



**ZEMİN STABİLİZASYONUNDA POMZA TAŞININ  
İNCELİK ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Zekeriya Hayri ÇELİK**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ  
2020**

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.  
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ZEMİN STABİLİZASYONUNDA POMZA TAŞININ İNCELİK ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ

(Investigation of the Fineness Effect of Pumice Stone in Soil Stabilization)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zekeriya Hayri ÇELİK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

BAYBURT

Ocak, 2020




## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ danışmanlığında, 162004022 numaralı Zekeriya Hayri ÇELİK tarafından hazırlanan “Zemin Stabilizasyonunda Pomza Taşının İncelik Etkisinin İncelenmesi” adlı bu tez çalışması 03/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Başkan** : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

**Jüri Üyesi** : Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

**Jüri Üyesi** : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza:   
İmza:   
İmza: 

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

03/01/2020

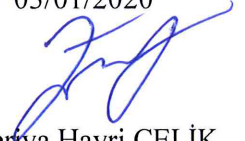
Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ

Enstitü Müdürü

## ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*Zemin Stabilizasyonunda Pomza Taşının İncelik Etkisinin İncelenmesi*” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

03/01/2020



Zekeriya Hayri ÇELİK

## TEŞEKKÜR

Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanan “*Zemin Stabilizasyonunda Pomza Taşının İncelik Etkisinin İncelenmesi*” isimli yüksek lisans tezimin oluşum süreci boyunca, yapıcı eleştirileri ve ufuk açıcı yönlendirmeleri ile çalışmama büyük katkılar sunan, başta tez danışmanım ve hocam Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ olmak üzere, öğrenimim süresince üzerimde emeği olan kıymetli hocalarıma, tezimin hazırlanış sürecine laboratuvar çalışmaları ve eleştirel okumalar bağlamında katkı sunan değerli arkadaşım Mesut TAŞ'a samimi teşekkürlerimi arz ederim.

Bu vesileyle, iyi yürekli anneciğimin ve babacığımın şahsında, bütün eğitim-öğretim hayatım boyunca çok güçlü bir şekilde yanımda olan, şahsımı destekleyen güzel aileme ve dostlarıma en içten şükranlarımı sunmayı borç bilirim.

Haddi aşan her türlü iddiadan uzak olan yüksek lisans tezimin, ulusal ve evrensel inşaat mühendisliği literatürüne mütevazı da olsa bir katkı sağlamasını ve bütün ilgililer için yararlanılması kolay, yalın ve sağlam bir çalışma olmasını temenni ederim.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEMİN STABİLİZASYONUNDA POMZA TAŞININ İNCELİK ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ

Zekeriya Hayri ÇELİK

Ocak 2020, 91 Sayfa

Yüzeysel stabilizasyon yöntemlerinden biri olan kimyasal stabilizasyonda incelik etkisini konu edinen bu çalışmada, düşük plastisiteli kil bir zeminin mühendislik özellikleri kireç ve pomza taşı ile iyileştirilmiştir. Çalışmada kullanılan pomza taşı ham ve inceltirilmiş halde ayrı ayrı zemine eklenmiştir. Kür sürelerinin 7, 28 ve 84 gün olarak belirlendiği bu deneysel çalışmada doğal zemine, %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ham ve inceltirilmiş pomza taşı kireçli/kireçsiz ilave edilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında, inceltirilmiş pomza taşı kullanılmasının hazırlanan numunelerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Deneysel sonuçlarında, pomza taşının inceltirilmesinin kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkisinin sınırlı düzeyde olduğu tespit edilmiştir. İnceltirilmiş pomza taşının katkı maddesi olarak kullanılmasının kireçsiz numunelerin dayanımlarında, kireçli numunelerin dayanım ve durabilitelerinde ham pomza kullanımına göre daha fazla iyileştirmeler gösterdiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Zemin stabilizasyonu, kireç, pomza taşı, incelik etkisi, dayanım, durabilite.

## **ABSTRACT**

### **MASTER THESIS**

# **INVESTIGATION OF THE FINENESS EFFECT OF PUMICE STONE IN SOIL STABILIZATION**

**Zekeriya Hayri ÇELİK**

**January 2020, 91 Pages**

In this study, which deals with the fineness effect of chemical stabilization, which is one of the surface stabilization methods, the engineering properties of a low plastic clay soil have been improved with lime and pumice stone. The pumice stone used in the study was added to the soil in raw and thinned form, separately. In this experimental study, where curing times are determined as 7, 28 and 84 days, experiment samples were prepared by adding raw and thinned pumice stone with/without lime to the natural soil at the rate of 0%, 5%, 10%, 15% and 20%. Within the scope of the study, the effect of using thinned pumice stone on the geotechnical properties of the prepared samples was investigated.

As a result of the experiments, it has been determined that the thinning of pumice stone has limited effects on consistency limits and compaction parameters. It was concluded that the use of thinned pumice stone as an additive shows more improvements in the strength of lime-free samples and in the strength and durability of lime containing samples compared to the use of raw pumice.

**Keywords:** Soil stabilization, lime, pumice stone, fineness effect, strength, durability.

## İÇİNDEKİLER

<b>ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI</b> .....	<b>i</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÖZ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>BİRİNCİ BÖLÜM</b> .....	<b>1</b>
Giriş.....	1
<b>İKİNCİ BÖLÜM</b> .....	<b>2</b>
Kuramsal Çerçeve .....	2
Zemin İyileştirme Yöntemleri .....	2
Derin iyileştirme yöntemleri.....	7
Kum drenleri metodu.....	7
Geosentetik dren.....	8
Vakumla su emme yöntemi.....	8
Önyükleme metodu.....	8
Vibroflotasyon yöntemi.....	8
Kompaksiyon kazıkları.....	9
Patlatma metodu.....	9
Dinamik kompaksiyon.....	10
Taş kolonlar.....	11
Derin karıştırma metodu.....	12
Kireç kazıkları.....	14
Jet grout metodu.....	15
Elektro-osmoz.....	17
Isıl işlemler.....	17
Isıtma metodu.....	18
Dondurma metodu.....	18
Yüzeysel iyileştirme yöntemleri.....	18



Katkısız stabilizasyon.....	18
Kompaksiyon yöntemi.....	18
Drenaj yöntemi.....	19
Katkılı stabilizasyon.....	20
Bitüm katkı maddesi ile stabilizasyon.....	20
Uçucu kül katkı maddesi ile stabilizasyon.....	21
Çimento katkı maddesi ile stabilizasyon.....	22
Kireç katkısı ile zemin stabilizasyonu.....	23
Pomza ile zemin stabilizasyonu.....	27
<b>ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....</b>	<b>29</b>
Materyal ve Yöntem.....	29
Materyal.....	29
Doğal malzeme.....	30
Kireç.....	31
Pomza taşı.....	32
Yöntemler.....	34
Deneylerde referans alınan standartlar.....	34
Kıvam limit deneyleri.....	35
Kompaksiyon deneyi.....	36
Serbest basınç deneyi.....	37
Islanma-kuruma periyodu deneyi.....	38
Donma-çözülme deneyi.....	38
<b>DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....</b>	<b>39</b>
Araştırma Bulguları.....	39
Deneylerden Elde Edilen Veriler.....	39
Kıvam limitleri.....	39
Kompaksiyon metodu.....	43
Serbest basınç dayanımı.....	47
Durabilite testleri.....	52
Islanma-kuruma periyodu.....	53
Donma-çözülme çevrimi.....	60
<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>62</b>
<b>Kaynakça.....</b>	<b>65</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>73</b>
Ek-1: Düşen Koni Penetrasyon Deney Sonuçları.....	73

EK-2: Kompaksiyon Deney Sonuçları .....	82
<b>ÖZ GEÇMİŞ .....</b>	<b>91</b>



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Zemin Çeşitlerine Göre Stabilizasyon Metotları.....	4
Tablo 2. Stabilizasyon Amaçlarına Göre Uygulanan Metotlar.....	5
Tablo 3. Zemin Islah Yöntemleri ve Kullanım Amaçları.....	6
Tablo 4. Zemin Islah Yöntemi İçin Yaklaşık Maliyetler.....	7
Tablo 5. Jet Enjeksiyonu Yönteminde Üretim Ölçütleri.....	16
Tablo 6. Jet Grout Sistemlerinin Karşılaştırması.....	16
Tablo 7. Sıkıştırma Gereçlerinin Genel Karakteristik Özellikleri.....	19
Tablo 8. Kimyasal Islah Uygulamasında Kullanılacak Katkının Seçimi.....	20
Tablo 9. Uçucu Küle Ait Fiziksel Özellikler.....	21
Tablo 10. Uçucu Külün Sahip Olması Gereken Fiziksel Değerler.....	21
Tablo 11. Değişik Zemin Gruplarına Ait Çimento Oranları.....	23
Tablo 12. Kireç İle Çimentolu İyileştirmelerde Durabilite Koşulları.....	23
Tablo 13. Kirece Ait Bileşimler.....	24
Tablo 14. Zemin Türlerine Göre Zemin İyileştirilmesinde Kullanılan Optimum Kireç Miktarları.....	26
Tablo 15. Farklı Zemin Türleri Ne Göre Kireç Oranları.....	26
Tablo 16. Kireç Katkısının Önerilen Kullanım Miktarları.....	26
Tablo 17. Deney Numunelerine Ait Notasyon Bilgileri.....	29
Tablo 18. Doğal Zemine Ait Özellikler.....	30
Tablo 19. Sönmüş Kirece Ait Analiz Sonuçları.....	31
Tablo 20. Pomza Taşına Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler.....	33
Tablo 21. Deneylerle İlgili ASTM Ölçütleri.....	34
Tablo 22. Deney Numunelerine Ait Kıvam Limit Sonuçları.....	39
Tablo 23. SPN Ve SPG Numunelerine Ait Kompaksiyon Değerleri.....	43
Tablo 24. SLPN ve SLPG numunelerine ait kompaksiyon değerleri.....	44
Tablo 25. Deney numunelerine ait serbest basınç dayanımı verileri.....	48
Tablo 26. Islanma-kuruma periyodu deney sonuçları.....	53
Tablo 27. Islanma-kuruma periyodu deneyi kütle kaybı yüzdeleri.....	54
Tablo 28. Karışımların donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları.....	60

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Farklı zeminlerde stabilizasyon uygulamaları.....	2
Şekil 2. Vibraflotasyon uygulama basamakları.....	9
Şekil 3. Dinamik kompaksiyon uygulaması.....	11
Şekil 4. Taş kolon yapım aşamaları.....	12
Şekil 5. Derin karıştırma yöntemi uygulaması.....	13
Şekil 6. Derin karıştırma ıslah uygulaması.....	13
Şekil 7. Derin karışımli ıslah uygulama tip ve modelleri.....	14
Şekil 8. Derin karıştırma uygulamasına yönelik öneriler.....	14
Şekil 9. Jet grout metodunun imalat aşamaları.....	16
Şekil 10. Killerde elektro-osmoz.....	17
Şekil 11. Aynı kireç içeriğinde olan farklı zemin türlerinin zamana bağlı zamana bağlı mukavemet artışı.....	26
Şekil 12. Doğal zemine ait dane boyutu dağılımı.....	31
Şekil 13. Kirece ait dane boyutu dağılımı.....	32
Şekil 14. Erzurum Pasinler'deki pomza ocağı.....	33
Şekil 15. Ham pomza taşına ait dane boyutu dağılımı.....	33
Şekil 16. İnceltilmiş pomza taşına ait dane boyutu dağılımı.....	34
Şekil 17. Koni penetrasyon düzeneği ve etüvde kurutulan örnekler.....	35
Şekil 18. Plastik limit deneyi sonucunda oluşan çatlaklar.....	36
Şekil 19. Standart Proktor Deneyi yapım aşamaları.....	37
Şekil 20. Tek eksenli basınç deneyine ait düzenek.....	37
Şekil 21. Islanma-kuruma periyodu deneyi.....	38
Şekil 22. Donma-çözülme test cihazı.....	38
Şekil 23. SPN ve SPG karışımlarına ait likit limit grafiği.....	40
Şekil 24. SPN ve SPG karışımlarına ait plastik limit grafiği.....	41
Şekil 25. SPN ve SPG karışımlarına ait plastisite indisi grafiği.....	41
Şekil 26. SLPN ve SLPG karışımlarına ait likit limit grafiği.....	42
Şekil 27. SLPN ve SLPG karışımlarına ait plastik limit grafiği.....	42
Şekil 28. SLPN ve SLPG karışımlarına ait plastisite indisi grafiği.....	43
Şekil 29. SPN ve SPG numunelerine ait optimum su içeriği sonuçları.....	45
Şekil 30. SPN ve SPG numunelerine ait maksimum kuru yoğunluk sonuçları.....	45

Şekil 31. SLPN ve SLPG numunelerine ait optimum su içeriği sonuçları.....	46
Şekil 32. SLPN ve SLPG numunelerine ait maksimum kuru yoğunluk sonuçları.....	46
Şekil 33. Numune örnekleri ve desikatörde numunelerin kür edilmesi.....	47
Şekil 34. Tek eksenli basınç dayanım testi.....	47
Şekil 35. SPN karışımlarının dayanım sonuçları.....	50
Şekil 36. SPG karışımlarının dayanım sonuçları.....	50
Şekil 37. SLPN karışımlarının dayanım sonuçları.....	51
Şekil 38. SLPG karışımlarının dayanım sonuçları.....	51
Şekil 39. SPN ve SPG karışımlarının kür sürelerine göre serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	52
Şekil 40. SLPN ve SLPG karışımlarının kür sürelerine göre serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	52
Şekil 41. SLPG ve SLPN numunelerinin ıslanma-kuruma periyoduna ait görüntüsü.....	53
Şekil 42. SL numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	55
Şekil 43. SLPG5 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	55
Şekil 44. SLPG10 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	56
Şekil 45. SLPG15 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	56
Şekil 46. SLPG20 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	57
Şekil 47. SLPN5 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	57
Şekil 48. SLPN10 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	58
Şekil 49. SLPN15 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	58
Şekil 50. SLPN20 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.....	59
Şekil 51. SLPG ve SLPN karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi...	59
Şekil 52. SLPN karışımlarının donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları.....	61
Şekil 53. SLPG karışımlarının donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları.....	61
Şekil 54. Doğal zemine ait düşen koni penetrasyon grafiği.....	73
Şekil 55. SL karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	73
Şekil 56. SPN5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	74
Şekil 57. SPN10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	74
Şekil 58. SPN15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	75
Şekil 59. SPN20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	75
Şekil 60. SPG5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	76
Şekil 61. SPG10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.....	76

Şekil 62. SPG15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	77
Şekil 63. SPG20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	77
Şekil 64. SLPN5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	78
Şekil 65. SLPN10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	78
Şekil 66. SLPN15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	79
Şekil 67. SLPN20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	79
Şekil 68. SLPG5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	80
Şekil 69. SLPG10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	80
Şekil 70. SLPG15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	81
Şekil 71. SLPG20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği. ....	81
Şekil 72. Doğal zemine ait kompaksiyon eğrisi. ....	82
Şekil 73. SL karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	82
Şekil 74. SPN5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	83
Şekil 75. SPN10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	83
Şekil 76. SPN15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	84
Şekil 77. SPN20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	84
Şekil 78. SPG5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	85
Şekil 79. SPG10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	85
Şekil 80. SPG15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	86
Şekil 81. SPG20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	86
Şekil 82. SLPN5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	87
Şekil 83. SLPN10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	87
Şekil 84. SLPN15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	88
Şekil 85. SLPN20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	88
Şekil 86. SLPG5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	89
Şekil 87. SLPG10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	89
Şekil 88. SLPG15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	90
Şekil 89. SLPG20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi. ....	90

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

<b>%</b>	: Yüzde
<b>A</b>	: Alan
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Ca</b>	: Kalsiyum
<b>Ca(OH)2</b>	: Kalsiyum Hidroksit
<b>CaCO3</b>	: Kalsiyum Karbonat
<b>CaO</b>	: Kalsiyum Oksit (Sönmemiş Kireç)
<b>CH</b>	: Yüksek Plastisiteli İnorganik Kil
<b>CL</b>	: Düşük Plastisiteli İnorganik Kil
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>cm<sup>2</sup></b>	: Santimetrekaire
<b>cm<sup>3</sup></b>	: Santimetreküp
<b>CPT</b>	: Koni Penetrasyon Deneyi
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>CS<sub>2</sub></b>	: Karbondisülfür
<b>dk</b>	: Dakika
<b>GC</b>	: Killi Çakıl
<b>GM</b>	: Siltli Çakıl
<b>GP</b>	: Kötü Derecelenmiş Çakıl
<b>gr</b>	: Gram
<b>GW</b>	: İyi Derecelenmiş Çakıl
<b>H<sub>2</sub>O</b>	: Su
<b>JG</b>	: Jet Grout
<b>k</b>	: Geçirgenlik Katsayısı
<b>K</b>	: Potasyum
<b>kg</b>	: Kilogram
<b>km</b>	: Kilometre
<b>kPa</b>	: Kilopaskal (kN/m <sup>2</sup> )
<b>LL</b>	: Likit Limit
<b>lt</b>	: Litre

<b>m</b>	: Metre
<b>m<sup>2</sup></b>	: Metrekare
<b>m<sup>3</sup></b>	: Metreküp
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>MgO</b>	: Magnezyum Oksit
<b>MH</b>	: Yüksek Plastisiteli İnorganik Silt
<b>ML</b>	: Düşük Plastisiteli İnorganik Silt
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>Na</b>	: Sodyum
<b>PI</b>	: Plastisite İndisi
<b>PL</b>	: Plastik Limit
<b>rpm</b>	: Dakikadaki Devir Sayısı
<b>s</b>	: Saniye
<b>SC</b>	: Killi Kum
<b>SM</b>	: Siltli Kum
<b>SP</b>	: Kötü Derecelenmiş Kum
<b>SPT</b>	: Standart Penetrasyon Deneyi
<b>SW</b>	: İyi Derecelenmiş Kum
<b>w</b>	: Su Muhtevası
<b>w<sub>opt</sub></b>	: Optimum Su Muhtevası
<b>w<sub>n</sub></b>	: Doğal Su Muhtevası (%)
<b>°C</b>	: Santigrad Derece
<b>ρ<sub>k</sub></b>	: Kuru Yoğunluk
<b>ρ<sub>kmax</sub></b>	: Maksimum Kuru Yoğunluk

### **Kısaltmalar**

<b>AASHTO</b>	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
<b>ASCE</b>	: Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği
<b>ASTM</b>	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
<b>CBR</b>	: Kaliforniya Taşıma Oranı
<b>FHWA</b>	: Federal Otoyol Yönetimi (Amerika)
<b>TS</b>	: Türk Standartları
<b>USCS</b>	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi



## BİRİNCİ BÖLÜM

### Giriş

Yer bilimleri, zeminlerin ve kayaların oluşumlarını, hareketlerini ve yapısal kimliklerini inceler. Zeminler, kayaçların fiziksel veya kimyasal yollarla parçalanması sonucu oluşan içinde organik maddeler besleyen ve çeşitli etkiler altında kalarak şekil değişimleri gösteren materyallerdir. Geoteknik, alanında kullanılan yöntemlerden yararlanılarak zemin olarak nitelendirilmiş malzemelerin davranışlarını inceleyen bilim dalıdır.

En genel anlamıyla stabilizasyon zeminlerin mühendislik özelliklerini amacına uygun hale getirmek için yapılan iyileştirme çalışmalarıdır (Önalp, 1983).

Zeminlerin mühendislik özellikleri zayıf ise aşağıdaki uygulamalar gerçekleştirilebilir:

- Zayıf zemini kazı yardımıyla çıkararak temeli sağlam tabakaya inşa etmek.
- Zayıf zeminin yerine mühendislik özellikleri yüksek olan zeminler ile değişim yapmak.
- Yapıyı yeniden projelendirmek veya yapının bulunduğu yeri taşımak (Kocabay, 2019).

Zemin iyileştirme uygulamalarında çok sayıda farklı etkenlere aynı çerçevede bakmak gerekmektedir. Bu minvalde yapılacak olan yöntemlerin niteliği; zemine özgü özelliklere, bulunan ortam çeşidine, uygulamalarda kullanılacak katkı malzemelerine ve buna benzer durumlara göre farklılıklar arz edebilmektedir (Mitchell, & Gallagher, 1998).

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, katkı maddesi olan pomza taşı atıklarının inceltilerek zemin stabilizasyonunda kullanılması ve inceliğin dayanım ve durabilite davranışları üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaca binaen, doğal ve inceltilmiş pomza taşı atıkları kireçli ve kireçsiz olarak doğal zeminle %0, %5, %10, %15, ve %20 oranlarında karıştırılmış ve hazırlanan numunelerin indeks, dayanım ve durabilite değerleri irdelenmiştir.

Çalışma kapsamında hazırlanan numunelere 7 gün, 28 gün ve 84 günlük kürler uygulanmıştır. Bu kür sürelerinin sonucunda serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanmış olan karışımlara ait numunelerde ıslanma kuruma periyotları ve donma çözülme testleri yapılarak durabilite davranışlarına bakılmıştır.

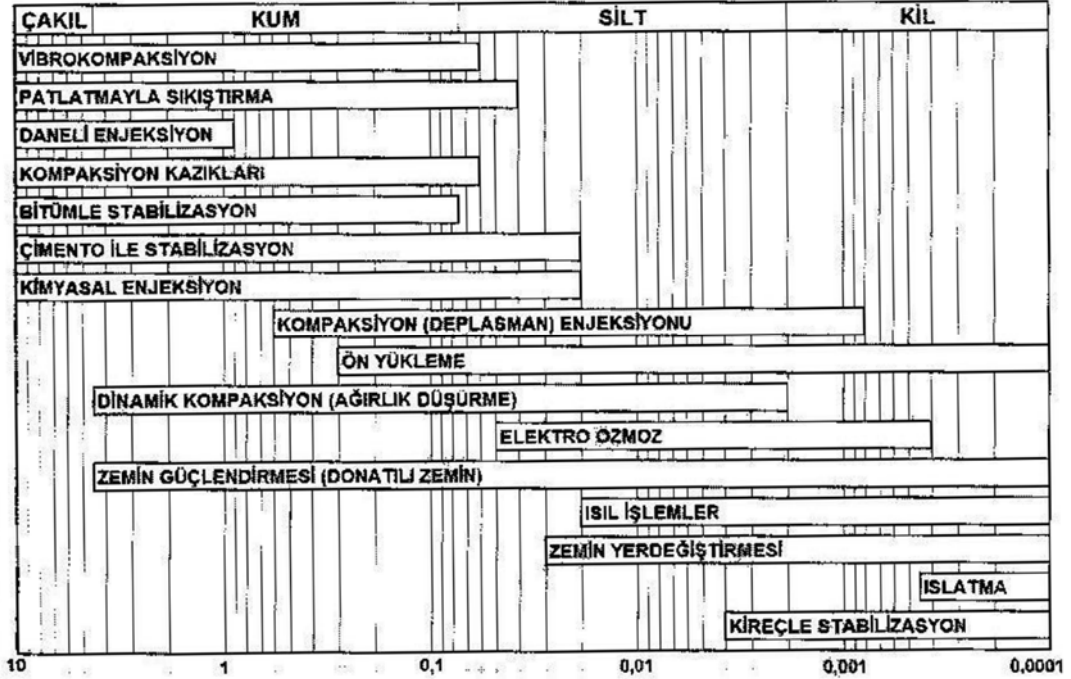
## İKİNCİ BÖLÜM

### Kuramsal Çerçeve

Zeminlere ait iyileştirme uygulamalarına, bu bağlamda yapılan literatür çalışmalarına ve örneklemelere bu kısımda yer verilmiştir.

#### Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zeminin iyileştirilmesinde amaç, zeminde var olan boşlukların en aza indirgenmesi ve zeminin mühendislik özelliklerinin güçlendirilmesidir (Sağlamer, 1985). Zemin stabilizasyon uygulamalarının dane boyutlarına göre sınıflandırılması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Farklı zeminlerde stabilizasyon uygulamaları (Sağlamer, 1985).

Stabilizasyon çalışmalarında gruplandırma kullanarak bu yöntemleri üç grupta ele almıştır. Bu yöntemler, kalıcı olmayan uygulamalar, herhangi bir materyal kullanılmadan yapılan ve kalıcı olan uygulamalar ise katkı malzemeleri kullanılarak yapılan yöntemlerdir (Van Impe, 1989).

Zemin stabilizasyonu çalışmalarında kimyasal katkılı stabilizasyon ve mekanik stabilizasyon yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik stabilizasyon, zeminlerin farklı zeminler karıştırılarak değiştirilmesi ve iyileştirilmesi işlemidir (Edil vd., 2002). Uygulanan yöntem çerçevesinde kullanılacak olan ekipmanların zemin üzerinde sabit ya da hareketli bir şekilde

kullanılarak zeminin karışımı sağlanır. Ardından hazırlanan bu karışım yüzeye serilip dikkatlice sıkıştırma işlemi yapılır (Çalık, 2012). Mekanik yöntemdeki ana gaye, kıvam limit değerlerinde düşüşler meydana getirmek ve durabilite özelliklerinin yükseltmektir (Winterkorn, & Fang, 1975). En yaygın kullanılan yöntem olan kimyasal ıslah yönteminde ise zemine katılan katkıların aracılığıyla zemin ile katkı arasında reaksiyon oluşturulup zemindeki yapısal nitelikleri güçlendirme amaçlanır (Lambe, Khosla, & Jayaratne, 1990).

Kimyasal stabilizasyonda amaç, zeminin dayanımını artırmak, oluşacak oturmaları azaltmak, durabilite davranışlarını arttırmak ve zeminin geçirgenliğini azaltarak mühendislik özelliklerinde iyileştirmeler meydana getirmektir.

Kimyasal stabilizasyon yönteminde iki reaksiyon meydana gelmektedir. Meydana gelebilecek reaksiyonları katyon alışverişleri ve çimentolaşma reaksiyonlarıdır (Michel, 1993). İyileştirme çalışmalarında bu iki reaksiyonun birlikte meydana geldiği zaman en etkili sonuçlara ulaşılır.

Geoteknik alanında, zemin iyileştirme yönteminin zeminlere uygulanan stabilizasyonun uygunluğu SPT ve CPT deneyleriyle birlikte arazi koşullarında mutlaka irdelenmelidir. Ulaşılan sonuç zayıf kalması durumunda gereken özellikler sağlanana dek, iyileştirme çalışmaları tekrarlanmalıdır (Kayabalı, 2010).

İyileştirilme yöntemleri zemin cinsleri ve amacına göre farklılıklar arz edebilir. Tablo 1’de zemin cinslerine göre zemin stabilizasyonları sunulurken, Tablo 2’de stabilizasyonların amaçlarına göre kullanılmaları verilmiştir (U. S. Army Corps. of Eng., 2003).

Zeminlerde çeşitlerine ve ıslah amacına göre uygulanacak stabilizasyon metotları Tablo 3 yardımıyla açıklanmıştır (Öntürk, 2011).

Tablo 1. *Zemin Çeşitlerine Göre Stabilizasyon Metotları (Hunt, 1986)*

Zemin cinsleri		Stabilizasyon yöntemleri
Çeşitli dolgular	Sığ	Kazı/Geri dolgu
	Derin	Dinamik kompaksiyon, kum kolonlar
Organik zeminler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar, taş kolonlar
Yumuşak killer	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar
Killer		Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal(dondurma), elektro-osmoz, geosentetik, drenaj
Gevşek siltler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, tuz katkısı
	Derin	Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonlar, elektro-osmoz, vakum kuyuları
Gevşek kumlar	Sığ	Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibroflasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma)
Sıvılaştırılabilen zeminler		Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj
Şişen zeminler		Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento, uçucu kül, tuz, kimyasal katkıları
Çatlaklı kayalar		Enjeksiyon, ankraj, püskürtme beton, yüzey altı yatay drenaj

Tablo 2. Stabilizasyon Amaçlarına Göre Uygulanan Metotlar (U. S. Army Corps. of Eng., 2003)

Amaçlar	Stabilizasyon Yöntemleri
Sıvılaşma direncini artırmak, Deplasmanları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Taş kolonlar Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Çakıl kolonlar Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Farklı oturmaya maruz kalabilecek yapıların zeminlerini ıslah etmek. Farklı oturma, deformasyon ve kırılma direncini artırmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Mini kazıklar Jet grout
Ani oturmaları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Şişen zeminleri ıslah etmek.	Çimento stabilizasyonu Kireç stabilizasyonu Drenaj Mekanik stabilizasyon
Şev stabilitesini artırmak.	Çakıl drenler Payanda dolgusu Granüler kolonlar (kum ve çakıl) Kompaksiyon enjeksiyonu Zemin çivi ve vidaları Jet grout
Konsolidasyon oturması oranını artırmak.	Sürsarj dolgulu veya dolgusuz yüzey drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıl)
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak.	Sürsarj (Ön yükleme) Jetgrout Taş kolonlar Kompaksiyon enjeksiyonu Elektro-osmoz
Sızıntı yollarını kapamak ve / veya su akımı doğrultusundaki borulamayı azaltmak.	Penetrasyon enjeksiyonu Kompaksiyon
Erozyon direncini artırmak.	Mekanik stabilizasyon Bioteknik stabilizasyon Kompaksiyon
Çatlaklardan ve bileşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek.	Kompaksiyon enjeksiyonu
Göçen zeminleri ıslah etmek.	Derin dinamik kompaksiyon Enjeksiyon Vibrokompaksiyon

Tablo 3. Zemin Islah Yöntemleri ve Kullanım Amaçları (Öntürk, 2011)

Uygulanan yöntem	Zemin türü		Zemin iyileştirme amacı				
	Daneli	Kohezyonlu	Taşıma Gücü	Oturma Kontrolü	Stabilite	Çevresel Sebepler	Sıvılaşma
Vibrokomp.	✓		✓	✓			✓
Kum Sık. Kazıkları	✓		✓	✓			✓
Kompaksiyon Kazıkları	✓		✓	✓			✓
Dinamik Kompaksiyon	✓		✓	✓		✓	✓
Patlatma	✓		✓				✓
Önyükleme		✓	✓	✓			
Düşey Direnler		✓	✓	✓			
Isıtma		✓		✓			
Soğutma	✓	✓				✓	
Geosentetikler		✓	✓	✓			
Mini Kazıklar	✓	✓	✓	✓			
Fore Kazıklar	✓	✓	✓		✓		
Zemin Çivileri	✓	✓			✓		
Donatılı Zemin	✓					✓	
Derin karıştırma	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Taş Kolonlar		✓	✓	✓	✓		✓
Permeasyon enj.	✓		✓	✓	✓	✓	
Çatlatma Enj.		✓	✓	✓		✓	
Komp. Enj.	✓	✓	✓	✓			✓
Jet Enj.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Zemin stabilizasyon çalışmalarında yapılacak olan iyileştirmenin maliyeti oldukça önemlidir. Tablo 4'te zemin ıslah uygulamalarında ortalama maliyetler çizelgesi belirtilmiştir. Islah yöntemleri çerçevesinde tabloda ifade edilen yöntemlerin bir kısmının oldukça maliyetli olmasına karşın bazı uygulamalarda oldukça ekonomik olarak kullanılabilir metotlardır.

Tablo 4. *Zemin Islah Yöntemi İçin Yaklaşık Maliyetler (U.S. Army Corps of Eng., 2003)*

Metodlar	Göreceli maliyet	\$/m	\$/m <sup>2</sup>	\$/m <sup>3</sup>	Referans
Derin dinamik kompaksiyon	Düşük	-	8-32	5	FHWA (1998)
Vibrokompaksiyon	Düşük-Orta	Arka dolgusuz 15, granüler arka dolgulu 25	-	1-4	Ledbetter (1985)
Taş kolonlar	Orta	45-60	-	-	Adailer (1996)
Çakıl direnler	Orta	11-22	-	-	
Patlatma tekniği ile kompaksiyon	Düşük	-	-	2-4	
Jet grout	Yüksek-Çok yüksek	Sızma kontrolü 30-200 Kazı sahasının desteklenmesi 95-650	-	-	FHWA (1998)
Zemin çivileri	Orta-Yüksek	-	Geçici 165-775, Sürekli 160-400	-	
Kompaksiyon enjeksiyon	Düşük-Orta	-	-	5-50	
Derin zemin karıştırılması	Yüksek-Çok yüksek	-	-	100-150	
Kimyasal enjeksiyon	Yüksek	-	-	150-400	Hayward (1996)
Bioteknik stabilizasyon	Uygulamaya bağlı	Bitkilendirilmiş geogridler 40-100	Şevi ağ şeklinde saran bitkilendirme 275-550	-	ASCE (1997)
Zeminin değiştirilmesi	Orta	-	-	10-20	Hayward (1996)
Düşey drenler	Düşük	1.2-4	-	-	FHWA (1998)
Taneli enjeksiyon	Orta	-	-	3-30	Adailer (1996)

Zemin Stabilizasyon çalışmaları yüzeysel ve derin stabilizasyon olmak üzere ikiye ayrılır.

### **Derin iyileştirme yöntemleri.**

En sık uygulanan derin ıslah yöntemleri, kum dren uygulamaları, jet grout, taş kolon yapımı, kazıklı yöntemler ve derin karıştırma metotlarıdır (Ayan, 2009).

### ***Kum drenleri metodu.***

Bu yöntemde zeminde burgular yardımı ile delikler açılır ve bu deliklerde kumlu kolonlar yapılır. Kum drenler, genellikle 1 ile 3 m aralıklarla ve ortalama 30 ile 60 cm genişliklerde uygulanır (Demiröz, & Karaduman, 2009).

### ***Geosentetik dren.***

Dane boyutu ince olan zeminlerin ön yüklemesi, 5-10 yıla varan oldukça uzun sürelerde meydana gelebilir. Bu durumu kısaltarak oturmayı hızlandırmak suretiyle zeminde belirli mesafelerde drenler oluşturulur. Bu işlemin yapımında uygulama alanını saran bir boru yerleşimi yapılır ve ardından açılan boşluk kısma malzemelerle doldurma işlemi yapılır (Uzuner, 2013). Böylelikle plastik drenlerle daha kısa sürede ön yükleme tamamlanmış olur.

### ***Vakumla su emme yöntemi.***

Vakumla su emme yöntemi, dolgu yapımının maliyetli olması durumunda veya yumuşak olan zeminde kayma dayanımının sürşarj yüksekliklerine sınırlama getirilen yüzeylerde kullanılan bir uygulamadır. Uygulamada üst tabakada geçirimsiz bir katman oluşturulur ve etrafı kapatılır. Yüzeeye yapılacak olan bu vakum dren sistemi içerisinde yer alır. Meydana gelen bu farkla da boşluk suyu basıncında oturmaları neden olur (Ayan, 2009).

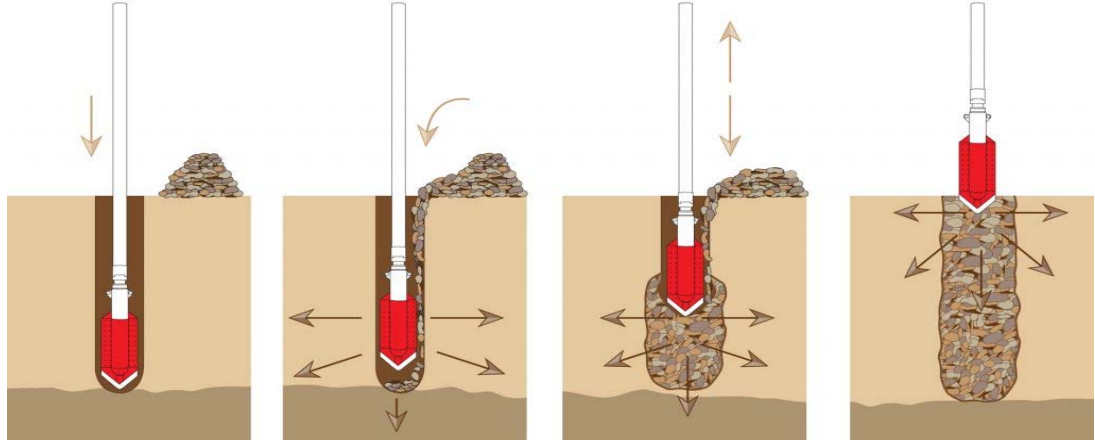
### ***Önyükleme metodu.***

Sıkıştırılabilir bir zemin üzerine yapılacak yapıdan dolayı ortaya çıkabilecek oturma problemleri büyük ölçütlerde olabilir. Yapı yapımına başlamadan önce oturma sürelerini kısaltabilmek adına yapının mevcutta olabilecek ağırlığına özdeş kuvvetler kullanılarak killi zeminlerin konsolidasyon süreleri kısaltılabilir. Yöntemin yapılmasının ardından istenilen oturma meydana geldiğinde, kullanılan yükleri boşaltmak üzere dolgular kaldırılır (Demiröz, & Karaduman, 2009).

### ***Vibroflotasyon yöntemi.***

Vibraflotasyon metodunda vibroflot olarak adlandırılan 1,5 ile 2,5 m uzunluğunda, 0,3 ile 0,5 m çapında, büyük silindir biçiminde bir vibratör kullanılır (Öksüz, 2006). İlk olarak vibroflot vinç yardımıyla alana taşınır ve alt başlık kısmında bulunan yüksek titreşim ve basınca sahip su sıçratılarak kendi ağırlığıyla zemin içerisine indirilir. İstenen derinliğe gelindiği anda su hızı azaltılır ve etki yönü ters istikamete alınır. Basıncılı olan bu suya ait hareket yönü dolgu malzemesinin zeminin köşe noktasına gitmesine sebep olur. Bu işlem devam ettiği süre zarfında alet etrafında 3 m'ye kadar alan sıkışması meydana gelir. Daha sonra kademe kademe alet zemin içerisinden çıkarılır ve yinelenerek devam edilir. Metot kapsamında 15 m derinliklerine dek zeminde sıkışma olabilesi mümkündür. Yönteme ait işlem basamakları Şekil 2'de verilmiştir. Bu metodun sıkıştırılmamış kumlu ve su düzeyi fazla olan kaba taneli zeminlerde kullanılması olumlu sonuçlar vermektedir.





Şekil 2. Vibraflotasyon uygulama basamakları (Das, 2002).

Direk güç kompaksiyonu sıkıştırma yönteminin farklı bir şeklidir. İnilecek çukurda vibratör vasıtasıyla yerleştirilen borunun uç kısmına bir miktar kum malzemesi bırakılır. Ardından basınçlı hava verilir ve hava verildiği esnada kaplama borusu çekilir. Daha sonra, boru vibrasyonla beraber tekrar itilerek kumlu malzeme sıkıştırılır ve şişen bir balon şeklini alır. Yapılan işlemlere devamında 60 ve 80 cm eninde kazıklar oluşur (Önalp, 1983).

#### ***Kompaksiyon kazıkları.***

Kompaksiyon kazık yöntemi 1950'lerde Japonya'da geliştirilmiş ve günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan bir yöntemdir. Gevşek kumlu zeminleri iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir ayrıca killi zeminlerde de uygulanmaktadır. Bu yöntemde en iyi sonuç su ihtiyacı az olan kumlu zeminlerde elde edilmektedir. Kil içerikli olan zeminler için fazla uygun değildir (Öztoprak, 2016). Kompaksiyon kazıkları, sıkıştırılmamış kumlu zeminlerde yoğunluk değerlerini yükselten, sıkıştırma adına zemine yerleştirilen ve zeminin iç kısmında bırakılan çelik kazıklardır.

Zeminde çakma işlemi sırasında titreşim ve deplasman ile beraber sıkıştırma yapılır. Direkler genellikle çakılan zeminlerde bırakılır. Yapılan bu işlem nedeniyle biraz pahalı bir yöntemdir. Kazıklar zeminde istenilen düzeyde sıkışma oluşturmak sebebiyle kısa mesafelerde gömülürler. Kullanılan bu kazıkların aralarında genellikle 1,0-1,5 m civarlarında açıklık bırakılır (Tumluer, 2006).

#### ***Patlatma metodu.***

Patlatma yönteminde, zeminde bulunan katmanlarda belirli aralıklarla yerleştirilen sınırlı miktarda patlayıcı maddesinin uzaktan bir mekanizma ile patlatılmasıyla yapılan bir uygulamadır. Uygulamanın yaygın olarak kullanılma nedeni kısa sürede yapılabilmesi ve

oldukça ekonomik olması ile beraber her durumda kullanılabilmesidir. 30 ile 40 m derinliklerine kadar kullanılabilir. Patlatma işlemi dinamit ve TNT kullanımı ile yapılır. Patlatma sonrasında çevrede meydana gelebilecek etkileri tahmin etmek mümkün değildir (Çetin, 2006).

Patlayıcı olan bu maddeleri zemine yerleştirmek amacıyla boruyla ya da çakarak yapılan yöntemler kullanılarak zemine indirilir. Patlayıcı yerleştirildiğinde boru yukarı çekilir. Zemin yüzeyinin alt kısımlarının gevşek geriye kalan kısımların ise yüzeysel kompaksiyon ile sıkıştırılarak zeminin sıkıştırılması sağlanır (Öksüz, 2006).

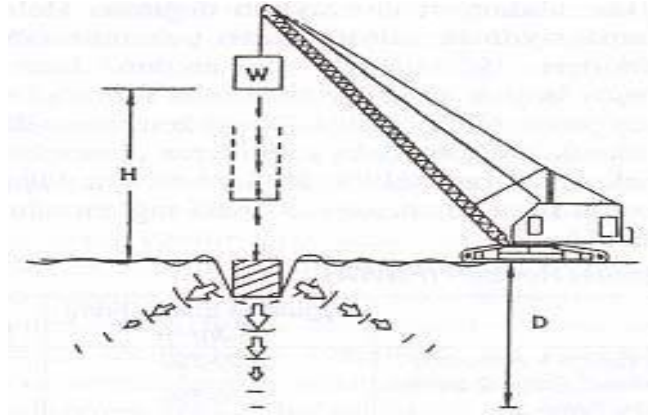
Patlatıcı maddelerin genel olarak faydalandığı alanlardan biri de suyun altındaki gevşek zeminlerin 1-3 m üstünden yapılan çıkarımlardır. Yaklaşık 20 m suyun alt kısmında yer alan kaba kum zeminde üst kısımdan atılan yaklaşık 20 kg ağırlıklı patlayıcı madde ile yüzey kısmında yaklaşık 250 mm çökme olduğu gözlemlenmiştir (Önalp, 1983).

Toz boyutunda bulunan malzemelerde yapılan yöntemde ise araziye suyla sardıktan sonra 5 kg'lık atımlar yapılmaktadır. Oluşacak etkinin sınırlandırılması amacıyla alanda kenar kısımlarına 0,5 m genişliğinde ve belirli derinliklerde kuyular kazılır, suyun zemin derinliğinde etkili olması adına belirlenen yerlerde sondaj çukurları kazılır (ENPC-LCPC, 1977).

### ***Dinamik kompaksiyon.***

Zeminin mekanik özelliklerinin yüzeyden daha derin seviyelerde iyileştirilmesi adına yapılan zemin stabilizasyon işlemidir. Bu uygulama Almanya'da otoyolların yapım esnasında 1930'lu yılların başlarında kullanılmaya başlanmıştır. Aynı uygulama daha sonralarda İngiltere'de araştırmalar sonucunda hayata geçmiştir (Loos, 1936).

Yöntem çerçevesinde kullanılan bir vinç vasıtasıyla belirli yükseklikten bazı ağırlık ölçütlerinde zeminde dövme şeklinde yapılan düzgün şekilli ıslah işlemleridir. Uygulamada kullanılan kütle, betondan oluşan bir prizma şekline sahiptir (Uzuner, 2000). Zeminde sıkışma işlemi 20 m kalınlıklarına kadar yapılan bir yöntemdir. Genel olarak yerleşim bölgelerinde kullanılan bu yöntemde atıklarla yapılan doldurma işlemleri ve çakıllı malzemelerin kullanımı ile olumlu sonuçlara ulaşılmıştır (Ayan, 2009). Dinamik kompaksiyon yöntemi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dinamik kompaksiyon uygulaması (Tunç, 2002).

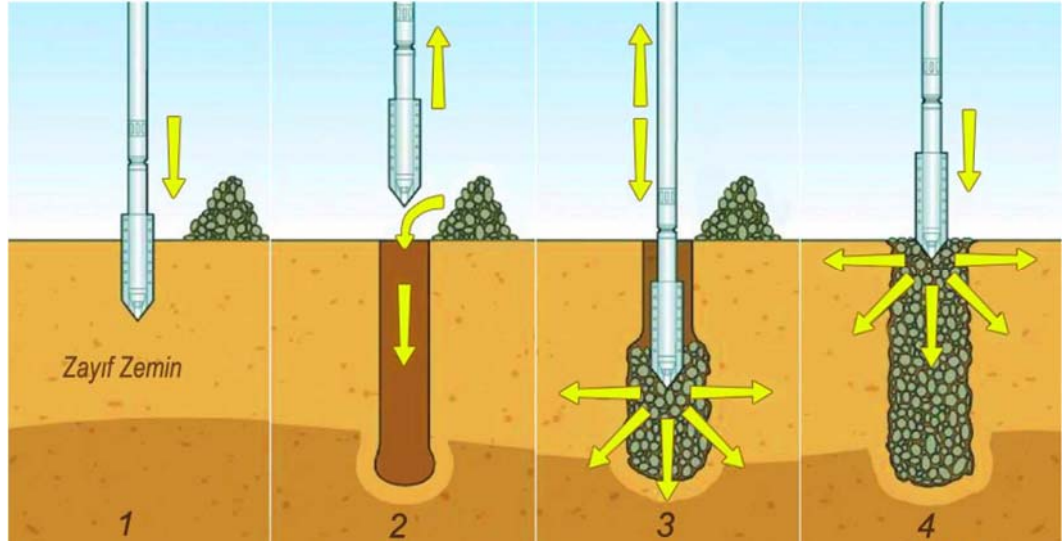
Düşme uygulamasında saha genelinde belirli aralıklarla uygulanır. Düşürme sonrasında oluşan çukurlar kepçe vb. makinelerle düzeltilir. Devamındaki düşürmede zemin tekrar sıkıştırılıp işlemlere devam edilir. Kum zeminlerde en çok kullanılan bu metot farklı türlerde de başarılı sonuçlara ulaşım olanağı sağlar (Menard, 1977). İnce taneli zeminde en iyi sonuçların alınabilmesi için zeminin yapısını bozabilecek enerji, belirli sürelerde yükselen su hareketi ve basıncı nedeniyle çatlakların meydana gelmiş olması gerekir (Tunç, 2002).

#### ***Taş kolonlar.***

Taş kolonlara ilk olarak 19. yüzyıl'da Fransa'da rastlanmış ve doğal zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı gerçekleştirilmiştir. Avrupa ülkelerinde 1950 yıllarından itibaren, ABD'de 1972 yılından itibaren kullanımı artmıştır (Demir, 2007). Ülkemizde bu yöntem 90'lı yıllardan itibaren ilk kez Gemlik'te bulunan Bor Çelik üretim atölyesinde kullanılmıştır (Durgunoğlu, Kulaç, İkiz, & Karadayılar, 1992).

Genel olarak sert olmayan kil içerikli zeminlerde uygulanan bu yöntemde, yüzeye gelen ağırlıkların zeminle beraber olarak bu kolonlarla taşınması sağlanır. Taş kolon yönteminde zeminlerde oturmalar azaltılır ve basınç dayanımlarında artışların meydana gelmesi sağlanmaktadır. Zeminin oturma problemini %50-60 oranında azaltır. Ayrıca ince daneli zeminlerde sıvılaşma problemine çözüm şeklinde de kullanılabilir (Özdemir, 2007).

Taş kolon üretimleri 3 kademede yapılır. Zemin içerisinde düşey bir delik oluşturulur ve iç kısmına materyal doldurularak sıkışma sağlanır. İnce taneli zeminde taş kolonların yapılma aşamaları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Taş kolon yapım aşamaları.

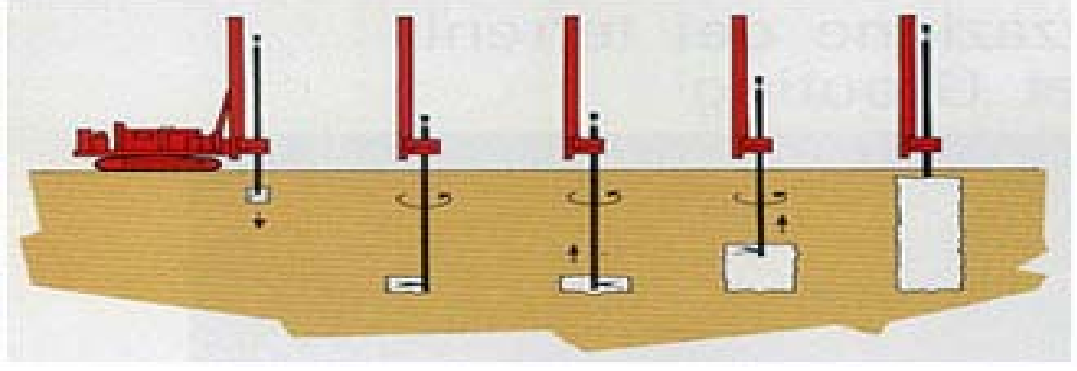
Bu yöntemin güvenilirliği şantiye çalışanlarının tecrübelerine bağlıdır. Taş kolon yöntemi tek ve büyük bir kolonda taşıma kapasitesinin geliştirilmesinde, akaryakıt tanklarının depolarının yerleştirildiği zeminde, radye temellerde ve baraj yapılarının iyileştirilmesinde dayanıklı bir alt tabaka oluşumu için kullanılmaktadır (Hughes, & Withers, 1974).

#### ***Derin karıştırma metodu.***

ABD’de yapılan çalışmalar sonucunda kullanılmaya başlanan bu uygulama daha sonralarda Japonya, Çin ve İsveç gibi ülkelerde detaylandırılarak daha kapsamlı bir hal alınması sağlanmıştır (Bruce, & Bruce, 2003).

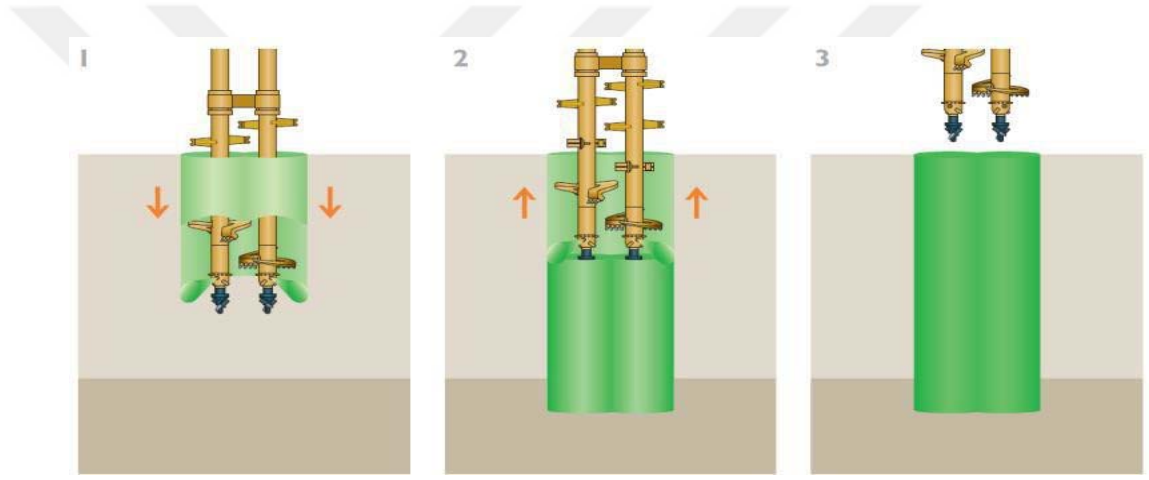
Bu metodun uygulamasında uç kısmında palet bulunan, orta kısmı boş olan burgu ve kanatlara sahip olan materyal kullanılır. Zeminle beraber iyileştirme çalışmalarında etkili katkılar kullanılarak silindirik biçimde kolonlar yapılır (Kayabalı, & Mollamahmutoğlu, 2004).

Zeminlerin derin karıştırılması yönteminde, zeminin kayma mukavemetini arttırmak, geçirimsizliği azaltmak ve ayrıca zarar verebilecek malzemelere karşı koyacak dayanımlara sahip olmaları istenir. Zemine güç katabilecek materyaller olarak sönmüş kireç, cüruf, çimento ve farklı katkı malzemeleri kullanılabilir. Uç kısmı delik olan burgu gövdesi istenilen derinliğe ulaştırılmasından sonra boru içerisinden bağlayıcı malzeme pompalanarak zemine karıştırılır. Kullanılması planlanan bu maddelerin ıslah çalışmalarında ortalama %20 ile %30 oranlarında kullanımları yapılmalıdır (Doru, 2014). Derin karışım uygulaması Şekil 5’te verilmiştir.



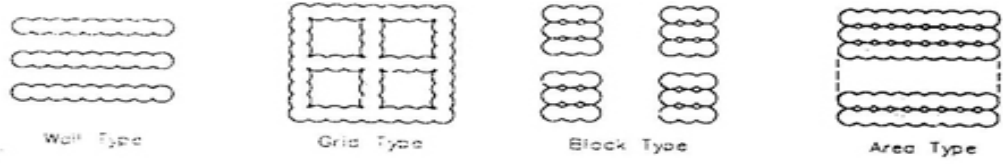
Şekil 5. Derin karıştırma yöntemi uygulaması.

Karıştırma işlemleri aşağıdan yukarıya olduğu gibi tam aksine yukarıdan aşağıya doğru da yapılabilir. Şekil 6'da ıslah metoduna ilişkin uygulama şekilleri sunulmuştur.

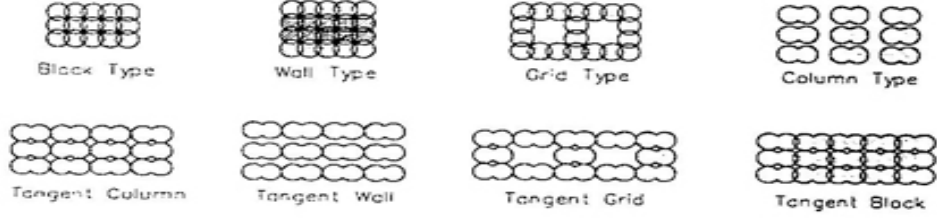


Şekil 6. Derin karıştırma ıslah uygulaması (Anonim, 2012).

Kolonların uygulama şekillerine göre duvar tipi, kafes veya blok şeklinde yapılabilir. Yapılan kolon çapları genellikle 0,6 m - 1,2 m olup, derinlikleri yaklaşık 40 metre civarına gelmektedir (Bagherinia, 2013). Bu metodu kendi başına, duvar tarzında olan yapıya düzenli ayak oluşturmak için gruplar şeklinde ya da hücremsi bir biçim oluşturularak uygulanabilir. Şekil 7'de ıslah uygulamasına ait tip ve modeller verilmiştir. Derin karıştırma uygulamasına yönelik önerilen farklı yöntemler Şekil 8'de sunulmaktadır.

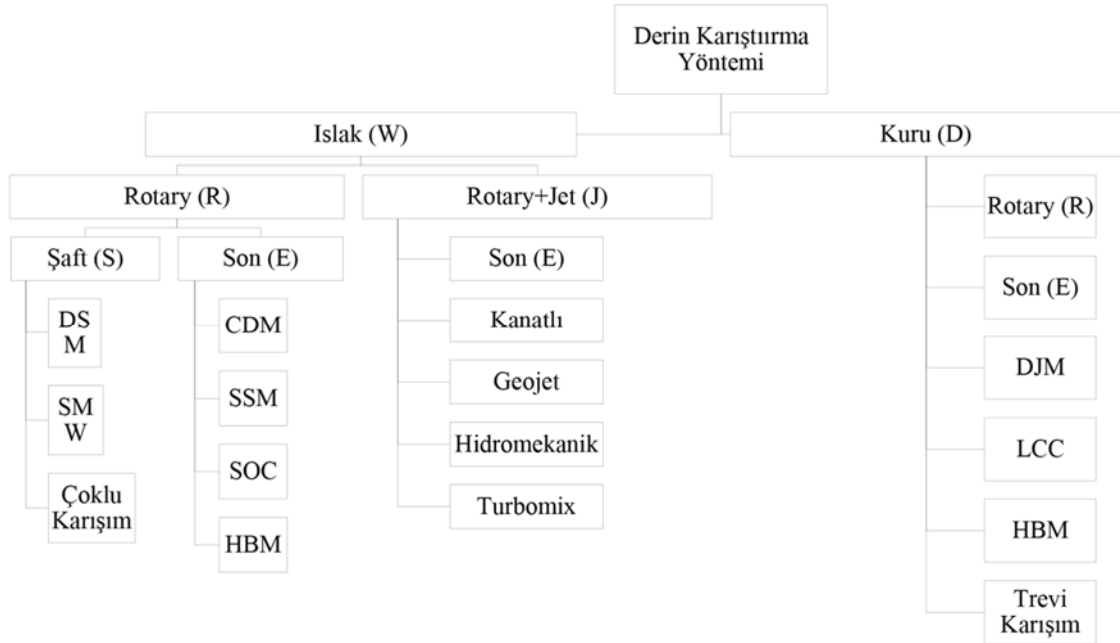


Basic SMW Treatment Patterns on Land



Basic CDM Treatment Patterns in Ocean

Şekil 7. Derin karışimli ıslah uygulama tip ve modelleri (Yang, 1997).



Şekil 8. Derin karıştırma uygulamasına yönelik öneriler (Porbaha, 1998).

Bu ıslah yönteminin uygulama alanları geçirimsiz perdeler, rıhtım yapıları, kazı çukurlarının çökmeye karşı korunması, sıvılaşmaya karşı önlem alınması ve temele ilave destek yapımı olarak ifade edilebilir (Altun, 2010). Kireç katkısı kolonlarda toplam karışım malzemesinin %5 ile %15 aralığında kullanılır. Yapılan başka bir uygulamada cüruf ve çimento kullanımıyla farklı olan zeminlerin bu yöntemle daha avantajlı olarak iyileştirilebileceği sonucuna varılmış ve karışımda kireç katkısının kullanımından sonra yaklaşık dayanımlarında 80 kat ve deformasyonunda ise 40 kat artışlarının olduğunu tespit etmiştir (Ergun, 1996).

### **Kireç kazıkları.**

Kireç kazığı uygulaması Çin'de eski yıllardan itibaren uygulanmaktadır ve sönmemiş

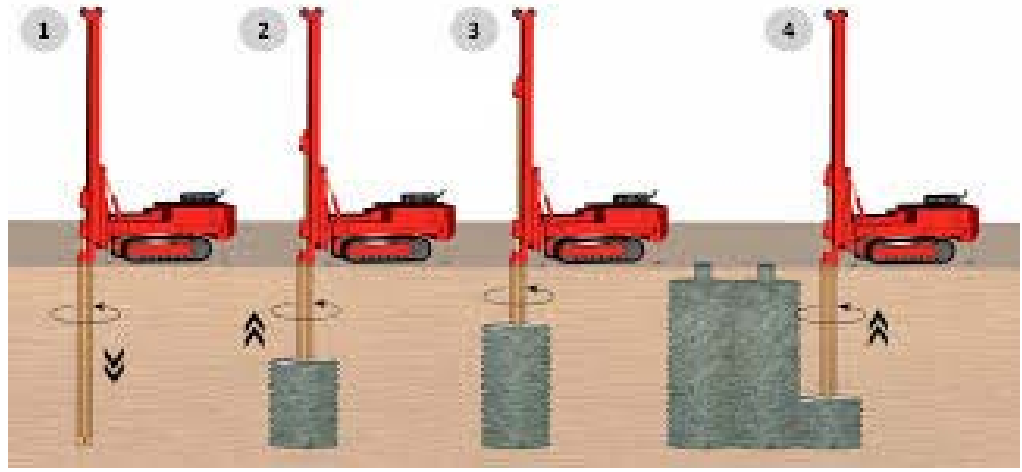
kirecin (CaO) sıkıştırılması şeklinde uygulanır. Su muhteva değeri %50 oranından fazla olan ince siltli ve/veya kil içeren zeminde oldukça uygun bir metottur (Horne, 1964). Reaksiyon sonucunda meydana gelen hidrasyon sonucunda, kirecin hacminde artış meydana gelir ve uygulandığı sondaj kuyusunun çevresinde 1250 ile 1400 kPa aralığında yüksek basınçlar meydana getirir. Bu durum zeminde radyel oturmalara neden olur. Şuan yapılan çalışmalarda 10 metre derinliklerinde yapılacak kuyu için genişliği 30 santimetre olan bu kazık 1-2 m aralıklarla zemine yerleşimi sağlanır (Demiröz, & Karaduman, 2009).

Çalışma sahasındaki kireç kazıklarını sırasıyla kum kazıkları ile değiştirilerek verimlerinin kaybolmasının engellenmesi sağlanır. Böylelikle uygulama daha ekonomik olur. Daha sonra su ve kum kazık yardımıyla uzaklaştırılır. Reaksiyonun bitiminde yüksek sıcaklıklar meydana geleceği için suya ait akıcılığın azaltılması tepkimeleri de hızlandırır (Ayan, 2009).

Kireçli kazıklar, etrafında bulunan zeminin kayma direncini ve şevdeki hassaslığını olumlu yönde etkiler (Handy, & Williams, 1967). Aynı zamanda kireç kazıkları uygulandığında hacim artışına neden olduğundan dolayı kazık etrafında bulunan doymuş kil zeminlerde radyel çatlak oluşturur ve zeminlerin kompaksiyonunda etkili bir yere sahip olur (Tystovich, Abelev, & Takhirov, 1971).

#### ***Jet grout metodu.***

Japonya’da bulunan bu uygulamada zeminin içerisine viskoz olan bir madde basılarak zemine ait kitlelerin kesilmesiyle düzenli olarak kolon oluşturma işlemidir (Karol, 2003). İyi bir karışımla homojen şerbet kıvamına getirilen çimento ve bentonit maddesinin yarma makinesi ile istenen derinliğe pompa vasıtasıyla basınç uygulanarak zemin içerisine püskürterek zemin içinde birleşimleri ile meydana gelen uygulama olarak nitelendirilir (Demiröz, & Karaduman, 2009). Başka bir çalışmada, yüksek basınçlı olan su jetlerinin kullanımı ile kesilen zeminin yerine, eşzamanlı ve dikkatli bir şekilde çimento katkısı enjeksiyonu verilmesi diye tanımlamışlardır (Welsh, Rubright, & Coomber, 1986). Bu ıslah uygulaması 4 aşamadan oluşur. Bu dört aşama Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Jet grout metodunun imalat aşamaları: 1-Delme, 2-Püskürtme, 3- Kolon şeklinin oluşması ve 4-Tamamlanma (Nikbakhtan, & Osanloo, 2009).

Günümüzde 3 çeşit jet grout uygulaması kullanılmaktadır. Oldukça yaygın kullanılan yöntemde; zeminde gerekli görülen fiziksel özellikler ile maliyet koşullarına göre kullanılacak sistem belirlenmektedir. Jet enjeksiyonu sistemlerinin karşılaştırması ve imalat parametreleri Tablo 5'te ve Tablo 6 üzerinde belirtilmiştir.

Tablo 5. Jet Enjeksiyonu Yönteminde Üretim Ölçütleri (Lunardi, 1997)

Sistem	Enjeksiyon Tipi	Basınç (bar)	Nozul Adetleri ve Çapı (adet, mm)	Çekme Hızı (cm/dk)	Dönme Hızı (rpm)	Su/Çimento Oranı	Pompa Kapasitesi (lt/dk)
Jet 1	Çimento	400-500	1-2 x 2-5	15-100	5-15	1,0-1,5	70-600
Jet 2	Çimento	400-550	1-2 x 2-5	10-30	4-8	1,0-1,5	70-600
	Hava	10-12		10-30			4000-10000
Jet 3	Çimento	50-100	1-2 x 4-5	6-15	4-8	1,2 - 1,5	80-200
	Hava	10-12		6-15			4000-10000
	Su			6-15			40-100

Tablo 6. Jet Grout Sistemlerinin Karşılaştırması (Altun , 2010)

Zemin Cinsi	Kolon Çapı	JG Kolon Dayanımı
Jet1 Kum ve Çakıl Kil	60 cm – 90 cm (110 cm'e kadar)	70 – 250 kg/cm <sup>2</sup> 20 – 100 kg/cm <sup>2</sup>
	60 cm – 90 cm	
Jet2 Kum ve Çakıl Kil	90 cm – 180 cm (300 cm'e kadar)	35 – 140 kg/cm <sup>2</sup> 10 – 70 kg/cm <sup>2</sup>
	90 cm – 150 cm	
Jet3 Kum ve Çakıl Kil	150 cm – 240 cm 90 cm – 180 cm	35 – 105 kg/cm <sup>2</sup> 10 – 50 kg/cm <sup>2</sup>

Jet grout metodu, killi, siltli veya farklı zeminlerde uygulanabilir ve kullanım alanları bakımından gün geçtikçe artmakta olan bir uygulamadır. Jet grout yönteminin başlıca kullanım alanları; istinatlarda, derin olan temellerde, çöp sahalarında, temel gibi yapılara yapılan temel takviyesi olarak kullanımları mümkündür (Melegari, & Garassino, 1997).

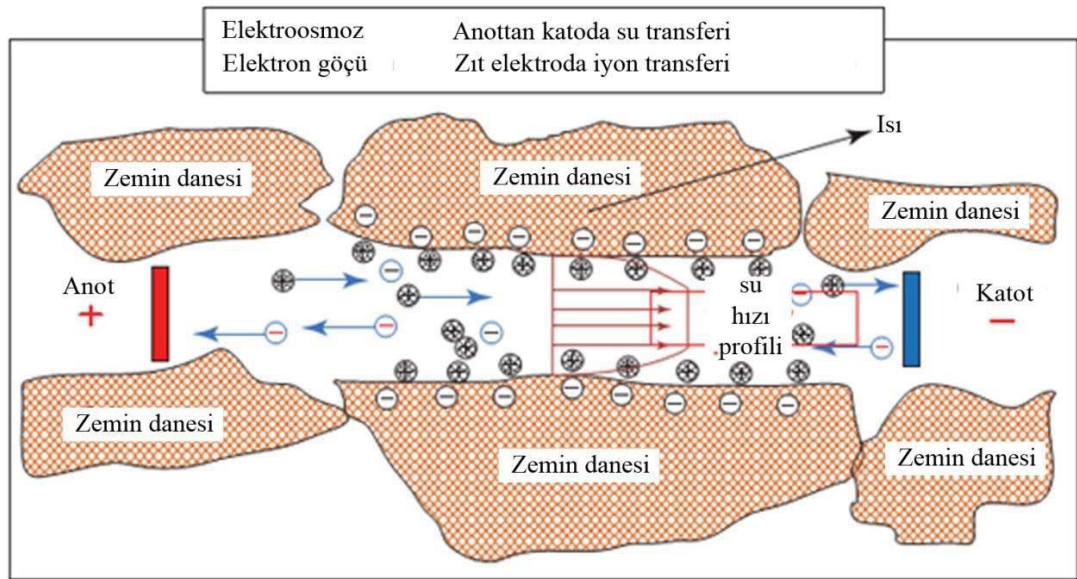


### ***Elektro-osmoz.***

Elektro-kinetik olarak da adlandırılan elektro-osmoz yönteminde ince daneli olan zeminleri iyileştirebilmek için zemine doğru akım uygulanmasıyla su seviyesinin azaltılarak zemindeki oturmaları hızlı hale getiren metottur (Sağlamer, 2011). Elektro-osmoz yöntemi boşluktaki suyun artı uçtan eksi uca hareketiyle meydana gelen tepkime işlemidir.

Katotta biriken su, yapı yapılması planlanan zeminden uzaklaştırılır. Artı uçtan eksi uç yönüne su akışları olur ve bu sırada negatif boşluk suyu basıncı oluşur. Ardından efektif gerilmenin artmasına karşın toplamdaki yüklerin değişmemesi oturmaları neden olur (Uzuner, 2006). İnce daneli zeminlerde suyun uzaklaştırılması farklı stabilizasyon uygulamalarıyla kolaylıkla yapılamamaktadır. Çünkü bu yöntemde olduğu gibi zeminlerde daneler arasındaki su rahat bir şekilde uzaklaşamaz. Bu nedenle kullanılacak olan yöntem olarak elektrik metotları seçimi daha doğrudur (Uzuner, 2000).

Anot ile katot arasında oluşan doğru akımın ince daneli zeminlere verilmesiyle suyun akışının artı uçtan eksi uca doğru yönelmesiyle suya ait drenaj yapılmış ve mevcut zeminde sıkışma olduğunu ifade etmiştir ve Şekil 10 ile açıklamaya çalışmıştır (Briaud, 2013).



Şekil 10. Killerde elektro-osmoz (Briaud, 2013).

### ***Isıl işlemler.***

Termal işlemler olarak da isimlendirilen bu yöntem, kayma dayanımında artışlar sağlamak, zeminde geçirimsiz bir tabaka oluşturmak ve ayrıca deformasyonları yükseltmek sebebiyle zeminde yapılan ısıtma ya da dondurma çalışmalarıdır. Genel olarak maliyetli olmasından dolayı tercih edilmez (Kayabalı, & Mollamahmutoğlu, 2004). Bu yöntem ısıtma ve dondurma uygulamaları olarak iki grupta incelenir.

### *Isıtma metodu.*

Isıl işlem yöntemi ile zeminde; plastisite indis değerlerinde, mukavemetlerinde ve taşıma kapasitelerinde olumlu etkiler meydana gelir. Isı ile zemin içerisinde su kaybı ortaya çıkar ve katılaşır. Zeminde kazılan kuyu içlerinde yakıtların yakılmasıyla büyük sıcaklıklar elde edilen killi zeminlerde, kuyu etrafında 2-3 m çaplarında silindirik biçimde katılaşır. Böylelikle pişmiş olan bu killi zeminler, geri dönüşümü olmayan özelliğe sahip olurlar.(Uzuner, 2000).

### *Dondurma metodu.*

Dondurma yöntemi sık kullanılan bir uygulama değildir. Göçebilir veya akış eğilimine sahip tünellerde, yer altındaki kazılarda veya açık kazıların yapımlarını kolay hale getirmek sebebiyle boşluk suyunun azaltılarak zemindeki dayanımı arttırmak için uygulanır (Maag, 1938).

### **Yüzeysel iyileştirme yöntemleri.**

Derin zemin stabilizasyonu yönteminin gerekli olmadığı düşünülen kısımlarda bu yöntem kullanılır. Bunun gibi iyileştirme yöntemleri genellikle yapılan yapılara ait yükün büyük değerlerde olmayan ve yolların yapımlarında kullanılması uygun bir uygulamadır. Başka bir deyişle fazla derine inmeden üst kısmın güçlendirilmesi olarak nitelendirilmektedir. Yüzeysel ıslah yöntemi 2'ye ayrılır (Öksüz, 2006).

### ***Katkısız stabilizasyon.***

Zemine hiç bir madde katılmadan yapılan iyileştirmeye katkısız stabilizasyon denir. Mevcutta var olan zemine ait granülometri eğrisi müsaitse uygulanır (Özaydın, 1989). Katkısız iyileştirilme yöntemi 2 gruba ayrılabilir.

### ***Kompaksiyon yöntemi.***

Kompaksiyon uygulamasında en önemli etken sudur. Suyun zeminlerin danelerinde yoğun halde olmasını ve danelerin tekrardan yapılanabilmesini sağlar. Bunun neticesinde zemine ait maksimum kuru ağırlık ve kayma dayanımlarında artışlar meydana getirir. Ancak belirli bir su içeriği miktarından itibaren maksimum kuru ağırlıklarında düşüş olur. Kompaksiyon parametrelerinden biri olan, zeminin kolayca sıkışma yaptığı su içeriklerine optimum su içeriği adı verilmektedir ve ayrıca bunlara denk gelen kuru birim hacim ağırlıklarına da maksimum birim hacim ağırlığı denilmektedir (Kocabey, 2019)

Kompaksiyon yönteminde zemin daneleri içerisindeki havanın dışarı atılmasıyla birlikte birbirlerine daha çok yaklaşır. Kompaksiyon uygulaması sonrasında sıkıştırmalar,

oturmalar azalırken, kayma dayanımları, taşıma kapasiteleri ve maksimum kuru ağırlıkları yükselir (Çakır, 2001).

Genellikle ince taneli zeminlerde silindir ile vibratör kullanımı yapılırken; iri daneli zeminlerde ise lastik tekerlek sıkıştırıcı ve keçi ayaklı silindir aletleri uygulanır. Ayrıca hepsinde tokmak kullanımı da yapılabilir. Sıkıştırma aletlerinin genel özellikleri Tablo 7’de gösterilmektedir (Tülek, 2007).

Tablo 7. Sıkıştırma Gereçlerinin Genel Karakteristik Özellikleri (Tülek, 2007)

Adı	Kütlesi (ton)	Hızı (km/saat)	Titreşim (Hz)	Tabaka kalınlığı (m)	Geçiş sayısı
Titreşimli tokmak	0,30 - 0,10	-	7,00 - 10,0	0,20 - 0,40	2,0 - 4,0
Titreşimli plaka	0,06 - 0,08	1,00	10,0 - 80,0	0,15 - 0,50	2,0 - 4,0
Hafif titreşimli silindir	0,60 - 2,00	2,00 - 4,00	25,0 - 70,0	0,30 - 0,50	4,0 - 6,0
Titreşimli ayak	6,00 - 15,0	8,00 - 10,0	25,0 - 30,0	0,30 - 1,50	4,0 - 6,0
Ağır titreşimli silindir	6,00 - 15,0	6,00 - 13,0	25,0 - 40,0	0,30 - 1,50	4,0 - 6,0
Vurmalı silindir	7,00	10,0 - 14,0	-	0,50 - 3,00	30’a kadar

#### *Drenaj yöntemi.*

Drenaj, herhangi bir yerde bulunan suyun doğal ya da yapay yollar yardımıyla zeminden ayrı bir kısma taşıma işlemleridir. Suların bulunduğu zeminden uzaklaştırarak zemine ait kesme dirençlerini ve stabilite değerini yükseltir. Zemindeki suyun içeriğinde meydana gelebilecek artışlar, genel olarak kohezyonlu olan zeminlerde mukavemetin ve taşıma kapasitesinin azalmasına sebep olur (Uzuner, 2006).

Drenajlar yüzeysel ve yüzey altı drenajları olmak üzere iki çeşidi vardır. Yüzeyin altında kullanılan drenaj yöntemi, enine yarmalarda ve dolgularda iri daneli drenlerin şiltesi ve dren borusuyla yatayda delikli olan dren borularını kullanarak yapılır. Ayrıca düşeyde yüzey altı drenaj yapılarında, yolun merkez kısımlarından yapılan hendekler yardımıyla su taşınır ve mukavemet değerleri de artar (Tunç, 2001).

Yüzeysel drenaj yöntemi yağışlar nedeniyle yüzeysel akış şeklinde yönelen suların kontrol edilmesidir. Deşarj edilecek olan suyun debisine, kullanım yerlerine ve amacına uygun olarak bordür hendekleri, düşüm olukları ve menfez olarak uygulanmaktadır (Tunç, 2001). Suların uzaklaştırılması için hendekler eğim verilerek yapılır ve hendek zeminleri de gelen suyun akışını engelleyemeyecek şekilde düzenlenir (Uzuner, 2000).

### ***Katkılı stabilizasyon.***

Mühendislik açısından zayıf zeminlere farklı özelliklere sahip katkı maddeleri eklenmesiyle mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi yöntemidir. Katkı materyalleri için en yaygın kullanılan kireç taşı, uçucu küller, çimento ve bitümdür. Kimyasal ıslah uygulamasında kullanılacak katkı seçimi için rehber Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. *Kimyasal Islah Uygulamasında Kullanılacak Katkının Seçimi (U.S. Army Corps of Eng., 2003)*

Alan no	Zemin sınıfı	Önerilen katkı	Kısıtlamalar	200 No.lu elekten geçen	Açıklamalar
1A	SW SP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	
1B	SW SP SW-SC	Bitüm Çimento Kireç	PI<10 PI<30 PI<12	-	
1C	SM SC SM-SC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
2A	GW GP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	
2B	GW GP GW- GC GP-GC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 PI<30 PI>12 PI<25	-	Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda
2C	GM GC GM-GC	Bitüm - Kireç K- Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
3	CH CL ML ML-CL	Çimento Kireç	LL<40 ve PI<20 PI>12	- -	Organik ve kuvvetli asidik zeminler uygun olmamaktadır.

### ***Bitüm katkı maddesi ile stabilizasyon.***

Bitüm, ağırlık bakımından çeşitli hidrokarbon karışımları veya bir arada bulunmaları ile oluşan metal olmayan türevleriyle beraber olan ve yapışkan özellikli materyal olarak tanımlanmaktadır (Kett, 1998).

Bitümlü malzemeler zemindeki danelerin arasında geçirimsizlik oluşturan bir işleve sahiptir. Kullanılması planlanan maddenin killerden temizlenmesi şartıyla danelerin birbirine yapışmalarını ve zemin içerisindeki sızıntıyı yok eder. Uygulanan yöntem içerisinde ilave edilecek malzeme %5 ile %10 oranlarında asfalt ya da katrandır. Bitüm katkı maddesi ile ıslah uygulamaları genellikle yol ve üst tabaka kesimlerinde kullanılır (Uzuner, 2000).

### *Uçucu kül katkı maddesi ile stabilizasyon.*

Termik santrallerde yakılarak elde edilen taban külleri, yüksek fırın cürufaları ve uçucu kül olarak 3 farklı madde oluşumu gerçekleşir (Aksoy, 1992). Uçucu kül en yaygın şekilde kullanılan puzolan olarak 0.09 mm inceliğe kadar öğütülmüş kömürlerin yaklaşık olarak 1600°C sıcaklıklarına kadar yanması sonucu oluşan ve bacalarda yapışan tozlu atıklardır. Atmosfere sürüklenemeyen ve fırın tabanında biriken boyut olarak büyük olan atıklara da taban külleri denilir (Mehta, 1986). Bu santrallerden meydana gelen atıkların geneli uçucu küllerdir (Çalık, 2012). Yolların alt tabanlarında kullanılması uygundur (Yıldırım, 2002). Genel olarak %10-35 oranlarında uçucu kül + %2-10 oranlarında kireç karışımları en iyi sonuçlara ulaşılan karışımlardır (Yılmaz, 2015).

Uçucu kül atık maddesinin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli zemin mekaniği testleri yapılırken kimyasal özellikler için analizler yeterlidir. Bu maddenin özelliklerinde farklılıkların oluşması; kullanılan kömüre, yakma şekli, öğütme inceliği, toplama veya depolama biçimlerine bağlıdır (Atanur, 1972).

Uçucu küllerin içeriğinde bulunan kalsiyum oksit oranına göre C tipi ile F tipi şeklinde 2 çeşidi bulunmaktadır. Analiz özelliklerinde kalsiyum monoksit miktarı %10 oranından çoksa C tipi şeklinde adlandırılırken %10'dan az CaO içeren uçucu küllerde F tipi olarak nitelendirilmiştir. Bitüm maddeli kömür yakılması sonucu F tipi uçucu küller meydana gelir. CaO miktarı C sınıfına göre düşük olduğundan ve silisle birlikte alümina içermesinden dolayı tek başına çimentolaşma özelliği oldukça azdır. Ancak kireç katkısı ile beraber tepkime sonrasında puzolan özelliği gösterir. Linyit kömürlerinin yanması sonucunda meydana gelen içerdiği kireç oranı fazla olan C sınıfı uçucu küller oluşur. Yüksek oranda kireçli olduğundan dolayı tek başlarına kullanımları mümkündür (Tumluer, 2006). Uçucu küle ait fiziksel özellikler Tablo 9'da, sağlaması gereken fiziksel değerler Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 9. *Uçucu Küle Ait Fiziksel Özellikler (Gücek, 2011)*

Çap (Mikron)	Ren	Şekil	Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )	İncelik
1 – 200	Gri	Yuvarla	2,2 - 2,7	Yaklaşık çimento inceliğinde

Tablo 10. *Uçucu Külün Sahip Olması Gereken Fiziksel Değerler (Çalık, 2012)*

	ASTM C 618 (2002)		TS 639 (1975)
	F sınıfı	C sınıfı	
İncelik; 45 mikron göz açıklığında kalan miktar, max. %	34	34	-
Özgül yüzey alanı, min. mm <sup>2</sup> /g	-	-	300000
Dayanım aktivite indeksi; 28. gün, min. %	75	75	70
Su ihtiyacı; Kontrol örneğine kıyasla, max. %	105	105	-

Zemin iyileştirme çalışmalarında uçucu kül katkısının kullanımı basınç dayanımlarını artırır, ilave kazıları ve dolgu maliyetini düşürür, yapılma hızlarını artırır ve taşıma gücü arttığından dolayı da yapılacak dolgu kalınlığını azaltır. Bazı durumlarda zemin iyileştirme çalışmalarında farklı maddeler ile de birlikte kullanılabilir (Çetin, 2011).

#### *Çimento katkı maddesi ile stabilizasyon.*

Çimento yapısında yüksek sıcaklıklarda yanan doğal kalker taşları ve kil karışımından oluşan, suyla hidrasyon sonucu dayanım kazanan bir maddedir. Stabilizasyon çalışmalarında en yaygın kullanılan çeşidi ise portland çimentosudur. Kilin kırılmasıyla, kalker taşı ya da kumun eklenip öğütme işlemleri yapılır ve toz biçimine getirilir. Oluşan bu malzeme dönel fırında 1500 °C sıcaklıkta pişirilir. Tüm bu işlemlerden sonra oluşan ürüne klinker adı verilir. Daha sonra klinkere %4-5 oranlarında alçıtaşı eklenip boyut olarak oldukça küçük boyutlu olması sonucunda portland çimentosu elde edilmiştir. (Tumluer, 2006).

Çimento ile stabilizasyon zeminde son derece büyük etkiler yaratmakta olan bir uygulamadır. Karayollarında ve hava meydanlarının yapımlarında çimento ile iyileştirme sıkça kullanılan bir yöntem olmuştur. Genel olarak çimento katkısı %15 oranlarına kadar zemine ilave edilir ve zemin karıştırılarak kompaksiyon yapılır (Fidan, 2016).

Çimento ile iyileştirme çalışmalarında kullanılan zemin türü ile karışım oranları dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Su oranı dayanım ile plastisite indisi değerlerinde oldukça etkili olabilmektedir (Littlejohn, 1982). Çimento katkısının saf kohezyonlu zeminlerde ve organik zeminlerde uygulanması olumlu bir sonuç vermemektedir. Tek eksenli basınç deneyleri sonuçlarına göre stabilizasyon için gerekli olan optimum çimento oranı belirlenir. İnce daneli zeminlerde optimum su muhteva değerinden fazla olan oranlarda su ilave edilerek deneyin yapılması daha olumlu verilere ulaşılmasını sağlamaktadır (Uzuner, 2013).

Çimentoyla zemin iyileştirme yöntemi gevşek ve viskoz olmayan zeminlerde kullanılmakta olup oldukça da etkili olmaktadır. Deneyde kullanılacak zemine çimento katkısının ilavesiyle zemine ait likit limit değeri düşerken plastik limitinde ve işlenebilirlik özelliği artmaktadır. Çimento katkı maddesi kireç gibi kür süresinin artmasıyla kullanıldığı zeminin dayanımını artırır. Tablo 11’de değişik zemin gruplarına ait çimento oranları sunulmuştur. Kireç ile çimentolu iyileştirmelerde durabilite koşulları Tablo 12’de sunulmaktadır.

Tablo 11. *Değişik Zemin Gruplarına Ait Çimento Oranları (Tunç, 2002)*

AASHTO Zemin sınıfı	Birleştirilmiş zemin sınıfı	Tipik çimento içeriği (% ağırlıkça)	Çimento ihtiyacı sınırları	
			Hacimce (%)	Ağırlıkça (%)
A-1-a	GW, GP, GM, SW,SP,SM	5	5-7	3-5
A-1-b	GM, GP, SM, SP	6	7-9	5-8
A-2	GM, GC, SM, SC	7	7-10	5-9
A-3	SP	9	8-12	7-12
A-4	CL, ML	10	8-12	7-12
A-5	ML, MH, CH	10	8-12	8-13
A-6	CL, CH	12	10-14	9-15
A-7	MH, CH	13	10-14	10-16

Tablo 12. *Kireç İle Çimentolu İyileştirmelerde Durabilite Koşulları (Tunç, 2002)*

Zemin türü	Durabilite tetkikleri sonucu numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp (%)
Granüler, PI>10	8-14
Granüler, PI<10	11-14
Kil	6-14
Silt	8-14
A-6, A7	7
A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	10
A-1, A-2-4, A-2-5, A-3	14

#### *Kireç katkısı ile zemin stabilizasyonu.*

Kireç, kalkerin ya da başka bir deyişle kirecin kalsinasyonu ile oluşan çokça kalsiyum içeren malzemelerdir. Kirecin kimyasal yapısına bakıldığında kalsiyum karbonatı ve magnezyum karbonat elementlerini içerir (Kızılcıkelik, 2010). Kireç taşına özgü olarak yapılmış fırınlarda çeşitli ısı (850-14500°C) aralıklarında pişmesi sonrasında meydana gelen maddelerdir. Pişme işine kalsinasyon tepkimesi adı verilmektedir. ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ )

Kireç renk olarak beyaz renkte olup ve çeşidine bağlı da çimento gibi suyla ve havayla sertliği artar. Su ile bir araya gelerek karışımda kullanıldığında bağlayan bir malzemeye dönüşür. Tepkime sonucunda ortaya çıkan CaO (sönmemiş kireç), suyla temas ettiği takdirde sönmüş kireç ve ısı ortaya çıkar (Ghabae, 2015).

CACO3 bileşiğinin oluşması için CO<sub>2</sub> ve CaOH tepkimeye girer ve yeniden kalsiyum karbonatı oluşturur. Bu reaksiyona da karbonasyon adı verilir. Kireç maddesinin nakliye ve depolama esnasında sürekli olarak atmosferle etkileşimde olmasıyla ortaya çıkar. Ortaya çıkan tepkime kirecin yüzdesini azalttığı için genellikle istenmez (Pektaş, 2012). Kirece ait bileşimler Tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 13. *Kirece Ait Bileşimler (Öntürk, 2011)*

Bileşimi teşkil eden maddeler	Kalsiyum kireci (söndürülmüş) S-KK 80 (ağırlıkça %)
CaO	En az 80
MgO	< 5
CO <sub>2</sub>	En çok 7
Asitte çözünmeyen maddeler, SiO <sub>2</sub> dahil	En çok 1,5
Metal oksitler: AlO <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> dahil	En çok 1
SO <sub>3</sub> dahil	En çok 2

Kireçle stabilizasyon eski yıllardan beri kullanılan iyileştirme yöntemlerinden biridir. Mısır, Çin, Persler, Babiller ve Hititliler tarafından kullanılmıştır. Ayrıca Romalılar da kireç katkısını yol yapımlarında ve su içi çalışması yapılan inşaatlarda kullanmışlardır. (Ghabae, 2015). Kireç modern inşaat uygulamaları çerçevesinde ilk defa 1924 yılında kullanılmış ve 1930'lu yıllarda da direkt olarak yolların stabilize edilmelerinde uygulanmıştır. Çağdaş anlamda kireçle stabilizasyon 2. Dünya Savaşı zamanlarında ulaşım yapılarında yaygın olmak üzere kullanımı sağlanmıştır. Kireç günümüz koşullarında da temellerin stabilitesi konusunda kullanım alanı olan ve ayrıca hava sahalarında, demir ve otoyollarda iyileştirme uygulamaları adına kullanımı sağlanan malzemelerdir (Erkan, 2007).

Ayrıca kalsiyum oksitin havada bulunan nem ile kolayca reaksiyona girmesiyle yapılan stabilizasyonun etkinliği azalabilir. Sönmemiş kireç ile yapılan iyileştirme genel anlamda iri taneli zeminde kullanım alanı olurken, killi ve siltli zeminde genellikle sönmüş kireç seçilir (Yılmaz, 2015).

Kireçle stabilizasyonu, dolgu malzemesi koşulunu taşıyamayan, zayıf mühendislik özelliklerini barındıran zeminlerde kireç kullanılarak uygulanan ıslah çalışmalarıdır (Kavak, Güngör, Avşar, & Atbaş, 2008). Değişik zemin gruplarında ve çeşitli boyutlarda olan zeminlerde kireç katkısı ile iyileştirme uygulamaları yapılabilmektedir. Kireçle zemin iyileştirme yöntemi, uygun olmayan veya yetersiz görülen zeminlerin uygun hale getirilmesine, iyileştirme maliyetinin düşürülmesine, dolgu ve yarma hacimlerinde azalmaya, kompaksiyon derecesine kolayca ulaşılmasına ve zeminin sahip olduğu mukavemet değerlerinde ve kapasitesinde artış meydana getiren bir yöntemdir (Pektaş, 2012).

Kireçle stabilizasyon çalışmasında sönmüş olan kireç çeşidi genel olarak seçilir. Oldukça yüksek sonuçlar vermesine karşılık çok tehlikeli olan sönmemiş kireçler bu nedenle çalışmalarda kullanılmaz (Kocabey, 2019). Zemin iyileştirmesi çalışmaları için kullanılan kireç oranı zeminin miktarına oranla yaklaşık %10 dolaylarına dek kullanım sağlanır (Ghabae, 2015). Kil minerallerini içerisinde bulunduran bu zeminlerde kirecin belirtilen oranlarının katılmasıyla olumlu sonuçlar elde edilir. Kireçle yapılan iyileştirme uygulamalarında killi



malzemenin kimyasal yapısı bozularak malzemenin eski haline geri dönüşümü olmaz. Suyula etkileşiminde killere benzemeyen bu maddelerin katkısı ile iyileştirme de büyük bir avantaj sağlar (Özdemir, 2007).

Çakılıoğlu (2007) tarafından yapılan çalışma sonucunda bentonit kiline %10 kireç oranı katkısı sabit tutulup belli miktarlarda uçucu küller ve zeolitleri eklemiştir. Deneyler kapsamında geoteknik deneylerini yapmış ve karışım oranlarının etkilerini incelemiştir. Yapılan bu çalışma kapsamında %100 kil + %10 kireç + %5 zeolit ve %5 oranında uçucu külleri ilave ettiği zeminler için temel tabakası olarak kullanılabilirliğini tespit etmiştir. Türköz (2006), yapmış olduğu dört farklı katkı oranlarında karıştırdığı numunelerde şişme deneylerini yapmıştır. Katkı eklenmemiş durumda ve etkili şişme değerlerini sağlayan modifiye proctor ile sıkıştırılan karışımlarda, kireç katkı maddesinin şişme yüzdesi kontrolünde oldukça önemli derecede etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Araştırma kapsamında sıkıştırılan numunelerde şişme yüzdesinin, etkin enerji seviyesinde daha yüksek olduğu gösterilmiştir.

İçerisinde yüksek oranlarda organik malzeme bulundurmayan zeminin kireç katkısıyla ıslah edilmeleri pek başarılı sonuçlar vermemektedir (Çalık, 2012). Zemin yapısında %5'den daha fazla organik madde bulunması durumunda ıslah yönteminde meydana gelecek tepkimeleri olumsuz etkilemektedir (Arman, & Moonfish, 1972). Aynı zamanda kireç stabilizasyonuna da zarar verir. Bu zarar ilk başlarda anlaşılmamakta olup ancak kuruma-ıslanma periyotlarında zemin ufalanarak dağılmakta olduğundan zarar verdiği sonucuna ulaşılmaktadır (Nelson, & Debora, 1992). Çeşitlerine göre zemin iyileştirilmesinde kullanılan optimum kireç miktarları Tablo 14'te verilmiştir. Nelson ile Debora (1992) farklı türler için zemin iyileştirmesini daha sade halde tablolatırılmış olup Tablo 15'te verilmiştir.

Kirecin kullanım miktarları etkili bir karışım için %5-10 oranları arasında değişmektedir. Başlangıç olarak %2 ile %3 civarlarındaki ağırlığına kadar olan kısım zeminin özelliğini ve işlenebilirliğini geliştirmede önemlidir (Raj, 1995). Tablo 16'da kirecin katkısının önerilen kullanım miktarları gösterilmiştir. Benzer kireç içeriğinde olan çeşitli zemin türlerinin zamana bağlı mukavemet artışı Şekil 11'de verilmiştir.

Tablo 14. Zemin Türlerine Göre Zemin İyileştirilmesinde Kullanılan Optimum Kireç Miktarları (Tunç, 2002)

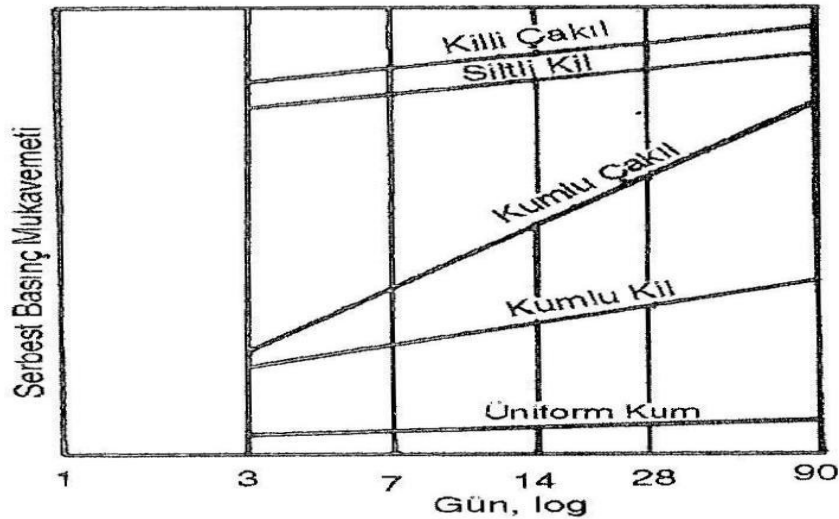
Zemin türü	Zeminin kuru ağırlık yüzdesi
Siltli kil	2 - 4
İyi derecelenmiş çakıl	3
Plastik kil	3 - 8
Yüksek plastisiteli kil	3 - 10
Kumlu kil	5
Kumlar	Tavsiye edilmez
Organik zeminler	Tavsiye edilmez

Tablo 15. Farklı Zemin Türleri Ne Göre Kireç Oranları (Nelson, & Debora, 1992)

Zemin Türü	Tavsiye edilen yaklaşık kireç miktarı (%)	
	Sönmemiş kireç	Sönmüş kireç
Killi Çakıl	2-3	2-4
Siltli kil	3-8	5-10
Kil	3-6	3-8

Tablo 16. Kireç Katkısının Önerilen Kullanım Miktarları (Ingles, & Metcalf, 1972)

Zemin Türü	Modifiyeli (%)	Stabilizasyon (%)
İyi derecelenmiş killi çakıl	1 - 3	3
Siltli killer	1 - 3	2 - 4
Plastik killer	1 - 3	3 - 8
Yüksek plastisiteli killer	1 - 3	3 - 10
İnce çatlaklı kaya	2 - 3	Önerilmez
Kumlu killer	Önerilmez	5
Kumlar	Önerilmez	Önerilmez
Organik zeminler	Önerilmez	Önerilmez



Şekil 11. Aynı kireç içeriğinde olan farklı zemin türlerinin zamana bağlı zamana bağlı mukavemet artışı (Tunç, 2002).

Kireç ile stabilizasyonda gereken reaksiyonların olabilmesi adına ortamda suyun bulunması şarttır (Little, 1987). Kireç ile zemin stabilizasyon çalışması sonucunda katyonlarda değişimler, ayrışmalar ve çimentolaşmayı meydana getirir (Fang, 1991).

Kil danelerinde gözüken monovalan katyonları ve divalan kalsiyum iyonları yer değiştirir. Katyon değişimindeki dizilim  $Al_3+>Ca_2+>Mg_2+>NH_4+>K+>Na+>Li^+$  şeklindedir. Yapılan dizilimde herhangi bir katyon, sağ tarafında bulunan iyonları değiştirebilir. Böylece kil tanecikleri aralarında kenetlenip daha büyük tanecikler oluşturur. Bunların sonucunda geçirimsizlik, işlenebilirlik artışı olurken; likit limit, plastisite indisinde ve şişme-büzülmede azalmalar meydana gelir, mukavemet değerlerinde ve sıkışa bilirlkte ise iyileşmeler olur (Çalık, 2012).

Kireçle stabilizasyon uygulamaları sonucunda zeminlerde kısa ve uzun dönemde birtakım değişiklikler olmaktadır. Uzun dönemde olan değişikliklerde kayma dirençleri, şişme yüzdelerinde, basınç dayanımlarında ve donlara karşı dayanımlarında yükselmeler meydana gelir (Kavak, & Akyarlı, 2007).

Eades ile Grim (1966), zemin içerisinde belirli oranlarda kireç katkısı eklemiş ve serbest basınç deneylerini yapmışlardır. Çalışma neticesine göre kireç miktarının artmasıyla birlikte %200-1000 arasında artışların meydana geldiğini gözlemlemişler ve zemine kireç katkısının katılmasıyla yapılan stabilizasyonun zeminin dayanımına katkısının uzun yıllar sürebilecek etkileşimlerinin olduğu tespit edilmiştir (Trb, 1987).

Kavak (1996), yapmış olduğu çalışmasında bentonitle beraber kaolinli zeminde kireci ekleyerek serbest basınç dayanımlarını incelemiştir. Yapmış olduğu deneyler neticesinde kaolin numunelerinde bentonitli numunelere göre 2 kat daha fazla yükselmelerin olduğunu tespit etmiştir.

#### *Pomza ile zemin stabilizasyonu.*

Pomza taşının oluşumu sırasında bünyesinde bulundurduğu gazların, aniden terki ve aniden soğuması sebebiyle, büyük ölçekten küçük ölçeklere kadar çok sayıda gözenek içerir. Bu gözeneklerin araları genel olarak (etkili olarak mikro gözenekler) bağlantı bulundurmeyen boşlukların olmasından ötürü permeabilitesi düşüktür, ses ve ısı yalıtımı yüksektir. Pomzanın rengi, gözenekli olması, kristal suyunun olmaması ile farklı türdeki kayalardan ayrılmaktadır. Pomza, genel anlamda renk benzerliği, yakınlığı ve kimyasal bileşimleri gibi özellikleri açısından perlite benzetilmekte olup ve kimi zamanda perlitten ayırt etmek zorlaşabilmektedir. İçerdiği gözeneklerin gözle görülebilir boyutundan, mikroskopta görülebilecek boyutlara

varana dek çok miktarda olup, her biri diğerlerinden ayrı camsı yapıda bir zar yardımıyla yalıtılmıştır. Bundan sebeple hafif, su içerisinde uzun sürelerde yüzebilen ve izolasyonuda yüksek olan bir kayadır (Gündüz *vd.*, 1998).

Kavlak (2008) tarafından yapılan çalışma kapsamında Isparta iline ait gelincik pomzasının karayolu esnek üst yapısında taban zemininde kullanımını incelemiştir. Yapılan çalışmada kullanılan gelincik pomzası için durabilite, basınç dayanımları gibi testler yapılmıştır. Çalışmadaki deney sonucuna bakıldığında ponzanın esnek madde davranışına sahip olmadığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda aşınma değeri bakımından incelendiğinde yolların tabanlarında yönetmeliklere uygun olarak %29 oranı kullanımı varken, soğuk hava şartlarına karşı dayanım için %46,51 değerinde karıştırılması uygun görülmüştür.

Yapılan başka bir çalışmada üst yapılara ait temellerin iyileştirilmesinde kullanılmak üzere Keçiborlu-Çapalı ariyet malzemesine ek olarak Isparta ilinin pomzasıyla beraber cüruf ilavesi yapılmıştır. Hazırlanmış karışımlardan elde edilen numuneler üzerinde yapılan deneyler ışığında en iyi sonuçların katkı oranı yüzdesinin %30 oranı olduğunu elde etmişlerdir (Fındık, 2005).

Keskin ve Çimen (1997) ise yapmış oldukları çalışma kapsamında killi zeminlerin stabilizasyonunda pomza kullanımını incelemişler ve yapmış oldukları deneyler neticesinde pomza taşının CH gurubunda yer alan zeminler üzerinde oldukça önemli etkiler oluşturduğunu elde etmişlerdir.

Özbayoğlu ve Gürel (1997) tarafından yapılan çalışmada, Nevşehir pomzalarının puzolanik maddeler katkıları ile yol stabilizasyonunda kullanılabilirliğini hakkında bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında, kireçli numunelerde %20'lere varan oranların kullanılmasıyla mukavemetlerde ciddi yükselmeler tespit edilmiş ve killi kumlu zemin örnekleri ile beraber hazırlanmış çalışmaların tetkikleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, pomza taşının inceltilmesiyle beraber çeşitli ek katkılar ile ıslah yöntemlerinde uygulanabilirliğini tespit etmişlerdir.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### Materyal ve Yöntem

Bu yüksek lisans tez çalışmasının ana gayesi, ham pomza ve inceltirilmiş pomzanın zemin stabilizasyonunda kireçli ve kireçsiz olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan materyallere, numuneler için yapılan testlere ve referans alınan standartlara yer verilmiştir.

#### Materyal

Bu çalışmada kullanılan doğal malzeme Bayburt il merkezinden 2 metre derinliğe sahip bir çukurdan temin edilmiştir. Getirilen bu doğal zemin Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda muhafaza edilmiştir. Deney çalışmalarına başlamadan önce doğal zemin 1 gün etüv içerisinde kurutulmaya bırakılmış ve kurutma sonrasında deney numuneleri hazırlanmaya başlanmıştır. Deneylerde kullanılan karışımlara ait adlandırmalar Tablo 17'de gösterilmiştir.

Tablo 17. *Deney Numunelerine Ait Notasyon Bilgileri*

Deney numuneleri ait karışımlar	Notasyonlar
Doğal zemin	S
Doğal zemin ve kireç	SL
Doğal zemin ve ham pomza	SPN
Doğal zemin ve inceltirilmiş pomza	SPG
Doğal zemin, kireç ve ham pomza	SLPN
Doğal zemin, kireç ve inceltirilmiş pomza	SLPG
Doğal zemin ve %5 ham pomza	SPN5
Doğal zemin ve %10 ham pomza	SPN10
Doğal zemin ve %15 ham pomza	SPN15
Doğal zemin ve %20 ham pomza	SPN20
Doğal zemin ve %5 inceltirilmiş pomza	SPG5
Doğal zemin ve %10 inceltirilmiş pomza	SPG10
Doğal zemin ve %15 inceltirilmiş pomza	SPG15
Doğal zemin ve %20 inceltirilmiş pomza	SPG20
Doğal zemin, %6 kireç ve %5 ham pomza	SLPN5
Doğal zemin, %6 kireç ve %10 ham pomza	SLPN10
Doğal zemin, %6 kireç ve %15 ham pomza	SLPN15
Doğal zemin, %6 kireç ve %20 ham pomza	SLPN20
Doğal zemin, %6 kireç ve %5 inceltirilmiş pomza	SLPG5
Doğal zemin, %6 kireç ve %10 inceltirilmiş pomza	SLPG10
Doğal zemin, %6 kireç ve %15 inceltirilmiş pomza	SLPG15
Doğal zemin, %6 kireç ve %20 inceltirilmiş pomza	SLPG20

### Doğal malzeme.

Deneyleerde kullanılan doğal zemin Bayburt il merkezinden 2 metre derinliğe sahip bir çukurdan temin edilmiştir. Doğal zeminin tamamı kurutulmuş olup 4 No'lu elekten geçirilmiş ve stabilizasyon çalışması kapsamında kullanılmıştır.

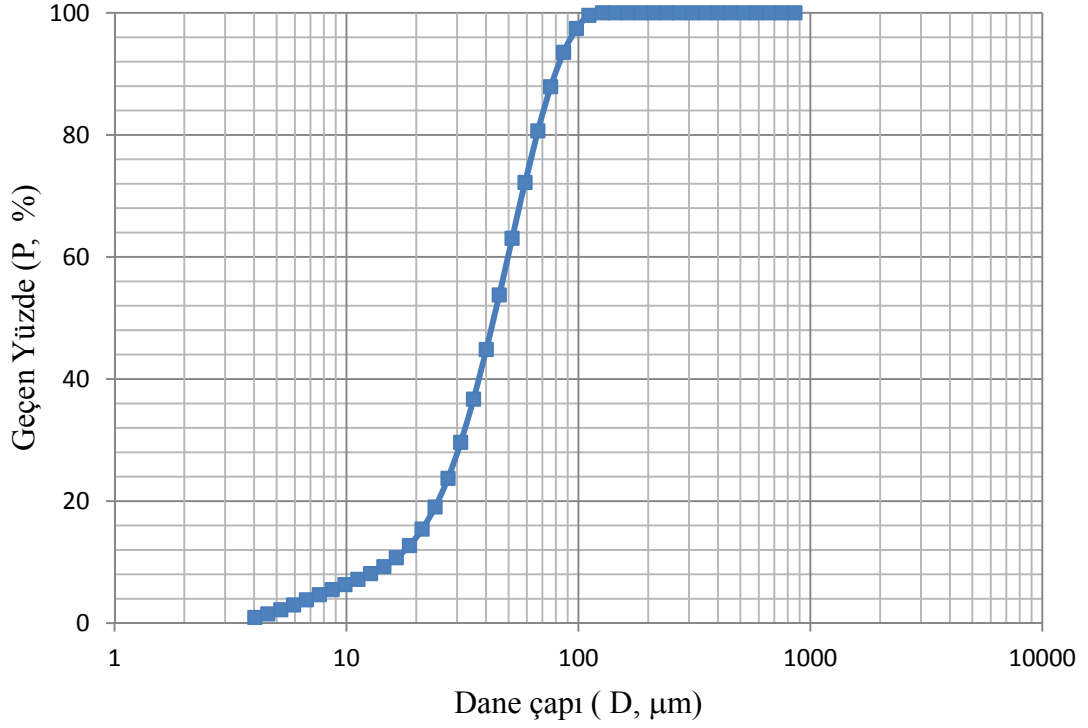
Çalışma kapsamında ilk olarak kullanılacak zeminin hangi sınıf zemin türü olduğunun belirlenmesi gerekir. Doğal zemin, ASTM D 2487 standardına göre gerçekleştirilen deney sonuçları ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine ait mühendislik özellikleri Tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 18. Doğal Zemine Ait Özellikler

USCS sınıflandırma	CL
Özgül ağırlık, $G_s$	2,60
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{kmax}(Mg/m^3)$	1,63
Optimum su içeriği, $w_{opt}(\%)$	23,0
Likit limit, LL (%)	48,88
Plastik limit, PL (%)	26,5
Plastisite indisi, PI (%)	22,3
Renk	Sarımtırak

Yapılan literatür çalışmalarında, organik malzeme miktarı %5'den çok olan zeminlerin kireçle iyileştirilmesi durumunda zeminde bulunan organik malzemelerin kimyasal tepkimeler üzerinde azaltıcı bir etki gösterdiği, ıslanma ve kuruma sürelerinde malzemenin ufaladığı tespit edilmiştir (Nelson, & Debora, 1992). Doğal malzemeye ait özellikleri Tablo 18'de verilmiş olan doğal zemine ASTM D 2974 standartlarına uygun şekilde Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Kimya Laboratuvarı'nda doğal malzeme analizi yapılmıştır. Alınan veriler incelendiğinde, doğal malzeme içerisinde bulunan organik malzeme oranının %4,8 seviyelerinde olduğu saptanmıştır. Bu sonuçlara göre doğal zemindeki organik madde oranının kireçle stabilizasyon çalışmaları için uygun değerde olduğu belirlenmiştir.

Doğal zemine lazer kırınım yöntemi ve yıkamalı elek analizi yapılmıştır. Lazer kırınım yöntemi örnek miktarlarının az olması, ölçüm süresinin kısalığı, deney sonuçlarının depolanabilirliği gibi nedenlerden dolayı hidrometre yöntemine veya pipet yöntemine göre daha etkin bir deneydir (Özer, & Orhan, 2007). Doğal zeminin granülometri eğrisi Şekil 12'de verilmiştir.



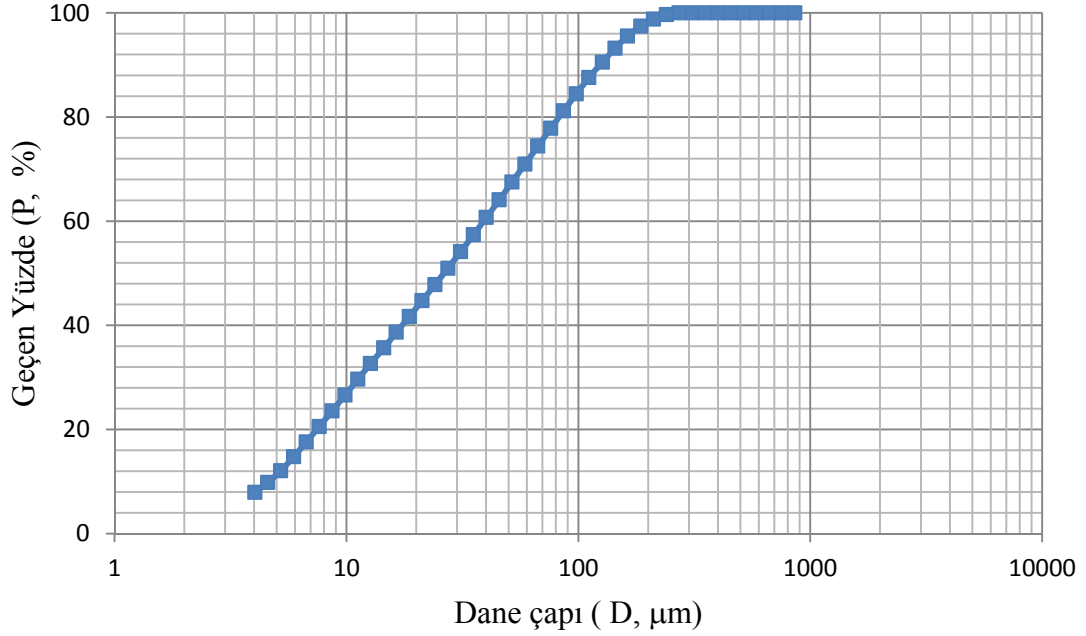
Şekil 12. Doğal zemine ait dane boyutu dağılımı.

### Kireç.

Çalışmada birincil bağlayıcı madde olarak kullanılan kireç Karsan Kireç Sanayi Şirketinden temin edilen sönmüş kalkerli kireçtir. Kirece ait fiziksel ve kimyasal analizler Tablo 19'da ve dane boyutu eğrisi Şekil 13'te verilmiştir.

Tablo 19. Sönmüş Kirece Ait Analiz Sonuçları (Kocabey, 2019)

Fiziksel özellikler	
75 µ elek üstü	3,8
Özgül ağırlık, $G_s$	2,37
pH Değeri	12,4
Yoğunluk ( $Mg/m^3$ )	0,48
Kimyasal özellikler	
SiO (%)	23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	40
Aktif CaO (%)	65
MgO (%)	1,4
Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	85,8



Şekil 13. Kirece ait dane boyutu dağılımı.

#### **Pomza taşı.**

Pomza taşı, teknik anlamda doğal hafif agrega olarak adlandırılmakta olup, bu taşta ayrıca bims taşı da denilmektedir. TS 1114 standardına göre hafif agrega terimi; meydana gelmeleri esnasında delikli bir yapı şeklinde bulunan tüf, pomza, sünger taşı, cüruf ve diatomit gibi kırılan ya da kırılmayan agregalar şeklinde gruplandırılmıştır. TS 3234 standardına göre pomza; birbirleri arasında bağlantısız boşluklu yapıda olması, silikat esaslı sünger görünümünde ve birim hacim ağırlıkları genellikle 10 kN/m<sup>3</sup> değerinden düşük olan ayrıca sertlik derecesi skalasına göre 6 seviyesinde olan bir malzeme olarak tanımlanır (Soğancı, 2011).

Pomza taşı, endüstriyel kullanım açısından boşluklu yapıya sahip ve dış etkilere karşı dayanıklılık gösteren, mühendislik alanları ve inşaat yapımlarında oldukça yaygın olarak kullanılan bir materyal olarak tanımlanabilir.

Yüksek lisans çalışması kapsamında Erzurum iline bağlı Pasinler ilçesinde bulunan Kaleblok bims Fabrikası'ndan alınan ham ve inceltmiş pomza agregası kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan pomzanın alındığı tesise ait fotoğraflar Şekil 14'te verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan pomza taşına ait kimyasal analizler ve fiziksel analizler Tablo 20'de, pomza taşlarına ait dane boyutu eğrileri Şekil 15 ve Şekil 16'da sunulmuştur.

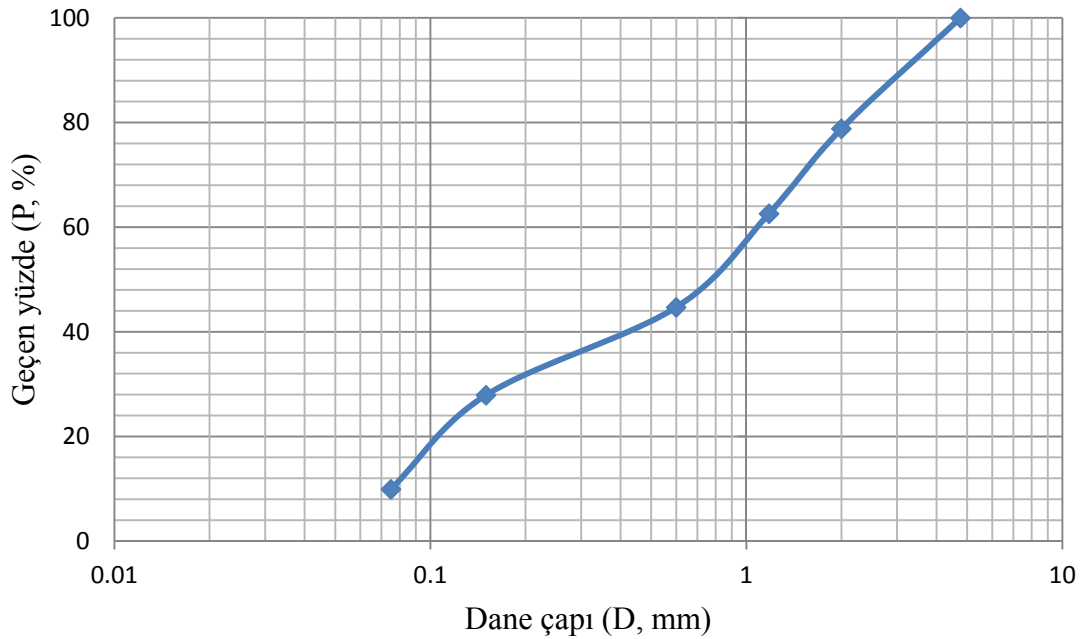




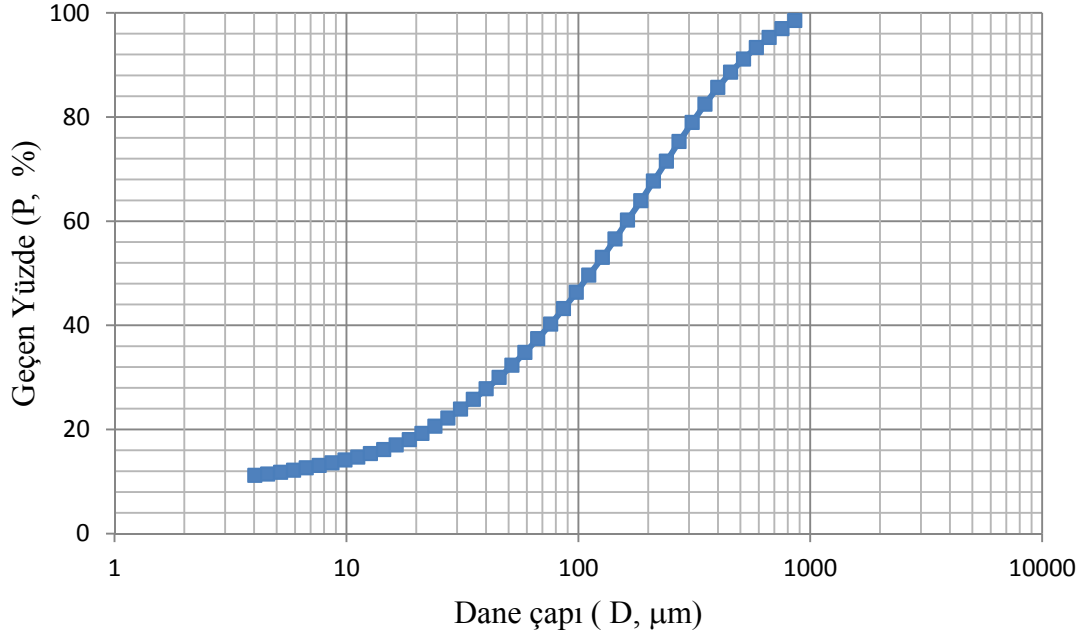
Şekil 14. Erzurum Pasinler'deki pomza ocağı.

Tablo 20. Pomza Taşına Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler (Soğancı, 2011)

Fiziksel özellikler	
75 µ elek üstü	3,8
Özgül ağırlık, $G_s$	2,25
pH Değeri	7,0
Yoğunluk ( $Mg/m^3$ )	0,48
Kimyasal özellikler	
SiO (%)	55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	50
Aktif CaO (%)	6
MgO (%)	1,6
Na <sub>2</sub> O-K <sub>2</sub> O (%)	8



Şekil 15. Ham pomza taşına ait dane boyutu dağılımı.



Şekil 16. İnceltilmiş pomza taşına ait dane boyutu dağılımı.

Çalışma kapsamı boyunca ham pomza ve inceltilmiş pomza terimleri kullanılmıştır. Tamamı 4 No'lu elek altı ve %50'den fazlası 1 mm dane çapından küçük olan granülometreye sahip malzeme ham pomzadır. Tamamı 1 mm'den küçük danelerden oluşan ve %50'si 100 mikron altı olan malzeme ise inceltilmiş pomza olarak isimlendirilmiştir.

## Yöntemler

Bu kısımda teze konu olan deneylerin dayandırıldığı standartlar ve çalışmadaki metotlar hakkında bilgiler ifade edilmiştir.

### Deneyslerde referans alınan standartlar.

Çalışma kapsamında kullanılan deneylere ait ASTM standartları Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 21. *Deneylerle İlgili ASTM Ölçütleri*

Deneyin adı	Standart
Elek analizi	ASTM D 422 (2007)
Organik madde tayini	ASTM D 2974 (2007)
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D 854 (2010)
Kıvam limitlerinin belirlenmesi	ASTM D 4318 (2010)
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D 698 (2007)
Serbest basınç deneyi	ASTM D 2166 (2006)
Donma çözülme deneyi	ASTM D 560 (1996)
Durabilite testi	ASTM D 559 (2003)

### **Kıvam limit deneyleri.**

Atterberg 1911 yılında, ince taneli zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi konusunda referans olan, kıvam limit değerleri diye adlandırılmış su içeriği değerlerini bulmuştur. Likit limit değerleri için akışkanlığın sınır değerini, çatlakların meydana geldiği sınır değerlerini de plastik limit olarak adlandırmıştır (Atterberg, 1911). Başka bir ifadeyle zemine katılan su oranı arttıkça malzeme akışkan bir hal alır ve tepkileri yok olur. Sahip olduğu su içeriğini kaybettiği takdirde kesme mukavemeti kazanır. Bu geçiş evresindeki su içeriğine likit limit değeri adı verilir.

Yüksek lisans çalışması kapsamında likit limitlerin belirlenmesinde kullanılan yöntem koni penetrasyon yöntemidir. Bu yöntemde, konik ucun kap içerisinde hazırlanan karışıma 20 mm batmasına karşılık gelen su muhtevası, zemine ait likit limit değerini göstermektedir.

Bu deneyde 40 No'lu elekten elenmiş zemine belirli miktarda su eklenerek karıştırılır. Desikatör içerisinde 1 gün süre ile bekletilen malzeme minimum 10 dakika boyunca karıştırılır. Hazırlanan bu karışım metal kaba konularak yüzeyi düzleştirilir. Koni ucu zemine temas etmeyecek şekilde indirilir, deney başlatılır. 5 saniye sonunda dijital saatte ölçülen değer okuması yapılır. Ardından koni ucu kaldırılıp ve kap içerisinden koninin battığı noktadan az miktarda örnek alınıp tartım yapılır. Tartım yapıldıktan sonra değerler not alınıp sonrasında kap etüve konur. Bu işlem su içeriğinde artışlar yapılarak tekrarlanır. Daha sonra elde edilen veriler sonucunda kıvam limit değerleri grafikleri hazırlanıp zemine ait limitler belirlenir. Koni penetrasyon deney düzeneği ile etüv içerisine bırakılan malzemeler Şekil 17'te verilmiştir.



Şekil 17. Koni penetrasyon düzeneği ve etüvde kurutulmuş örnekler .

Plastik limit deneyinde 40 No'lu elekten geçen ve çok az miktarda su katılarak karıştırılmış malzemenin avuç ayasıyla cam plaka üzerinde yuvarlanıp 3 mm'ye kadar

inceltirerek bu sınır değerinde ortaya çıkan çatlaklara denk gelen değerlerdir. Plastik limit deneyi sonucunda oluşan çatlaklar Şekil 18’te gösterilmiştir.



Şekil 18. Plastik limit deneyi sonucunda oluşan çatlaklar.

### **Kompaksiyon deneyi.**

Kompaksiyon deneyi, zeminde farklı yöntemler kullanılarak tabakalar halinde serilip zemin içerisinde boşluksuz bir yapı meydana getirmek amacıyla yapılan yöntemdir. Kompaksiyon deneyi, zeminde dayanıklılığı arttırmasının aynı oturmayı azaltıcı bir etkisi bulunan mekanik bir işlemdir (Fidan, 2016). Çalışma kapsamında Standart Proktor Deneyi yapılmış, kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içeriği bulunması amaçlanmıştır.

Deney kapsamında doğal zemine belirli oranlarda su eklenerek karışım iyice karıştırılır. Hazırlanan bu karışım standartlara uygun bir Şekilde silindir elik kalıba 3 aşamada uniform biçimde doldurulduktan sonra kademeli bir Şekilde 25 kez tokmak yardımı ile sıkıştırma işlemi yapılır . Sıkıştırılan zemin kalıptan çıkarılır. Çıkarılan zeminden orantılı bir miktar örnek malzeme alınır, tartılır, etüvde bekletilir ve son aşamada su içeriği hesapları yapılır. Uygulamada belirlenen su miktarı eklenerek deney 5 kez yeniden uygulanır. Deneylerin sonucunda elde edilen veriler  $\rho_k-w$  grafiğinde işaretilenerek kompaksiyon eğrileri oluşturulur. Oluşan parabolden optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilir. Şekil 19’da Standart Proktor Deneyi’nin yapım aşamalarına ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 19. Standart Proktor Deneyi yapım aşamaları.

### Serbest basınç deneyi.

Serbest basınç deneyi genel olarak killi zeminler için uygulanan bir deneydir. Hazırlanan deney numuneleri 100 mm yüksekliğinde ve 50 mm çapında silindir numunelerdir. Karışımlara ait numuneler desikatörde hava almayacak şekilde 7, 28 ve 84 gün bekletildikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Tek eksenli serbest basınç deneyine ait aşamalar Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. Tek eksenli basınç deneyine ait düzenek.

### **Islanma-kuruma periyodu deneyi.**

Desikatör içerisinde 28 gün küre bırakılan örnekler kür süresinin sonunda ASTM D 559 (2003) uygun olarak 12 ıslanma kuruma çevrimine tabi tutulmuşlardır. Bu deneyde kaplardan alınan her bir numune kuru halde tartıldıktan sonra suyla doldurulmuş haznenin içine bırakılır. 24 saat süresince su içerisinde duran örnekler alınır ve tepsi üzerinde suyunu kaybetmesi sağlanır. 24 saat sonra kuruyan numuneler yeniden tartılır. İşlemlerin sonucunda numunelere ait kütle kayıplarının ve hacimsel bütünlüğünün korunup korunamadığı incelenir. Islanma ve kuruma çevrimleri deney aşamaları Şekil 21’de gösterilmiştir.



*Şekil 21.* Islanma-kuruma periyodu deneyi.

### **Donma-çözülme deneyi.**

Desikatör içerisinde 28 gün kürede bekletilen numuneler ASTM D 560 (1996) standardına uygun biçimde donma çözülme çevrimine tabi tutulmuşlardır. Sıcaklık olarak -20 °C ve 24 °C’de 12 kez donma-çözülme çevrimi yapılmıştır.

Kapalı sistem durumunda ve havada donma-çözülme cihazında gerçekleştirilen çevrimler sonucunda alınan örneklerin dayanımlarını tespit edebilmek adına tek eksenli serbest basınç testi uygulanmıştır. Donma ve çözülme test cihazı Şekil 22’de verilmiştir.



*Şekil 22.* Donma-çözülme test cihazı.

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### Araştırma Bulguları

Tez çalışması kapsamında Bayburt il merkezinden alınan zemin numunesinin kireç ve pomza taşı ile stabilizasyonu irdelenmiştir. Deneylerde kullanılan pomza taşının incelik etkisinin zemin üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlarda doğal zemine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında belirlenen ham ve inceltirilmiş pomza karışımlarına ek olarak %6 kireç oranı ile birlikte aynı oranlarda ham ve inceltirilmiş pomza katılarak dayanım ve durabilite davranışları irdelenmiştir. Bu bölüm kapsamında yapılan deney verileri ve araştırma bulguları detaylı şekilde anlatılmıştır.

#### Deneylelerden Elde Edilen Veriler

##### Kıvam limitleri.

Çalışma konusu kapsamında yapılmış ve notasyonları daha önceden belirtilen karışımlara ait ASTM D 4318 (2010) standardına uygun biçimde yapılan kıvam limitleri deneylerinden alınan sonuçlar Tablo 22’de verilmiştir.

Tablo 22. Deney Numunelerine Ait Kıvam Limit Sonuçları

Karışımlar	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
S	47,5	24,8	22,7
SL	43,9	30,7	13,2
SPN5	47,1	26,1	21,0
SPN10	45,8	25,7	20,1
SPN15	45,2	26,2	19,0
SPN20	44,1	24,9	19,2
SPG5	46,8	25,4	21,4
SPG10	46,1	26,3	19,8
SPG15	44,7	25,8	18,9
SPG20	43,8	25,2	18,6
SLPN5	43,4	30,4	13,0
SLPN10	42,6	29,7	12,9
SLPN15	42,1	29,6	12,5
SLPN20	41,7	28,5	13,2
SLPG5	43,1	30,9	12,2
SLPG10	42,7	30,4	12,3
SLPG15	42,6	29,7	12,9
SLPG20	42,1	29,1	13,0

Kıvam limitleri deneyi için karışımlar hazırlanıp bekletilmeden deney yapılmıştır. Doğal zemine ait likit limit değeri ve plastisite indisi değeri çalışma kapsamındaki hazırlanan bütün numunelerden daha yüksek olmuştur.

SL karışımında doğal zemine göre likit limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüşler meydana gelirken plastik limit değerinde artış meydana gelmiştir.

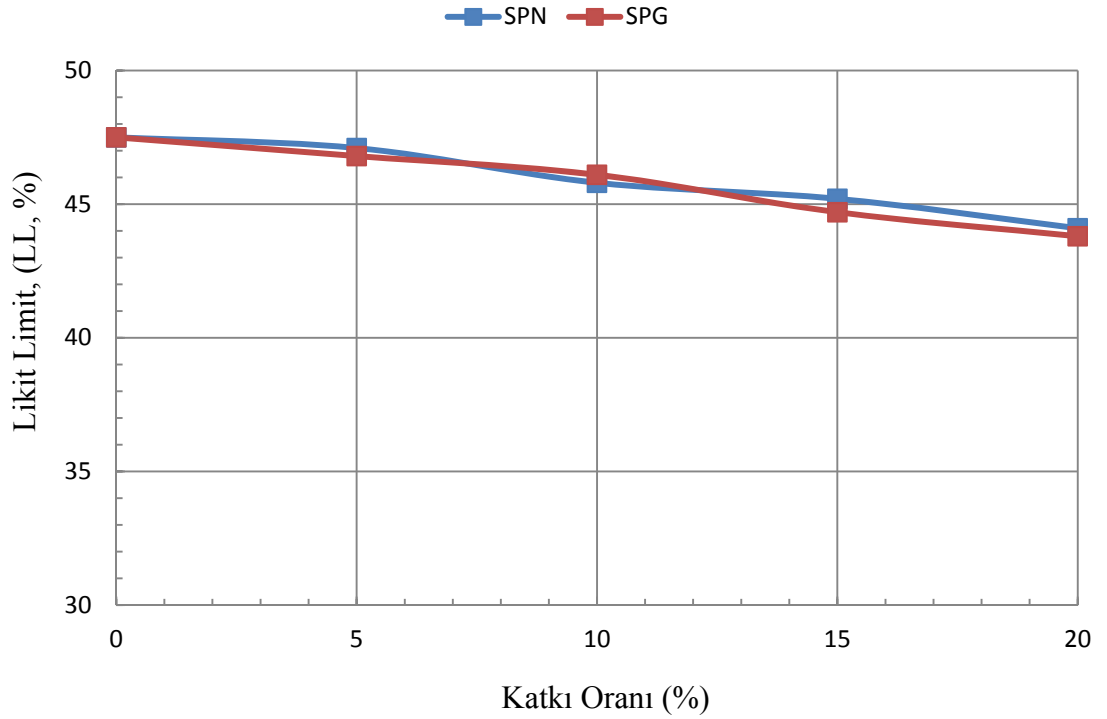
SPN ve SPG karışımlarında doğal zemine ve katkı oranının artmasına bağlı olarak likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalmalar meydana gelirken plastik limit değerlerinde ise düzensiz bir davranış söz konusudur.

SLPN ve SLPG karışımlarında SL karışımına göre artan katkı miktarıyla ters orantılı olarak kıvam limitlerinde azalmalar görülmüş, SPN ve SPG karışımlarına göre likit limit ve plastisite indislerinde azalmalar meydana gelirken, plastik limit değerlerinde ise artışlar elde edilmiştir.

Hazırlanan karışımlara kirecin eklenmesi ile likit limit ve plastisite indislerinde azalmalar meydana gelirken, plastik limit değerlerinde artışlara sebep olmuştur.

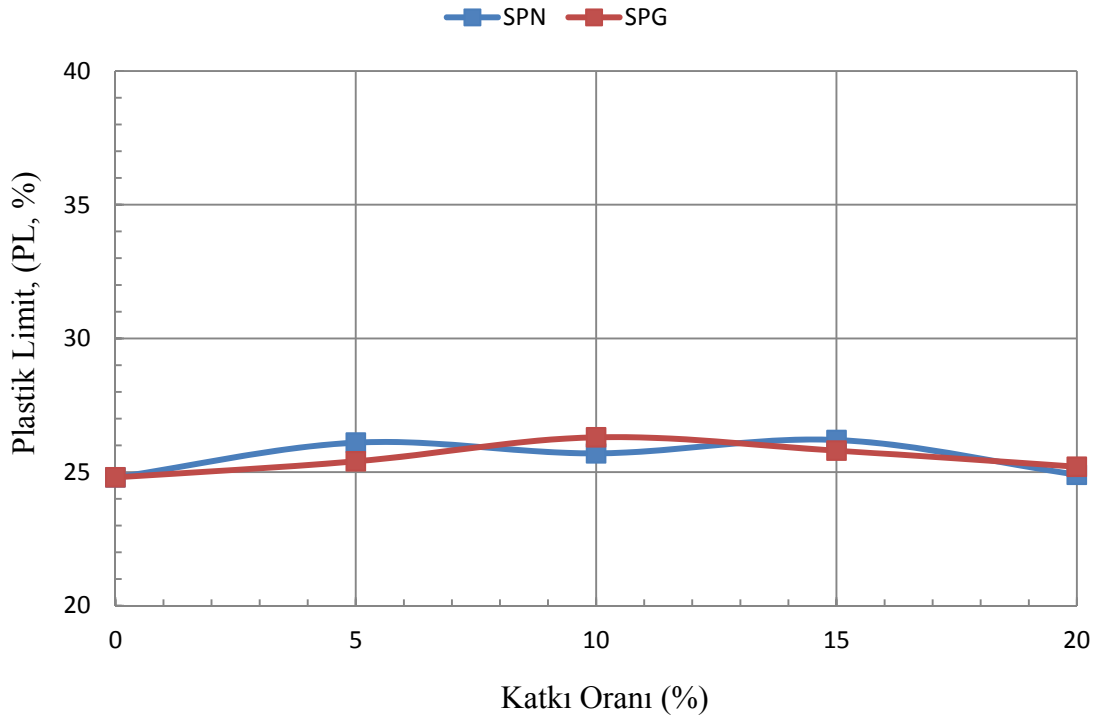
Karışımların likit limit değerlerinin belirlenmesinde kullanılan koni penetrasyon deneyi verileri EK-1’de sunulmaktadır.

SPN, SPG, SLPN ve SLPG’ye ait LL, PL ve PI grafikleri Şekil 23, Şekil 24, Şekil 25, Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28’de sunulmuştur.

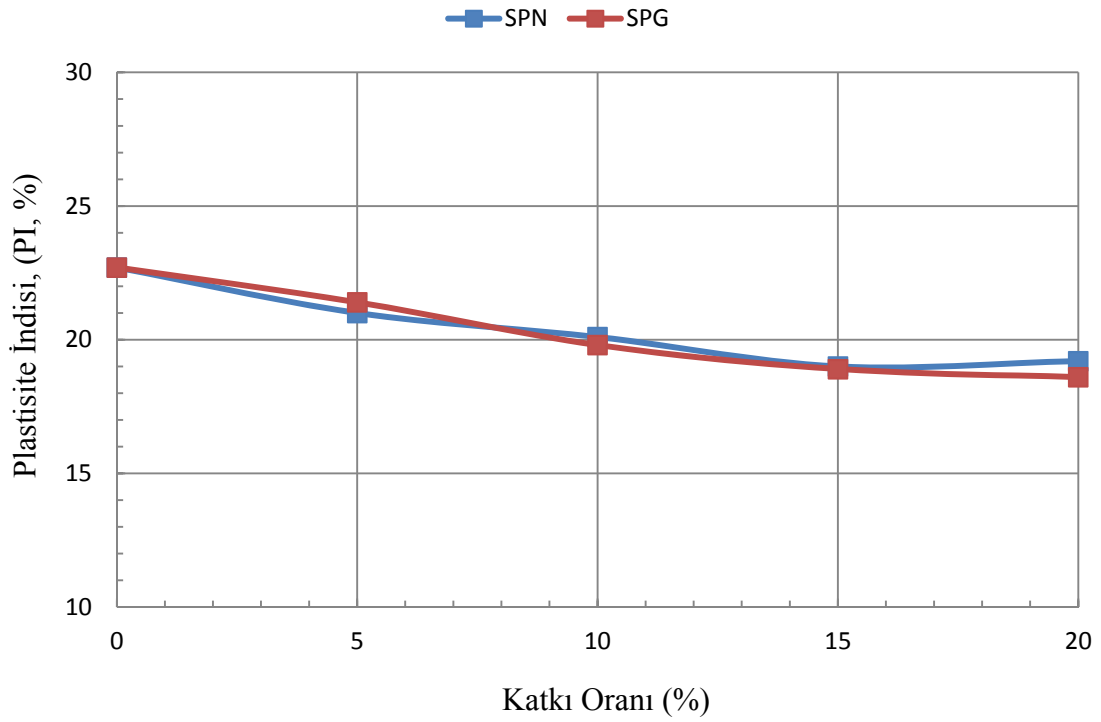


Şekil 23. SPN ve SPG karışımlarına ait likit limit grafiği.

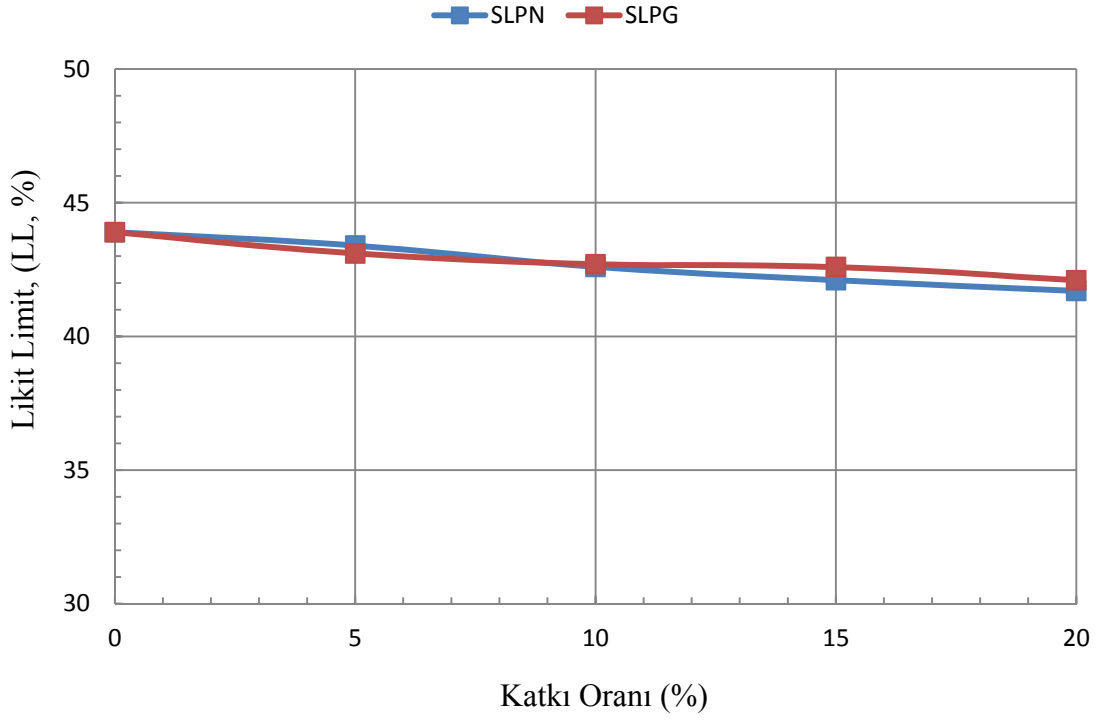




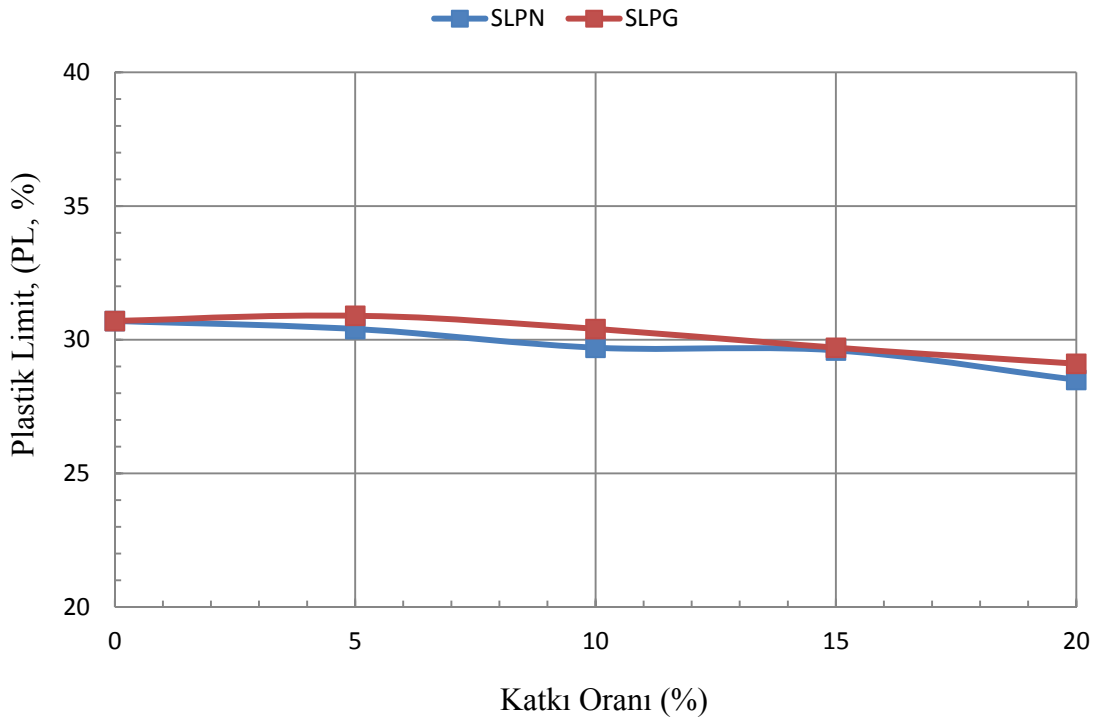
Şekil 24. SPN ve SPG karışımlarına ait plastik limit grafiği.



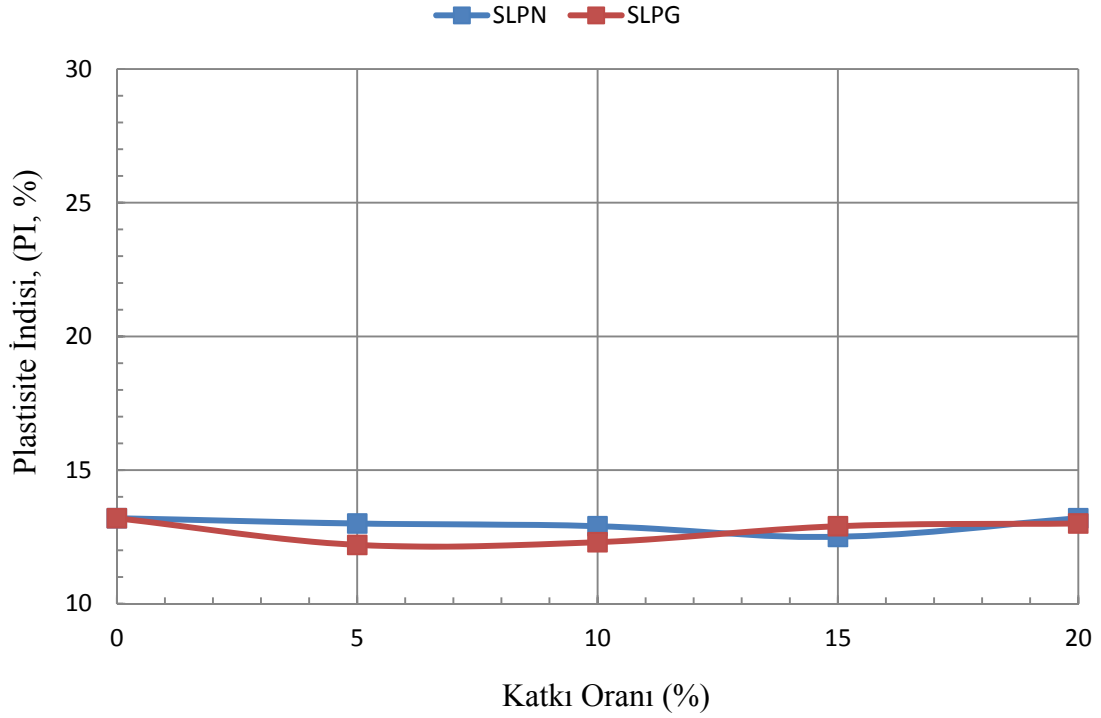
Şekil 25. SPN ve SPG karışımlarına ait plastisite indisi grafiği.



Şekil 26. SLPN ve SLPG karışımlarına ait likit limit grafiği.



Şekil 27. SLPN ve SLPG karışımlarına ait plastik limit grafiği.



Şekil 28. SLPN ve SLPG karışımlarına ait plastisite indisi grafiği.

#### **Kompaksiyon metodu.**

Çalışma kapsamında 18 farklı karışım hazırlanmıştır. Deneysel olarak belirlenen karışımlara ait toplamda 90 adet kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Doğal zeminden farklı olarak SL, SPN, SPG, SLPN ve SLPG karışımlarına %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yapılan kompaksiyon deneyleri standartlara uygun olarak yapılmış,  $w_{opt}$  ve  $\rho_{kmax}$  değerleri tespit edilmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda ulaşılan verilerin grafikleri Ek-2’de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan karışımlara ait  $w_{opt}$  ve  $\rho_{kmax}$  değerleri Tablo 23 ve Tablo 24’te verilmektedir.

Tablo 23. SPN Ve SPG Numunelerine Ait Kompaksiyon Değerleri

Numune	$\rho_{kmax}(Mg/m^3)$	$w_{opt}(\%)$
S	1,64	24,5
SPN5	1,63	24,9
SPN10	1,62	24,2
SPN15	1,62	23,9
SPN20	1,59	23,6
SPG5	1,62	24,2
SPG10	1,61	24
SPG15	1,61	23,7
SPG20	1,58	23,5

Tablo 24. *SLPN ve SLPG numunelerine ait kompaksiyon değerleri*

Numune	$\rho_{kmax}(Mg/m^3)$	$w_{opt}(\%)$
SL	1,58	27
SLPN5	1,57	26,5
SLPN10	1,6	25,9
SLPN15	1,62	24,7
SLPN20	1,62	23,4
SLPG5	1,59	25,8
SLPG10	1,59	24,9
SLPG15	1,6	24,7
SLPG20	1,61	24,2

Doğal zemin numunesine kireç eklenmesiyle beraber optimum su muhtevalarında artışlar meydana gelmiş ve maksimum kuru birim ağırlıklarında ise azalmalar görölmüşür.

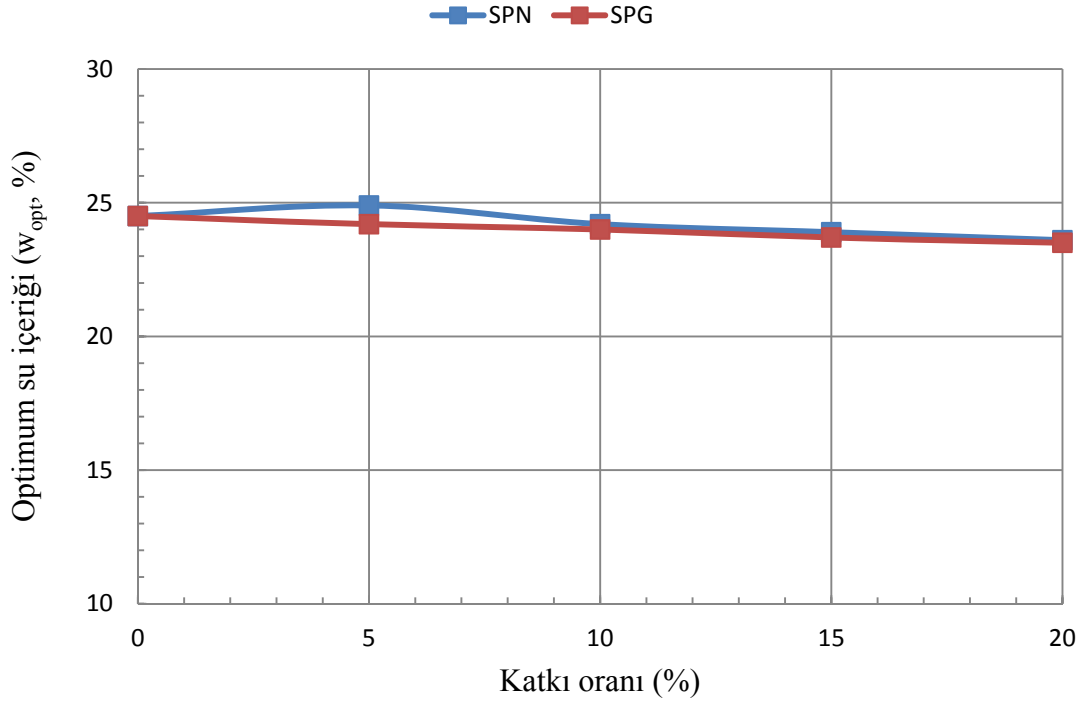
Elde edilen veriler incelendiğinde doğal zemine ham ve inceltilmiş pomza belirlenen oranlarda katıldığında doğal zemin ile benzer değerlere ulaşılmıştır. Ayrıca artan katkı oranları incelendiğinde kompaksiyon parametrelerinde düşüşler meydana gelmiştir.

Doğal zemine kireç katkısı katılarak hazırlanan numunelerde maksimum kuru yoğunluk değerinin azaldığı, optimum su içeriğinin ise arttığı görölmüşür.

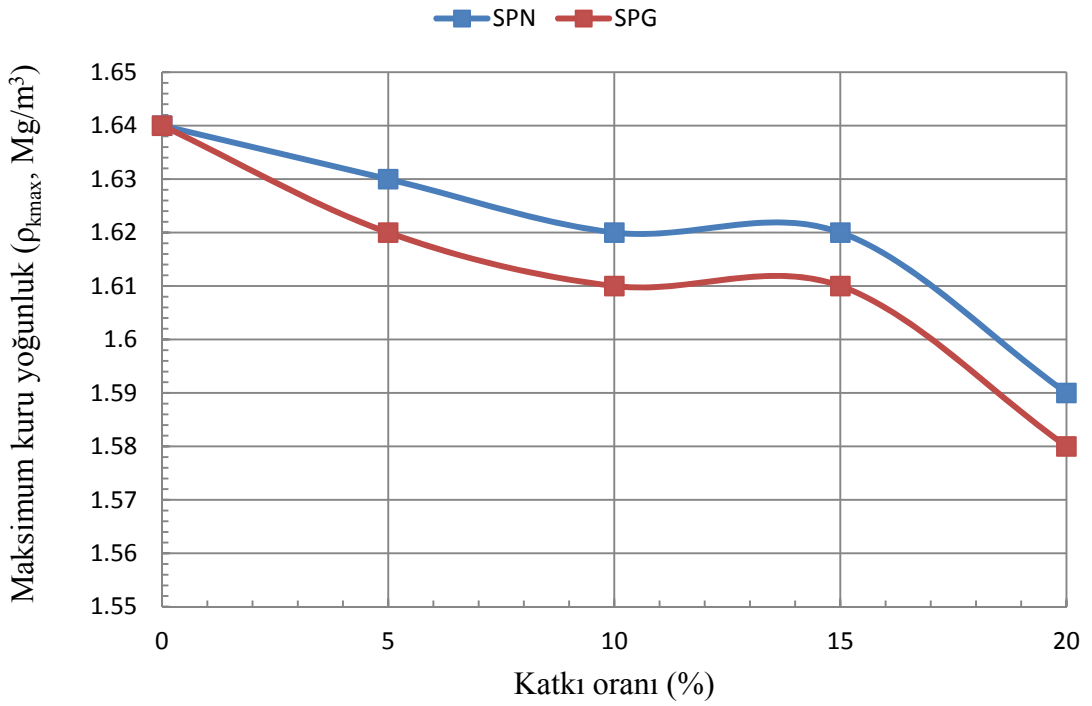
SLPN ve SLPG karışımları SL karışımına göre optimum su içeriklerinde azalmalar meydana gelmiş ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde az miktarda artışlar tespit edilmiştir. Hazırlanan bu karışımlarda artan katkı miktarı ile su içeriklerinin azaldığı ve yoğunluklarının arttığı görölmüşür.

Deney kapsamında hazırlanan bütün karışımlar incelendiğinde maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ve optimum su muhtevası değerlerinde doğal zemine kıyasla anlamlı değişimler meydana gelmediği görölmüşür.

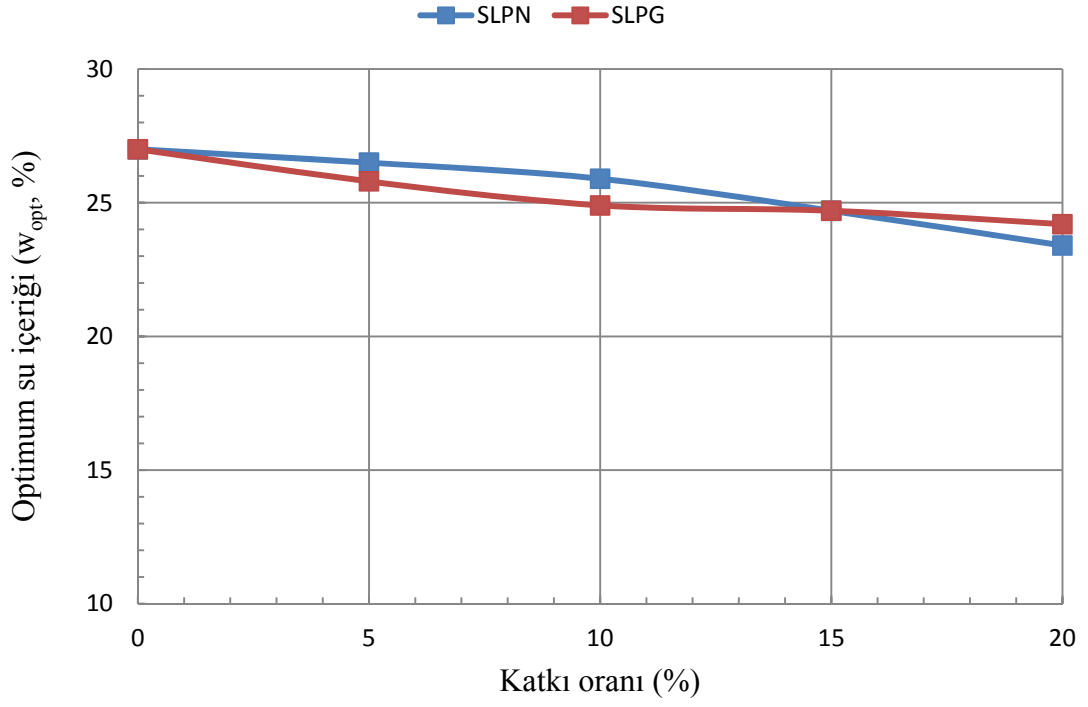
Deney kapsamında hazırlanan karışımlara ait kompaksiyon parametreleri Şekil 29, Şekil 30, Şekil 31 ve Şekil 32'de gösterilmiştir.



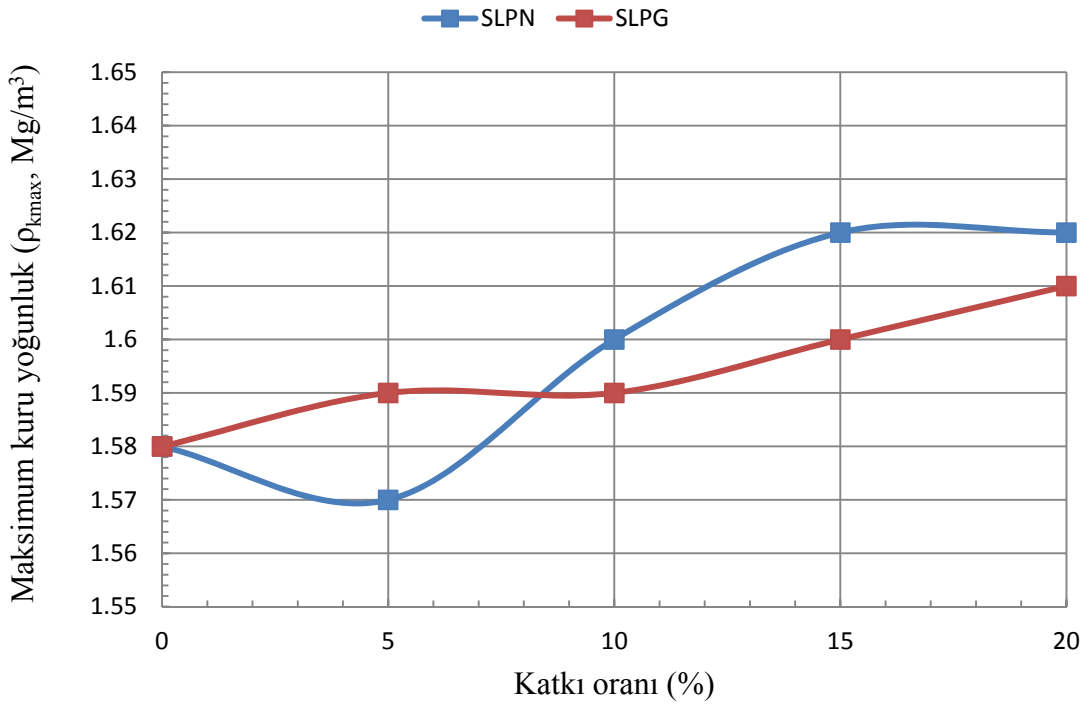
Şekil 29. SPN ve SPG numunelerine ait optimum su içeriği sonuçları.



Şekil 30. SPN ve SPG numunelerine ait maksimum kuru yoğunluk sonuçları.



Şekil 31. SLPN ve SLPG numunelerine ait optimum su içeriği sonuçları.



Şekil 32. SLPN ve SLPG numunelerine ait maksimum kuru yoğunluk sonuçları.

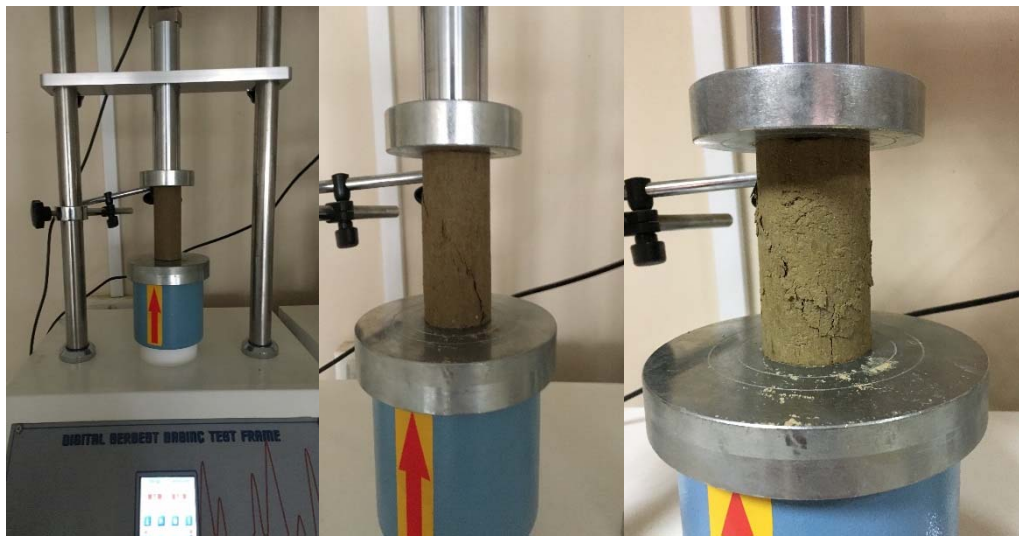
### Serbest basınç dayanımı.

Serbest basınç deneyleri için 100 mm yüksekliğe ve 50 mm çapa sahip silindirik numunelerden 153 adet hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler desikatörlerde 7 gün, 28 gün ve 84 gün boyunca kür edilmişlerdir. Deney kapsamında her bir kür süresi deneyleri için 3'er adet numune hazırlanmış olup değer tespitinde ortalama değerler baz alınmıştır. Kür zamanı biten örneklerle tek eksenli dayanım testleri uygulanmıştır. Şekil 33'de numune örnekleri ve desikatörde numunelerin kür edilmesi gösterilmiştir.

İlgili standartlara uygun bir şekilde hazırlanmış numunelere, belirlenmiş olan kür günlerinde dayanım deneyleri yapılmıştır. Şekil 34'de numunelerin dayanım cihazında kırılmalarına ait örnek gösterilmiştir. Çalışma kapsamında doğal zemin ve katkılı karışımların basınç dayanımlarına ait veriler Tablo 25'te belirtilmiştir.



Şekil 33. Numune örnekleri ve desikatörde numunelerin kür edilmesi.



Şekil 34. Tek eksenli basınç dayanım testi.

Tablo 25. Deney numunelerine ait serbest basınç dayanımı verileri

Numune Adı	Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımları (kPa)		
	Kür Süreleri		
	7. Gün	28. Gün	84. Gün
S	172,8	174,6	175,9
SL	457,6	596,4	1242,1
SPN5	174,3	191,1	188,3
SPN10	177,1	192,9	190,1
SPN15	186,3	210,7	202,2
SPN20	173,4	201,4	178,3
SPG5	177,9	186,2	189,9
SPG10	182,3	188,7	213,2
SPG15	199,9	316,8	367,6
SPG20	174,8	208,7	259,1
SLPN5	499,3	703,5	1384,6
SLPN10	549,8	883,3	1554,4
SLPN15	572,8	924,7	1567,4
SLPN20	615,7	993,1	1680,2
SLPG5	512,8	833,5	1570,4
SLPG10	514,3	966,1	1667,5
SLPG15	696,8	1118,4	1985,4
SLPG20	657,2	1029,1	1765,1

Doğal zeminin tek eksenli serbest basınç dayanımlarında artan kür süreleriyle birlikte anlamlı bir değişiklik meydana gelmemiştir. Doğal zeminin 7 günlük tek eksenli serbest basınç dayanımı 172,8 kPa iken, 28. günün sonunda 174,6 kPa, 84. günün sonunda ise 175,9 kPa olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine kireç katılarak hazırlanan SL karışımlarına bakıldığında doğal zemine göre ciddi derecede artışlar meydana gelmiştir.

SPG karışımlarıyla hazırlanan deney numunelerinde 7 günlük kür sonunda serbest basınç sonuçları ham pomza katkılı olan SPN örneklerine kıyasla oldukça iyi verilere ulaşılmıştır. Arttırılan pomza yüzdelerinde %15 oranına dek eklenen pomza taşında dayanımda artış olurken, pomza oranının daha fazla arttırılması ile dayanımda düşüşler meydana gelmiştir. Doğal zemine optimum kireç oranı ve inceltmiş pomzanın belirlenen oranlarda katılmasıyla hazırlanan SLPG karışımlarının numunelerindeki 7. gün ardından dayanım verilerinde SLPN karışımlarına göre daha iyi sonuçlar meydana geldiği görülmüştür. Bu karışımlarla hazırlanan numunelerde 7. gün basınç dayanımları sonuçlarına göre artan pomza oranlarında dayanımın da arttığı görülmektedir.

Doğal zemin ve inceltmiş pomzanın kullanıldığı SPG örneklerinin serbest basınç deneylerinde 28. gün kür sonrasındaki verilere bakıldığında artan kür süresini dayanım değerleri üzerinde olumlu sonuçlar meydana getirdiği belirlenmiştir. 28 günlük kürün sonunda SPG15 karışımlarında, SPN15 karışımlarına göre %50 oranında artış meydana gelmiştir. SPG



karışımlarıyla hazırlanan tüm numunelerin doğal pomza ile hazırlanan SPN numunelerine göre dayanım değerleri artmış ve pomzanın inceliğinin serbest basınç değerlerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

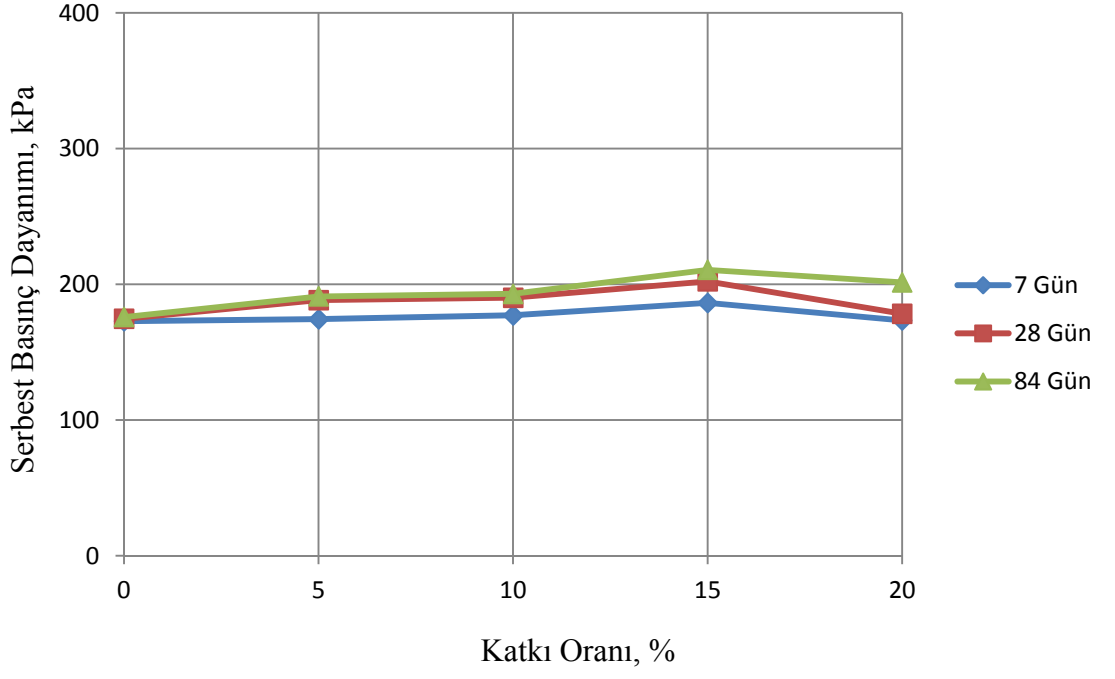
İnceltilmiş pomza ve optimum oranda kirecin kullanıldığı SLPG karışımlarının dayanım testlerinde 28. gün kür sonundaki verilere bakıldığında artan kür süresinin dayanım değerleri üzerinde olumlu sonuçlar oluşturduğu belirlenmiştir. SLPG15 karışımlarında, SLPN15 karışımlarına kıyasla %21 civarlarında artma meydana gelmiştir. 28. gündeki tek eksenli serbest basınç dayanımlarında SLPG karışımlarıyla hazırlanan tüm numunelerin %15 pomzalı numunelerine kadar dayanım değerleri artarken, pomza oranının arttırılmasıyla (%20) dayanımda düşüşler meydana gelmiştir.

Doğal zemin ve inceltilmiş pomza ile hazırlanan karışımlarda 84 günlük kür sonundaki tek eksenli serbest basınç dayanımlarına bakıldığında artan kür süresinin olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. SPG karışımlarının basınç dayanımı değerlerine bakıldığında SPN karışımlarına nazaran daha yüksek oldukları tespit edilmiştir. SPG karışımlarında en iyi dayanım sonucu 367,6 kPa olan SPG15 karışımında elde edilmiştir. SPN karışımlarında en iyi dayanım sonucu ise 202,2 kPa olan SPN15 karışımından elde edilmiştir.

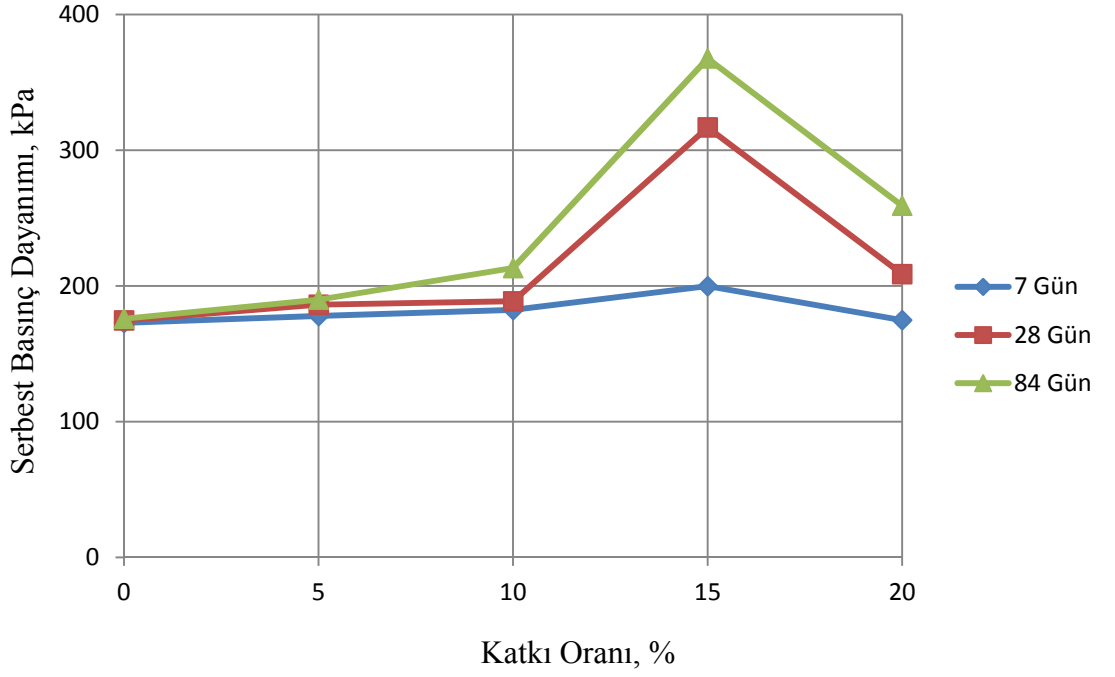
84 günlük SLPG karışımlarına bakıldığında en iyi dayanım sonucunun 1985,4 kPa olan SLPG15 karışımlarından elde edildiği görülmüştür. SLPN karışımlarında 84 günlük kürün ardından dayanım testlerinde %15 ile %20 pomza oranında iyi dayanım sonuçları verdiği görülmüştür. SLPN karışımlarındaki en yüksek dayanım değeri 1680,2 kPa ile SLPN20 karışımlarından elde edilmiştir.

Belirtilen kürlerdeki tek eksenli basınç dayanımı verileri incelendiğinde kireç ve inceltilmiş pomza ile hazırlanan SLPG karışımlarının kireç ve ham pomza ile hazırlanan SLPN karışımlarına göre dayanım değerlerinde çok daha başarılı olduğu görülmüştür. Aynı şekilde yine doğal zemin ve inceltilmiş pomza ile hazırlanan SPG karışımlarının ham pomza ile hazırlanan SPN karışımlarına nazaran daha yüksek oldukları tespit edilmiştir. İnceltilmiş pomzalı numunelerin ham pomzalı numunelerdekilere göre daha iyi sonuçlar vermesinin nedeni doğal puzolan olan pomza tanelerindeki inceliğin arttırılmasından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

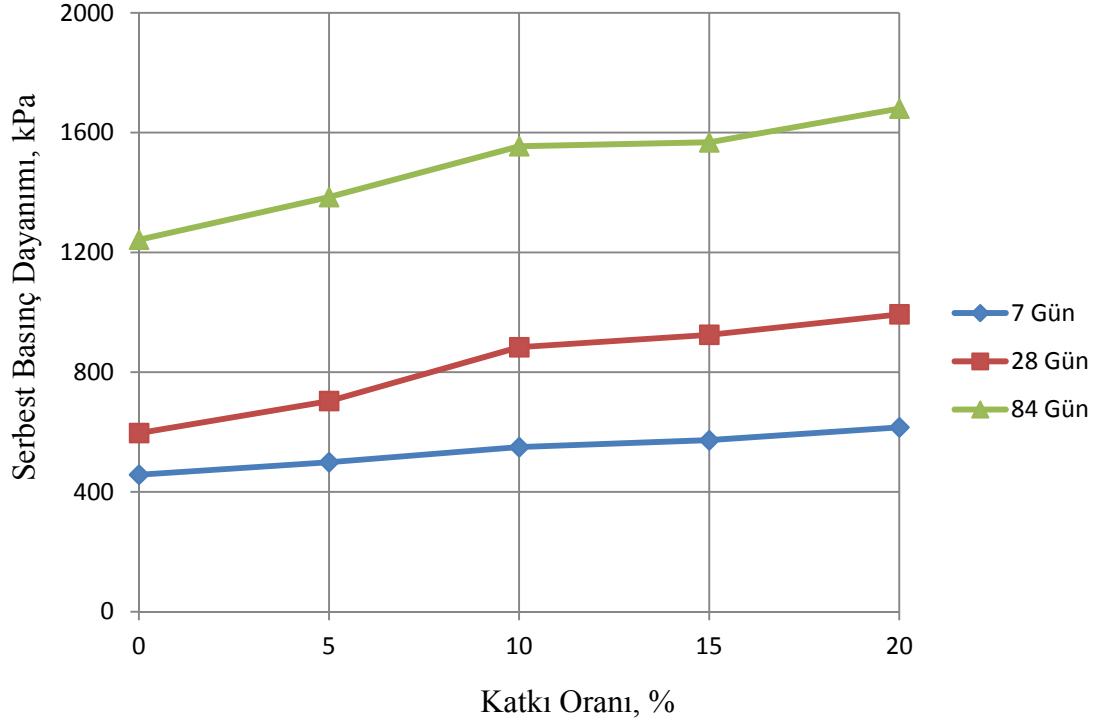
Karışımların belirtilen kür günlerine göre basınç dayanım verileri Şekil 35, Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38'de sunulmuştur. Karışımların belirtilen kür günlerine göre basınç dayanım verileri Şekil 39 ve Şekil 40'da karşılaştırmıştır.



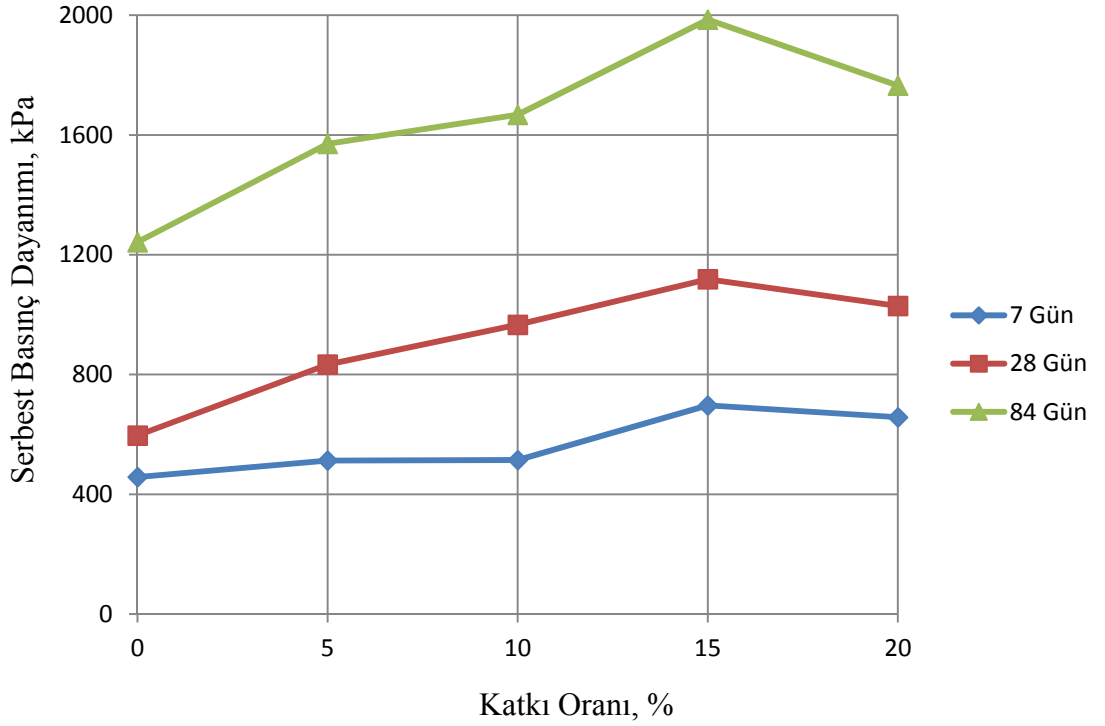
Şekil 35. SPN karışımlarının dayanım sonuçları.



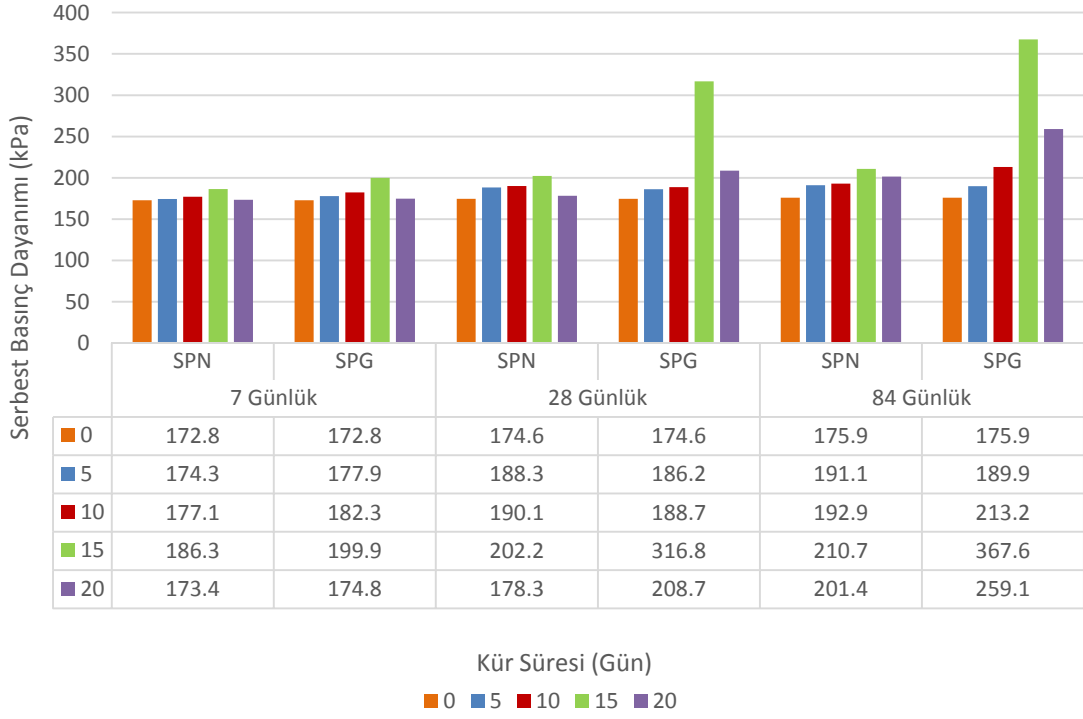
Şekil 36. SPG karışımlarının dayanım sonuçları.



Şekil 37. SLPN karışımlarının dayanım sonuçları.



Şekil 38. SLPG karışımlarının dayanım sonuçları.



Şekil 39. SPN ve SPG karışımlarının kür sürelerine göre serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 40. SLPN ve SLPG karışımlarının kür sürelerine göre serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

### Durabilite testleri.

Çalışma kapsamında yapılan karışımların farklı çevre koşullarında gösterdiği davranışları belirlemek, bu karışımların kullanılabilirliğini tespit etmek amaçlanmıştır. Bu

amaçla hazırlanmış olan deney numunelerini ıslanma kuruma ve donma çözülme deneyleri uygulanmıştır.

### ***Islanma-kuruma periyodu.***

Islanma kuruma periyodu için 100 mm boyunda ve 50 mm genişliğinde 18 adet örnek yapılmıştır. Dayanım şartı olarak 12 periyot çevrim yapılan örneklerin maksimum ağırlık düşüşlerinin %14 oranını geçmemesi gerekmektedir (Fidan, 2016). Bu deney için yapılmış 18 örnek kürde 28 gün bekletildikten sonra deneye geçilmiştir. Kür sonucunda ASTM D 559 (2003) standardına uygun biçimde 12 ıslanma kuruma çevrimi tamamlanmıştır. Şekil 41’de ıslanma kuruma deneyi gösterilmiş ve deney sonuçları Tablo 26’da sunulmuştur.



**Şekil 41.** SLPG ve SLPN numunelerinin ıslanma-kuruma periyoduna ait görüntüsü.

**Tablo 26.** *Islanma-kuruma periyodu deney sonuçları*

Numune	İlk Ağırlık (gr)	GÜN											
		1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün	8. Gün	9. Gün	10. Gün	11. Gün	12. Gün
SL	346,8	322,6	318,4	309,7	301,9	298,8	292,5	286,3	243,1	200,1	-	-	-
SLPN5	359,3	346,6	339,7	335,0	330,2	327,4	321,2	316,4	295,4	290,2	285,8	284,1	283,4
SLPN10	341,6	334,1	330,3	323,3	319,5	315,0	309,7	302,3	293,9	288,4	280,4	274,9	270,6
SLPN15	350,1	340,2	334,4	327,6	324,2	318,6	313,7	308,5	302,5	290,1	279,1	272,5	266,3
SLPN20	346,5	339,8	335,2	331,3	325,4	320,1	317,7	315,4	311,1	308,5	305,4	303,7	302,1
SLPG5	349,1	334,1	326,8	321,9	315,6	312,8	308,6	306,2	294,3	291,5	286,6	284,2	281,4
SLPG10	347,4	334,5	329,7	323,8	318,9	314,4	311,3	308,5	299,1	296,3	294,9	292,5	289,7
SLPG15	350,9	338,4	334,7	331,3	327,1	324,47	322,1	320,5	317,9	315,4	313,2	310,1	308,7
SLPG20	347,7	335,1	333,3	330,5	328,4	325,12	320,5	318,9	316,0	314,7	310,1	308,1	307,4

Deneyleyler sonucunda; kireç katılmamış doğal zemine farklı oranlarda inceltilmiş veya ham pomza katıldığı durumlarda numunelerin 1. günden sonra hacimsel bütünlüğünün tamamen bozulduğu görülmüştür ve bu nedenden dolayı tabloda yer verilmemiştir.

Optimum kireç oranında (%6) kireç kullanılması durumunda ise, hazırlanan numunelerin 12 kez ıslanma-kuruma periyodunda direnç gösterdiği tespit edilmiştir.

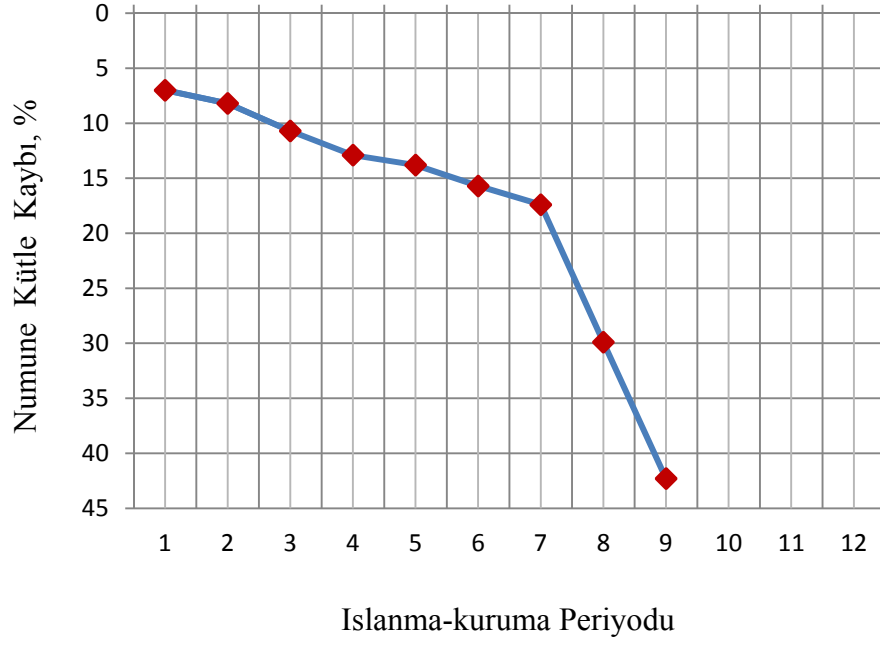
Deneysel kapsamında; doğal zemine kireç olmaksızın katılan inceltilmiş veya ham pomzanın ıslanma-kuruma periyodu açısından durabiliteye ilişkin olarak kayda değer bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Aynı çerçevede, durabilite bakımından alınan iyi sonuçların kullanılan pomza miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 27’te ıslanma-kuruma periyodu deney numunelerinin her birinin kütle kaybı yüzdeleri verilmiştir. Islanma-kuruma periyodu deneyi sonucunda bulunan kütle kaybı yüzdelerinin grafikleri Şekil 42, Şekil 43, Şekil 44, Şekil 45, Şekil 46, Şekil 47, Şekil 48, Şekil 46, Şekil 49 ve Şekil 50’de verilmiştir. SLPG ve SLPN karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi Şekil 51’de verilmiştir.

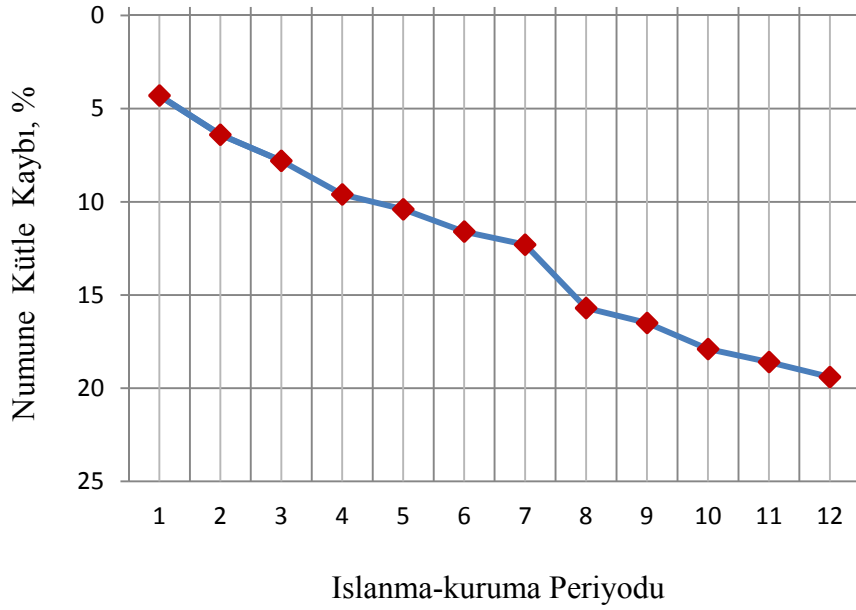
Tablo 27. *Islanma-kuruma periyodu deneyi kütle kaybı yüzdeleri*

Numune	İlk Ağırlık (%)	GÜN											
		1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün	8. Gün	9. Gün	10. Gün	11. Gün	12. Gün
SL	100	7,0	8,2	10,7	12,9	13,8	15,7	17,4	29,9	42,3	-	-	-
SLPN5	100	3,0	4,9	6,2	7,5	8,3	10,1	11,4	17,3	18,8	20,0	20,5	20,6
SLPN10	100	3,1	4,2	6,3	7,4	8,6	9,3	12,3	14,8	16,4	18,7	20,3	21,5
SLPN15	100	1,3	3,0	5,0	6,0	7,6	9,0	10,5	12,3	15,9	19,1	21,0	22,8
SLPN20	100	1,5	2,8	3,9	5,6	7,2	7,9	8,5	9,8	10,5	11,4	11,9	12,4
SLPG5	100	4,3	6,4	7,8	9,6	10,4	11,6	12,3	15,7	16,5	17,9	18,6	19,4
SLPG10	100	3,7	5,1	6,8	8,2	9,5	10,4	11,2	13,9	14,7	15,1	15,8	16,6
SLPG15	100	1,9	2,9	3,9	5,1	5,9	6,6	7,0	7,8	8,5	9,2	10,1	10,5
SLPG20	100	2,8	3,4	4,1	4,8	5,7	7,0	7,5	8,4	8,7	10,1	10,7	11,6

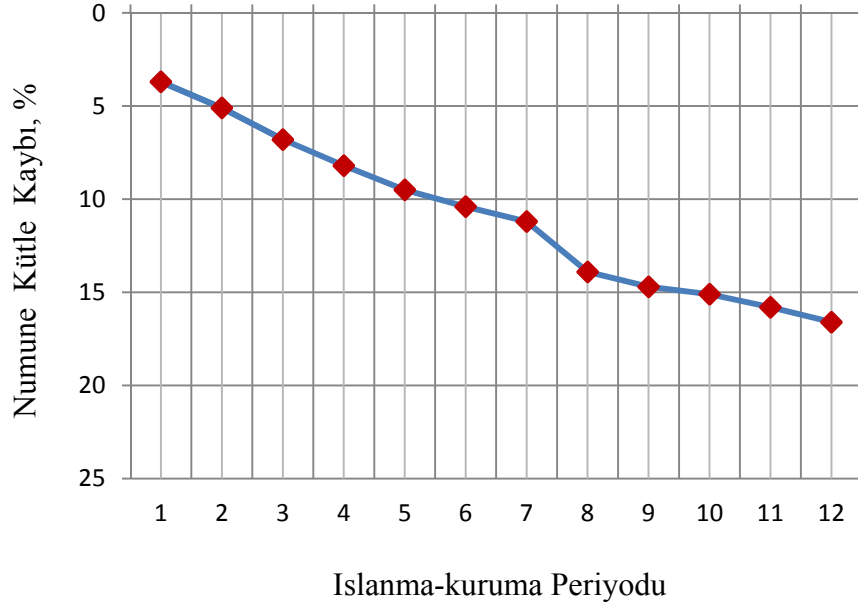
Elde edilen veriler incelendiğinde, SL karışımında %42,3 kütle kaybı olduğu görülmüş ve durabilite şartını sağlamadığı tespit edilmiştir. Kireç katkılı SLPN20, SLPG15 ve SLPG20 numunelerinin %14 durabilite sınır değerini aşmadığından dolayı kullanılmalarının uygun olduğu söylenebilir.



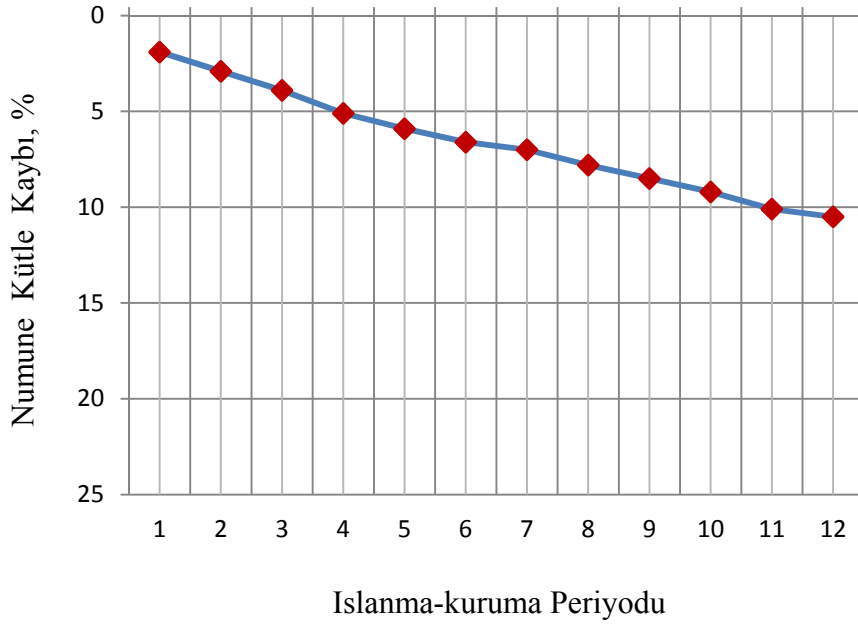
Şekil 42. SL numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.



Şekil 43. SLPG5 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.

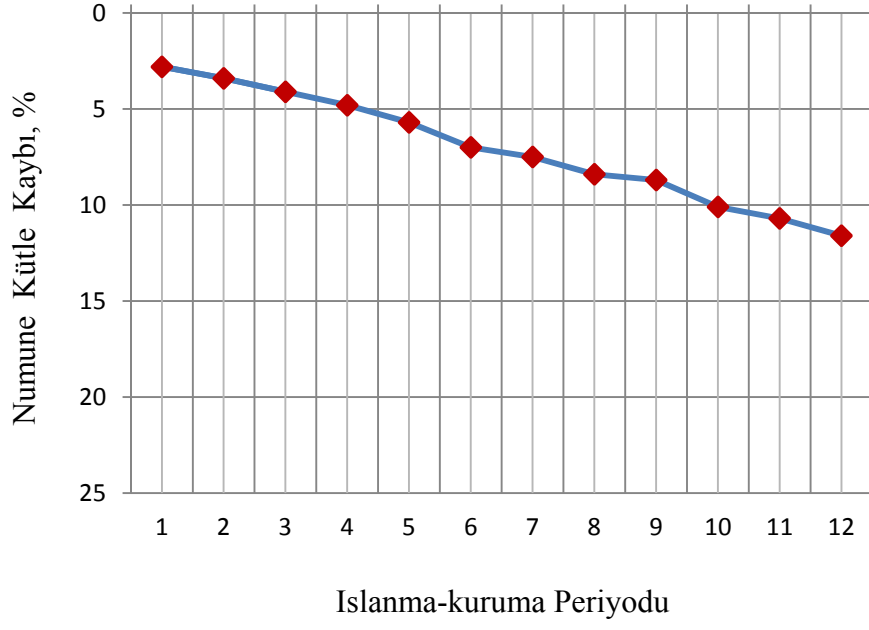


Şekil 44. SLPG10 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.

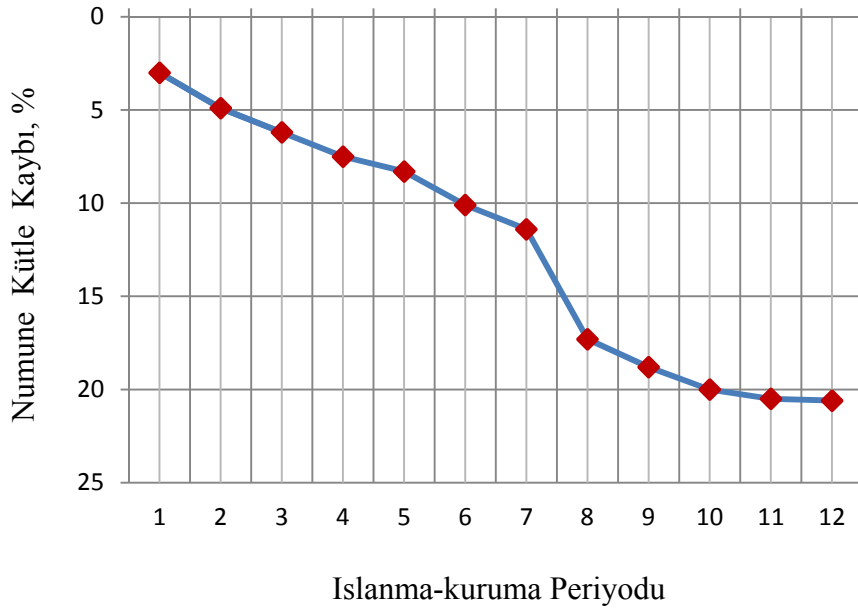


Şekil 45. SLPG15 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.

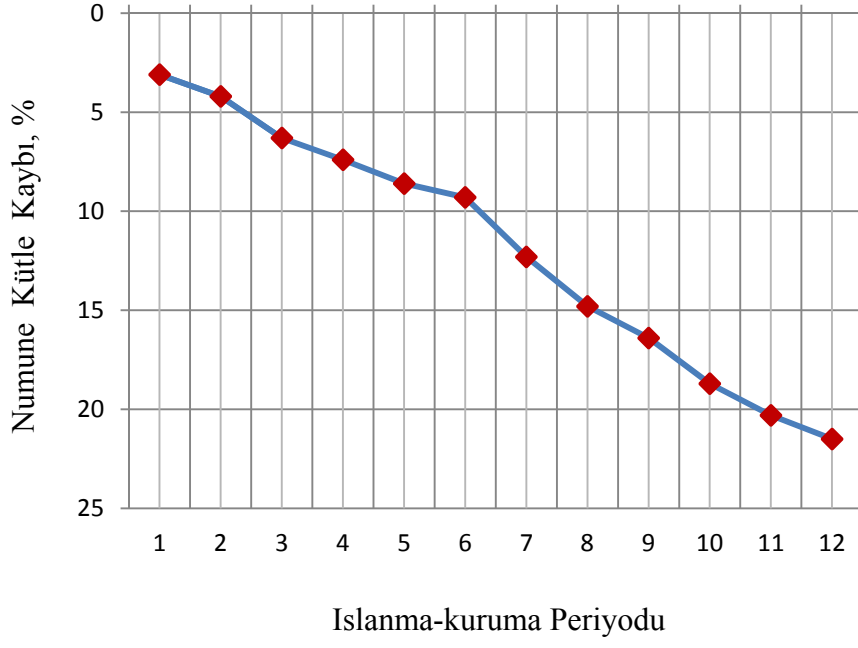




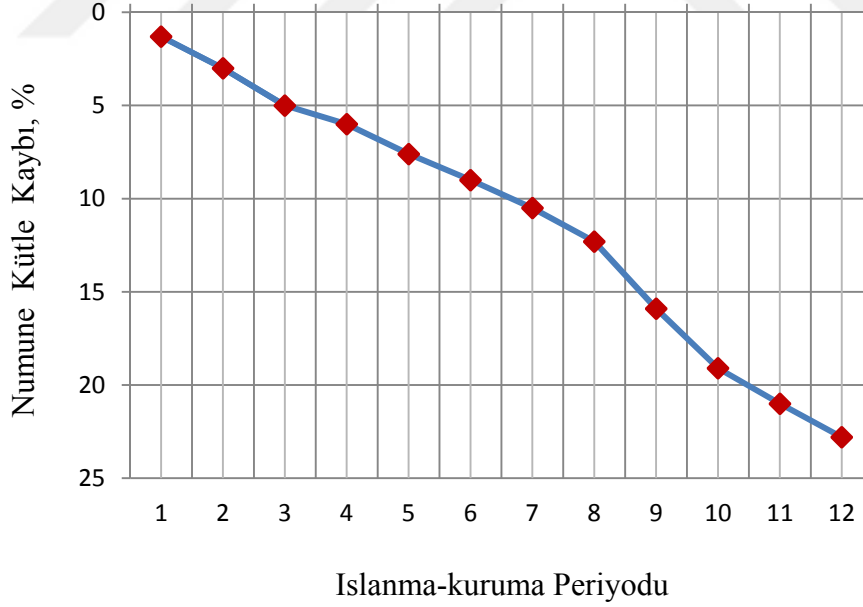
Şekil 46. SLPG20 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.



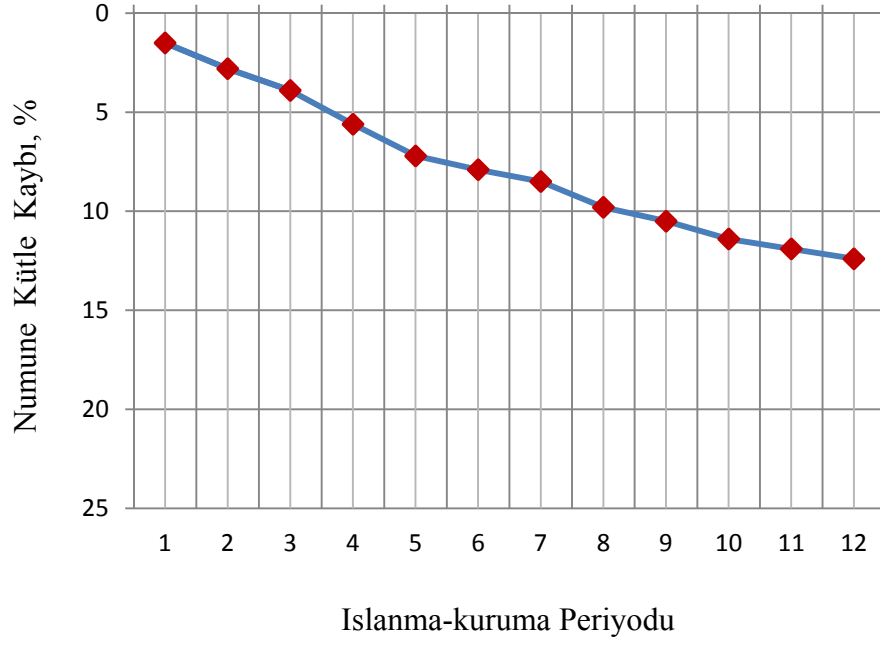
Şekil 47. SLPN5 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.



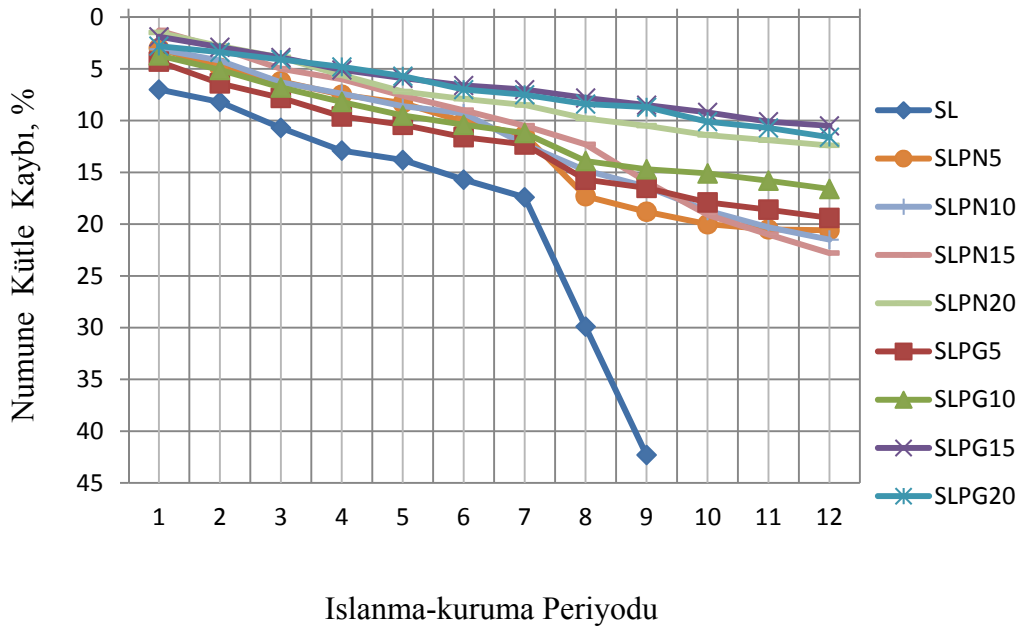
Şekil 48. SLPN10 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.



Şekil 49. SLPN15 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.



Şekil 50. SLPN20 numunesinin ıslanma-kuruma periyodu kütle kaybı eğrisi.



Şekil 51. SLPG ve SLPN karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi.

### ***Donma-çözülme çevrimi.***

ASTM D 560 (1996) standardına göre karışımları 28 gün kürde bekletildikten sonra 12 donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Donma-çözülme çevrimi sonrasında bu karışımların dayanımlarının belirlenmesi için tek serbest basınç dayanımı yapılmıştır.

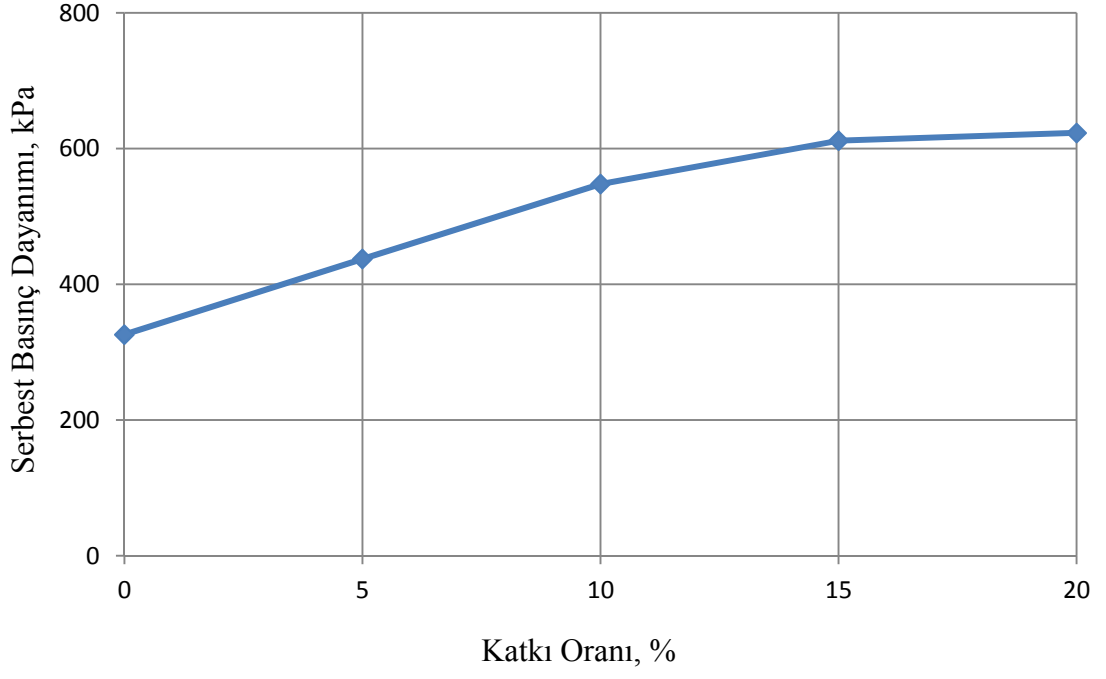
Donma çözülme deneyi sadece kireçli SLPN ve SLPG numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Bunun nedeni, SPN ve SPG numunelerinin serbest basınç dayanımlarının kireçli numunelere göre oldukça düşük olması ve ıslanma-kuruma çevriminde durabilite koşullarını sağlamamasıdır. Çevrimler sonucunda karışımlara ait dayanım sonuçlarına ilişkin veriler Tablo 28'de gösterilmiştir.

Tablo 28. *Karışımların donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları*

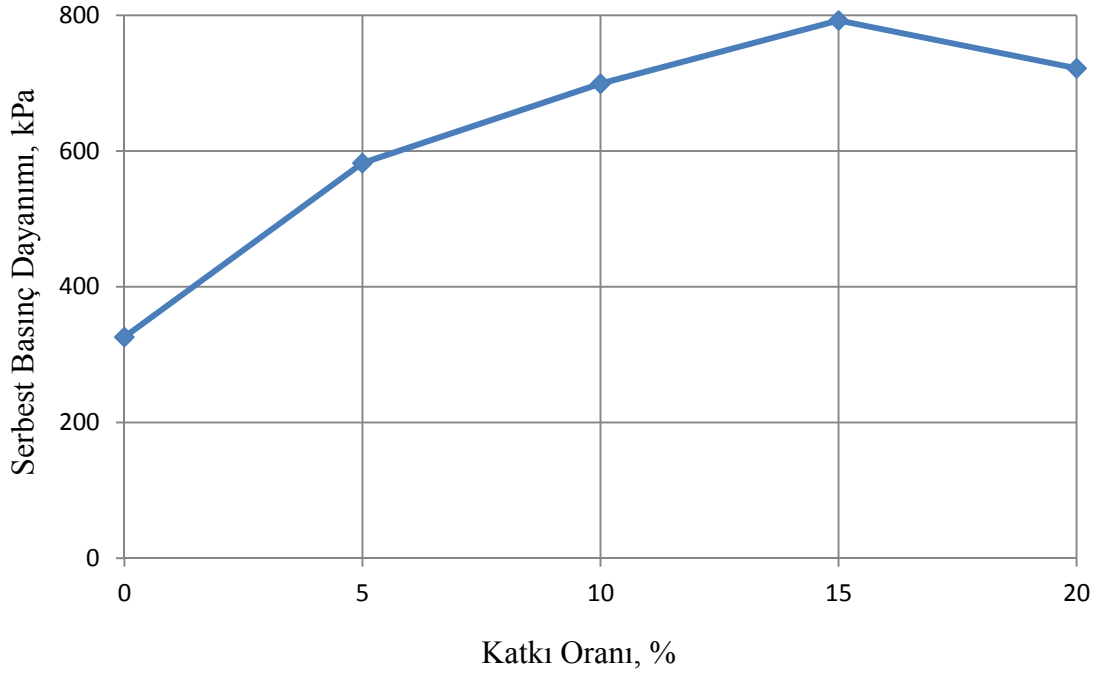
Numuneler	Tek Eksenli Basınç Dayanımları (kPa)
SL	325,9
SLPN5	437,4
SLPN10	547,8
SLPN15	611,7
SLPN20	623,1
SLPG5	582,3
SLPG10	699,2
SLPG15	792,4
SLPG20	721,9

Deney kapsamında 28. günün sonunda donma-çözülme çevrimine tabi tutulan numunelerin tamamının tek eksenli serbest basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde; 28. gün sonunda SLPG15 karışımında 1118,4 kPa olan tek eksenli serbest basınç dayanımı, donma-çözülme çevrimi işleminin ardından 792,4 kPa olarak ölçülmüştür. SLPN20 karışımının 28. gün sonunda 993,1 kPa olan tek eksenli serbest basınç dayanımı, donma-çözülme çevrimi işleminin ardından 623,1 kPa olarak ölçülmüştür. SL karışımına göre, SLPN ve SLPG numunelerine ait basınç dayanımları daha durabil sonuçlar vermiştir.

Deney kapsamında ulaşılan 9 farklı veri birlikte değerlendirildiğinde; mukavemetin oransal olarak en az düştüğü durumun %10 oranında inceltilmiş pomza kullanımının söz konusu olduğu durum (SLPG10) olduğu tespit edilmiştir. Şekil 52 ve Şekil 53'de SLPG ve SLPN karışımlarının donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları gösterilmiştir.



Şekil 52. SLPN karışımlarının donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları.



Şekil 53. SLPG karışımlarının donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli basınç dayanımları.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düşük plastisiteli kil bir zeminin stabilizasyonunda kireçli/kireçsiz olarak kullanılan pomza taşımanın inceltilmesinin dayanım ve durabiliteye etkisi incelenmiştir.

Çalışma neticesinde aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- ✓ Sadece kireç eklenerek hazırlanan SL numunesinin doğal zemine göre LL ve PI değerlerinde azalmalar meydana gelirken, PL değerinde artış tespit edilmiştir.
- ✓ Kireç katkıli SLPN ve SLPG karışımlarında likit limit ve plastik limit değerleri SL numunesine yakın değerdedir. Artan pomza taşı oranıyla birlikte likit limit değerlerinde düşüşler, plastik limit değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Bu değişimler düşük mertebelere düşmektedir.
- ✓ Sadece pomza taşı içeren SPN ve SPG numunelerinin kıvam limitleri sonuçları doğal zemine göre anlamlı farklılıklar meydana getirmemiştir.
- ✓ Maksimum kuru yoğunluklar ve optimum su içerikleri SPN ve SPG numunelerinde doğal zemine göre azalmıştır. SLPN ve SLPG numunelerinde maksimum kuru yoğunluklar artan pomza taşı oranıyla birlikte artmış, optimum su içerikleri azalmıştır.
- ✓ Kirecin doğal zeminle karıştırılmasıyla hazırlanan SL numunesinde 7 günlük kür sonunda doğal zemine göre 2 kata varan, 28 günlük kür sonrasında 3 kata varan, 84 günlük kür sonunda 7 kata varan dayanım artışları tespit edilmiştir. Kirecin katkı maddesi olarak kil stabilizasyonunda kullanılabilir olduğunu gösteren bu veriler literatür çalışmalarını destekler niteliktedir.
- ✓ SPN karışımlarında 7, 28 ve 84 günlük kür süresi sonunda yapılan tüm serbest basınç deneylerinde en yüksek dayanım SPN15 numunesinden elde edilmiştir. SPN15 karışımı doğal zemin numunesine göre 7 günlük kür sonunda %8, 28 günlük kür sonunda %20, 84 günlük kür sonunda %15 oranında artan dayanım göstermiştir.
- ✓ SPG15 karışımında 7 günlük kür sonunda doğal zemin numunesine göre %16, 28 günlük kür sonunda %80 ve 84 günlük kür sonunda %108 oranında artan dayanım meydana gelmiştir. İnceltmiş pomza taşı katkıli SPG karışımlarının SPN karışımlarına göre daha yüksek sonuçlar vermesi pomza taşımanın incelik etkisinin dayanımlarda etkin olduğunu göstermiştir.
- ✓ SLPN karışımlarının 7 günlük kür sonrasında doğal zemine göre serbest basınç dayanımında 4 kat artış olmuştur. Hazırlanan bu karışımların basınç dayanımları

- incelendiğinde elde edilen maksimum dayanımlar, SLPN20 numunesinden elde edilmiştir. SLPN20 karışımı SL karışımına göre 7 günlük kür sonunda %34, 28 günlük kür sonunda %67 ve 84 günlük kür süresinde %35 oranında artan dayanım göstermiştir.
- ✓ SLPG karışımlarına ait 7, 28 ve 84 günlük kür süreleri sonunda alınan basınç dayanım sonuçlarına göre en yüksek dayanım değeri SLPG15 numunesinden elde edilmiştir. SLPG15 karışımında SL numunesine göre 7 günlük kür sonrasında %52, 28 günlük kür sonunda %88 ve 84 gün kür süresinde %60 oranında basınç dayanımlarında artışlar gerçekleşmiştir.
  - ✓ SLPN karışımlarının 84 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre en yüksek değer 1680,2 kPa olarak elde edilen SLPN20 karışımlarında meydana gelmiştir. SLPG karışımlarında en yüksek değer SLPG15 karışımlarına ait 1985,4 kPa olarak elde edilmiştir. SLPN10 karışımı 1667,5 kPa dayanıma sahiptir. Bu değer SLPN20 karışımından elde edilen değer civarındadır. Yani, hom pomza taşının yarı oranında inceltilmiş pomza taşı kullanılarak aynı seviyelerde serbest basınç dayanımı verilerine ulaşılmıştır.
  - ✓ Serbest basınç dayanımları açısından; SPG karışımları doğal zemin ve SPN karışımlarına göre daha yüksek dayanıma sahiptirler. Benzer davranış SLPG numunelerinde, SL ve SLPN numunelerine göre gerçekleşmiştir. Buna göre pomza taşının inceltmesiyle dayanım verilerinin arttığını söylemek mümkündür. Kompaksiyon ve kıvam limitlerinde katkı maddelerinin eklenmesi ile birlikte anlamlı değişimler olmamasına rağmen serbest basınç deneyi sonuçlarındaki farklılıklar, incelik etkisi ile birlikte suyun varlığında kimyasal reaksiyonların daha fazla gerçekleştiğinin bir göstergesidir.
  - ✓ İslanma kuruma çevrimi tüm numunelere uygulanmıştır. Deney verileri incelendiğinde, SPN ve SPG karışımlarının hacimsel bütünlüğünü koruyamadığı tespit edilmiştir. Sadece SLPN20, SLPG15 ve SLPG20 karışımları 12 ıslanma kuruma çevrimi sonunda hacimsel bütünlüklerini korumuşlardır. SLPG karışımlarının, SLPN karışımlarına göre durabilite koşullarını daha iyi sağladıkları tespit edilmiştir.
  - ✓ Donma çözülme çevrimi sadece SL, SLPN ve SLPG numunelerine uygulanmıştır. Donma çözülme çevrimleri sonrasında elde edilen dayanım verileri incelendiğinde SLPG15 numunesinde en yüksek dayanım elde edilmiştir.
  - ✓ Durabilite tetkikleri açısından ıslanma kuruma ve donma çözülme deneyleri sonuçlarına göre en iyi durabilite davranışı gösteren karışımlar serbest basınç dayanımlarında da ortaya çıkan SLPN20 ve SLPG15 numunelerinde görülmüştür. Bu bağlamda pomza

taşının hem dayanım hem de durabilite davranışına etkisinin olduğu ve en yüksek dayanımların SLPG karışımlarında meydana gelmesiyle incelik etkisinin olumlu sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

İleriye dönük çalışmalara rehber olması amacıyla verilebilecek öneriler şunlardır:

- ✓ Farklı katkıların zemin stabilizasyonundaki incelik etkileri araştırılabilir.
- ✓ İkincil bağlayıcıların puzolanik özelliklerini arttıran kalsinasyonun zemin stabilizasyonu üzerindeki etkisi incelenebilir.





## Kaynakça

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (AASHTO). (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. USA: AASHTO M 147, 63-65.
- Adailer, K. (1996). *Mitigation of Earthquake-Induced Liquefaction Hazards (Doctoral dissertation)*. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- Aksoy, İ. H. (1992). Uçucu Külün Geoteknikte Kullanımı. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İstanbul.
- Altun, S. (2010). Zemin İyileştirme Yöntemleri, Derin Temeller ve Uygulama Örnekleri Sunumu. *İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi*, İzmir.
- Anonim, (2000). Guideline for The Design and Use of Asphalt Pavement Of Colorado Road Ways. *Colorado Asphalt Pavement Association (CAPA) Colorado*, USA.
- Anonim, (2012). Deep Soil Mixing. *Brochure*, USA: 32-01 E.
- Arman, A., & Moonfish, G. A. (1972). Lime Stabilization of Organic Soils, Research Record No. 381. *Highway Research Record*, Washington, 37-45.
- ASCE, (1997). Soil Improvement and Geosynthetics Committee Report, *Ground Improvement- Ground Reinforcemen*, 17-19 Temmuz 1997, GSP No:69, 1-371, Utah.
- ASTM C 618, (2002). *Annual Book of ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2166, (2006). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2487, (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2974, (2007). *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 422, (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, (2010). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 559, (2003). *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-*

- Cement Mixtures, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 560, (1996). Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 698, (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 854, (2010). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- Atanur, A. (1972). Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi olarak kullanılması. T.C. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 219.
- Atterberg, A. (1911). The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity. *Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift*, 50/2, 132-158.
- Ayan, E. (2009). Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 251281)
- Bagherinia, M. (2013). Killerin Derin Karıştırma Yöntemi ile İyileştirilmesinde Doymamış Polyesterin Kullanılabilirliği (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 346686)
- Briaud, J. L. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*.
- Bruce, D. A., & Bruce, M. E. C. (2003). *The Practitioner's Guide to Deep Mixing*. 3rd Internatioanal Conference on Grouting and Ground Treatment, Louisiana.
- Çakılcıoğlu, İ. (2007). Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 216270)
- Çakır, M. (2001). Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 98397)
- Çalık, Ü. (2012). Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireçle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 300926)
- Çetin, A. Y. (2011). Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez

- Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 295471)
- Çetin, H. (2006). Zemin Islah Yöntemleri, Ders Notları Sunum, <https://docplayer.biz.tr/47697721-Zemin-islak-yontemleri-prof-dr-hasan-cetin.html>, 10.10.2018.
- Das, B. M. (2002). Principles of Geotechnical Engineering, Stamford. *Cengage Learning*.
- Demir, H. (2007). *Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 201279)
- Demiröz, A., & Karaduman M. (2009). Zemin İyileştirme Metodları, *Selçuk-Teknik Dergisi*, Cilt 8, Sayı:3.
- Doru, H. M.(2014). *Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 373292)
- Durgunoğlu, H. T., Kulaç, F. H., İkiz, S., & Karadayılar, T. (1992). Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine bir Uygulama. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İstanbul.
- Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966). A Quick Test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization. *Highway Research Board*, 61-72.
- Edil, T. B., Benson, C. H., Bin-Shafique, M. S., Kim, W., Tanyu, B. F., & Senol, A. (2002). Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway over Soft Subgrade. *Transportation Research Board*, Washington, 36-48.
- ENPC-LCPC, 1977. International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics. *Environmental Geology*. 6, 987-997.
- Ergun, U. (1996). Bir Önyükleme Uygulaması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, Ankara.
- Erkan, İ. H.(2007). *Yumuşak Killi Zeminlerin Kireç Kolonlarıyla Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 212405)
- Fang, H. Y. (1991). *Foundation Engineering Handbook*. Londra: Van Nostrand Reinhold Publishing.
- Federal Highway Administration, (1998). *Ground Improvement Technical Summaries Final Draft*. FHWA Demonstration Project. USA.

- Fındık, S. (2005). *Karayolu esnek üstyapıları alttemel tabakasının stabilizasyonunda hafif agregaların kullanılabilirliği* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 197340)
- Fidan, D. (2016). *Killerin Stabilizasyonunda Doğal Puzolanik Katkı Maddesi İnceliğinin Dayanım ve Durabiliteye Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 44951)
- Ghabaee, S.(2015). *Kireç ile Stabilize Edilmiş Bentonitin Kür Süresinin Mukavemet Üzerindeki Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 397856)
- Gücek, S. (2011). *Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 284513)
- Gündüz, L., Sarıışık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, İ., & Çankıran, O., (1998). Pomza Teknolojisi Cilt 1. Isparta, 285.
- Handy, R. L., & Williams, N. W. (1967). *Chemical Stabilization of an Active Landslide*. Iowa. 37,62-65.
- Hayward, B. (1996). *Ground Modification Seminar Notes*. Odenton.
- Horne, M. R. (1964). The Consolidation of a Stratified Soil with Vertical and Horizontal Drainage. *International Journal of Mechanical Sciences*. 6, 187-197.
- Hughes, J. M. O., & Withers, N. J. (1974). Reinforcing of Soft Cohesive Soils With Stone Columns. *Ground Engineering*. 42-49.
- Hunt, R. E. (1986). *Geotechnical Engineering Techniques and Practices*. McGraw Hill. USA.
- Hunt, R. E. (1994). *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGraw Hill. USA.
- Ingles, O., G., & Metcalf, J. B. (1973). *Soil Stabilization*. John Wiley&Sons. New York.
- Karol, R. H. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization* (3. Baskı). *Recised and Expanded, Rutgers University*. New Jersey.
- Kavak, A. (1996). *The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 50492)
- Kavak, A., & Akyarlı, A. (2007). A Field Application for Lime Stabilization. *Environmental Geology*. 51.
- Kavak, A., Güngör, A. G., Avşar, C., & Atbaş, B. (2008). Kireç ile Zemin Stabilizasyonu. *Zemin*

*Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongres. Konya.*

- Kavlak Y., (2008). *Isparta Gelincik pomzasının karayolu esnek üstyapıları taban zemini stabilizasyonunda kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 237278)
- Kayabalı, K. (2010). Geoteknik Mühendisliğine Giriş. *Ankara. Gazi Kitapevi, 636.*
- Kayabalı, K., & Mollamahmutoğlu, M. (2004). Geoteknik Mühendisliği Elkitabı. *McGraw-Hill El Kitapları, Robert W. Day. Ankara. Gazi Kitabevi.*
- Keskin, S. N., & Çimen, Ö. (1997). Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımının araştırılması. *I. Isparta Pomza Sempozyum. 97-101.*
- Kett, I. (1998). Asphalt Materials and Mix Design Manual. *New Jersey. Noyes Publications.*
- Kızılcılık, M. (2010). *Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 275771)
- Kocabay, S. (2019). *Düşük Plastisiteli Killerin Kireçle Stabilizasyonunda İnceliğin Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 533972)
- Lambe, P. C., Khosla, N. P., & Jayaratne, N. N. (1990). Soil Stabilization in Pavement Structures. *Transportation Studies Research. Sacramento. 545-589.*
- Ledbetter, R. H. (1985). Improvement of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures. *Dept. of the Arm. Washington.*
- Little, N. D. (1987). Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime. *National Lime Association. Arlington, 19-20.*
- Littlejohn, G. S. (1982). Design of Cement Based Grouts-Grouting in Geotechnical Engineering. *In Proc. of an ASCE Conference. New York.*
- Loos, W. (1936). Comparative Studies of the Effectiveness of Different Methods for Compacting. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Massachusetts.*
- Lunardi P. (1997). Ground Improvement by Means of Jet-Grouting. *Ground Improvement. ISSMFE Thomas Telford. 1/2, 65 - 86.*
- Maag, E. (1938). Über Die Verfestigung und Dichtung des Baugrundes. *Lecture to Federal Technical University. Zurich.*

- Mehta, P. K. (1986). Concrete-Structure, Properties and Materials, *New Jersey: Prentice-Hall*. 350-400.
- Melegari, C., & Garassino A. L. (1997). Seminar on Jet Grouting. *CI-Premier Pte Ltd*. Singapore.
- Menard, L. (1977). The Dynamic Consolidation of Foundation Soils. *Report by Techniques Louis Menard*. Paris.
- Menard, L. & Boise, Y. (1975). Theoretical and Practical Aspects of Dynamics Consolidation. *Geot.* 1, 3- 18.
- Mitchell, J. K., & Gallagher, P. M. (1998). Guidelines for Ground Improvement of Civil Works and Military Structures and Facilities. *U.S. Army of Corps. Of Engineers*. Washington. 109.
- Nelson, J. D., & Debra D. J. (1992). Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. *Londra: John Willey and Sons Inc*. 259-261.
- Nikbakhtan, B., & Osanloo, M. (2009). Effect of Grout Pressure and Grout Flow on Soil Physical and Mechanical Properties in Jet Grouting Operatitons. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 46, 498-505.
- Öksüz, K. (2006). *Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 183731)
- Önalp, A. (1983). İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi (Cilt 2).*Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi*. 3, 1225.
- Öntürk, K.(2011). *Zemin İyileştirmesinde Polısaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 287312)
- Özaydın, K. (1989). Zemin Mekaniği. *İstanbul: Birsen Yayınevi*, 261.
- Özaydın, K. (2012). Zemin İyileştirme Teknikleri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi Isparta*.
- Özbayoğlu, F., & Gürel, A. (1997). Nevşehir Pomzalarının puzolanik Maddeler katkısı ile Yol Stabilizasyonunda Kullanılması. *I. Isparta Pomza Sempozyumu*. 26-28 Haziran, 113-118.
- Özdemir, A., & Özdemir, M. (2007). Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri. *Sondaj Dünyası*. 3.

- Özer, M., & Orhan, M. (2007). Lazer Kırınım Yöntemiyle Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Belirlenmesi: Genel İlkeler ve Örnek Hazırlama Yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 22/ 2, 217-226.
- Öztoprak, S. (2016). Zeminlerin İyileştirilmesi: Yöntemlere Genel Bir Bakış. *İMO İstanbul Karaköy Şb.* Kasım 2016, İstanbul.
- Pektaş, C. (2012). *Muhtelif Katkı Maddeleri ve/veya Donatı Kullanımı ile Yapılan Zemin İyileştirme (Stabilizasyon) Yöntemlerinin Teorik ve Deneysel Olarak Ayrıntılı Bir İrdeleme ve Değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 327224)
- Porbaha, A. (1998). State of the Art in Deep Mixing Technology: Part 1. *Basic Concepts and Overview*. *Ground Improvement*. 2(2), 81–92.
- Raj, P. P. (1995). *Geotechnical engineering*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Sağlamer, A. (1985). Zemin Islah Metotları. *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*. DSİ Genel Müdürlüğü, Adana.
- Sağlamer, A. (2011). Zemin iyileştirme yöntemleri. *ZM11 Sunum Notları*. Trabzon.
- Trb, (1987). State of the Art Report 5. *Transportation Research Board*. Washington.
- TS 639, (1975). *Uçucu Küller*. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- Tumluer, G. (2006). *Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 183645)
- Tunç, A. (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım. 325.
- Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım. 912.
- Tülek, M. (2007). *Kimyasal Atık Alçıların Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 177873)
- Türköz, M. (2006). Şişen Killerin Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik Killerine Uygulanması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*. 19, 2, 75-88.
- Tystovich, N. A., Abelev, M. Y., & Takhirov, I. G. (1971). Compacting Saturated Loeses Soils by Means of Lime Piles. *Proceedings of the 4th Conference on Soil Mechanics*.

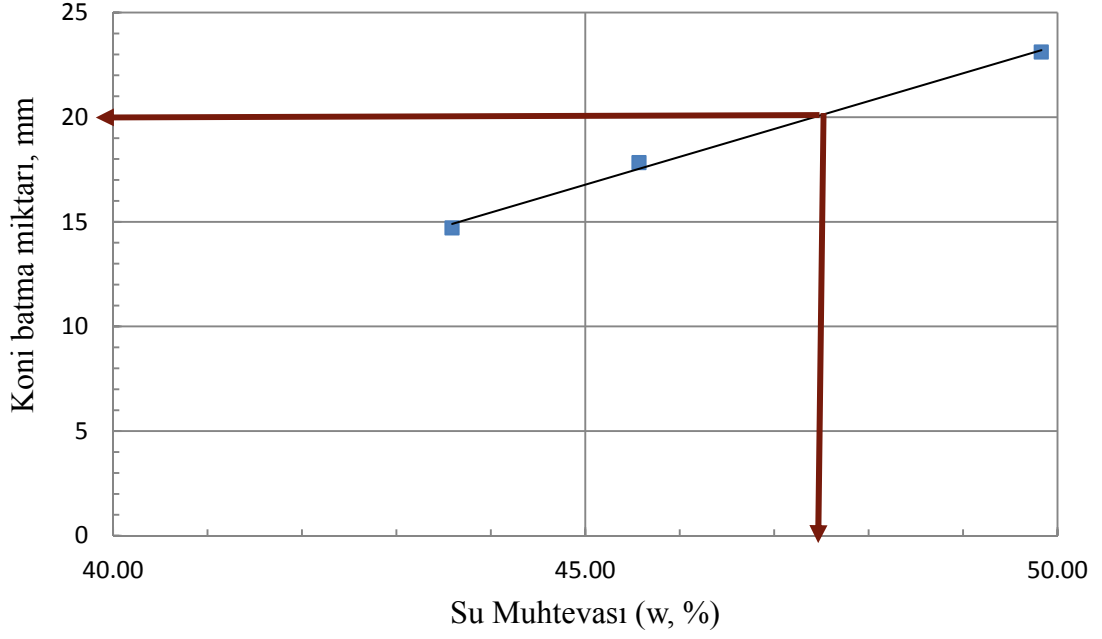
Budapest.

- U. S. Army Corps. of Eng. (2003). *Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities*. Dept of the Army. Washington.
- Uzuner, B. A. (2006). *Temel Mühendisliğine Giriş (3.Baskı)*. Trabzon: Derya Kitabevi. 310-360.
- Uzuner, B. A. (2013). *Temel Mühendisliğine Giriş (5.Baskı)*. Trabzon: Derya Kitabevi. 342-359.
- Uzuner, B.A. (2000). *Temel Mühendisliğine Giriş (2.Baskı)*. Trabzon: Derya Kitabevi. 245-270.
- Van Impe, W. F. (1989). *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*, Rotterdam: A.A. Balkema, 125.
- Welsh, J.P., Rubright, R.M. ve Coomber, D.B. (1986). Jet Grouting for Support of Structures Session. *ASCE Spring Convention*. Seattle.
- Winterkorn, H. F., & Fang, H. Y. (1975). *Foundation Engineering Handbook*. Londra: VanNostrand Reinhold Publication. 176.
- Yang, D. S. (1997). In Situ Ground Improvement, Reinforcement and Treatment: A Twenty Year Update and a Vision for the 21st Century. *Ground Reinforcement Committee, American Society of Civil Engineers Geo- Institute Conference*. Logan.
- Yıldırım, S. (2002). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi. 466.
- Yılmaz, F. (2015). *Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği ile Araştırılması* (Doktora Tezi). Yüksek öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 397321)

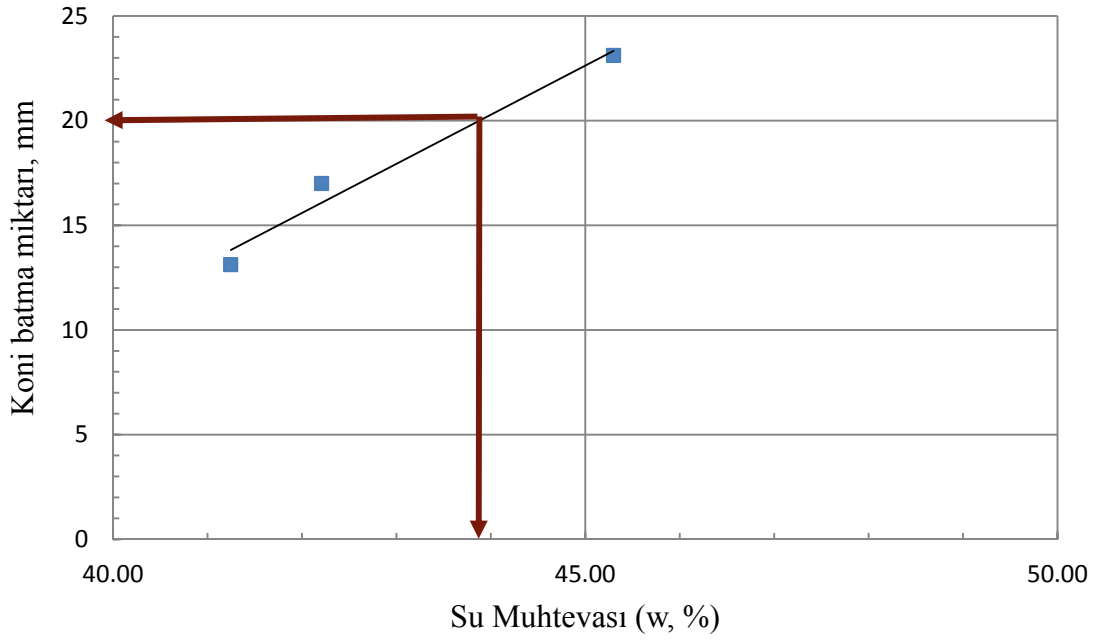


## EKLER

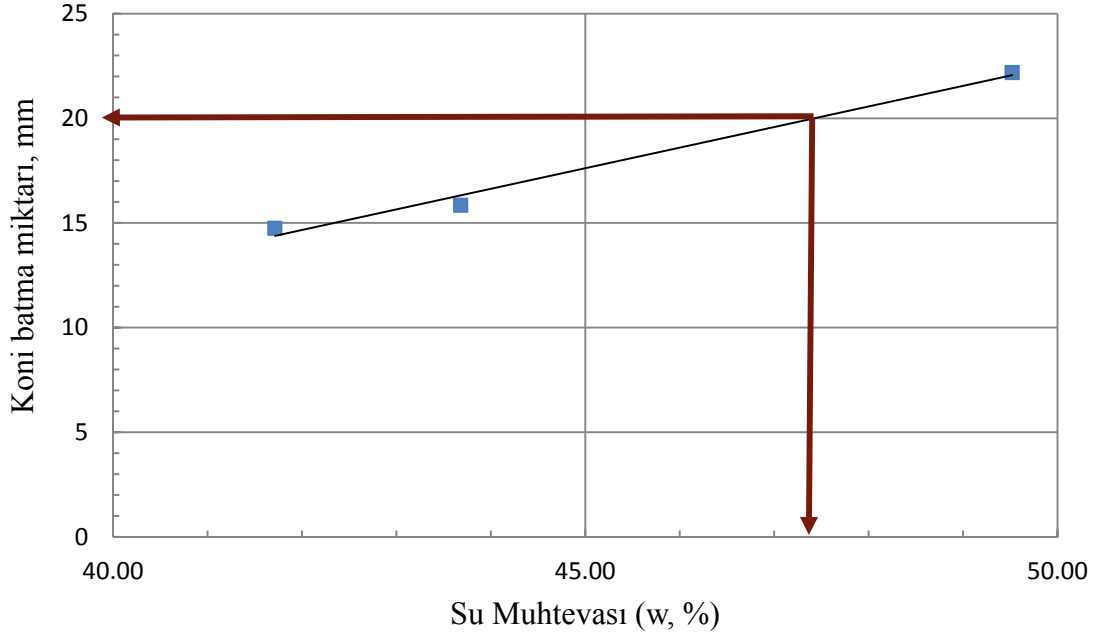
### Ek-1: Düşen Koni Penetrasyon Deney Sonuçları



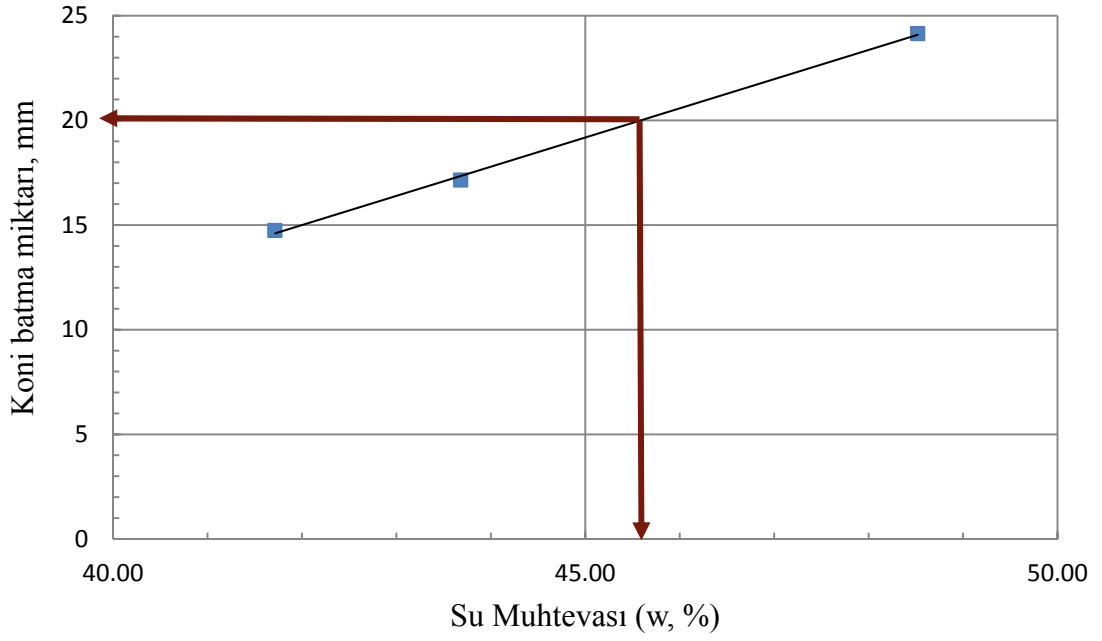
Şekil 54. Doğal zemine ait düşen koni penetrasyon grafiği.



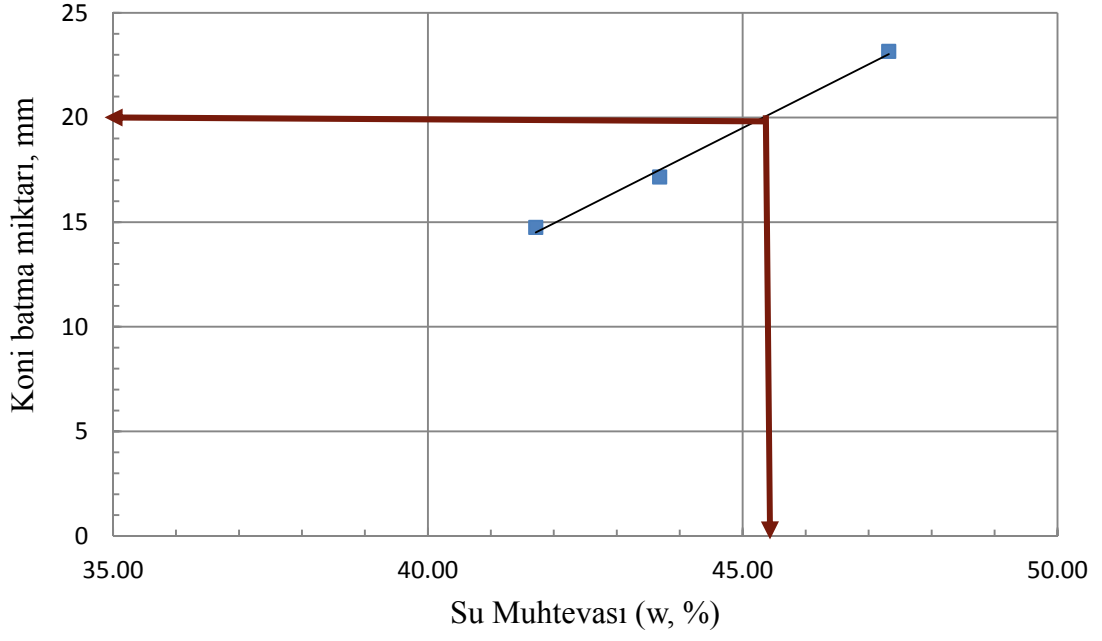
Şekil 55. SL karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



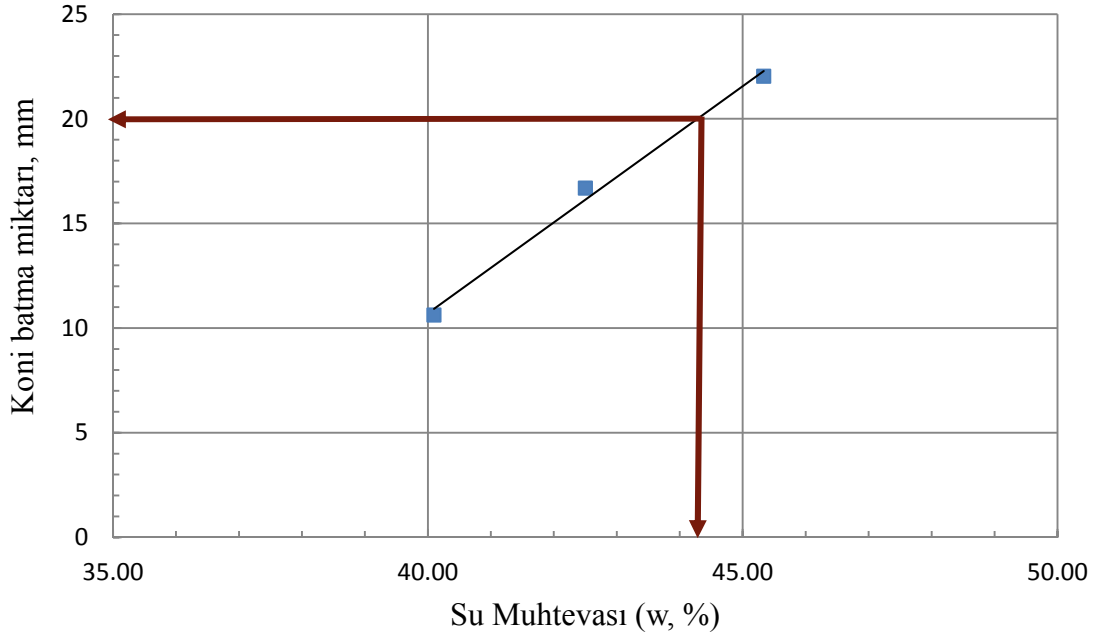
Şekil 56. SPN5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



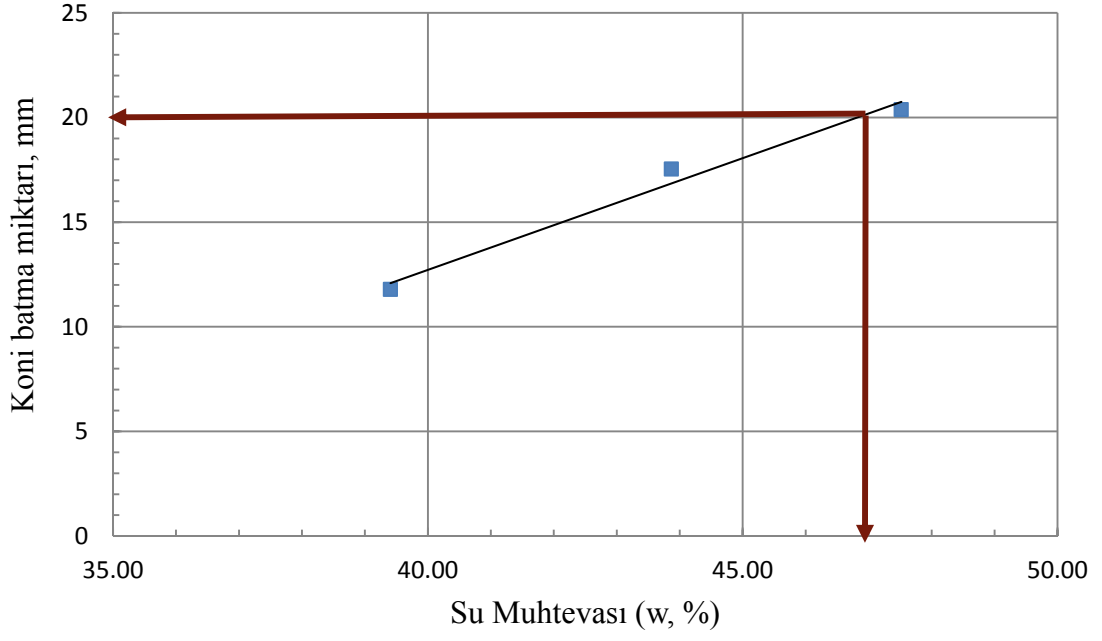
Şekil 57. SPN10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



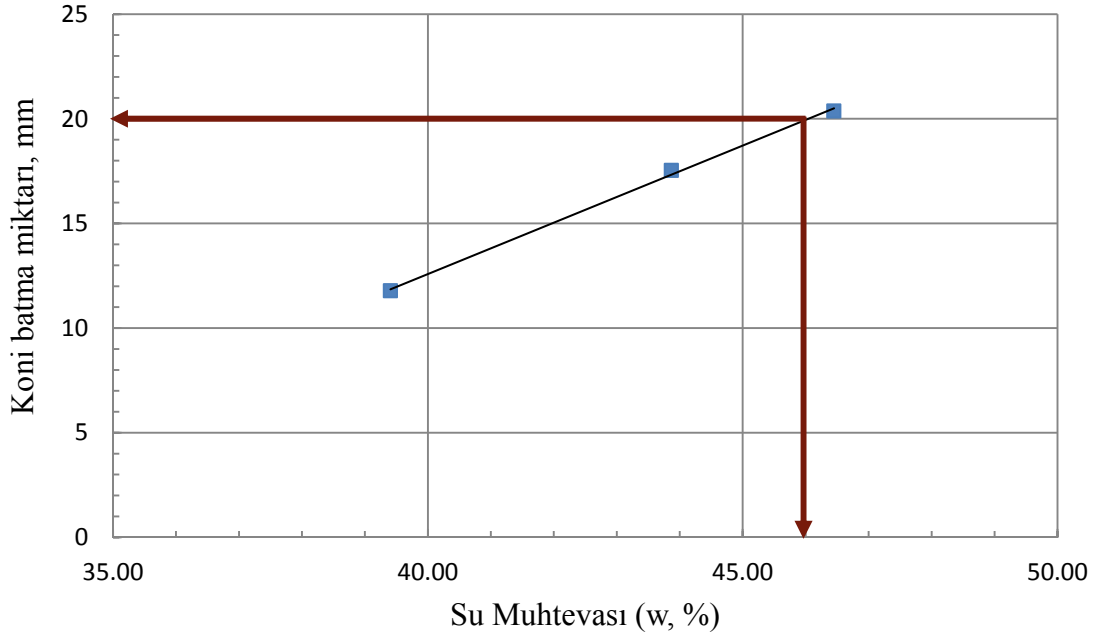
Şekil 58. SPN15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



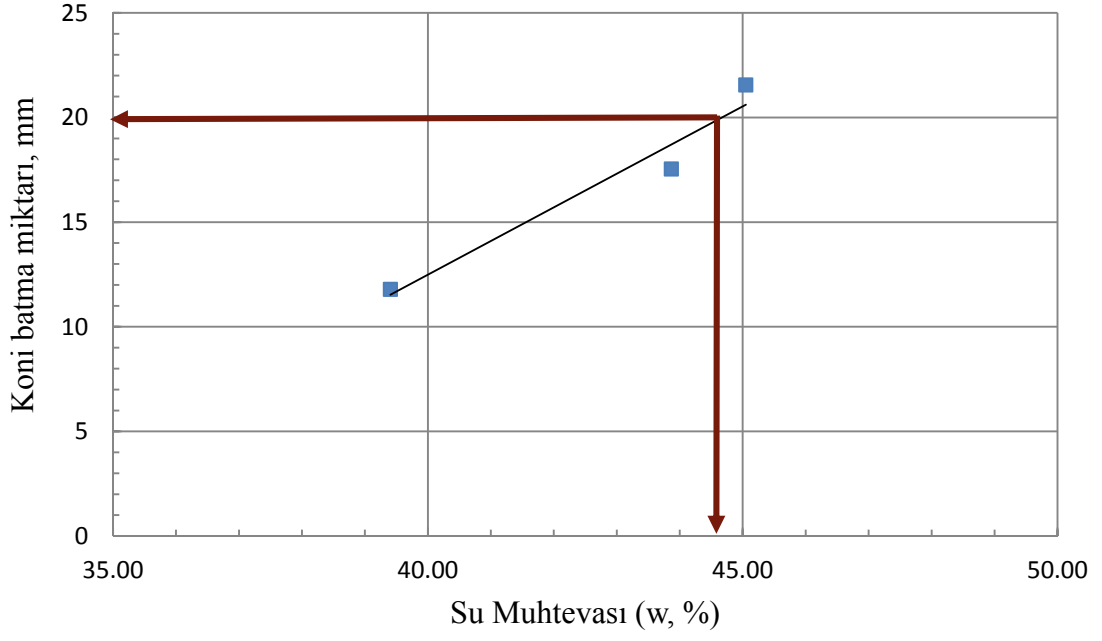
Şekil 59. SPN20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



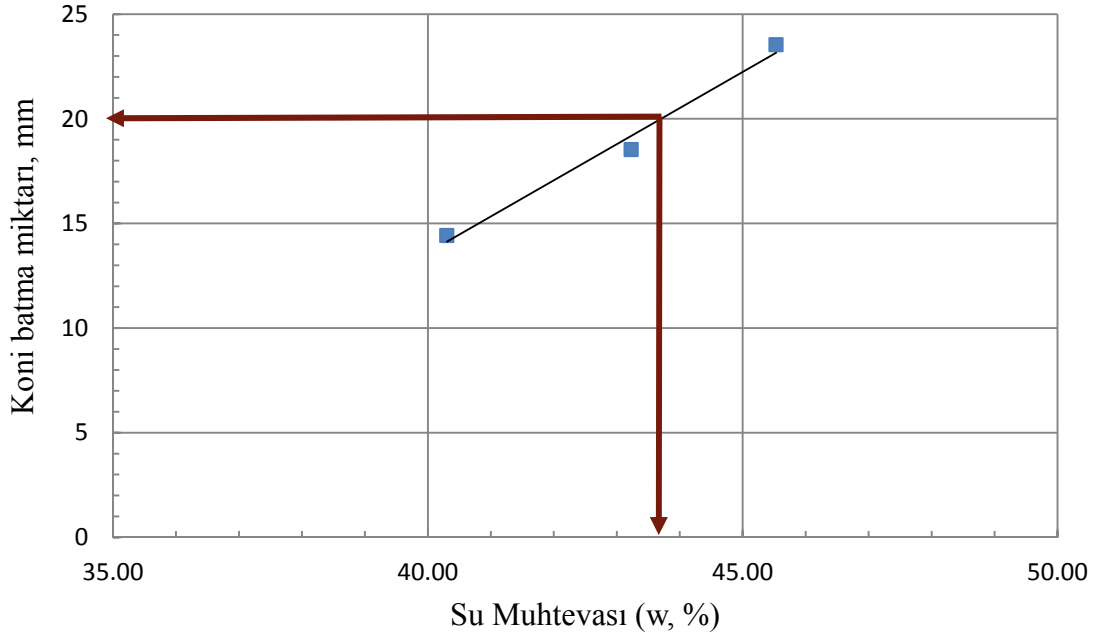
Şekil 60. SPG5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



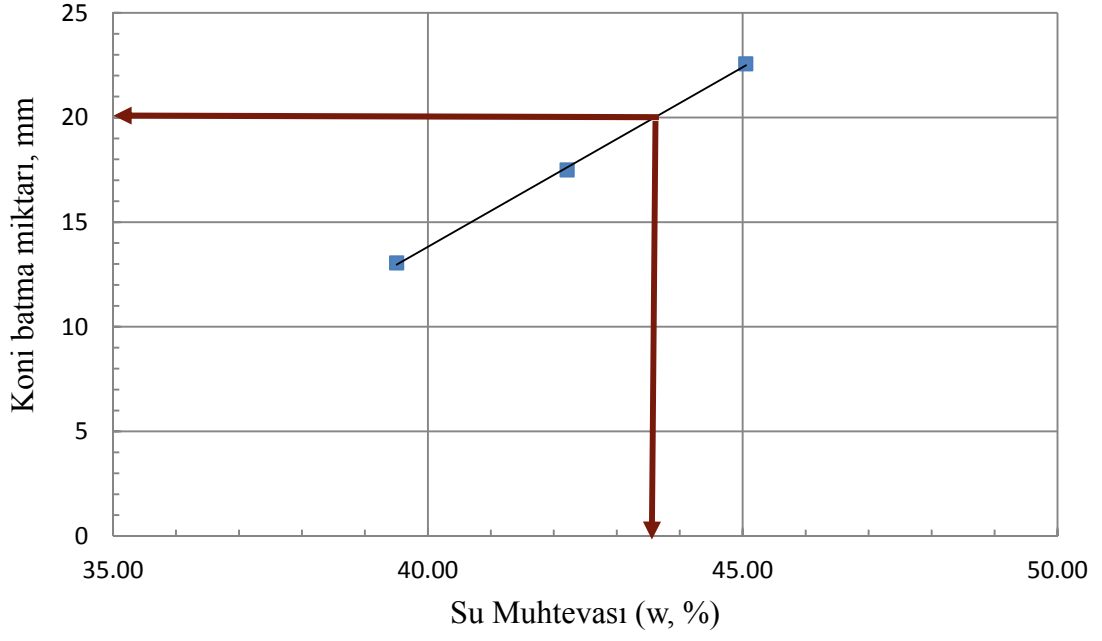
Şekil 61. SPG10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



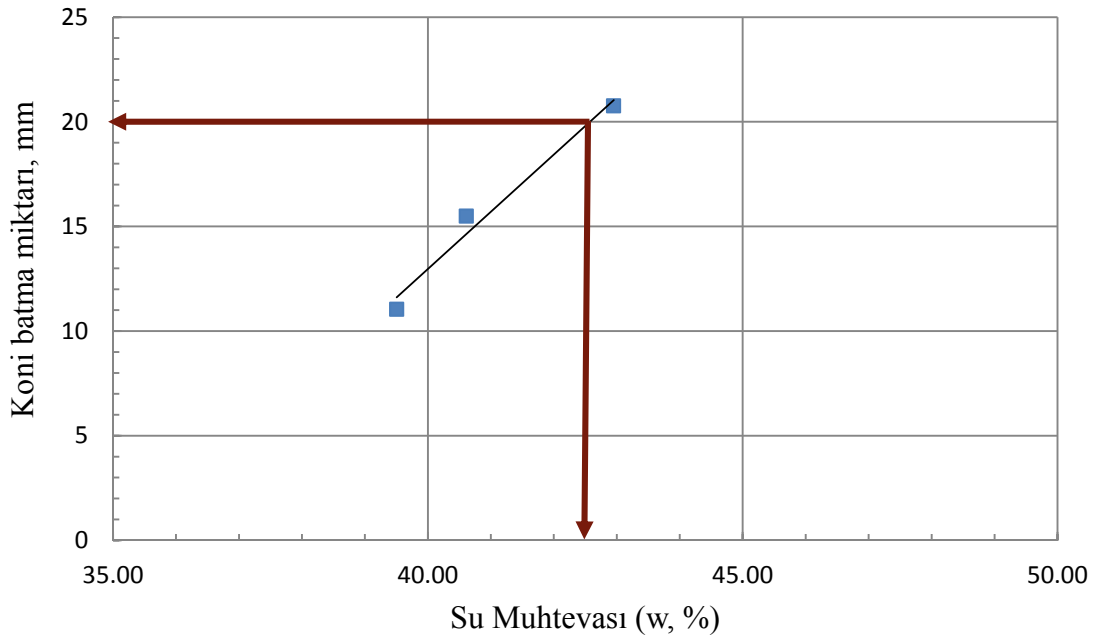
Şekil 62. SPG15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



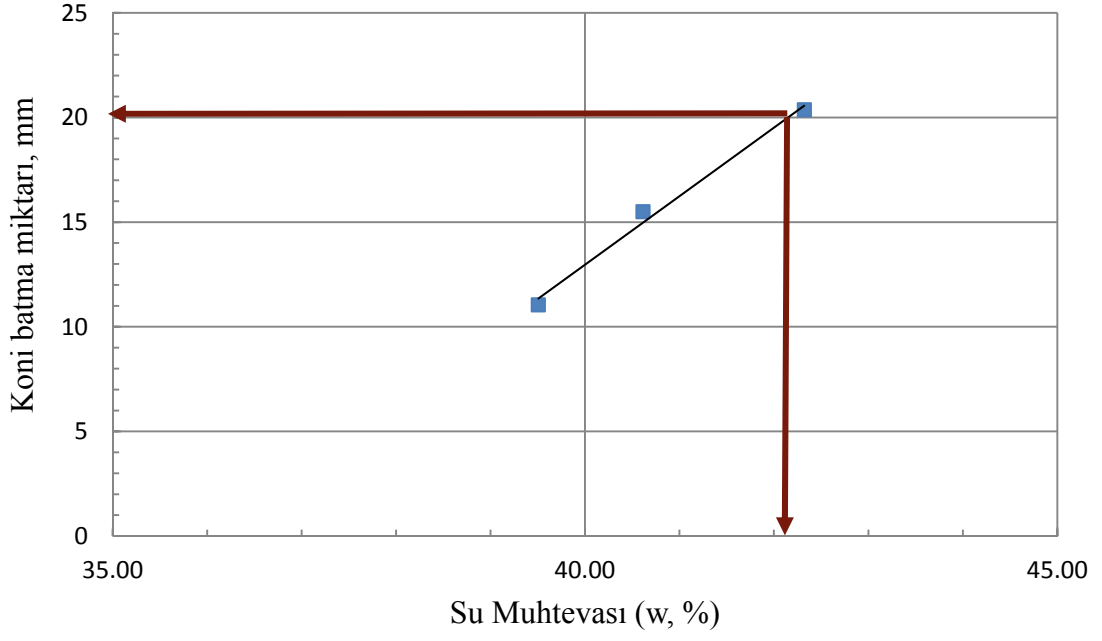
Şekil 63. SPG20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



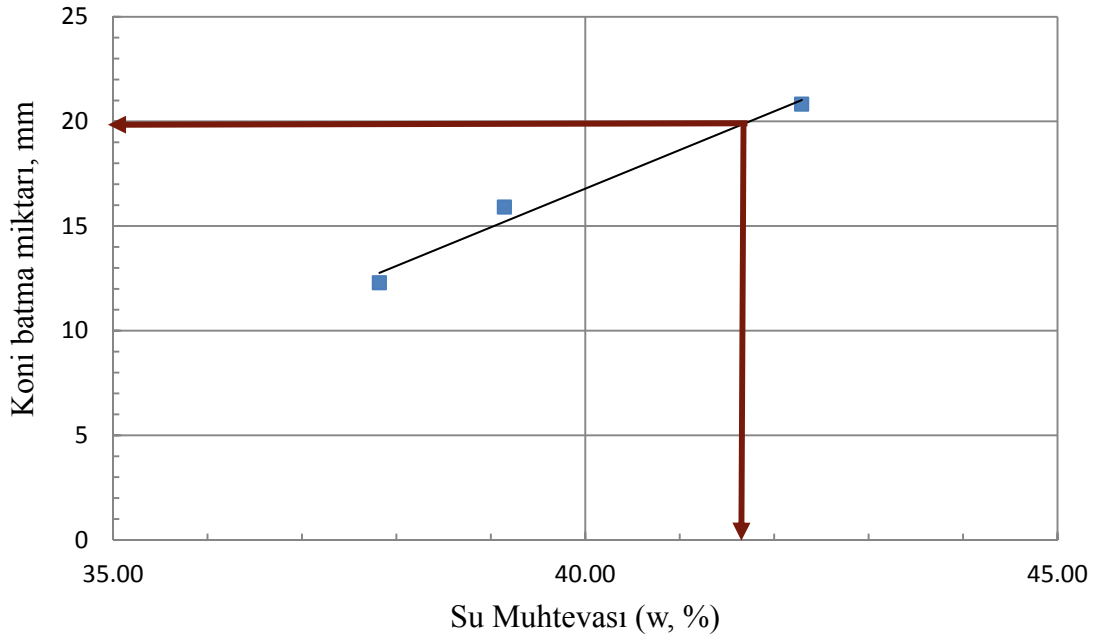
Şekil 64. SLPN5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



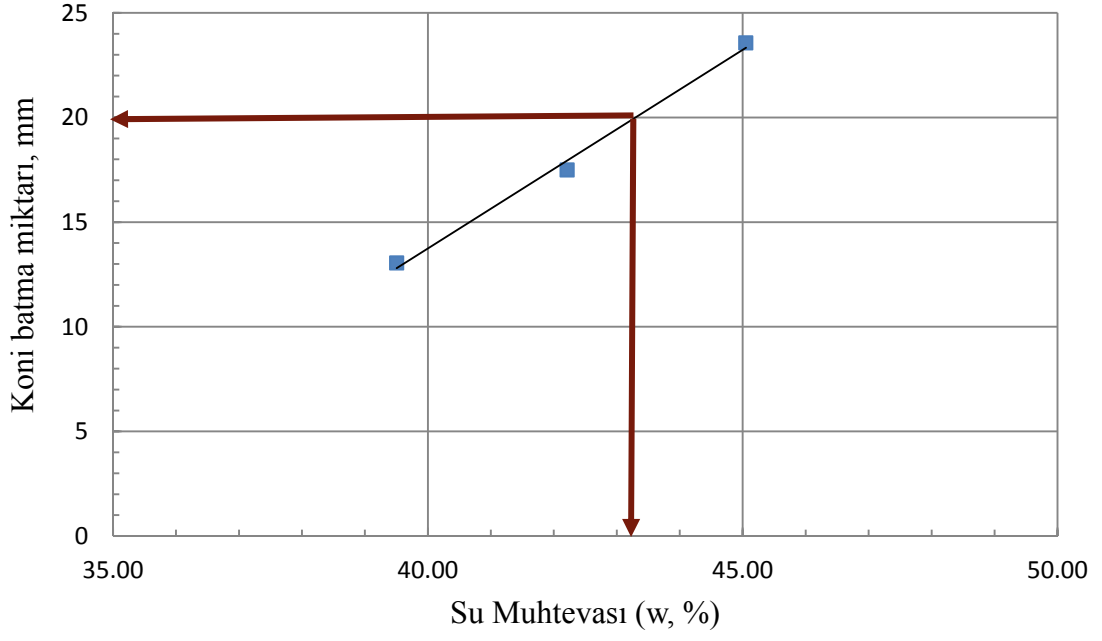
Şekil 65. SLPN10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



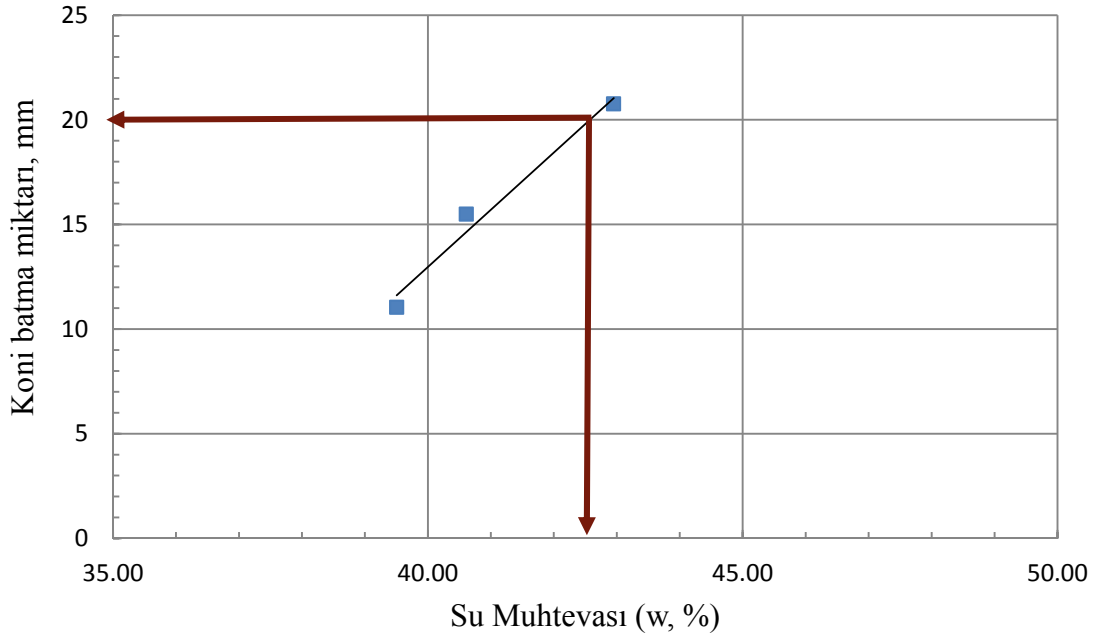
Şekil 66. SLPN15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



Şekil 67. SLPN20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.

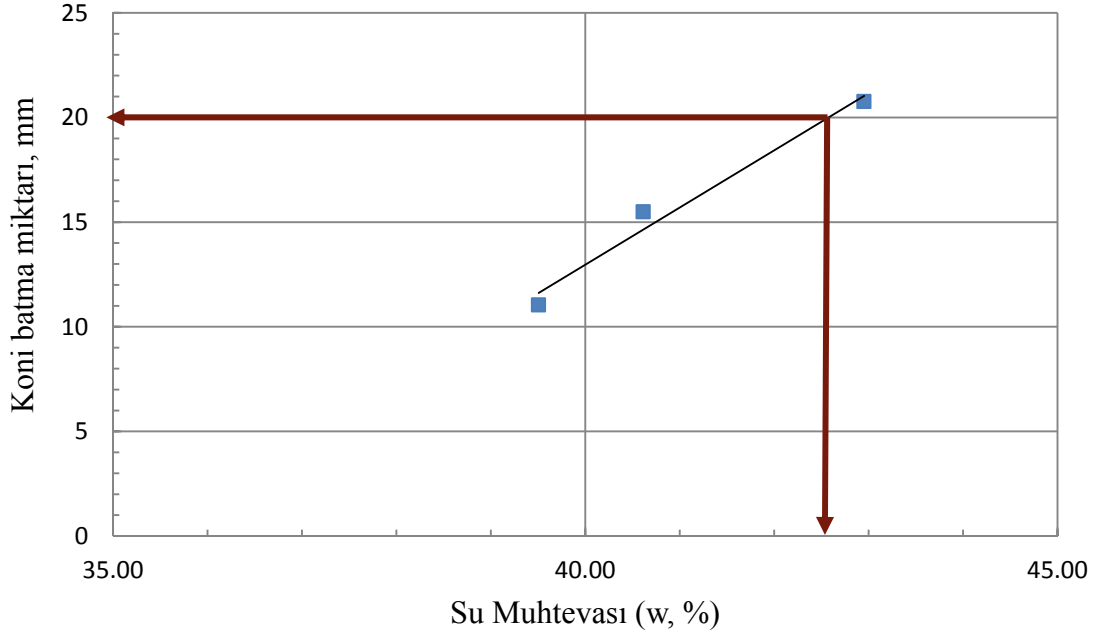


Şekil 68. SLPG5 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.

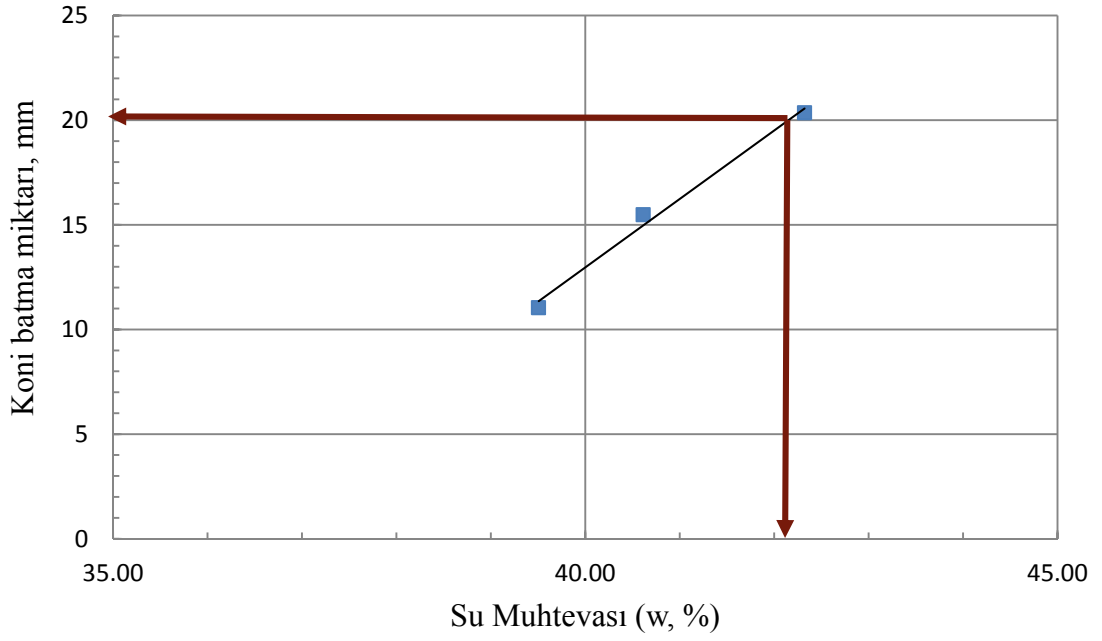


Şekil 69. SLPG10 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.



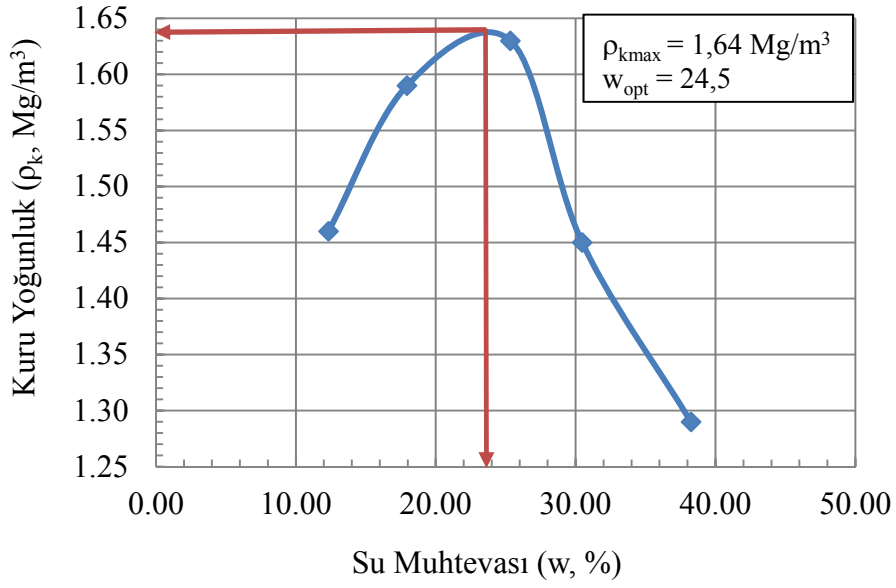


Şekil 70. SLPG15 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.

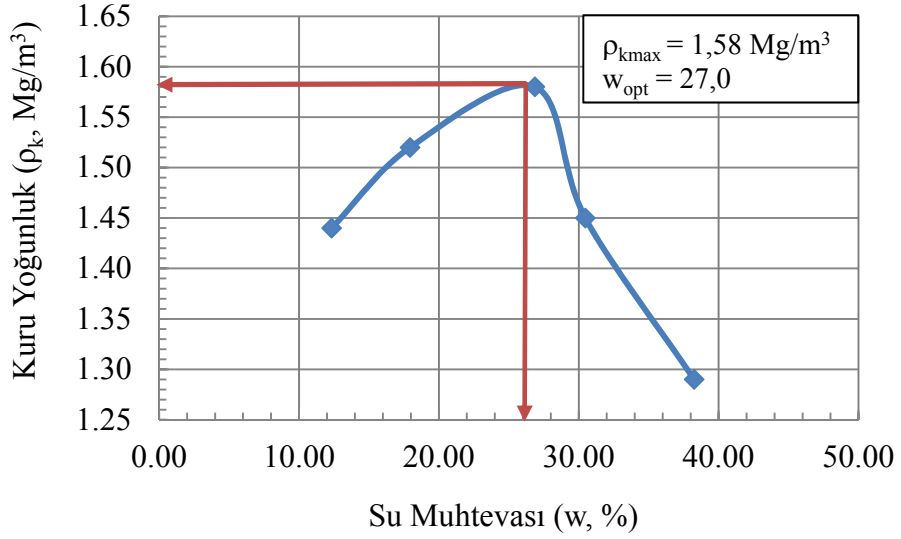


Şekil 71. SLPG20 karışımının düşen koni penetrasyon grafiği.

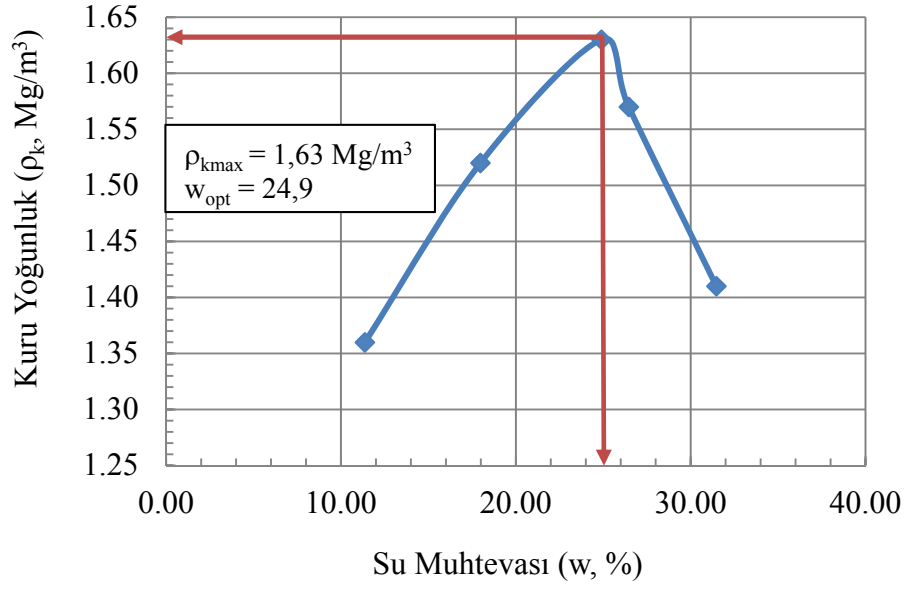
## EK-2: Kompaksiyon Deney Sonuçları



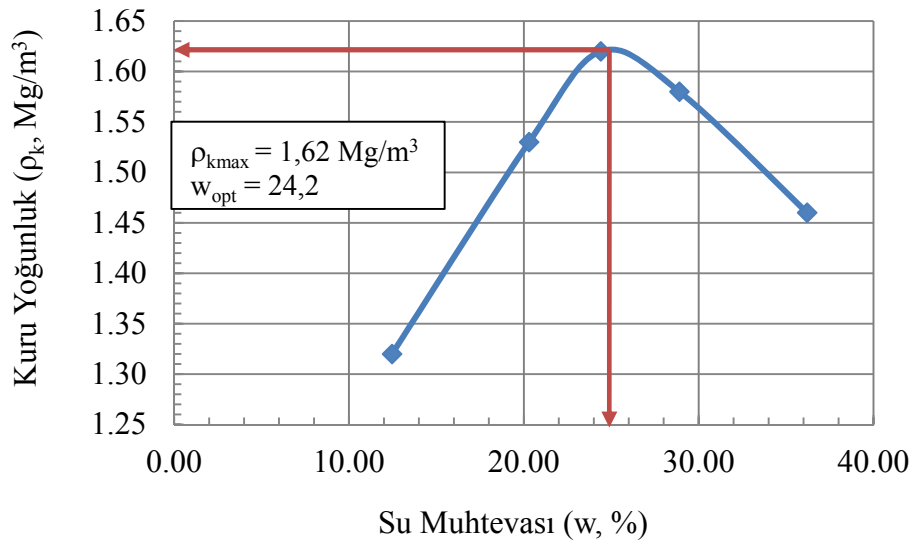
Şekil 72. Doğal zemine ait kompaksiyon eğrisi.



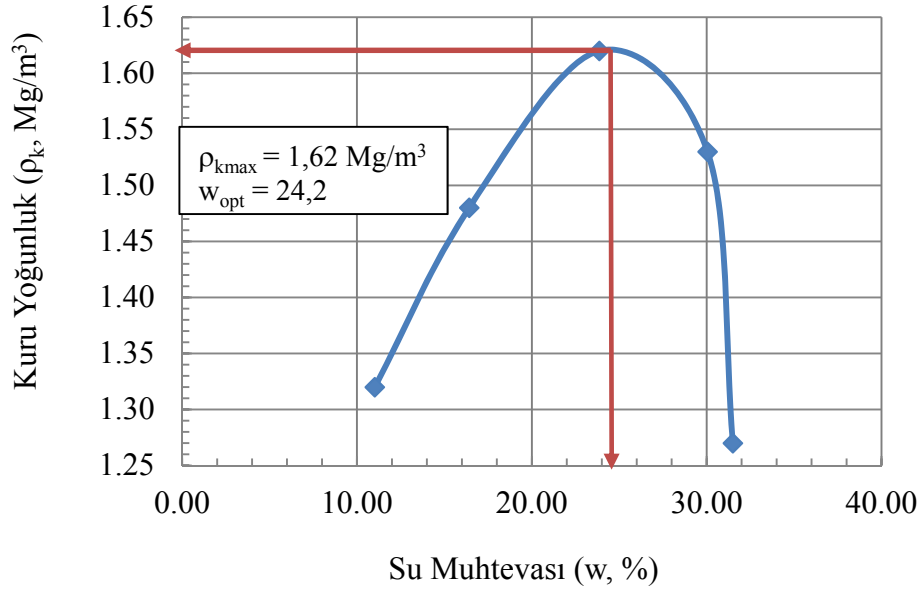
Şekil 73. SL karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



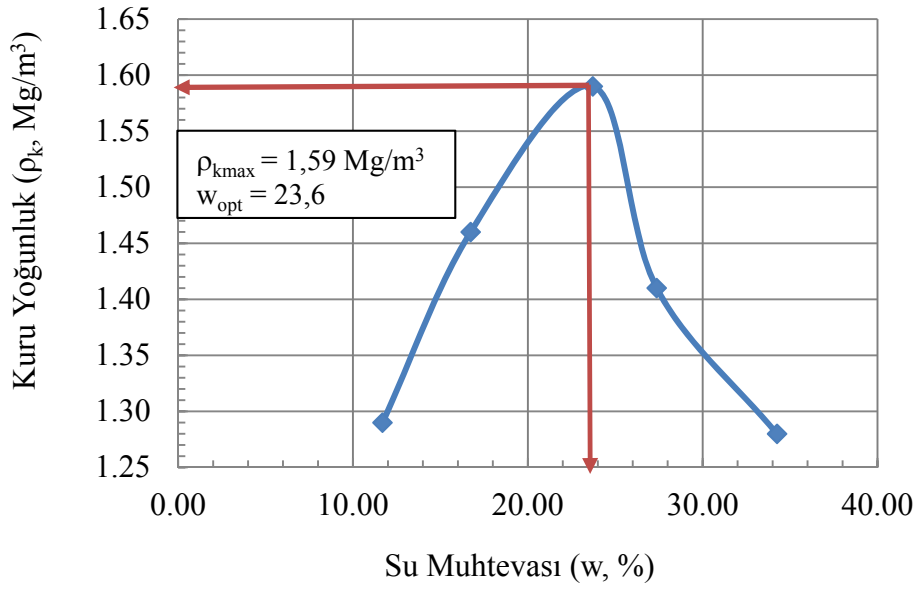
Şekil 74. SPN5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



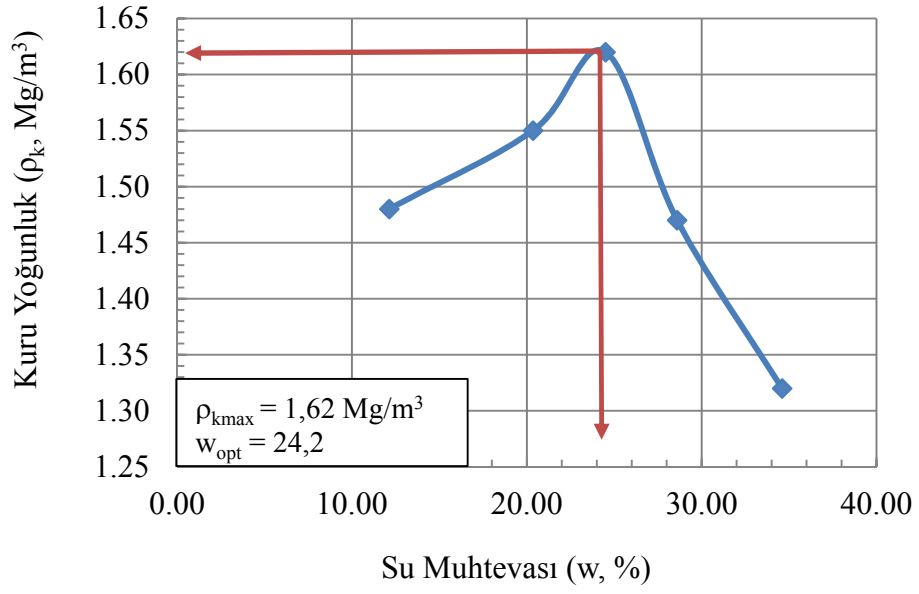
Şekil 75. SPN10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



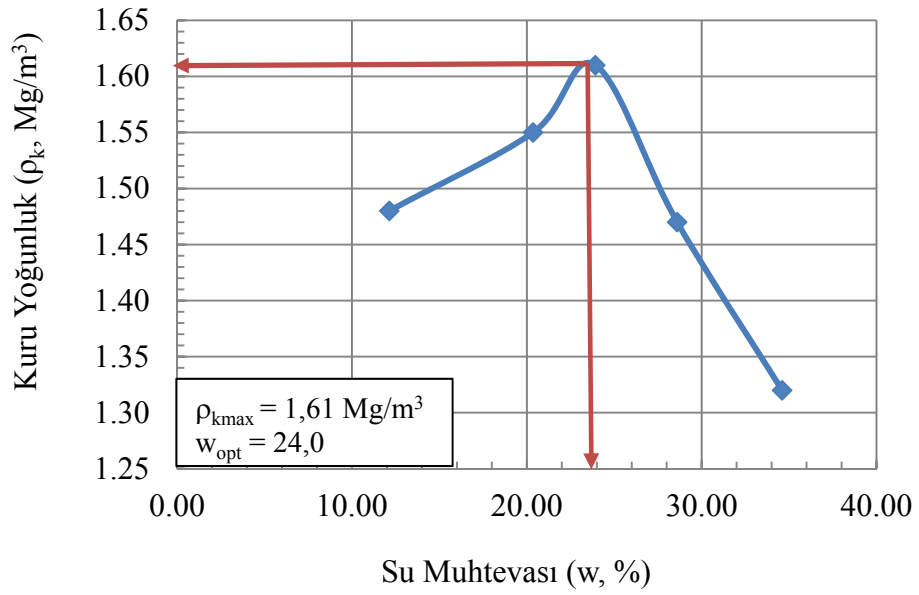
Şekil 76. SPN15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



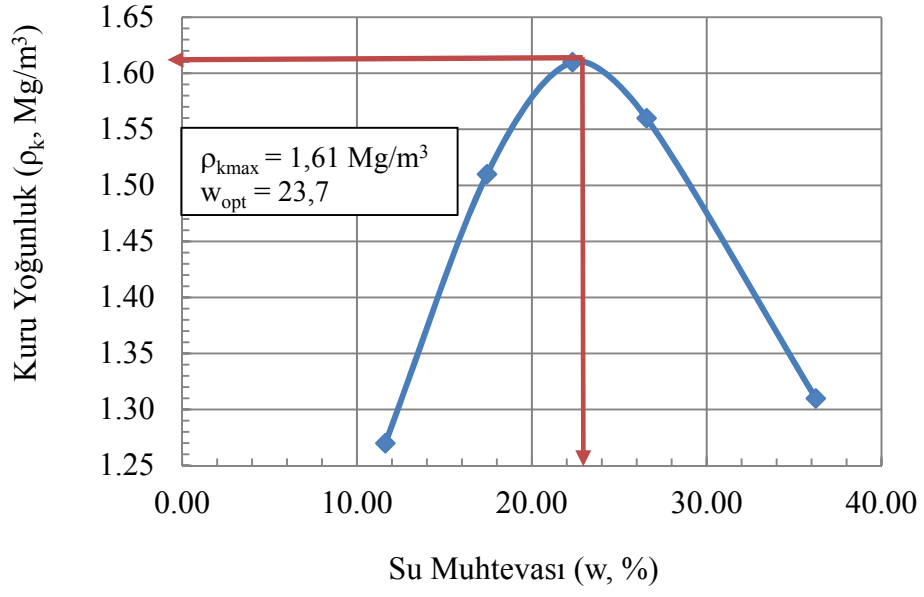
Şekil 77. SPN20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



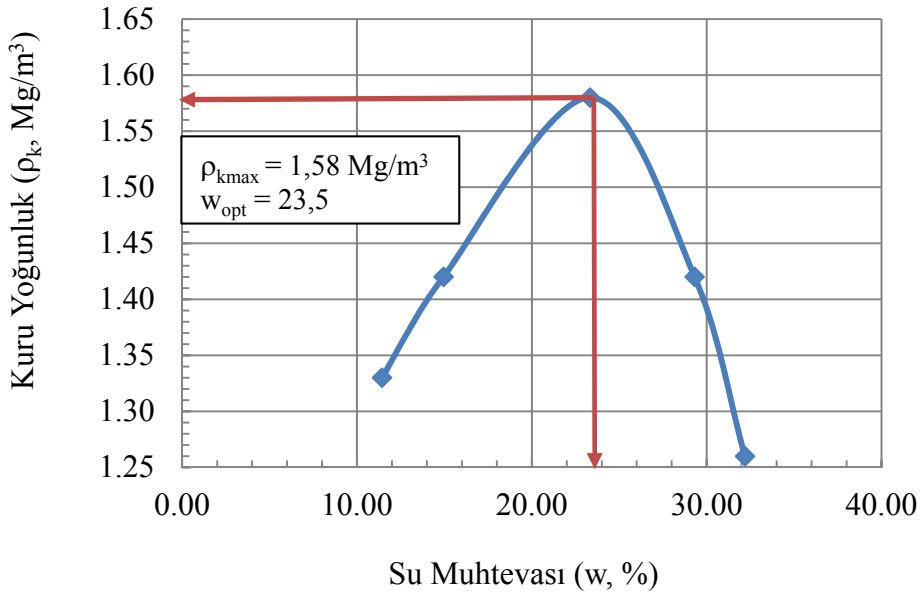
Şekil 78. SPG5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



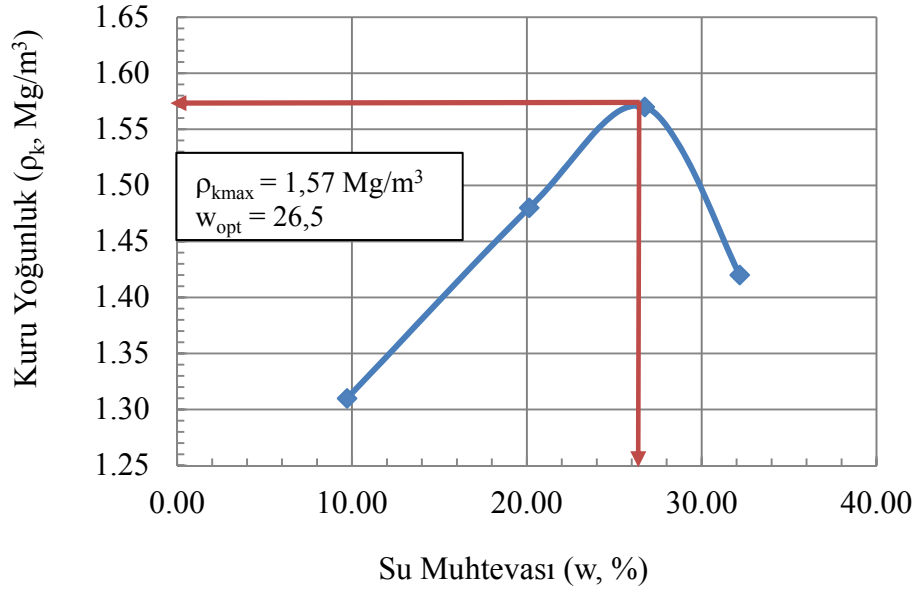
Şekil 79. SPG10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



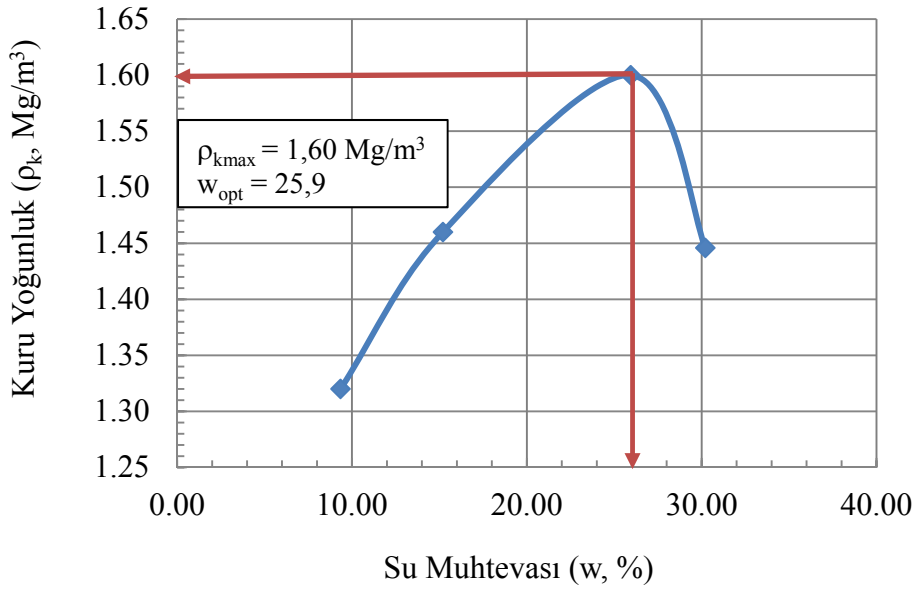
Şekil 80. SPG15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



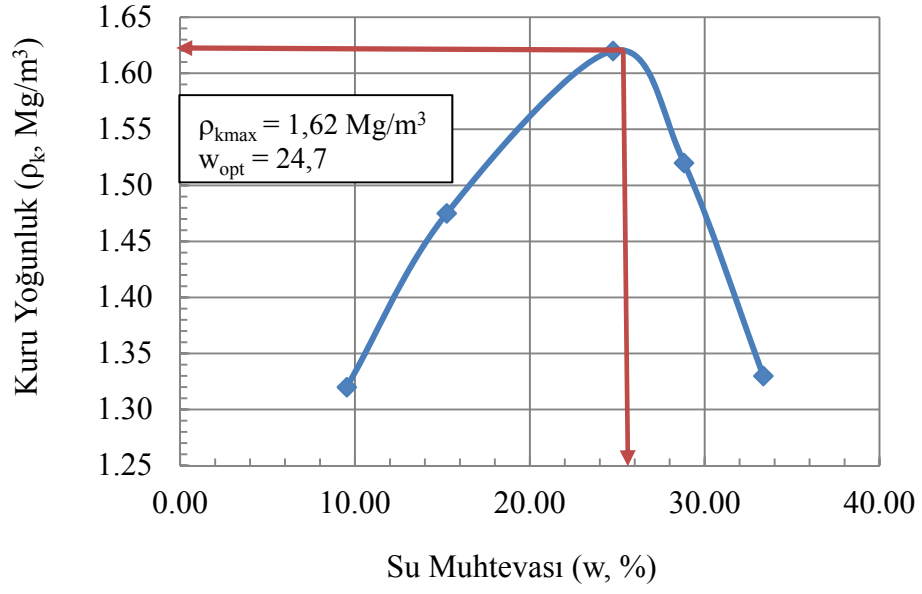
Şekil 81. SPG20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



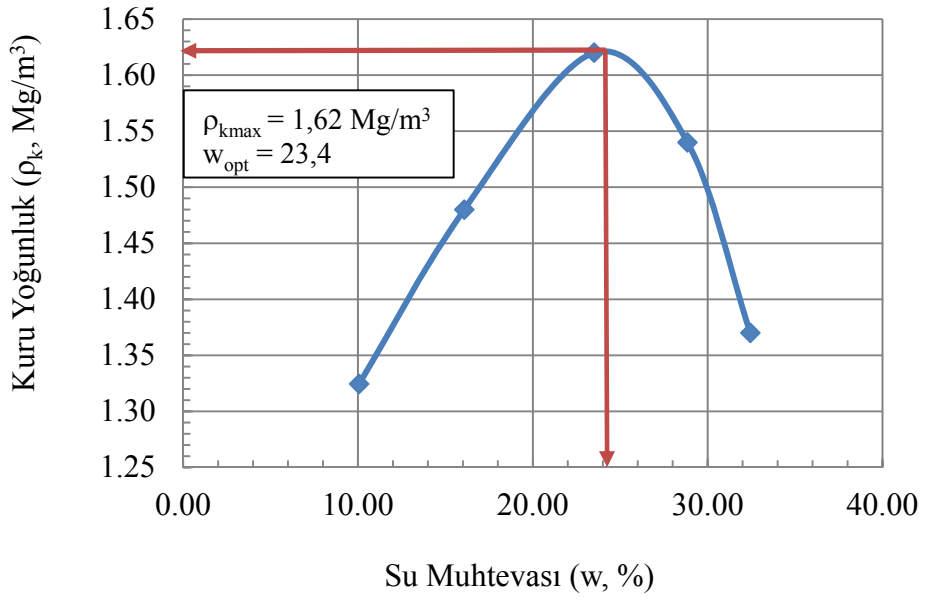
Şekil 82. SLPN5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



Şekil 83. SLPN10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.

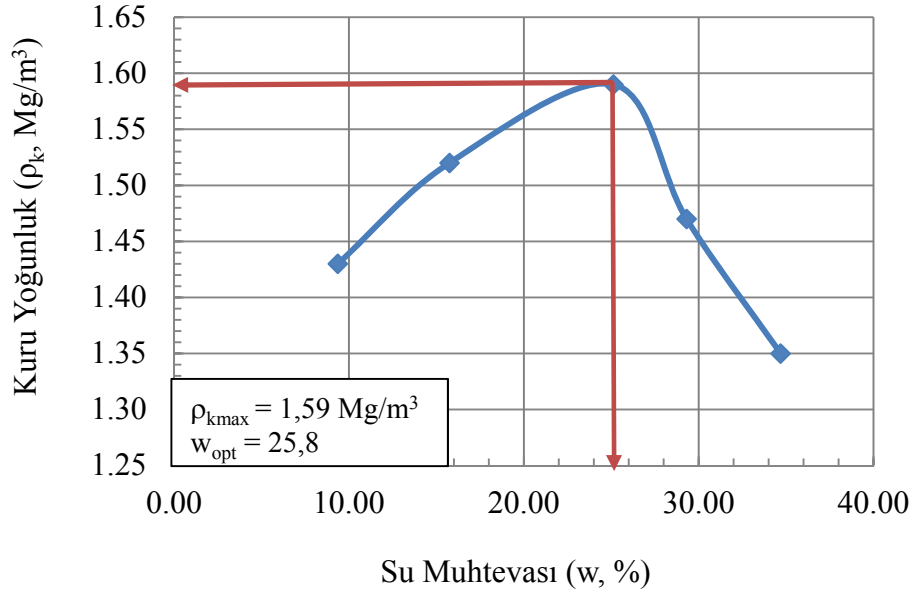


Şekil 84. SLPN15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.

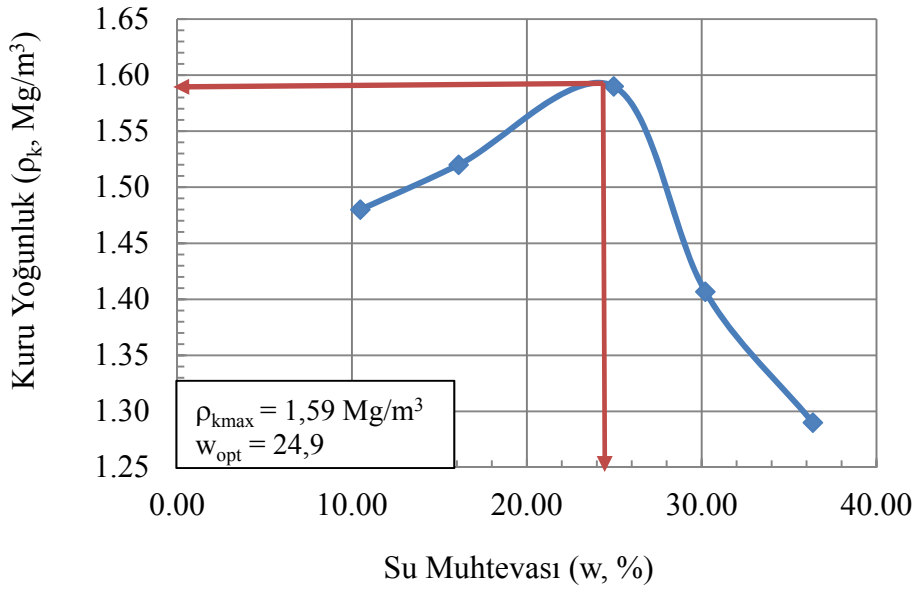


Şekil 85. SLPN20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.

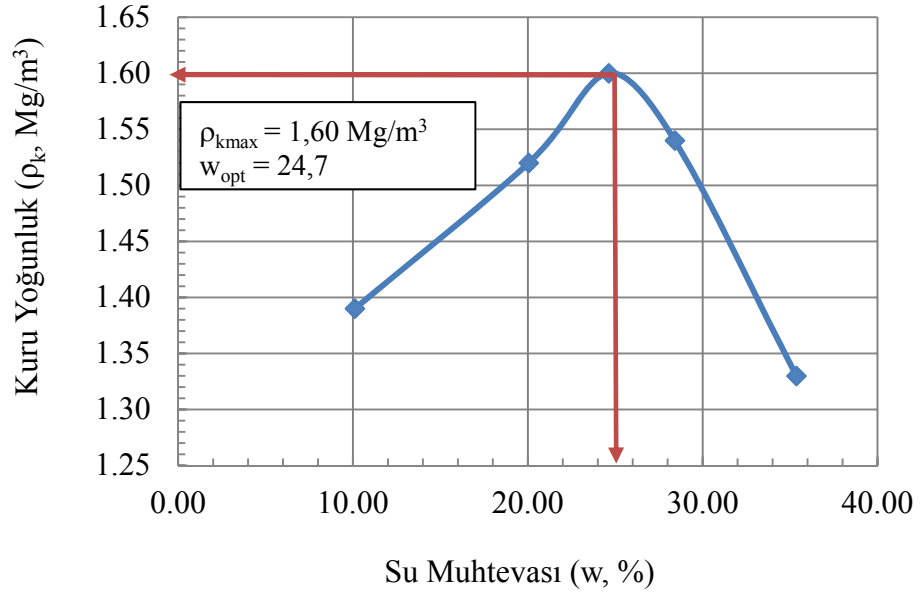




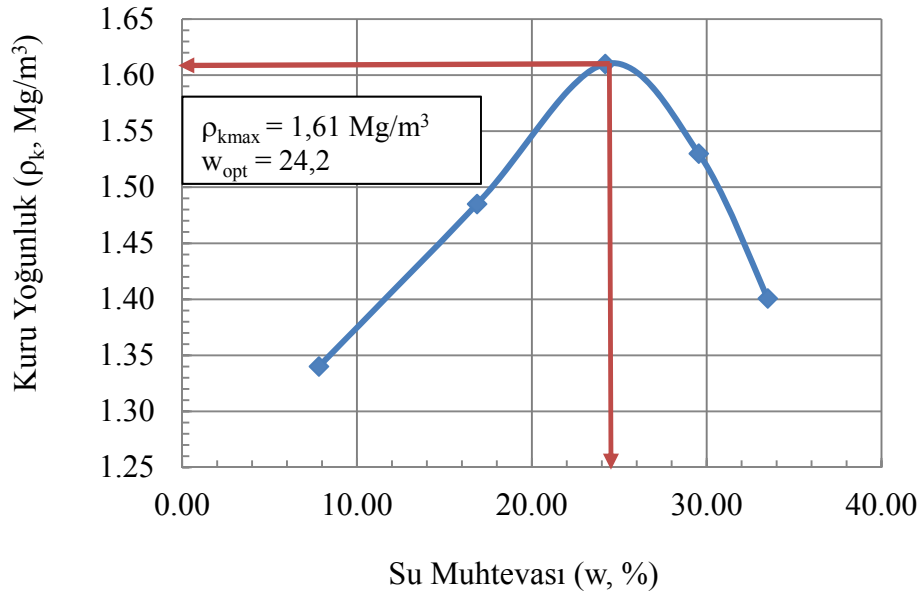
Şekil 86. SLPG5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



Şekil 87. SLPG10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



Şekil 88. SLPG15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.



Şekil 89. SLPG20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.

## ÖZ GEÇMİŞ

Zekeriya Hayri ÇELİK, 1993 yılında, Siirt'te doğdu. İlköğrenimini İstanbul Büyükşehir İlköğretim Okulu'nda, ortaöğrenimini ise Siirt Selami Değer Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde tamamladı.

2013 yılında başladığı yükseköğrenimini Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlayan Zekeriya Hayri ÇELİK, mezuniyetinin ardından kurduğu mühendislik/değerleme/danışmanlık firmasında faaliyetlerine ve Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda lisansüstü öğrenimine devam etmektedir.