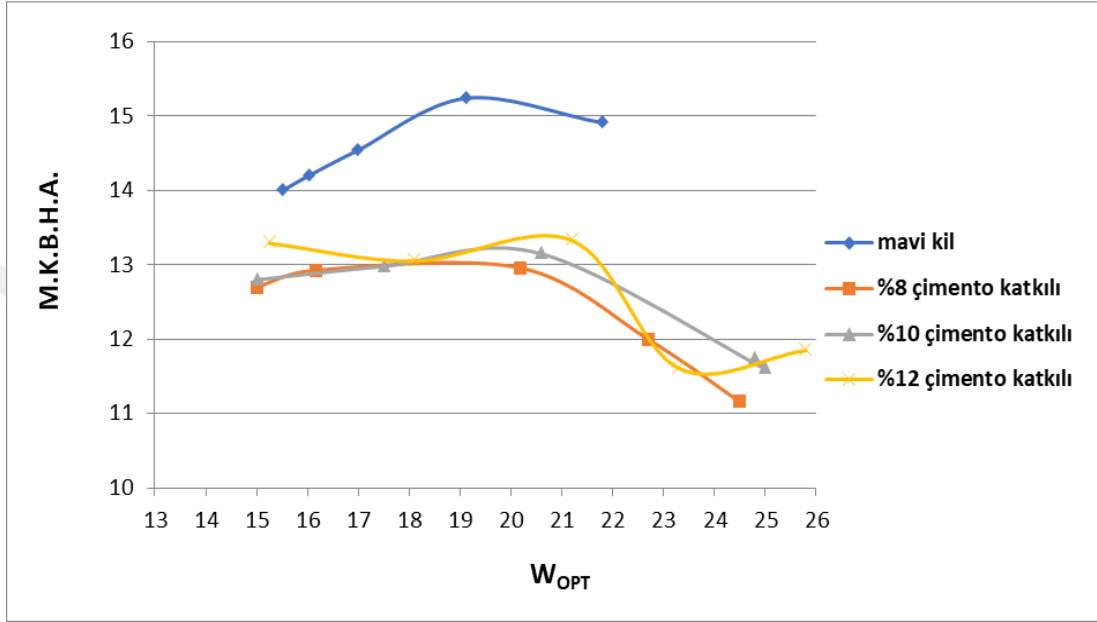
Şekil 4.9. %8 çimento katkıli kilin optimum su muhtevası

Diğer çimento katkıli killerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının grafikleri eklerde mevcuttur. Çimento katkılarıyla birlikte tüm değerler Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Katkısız ve katkıların kompaksiyon deney sonuçları

	Optimum su muhtevası (%)	Maks. K.B.H.A. (kN/m^3)
Saf Kil	19,12	15,18
%8 çimento	20,18	12,96
%10 çimento	20,63	13,15
%12 çimento	21,20	13,33

Sonuçlara bakıldığında çimento katkılılarda katkısız göre optimum su muhtevası artmışken maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında azalma gerçekleşmiştir. Bu deneyler sonucundaki su muhtevalarına bakılarak serbest basınç deneyi için numuneler hazırlanmıştır. Bütün değerler için oluşturulan grafik Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Kompaksiyon deneylerin grafik hali

4.8. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyinde amaç optimum su muhtevalarındaki numunelerin kırılmadan önceki maksimum mukavemetlerini yani zeminin dayanımını bulmaktır. Deney numunelerini hazırlamaktaki amaç ise zemin yapısında ve su muhtevalarında bir değişiklik olmadan yüksekliği çapının iki katı olan uçları düz silindirik bir numune elde etmektir.

Numune hazırlanışı, her numunenin optimum su muhtevalarına göre yapılmaktadır. Bu deneysel çalışmada su muhtevaları katkılı numuneler için optimum su muhtevalarında yapılmıştır. Katkısızda da optimum su muhtevaları değerine bakılarak su katılmıştır. Doğal zemin(katkısız) için sadece anlık ve 1 günlük deneyler yapılmıştır. Çimento katkılılarda ise anlık, 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük deneyler yapılmıştır. Her bir deney için 3 tane numune hazırlanmıştır. Deney sayısı ile bilgi Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8. Serbest basınç deneyi için numune bilgileri

Kullanılan malzeme	W(%)	Deney sayısı			
		Anlık	1 günlük	7 günlük	28 günlük
Doğal	19,12	3	3	-	-
%8 çimento katkı	20,18	3	3	3	3
%10 çimento katkı	20,63	3	3	3	3
%12 çimento katkı	21,20	3	3	3	3

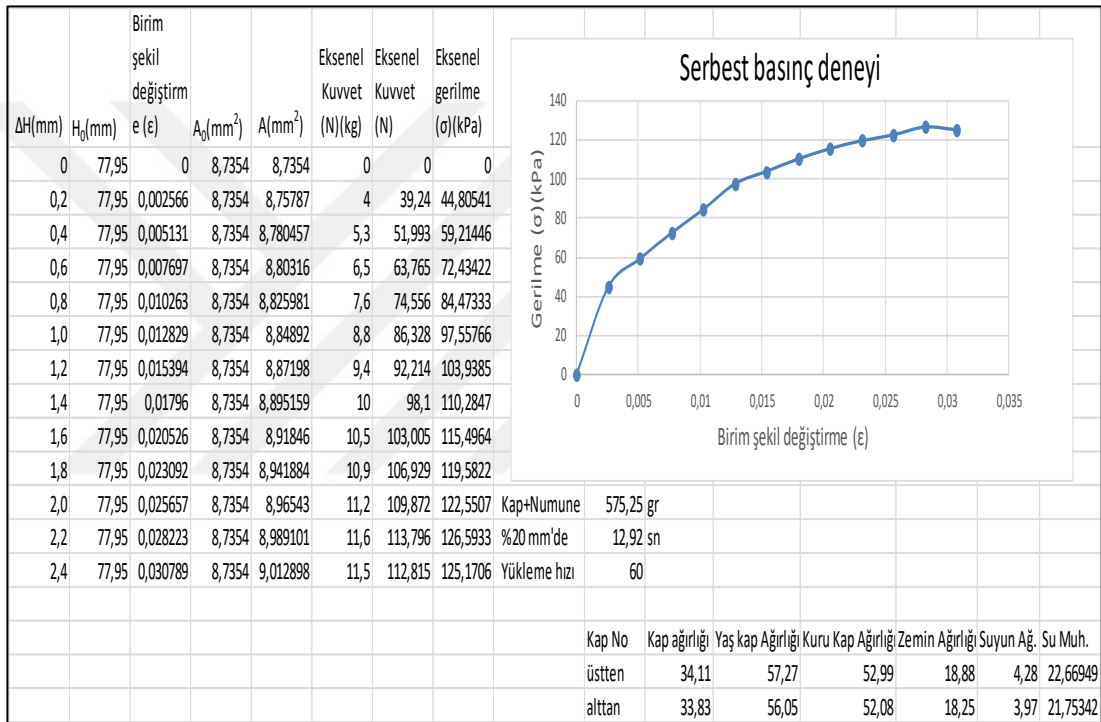
Numuneler kompaksiyon deneyinde olduğu gibi minyatür kompaksiyon aleti ile yapılmıştır. İlk olarak doğal zeminde anlık ve 1 günlük serbest basınç deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Kompaksiyon deneyinde bulunan su muhtevası ile yaklaşık 330 gr kullanılmıştır. Belirlenen su miktarı 40 numaralı elekten geçen zemine ilave edildikten sonra topaklanma olmaması için iyice karıştırılır. Karıştırma işleminden sonra kompaksiyon aletinde 3 tabaka olacak şekilde kalıp hazırlanmıştır. Bu kalıplardan anlık katkısız için 3 tane hazırlanmıştır. Numuneler kalıpla birlikte tartılmıştır ve sonrasında numune kalıptan çıkarılmıştır. Kalıp bir dahaki numune hazırlığı için iyice temizlenir. Numuneler hazırlandıktan sonra serbest basınç deneyine başlanmıştır. Deneyin yapılışı Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Serbest basınç deneyi

Anlık deneyler için numune serbest basınç aletine dikkatlice yerleştirilir. Su muhtevasında değişiklik olmaması için tamamen kapatılır. Deney hızı ve

deformasyon aleti de ayarlandıktan sonra deney başlatılır. Deney başladıktan sonra her 20 mm deformasyonda yüklenen kuvvet 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 bırakılmıştır. Deneyde alınan veriler grafiğe işlenmiştir. Her bir numune için bu işlemler en baştan itibaren tekrarlanmıştır. Anlık serbest basınç deneyi yapılan bir numunenin sonuçların grafik hali Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Killi zeminin anlık serbest basınç deneyi sonuçları

Anlık serbest basınç deneylerinin diğer numunelerin sonuçları ve grafikleri ekler kısmında mevcuttur. Katkısız 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 kapta 1 gün bekletilmiştir. Su muhtevasında kayıp olmaması için bu işlem yapılmıştır. 1 günlük deneylerin serbest basınç grafikleri eklerde mevcuttur. Her bir deneyin maksimum

mukavemet değerleri ve bunların sonucunda ortalama serbest basınç mukavemet değeri Tablo 4.9’da gösterilmiştir.

Tablo 4.9. Doğal zeminin 1 günlük serbest basınç mukavemet değerleri

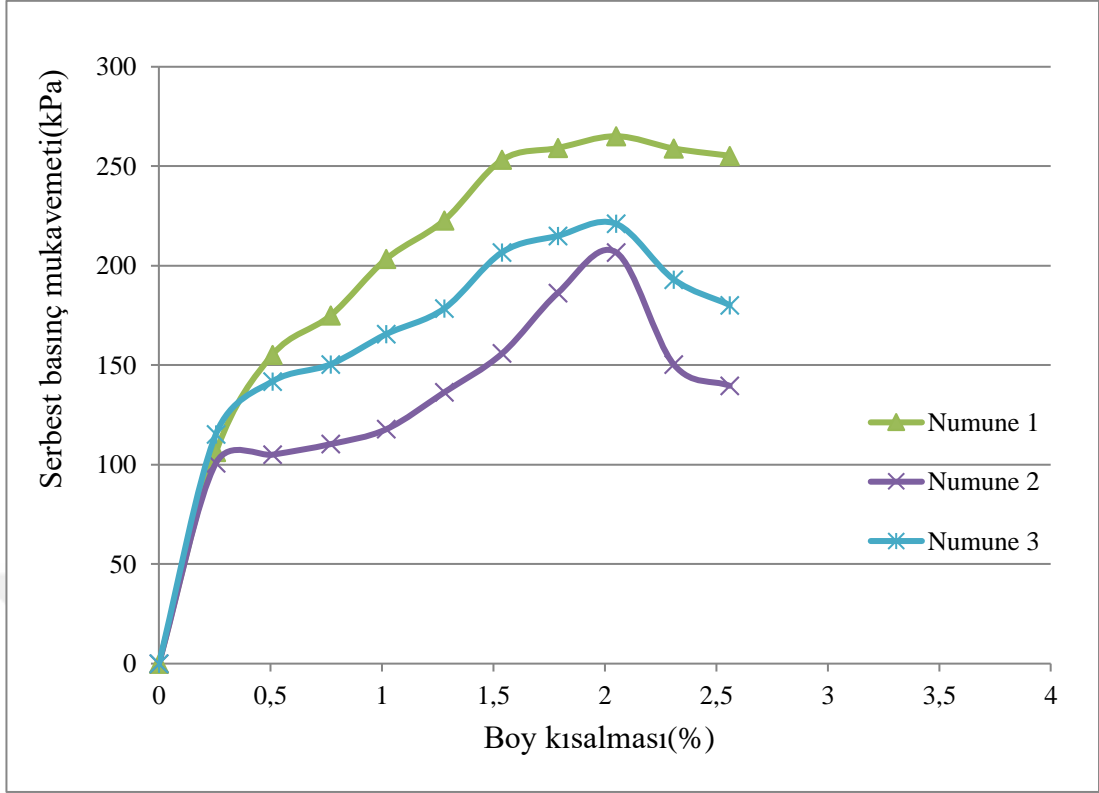
Numune no	1	2	3	Ortalama
Serbest basınç değeri(kPa)	180,20	198,13	203,54	193,96



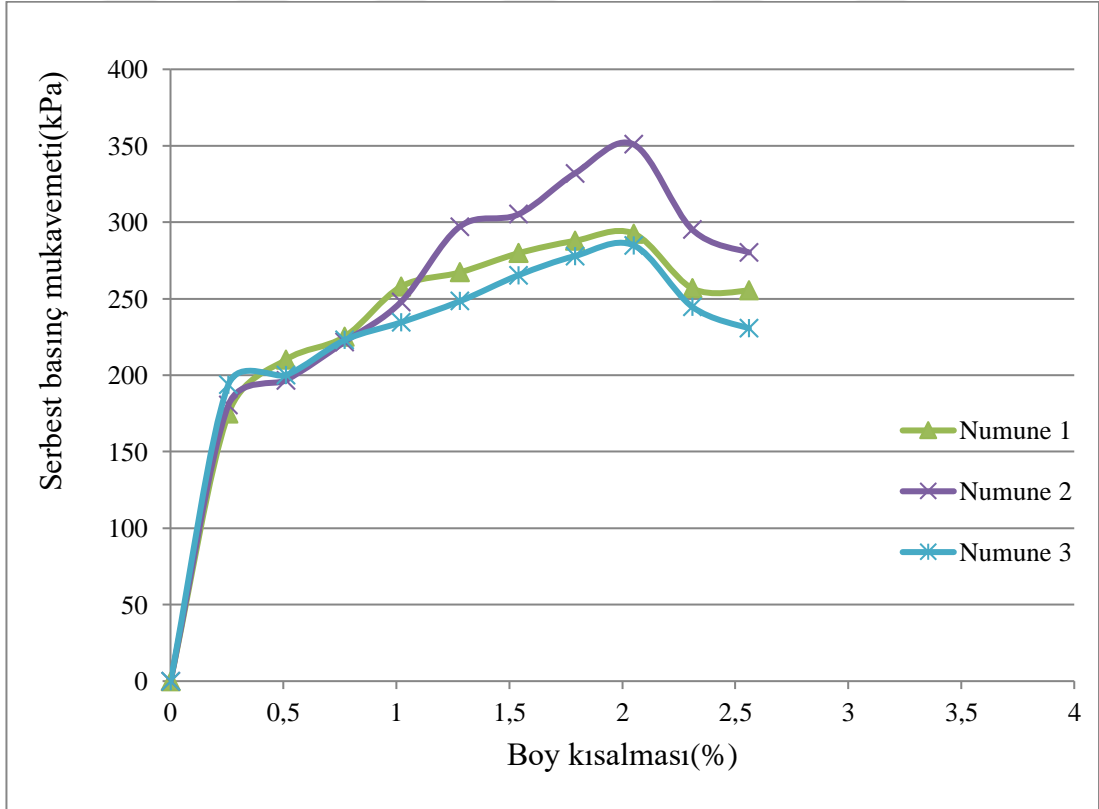
şekil 4.13. Numunelerin alüminyum folyoyla sarılması

4.8.1. %8 imento katkılı zeminin serbest basınç grafiği

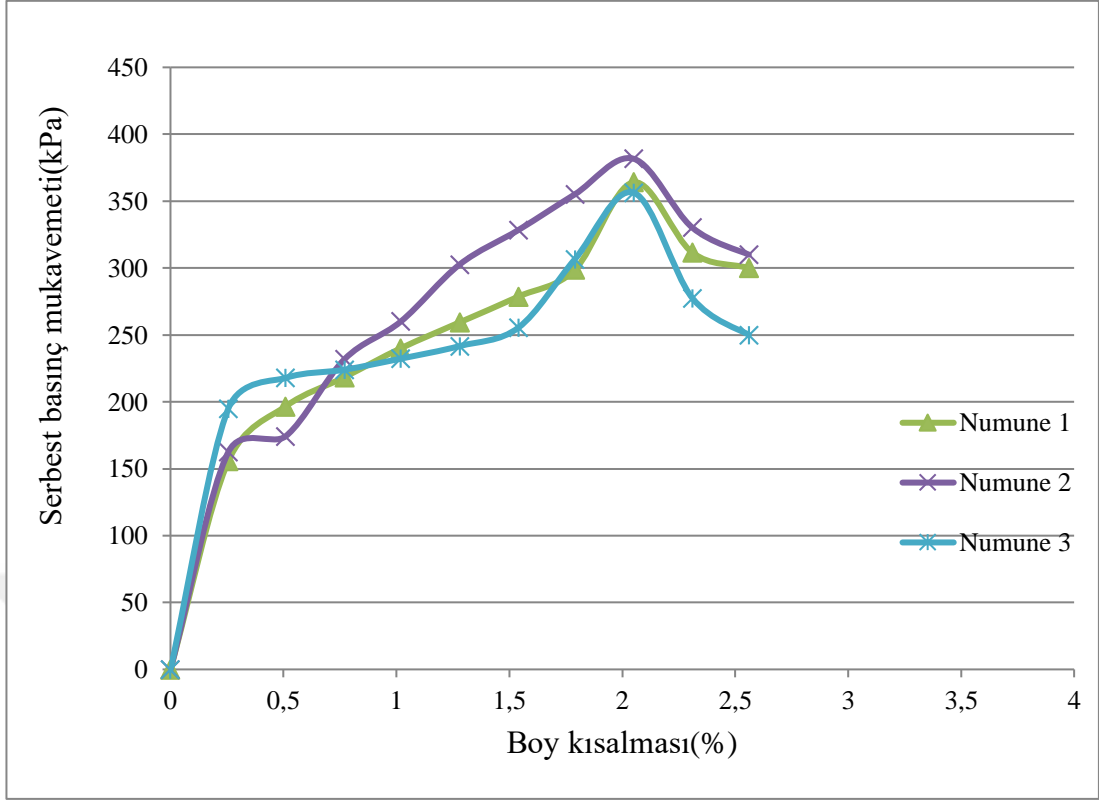
Çimento katkılı zeminlerin deneylerinde 40 numaralı elekten geçen malzemeden her deney için 330 gr alınmıştır. Alınan malzemeye %20,18 oranında su ve % 8 oranında imento katkısı ilave edilerek iyice karıştırılmıştır. Katkısızlarda olduğu şekilde numuneler hazırlanmış ve deney gerçekleştirilmiştir. şekil 4.14’de anlık, şekil 4.15’de 1 günlük, şekil 4.16’da 7 günlük, şekil 4.17’de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kr sürelerinde değerlerin ortalaması da şekil 4.18’de gösterilmiştir.



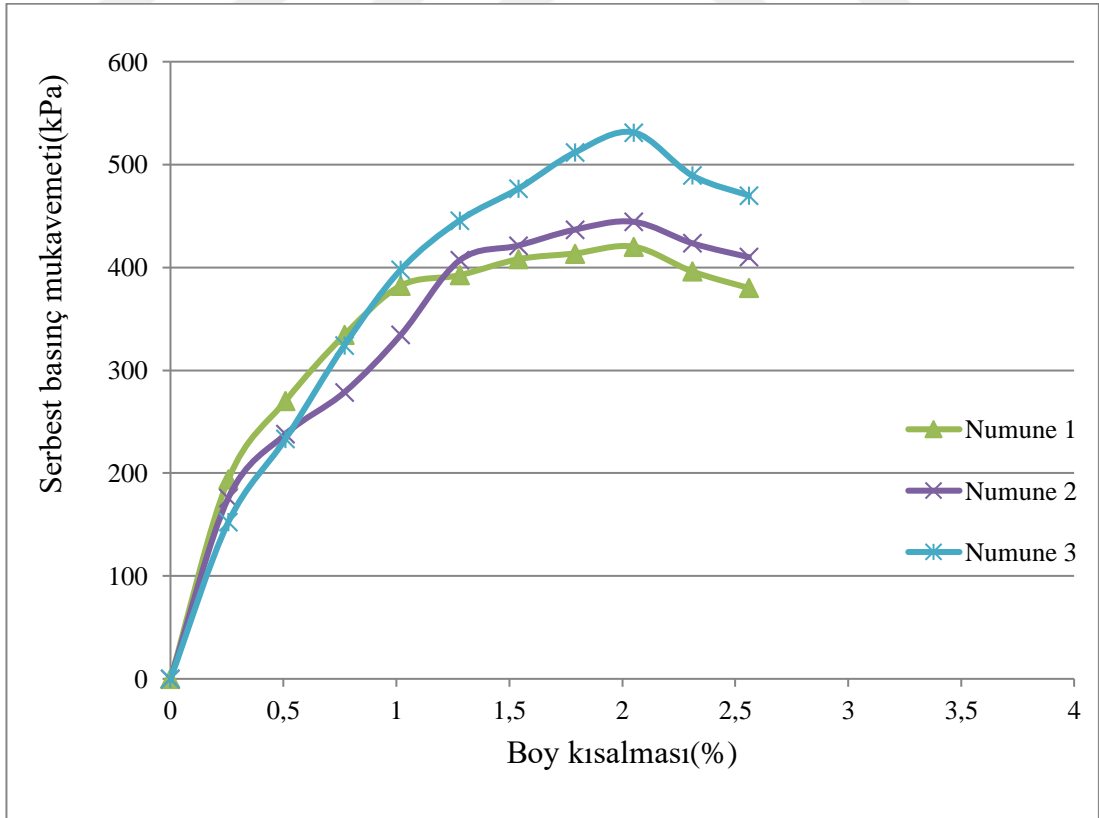
Şekil 4.14. %8 çimento katkılı malzemenin anlık serbest basınç grafiği



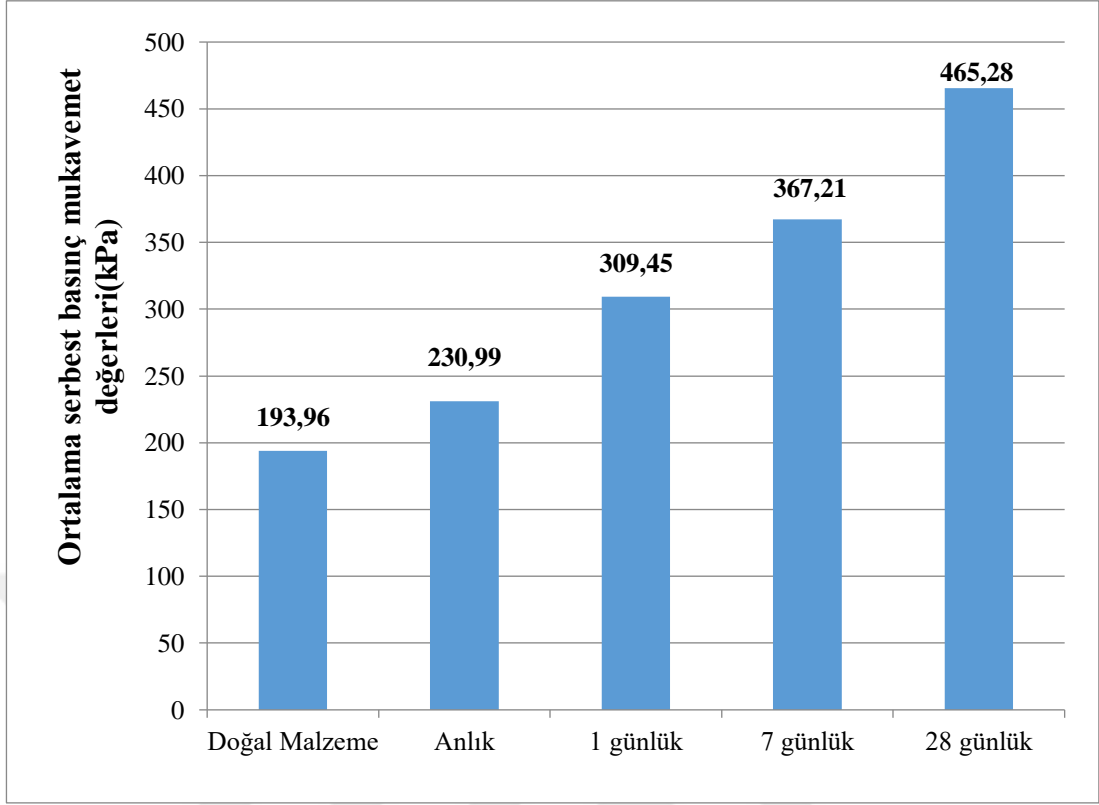
Şekil 4.15. %8 çimento katkılı malzemenin 1 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 4.16. %8 çimento katkılı malzemenin 7 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 4.17. %8 çimento katkılı malzemenin 28 günlük serbest basınç grafiği

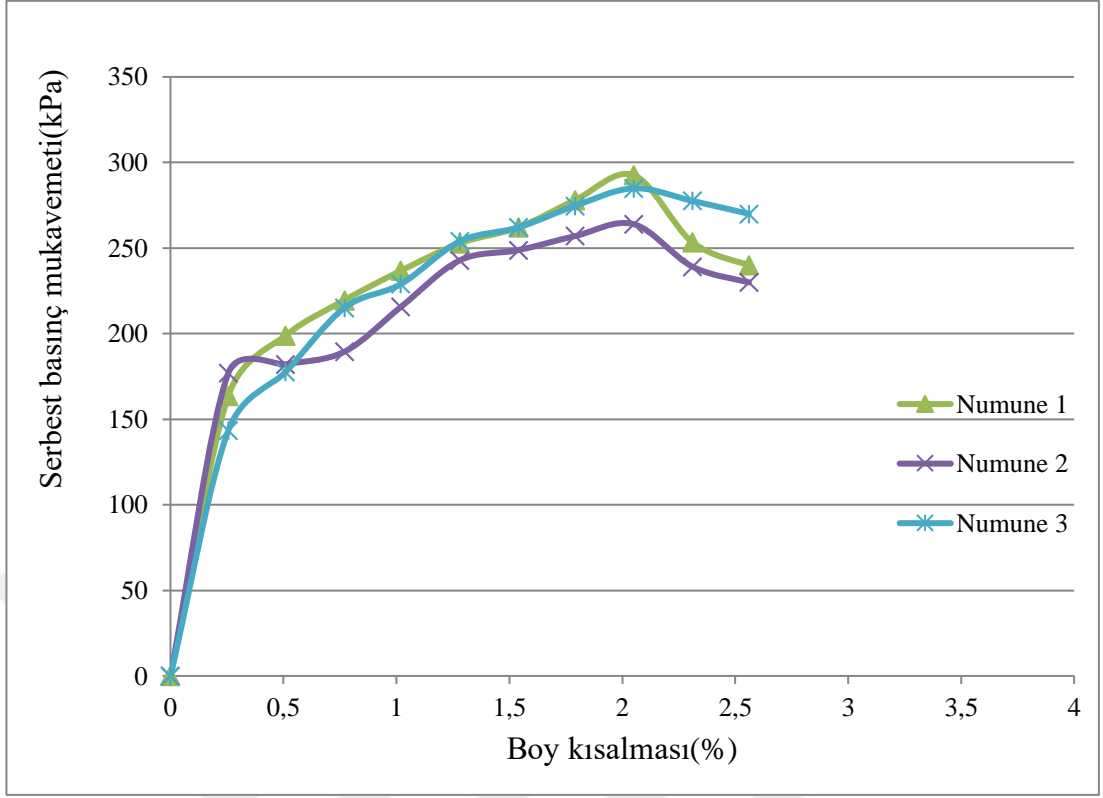


Şekil 4.18. %8 çimentolu zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerleri

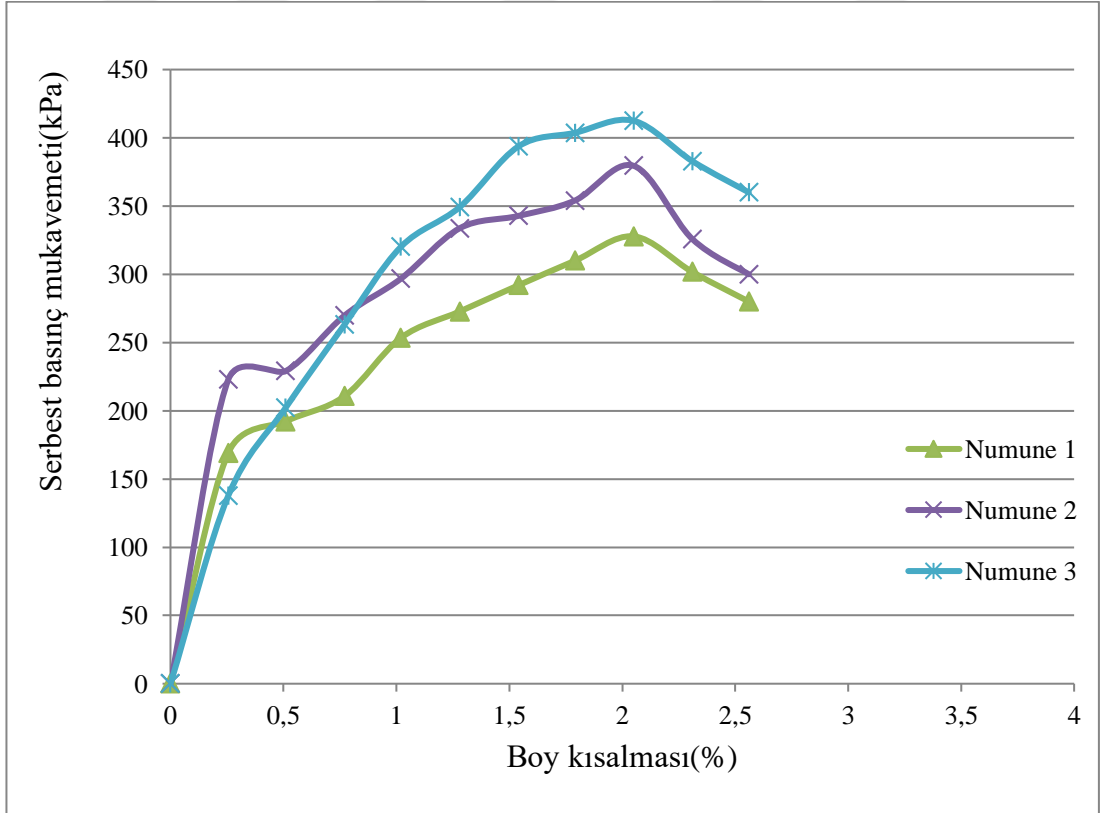
%8 çimento katkılı zeminlerin serbest basınç deney sonuçlarına göre %20,18 su muhtevsındaki çimento katkılı zeminin, optimum su muhtevsındaki doğal zemine göre 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde yaklaşık olarak %210 daha iyi sonuç verdiği Şekil 4.18’de görülmektedir. Bu da çimentonun katılmasıyla dayanımın arttığını göstermektedir. Boy kısaltmalarında ise 28 günlük numunelerde daha az deforme olduğu gözlemlenmiştir.

4.8.2. %10 çimento katkılı zeminin serbest basınç grafiği

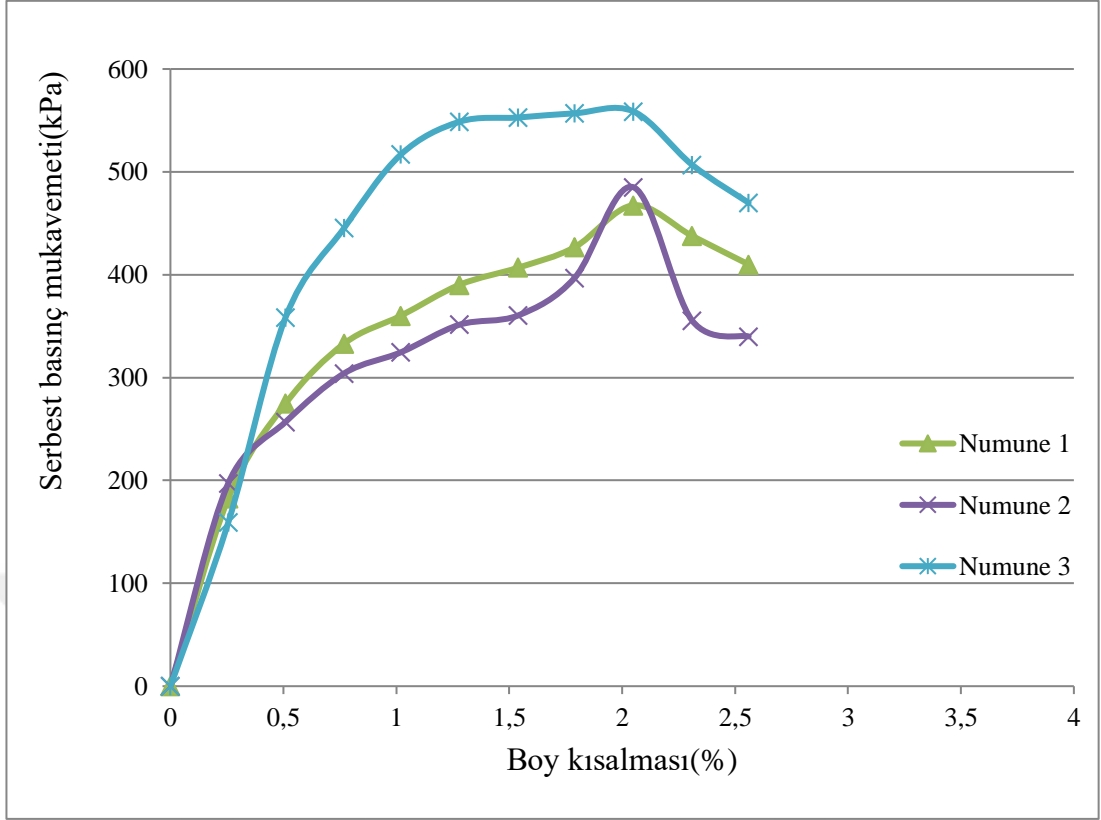
Çimento katkılı zeminlerin deneylerinde 40 numaralı elekten geçen malzemedan her deney için 330 gr alınmıştır. Alınan malzemeye %20,63 oranında su ve % 10 oranında çimento katkısı ilave edilerek iyice karıştırılmıştır. Katkısızlarda olduğu şekilde numuneler hazırlanmış ve deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.19’da anlık, Şekil 4.20’de 1 günlük, Şekil 4.21’de 7 günlük, Şekil 4.22’ de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kür sürelerinde değerlerin ortalaması da Şekil 4.23’te gösterilmiştir. Deneylerin sonunda da değerlendirmeler yapılmıştır.



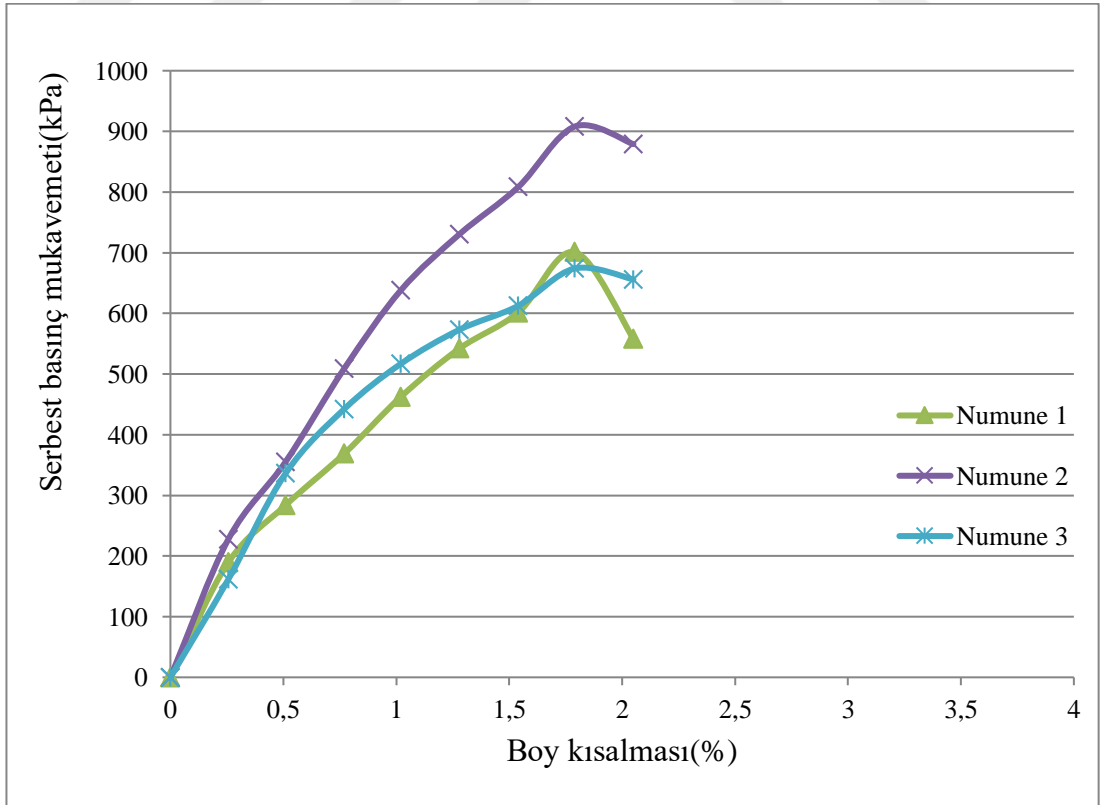
Şekil 4.19. %10 çimento katkılı malzemenin anlık serbest basınç grafiği



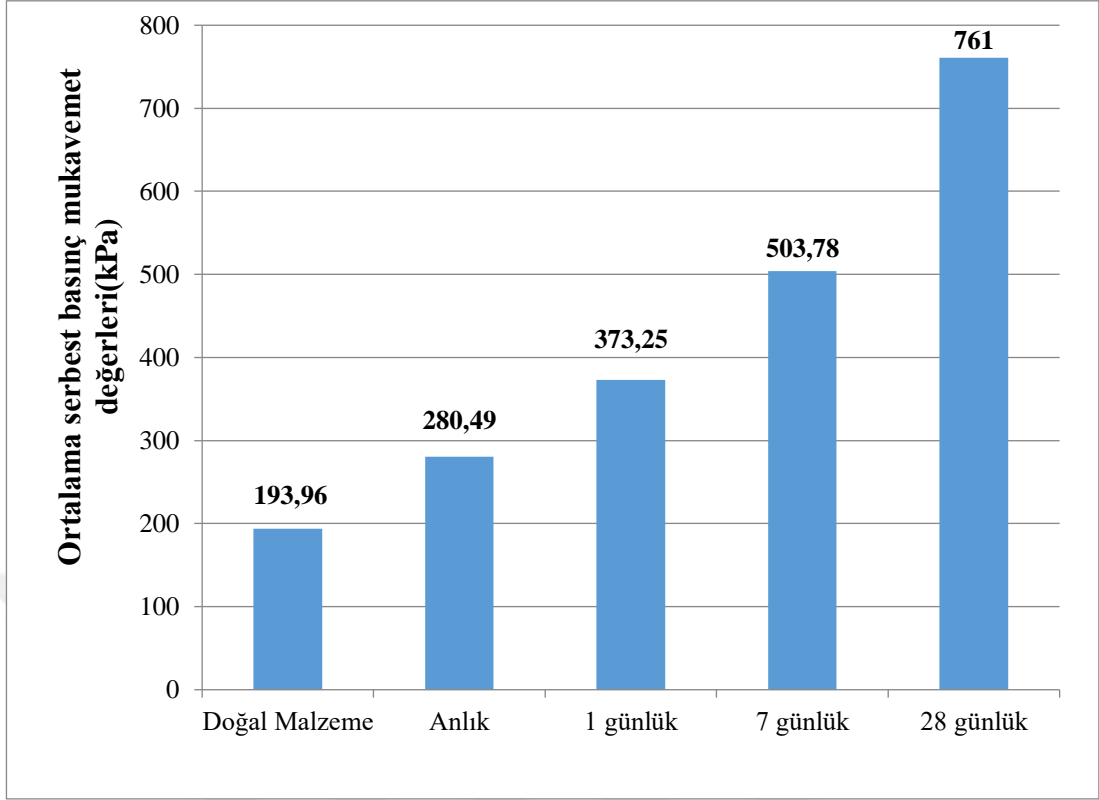
Şekil 4.20. %10 çimento katkılı malzemenin 1 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 4.21. %10 çimento katkılı malzemenin 7 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 4.22. %10 çimento katkılı malzemenin 28 günlük serbest basınç grafiği



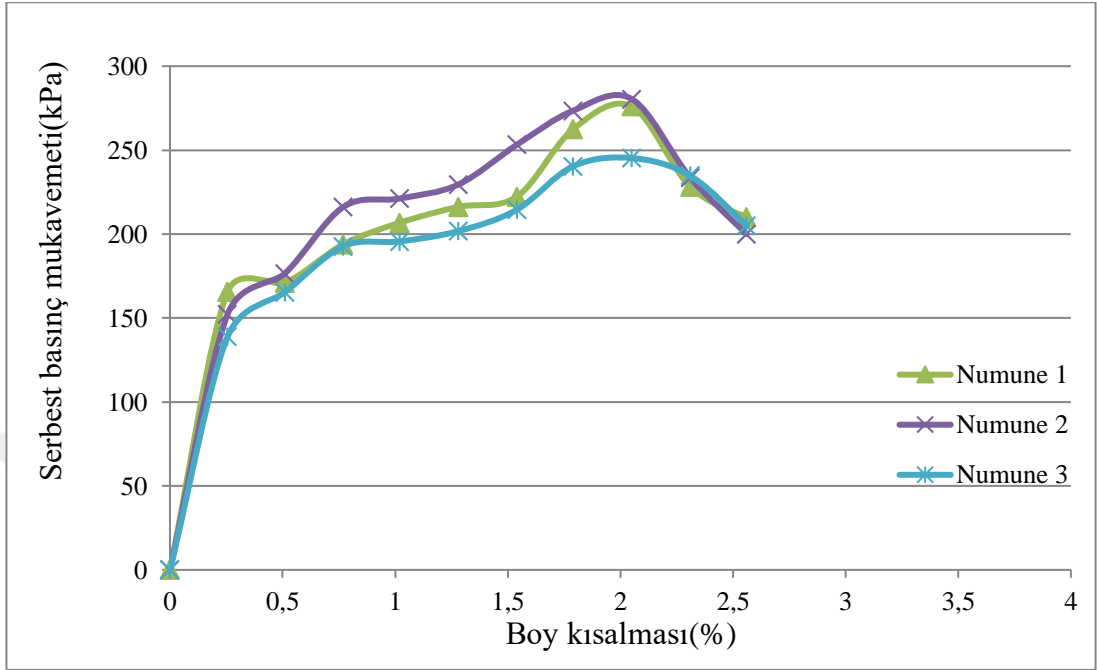
Şekil 4.23. %10 çimentolu zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerleri

%10 çimento katkılı zeminlerin serbest basınç deney sonuçlarına göre %20,63 su muhtevsındaki çimento katkılı zeminin, optimum su muhtevsındaki doğal zemine göre 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde yaklaşık olarak %40,5 daha iyi sonuç verdiği Şekil 4.23'te görülmektedir. Bu da çimentonun katılmasıyla dayanımın %8 çimento katkılıya göre daha çok arttığını göstermektedir. Boy kısalmaların da ise 28 günlük numunelerde daha az deforme olduğu gözlemlenmiştir.

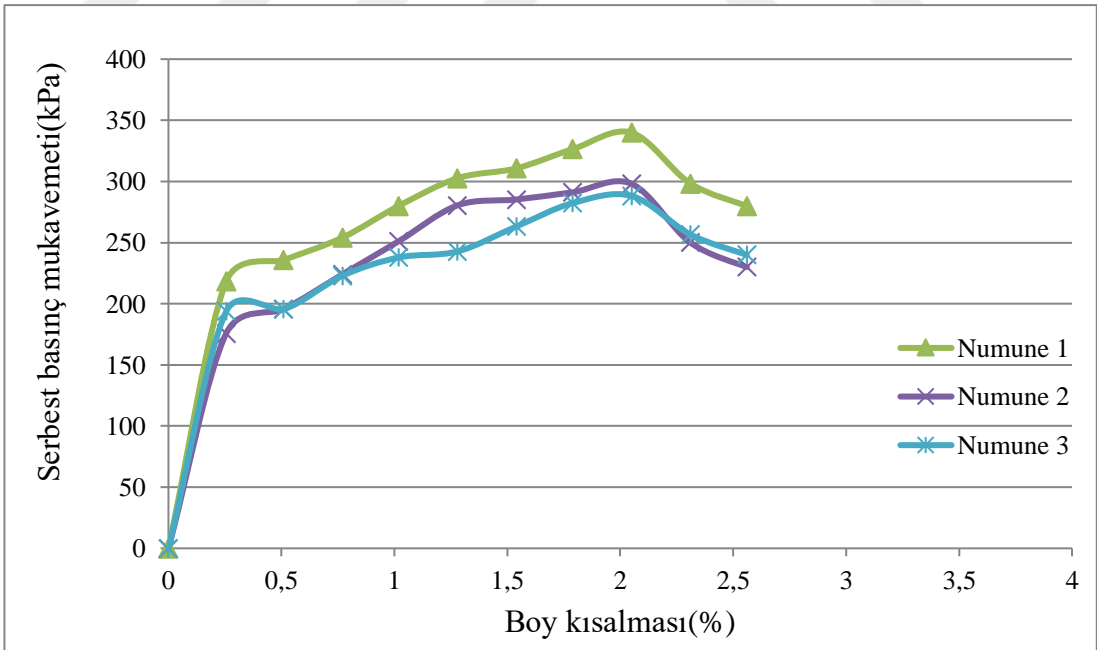
4.8.3. %12 çimento katkılı zeminin serbest basınç grafiği

Çimento katkılı zeminlerin deneylerinde 40 numaralı elekten geçen malzemeden her deney için diğer katkılılarda olduğu gibi 330 gr alınmıştır. Alınan malzemeye kendi oranında su ve %12 oranında çimento katkısı ilave edilerek iyice karıştırılmıştır. Tüm deneylerde olduğu şekilde numuneler hazırlanmış ve deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.24'te anlık, Şekil 4.25'de 1 günlük, Şekil 4.26'da 7 günlük, Şekil 4.27'de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kür sürelerinde değerlerin ortalaması da Şekil 4.28'te gösterilmiştir.

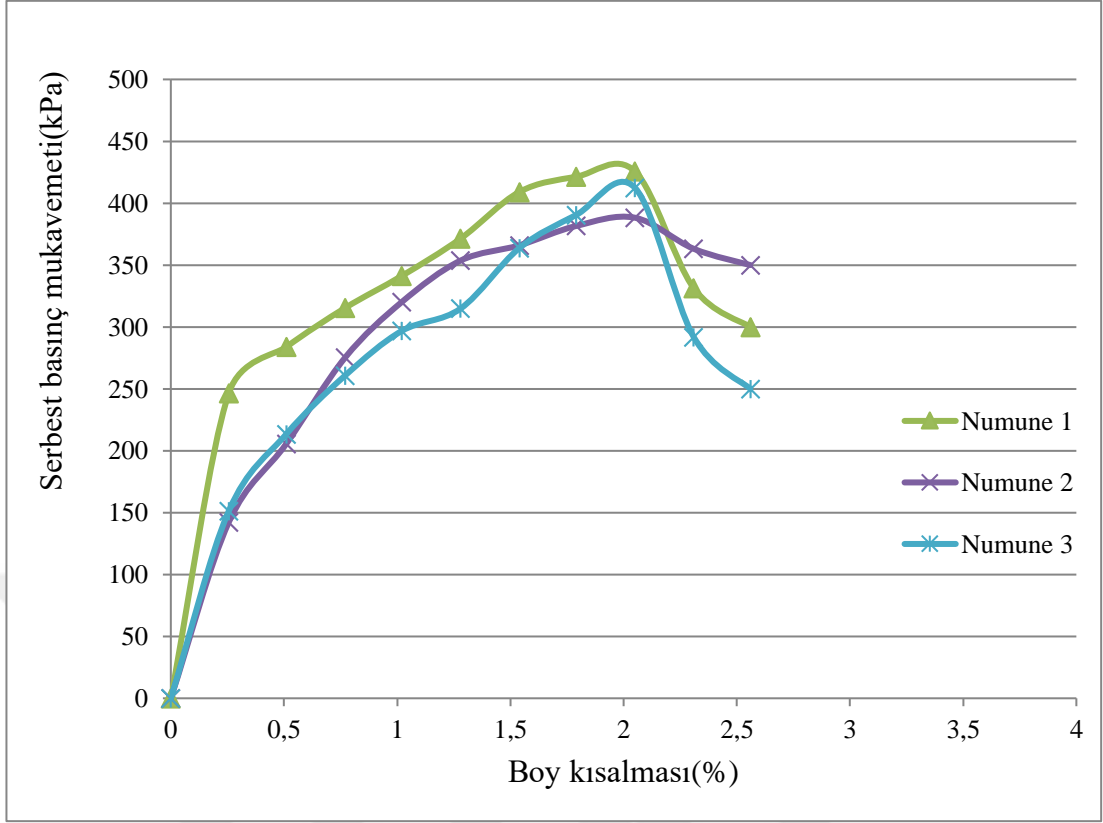
Deneylerin sonunda da değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca %8 ve %10 imento katkılarına göre de kıyaslama yapılmıştır.



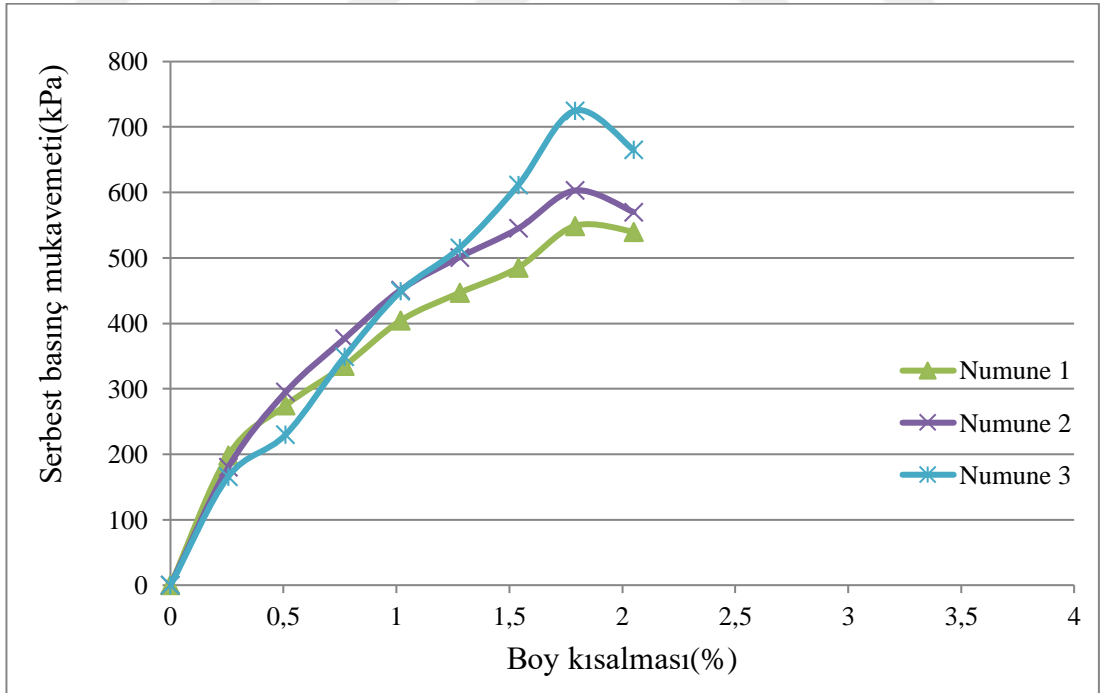
şekil 4.24. %12 imento katkılı malzemenin anlık serbest basınç grafiği



şekil 4.25. %12 imento katkılı malzemenin 1 günlük serbest basınç grafiği



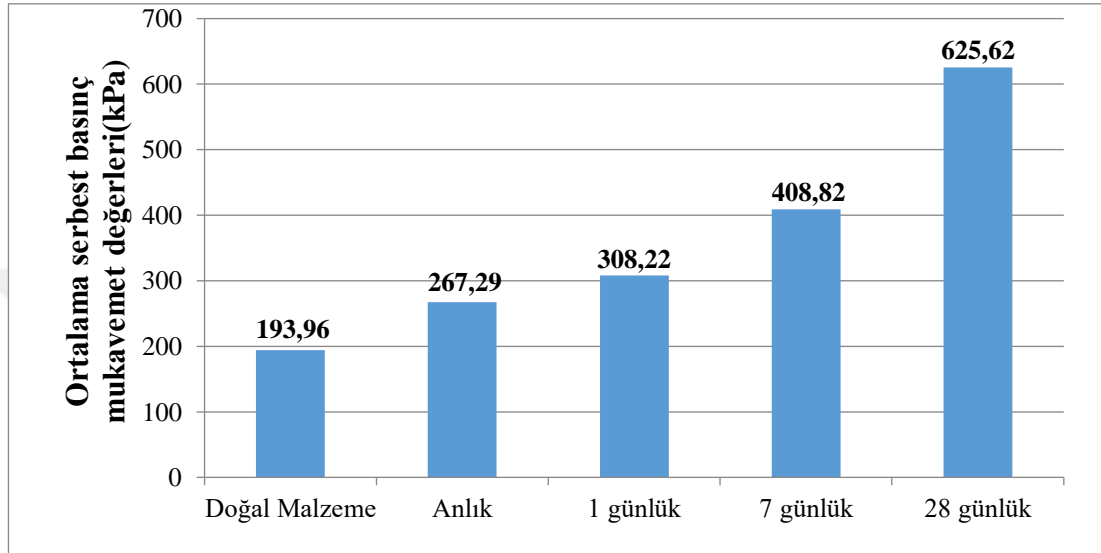
Şekil 4.26. %12 çimento katkılı malzemenin 7 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 4.27. %12 çimento katkılı malzemenin 28 günlük serbest basınç grafiği

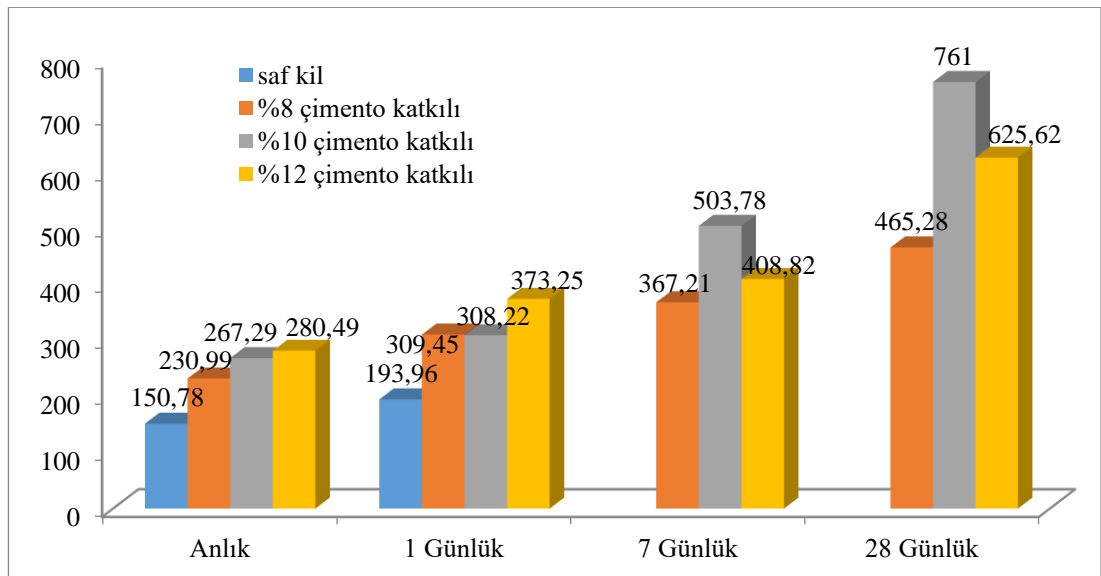
%12 çimento katkılı zeminlerin serbest basınç deney sonuçlarına göre %21,20 su muhtevasındaki çimento katkılı zeminin, optimum su muhtevasındaki doğal zemine

göre 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde yaklaşık olarak %315 daha iyi sonuç verdiği Şekil 4.28'te görülmektedir. Bu da çimentonun katılmasıyla dayanımın %8 ve %12 çimento katkıya göre daha çok arttığını göstermektedir. Boy kısaltmaların da ise 28 günlük numunelerde daha az deforme olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.28. %12 çimentolu zeminin kür süresine göre ortalama mukavemet değerleri

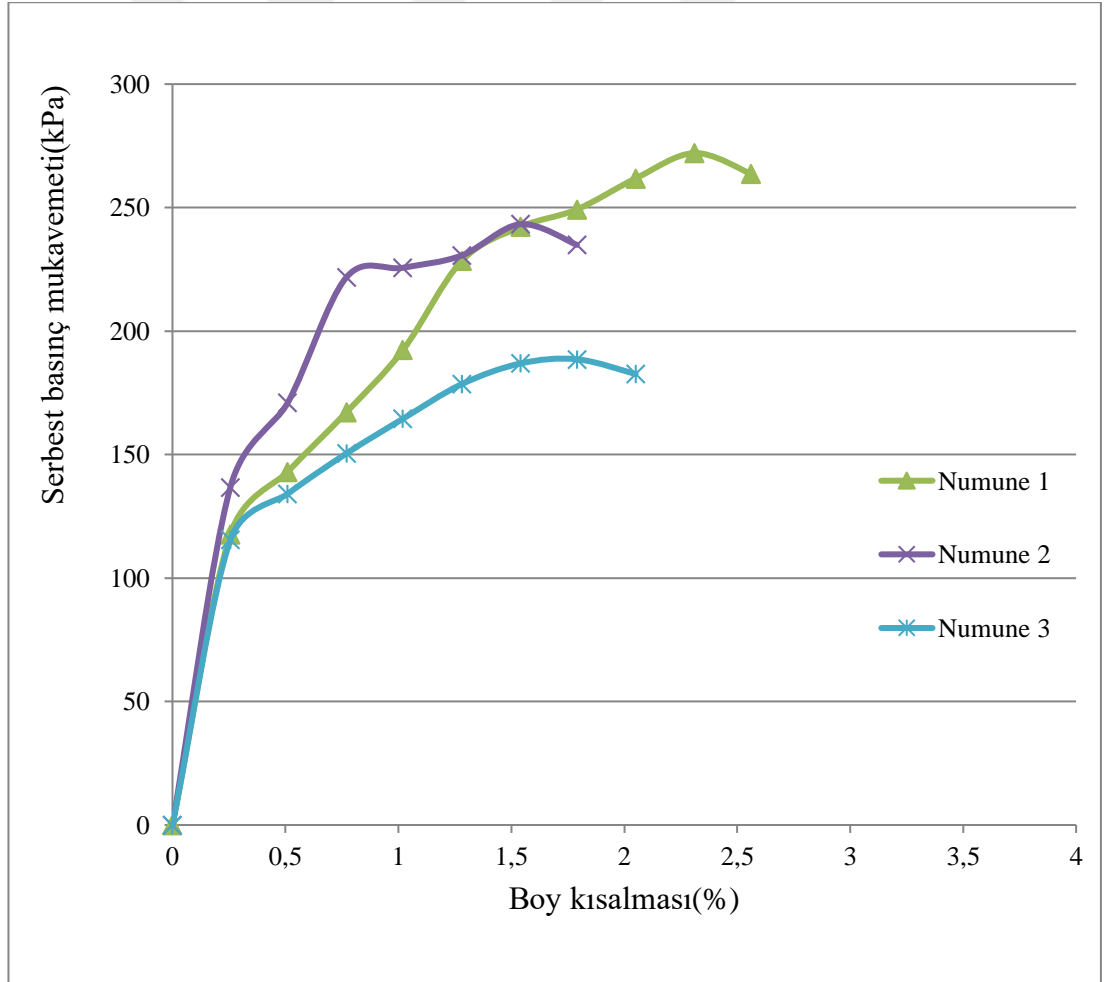
Şekil 4.29'da ise katkısız ve katkılı bütün serbest basınç deneylerin sonuçları grafik halinde gösterilmiştir. %8, %10, %12 çimento katkıların kür sürelerine göre stabilizasyona yaptığı etki grafikte gösterilmiştir.



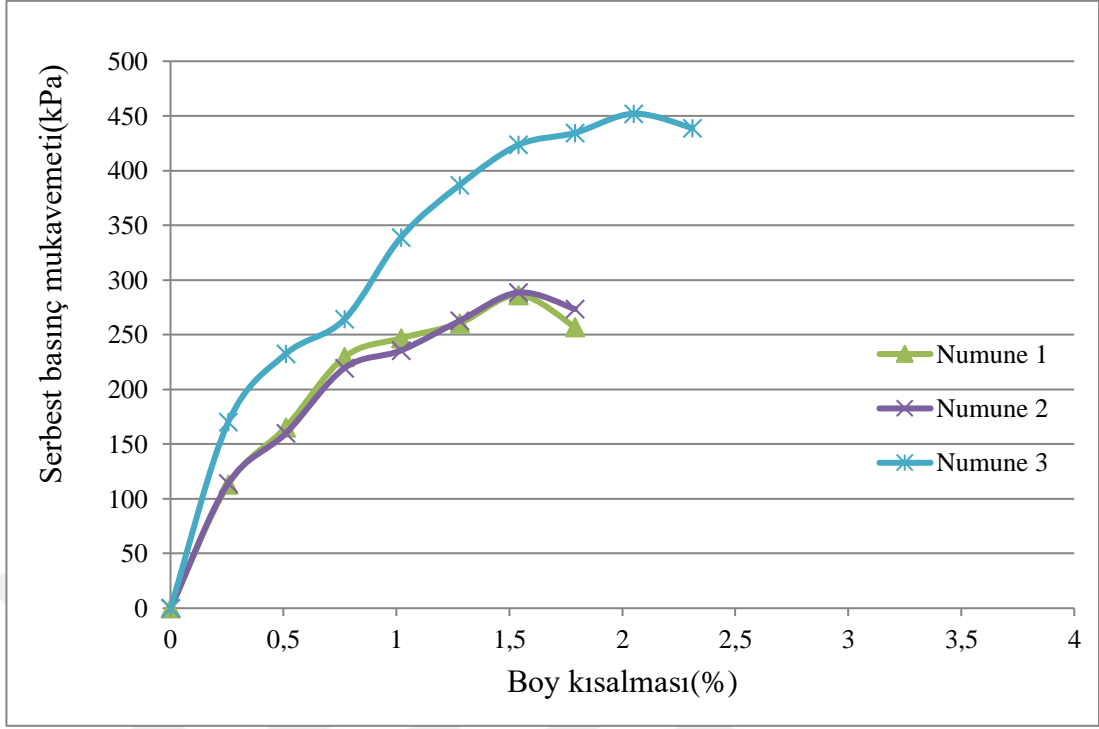
Şekil 4.29. Bütün deneylerin kür süresine göre mukavemet değerleri(kpa)

4.8.4. Doğal su muhtevasında %10 çimento katkı zeminin serbest basınç grafiği

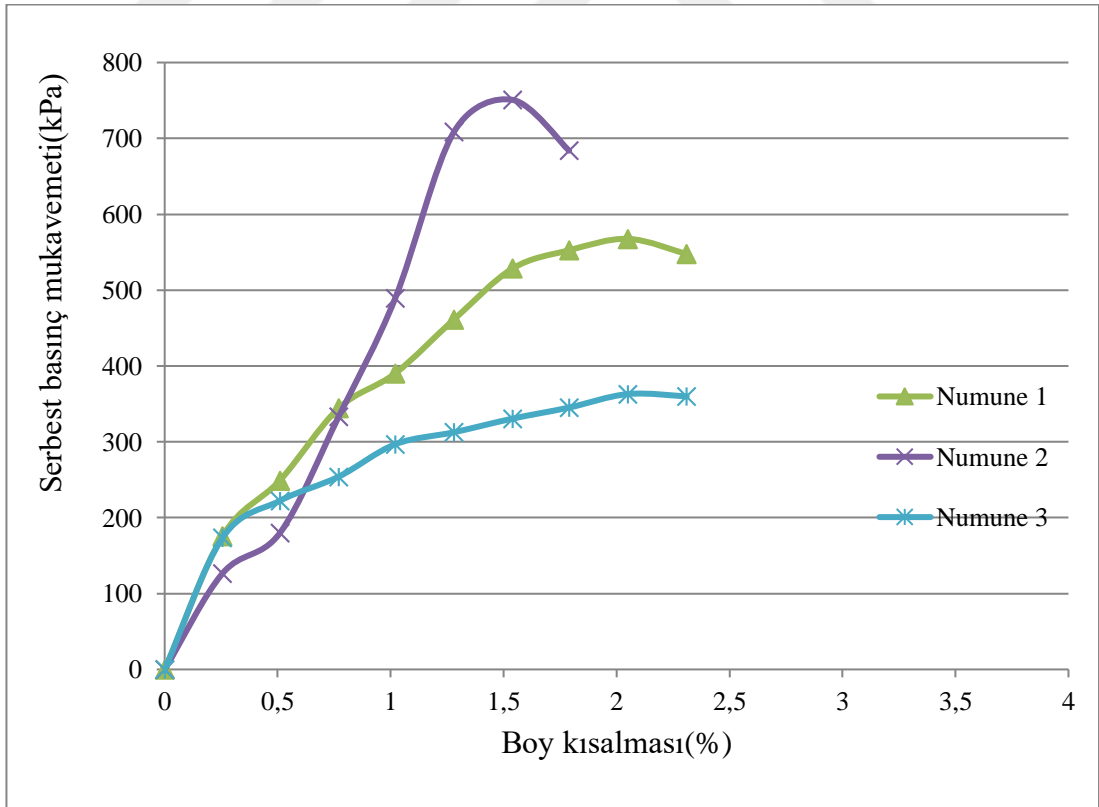
Deneyde, Yalova bölgesinden getirilen zeminin tamamen kurutulmuş hali kullanılmıştır. Zemine herhangi bir ufalama işlemi yapılmadan doğal su muhtevası eklenmiştir. Ayrıca çimentodan %10 oranında ve killi zeminden de yaklaşık 400 gr kullanılmıştır. Baştaki deneylerde bulunan doğal su muhtevasıyla anlık, 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 4.30'da anlık, Şekil 4.31'de 1 günlük, Şekil 4.32'de 7 günlük, Şekil 4.33'de 28 günlük deneylerin serbest basınç mukavemet değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Ayrıca kür sürelerinde değerlerin ortalaması da Şekil 4.34'de gösterilmiştir.



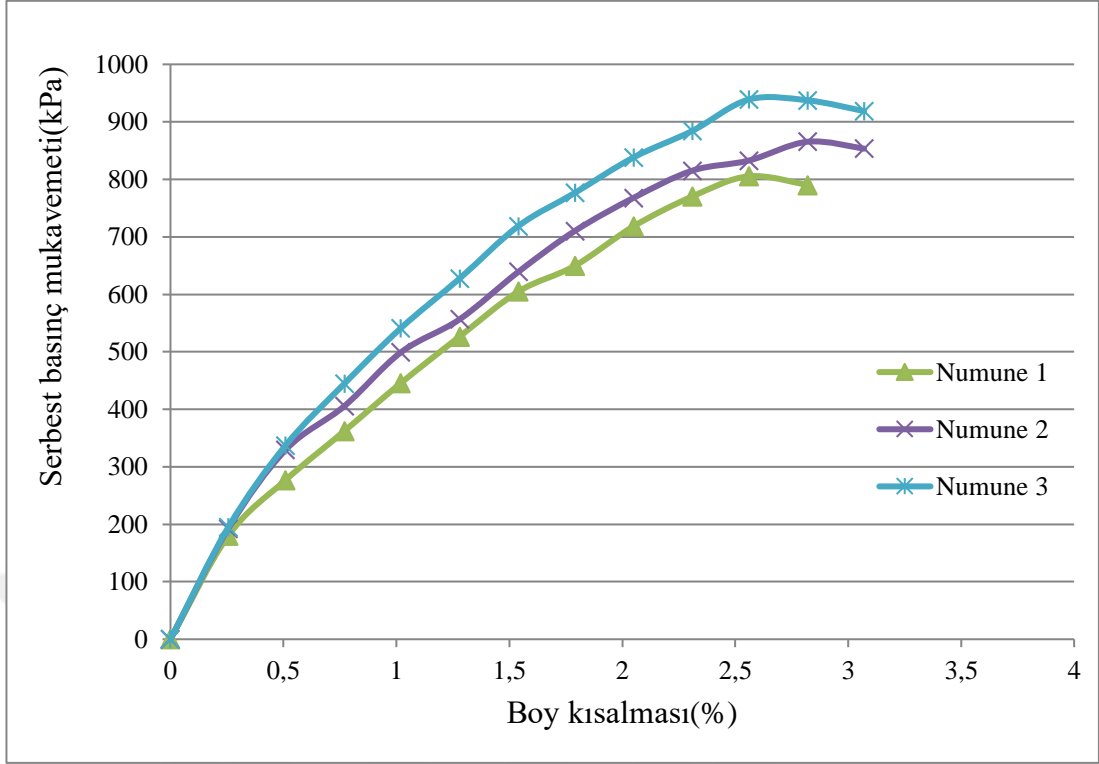
Şekil 4.30. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevastaki anlık serbest basınç grafiği



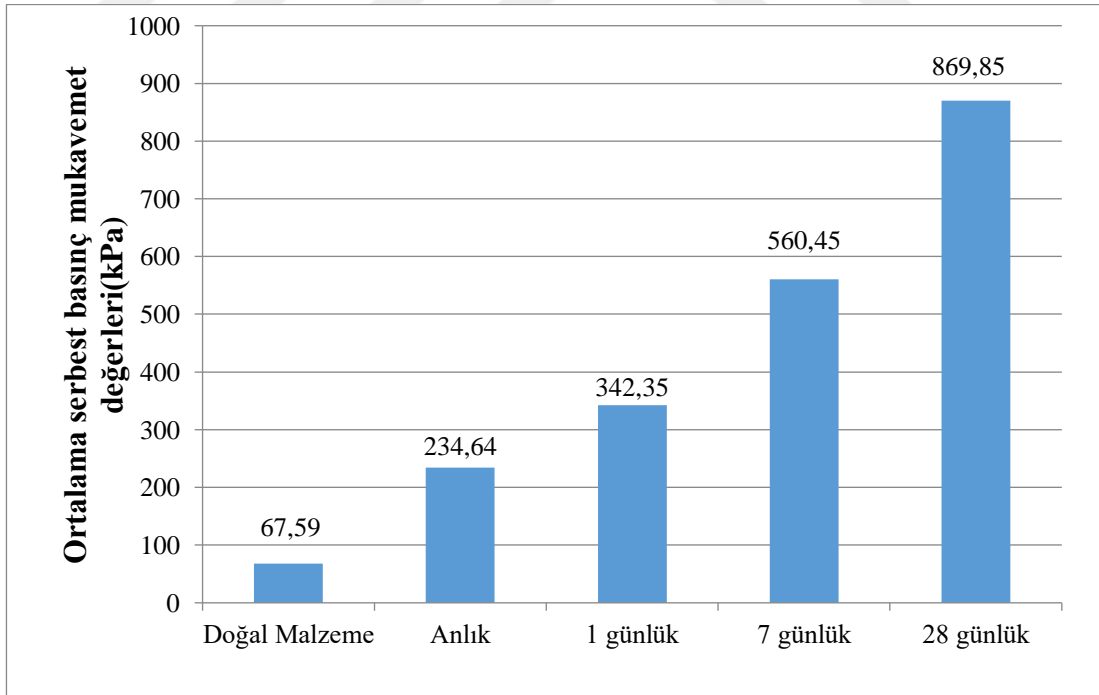
Şekil 4.31. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki 1 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 4.32. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki 7 günlük serbest basınç grafiği

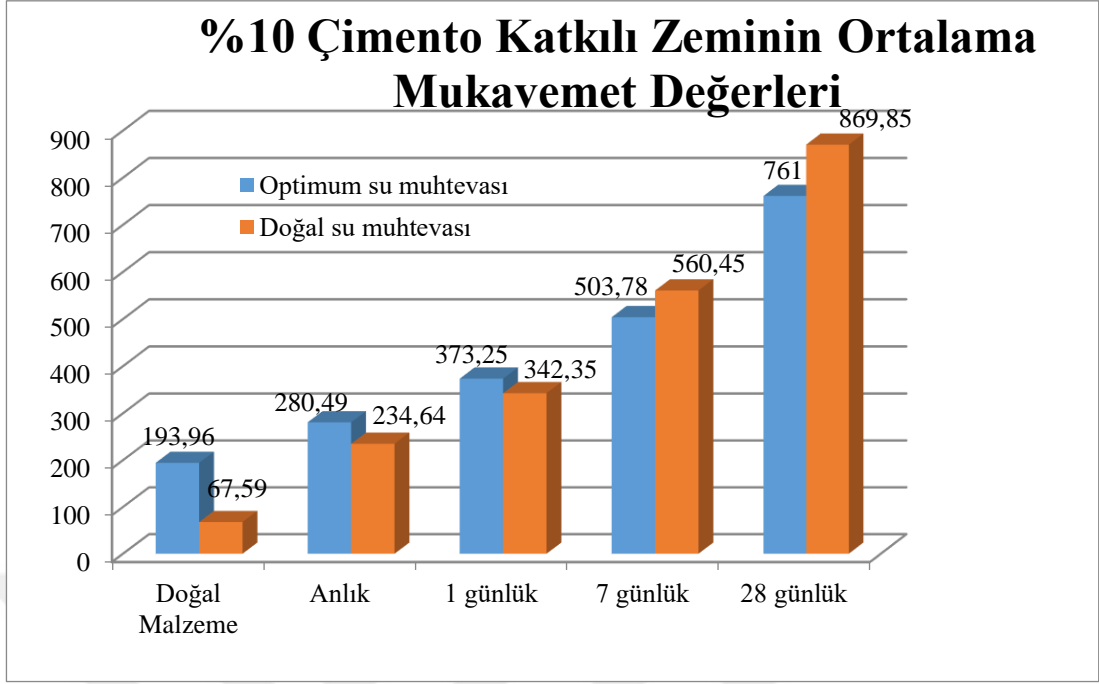


Şekil 4.33. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki 28 günlük serbest basınç grafiği



Şekil 4.34. %10 çimentolu malzemenin doğal su muhtevsındaki ortalama mukavemet değerleri

%10 çimentolu malzemenin optimum ve doğal su muhtevsındaki ortalama mukavemet değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.35'te gösterilmiştir



Şekil 4.35. %10 çimentolu malzemenin optimum ve doğal su muhtevasındaki ortalama mukavemet değerlerinin karşılaştırılması (kpa)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmaları kapsamında, killi bir zemine yüksek ve farklı oranlarda çimento katkısı yapılarak zemindeki iyileştirmeler araştırılmıştır. Çalışmalar laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yüksek orandaki çimentonun killi zeminlere mukavemet, taşıma gücü ve dayanım açısından etkilerine bakılmıştır ve mühendislik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir;

- Doğal zeminin likit limit değeri %85,06 ve plastik limit değeri %23,05 bulunmuştur. Bu değerlere göre zemin sınıfının CH, yüksek plastisiteli kil olduğu belirlenmiştir. Zeminin dane boyutlarına bakılarak da sınıfının ASHTO zemin sınıflandırmasına göre A-7-6 olarak belirlenmiştir.
- Çimento katkılı killi zeminlerde yapılan likit limit ve plastik limit deneyleri sonucunda, doğal zemine göre likit limit ve plastisite indisinde azalma plastik limitte ise artma gözlemlenmiştir. Yüksek plastisiteli zemine doğru oranda çimentonun katılmasıyla kıvamında katılma olacağı ve işlevselliğin arttığı söylenebilir.
- Kompaksiyon deneyi sonucunda killi zeminin optimum su muhtevası %19,12 maksimum kuru birim hacim ağırlığı da 15,18 kN/m³ olarak elde edilmiştir. Çimento katkılı killi zeminlerde doğal zemine göre optimum su muhtevasında artış. Maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında ise azalma olduğu görülmüştür.
- Yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda çimento katkılı olanlarda katkılı olmayanlara göre anlık, 1 günlük, 7 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde ciddi artışlar görülmüştür. Zamana bağlı deformasyonlar da ise belirli oranda azalma görülmüştür.
- Yüksek ve 3 farklı oranda yapılan deneyler sonucunda mukavemet değerlerine bakıldığında %10 çimento katkılılarda daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür. En iyi iyileştirmenin %10 çimento oranı ile yapılacağı yorumuna varılmıştır.
- Mukavemet değerlerini kür süreleri noktasında bakıldığında, 28 günlük kür süresi sonunda yapılan serbest basınç deneylerinde anlık, 1 günlük ve 7 günlüklere kıyasla az deformasyonla kısa zamanda çok daha fazla yük aldığı sonucuna varılmıştır.

- Yalova bölgesinden getirilen killi zeminin yüksek oranda çimento ile iyileştirme yapılabileceği kanısına varılmıştır.
- %10 çimento katkılı numunelerin 7 günlük ve 28 günlük mukavemet değerlerinin %12 çimento katkılılara göre daha iyi sonuçlar verdiğiinden ve %10 çimentonun daha ekonomik olmasından dolayı iyileştirmenin %10 çimento oranı ile yapılması uygun görülmüştür.
- Uzun vadede %10 çimento oranında doğal su muhtevasında, %10 çimento oranındaki optimum su muhtevasına göre daha iyi sonuçlar alınmıştır.
- Doğal zemin, yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevasına sahip olduğundan şişme potansiyeli yüksek bir malzeme olduğu görülmüştür. Ancak çimento katkı malzemesinin ilavesiyle şişme potansiyelin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Laboratuvar deneyleriyle çimento katkısı ile iyileştirme araştırması mümkün olduğunca geniş şekilde yapılmıştır. Farklı bir yöntem olarak araziden getirilen numune üzerinde CBR deneylerin yapılması önerilebilir.
- Bu çalışma kapsamında sadece çimento katkısı kullanılmıştır. Aynı çimento oranları ile alternatif iyileştirme malzemeleri ilave edilebilir ya da sadece alternatif malzeme kullanılıp çimento ile kıyas edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Tumluer G., Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006, 6001.
- [2] Kalıpcılar İ., Çimento ile Stabilize Edilen Killi Zeminin Sodyum ve Magnezyum Sülfatlı Çözeltiler Etkisinde Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015, 405310.
- [3] 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.
- [4] Kalem Z., Kentsel Dönüşümdeki İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Killi Zeminlerde İyileştirmeye Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2015, 413344.
- [5] URL-1: <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/cimento/> (Zitaret tarihi: 25 Eylül 2019).
- [6] Kılıç G., Çimento ile Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 213300.
- [7] Aytekin M., *Deneyisel Zemin Mekaniği*, 1. Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara, 2004.
- [8] Saitoh S., Experimental Study of Engineering Properties of Cement Improved Ground By The Deep Mixing Method, PhD Thesis, Nihon University, Faculty of Engineering, 1988.
- [9] Ahnberg H., Ljungkrantz C., Holmqvist L., Deep Stabilization of Different Types of Soft Soils, *Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1995, **7**, 167-172.
- [10] Kızılcılık M. M., Yüksek Plastisiteli Kilin Kireç ile Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 275771.
- [11] URL-2: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kil> (Ziyaret tarihi:18 Ekim 2019).
- [12] Tüylüce F., Deniz Killerinin Kireç Stabilizasyonu ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 275774.

- [13] Doru M. H., Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2014, 373892.
- [14] Yıldırım S., *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, 2. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2002.
- [15] 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.
- [16] Öntürk K., Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2011, 287312.
- [17] Özaydın K., *Zemin Mekaniği*, 2. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [18] Çetin A. Y., Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerinin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 295471.
- [19] 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.
- [20] Çakılcıoğlu İ., Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007, 216270.
- [21] Ingles O. G., Metcalf J. B., *Soil Stabilization: Principles and Practice*, 7th ed., Ejge, Sydney, 1972.
- [22] Kavak A., The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, PhD Thesis, University of Boğaziçi, Institute of Science, İstanbul, 1996, 50492.
- [23] Uzuner B. A., *Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği*, 1. Baskı, Derya Yayınevi, Ankara, 2007.
- [24] 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.



EKLER

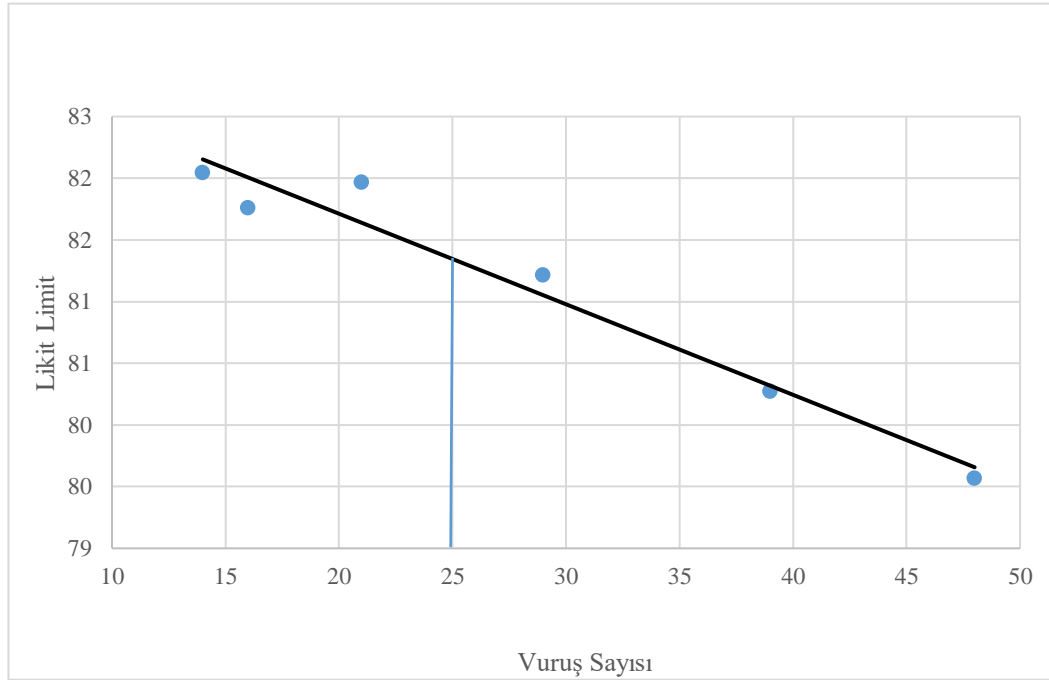
Ek-A Kıvam limitleri

Tablo A.1. %8 çimento 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
180	34,57	48	42,83	39,17	4,60	8,26	3,66	79,57
362	35,46	39	40,76	38,40	2,94	5,30	2,36	80,27
123	37,33	29	43,89	40,95	3,62	6,56	2,94	81,22
77	34,40	21	39,95	37,45	3,05	5,55	2,50	81,97
63	35,02	16	40,80	38,20	3,18	5,78	2,60	81,76
130	33,96	14	39,84	37,19	3,23	5,88	2,65	82,04

Tablo A.2. %8 çimento 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
227	34,13	41,30	39,45	5,32	7,17	1,85	34,77
113	34,38	39,73	38,37	3,99	5,35	1,36	34,09
142	35,37	40,61	39,26	3,89	5,24	1,35	34,70
						W_p	34,52



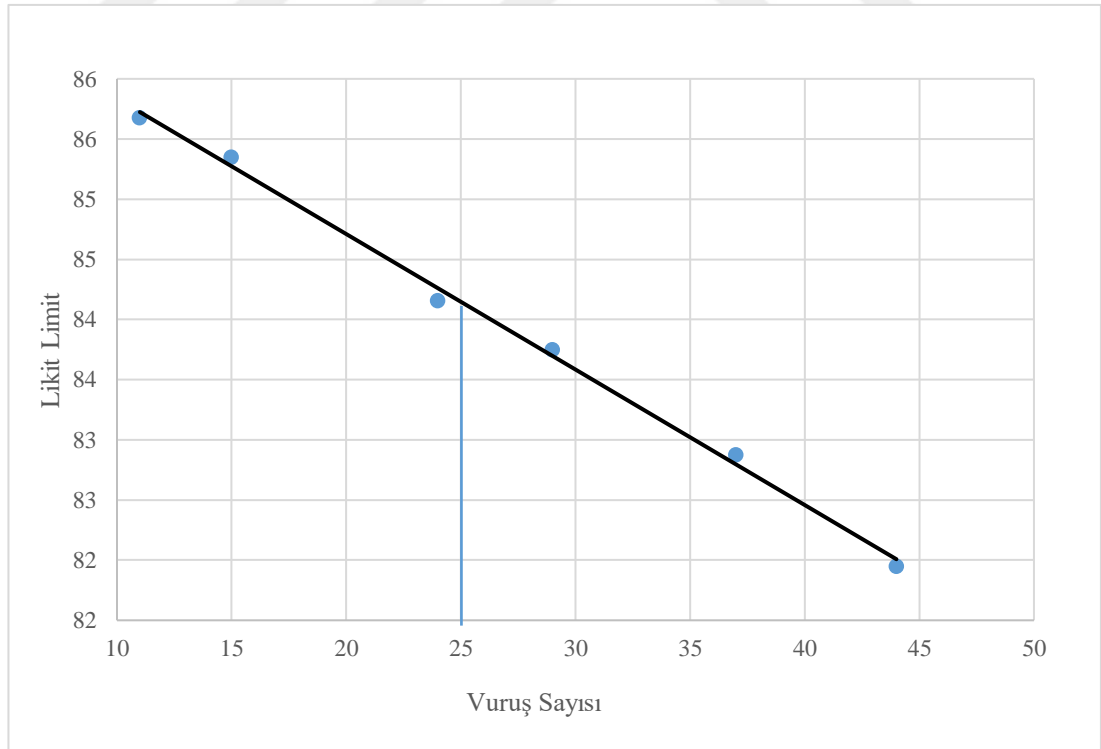
Şekil A.1. %8 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği

Tablo A.3. %10 çimento 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
162	35,83	44	46,11	41,48	5,65	10,28	4,63	81,95
92	34,87	37	45,55	40,71	5,84	10,68	4,84	82,88
240	34,09	29	43,70	39,32	5,23	9,61	4,38	83,75
213	34,21	24	41,65	38,25	4,04	7,44	3,40	84,16
152	35,98	15	43,95	40,28	4,30	7,97	3,67	85,35
246	34,07	11	41,46	38,05	3,98	7,39	3,41	85,68

Tablo A.4. %10 çimento 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
98	35,40	42,35	40,58	5,18	6,95	1,77	34,17
138	35,40	42,38	40,88	5,48	6,98	1,50	27,37
228	35,22	41,99	40,30	5,08	6,77	1,69	33,27
						W_p	31,60



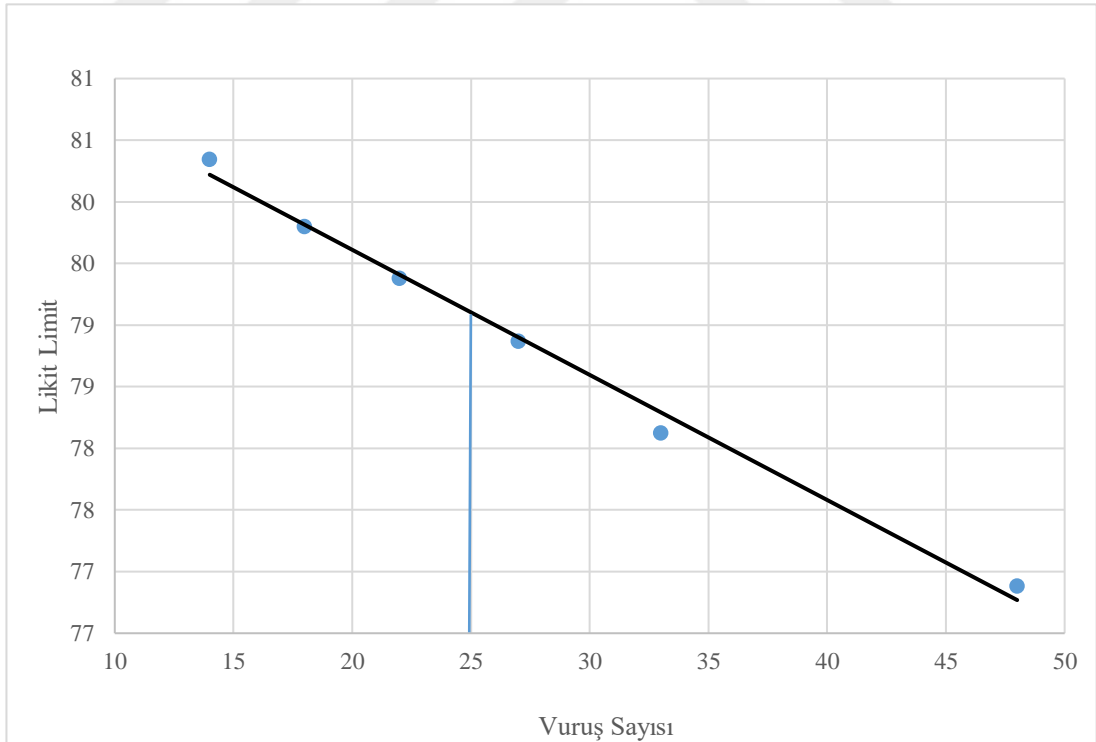
Şekil A.2. %10 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği

Tablo A.5. %12 çimento 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
134	34,43	48	41,01	38,15	3,72	6,58	2,86	76,88
363	35,34	33	41,04	38,54	3,20	5,70	2,50	78,13
193	34,97	27	42,25	39,04	4,07	7,28	3,21	78,87
70	36,72	22	43,68	40,60	3,88	6,96	3,08	79,38
199	33,73	18	40,85	37,69	3,96	7,12	3,16	79,80
82	33,85	14	42,20	38,48	4,63	8,35	3,72	80,35

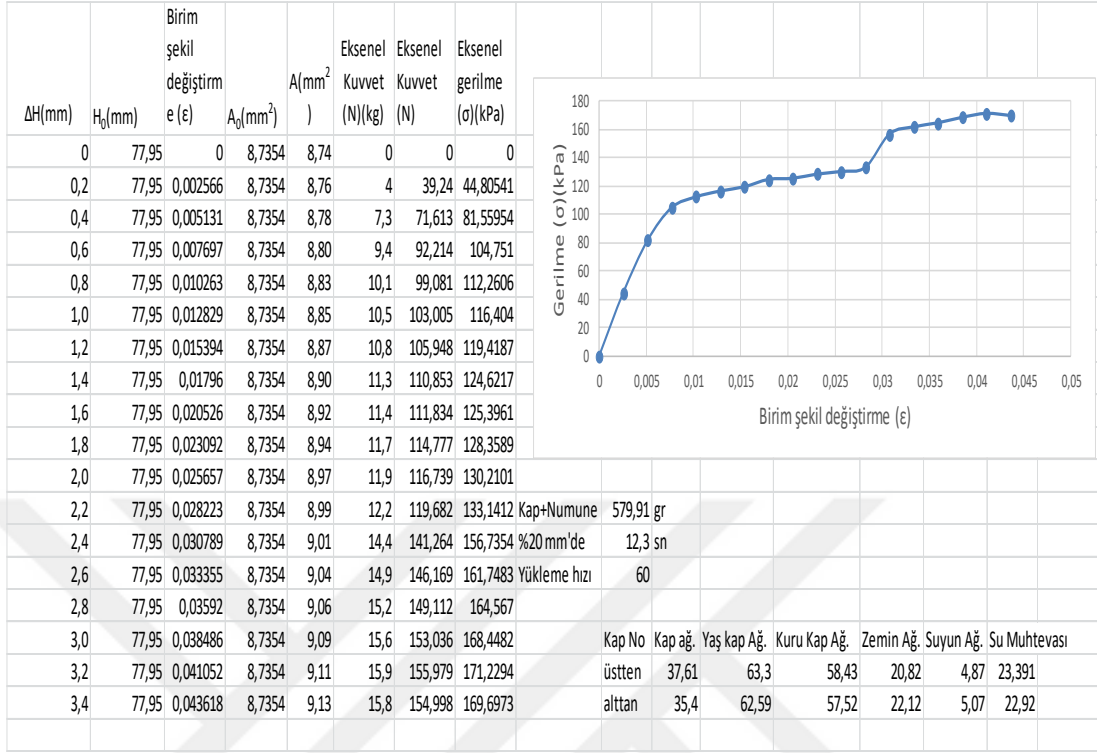
Tablo A.6. %12 çimento katkılı zeminin plastik limit değeri

Plastik Limit							
Kap No	W_{kap}	$W_{yaş+kap}$	$W_{kuru+kap}$	W_{kuru}	$W_{yaş}$	W_w	W_p
122	36,25	42,27	40,66	4,41	6,02	1,61	36,51
181	34,13	40,38	38,73	4,60	6,25	1,65	35,87
126	35,02	40,84	39,30	4,28	5,82	1,54	35,98
						W_p	36,12

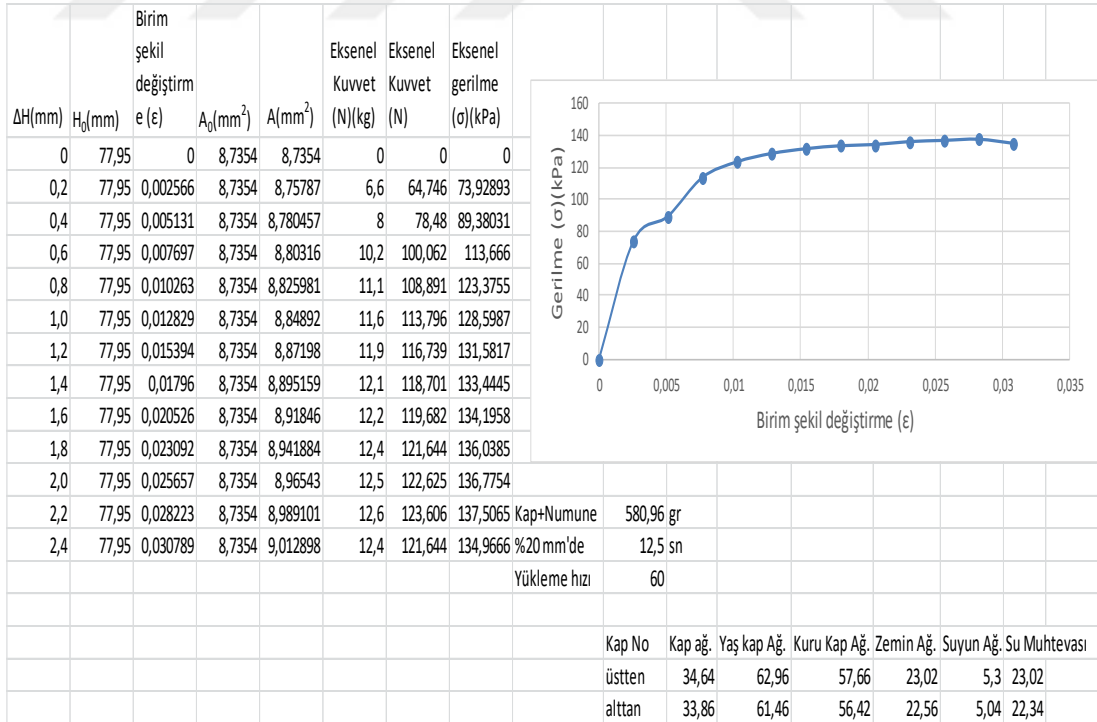


Şekil A.3. %12 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği

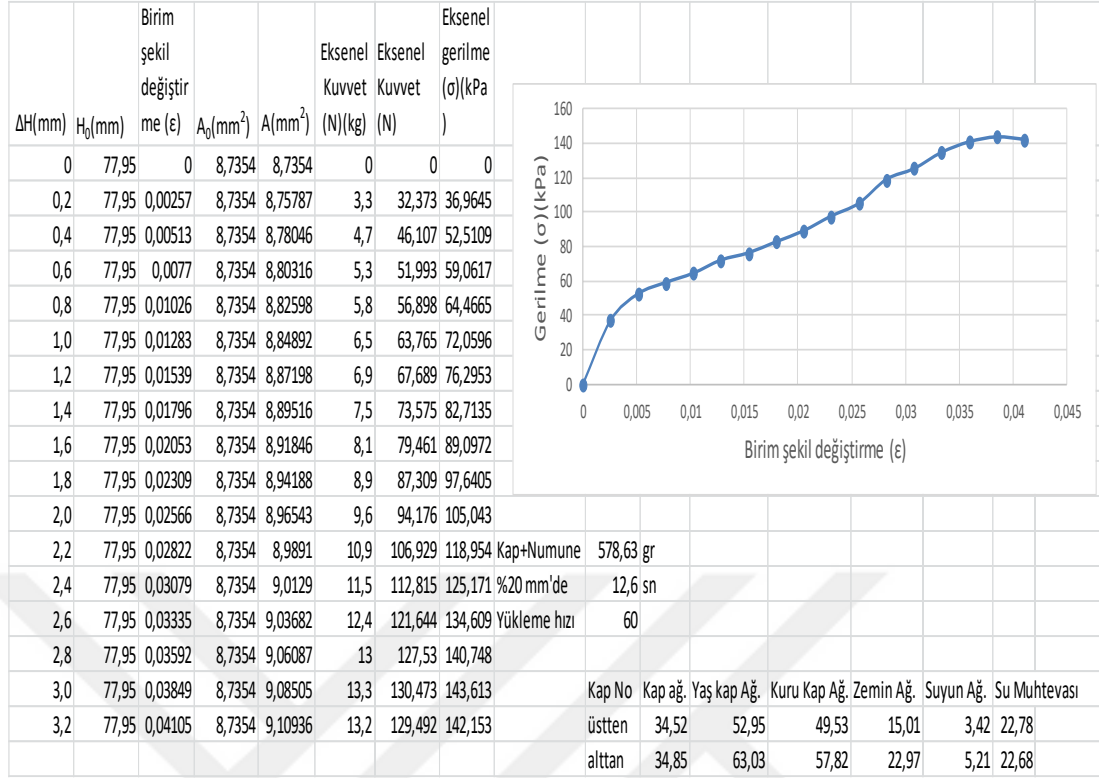
Ek-B Serbest basınç deneyi



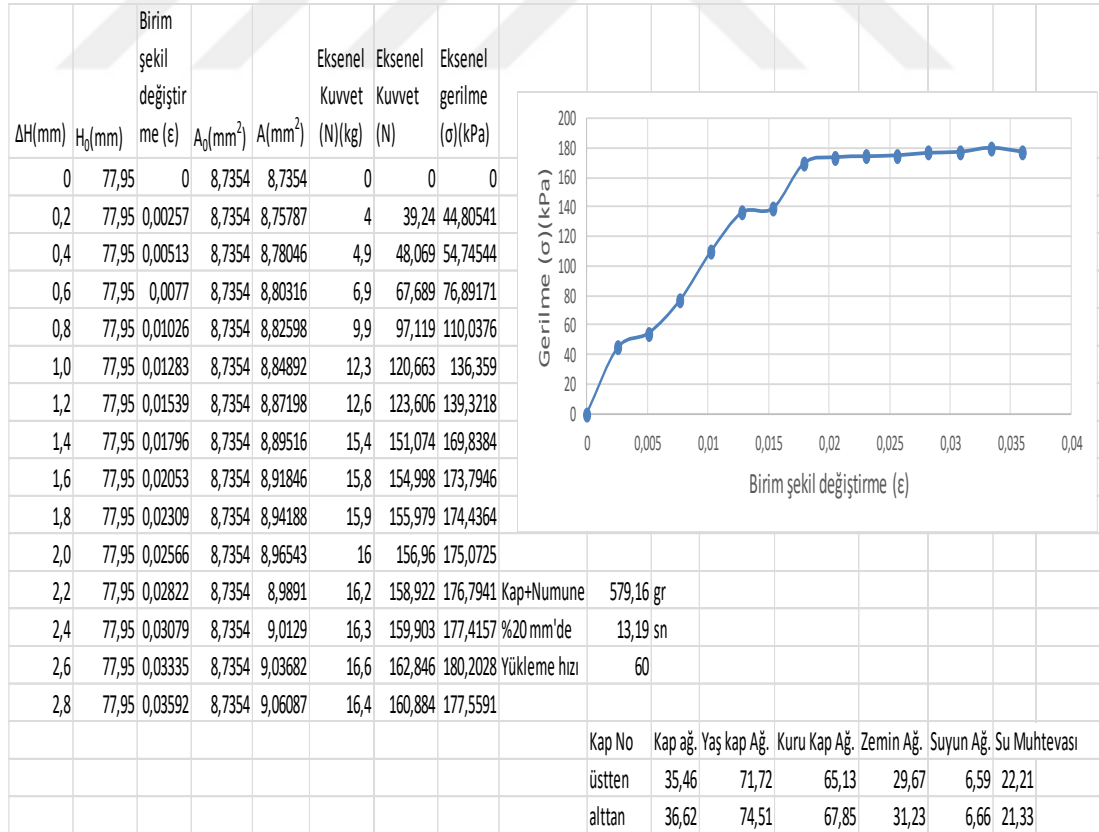
Şekil B.1. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



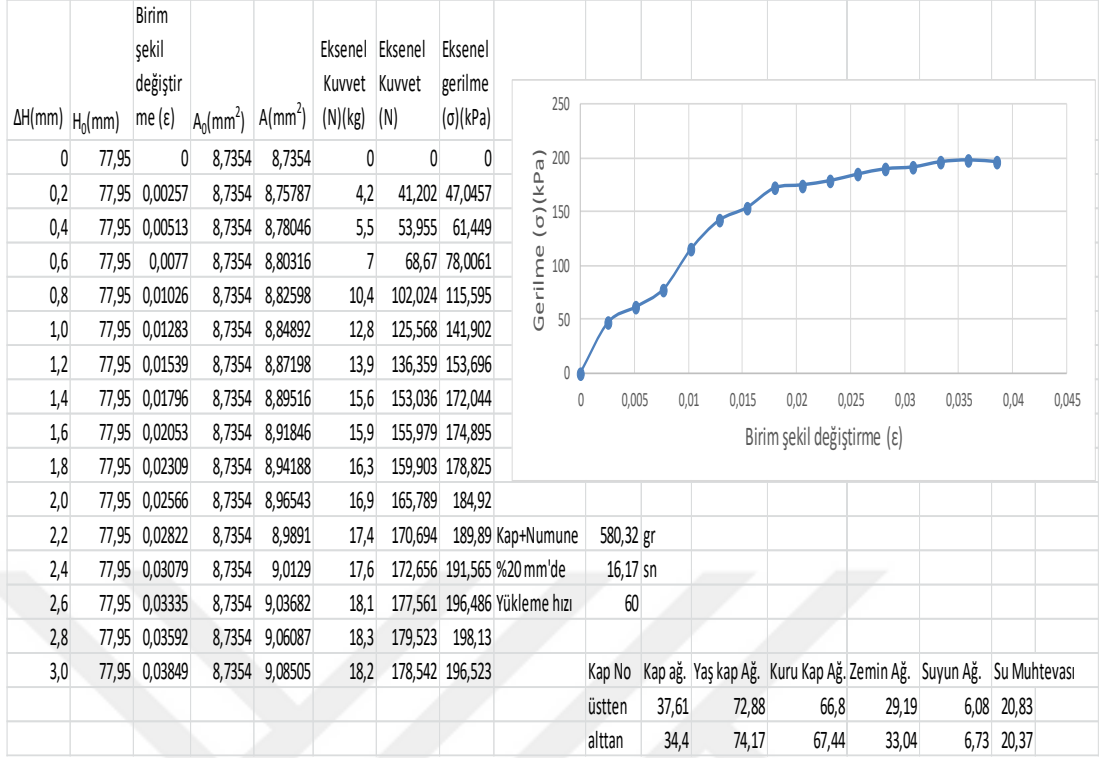
Şekil B.2. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



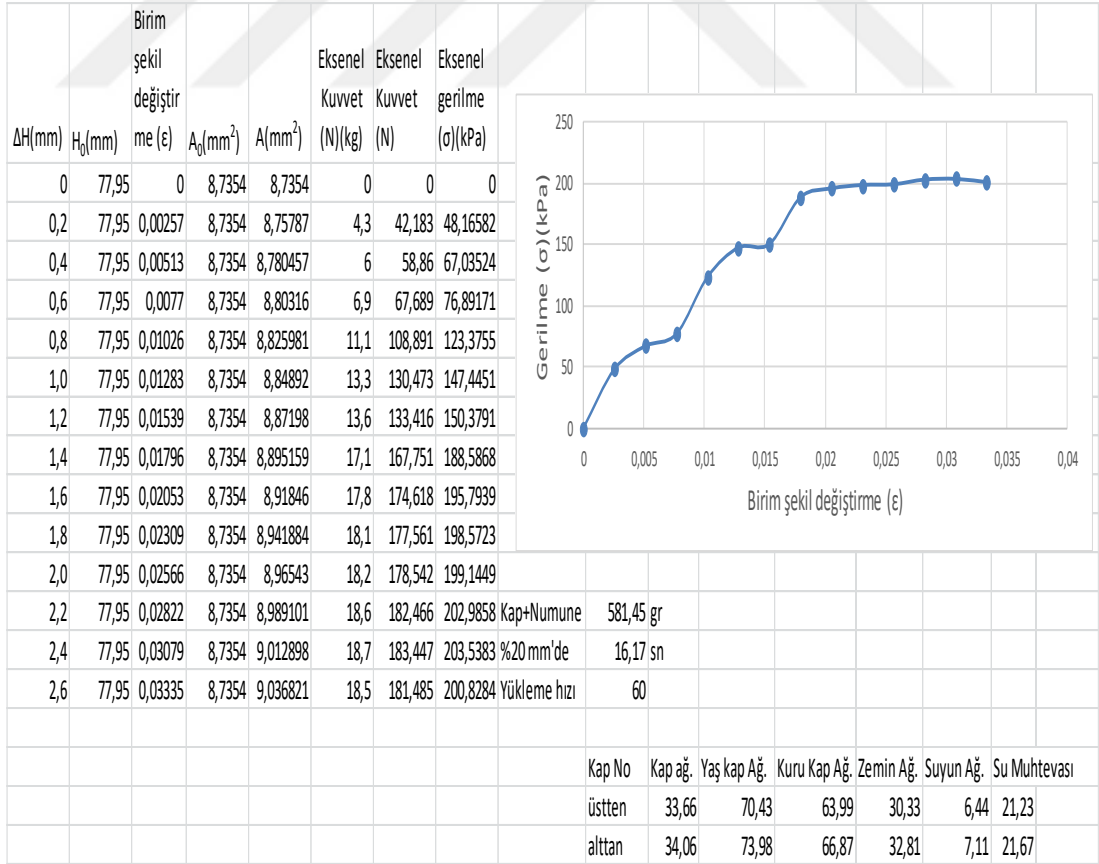
Şekil B.3. Optimum su muhtevasında doğal zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



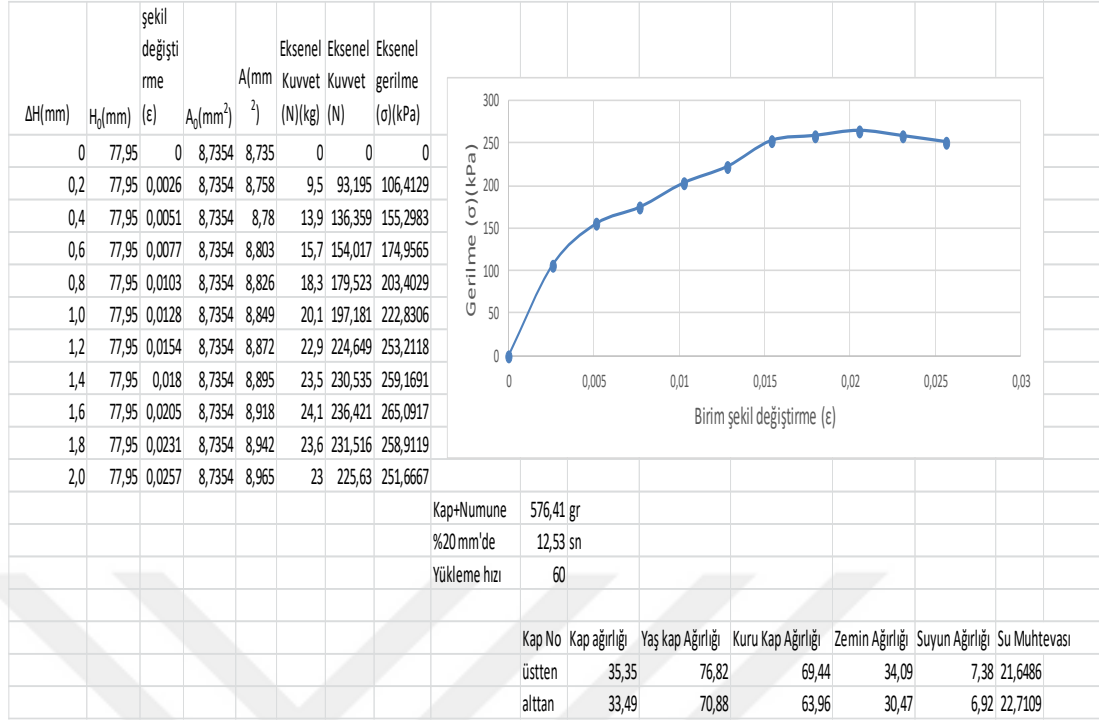
Şekil B.4. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



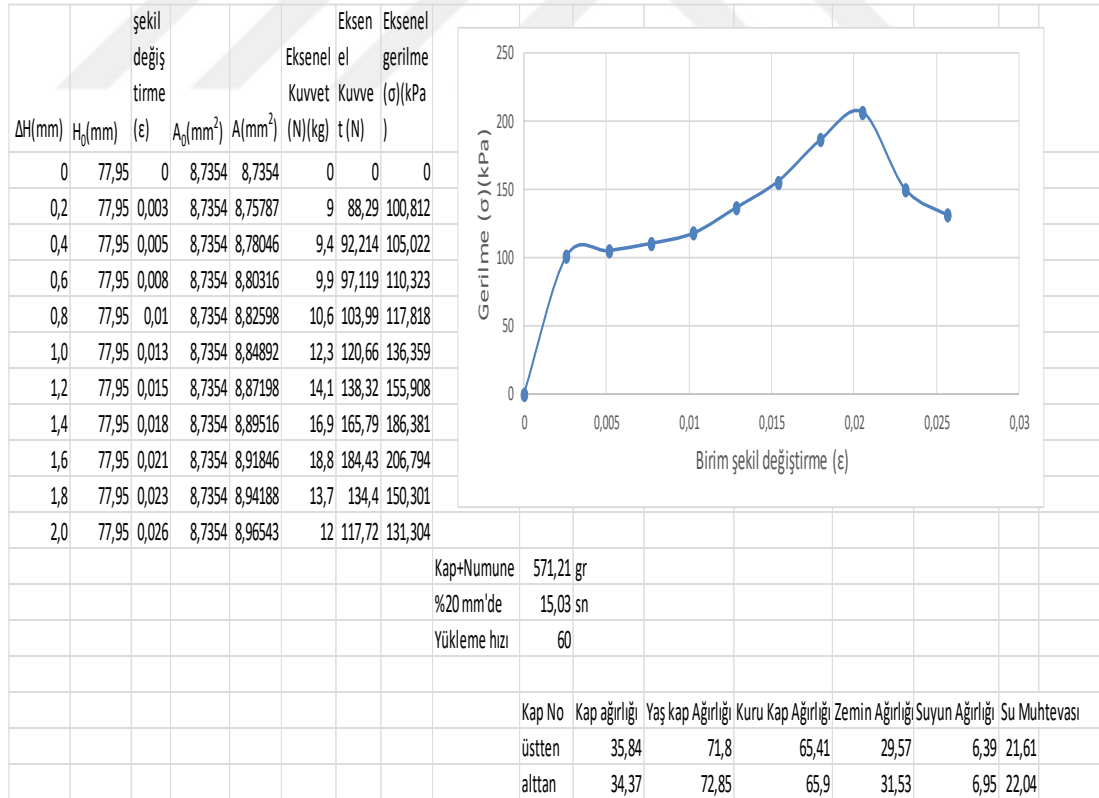
Şekil B.5. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



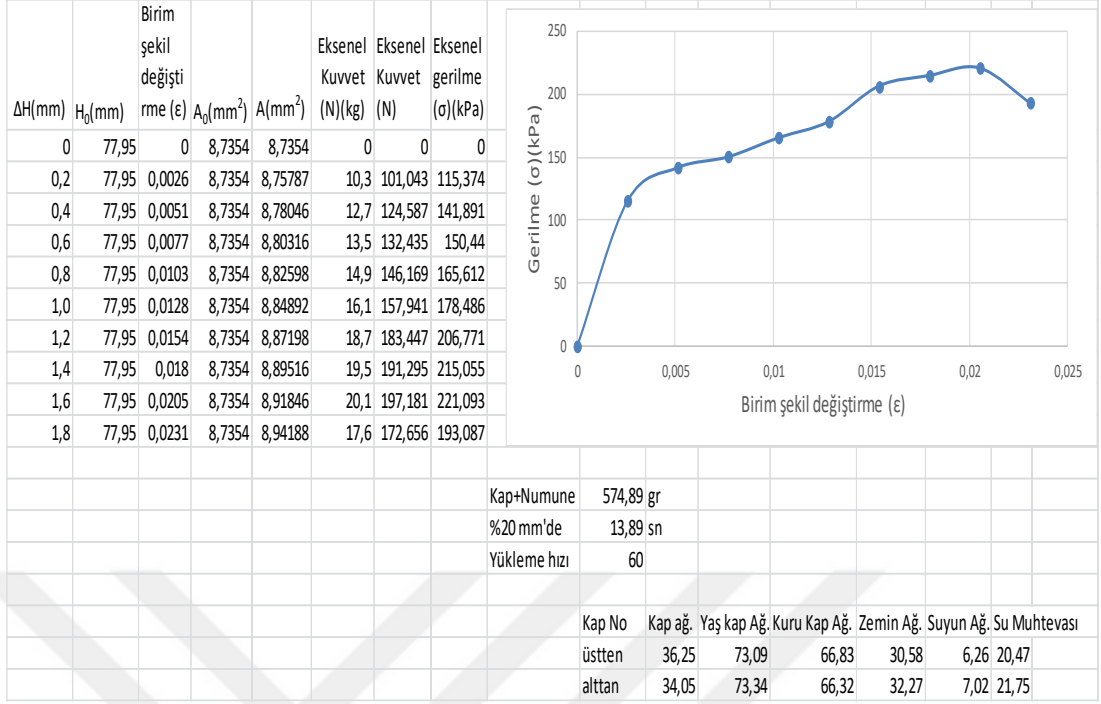
Şekil B.6. Optimum su muhtevasında doğal zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



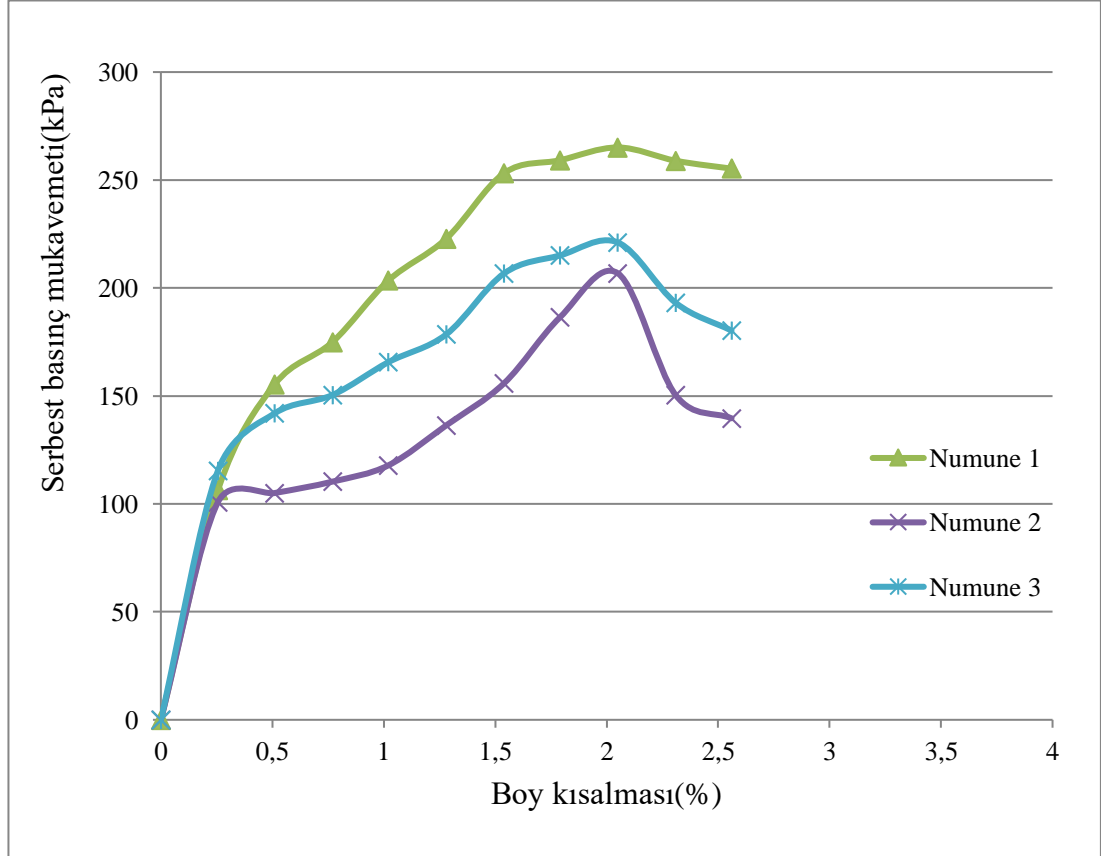
Şekil B.7. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



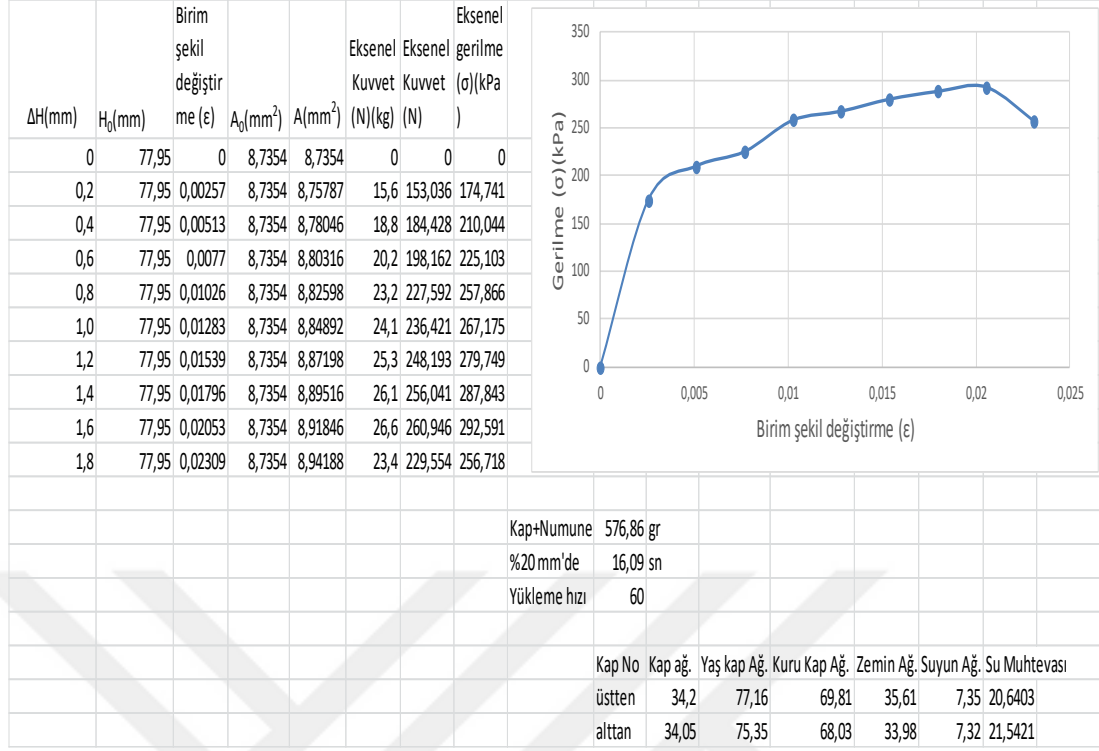
Şekil B.8. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



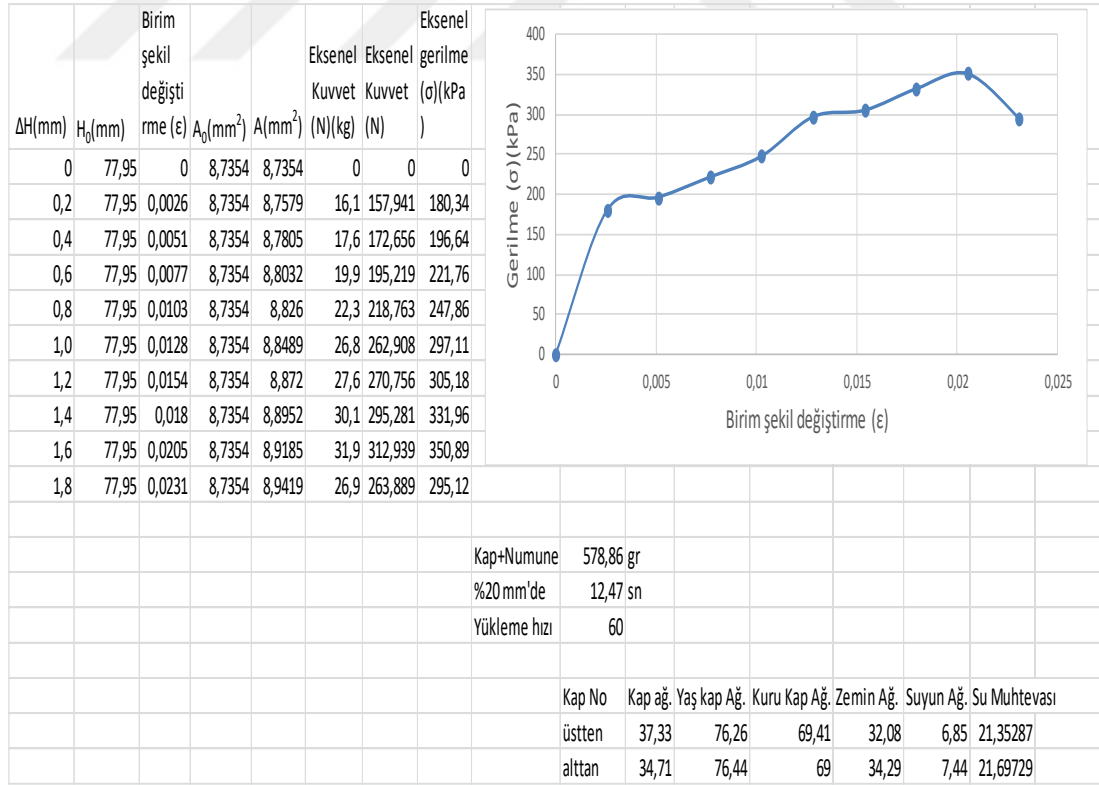
Şekil B.9. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



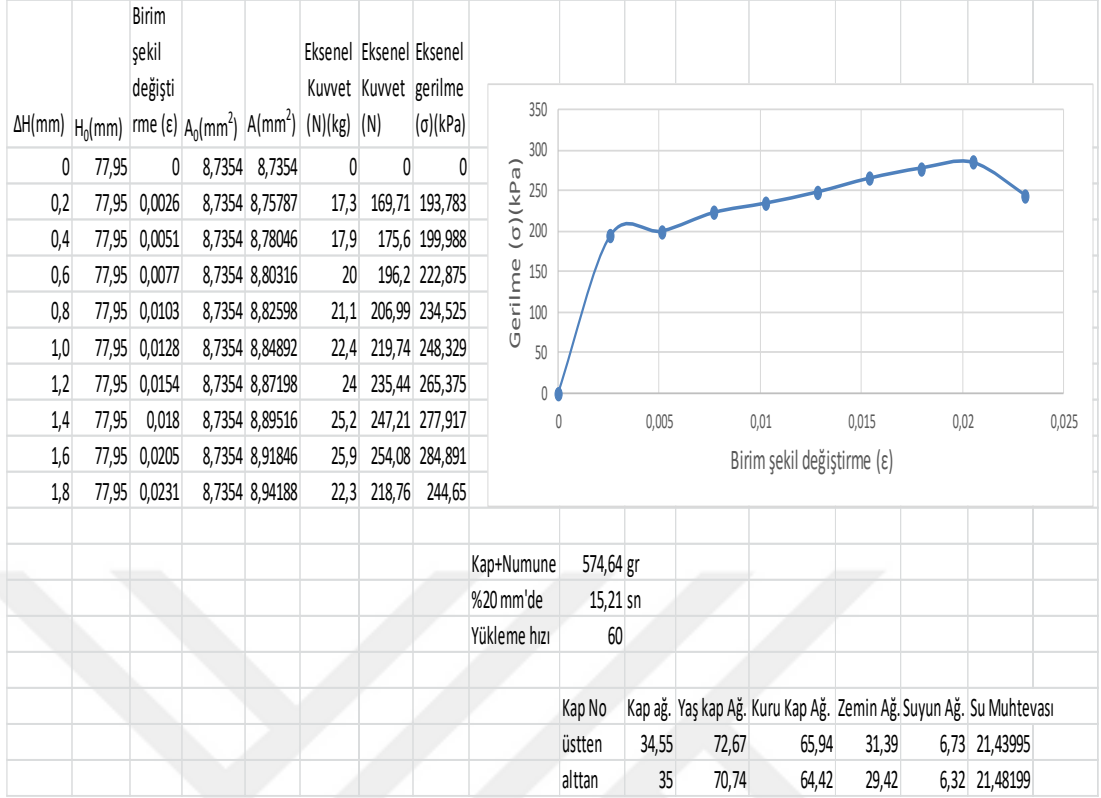
Şekil B.10. %8 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafik kıyaslaması



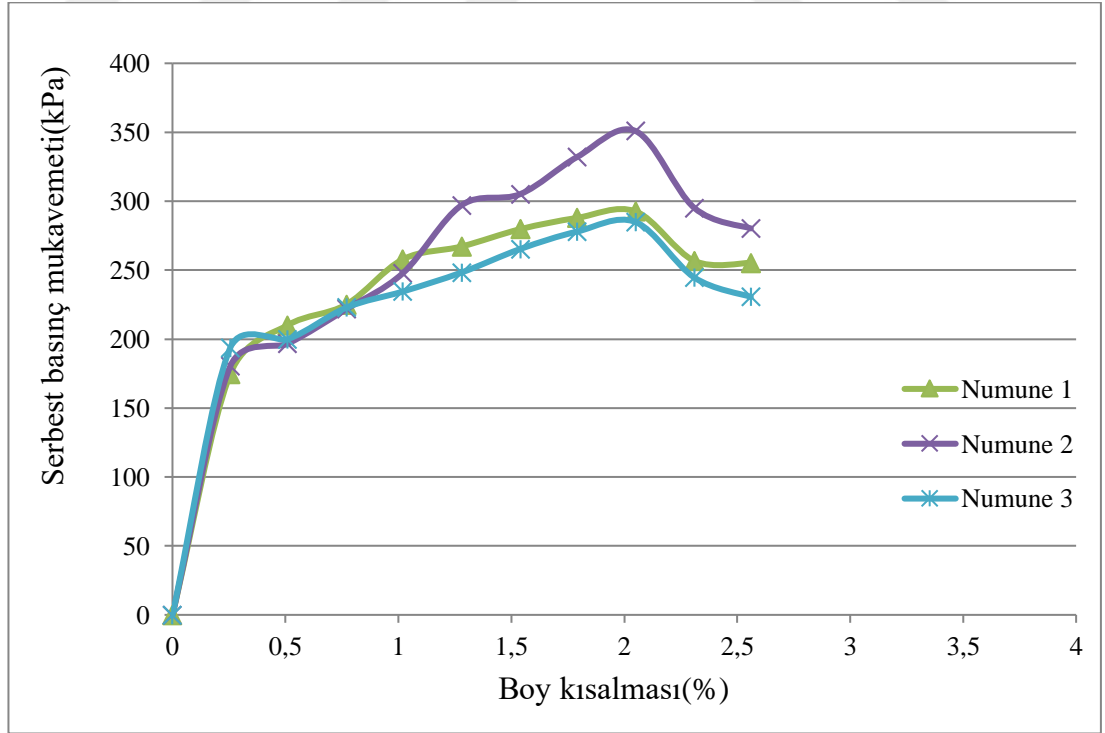
Şekil B.11. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



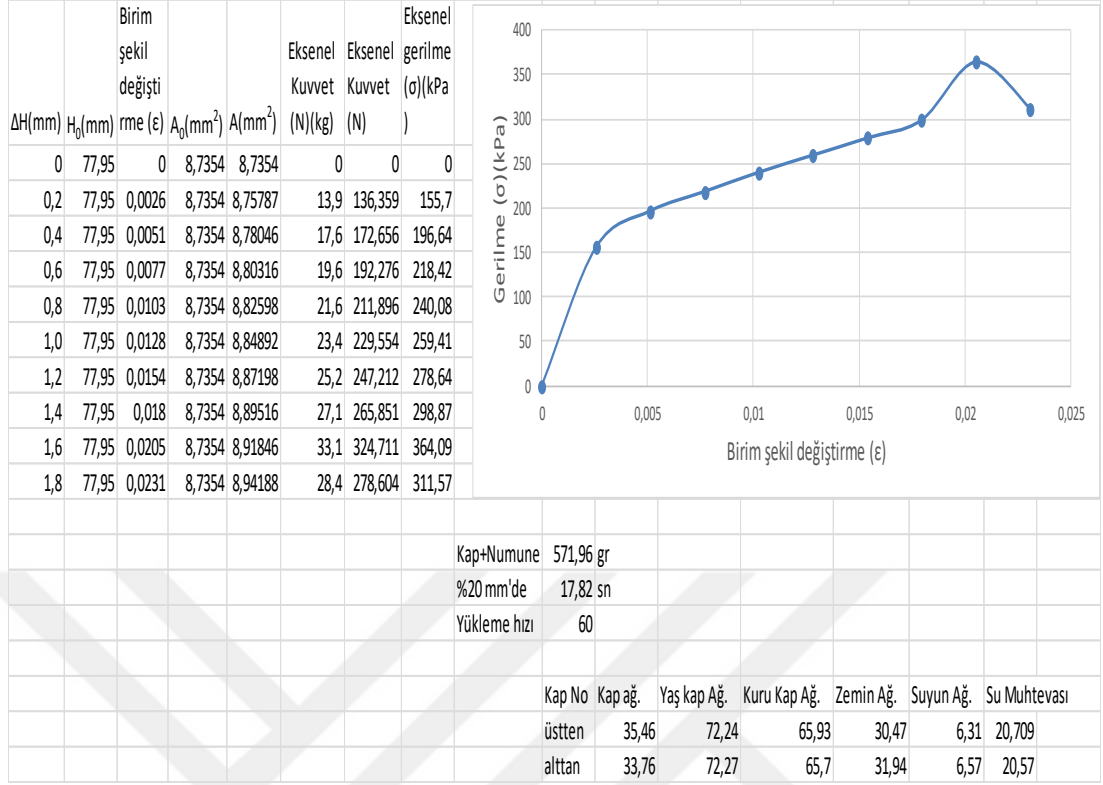
Şekil B.12. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



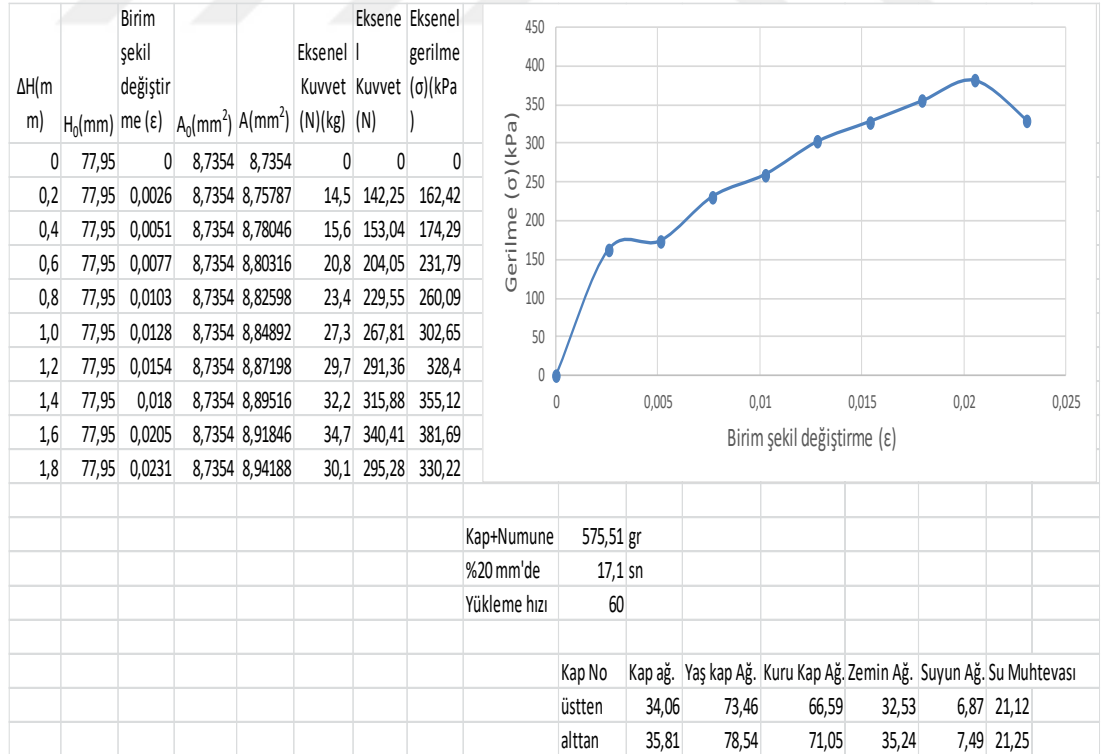
Şekil B.13. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



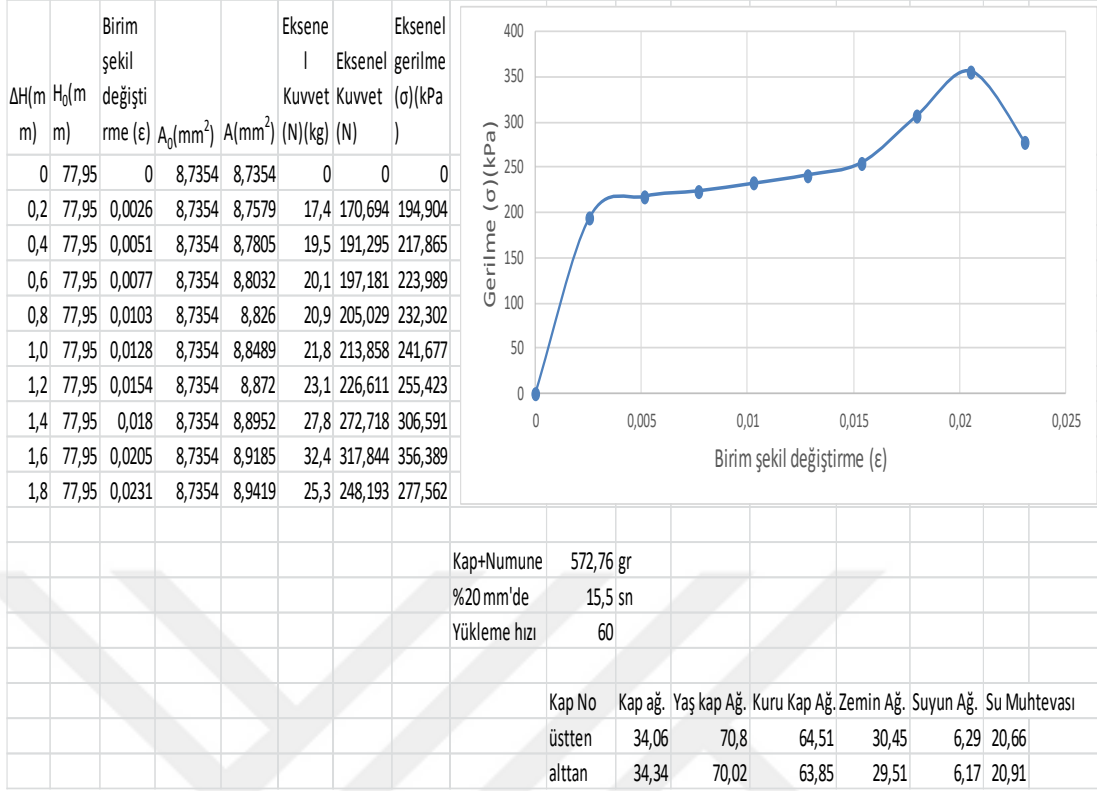
Şekil B.14. %8 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



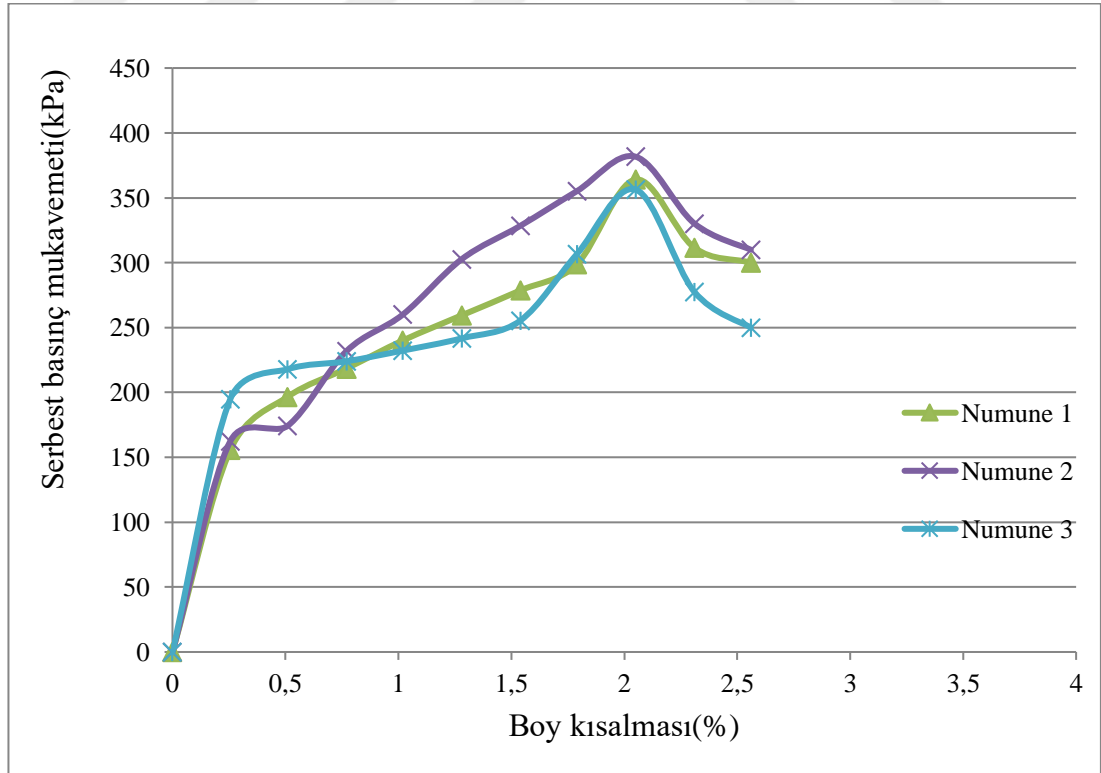
Şekil B.15. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



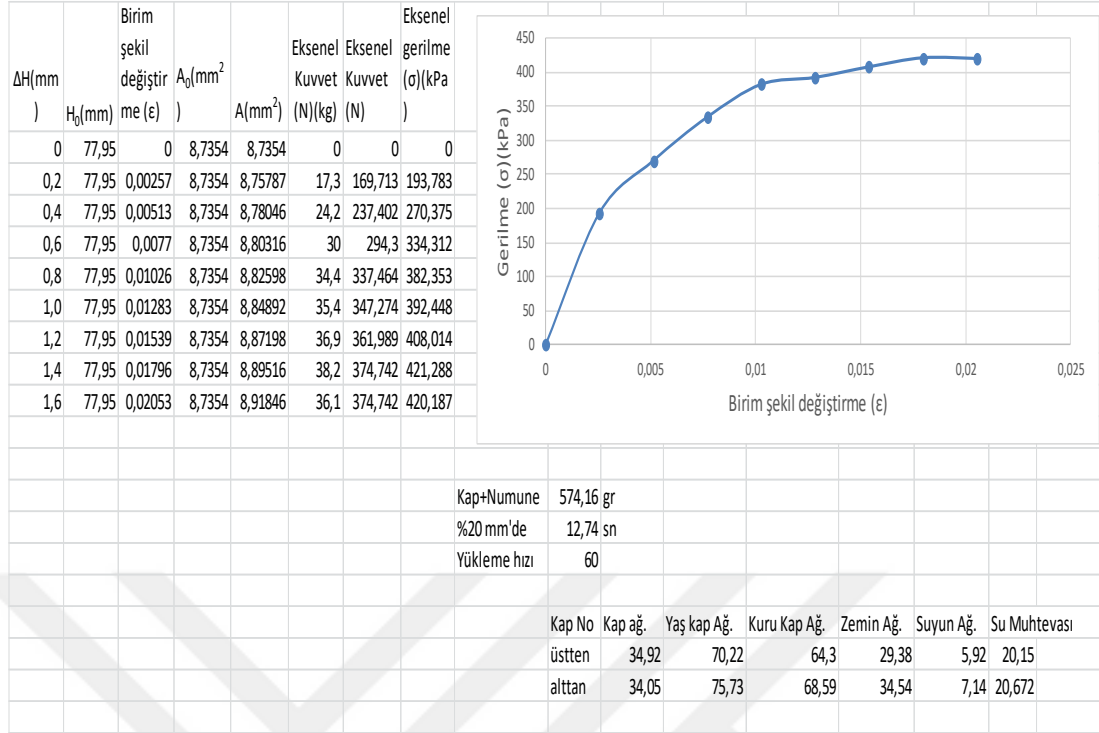
Şekil B.16. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



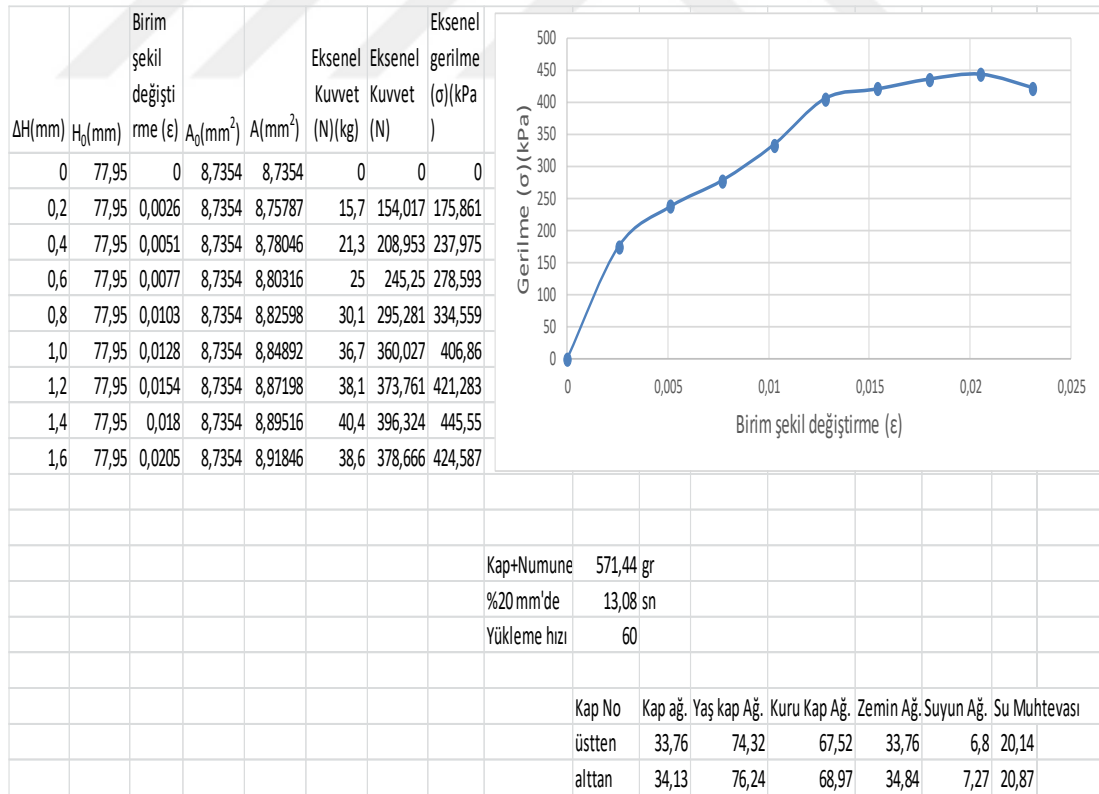
Şekil B.17. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



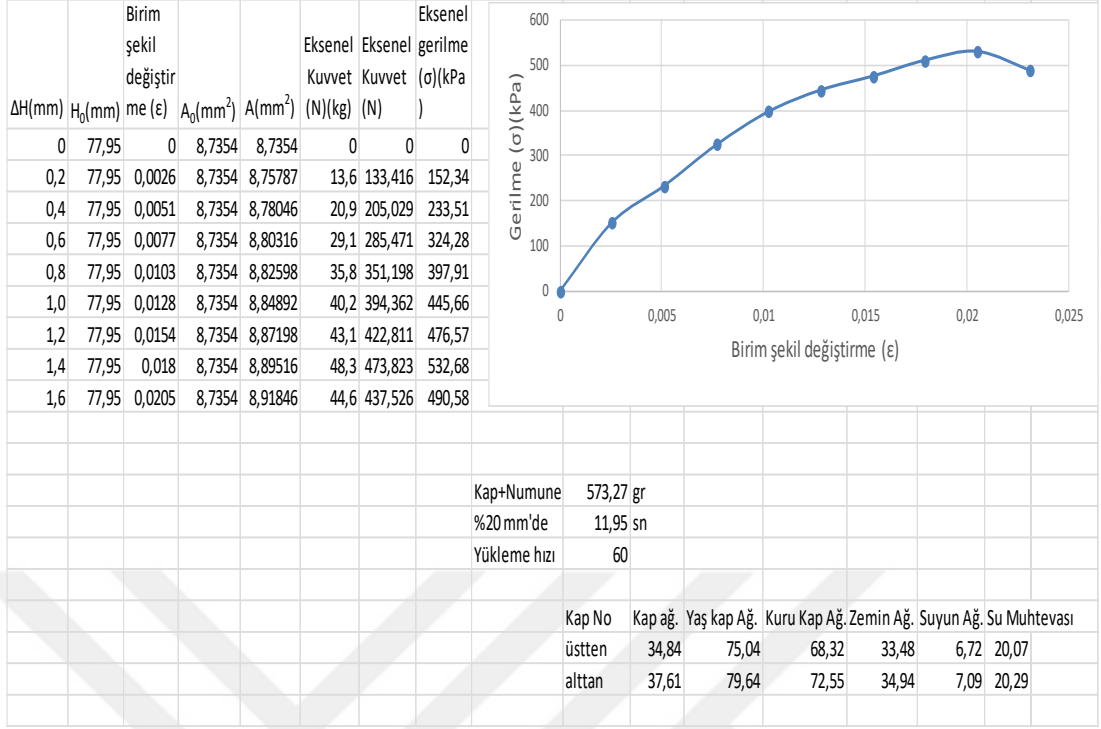
Şekil B.18. %8 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



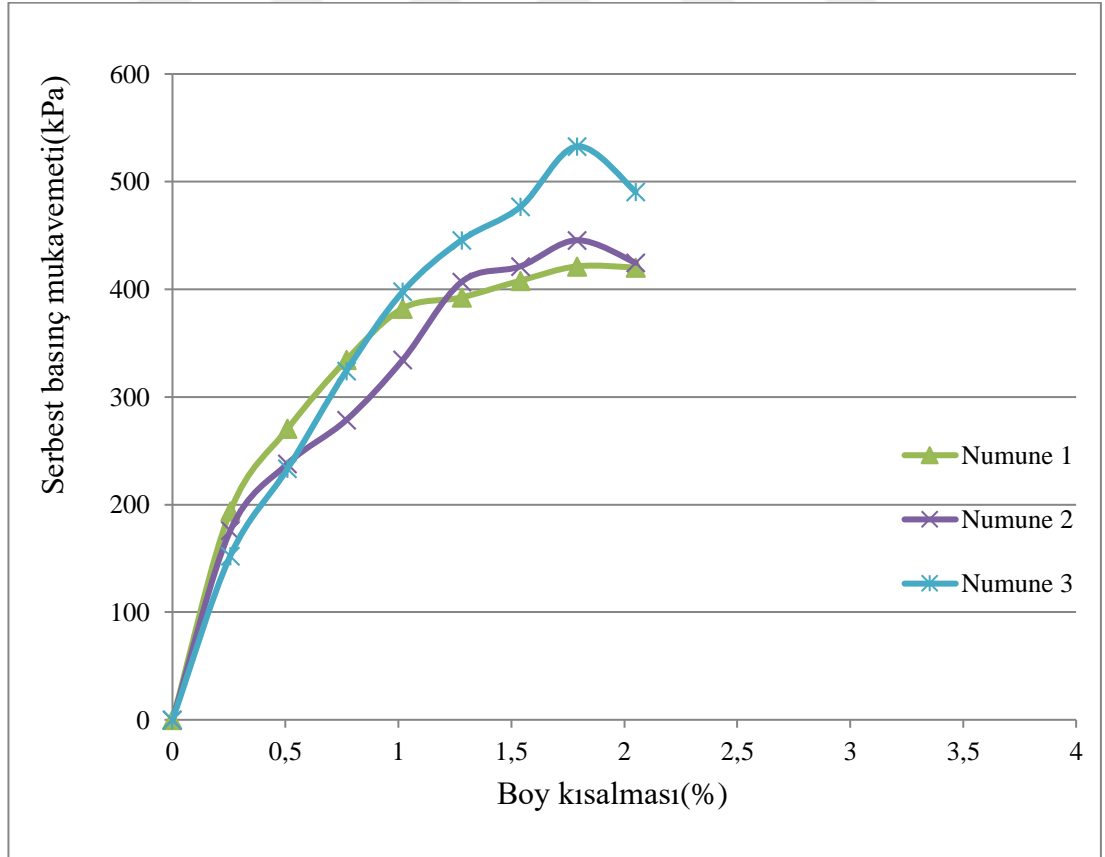
Şekil B.19. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



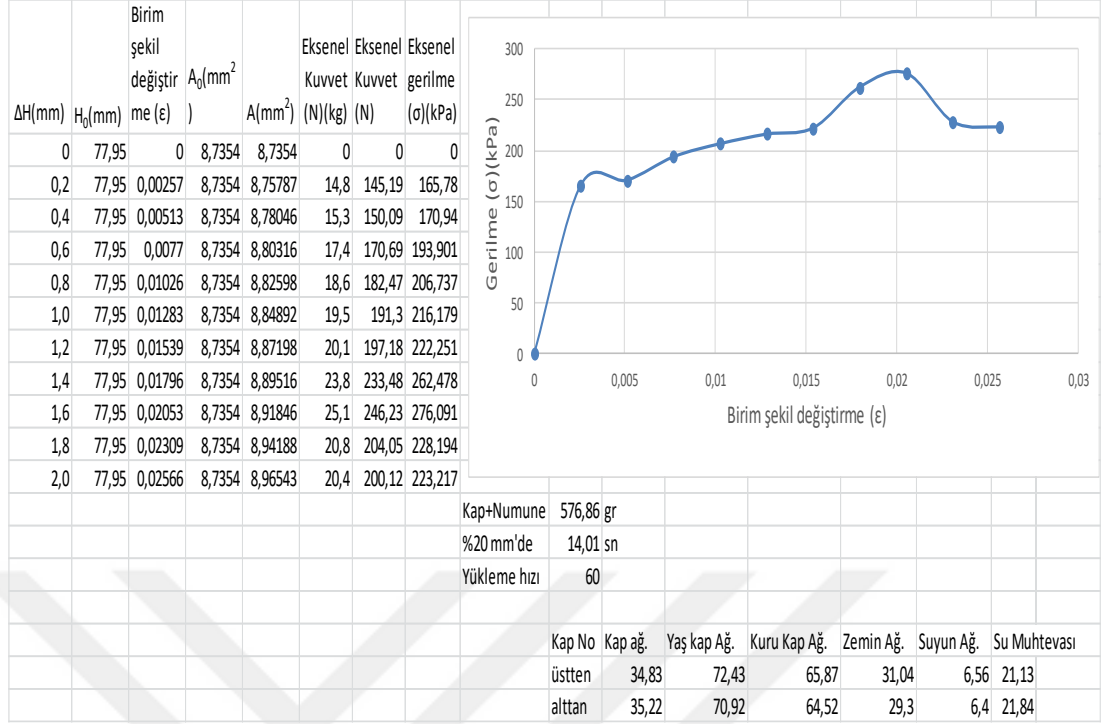
Şekil B.20. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



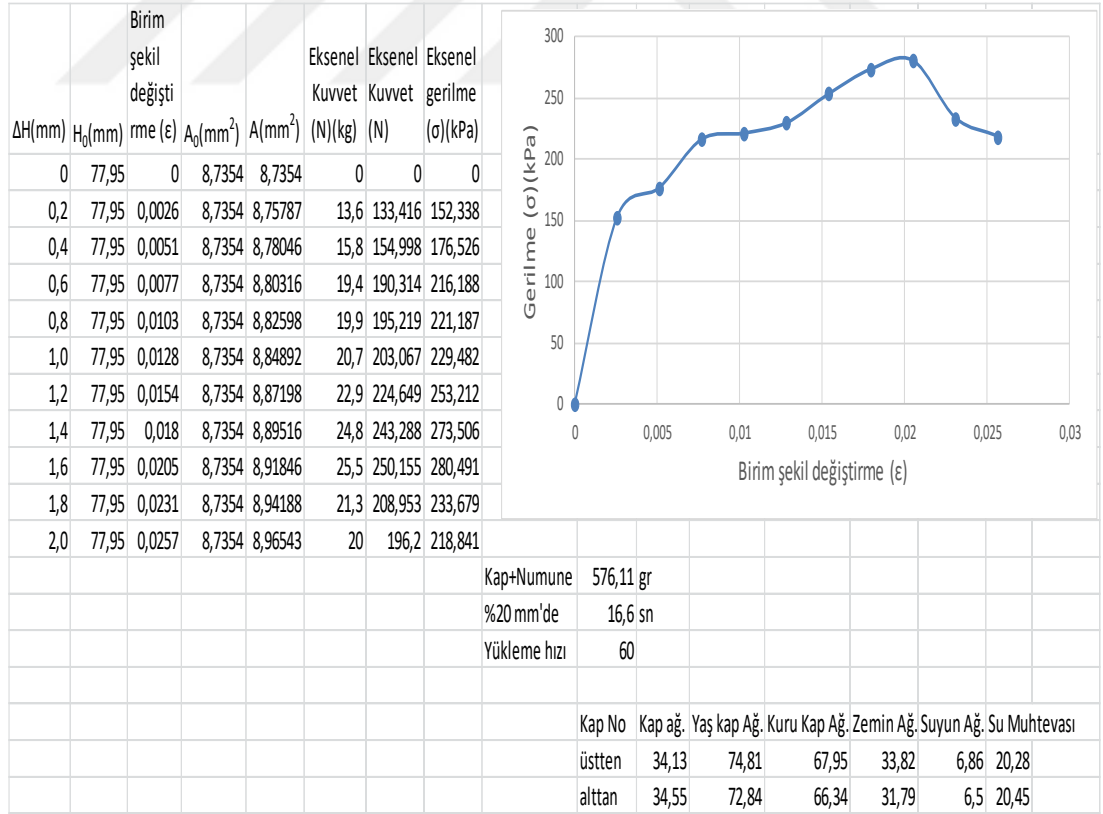
Şekil B.21. Optimum su muhtevasında %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3



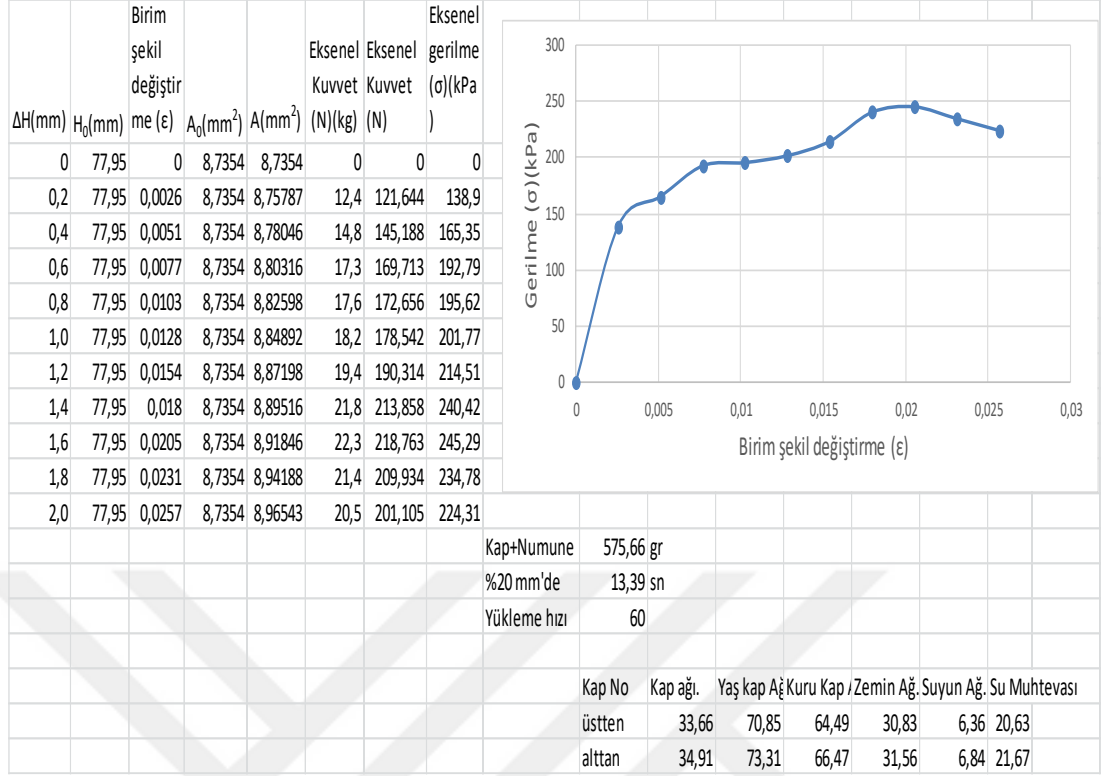
Şekil B.22. %8 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri



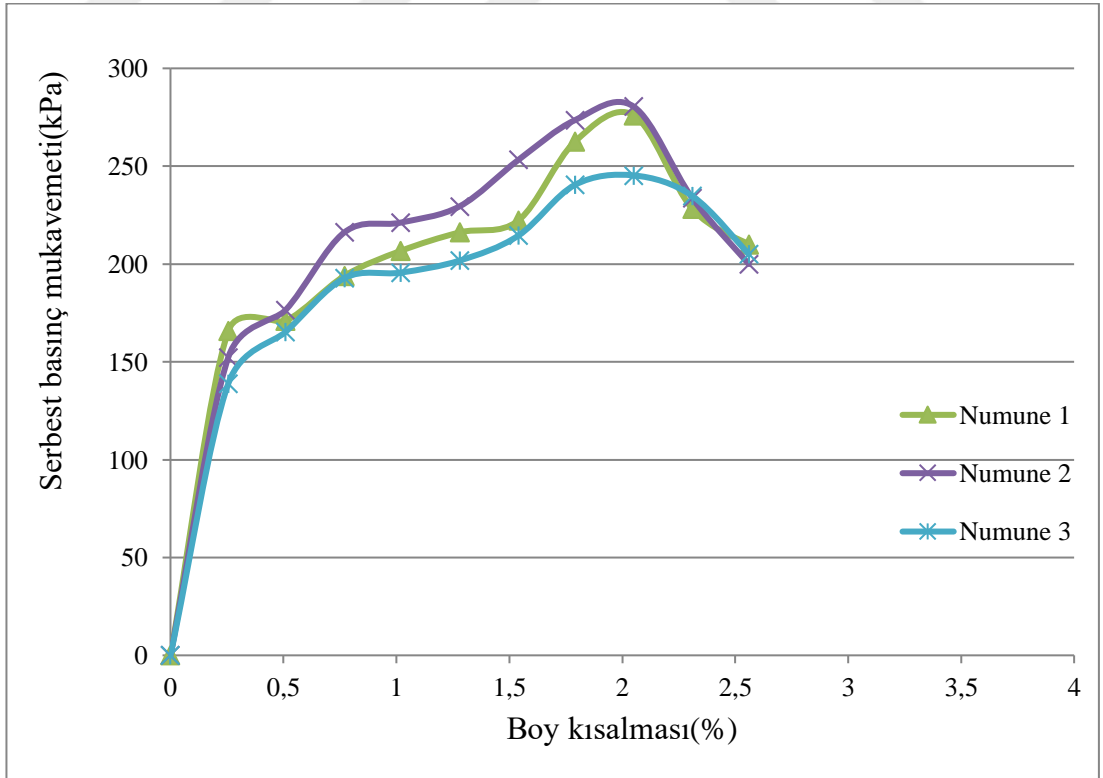
Şekil B.23. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



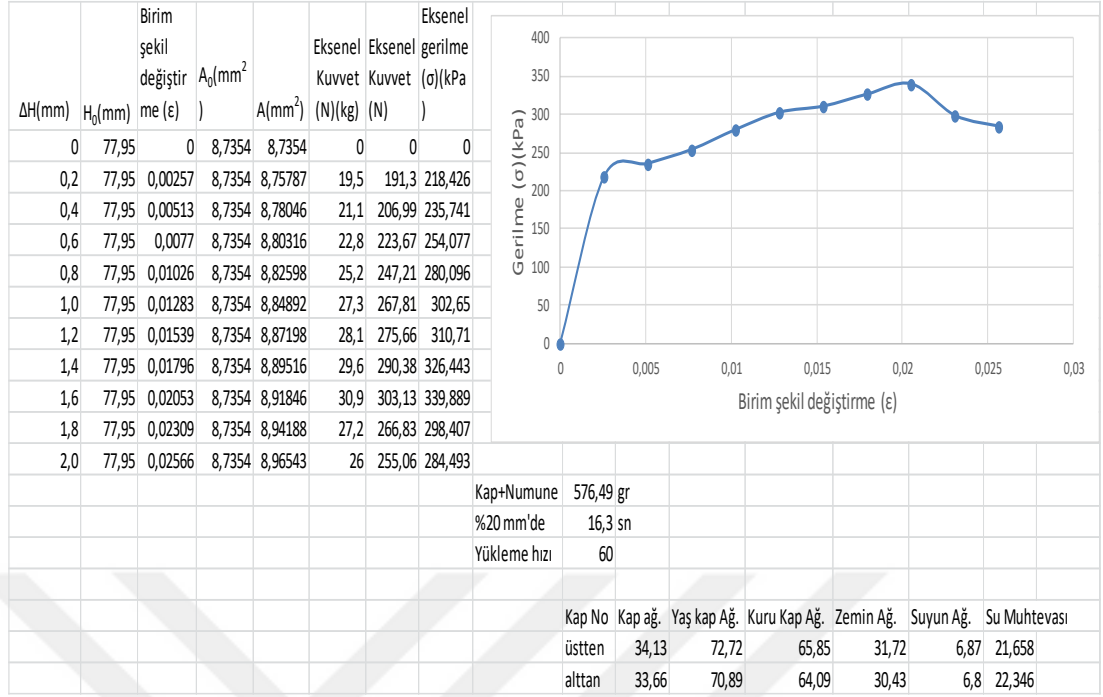
Şekil B.24. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



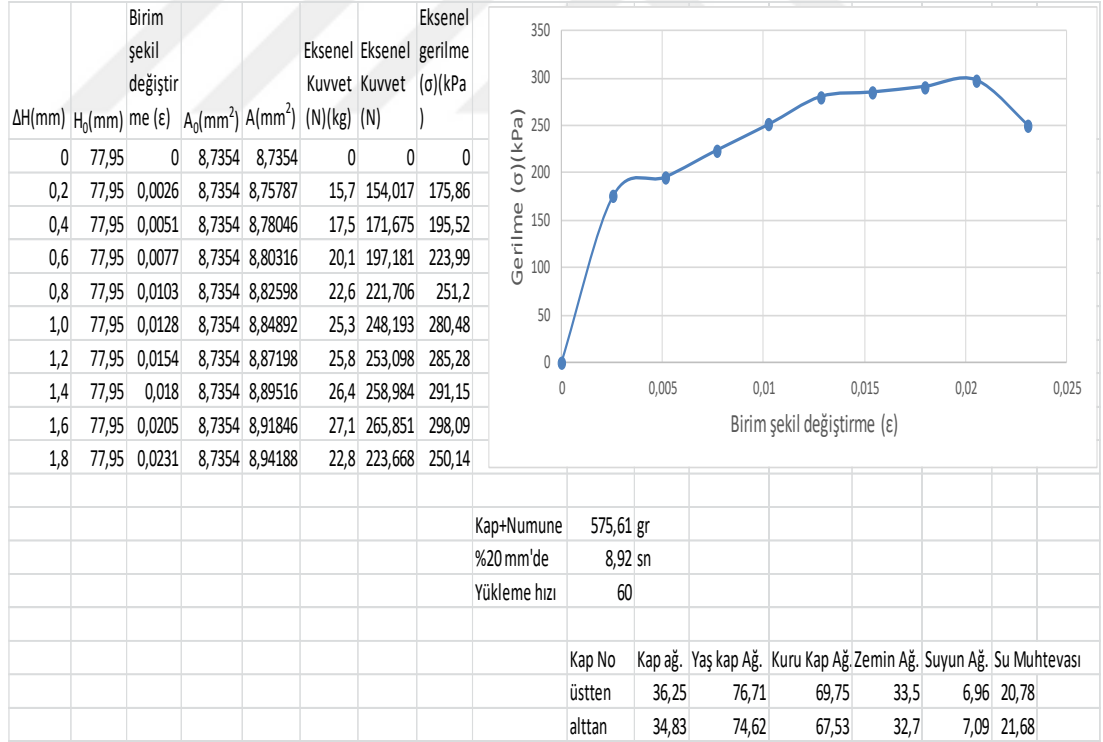
Şekil B.25. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



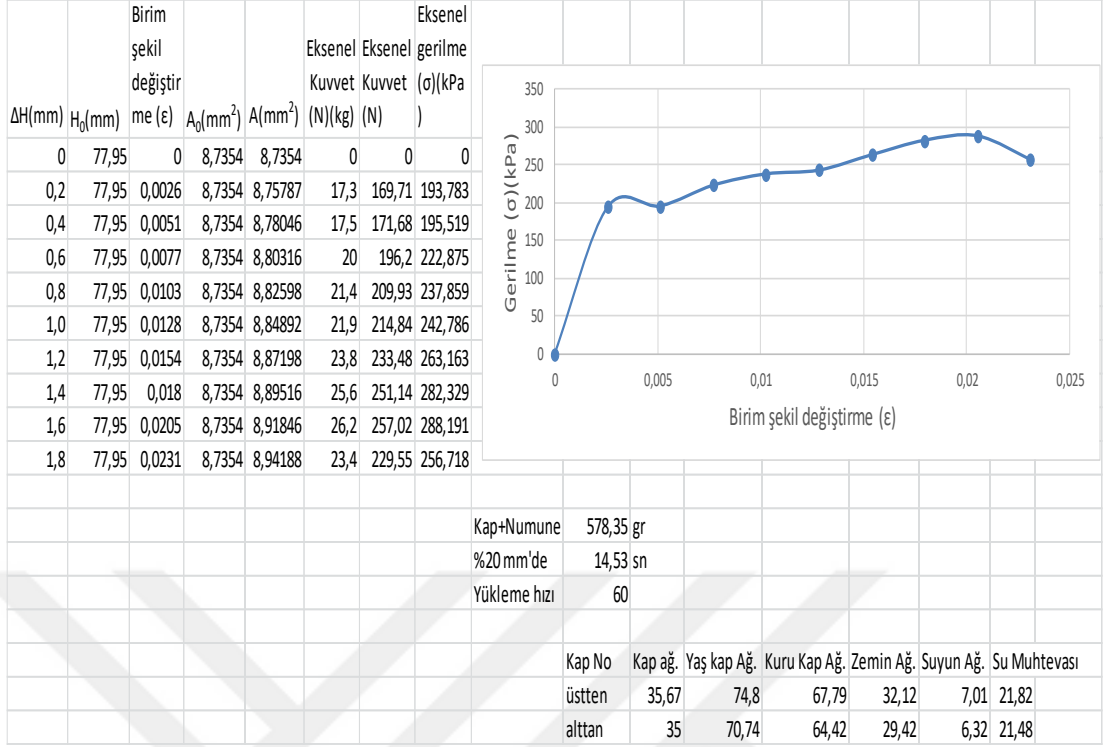
Şekil B.26. % 12 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafikleri



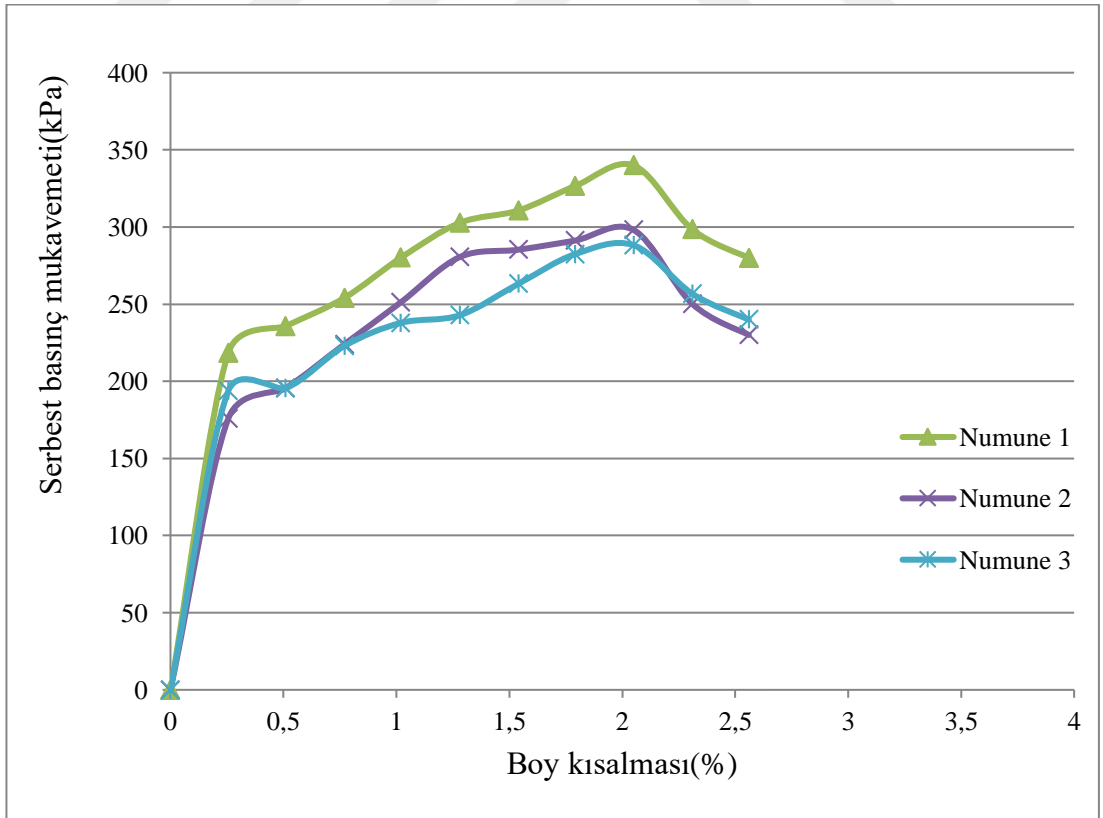
Şekil B.27. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



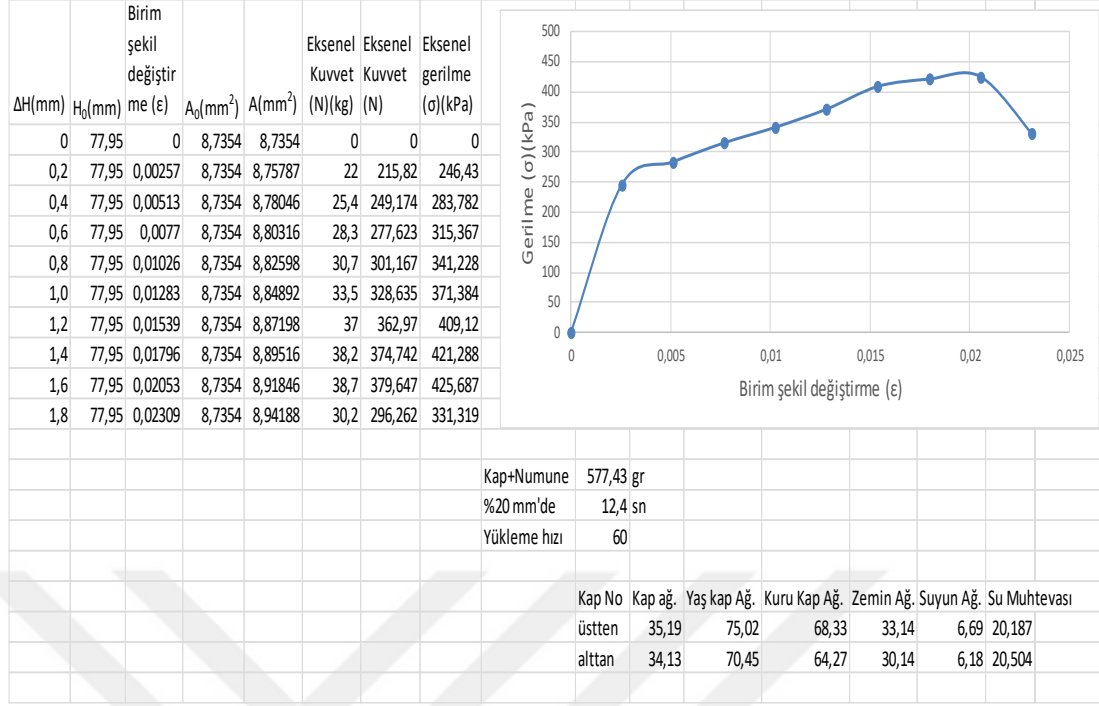
Şekil B.28. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



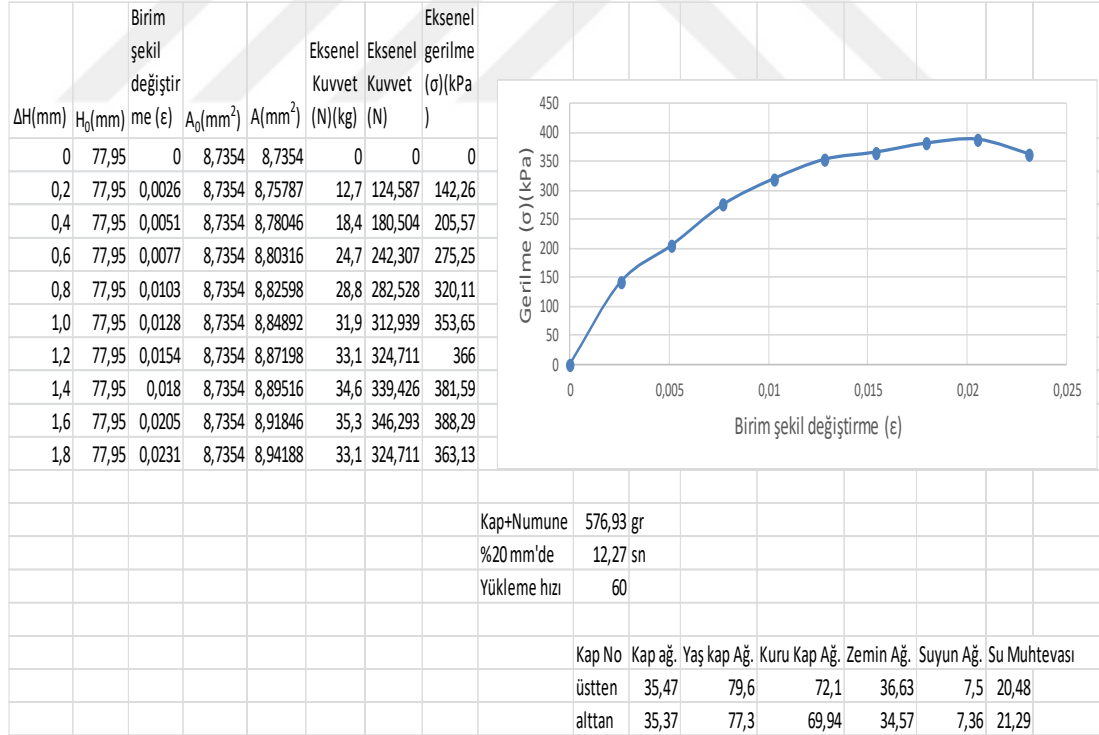
Şekil B.29. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



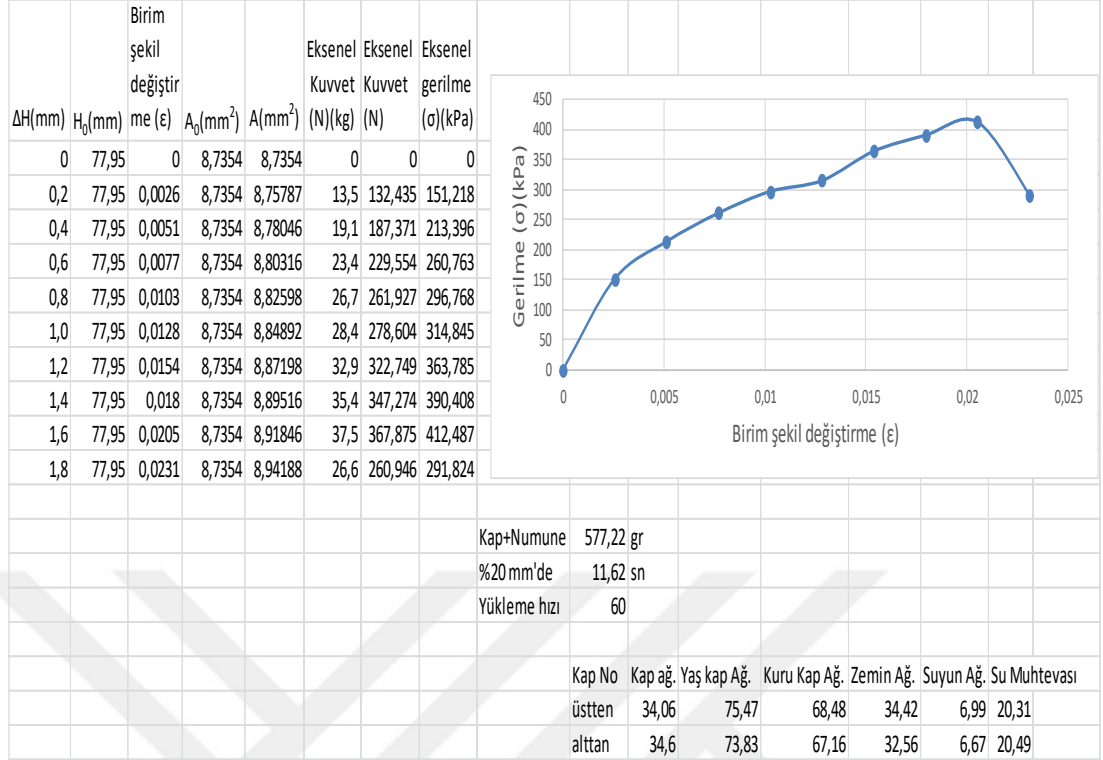
Şekil B.30. %12 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



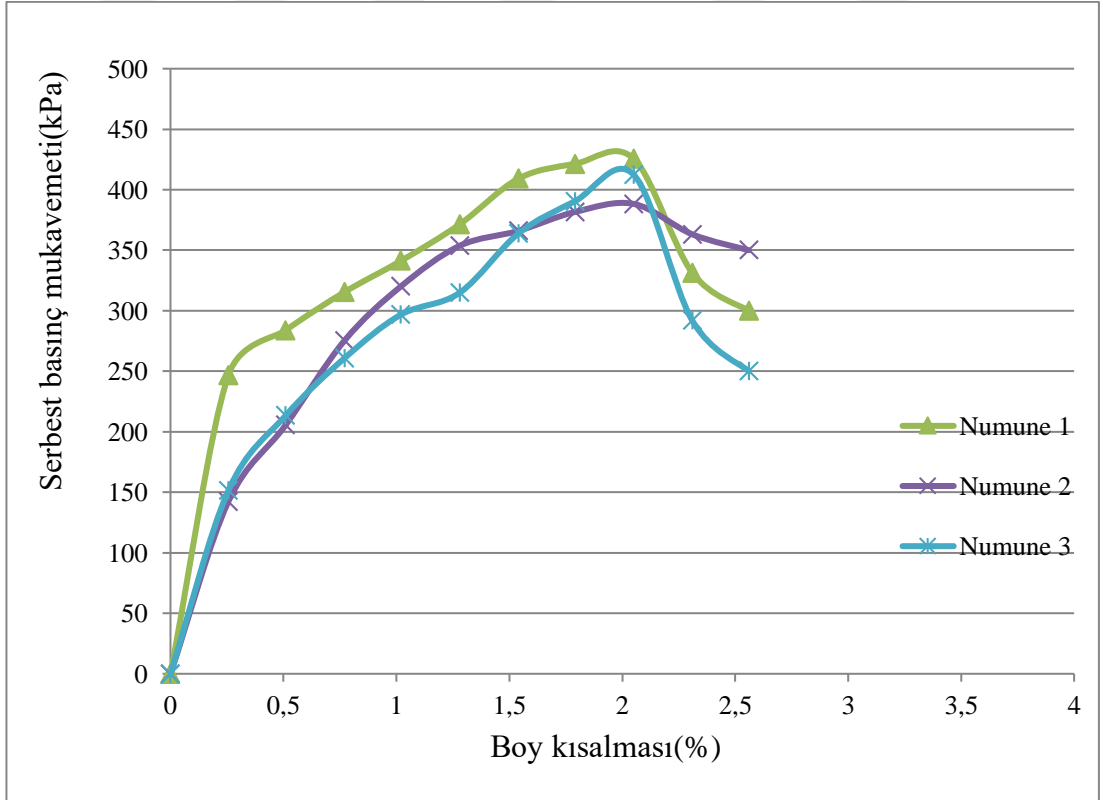
Şekil B.31. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



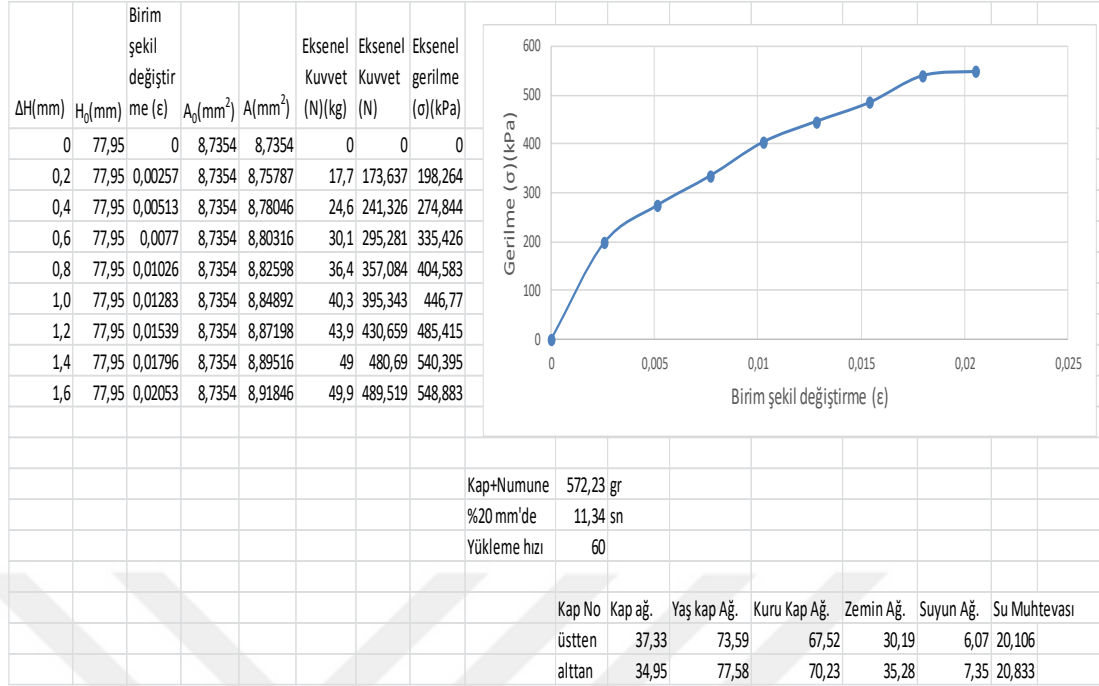
Şekil B.32. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



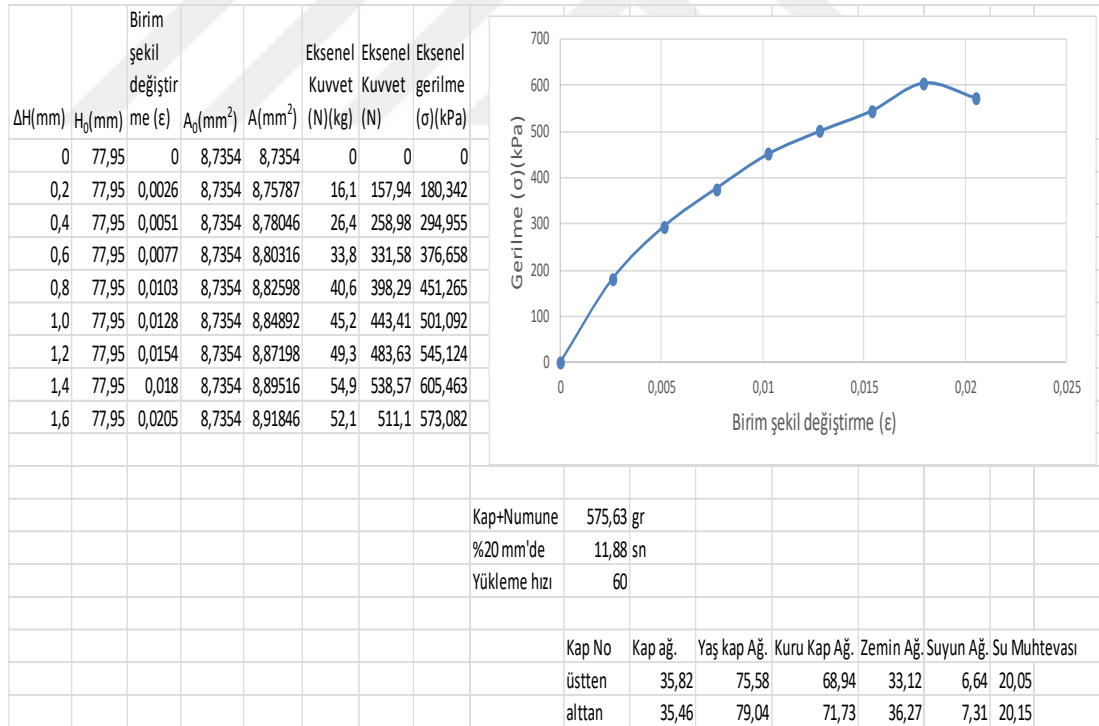
Şekil B.33. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



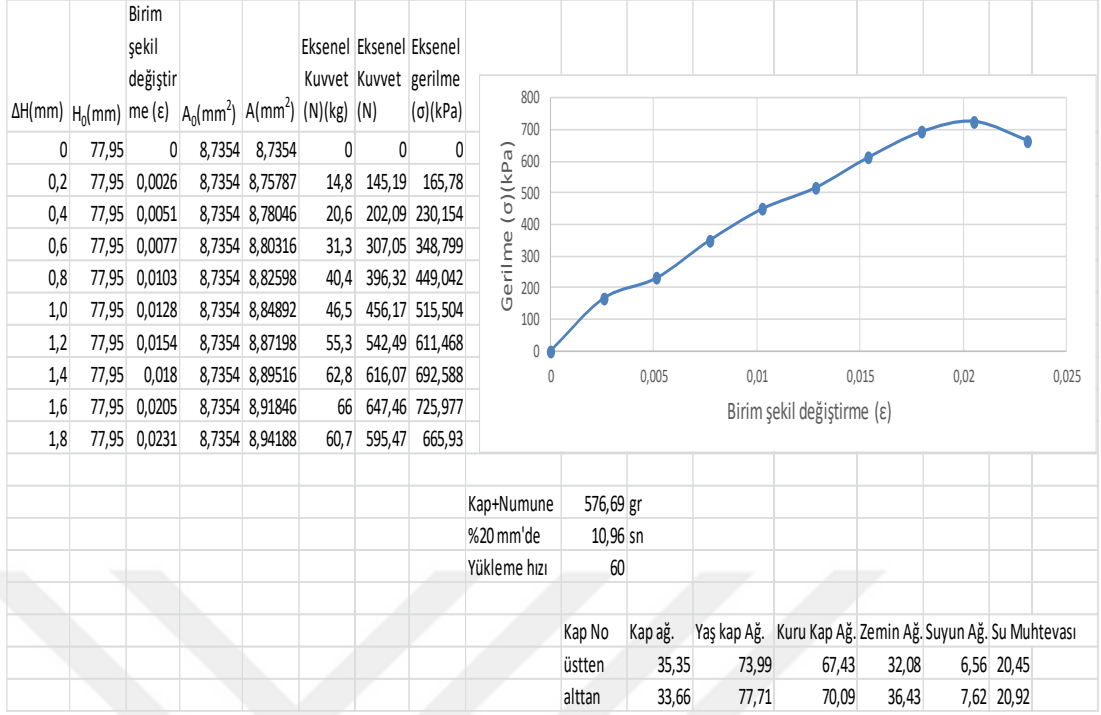
Şekil B.34. %12 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



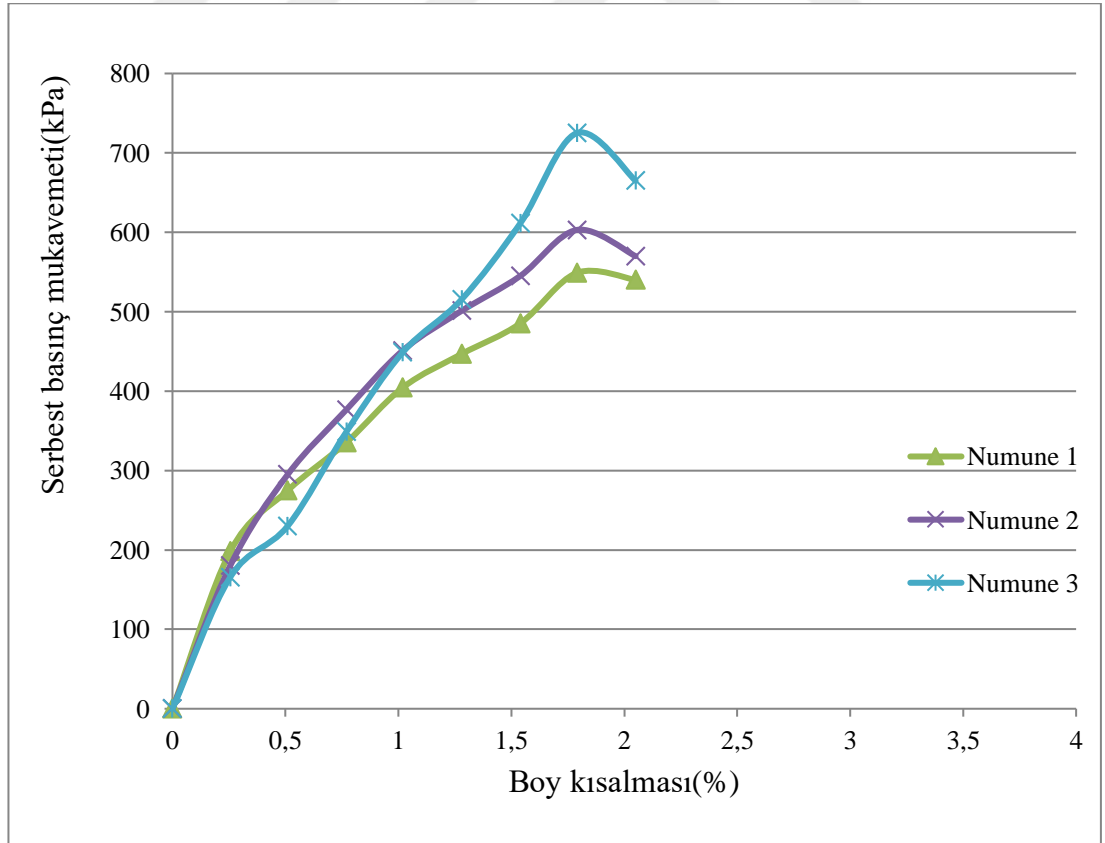
Şekil B.35. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



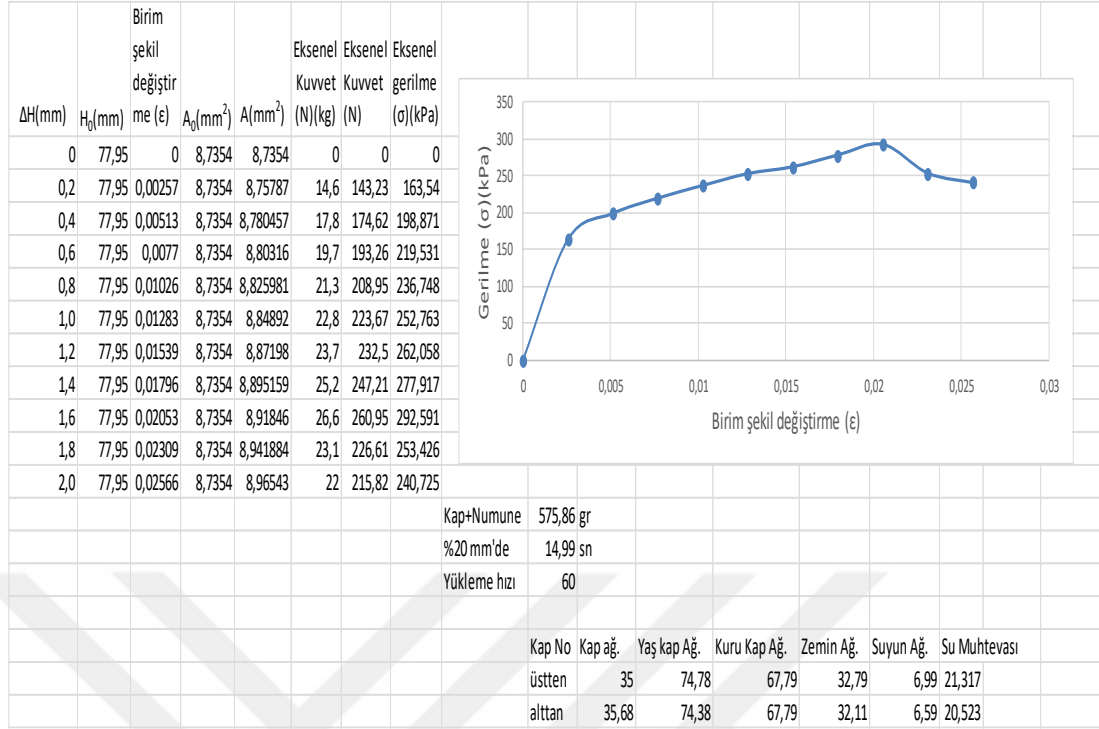
Şekil B.36. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



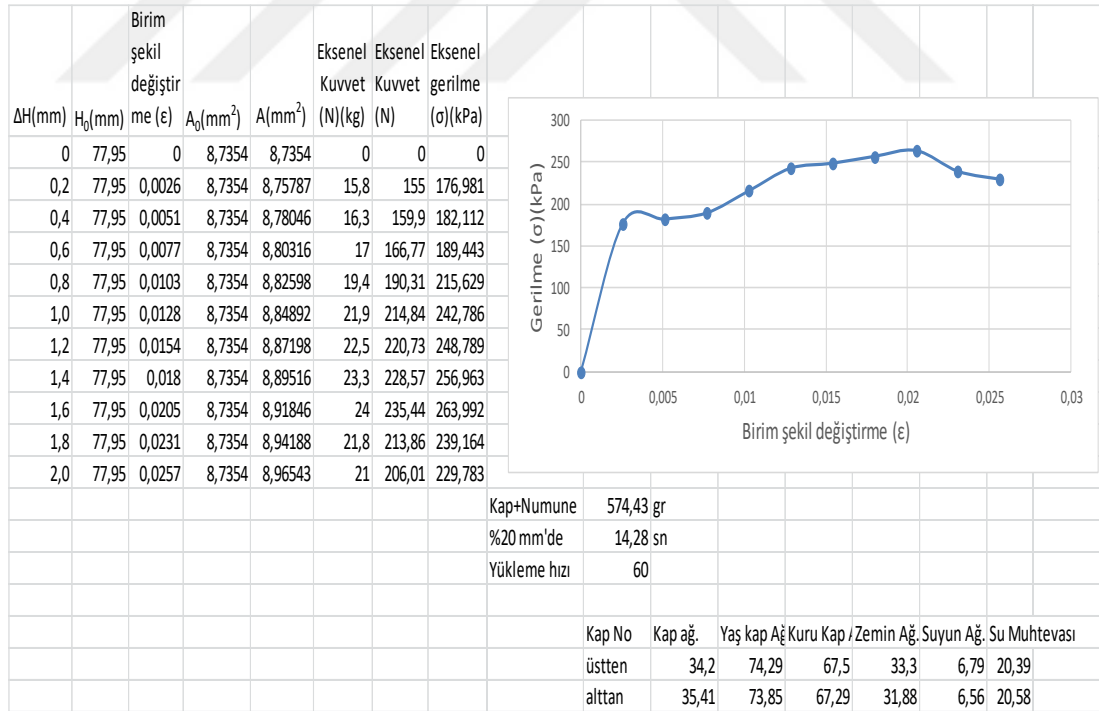
Şekil B.37. Optimum su muhtevasında %12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3



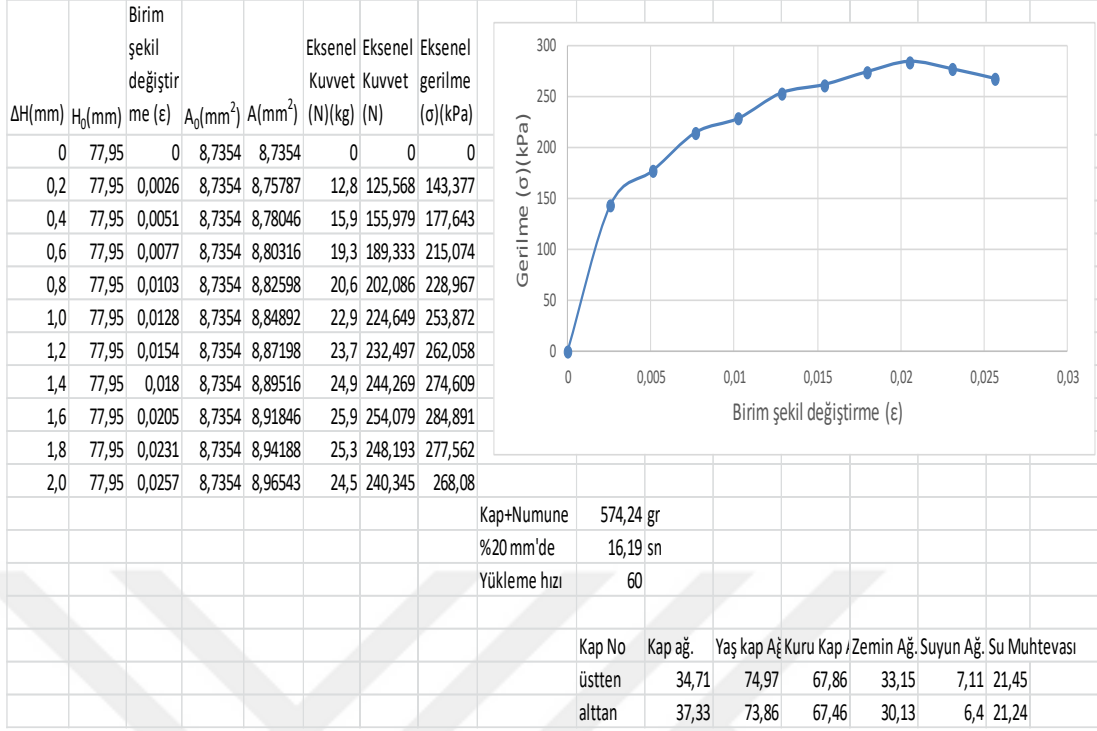
Şekil B.38. % 12 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri



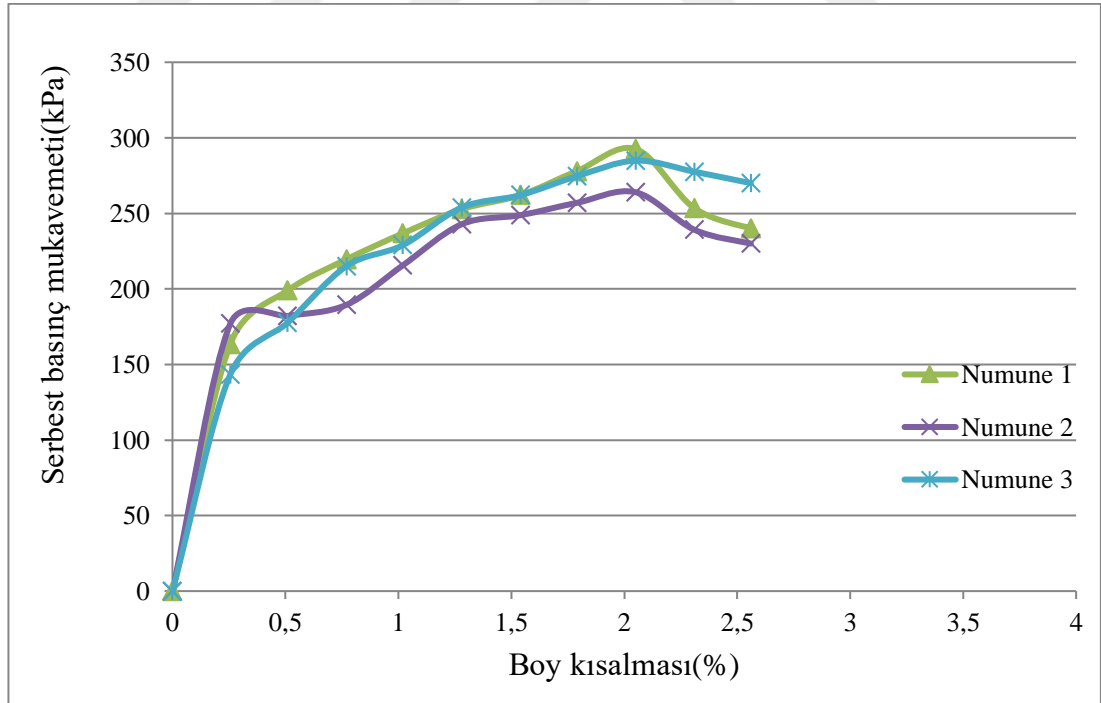
Şekil B.39. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



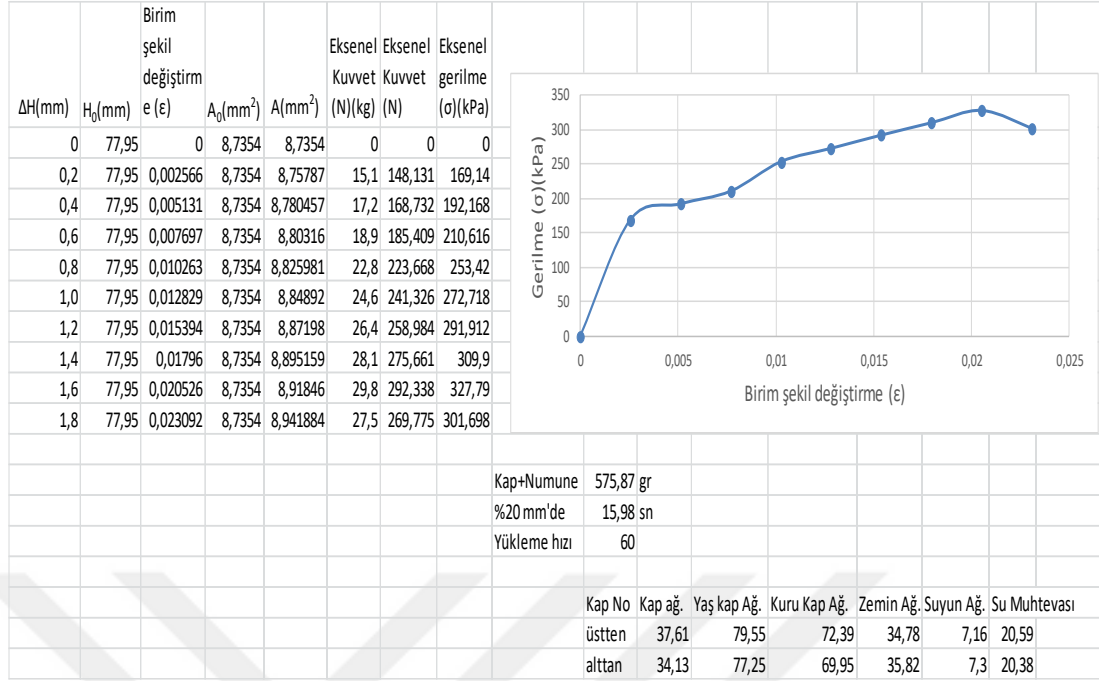
Şekil B.40. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



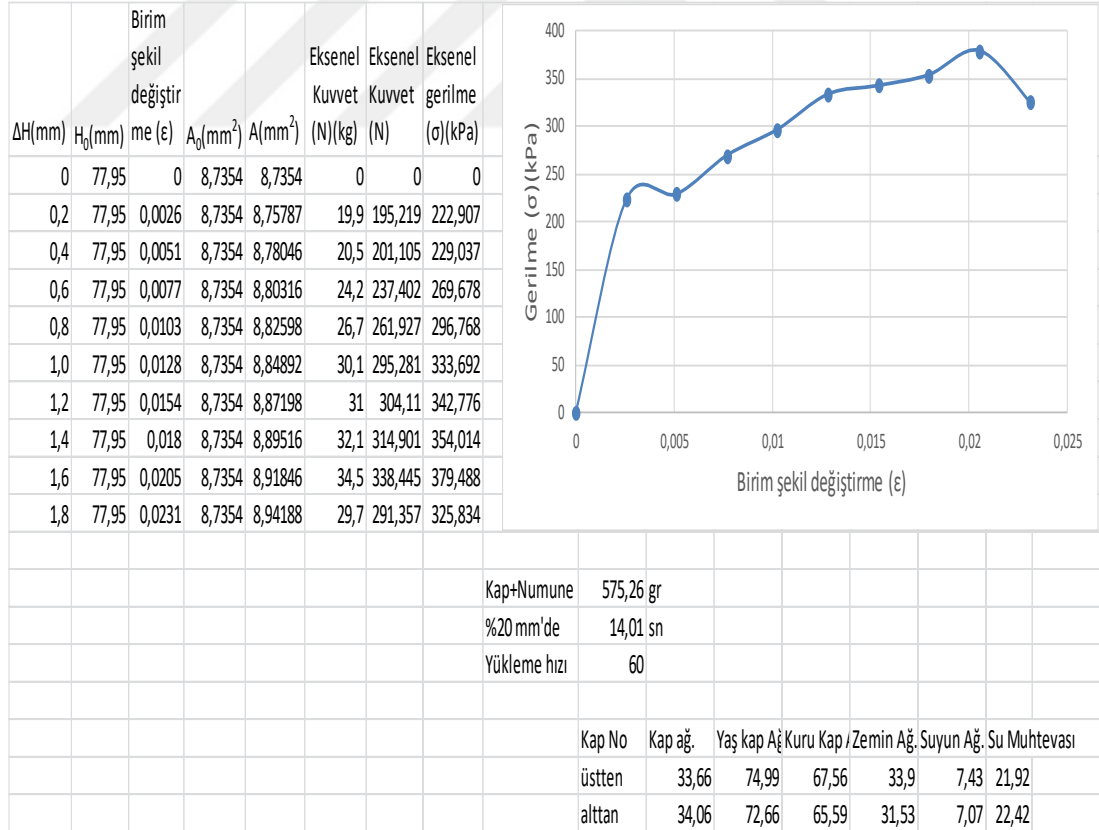
Şekil B.41. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



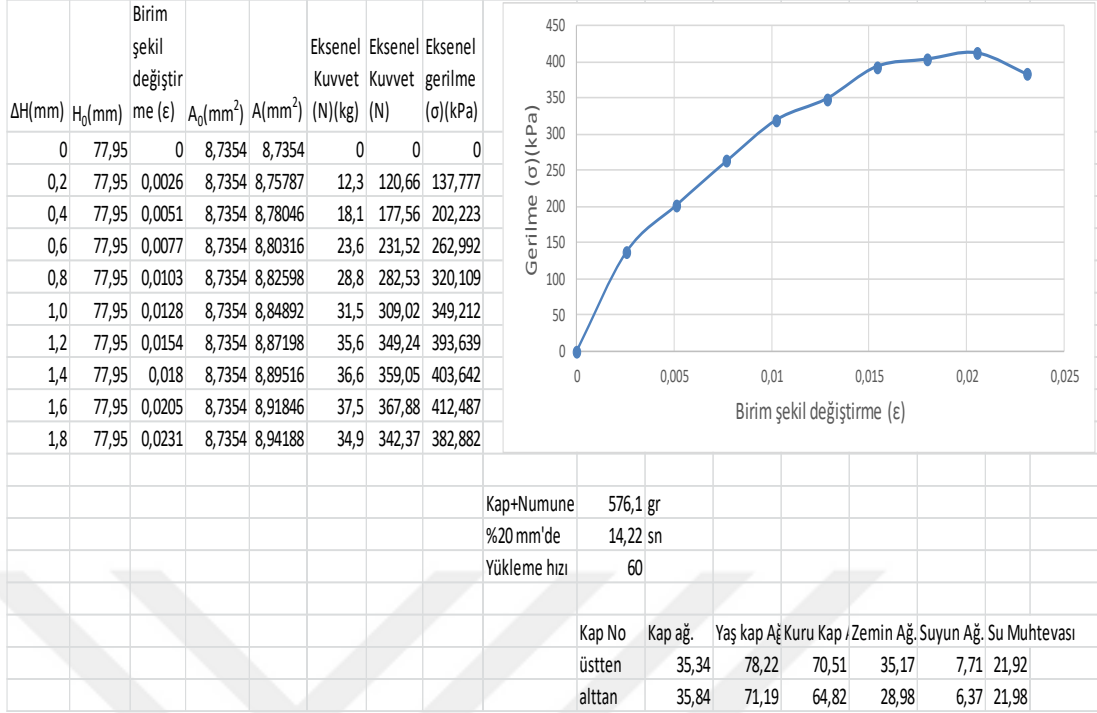
Şekil B.42. % 10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafikleri



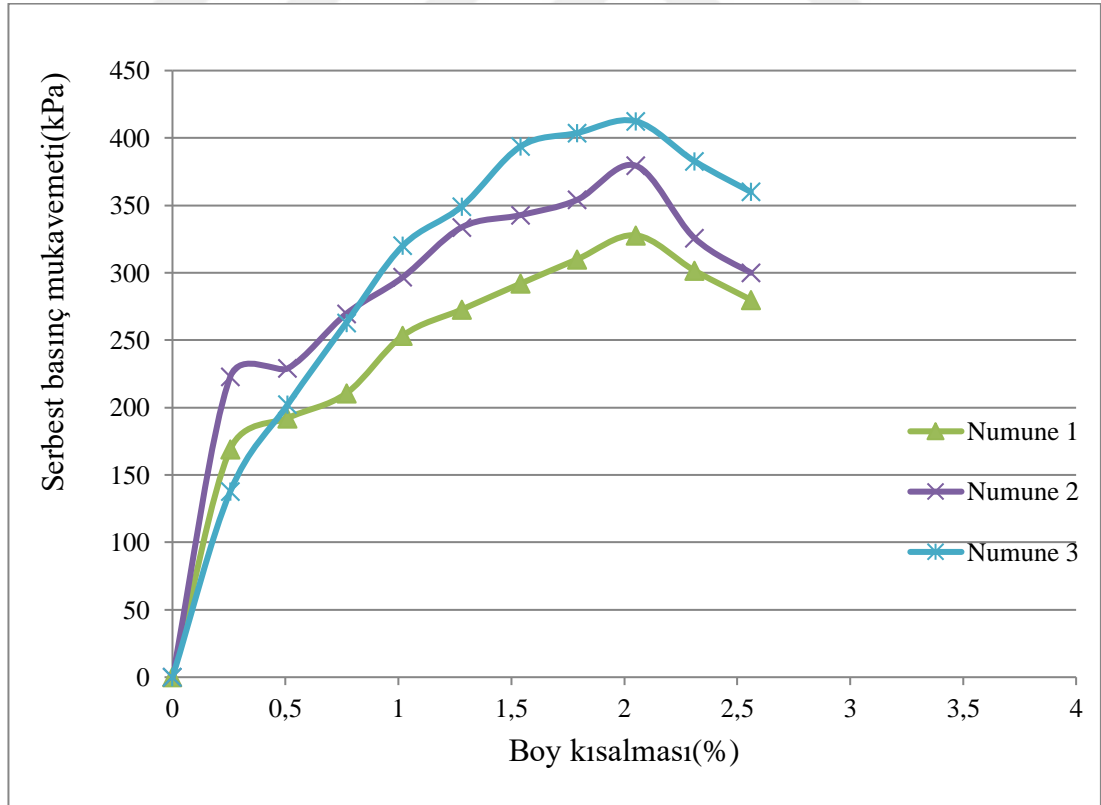
Şekil B.43. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



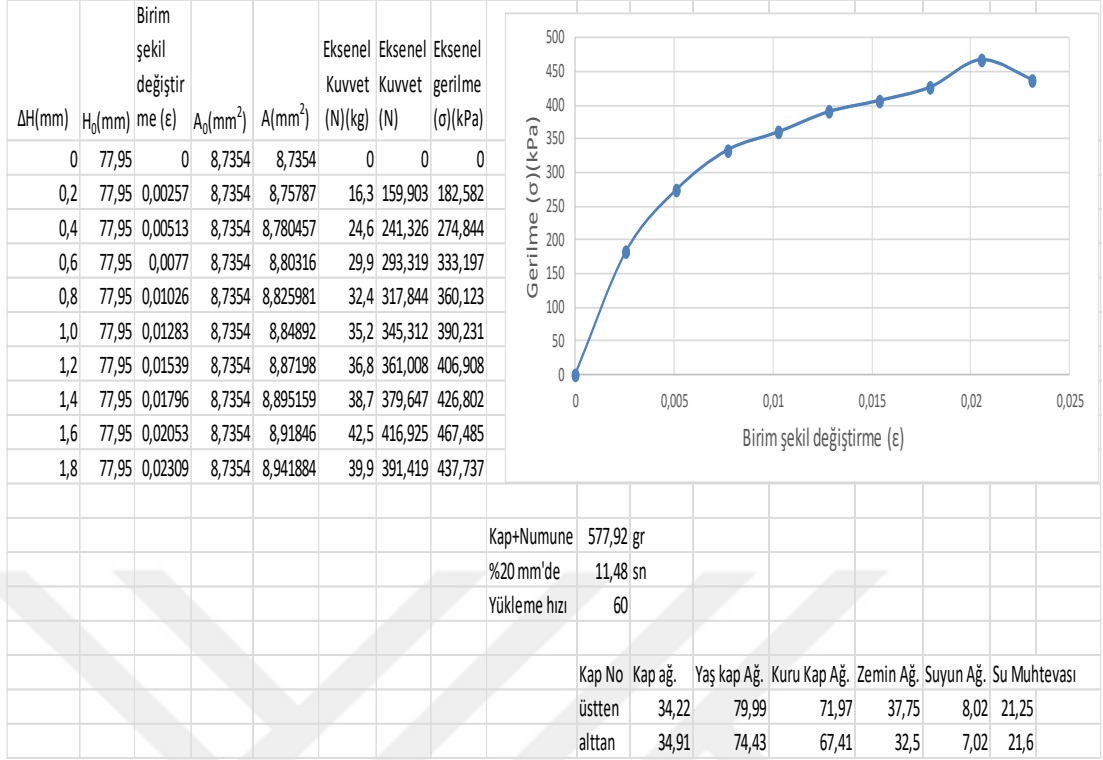
Şekil B.44. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



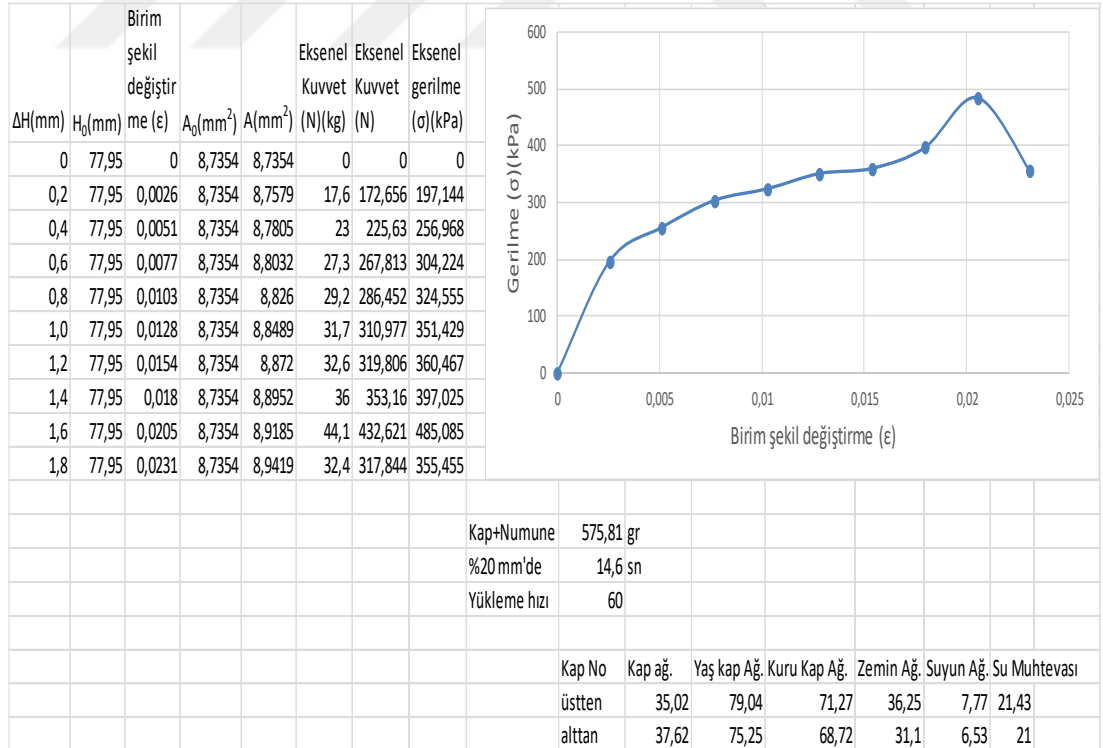
Şekil B.45. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



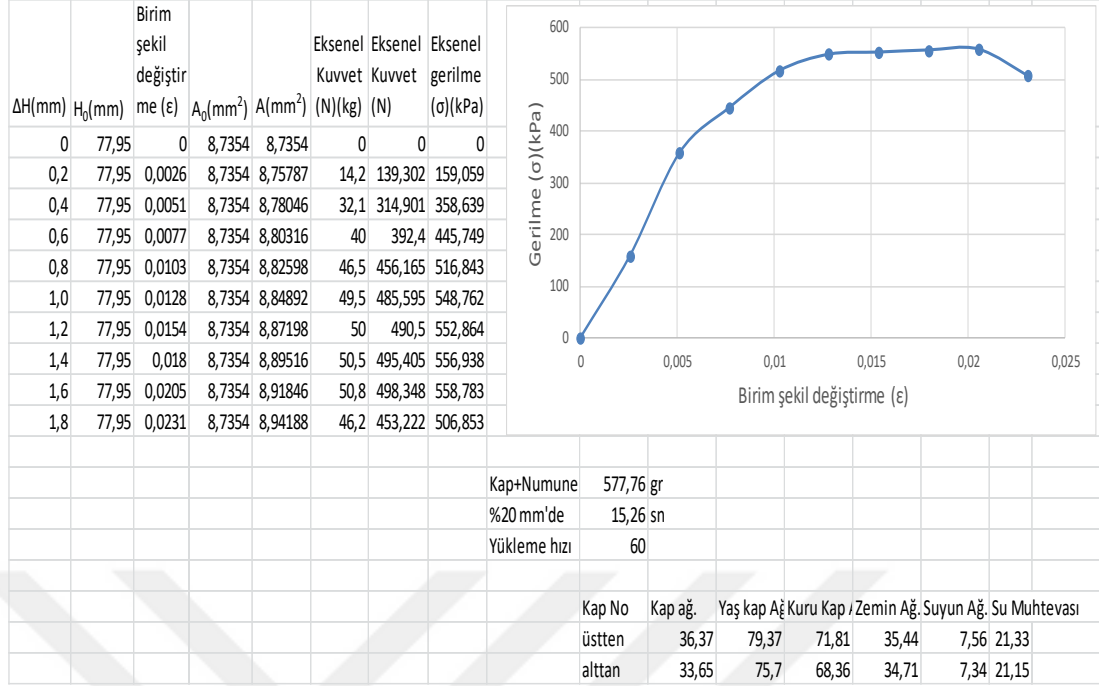
Şekil B.46. %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



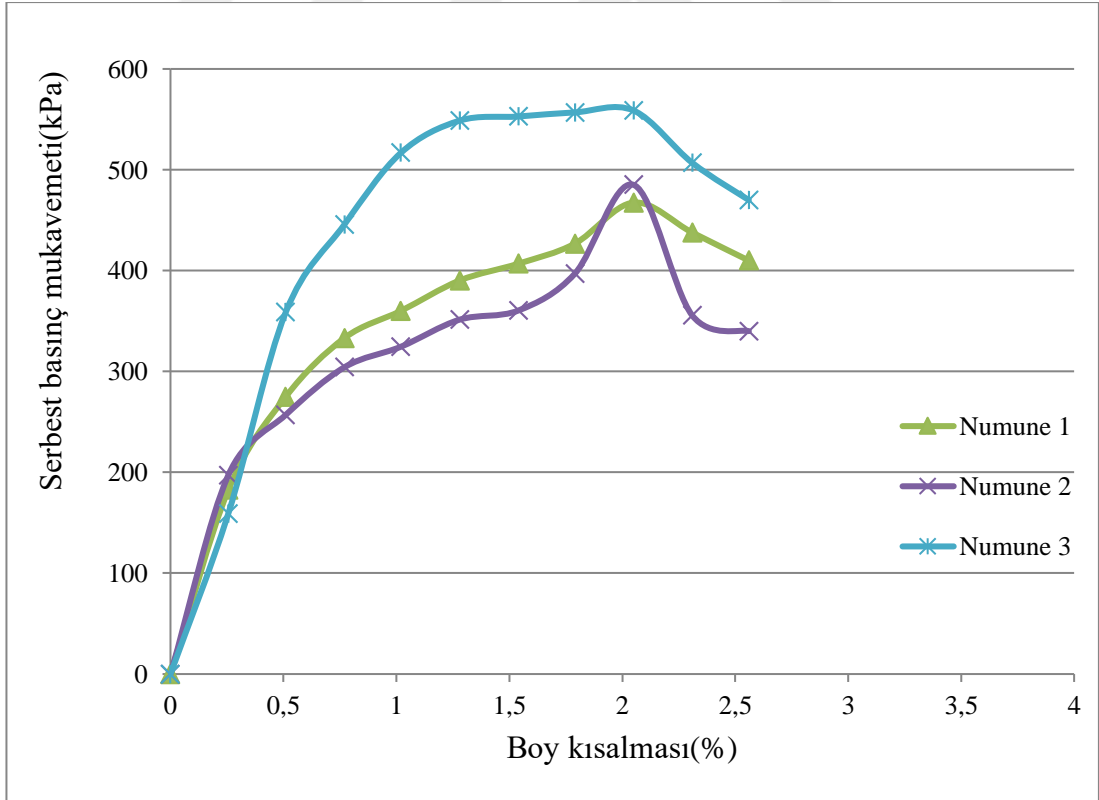
Şekil B.47. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



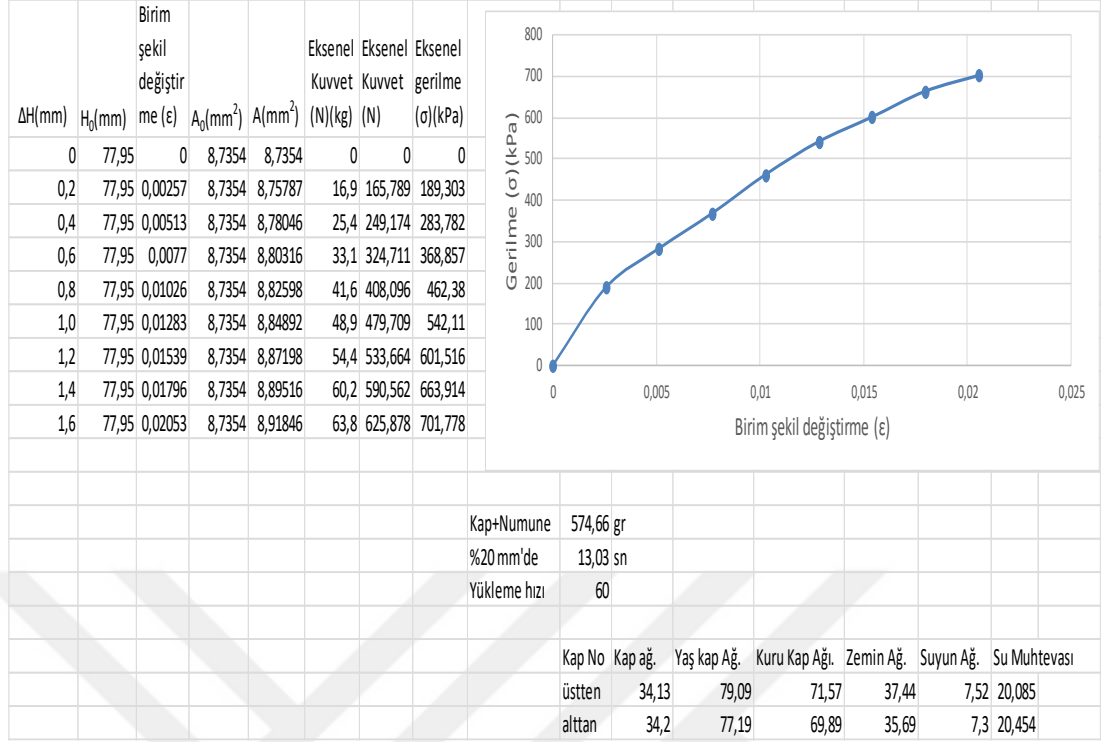
Şekil B.48. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



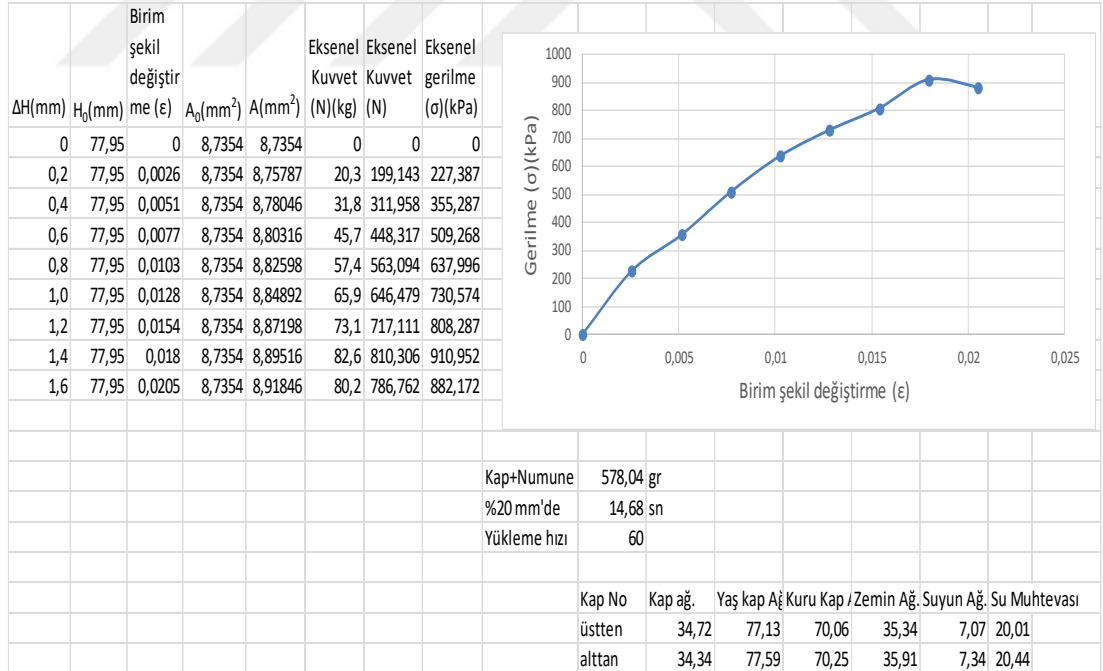
Şekil B.49. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



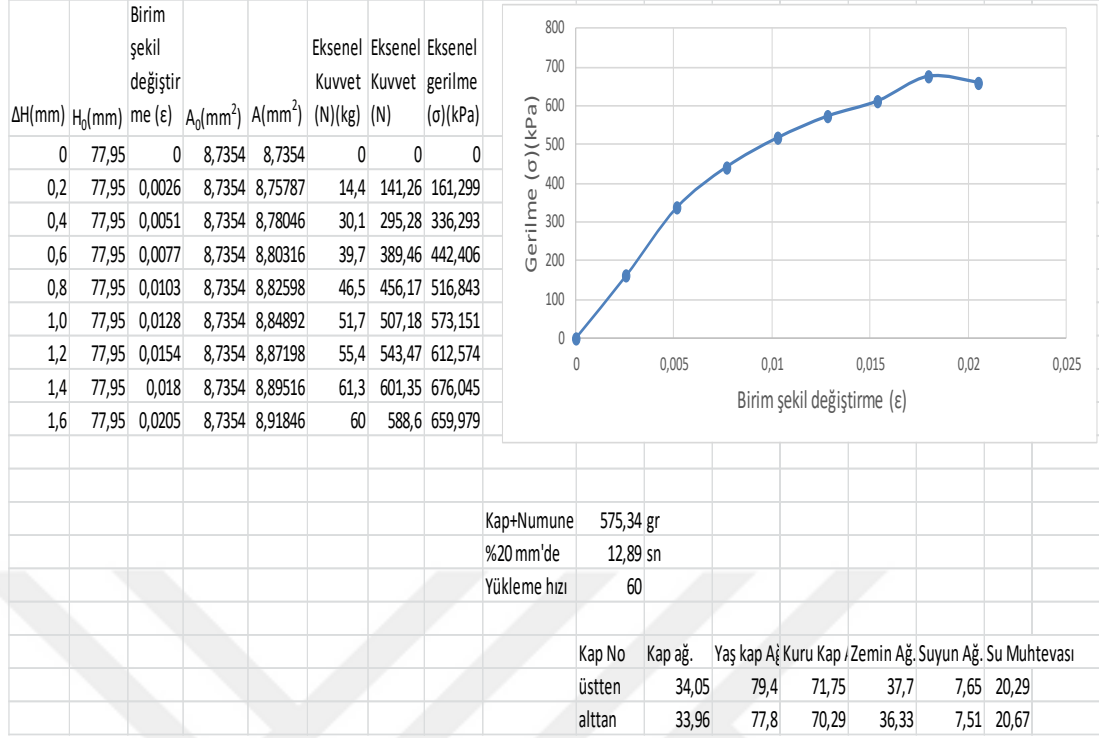
Şekil B.50. % 10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



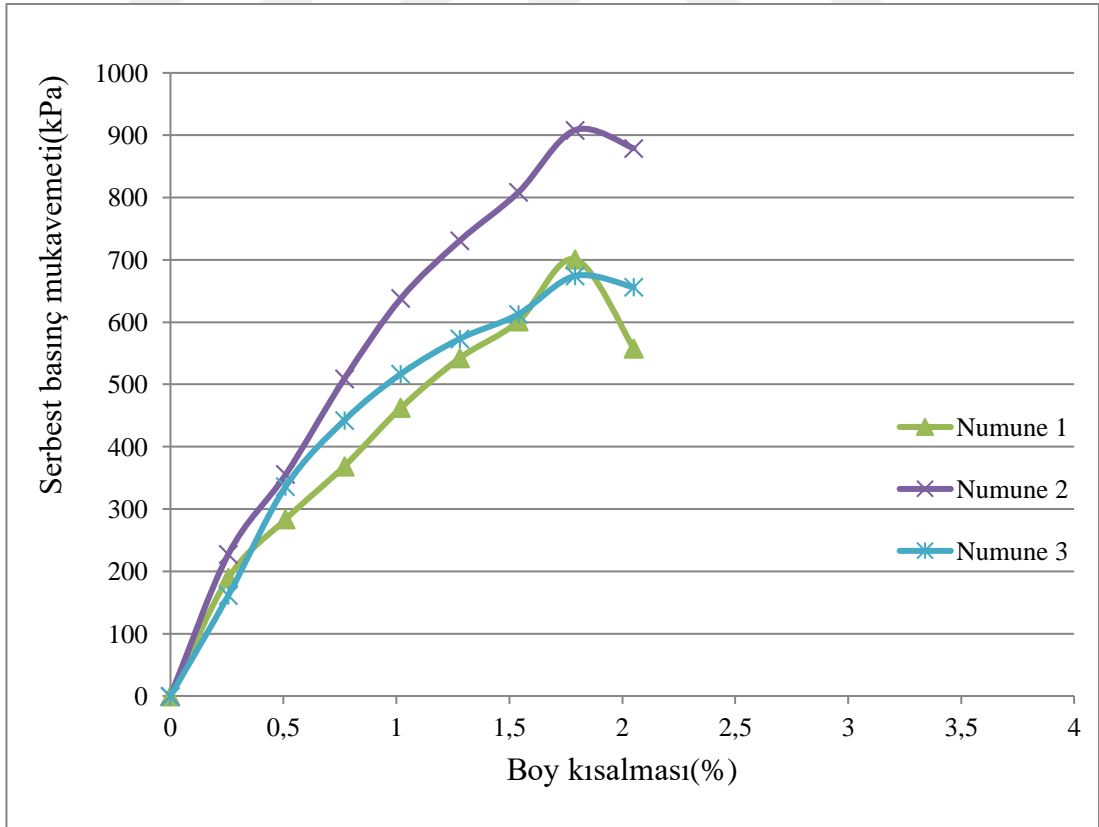
Şekil B.51. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



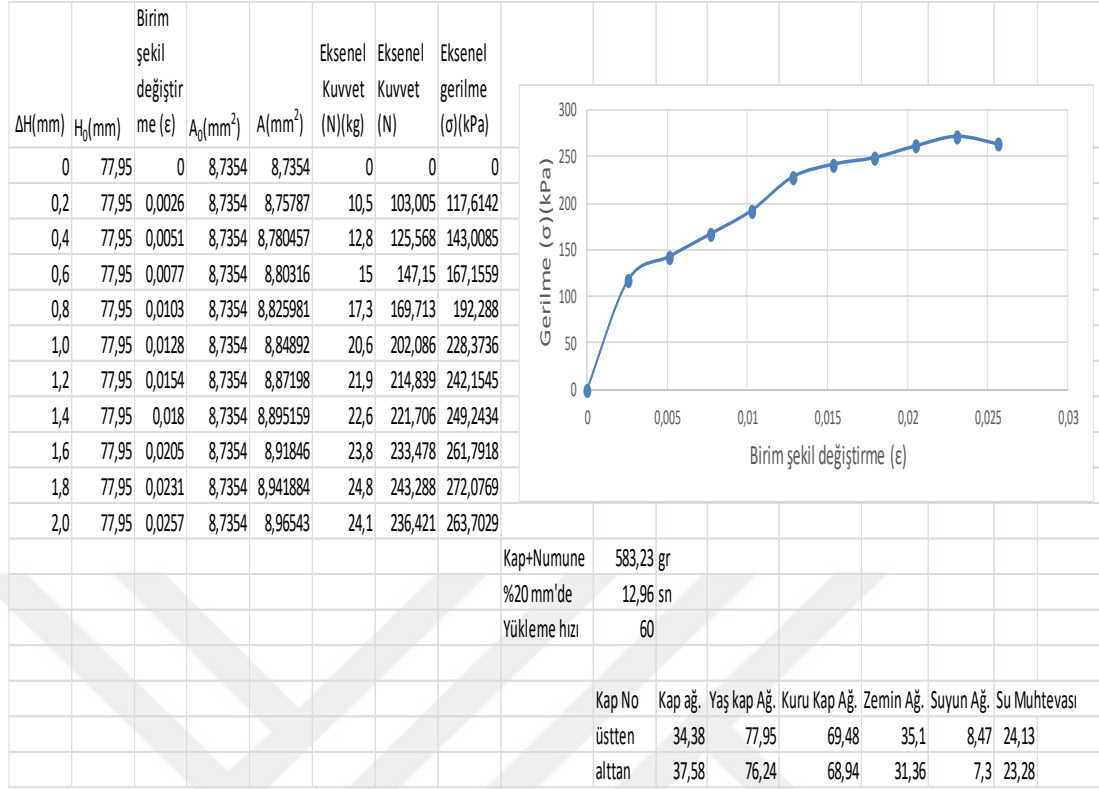
Şekil B.52. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



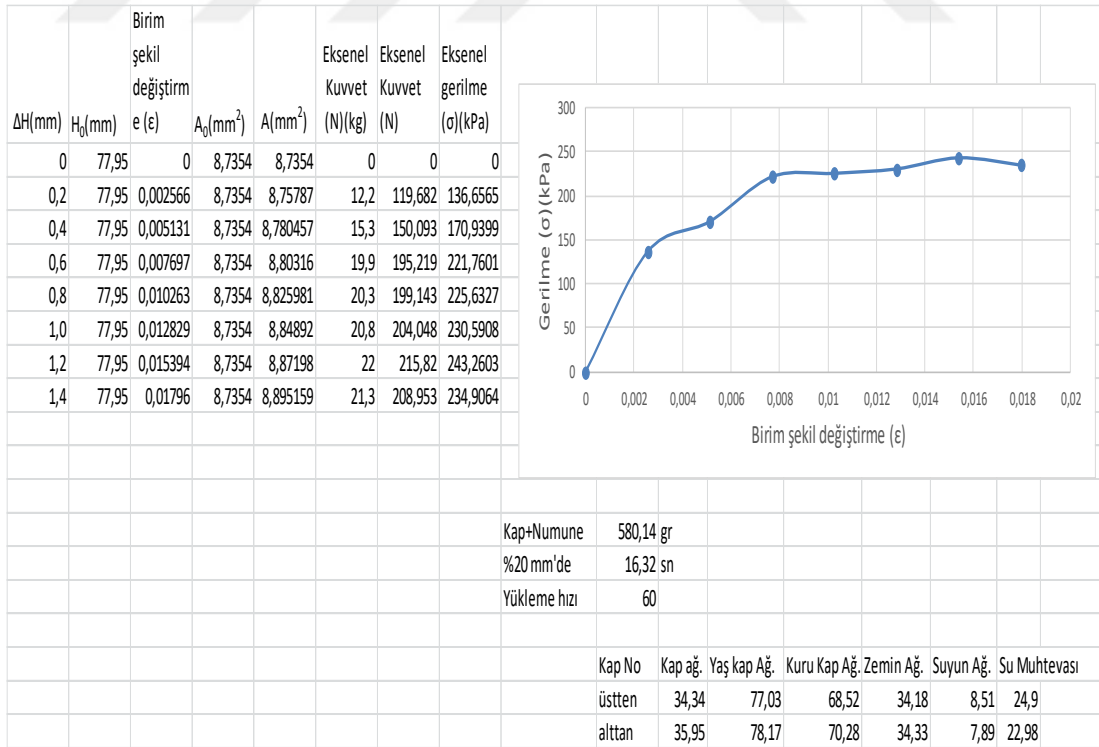
Şekil B.53. Optimum su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3



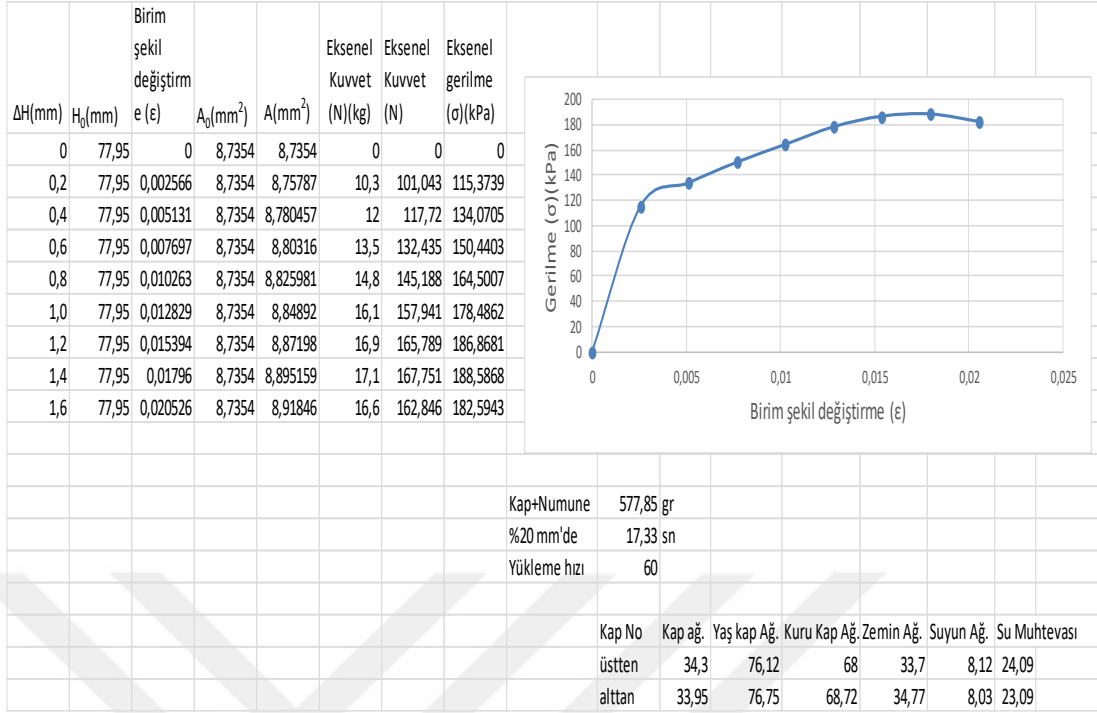
Şekil B.54. % 10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri



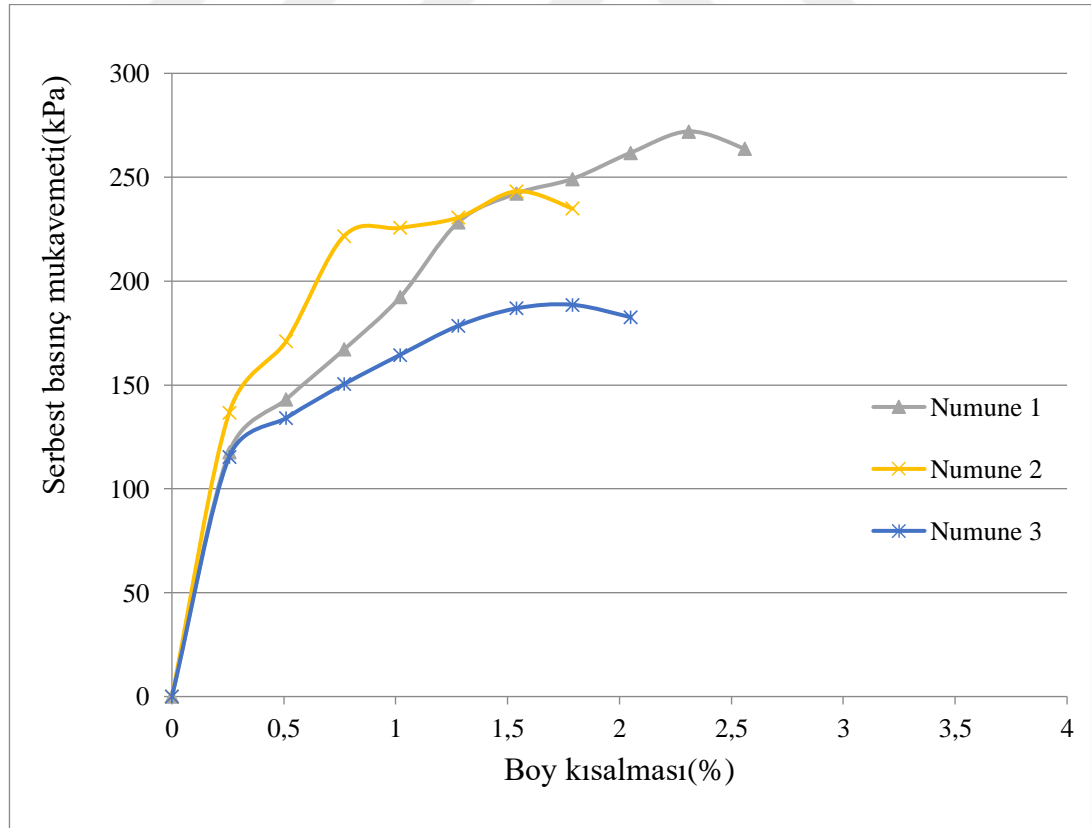
Şekil B.55. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-1



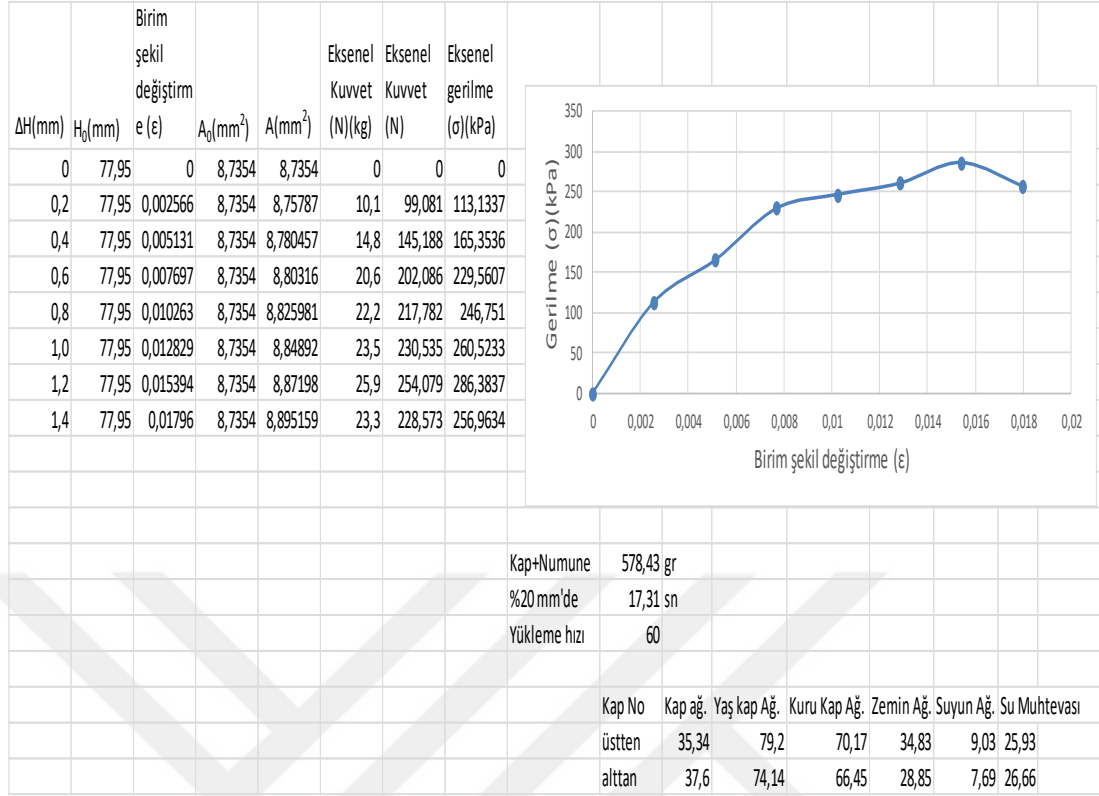
Şekil B.56. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-2



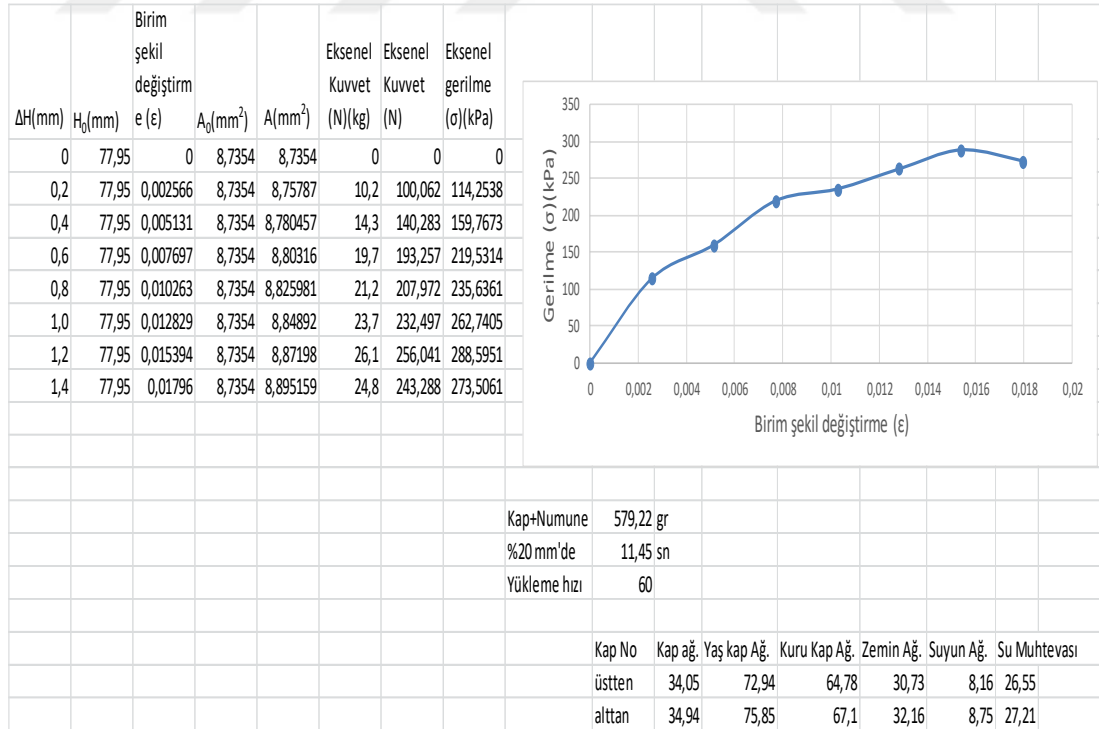
Şekil B.57. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç deneyi-3



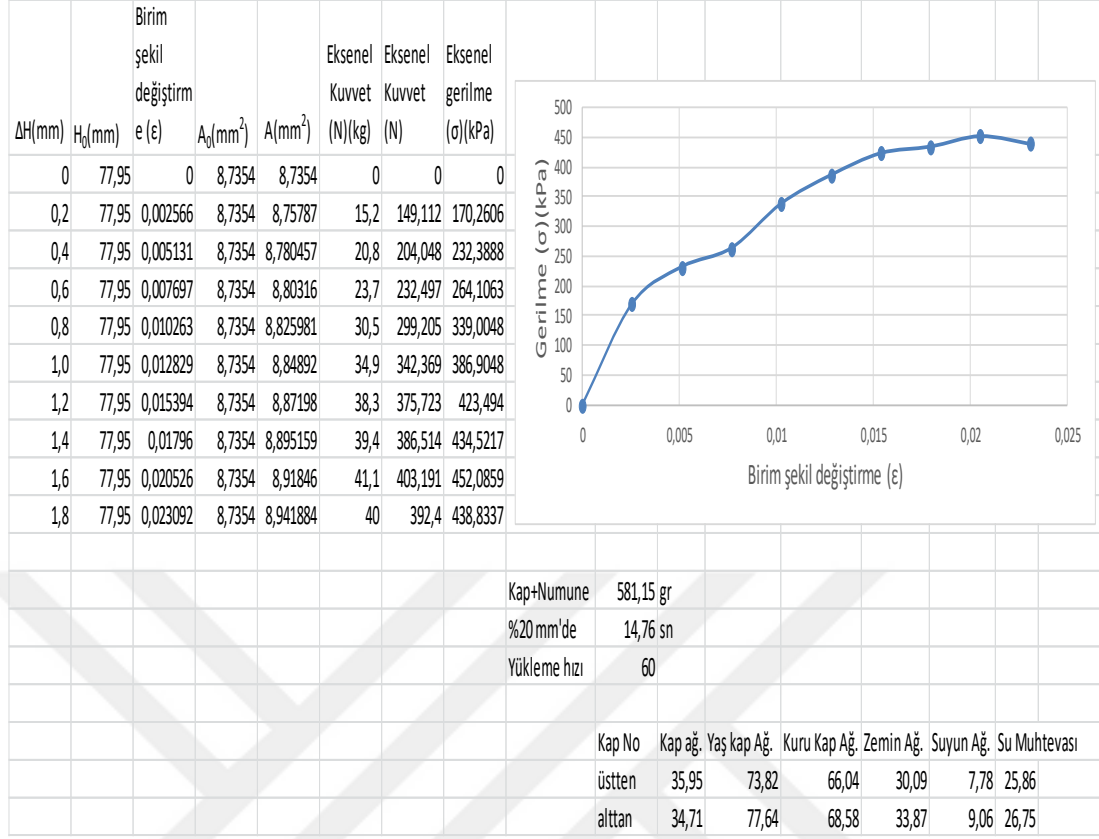
Şekil B.58. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin anlık serbest basınç grafikleri



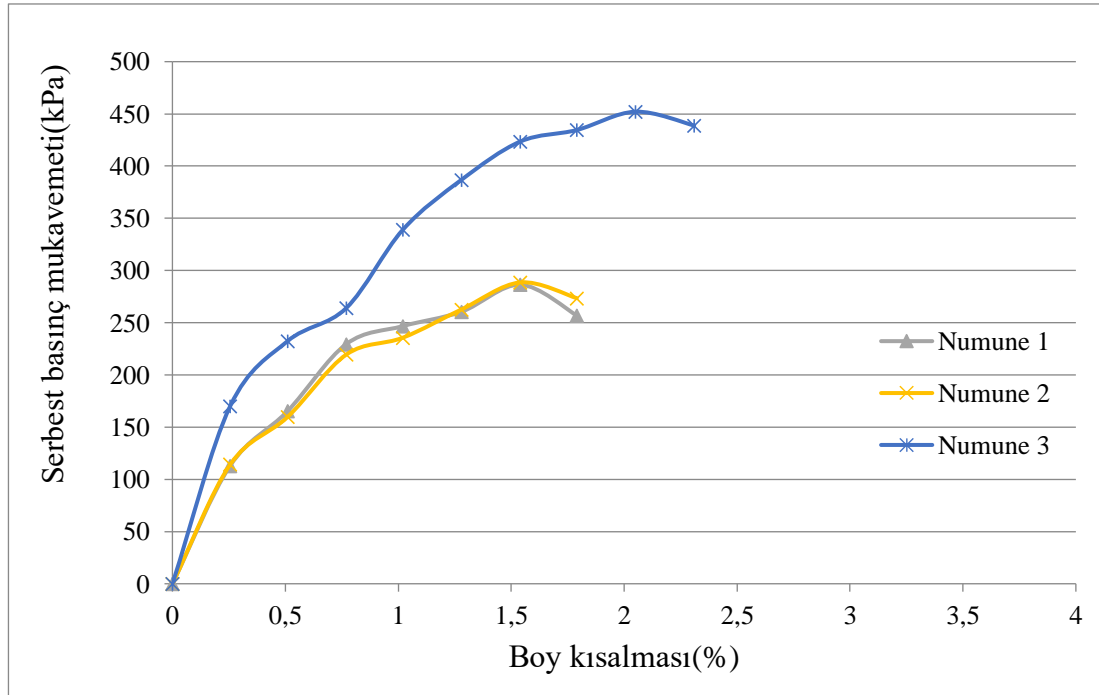
Şekil B.59. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-1



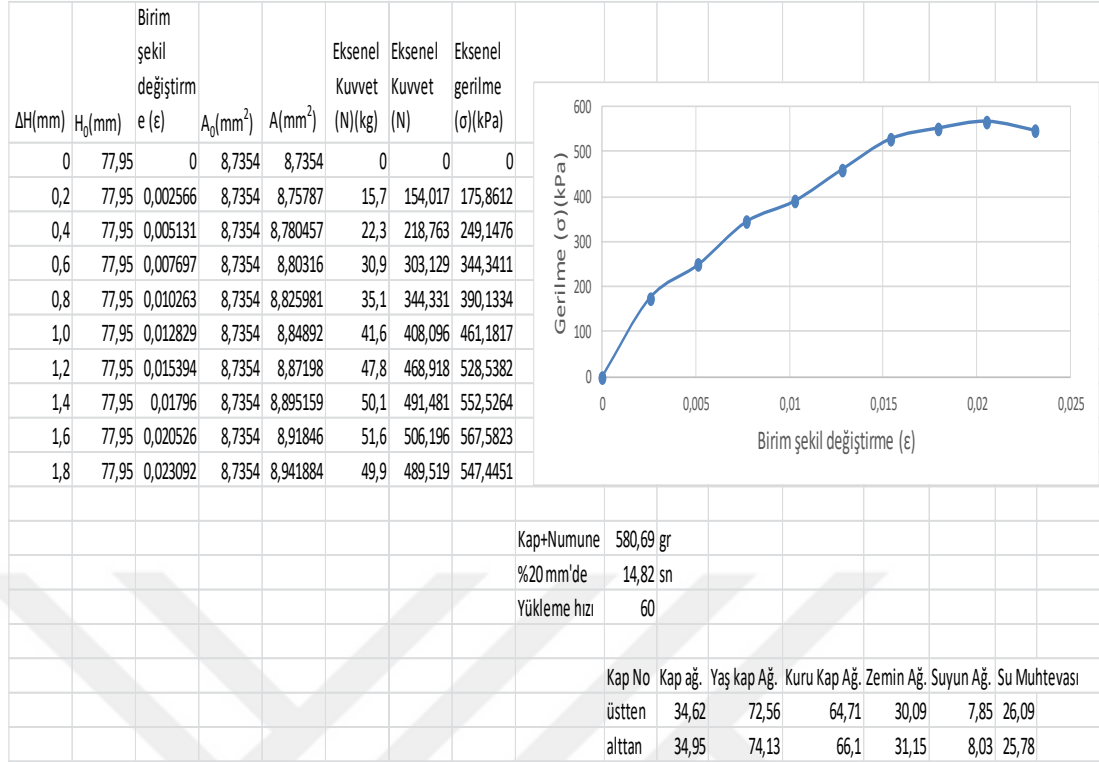
Şekil B.60. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-2



Şekil B.61. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç deneyi-3



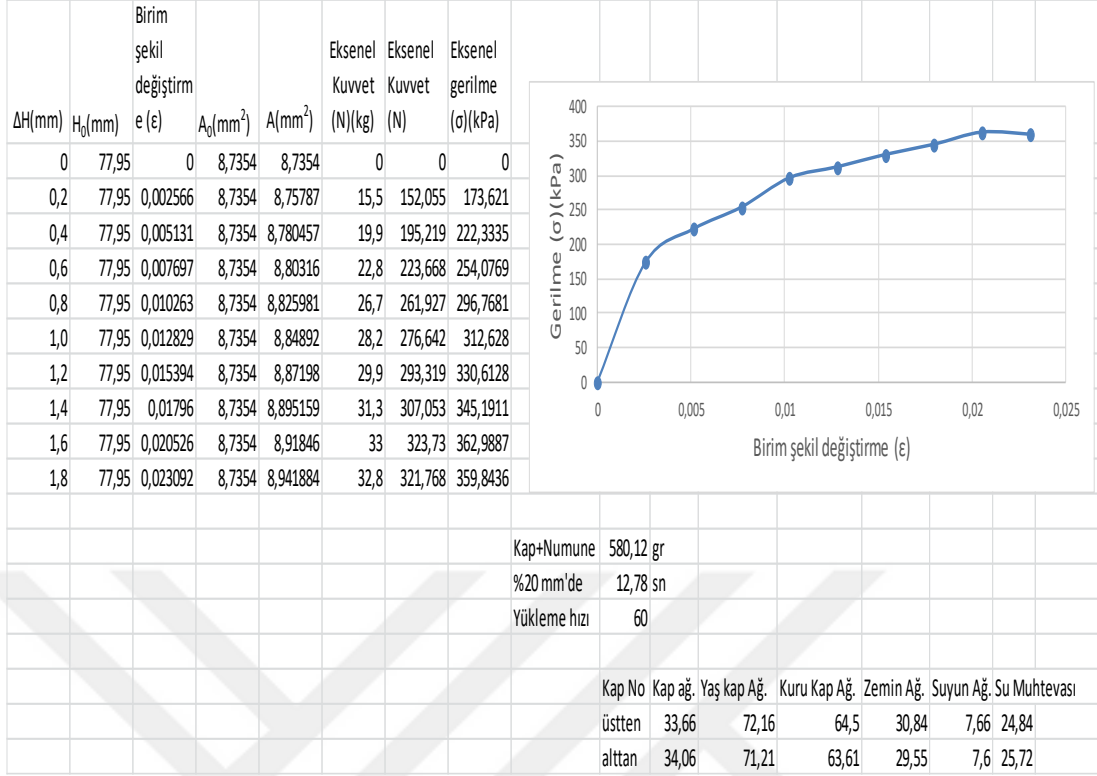
Şekil B.62. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 1 günlük serbest basınç grafikleri



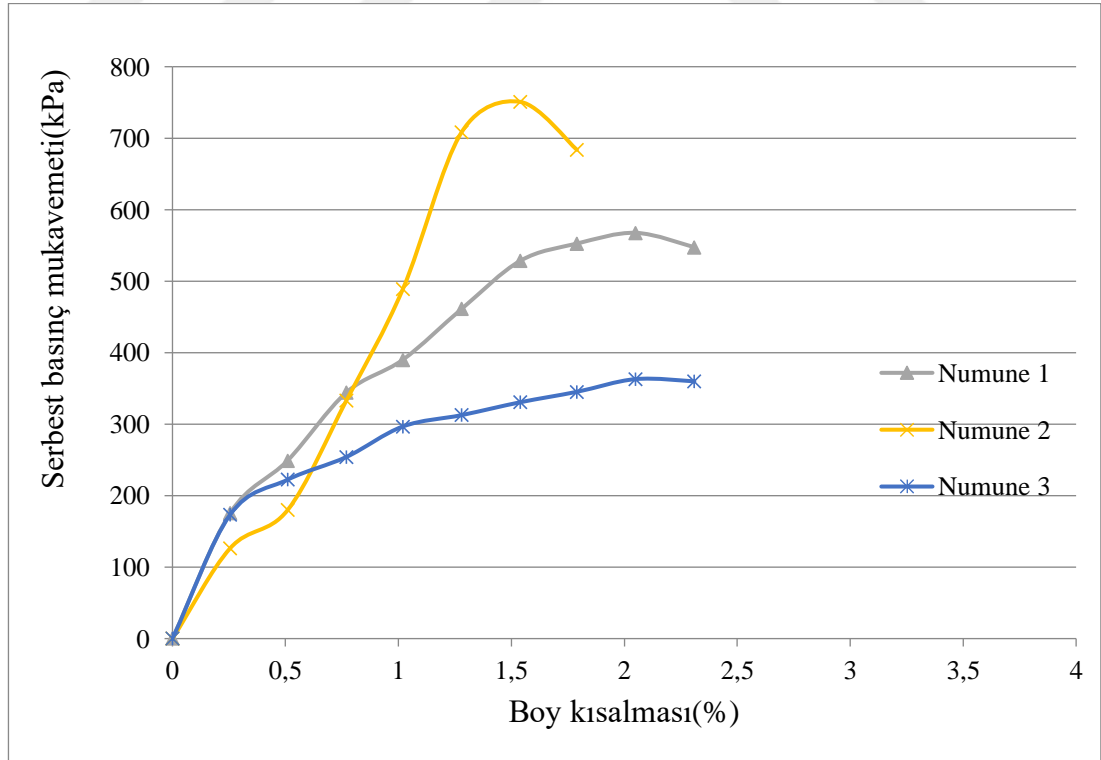
Şekil B.63. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-1



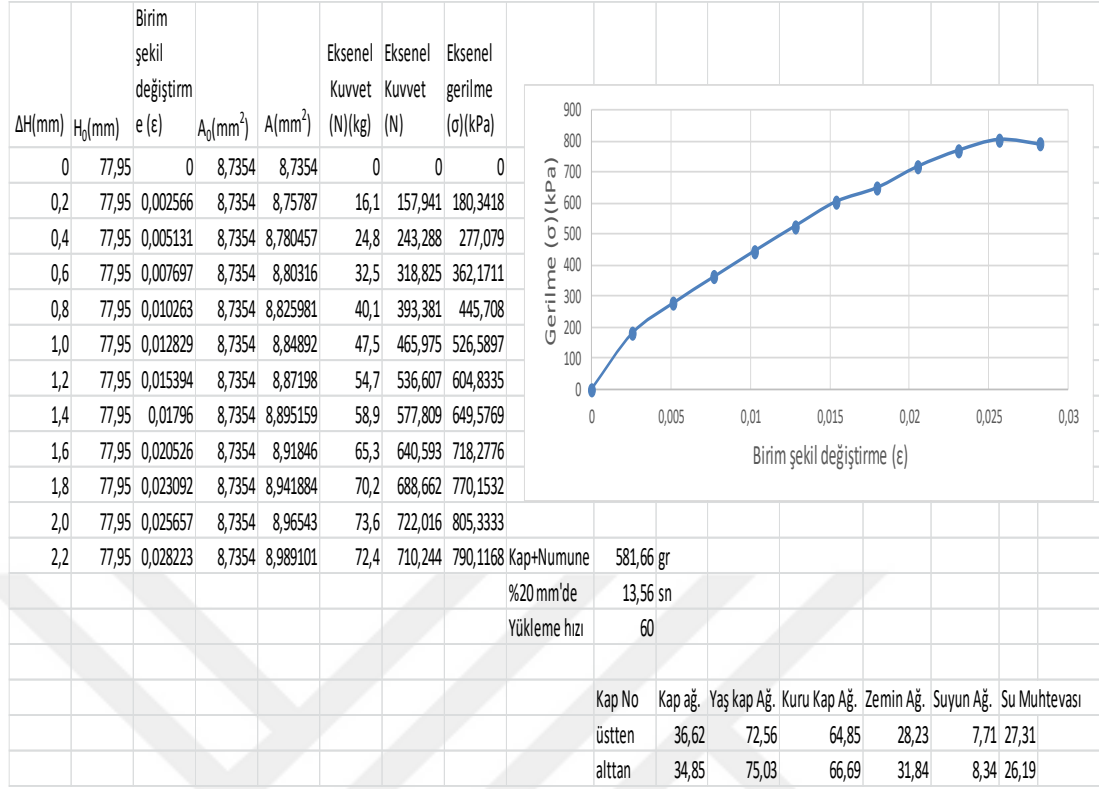
Şekil B.64. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-2



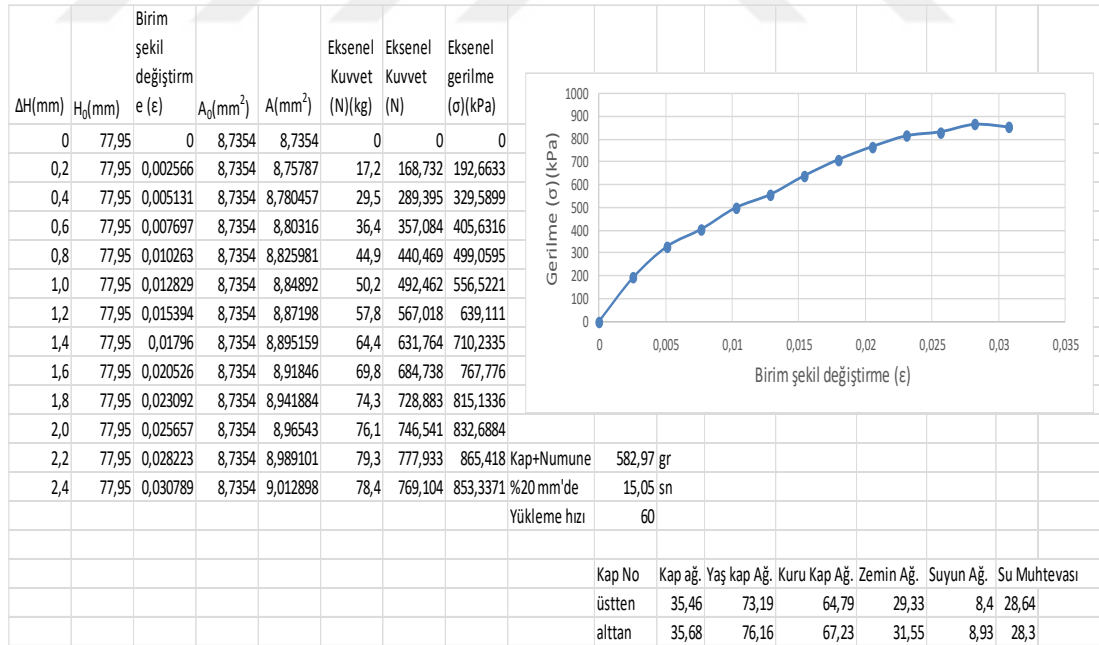
Şekil B.65. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç deneyi-3



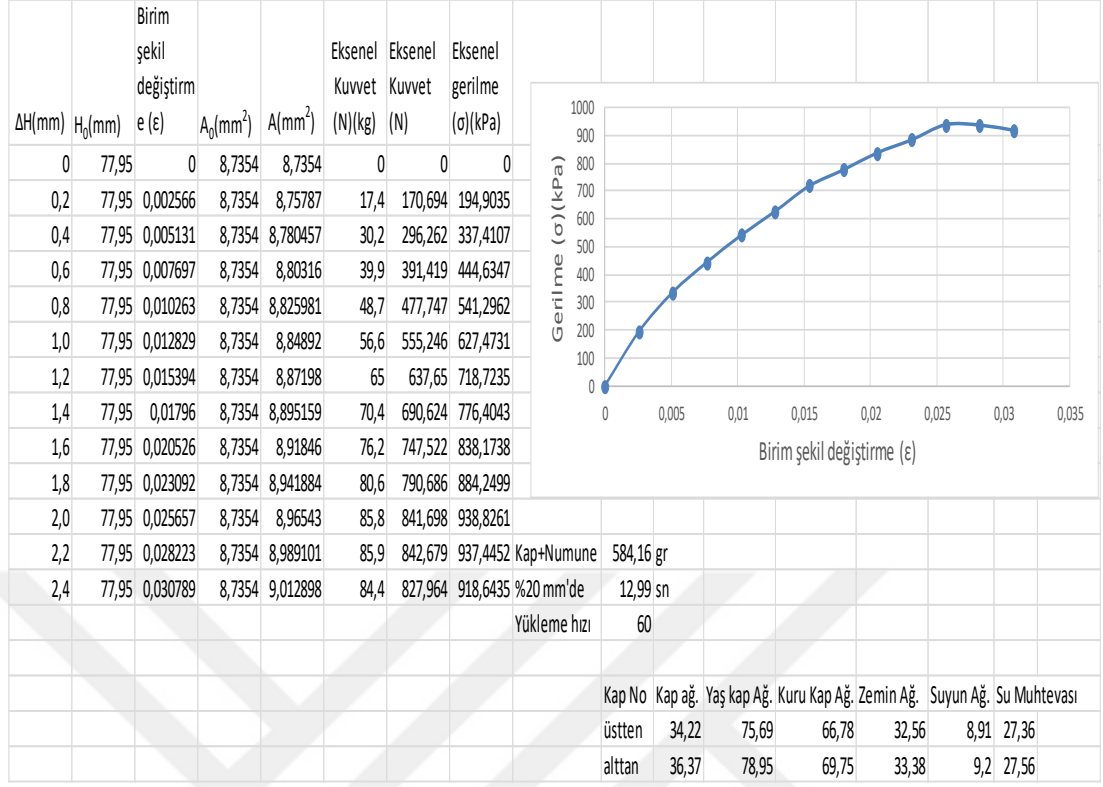
Şekil B.66. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 7 günlük serbest basınç grafikleri



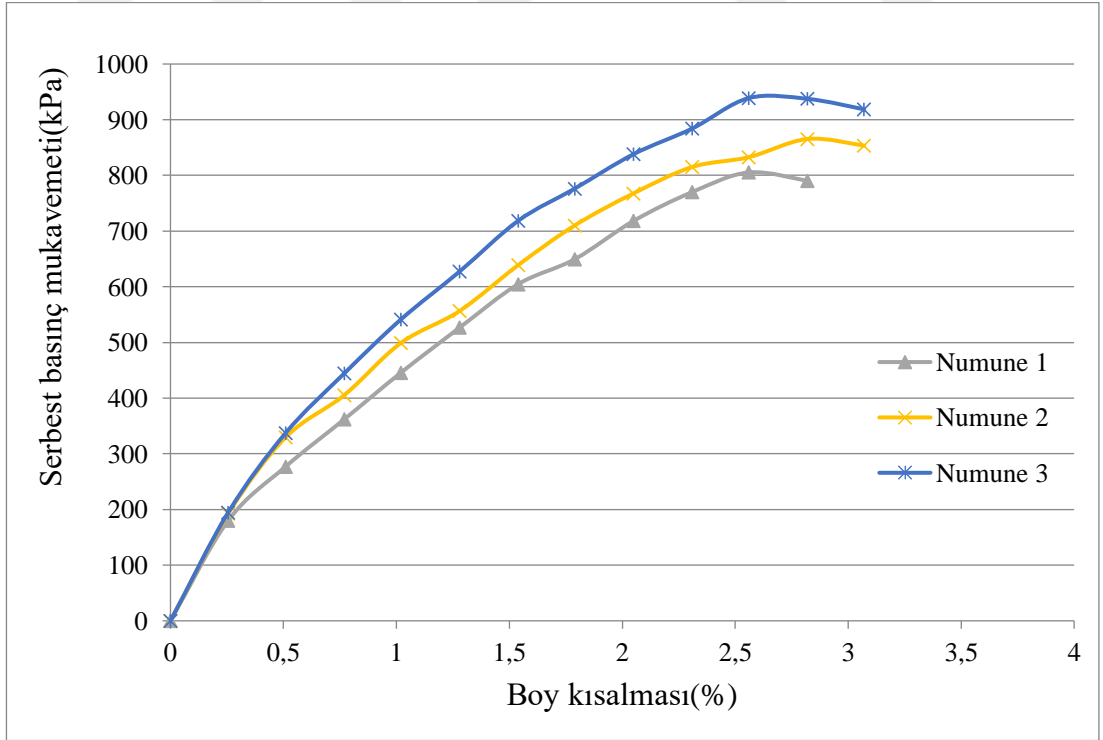
Şekil B.67. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-1



Şekil B.68. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-2



Şekil B.69. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç deneyi-3

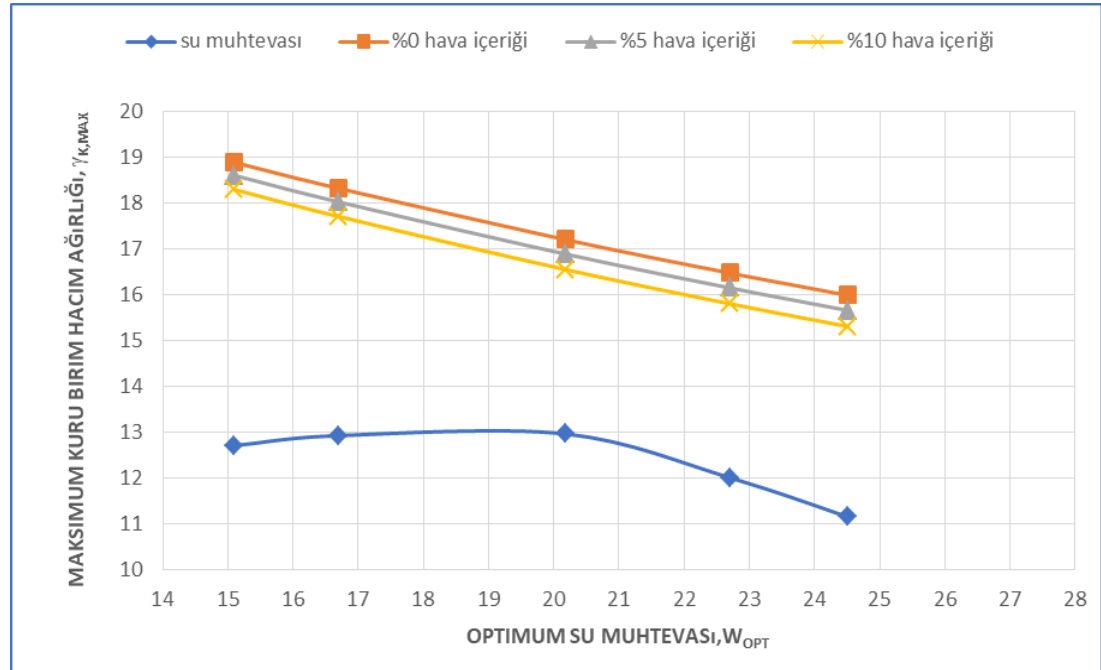


Şekil B.70. Doğal su muhtevasında %10 çimentolu zeminin 28 günlük serbest basınç grafikleri

Ek-C Kompaksiyon deneyleri

Tablo C.1. %8 çimento katkılı zeminin kompaksiyon deneyi

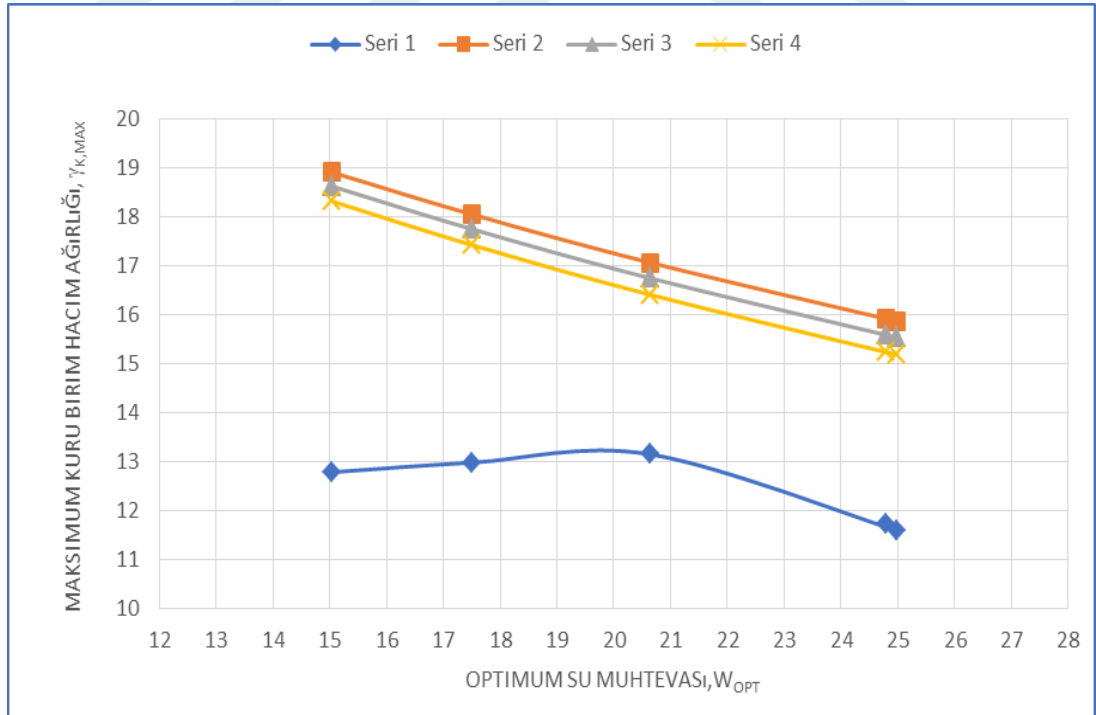
Deney No	1	2	3	4	5
Katılan Su Oranları (%mL)	11	14	17	20	23
Kalıp Ağırlığı	473,81	473,81	473,81	473,81	473,81
Sıkıştırılmış Zemin + Kalıp Ağırlığı	575,4	578,56	582	576,13	570,26
Sıkıştırılmış Zemin	101,59	104,75	108,19	102,32	96,45
Islak birim hacim ağırlık (kN/m ³)	1,491952	1,53836	1,58888	1,502673	1,416466
Kap No	165	201	205	239	199
Kap Ağırlığı (gr)	34,6	34,06	34,22	36,37	33,65
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı (gr)	72,58	71,32	71,14	73,77	73,02
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	67,6	65,99	64,94	66,85	65,27
Su Muhtevası (w)(%)	15,09091	16,69277	20,18229	22,70341	24,5098
Su Oranı (s)%	13,11216	14,30488	16,79307	18,50267	19,68504
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	12,71695	12,93252	12,96939	12,0137	11,16019
Kap Hacmi	68,092	68,092	68,092	68,092	68,092
Su Muhtevası (w) (%)	15,09091	16,69277	20,18229	22,70341	24,5098
%0 Hava İçeriği	18,89818	18,33247	17,21018	16,48123	15,99579
%5 Hava İçeriği	18,61338	18,03634	16,89533	16,15688	15,66626
%10 Hava İçeriği	18,30684	17,71834	16,55875	15,81114	15,31569



Şekil C.1. %8 çimento katkılı zeminin su muhtevası

Tablo C.2. %10 çimento katkılı zeminin kompaksiyon deneyi

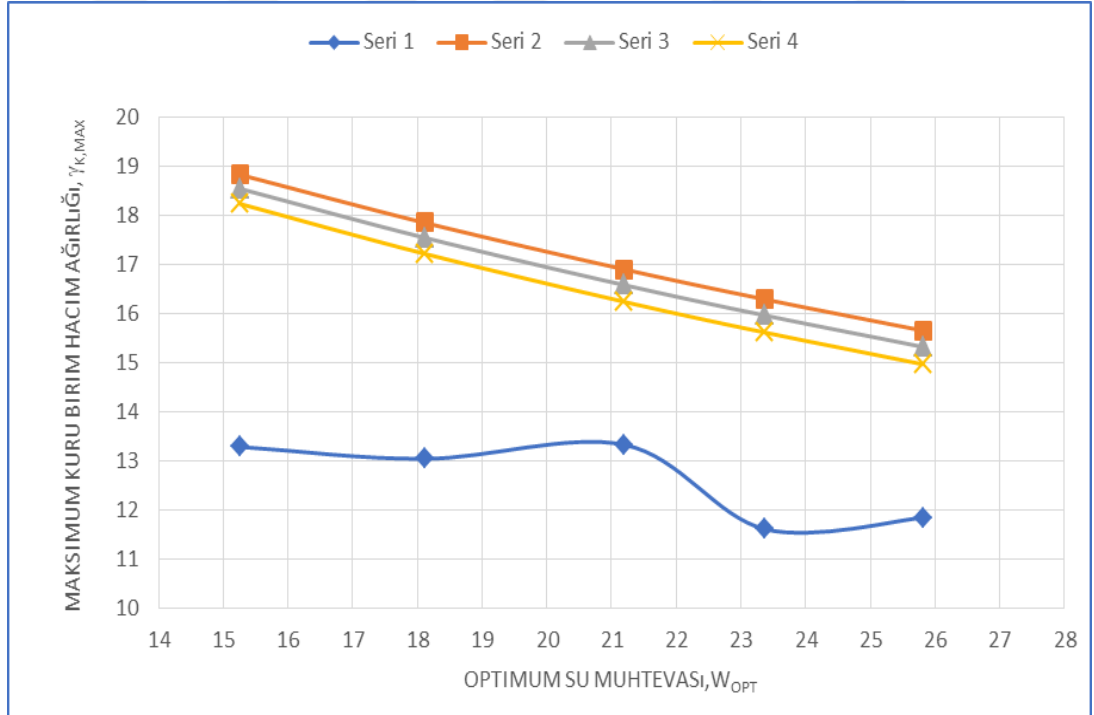
Deney No	1	2	3	4	5
Katılan Su Oranları (%mL)	11	14	17	20	23
Kalıp Ağırlığı	473,81	473,81	473,81	473,81	473,81
Sıkıştırılmış Zemin + Kalıp Ağırlığı	575,99	579,75	584	574,5	575,5
Sıkıştırılmış Zemin	102,18	105,94	110,19	100,69	101,69
Islak birim hacim ağırlık (kN/m ³)	1,500617	1,555836	1,618252	1,478735	1,493421
Kap No	188	64	173	181	98
Kap Ağırlığı (gr)	35,46	35,68	34,34	34,13	35,4
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı (gr)	72,84	75,36	73,8	71,16	74,11
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	67,95	69,45	67,05	63,76	66,42
Su Muhtevası (w)(%)	15,05078	17,50074	20,63589	24,97469	24,79046
Su Oranı (s)%	13,08186	14,89415	17,10593	19,9838	19,86567
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	12,79526	12,9895	13,15947	11,60746	11,74005
Kap Hacmi	68,092	68,092	68,092	68,092	68,092
Su Muhtevası (w) (%)	15,05078	17,50074	20,63589	24,97469	24,79046
%0 Hava İçeriği	18,9128	18,05978	17,07431	15,87545	15,92292
%5 Hava İçeriği	18,62831	17,75865	16,75753	15,54478	15,5927
%10 Hava İçeriği	18,32208	17,43562	16,41906	15,19317	15,24149



Şekil C.2. %10 çimento katkılı zeminin su muhtevası

Tablo C.3. %12 çimento katkılı zeminin kompaksiyon deneyi

Deney No	1	2	3	4	5
Katılan Su Oranları (%mL)	11	14	17	20	23
Kalıp Ağırlığı	473,81	473,81	473,81	473,81	473,81
Sıkıştırılmış Zemin + Kalıp Ağırlığı	580,16	580,8	586	573,31	577,32
Sıkıştırılmış Zemin	106,35	106,99	112,19	99,5	103,51
Islak birim hacim ağırlık (kN/m ³)	1,561857	1,571257	1,647624	1,461258	1,520149
Kap No	333	70	195	92	141
Kap Ağırlığı (gr)	37,61	36,62	34,64	34,85	34,31
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı (gr)	75,24	75,1	74,14	75,6	70,67
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	70,26	69,2	67,23	67,88	63,21
Su Muhtevası (w)(%)	15,25268	18,10927	21,20282	23,37269	25,81315
Su Oranı (s)%	13,23412	15,33264	17,49367	18,94479	20,51705
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	13,29411	13,05065	13,33565	11,61922	11,85302
Kap Hacmi	68,092	68,092	68,092	68,092	68,092
Su Muhtevası (w) (%)	15,25268	18,10927	21,20282	23,37269	25,81315
%0 Hava İçeriği	18,83947	17,8597	16,90747	16,29797	15,66292
%5 Hava İçeriği	18,55344	17,55509	16,58843	15,97156	15,33038
%10 Hava İçeriği	18,24564	17,22858	16,24776	15,62388	14,97707



Şekil C.3. %12 çimento katkılı zeminin su muhtevası

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yıldız Y., Killi Bir Zeminin Çimento ile Stabilizasyonu, *Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi*, Kartepe, Kocaeli, 1-3 Kasım 2019.



ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Kocaeli’nde doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Dilovası Mehmet Zeki Obdan İlköğretim Okulu’nda lise eğitimini ise Dilovası Çok Programlı Lisesi’nde tamamladı. Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2015 yılında bitirerek İnşaat Mühendisi ünvanını aldı. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Yüksek Lisans programına başladı.

