

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORMAN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ORMAN YOLLARINDA KAĞIT FABRİKASI ATIĞININ (KİREÇ ÇAMURU)  
STABİLİZASYON AMAÇLI KULLANIMI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

139207

**Orman Yük. Müh. Habip EROĞLU**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Doktor "  
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.08.2003  
Tezin Savunma Tarihi : 23.09.2003**

138207

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. H. Hulusi ACAR**

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. Fazıl ÇELİK**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Lokman ALTUN**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Osman ÜÇÜNÜ**

**Jüri Üyesi : Prof. Dr. Turgay AYKUT**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ**

**Trabzon 2003**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

## ÖNSÖZ

“Orman Yollarında Kağıt Fabrikası Atığının (Kireç Çamuru) Stabilizasyon Amaçlı Kullanımı Üzerine Bir Araştırma” isimli bu çalışma ile orman yollarının altyapısında taban zeminlerin stabilizasyonunda ve üst yapıda kaplama tabakasında kullanılmak üzere alternatif bir malzeme ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla kireç çamuru ile katkı çimento karışımları üzerinde basınç dayanımı ve çimento deneyleri ile kumlu balçık, balçıklı kil ve ağır kil zeminlerinin stabilizasyonuna yönelik, atterberg limitleri, üç eksenli basınç deneyi, kompaksiyon ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

Konu seçiminden çalışmanın sonuçlandırılmasına kadar bütün aşamalarda yakın ilgi ve desteğini gördüğüm ve bu konuda bana çalışma imkanı sağlayan Sayın Hocam Prof. Dr. H. Hulusi ACAR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezi çalışmalarım süresince gerekli denetim ve uyarıları yaparak katkılar sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Fazıl ÇELİK ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Lokman ALTUN’a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın başlangıcında ve ilerleyen aşamalarda fikir ve desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Turgay AYKUT, Sayın Prof. Dr. Ö. Bülend SEÇKİN, Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman ÜÇÜNCÜ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Necmettin ŞENTÜRK’e ayrı ayrı teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmada kullanılan atık kireç çamurunun temininde yardımlarını gördüğüm Seka Afyon-Çay İşletmesi Müdür Yardımcısı Sayın Mustafa BAYKÖK’e, çimento deneylerinin yapılmasında ilgi ve yardımlarını gördüğüm, Trabzon Çimento Sanayii A.Ş. Kalite Kontrol Mühendisi Sayın Halil SÜNGÜN’e, zemin deneylerinin yapılmasında yardımlarını gördüğüm, DSİ Trabzon Bölge Müdürlüğü, Araştırma Laboratuvarı Müdürü Sayın Cahit ATALAY’a ve tekniker Sayın Seymen SÖNMEZ’e, prizma örneklerine Taramalı Elektron Mikroskobunda fotoğraf çekiminde yardımlarını esirgemeyen Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN’a ve laboratuvar sorumlusu Sayın Mustafa KIRARSLAN’a, zemin örneklerinin tanımlanması için yapılan deney ve analizlerde yardımlarını gördüğüm Sayın Arş. Gör. Murat YILMAZ, Sayın Orman Yüksek Mühendisi Ayhan USTA, Sayın Orman Mühendisi Selvinaz YILMAZ’a, Sayın Arş. Gör. Osman GÖRÜR ve Sayın Arş. Gör. Gökhan APAYDIN’a teşekkür ederim.

Orman yollarında stabilizasyon için alternatif bir çözümün geliştirildiği bu tezden elde edilen sonuçların ülkemiz için yararlı olması dilerim.

Habip EROĞLU  
Eylül, 2003

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER .....	III
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi .....	4
1.3. Beklenen Sonuçlar ve Yararları .....	5
1.4. Literatür Özeti .....	7
1.5. Orman Yolları .....	12
1.5.1. Orman Yollarının Yapım Yönünden Sınıflandırılması .....	12
1.5.1.1. Toprak Yollar .....	12
1.5.1.2. Stabilize Yollar .....	13
1.5.1.3. Asfalt Kaplamalı Yollar .....	14
1.5.1.4. Beton Yollar .....	14
1.5.2. Orman Yollarının Planlanması ve Projelendirilmesi .....	15
1.5.3. Orman Yollarının İnşaatı .....	18
1.5.4. Orman Yolları İnşaatı Açısından Zeminin İncelenmesi .....	21
1.5.4.1. Zeminin Mekanik Yönden İncelenmesi .....	22
1.5.4.2. Zeminin Morfolojik Olarak İncelenmesi .....	25
1.5.5. Orman Yollarının Üst Yapı Bakımından Ülkemizdeki ve Dünyadaki Durumu .....	26
1.6. Stabilizasyon ve İyileştirme .....	27
1.7. Stabilizasyon Yöntemleri .....	28
1.7.1. Derin Kompaksiyon .....	28
1.7.2. Önceden Yükleme İle İyileştirme .....	28
1.7.3. Enjeksiyon Teknikleri .....	29

1.7.4.	Işıl İşlemler .....	30
1.7.5	Ortamın Donatılması .....	31
1.7.6.	Katkı Maddeleri İle Stabilizasyon .....	32
1.7.6.1.	Kireçle Stabilizasyon .....	32
1.7.6.2.	Çimento İle Stabilizasyon .....	34
1.7.6.3.	Bitümlü Stabilizasyon .....	34
1.7.6.4.	Diğer Katkı Maddeleri İle Stabilizasyon .....	35
1.8.	Türkiye'deki Seka İşletmeleri .....	37
1.8.1.	Seka Afyon Çay İşletme Müdürlüğü ve Atık Özellikleri .....	38
1.8.2.	Odun Hamuru Üretim Yöntemleri .....	40
1.9.	Çimento .....	41
1.9.1.	Portland Çimentosunun Dünya ve Türkiye'de Tarihi Gelişimi	42
1.9.2.	Endüstride Çimento Üretimi .....	43
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	47
2.1.	Materyal .....	47
2.1.1.	Seka Afyon-Çay Atık Kireç Çamuru .....	47
2.1.1.1.	Seka Afyon İşletme Müdürlüğü Çalışma Sisteminin Akış Şeması.....	48
2.1.1.2.	Atık Kireç Çamuru .....	51
2.1.2.	Katkılı Çimento (KÇ) .....	52
2.1.3.	Stabilizasyon Çalışmalarında Kullanılan Zeminler .....	53
2.1.4.	Çalışmalarda Kullanılan Araç-Gereçler .....	53
2.1.4.1.	Çimento Deneğinde Kullanılan Araç-Gereçler .....	53
2.1.4.1.1.	Rilen- Cembureau Harç Karıştırıcısı ve Harç Kalıpları .....	54
2.1.4.1.2.	Basınç Dayanım Aleti .....	55
2.1.4.1.3.	Vicat Aleti .....	56
2.1.4.1.4.	Le Chatellier Aleti .....	56
2.1.4.1.5.	Elek Sarsma Aleti .....	57
2.1.4.1.6.	Le Chatellier Balonu .... ..	57
2.1.4.1.7.	Blain Aleti .....	58
2.1.4.1.8.	Taramalı Elektron Mikroskop .....	59
2.1.4.2.	Zemin Stabilizasyonunda Kullanılan Araç-Gereçler .....	60



2.1.4.2.1.	Enerji Dispersiv X-ışını Floresans Spektroskopisi (EDXRF) .....	61
2.1.4.2.2.	X-ışınları Toz Difraktometresi (XRD) .....	61
2.1.4.2.3.	Elek Sarsma Aleti ve Elekler .....	62
2.1.4.2.4.	Casagrande Likit Limit Aleti .....	63
2.1.4.2.5.	Üç Eksenli Basınç Deney Aleti .....	63
2.1.4.2.6.	Konsolidasyon Deney Aleti (Ödometre) .....	64
2.1.4.2.7.	Standart Kompaksiyon Aleti .....	65
2.1.4.2.8.	Diğer Araç-Gereçler .....	66
2.2.	Yöntem .....	69
2.2.1.	Çalışmada Kullanılacak Malzemelerin Seçimi ve Alınması .....	70
2.2.2.	Çimento Deneyleri .....	70
2.2.2.1.	Basınç Dayanım Testi (Rilem- Cembureau Metodu) .....	71
2.2.2.2.	Priz Başlama ve Sona Erme Sürelerinin Tayini .....	74
2.2.2.3.	Hacim Genleşmesi Tayini .....	75
2.2.2.4.	Tane Büyüklüğü Tayini.....	76
2.2.2.5.	Yoğunluk Tayini .....	76
2.2.2.6.	Özgül Yüzey Tayini .....	77
2.2.2.7.	Taramalı Elektron Mikroskopla Fotoğrafların Çekimi .....	79
2.2.3.	Zemin Stabilizasyon Deneyleri .....	82
2.2.3.1.	Zeminlerin Tanımlanması .....	82
2.2.3.1.1.	Kimyasal Analizler .....	82
2.2.3.1.2.	Elek Analizi .....	84
2.2.3.1.3.	Mekanik Analiz (Tekstür Tayini) .....	85
2.2.3.1.4.	Organik Madde Tayini .....	85
2.2.3.1.5.	pH Tayini .....	85
2.2.3.1.6.	Elektriksel İletkenlik Tayini .....	86
2.2.3.1.7.	X-ışını Difraktometrisi (XRD) .....	86
2.2.3.1.8.	Enerji Dispersiv X-ışını Floresans Spektroskopisi (EDXRF) .....	87
2.2.3.2.	Atterberg Limitleri .....	88
2.2.3.3.	Üç Eksenli Basınç Dayanımı .....	88
2.2.3.4.	Konsolidasyon Deneyi .....	90
2.2.3.5.	Standart Kompaksiyon (Proctor) Deneyi .....	93
2.2.3.6.	Su Muhtevası ve Kıvam Limitlerinin Ölçümü .....	94
2.2.4.	Sonuçların Değerlendirme Yöntemi .....	95

3.	BULGULAR ve TARTIŞMA .....	96
3.1.	Çimento Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	96
3.1.1.	Kireç Çamuru ve Katkılı Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu .....	96
3.1.2.	Basınç Mukavemeti Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	99
3.1.3.	Diğer Çimento Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	105
3.1.4.	Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Kullanılarak Elde Edilen Bulgular ve Tartışılması .....	109
3.2.	Zemin Stabilizasyonuna Ait Bulgular ve Tartışma .....	117
3.2.1	Kullanılan Zeminlerin Tanımlanmasına Ait Bulgular ve Tartışma .....	117
3.2.2.	Elek ve Hidrolik Analizlerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	122
3.2.3.	Atterberg Limitlerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	123
3.2.4.	Özgül Ağırlık Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	128
3.2.5.	Üç Eksenli Basınç Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	130
3.2.6.	Kompaksiyon Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	144
3.2.7.	Konsolidasyon Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	149
3.3.	Bulgularının Orman Yolları Açısından Değerlendirilmesi .....	158
4.	SONUÇLAR .....	160
5.	ÖNERİLER .....	164
6.	KAYNAKLAR .....	166
	ÖZGEÇMİŞ.....	173

## ÖZET

Orman yolları, üzerinde taşınan ağır yükler, iklim koşulları ve doğal koşullar nedeniyle bozulmalara uğramaktadır. Taşımanın kesintisiz olarak yapılabilmesi ve orman yollarının ömürlerinin uzatılabilmesi açısından, orman yollarının taban zeminlerinin iyileştirilmesi ve üst yapıya kavuşturulması önemlidir.

Bu çalışmada, orman yollarının üst yapı elemanlarından olan kaplama tabakası ile taban zeminlerin iyileştirilmesinde, alternatif stabilizasyon tekniği araştırılmıştır. Bu amaçla Afyon-Çay Seka İşletmesi atığı olan kireç çamuru kaplama tabakasında kullanılmak üzere katkılı çimentoyla karışıma sokularak, başta basınç dayanım testi olmak üzere priz başlama ve sona erme, hacim genişlemesi, tane büyüklüğü, yoğunluk ve özgül ağırlık deneyleri ile taramalı elektron mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Bunun yanında kireç çamuru 3 değişik zemin türüyle karıştırılarak taban zeminlerin stabilizasyonuna yönelik üç eksenli basınç dayanımı, atterberg limitleri, konsolidasyon, kompaksiyon, su muhtevası ve kıvam limitleri deneylerine tabi tutularak değişimler incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonunda kireç çamurunun, katkılı çimentoyla % 5 ile 10 arası oranlarda katılarak oluşturulan numuneler iyi basınç dayanımı göstermiş, böylece kireç çamurunun bu oranlarda çimentoya katılabileceği ortaya çıkmıştır.

Yine % 5-10 kireç çamuru katkısının; çalışmada kullanılan kumlu kil, killi balçık ve ağır kil zeminleri üzerinde belirli oranlarda dayanımını ve Atterberg limitlerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Kireç çamurunun % 5-10 arasındaki oranlarda çalışmada kullanılan zeminlerle karıştırılarak taban zeminlerin iyileştirilebileceği tespit edilmiştir.

Yapılan bu araştırmayla, doğaya terk edilen ve kağıt endüstrisi atığı olan kireç çamurunun stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilceği, orman yollarının üst yapısında kaplama tabakasına ve taban zeminlerin stabilizasyonu için kullanımının uygun olabileceği ortaya konulmuştur. Böylece doğaya zararlı etkisi olan kireç çamuru atığı değerlendirilmiş ve orman yolları için ucuz bir alternatif stabilizasyon malzemesi sağlanmış olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Orman Yolları, Kireç Çamuru, Çimento, Zemin Stabilizasyonu, Basınç Dayanımı Testi, Üç Eksenli Basınç Deneyi

## SUMMARY

### **An Investigation Recycling on Pulp-Paper Industry Solid Waste (Lime Mud) Materials For Stabilization Purpose On The Forest Roads**

Forest roads are exposed deformation because of heavy load transported on its survey, weather conditions and other natural effects. Suitable superstructure and sub-grade are very important to obtain continuous transport and expand forest roads life.

In this study, an alternative stabilization technique for pavement and sub-grade of forest road is investigated. For this purpose, lime mud, supplied from Afyon-Çay Pulping Mill producing bleached kraft pulp, is mixed with composite cement for pavement layer. Unconfined compressive strength, setting time, Le Chateller soundness, blain fineness, density and specific weight of mixtures are measured. The photo of concrete samples was taken with Scanning Electron Mikroskop (SEM). Furthermore, lime mud is mixed with sandy clay, loamy clay and clay soils for forest road sub-grade. Changes of physical properties of soils were determined by triaxial compression, Atterberg limits, consolidation, compaction, water content and consistency limit tests.

The result of studies showed that, the most suitable samples in terms of high compressive strength was obtained by addition of 5-10 % lime mud to the mixture. Thus, 5-10 % lime mud should be added to the mixture for optimum strength.

Adding the 5-10 % lime mud to mixture positively affect compressive strength, compaction and Atterberg limits of sandy clay, loamy clay and clay soils. It can be concluded that lime mud can be used for base and sub-base layers of forest roads for these types soil.

This study reveals that, lime mud, a waste material of paper mills, can be used as stabilization materials forest road sub-grade and pavement. Hence, hazardous lime mud of paper mills is recycled without giving any damage to environment and an alternative low cost stabilization material is also produced.

**Key Words:** Forest Roads, Lime Mud, Cement, Soil Stabilization, Unconfined Compressive Strength Test, Triaxil Soil Strength

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Orman yolu yapı elemanları .....	19
Şekil 2.	Orman yollarında üst yapının boyutlandırılması ve seçimini etkileyen faktörler .....	20
Şekil 3.	Yol proje ve inşaatı ile zemin ilişkisi.....	22
Şekil 4.	Üç fazlı sistem olarak zemin .....	22
Şekil 5.	Afyon-Çay Seka İşletmesi .....	38
Şekil 6.	Seka Afyon-Çay beyaz selüloz fabrikasının işletme akış şeması.....	49
Şekil 7.	Fabrikanın kostikleştirme ünitesinden atılan kireç çamuru .....	52
Şekil 8.	Rilen-Cembureau harç karıştırıcısı .....	54
Şekil 9.	Rilem-Cembureau harç kalıpları.....	54
Şekil 10.	Basınç dayanım aleti.....	55
Şekil 11.	Vicat aleti.....	56
Şekil 12.	Le Chatellier hacim sabitliği tayin aleti.....	56
Şekil 13.	Elek sarsma aleti .....	57
Şekil 14.	Le Chatellier balonu .....	58
Şekil 15.	Blaine aleti .....	59
Şekil 16.	JSM 6400 taramalı elektron mikroskop .....	60
Şekil 17.	X-ışını floresans sistemi .....	61
Şekil 18.	X-ışını difraktometre sistemi .....	62
Şekil 19.	Elekler ve elek sarsma aleti .....	62
Şekil 20.	Casagrande likit limit aleti.....	63
Şekil 21.	Üç eksenli basınç deney aleti .....	64
Şekil 22.	Konsolidasyon deney aleti (ödometre) .....	65
Şekil 23.	Standart kompaksiyon deney aletleri .....	66
Şekil 24.	Mekanik analizde kullanılan araç-gereç .....	66
Şekil 25.	Walkley-Black yaş yakma düzeneği.....	67
Şekil 26.	pH metre .....	67
Şekil 27.	Elektriksel iletkenlik ölçme aleti .....	68
Şekil 28.	Fosfor miktarını ölçme aleti .....	68
Şekil 29.	Atomik absorpsiyon aleti .....	68

Şekil 30.	Çalışma aşamalarını gösteren akış şeması .....	69
Şekil 31.	Kalıptan çıkarılmış prizmalar .....	73
Şekil 32.	Taramalı elektron mikroskopun şematik yapısı.....	80
Şekil 33.	Elektron demeti ve numune etkileşimi.....	81
Şekil 34.	ACME laboratuvarı çalışma esasları akış şeması.....	83
Şekil 35.	CaO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> diyagramında kireç çamurunun yeri.....	98
Şekil 36.	Kireç çamuru için K-X ışını spektrumu .....	99
Şekil 37.	Kireç çamuru-katkılı çimento örneklerinin katkı oranına göre basınç dayanımları .....	102
Şekil 38.	Zaman - Basınç dayanımı grafiği.....	103
Şekil 39.	Zamana bağlı basınç dayanımı oranı (puzolanik aktivite) .....	104
Şekil 40.	Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkılı örneklerdeki özgül yüzey grafiği.....	106
Şekil 41.	Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkılı örneklerdeki priz başlama süresi eğrisi .....	106
Şekil 42.	Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkılı örneklerdeki özgül ağırlık grafiği .....	107
Şekil 43.	Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkılı örneklerdeki hacim genleşmesi grafiği .....	108
Şekil 44.	Kireç çamuru katkılı KÇ 32.5 örneklerinin normal kıvam suyu grafiği	109
Şekil 45.	Kireç çamuru katkısız ve 28 günlük örneğe ait görüntü.....	115
Şekil 46.	% 5 Kireç çamuru katkılı ve 28 günlük örneğe ait görüntü.....	116
Şekil 47.	% 10 Kireç çamuru katkılı ve 28 günlük örneğe ait görüntü .....	116
Şekil 48.	% 15 Kireç çamuru katkılı ve 28 günlük örneğe ait görüntü .....	117
Şekil 49.	% 25 Kireç çamuru katkılı ve 28 günlük örneğe ait görüntü .....	117
Şekil 50.	Kireç çamuru katkısız ve 60 günlük örneğe ait görüntü .....	118
Şekil 51.	% 5 Kireç çamuru katkılı ve 60 günlük örneğe ait görüntü .....	118
Şekil 52.	% 10 Kireç çamuru katkılı ve 60 günlük örneğe ait görüntü .....	119
Şekil 53.	% 15 Kireç çamuru katkılı ve 60 günlük örneğe ait görüntü .....	119
Şekil 54.	% 20 Kireç çamuru katkılı ve 60 günlük örneğe ait görüntü .....	120
Şekil 55.	Kireç çamuru katkısız ve 90 günlük örneğe ait görüntü .....	120
Şekil 56.	% 5 Kireç çamuru katkılı ve 90 günlük örneğe ait görüntü .....	121
Şekil 57.	% 10 Kireç çamuru katkılı ve 90 günlük örneğe ait görüntü .....	121
Şekil 58.	% 20 Kireç çamuru katkılı ve 90 günlük örneğe ait görüntü .....	122
Şekil 59.	% 25 Kireç çamuru katkılı ve 90 günlük örneğe ait görüntü .....	122



Şekil 60.	Zeminlerin Kum-Kil-Toz diyagramındaki yerleri .....	124
Şekil 61.	Z1 zeminine ait K-X ışını spektrumu .....	125
Şekil 62.	Z2 zeminine ait K-Xışını spektrumu .....	125
Şekil 63.	Z3 zeminine ait K-Xışını spektrumu .....	126
Şekil 64.	Z1 zeminine ait X-ışını difraktogramı .....	127
Şekil 65.	Z2 zeminine ait X-ışını difraktogramı .....	127
Şekil 66.	Z3 zeminine ait X-ışını difraktogramı .....	128
Şekil 77.	Çalışmada kullanılan zeminlerin granülometri eğrileri .....	130
Şekil 68.	Z1 zemin türünde katkı miktarına göre atterberg limitlerinin değişimi ..	132
Şekil 69.	Z2 zemin türünde katkı miktarına göre atterberg limitlerinin değişimi ..	133
Şekil 70.	Z3 zemin türünde katkı miktarına göre atterberg limitlerinin değişimi ..	134
Şekil 71.	Z1 zemin türüne ait özgül ağırlık katkı miktarı ilişkisi .....	136
Şekil 72.	Z2 zemin türüne ait özgül ağırlık katkı miktarı ilişkisi .....	136
Şekil 73.	Z3 zemin türüne ait özgül ağırlık katkı miktarı ilişkisi .....	137
Şekil 74.	Z1 zemin türünün katkısız numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	139
Şekil 75.	Z1 zemin türünün % 5 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	139
Şekil 76.	Z1 zemin türünün % 10 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	140
Şekil 77.	Z1 zemin türünün % 15 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	140
Şekil 78.	Z2 zemin türünün katkısız numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	141
Şekil 79.	Z2 zemin türünün % 5 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda Elde edilen Mohr daireleri .....	141
Şekil 80.	Z2 zemin türünün % 10 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	142
Şekil 81.	Z2 zemin türünün % 15 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	142
Şekil 82.	Z3 zemin türünün katkısız numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	143
Şekil 83.	Z3 zemin türünün % 5 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	143
Şekil 84.	Z3 zemin türünün % 10 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	144



Şekil 85.	Z3 zemin türünün % 15 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri .....	144
Şekil 86	Zeminlerin katkı miktarına göre zemin kohezyonu değişimi .....	145
Şekil 87.	Zeminlerin katkı miktarına göre kayma direnci açısı değişimi .....	145
Şekil 88.	Z1 zemin türünde katkı miktarına bağlı olarak kayma direnci ve kohezyon ilişkisi .....	146
Şekil 89.	Z2 zemin türünde katkı miktarına bağlı olarak kayma direnci ve kohezyon ilişkisi .....	146
Şekil 90.	Z3 zemin türünde katkı miktarına bağlı olarak kayma direnci ve kohezyon ilişkisi .....	147
Şekil 91.	Z1 zeminin gözlenen gerilme ile eksenel şekil değiştirme davranışı .....	148
Şekil 92.	Z2 zeminin gözlenen gerilme ile eksenel şekil değiştirme davranışı .....	149
Şekil 93.	Z3 zeminin gözlenen gerilme ile eksenel şekil değiştirme davranışı .....	150
Şekil 94.	Z1 zemin türüne ait katkı miktarı kuru birim hacim ağırlık ilişkisi .....	152
Şekil 95.	Z2 zemin türüne ait katkı miktarı kuru birim hacim ağırlık ilişkisi .....	152
Şekil 96.	Z3 zemin türüne ait katkı miktarı kuru birim hacim ağırlık ilişkisi .....	153
Şekil 97.	Z1 zemin türüne ait katkı miktarı optimum su muhtevası ilişkisi .....	154
Şekil 98.	Z2 zemin türüne ait katkı miktarı optimum su muhtevası ilişkisi.....	154
Şekil 99.	Z3 zemin türüne ait katkı miktarı optimum su muhtevası ilişkisi.....	155
Şekil 100.	Maksimum kuru birim hacim ağırlık-optimum su içeriği ilişkisi .....	156
Şekil 101.	Z1 zemininin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma özelliğindeki değişim .....	159
Şekil 102.	Z2 zemininin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma özelliğindeki değişim .....	160
Şekil 103.	Z3 zemininin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma özelliğindeki değişim .....	161
Şekil 104.	Z1 zemininin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarının değişimi .....	162
Şekil 105.	Z2 zemininin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarının değişimi .....	163
Şekil 106.	Z3 zemininin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarının değişimi .....	164

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. Orman yolu geçkilerini etkileyen faktörler ve puanlandırma sistemi.....	17
Tablo 2. Ülkemizdeki Seka İşletmeleri, üretim türleri ve kapasiteleri .....	37
Tablo 3. Portland çimentosunun ana bileşenleri .....	43
Tablo 4. Türkiye Çimento Standartları .....	44
Tablo 5. Döner fırınlarda meydana gelen reaksiyonlar .....	46
Tablo 6. Katkılı çimentonun kimyasal özellikleri .....	52
Tablo 7. Zeminlerin içerdiği kum-kil-toz oranları .....	53
Tablo 8. Kireç Çamuru ve Katkılı Çimentoya Ait Kimyasal Analiz Sonuçları .....	100
Tablo 9. Katkılı Çimento (KÇ), Kireç Çamuru (KÇa) ve karışımların kimyasal analiz sonuçları .....	101
Tablo 10. Kullanılan katkılı çimento ve standart portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri .....	103
Tablo 11. Tras standartları .....	104
Tablo 12. TS 819 Rilem Cembureau Standart Kumü Özellikleri .....	104
Tablo 13. Kireç Çamurunun (KÇa) Katkılı Çimentoyla (KÇ) Karıştırılmasıyla Elde Edilen Basınç Dayanımları .....	105
Tablo 14. Kireç çamurunun (KÇa) Katkılı Çimentoyla (KÇ) karıştırılmasıyla elde edilen deney sonuçları .....	109
Tablo 15. Zeminlerin kimyasal içerikleri ve bazı fiziksel özellikleri .....	123
Tablo 16. Deneylerde kullanılan zeminlerin granülometrisi .....	129
Tablo 17. Zemin ve Zemin + Kireç Çamuru karışımların atterberg limitleri .....	131
Tablo 18. Zemin ve Zemin + Kireç Çamuru karışımların özgül ağırlıkları .....	135
Tablo 19. Üç eksenli kesme deney sonuçları .....	138
Tablo 20. Zemin ve Zemin + Kireç Çamuru karışımların kompaksiyon değerleri .....	151
Tablo 21. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen konsolidasyon katsayıları .....	157
Tablo 22. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen hacimsel sıkışma katsayıları ....	158

## SEMBOLLER DİZİNİ

c	: Kayma gerilmesi
C	: Kohezyon
Cv	: Konsolidasyon katsayısı
EDXRF	: Enerji dispersiv X-ışını floresans spektroskopisi
KÇ 32.5	: Katkılı çimento
KÇa	: Kireç çamuru
Mv	: Hacimsel sıkışma katsayısı
N/mm <sup>2</sup>	: Newton/milimetrekare
SEM	: Taramalı elektron mikroskop
TS	: Türk standartları
Wopt.	: Optimum su içeriği
XRD	: X-ışınları difraktometrisi
Z1	: Artvin yöresinden temin edilen kumlu balçık zemin
Z1K0	: Kireç çamuru katkısız kumlu balçık zemin
Z1K05	: % 5 kireç çamuru katkılı kumlu balçık zemin
Z1K10	: % 10 kireç çamuru katkılı kumlu balçık zemin
Z1K15	: % 15 kireç çamuru katkılı kumlu balçık zemin
Z2	: Borçka yöresinden temin edilen balçıklı kil zemin
Z2K0	: Kireç çamuru katkısız balçıklı kil zemin
Z2K05	: % 5 kireç çamuru katkılı balçıklı kil zemin
Z2K10	: % 10 kireç çamuru katkılı balçıklı kil zemin
Z2K15	: % 15 kireç çamuru katkılı balçıklı kil zemin
Z3	: Artvin yöresinden temin edilen ağır kil zemin
Z3K0	: Kireç çamuru katkısız ağır kil zemin
Z3K05	: % 5 kireç çamuru katkılı ağır kil zemin
Z3K10	: % 10 kireç çamuru katkılı ağır kil zemin
Z3K15	: % 15 kireç çamuru katkılı ağır kil zemin
$\gamma_k$	: Kuru birim hacim ağırlık
$\Phi$	: İçsel sürtünme açısı (kayma direnci açısı)
$\mu\text{m}$	: mikro metre
$\sigma$	: Basınç gerilmesi
$\tau$	: Kayma gerilmesi

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Ormanlardan optimal şekilde faydalanmayı sağlamak amacıyla, önceden belirlenecek hedefler doğrultusunda hazırlanan planlara paralel olarak ormanların işletmeye açılması gerekmektedir. İşletmeye açma çalışmalarının temeli orman yollarıdır. Belirlenen hedefler ve ormanların fonksiyonlarına uygun olarak planlanan orman yollarının tekniğine uygun olarak tesis edilmesi, hedeflere ulaşma ve ekonomik kayıpları önleme açısından oldukça önemlidir.

Ormanların işletmeye açılması, entansif ve amaca uygun bir rasyonel ormancılık uygulamasını olanaklı hale getirmektedir. Bu amaçla ihtiyaç duyulan en önemli araçlardan birisini orman yolları teşkil etmektedir. Ülkemizde ormancılık çalışmaları ülkenin değişik yerlerinde ve dağınık durumdaki ortalama 20 milyon ha orman alanı üzerinde yürütülmektedir. Bu kadar geniş ve dağınık, hatta çoğunlukla dağlık arazi üzerinde işletmecilik yapmak iyi bir yol ağına sahip olmak ile mümkündür. Orman yolları her yıl yaklaşık 17 milyon m<sup>3</sup> asli orman ürününün taşınmasında kolaylık sağlaması ile birlikte orman koruma, kadastro, bakım, erozyon ve ağaçlandırma çalışmaları gibi diğer ormancılık hizmetlerinin yürütülmesinde de önemli rol oynamaktadır. Ayrıca orman köylerinin yol gereksinimlerinin ve halkın dinlenme isteklerinin karşılanmasına imkan sağlamaktadır. Bu suretle söz konusu orman yolları ekonomik, sosyal hatta kültürel faydalar meydana getirmektedir (Erdaş vd., 1995).

Ülkemizde sistematik orman yol şebeke planlama çalışmalarına OGM'ce 1964 yılında başlanmış ve 1974 yılında tamamlanmıştır. Bu çalışmalarda sadece verimli orman alanları dikkate alınarak toplam orman yolu uzunluğu 144 425 km olarak planlanmıştır. Ancak, ormancılık teknoloji ve tekniklerinin gelişmesi, rasyonel ormancılığın istekleri ve plan uygulamaları ile elde edilen sonuçlar bu planların revize edilmesini gündeme getirmiştir. Bu yeni düzenleme ile toplam orman yolu uzunluğu 201 810 km olarak planlanmış ve 2000 yılı itibariyle 132 515 km'si yani % 65.66'sı inşa edilmiştir. Yapımı gerçekleştirilen orman yollarının 54 724 km'sinde üstyapı inşaatı planlanmış olup, ancak bununun 23 277 km'lik kısmı tamamlanabilmiştir. Bu durum, ülke genelinde planlanan orman

yollarının yaklaşık % 11.5'inde üstyapının tamamlanmış olduğunu göstermektedir (Aykut vd., 1998 ve DPT, 2001).

Orman Genel Müdürlüğü; ülke genelinde yapılan beş yıllık kalkınma planları çerçevesinde her yıl orman yollarının yapımı, onarımı ve üstyapı inşaatı gibi kalemlere ödenek ayırmakta ve bu ödenekler belli oranlarda kullanılmaktadır. VII. Beş Yıllık Kalkınma Planı dönemi içerisinde orman yollarının büyük onarımı için 2.4 trilyon TL ve orman yollarında üstyapı inşaatı için 3 trilyon TL. harcanmıştır (DPT, 2001).

Özellikle dağlık bölgelerde yapımı pahalı olan orman yolları planlara göre inşa edilmektedir. Orman yolları tekniğine uygun inşa edilmediği takdirde çevresel etkilerle ve maruz kaldığı aşırı yüklenmenin de etkisiyle deformasyonlara uğramaktadır. Böylece, orman yolları tahrip olmakta ve kullanılamaz hale gelmektedir. Bu yollardan tekrar yararlanmak için bakım yapılması zorunludur. Bu da bakım masrafları olarak karşımıza çıkmakta ve oldukça önemli mali kayıplara neden olmaktadır.

Tekniğine uygun olarak yapılan orman yollarında, yolların hizmet yıllarını uzun kılabilmek açısından üstyapı öncelikle ele alınması gereken bir konudur. Üstyapının uygun olarak inşa edilebilmesi, üzerine oturtulacağı zeminin yani altyapının elverişli şartlara sahip olmasıyla birlikte sağlanabilir. Bu işlemlerin tekniğine uygun ve ekonomik olarak gerçekleştirilebilmesi için orman yollarında hem üstyapıda hem de altyapıda stabilizasyon konusunun ele alınması gerekir.

Ülkemizde orman yollarının yapıldığı yerlerde uygun olmayan zeminlerden geçilmesi durumunda, bu zeminlerin güvenli geçişi sağlayabilmesi için üzerine, günümüzde çoğunlukla deneysel çalışmalara dayanmayan klasik kum-kil karışımları, tabii ya da konkasörde kırılarak elde edilen çakıl ya da kırmataş, yine çakıllı malzemeye kil ve kalsiyum klorür ilave edilmesiyle elde edilen stabilize malzemeler serilmekte ve böylece zeminin taşıma kapasitesinin artırılması yoluna gidilmektedir (Aykut, 1978).

Taban zeminlerinin uygun olmaması halinde yol mühendisi aşağıdaki alternatiflerden birine karar vermek durumundadır.

- Uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etmek
- Uygun olmayan zemini atıp yerine uygun zemin koymak
- Uygun olmayan zemini iyileştirmek

İlk alternatif aşırı üstyapı kalınlığı gerektireceğinden ekonomik olmayabilir. Ayrıca zeminin zayıf özelliklerinin üstyapıda meydana getireceği olumsuz etkiler üstyapının kalınlığını arttırmakla giderilemeyebilir. İkinci alternatif zahmetli, zaman alıcı ve duruma

göre büyük bir maliyet gerektirebilir. Sonuncu alternatif ise stabilizasyon teknikleri ile zeminin ıslah edilmesidir. Zemin stabilizasyonu, zemini daha stabil hale getirmek için yapılan işlemlerdir. Zemine ait bazı özellikler uygun bir stabilizasyon tekniği ile giderilebilir. Stabilizasyon teknikleri ile zeminin hacimsel stabilitesi, mukavemeti, permeabilitesi (geçirgenlik), sıkışabilirliği ve dayanıklılığı gibi özellikleri iyileştirilebilir (Tunç, 2001).

Yukarıda adı geçen malzemelerin her zaman temin edilmesi mümkün olamamakta, temin edilse bile taşıma masrafları yüksek olabilmekte, aynı zamanda zaman alıcı ve zahmetli bir iş haline gelebilmektedir. Bu durumda değişik stabilizasyon teknikleri ve malzemeleri kullanılarak, zeminin yerinde ıslah edilmesi daha ekonomik olabilir.

Yol üstyapısının stabilitesi, üzerine oturduğu zeminin ve/veya dolguda kullanılan zeminin özelliklerinden oldukça etkilenir. Zira, taban zeminleri üstyapının temeli olduğundan dolayı trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere emniyetle karşı koyabilmelidir. Zeminlerin, kompaksiyon, stabilizasyon teknikleri ve drenaj teknikleri ile sıkışabilen zeminler için önyükleme, kum drenleri, patlatma, dinamik konsolidasyon ve çabuk dren yöntemleri yanında hafif malzeme ile dolgu yapımı, uygun malzeme ile yer değiştirme çalışmalarının sonucunda ıslah edilebilecekleri ifade edilmektedir (Tunç, 2001).

Altyapının taşıma gücünün istenilen değere yükseltilmesi işinde kompaksiyon genellikle yetmez ve taşıma kapasitesinin daha da yükseltilmesi gerekir. Stabilizasyon terimi ile ifade edilmek istenilen durum temel zemini, temel veya kaplamanın stabilitesinin artırılması veya muhafazası işlemi olarak bilinir (Kumbasar ve Kip, 1984).

Katkı maddeleri kullanılarak elde edilen karışımlarda önemli sayılabilecek mekanik dayanım artışı olmadığı halde, bazı mühendislik özelliklerinde olumlu gelişmeler elde edilmesine "iyileştirme" denir. Bu anlam içinde iyileştirmeyi karakterize eden değişiklikler plastisite indisinin düzenli sıkıştırma işleminde optimum su muhtevası süspansiyonlarda deflokülasyona karşı direnç ve kohezyonun artmasıdır. Bu sırada mekanik dayanım da belirgin ölçüde artmışsa sistemde elde edilen özellik değiştirmenin iyileştirmeden de öteye gittiği kabul edilir. Stabilizasyon terimiyle anlatılmak istenen de bu ikinci aşamadır (Balta, 1984).

Zeminin olumsuz etkilerini gidererek kaplamada oluşabilecek bozulmaları önlemek veya zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirerek kaplama kalınlığını azaltmak amacıyla zemine çimento, kireç, uçucu kül, tabii puzolan, vb gibi maddeler katarak yapılan zemin



ıslahına kimyasal stabilizasyon denir. Her iki amaç da zemindeki stabiliteyi yani deformasyona karşı direnci artırmaktadır (Tunç, 2001).

Orman yollarında kullanılan yol taban malzemelerinin taşıma kabiliyetlerinin arttırabilmesi ve yağışlı ya da kuru hava hallerinde dahi trafik yüklenmelerine karşı direnç gösterebilmeleri için modern stabilizasyon malzemeleri olarak RRP, WEGS, PERMA-ZYME, geotekstiller (geonet, geokompozit ve diğer geosentetikler), kül, fosforik asit, magnezyum sülfat, anilin ve diğer kimyasal malzemeler kullanılabilir. Klasik yöntemlerle yapılan stabilizasyonlarda zeminlerin bazı özellikleri iyileştirilirken, modern yöntemlerle yapılan stabilizasyonda laboratuvar şartlarının da geliştirilmesi ve zemin tiplerinin modellenmesi ile zeminde bozulmalara neden olan diğer olumsuzluklar da giderilebilmektedir. Özellikle çok fazla yağış alan nemli iklimlerde ya da yüzeysel akış sularının ve taban sularının yol yüzeyinde toplandığı orman yollarında, iklimle beraber trafik yüklenmelerinin de etkisiyle çökmeler, dolgu şevine doğru kaymalar, ondülasyon ve yol yüzeyinde erozyon meydana gelmektedir. Modern yöntemlerle, yol temel ve alttemel tabakasındaki zemin stabilizasyonu yanında kimyasal bağlayıcılarla uçucu ve suyla akıcı toz, kil ve silt gibi toprak fraksiyonları da yapıştırılarak hareketleri engellenmektedir (Acar ve Eker 2001).

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Ülkemizde, odun hacmine olan ihtiyacın artışı, bu materyalin en hızlı bir şekilde satış depolarına ya da fabrikalara taşınması gerektirir. Bu gereği yerine getirmek için yeni ve güçlü taşıma araçlarına ve bu araçlarla taşımayı sağlayabilecek nitelikte yollara ihtiyaç doğmuştur.

Ülkemizde mevcut orman yollarının çok az miktarının üstyapıya sahip olması, geri kalan çoğunluğun kaplamasız ve temelsiz toprak yol niteliği taşıması, üretilen orman ürünlerinin kesintisiz ve sağlıklı bir şekilde taşınmasını engellemektedir. Bu nedenle tüm orman alanlarında orman yollarının acilen ve inşaat tekniğine uygun bir biçimde üstyapıya kavuşturulması ve taşıma kapasitesinin artırılması gerekmektedir.

Orman yollarının üstyapıya kavuşturulması konusunda yapılan çalışmalar tekniğine uygun olmayıp bilimsel temellere dayalı yapılmamaktadır. Üstyapının orijinal şeklini muhafaza edebilmesi onun hemen altında bulunan ve ona temel teşkil eden altyapının stabilitesine bağlı bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı da yol inşaatında altyapıyı teşkil eden



taban topraklarının etraflı bir şekilde etüdü ve bunların özellikle taşıma kabiliyetlerine göre üstyapı kalınlıklarının belirlenmesi gerekmektedir (Bayoğlu, 1968a).

Orman yollarında üstyapının daima sağlam taban toprağı üzerine getirilmesi gerekliliğı, sağlam ve elverişli bir taban toprağının seçimini orman yollarının inşaatı açısından en önemli bir konu olması sonucunu doğurmaktadır (Aykut 1978 ).

Orman yollarının inşaatı açısından uygun olan taban zeminlerinin bulunması çoğı zaman mümkün olmamakta, uygun zemin bulunsa bile, yol planlama ve projelendirme açısından problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu aşamada; yolların uygun zeminler üzerinde inşaatı yerine mevcut zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi veya stabilize edilmesi alternatifi düşünölmelidir. Bu amaca yönelik olarak günümüze kadar zeminlerin stabilizasyonuna ilişkin yabancı ve yerli bir çok bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu araştırmalarda çok değişik katkı malzemeleri kullanılmış, bunlardan kireç ve çimento gibi bazı malzemelerden olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada; orman yollarında hem üstyapı kaplama tabakasında hem de yol taban zeminlerinde stabilizasyon sağlayacak alternatif malzeme ortaya koyabilmek amaçlanmıştır. Bu malzemenin türüne karar verilirken, ekonomik olarak elde edilebilecek ve başka amaçlar için değerlendirilmeyip doğaya terk edilen hatta doğaya zararlı etkileri olabilen bir endüstriyel atık seçilmesine özen gösterilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, orman yollarının üstyapı elemanlarından kaplama tabakasında kullanılabilecek ve yolların geçtiğı bazı taban zeminlerin olumsuz özelliklerini iyileştiren ucuz ve bağlayıcı özelliğı iyi bir malzemenin bulunmasını sağlamıştır. Bu yönüyle yapılan çalışma orman yolları için önemli sonuçlar ortaya koymuş ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, üstyapı ve altyapı konularında yapılacak çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

### **1.3. Beklenen Sonuçlar ve Yararları**

Özellikle dağık orman alanlarında yapımı yüksek maliyet gerektiren orman yollarının uzun yıllar boyunca hizmet verebilmesi ve ülke mali kaynaklarının boşa harcanmaması bakımından tekniğı uygun, çevreye karşı duyarlı ve amaca uygun olarak inşa edilmesi zorunluluğı vardır.

Orman yollarının uzun ömürlü olması, ulaşımın konforlu ve emniyetli olarak gerçekleşmesi ve yollara yapılacak bakım masraflarının azaltılması açısından orman yollarının iyi bir yapıya kavuşturulması gerekmektedir.

Orman yollarının özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda, VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı çerçevesinde hazırlanan Ormancılık Özel İhtisas Raporunda ulaşılmak istenen amaçlar olarak aşağıdaki iki husus ele alınmıştır.

1- "Ormanların işlevsel sınıflandırılması ve bu doğrultuda yapılacak fonksiyonel planlamanın zaman alacağı göz önüne alındığında VIII. Beş Yıllık Plan Döneminde yeni yol yapım miktarının düşük tutulma zorunluluğu bulunmaktadır. Bu dönem içinde mevcut yolların iyileştirilmesi çalışmalarına ağırlık verilecektir"

2- "Sanat yapıları ve üstyapı çalışmaları hızlandırılacaktır. Sanat yapılarında, hendek sularının tahliyesi için, uzun aralıklarla büyük kesitli sanat yapıları yerine, kısa aralıklarla küçük sanat yapılarına öncelik verilecek, deşarj edilen suyun mansap tarafındaki tahribatı asgari seviyeye indirilecektir. Üstyapı çalışmalarında; en az 25 cm. üstyapı kalınlığı sağlanacak, sıkıştırma serbest trafiğe bırakılmayacak, sulama ve silindir ile sıkıştırma sağlanacaktır" (DPT, 2001).

Yapılan çalışmada, elde edilecek sonuçların bu problemleri çözmede önemli derecede faydalar sağlayacağı düşüncesiyle, orman yollarının stabilizasyonuna yönelik alternatif bir çözüm üzerinde durulmuştur.

Orman yollarının uzun ömürlü olabilmesi, araç ve sürücüler açısından güvenli geçişe uygun hale gelebilmesi ve sık sık bakım onarım yapılmasının önüne geçilebilmesi açısından araştırmadan elde edilecek sonuçlar uygulayıcılar için bir alternatif olacaktır.

Bu çalışmada, Türkiye ormancılığının hedefleri içerisinde önemle belirtilen orman yollarının iyileştirilmesi konusuna yönelik çözümler araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında zemin özelliklerine bağlı olarak orman yollarının yerinde stabilizasyonu yapılabilecek, böylece taşıma kapasitesi yüksek, aşırı yüklere karşı dayanıklı ve kolay deforme olmayan yolların inşası için önerilerde bulunulacaktır.

Böylelikle bu çalışma ile amaca uygun, çevreye karşı duyarlı, taşıma kapasitesi trafik yükünü karşılayabilen ve uzun ömürlü orman yollarının yapılması ya da mevcut yolların ömrünün uzatılması çalışmalarına katkılarda bulunulacaktır. Dolayısıyla maliyet bakımından önemli derecede yüksek olan bakım masrafları düşürülebilecek ve orman yollarının yüksek büyük onarım giderleri ortadan kaldırılabilir. Kısaca çalışma sonunda elde edilecek verilerden yararlanarak inşa edilen yollarla veya mevcut yolların

yeniden düzenlenmesi ile ülke ekonomisine katkılarda bulunmuş olunacaktır. Çalışma sonuçları Orman Genel Müdürlüğüne direkt olarak yararlı olacaktır.

#### 1.4. Literatür Özeti

Orman yolları için ülkemizde stabilizasyona yönelik az sayıda çalışma bulunmasına rağmen orman yollarında stabilizasyon konusu son zamanlarda ortaya çıkan bir kavram değildir. Günümüze kadar bu konuda ülkemizde ve yabancı ülkelerde yapılmış çalışmalar burada özetlenecektir. Bu bölümde yer alan literatür; tez kapsamına yönelik olarak, orman yollarında yapılan stabilizasyon çalışmaları, üstyapıda kaplama tabakasına yönelik değişik katkılar kullanılarak yapılan çimento stabilizasyon çalışmaları ve taban zeminlerde değişik katkılar kullanılarak yapılan stabilizasyon çalışmaları olarak ele alınmıştır.

Martin vd. (1998) yaptıkları çalışmada; 72 adet değişik orman yolunu yüzey performansına göre 40 ve 60 tonluk yüklere göre sınıflandırmışlardır. Non-parametrik istatistik yöntemler kullanarak yüzey pürüzlülüğünün drenaj şartlarına ve maruz kaldıkları yüke bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Sonuçta; orman yollarında meydana gelecek bozulmaları önlemede, yol güzergahlarının geçtiği temel zeminlerin yol yüzeylerinde oluşturulacak üstyapının çok önemli olduğunu söylemişlerdir.

Bayoğlu (1968) yaptığı çalışmada, orman yol inşaatlarında zemin etütleri konusunda yapılan çalışmalar hakkında bilgiler vermiştir. Yol inşaatlarında toprak etütlerinin, doğal toprak birikintilerinin veya kazıdan elde edilen toprağın dolgu temeli olarak kullanılabilir nitelik taşıdığı tespitini ve toprağın üstyapı malzemesi olarak kullanılabilmesinin belirlenmesi amacıyla yapıldığını söylemiştir.

Erickson (1975) yaptığı çalışmada, orman yollarında üstyapı için malzeme seçimi ve uygulanacak teknoloji seçimi ile ilgili esasları incelemiştir. Orman yollarında üstyapının planlanmasının iyi bir mühendislik verileri gerektirdiğini; en ekonomik malzeme seçiminin sağlanabilmesi için analizlerin özenle yapılması gerektiğini; orman yol inşaatı için en önemli konuların, zemin denemeleri yapılarak maliyeti düşürecek yeni inşaat tekniklerinin ortaya konulması olduğunu belirtmiştir.

Bowman vd. (1975), orman yollarının yapımında uygulanan bir metodu anlattıkları çalışmalarında, artan üretim ve çevre taleplerini karşılamak için etkili bir orman yol ağı planına ve uygun yol üstyapısına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Yeni yol standartlarının,

daha önceden yapılmış mevcut yollara ve bütün ihtiyaçları karşılayacak şekilde geliştirilmiş yol yüzeylerinin planlanmasına bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

McFarlane vd. (1975) yaptıkları çalışmada Kanada'da orman yollarının üstyapısındaki kaplama tabakasında kullanılmış olan asfaltın üzerinde kamyonlarla yapılan taşımacılığın sebep olduğu deformasyonları Benkelman Beam aleti ile ortaya koymuşlardır. Değişik altyapı sistemlerine sahip olan orman yollarında kamyonla taşımadan sonra kaplama tabakasındaki deformasyonları belirlemişlerdir. Buna göre orman yolu altyapısı üzerinde taşınan yükün deformasyon miktarını artırdığını belirlemişlerdir.

Edward vd. (1975) yaptıkları çalışmada, orman yollarında asfalt stabilizasyonunun performansını ve orman yollarının yapım tekniğini araştırmışlardır. Bunun için kumlu ve çakıllı zemine sahip orman yollarında asfalt çimentosunun ve asfaltın stabilizasyondaki etkilerini, gerilme üzerinde ise sıcaklık ve trafiğin etkilerini incelemiştir. Sonuçta; asfalt stabilizasyonunun kumlu zeminlerde çakıllı zeminlere göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

Aykut (1978), Kastamonu yöresinde orman yollarında üstyapı tekniği üzerinde yaptığı araştırmasında, yörede belirli bir bölge seçerek mevcut yolların zemin etütlerini yapmıştır. Bu amaçla; zemin etüdü için 99 noktadan zemin örneği almış ve bu örnekler üzerinde elek analizi, Atterberg limitleri, nem içeriği-yoğunluk ilişkilerini tespit ederek, grup indeksi yöntemiyle üstyapı kalınlıklarını belirlemiştir. Üstyapı malzemesi olarak bölge için kullanılacak malzeme tiplerini ve üstyapı kalınlıklarını tespit ederek değişik zemin koşullarında orman yolları inşaatına başlamadan önce zemin etütlerinin yapılması gerektiği konusunda önerilerde bulunmuştur.

Erdaş (1983), yaptığı çalışmada, orman yollarının yapımında karşılaşılan bazı teknik ve yönetsel sorunları irdelemiştir. Orman yollarının çok az bir bölümünde üstyapı inşaatı yapılmakta olduğunu ve inşaat sırasında zeminin taşıma kapasitesine göre yapım makinesi kullanılması gerektiğini, yol inşaatından önce zemin etütlerinin çok önemli olduğunu, zeminlerin özellikleri ortaya konularak inşaat araç ve tekniğine karar verilmesi gerektiğini vurgulamış ve bazı yönetsel problemleri açıklamıştır.

Eskioglou ve Efthymiou (1996), Yunanistan'da yaptıkları bir araştırmada, değişik zeminler, farklı oranlarda kireç, NaCl + kireç, tuf + kireç, çimento, RRP, kireç + çimento + RRP kullanarak stabilizasyon denemeleri yapmışlardır. Sonuçta; hangi zeminlerde hangi stabilize maddesi ve karışımlarının daha etkili olduğu, karışımlardan elde edilen biriketler

üzerinde 7, 28 ve 35 gün kür sürelerinde sıkışma dirençlerini ölçülerek ortaya koymuşlardır.

Foltz (1996), yaptığı çalışmada yol üstyapılarının oluşturulması esnasında kullanılan agrega kalitesinin trafiğe açık olan zamanlarda ve açık olmayan zamanlarda, yol yüzeyinde meydana gelen deformasyonlara etkisini araştırmıştır. Sonuçta; agrega kalitesinin deformasyon miktarı üzerinde istatistiki olarak etkili olduğunu, agrega kalitesine göre yol yüzeyinde oluşan deformasyon miktarındaki fark üzerine düşen yağış miktarına ve üzerinden yapılan taşıma miktarının artmasına paralel olarak arttığını ortaya koymuştur.

USDA Forest Service'te (2000) yapılan bir çalışmada, kağıt fabrikalarının yan ürünü olarak açığa çıkan Tall-oil'in orman yollarının stabilizasyonunda kullanım imkanları araştırılmıştır. Bunun için Amerika'da bir bölgede, orman yollarına 8-10 cm derinliğe tall-oil, hiç işlenmeden mekanik olarak kimyasal katılmadan karıştırılarak, 3:1 ve 6:1 oranında kimyasal karıştırılarak dört değişik şekilde enjekte edilmiş ve kesme basıncı, nem içeriği ve geçirimsizlik değerleri ölçülmüştür. Sonbahar ve ilkbaharda alınan örnekler üzerinde geoteknik özellikler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; tall-oil'in orman yollarının yüzeyinden meydana gelen sediment taşınımını büyük oranda engelleyerek, yolların inşaa ve bakım masraflarını azalttığı, diğer taraftan da yağışlı mevsimlerde orman yollarının taşıma kapasitelerinin artmasına olumlu katkılar sağladığı belirlenmiştir.

Acar ve Eker (2001)" Orman Yolu Stabilizasyon Metotlarında Yeni Gelişmeler ve Ülkemizdeki Durum" adlı çalışmalarında, orman yollarında kullanılan yeni stabilizasyon tekniklerini belirleyerek, ülkemizde bu konuda yapılan çalışmaları anlatmışlardır. Klasik stabilizasyon metotlarını, mekanik ve granüler, kireçle veya çimentoyla yapılan stabilizasyon olarak, modern stabilizasyon metotlarını RRP, WEGS, Perma-zyme, geotekstil, kül, fosforik asit, magnezyum sülfat, anilin ve diğer kimyasal malzemelerle yapılan stabilizasyon olarak ortaya koymuşlardır. Ayrıca bu tekniklerin ülkemizde uygulanma durumunu veya imkanlarını değerlendirmişlerdir.

Tez çalışması kapsamında orman yollarının üstyapısına kullanılacak alternatif malzeme üretimine yönelik olarak yapılan çalışmalara ait literatüre bakıldığında, çimento üretiminde değişik katkıları kullanılarak yapılan çalışmalar oldukça fazladır. Burada sadece endüstri atıklarının çimentoya katkı olarak kullanımına ait birkaç literatür verilmiştir.

Mullick vd. (1997), yaptıkları çalışmada uçucu küllerin çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılan hammaddelere katılabilme imkanlarını araştırmışlardır. Bunun için; uçucu kül, kireç taşı, demir cevheri ve yumuşak kayanın (arduvaz) karışıma katıldığı



6 değişik imento katkısı elde etmişlerdir. Böylece bu karışımların çimentoya katkı olarak kullanılıp kullanılmayacaklarını araştırmışlardır. Sonuçta % 92.57 kireç taşı, % 0.96 demir cevheri, % 2.97 uçucu kül ve % 3.51 yumuşak kayadan oluşan ve % 93.26 kireç taşı, % 0.95 demir cevheri, % 3.08 uçucu kül ve % 2.70 yumuşak kayadan oluşan karışımların imento yapımında yüksek kaliteli olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Turanlı ve Erdoğan (1997) yaptıkları çalışmada, uçucu küllerin portland çimentosuna katılma şeklinin ve miktarının portland çimentosunun çeşitli özellikleri üzerine etkilerini ve uçucu kül sistemlerini araştırmışlardır. Bunun için, aynı tip klinker ve uçucu kül (yüksek kireç ihtiva eden) kullanarak, öncelikle klasik portland imentosu (uçucu kül katkısız) ve uçucu külün katılma şeklinin farklı olduğu 4 değişik uçucu kül portland imentosu (%10, 20, 30 ve 40 uçucu kül katkılı) üretmişlerdir. Ayrıca % 10, 20, 30 ve 40 uçucu kül karıştırılmış ve uçucu kül-portland imentosu karışımlarını elde etmişlerdir. Bu 8 değişik numune üzerinde, normal kıvam, özgül yüzey, priz süresi, basınç dayanımı ve eğilme mukavemetini ölçmüşlerdir. Sonuçta, uçucu kül miktarı arttıkça su ihtiyacı artmakta ve priz süresi uzamakta, katkısız çimentoyla karşılaştırıldığında bütün kür sürelerinde uçucu kül katkılı çimentonun basınç dayanımının daha yüksek olduğu, basınç dayanımı için maksimum uçucu kül oranının ise % 30 civarında olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kamon vd. (2000), yaptıkları çalışmalarında kentsel katı atık cürufların kömür külleri ile stabilizasyonunu deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Bunun için kentsel katı atıkların yakılmasından elde edilen uçucu külleri imento ve kömür külleri ile karıştırıp, basınç dayanımı, leachate test ve drenaj testleri uygulamışlardır. Sonuçta yalnız imento katkısı ile yapılan deneylerde çok iyi bir direnç ve dayanım elde edememelerine rağmen kentsel katı atık küllerinin FCA (Kömür yakıtı kullanan termik elektrik santrallerden elde edilen ve atık cürufların stabilizasyonunda kullanılan özel bir madde) ile karışımıyla elde edilen malzeme üzerinde çok iyi dayanım ve direnç elde etmişlerdir.

Gülay (2002) yaptığı çalışmada, Trabzon İçmesuyu Arıtma Tesisinin atık çamurunu imento katkısı olarak kullanmış ve ele ettiği karışımlarda 1, 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını ölçmüştür. Sonuçta, arıtma çamuru katkılı imento örneklerinde arıtma çamuru katkı miktarları arttıkça imento yoğunluğunda fazla bir değişim olmadığı, % 5 arıtma çamuru katkılı örneklerin 1, 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerlerinin P 42.5 değerlerinden daha büyük olduğu, en uygun atık çamur katkı oranının % 10 ile % 15 arasında olduğunu belirlemiştir.

Orman yollarında veya toprak yollarda stabilizasyon amaçlı çalışmalarda kullanılan alternatif katkı maddelerine ait çalışmalar oldukça fazladır. Bu kısımda değişik katkılar kullanılarak farklı özelliğe sahip zeminlerin stabilizasyonuna yönelik sınırlı sayıda literatür verilmiştir.

The Asphalt Institute'nin (1973) yapmış olduğu bir çalışmada, stabilizasyon imkanları araştırılmıştır. Çalışma sonunda, mika ağırlıklı ve ağır killi zeminlerde veya stabil olmayan materyallerin bulunduğu elverişsiz şartlara sahip zeminlerde stabilizasyon çalışmaları yapılmasının yerinde olacağı belirtilmektedir. Ayrıca sönmüş kirecin kilin plastikliğini azaltmak için kullanılabilmesi ve kaba taneli agregaların mikali malzemelerin stabilizasyonunda uygun olabileceği ortaya konulmuştur.

Thompson (1975) yaptığı çalışmada, toprak yollar üzerinde toprak-kireç karışımlarının kaplama olarak kullanma imkanlarını araştırmıştır. Yaptığı denemelerde plastisite, hacim genişlemesi, dayanım ve deformasyon, basınç dayanımı, kesme dayanımı, gerilme dayanımı ve CBR değerlerini belirlemiştir. Sonuçta; kireç stabilizasyonunun zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini, toprak-kireç karışımının orman yollarındaki kaplama tabakasında kullanılabilmesini belirtmiştir.

Evans ve Pancoski (1989) yaptıkları çalışmada, değişik mineralojik yapıya sahip olan killerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için değişik organikleri kullanarak denemeler yapmışlardır. Bunun için 4 değişik yapıdaki kil mineraline 4 değişik organik katkı katarak serbest şişme deneyi yapmışlardır. Sonuçta; katılan organik katkı ile kil çeşidine bağlı olarak şişme özelliklerinde iyileşmeler sağlamışlardır.

Turner (1997) yaptığı çalışmada, yol temel zeminlerinin sülfür oranı düşük olan kömürlerden meydana gelen uçucu kütle muamelesi sonucundaki değişimlerini ortaya koymuştur. Bunun için çakıllı kum, siltli kum, kumlu silt ve plastik özelliği yüksek killi zeminler üzerinde denemeler yapmıştır. Denemelerde basınç dayanımı esneklik modülü, su alma-kuruma ve donma-çözünmeye karşı dayanıklılığını ölçmüştür. Sonuçta uçucu kül kullanımının ham yolların temel zeminlerinde agrega kalınlığını önemli derecede artırdığını ortaya koyarken, uçucu kül ilavesiyle zeminlerin mühendislik özelliklerinde meydana gelen iyileşmenin kesin bir standardının olamayacağı görüşüne yer vermiştir.

Wild vd. (1998) yaptıkları çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın granüle cürufunun, kireçle stabilize edilen killi zeminlerin dayanımlarına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, kaolinit ve Kimmeridge bölgesi kili, Buxton kireç endüstrisinden elde edilen kireç ve cüruf çimentosu üreten bir fabrikadan elde edilen öğütülmüş yüksek fırın granüle cürufunu



kullanılmışlardır. Sonuçta; öğütülmüş yüksek fırın granüle cürufunun, kireçle birlikte stabilzer olarak kullanılmasının zeminlerin taşıma kapasitesi ve basınç dayanımlarında önemli derecede iyileşme sağladığını ortaya koymuşlardır.

Çokça (1999) yaptığı çalışmada, uçucu külün şişen zeminler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu zeminlere % 0, 3, 5, 8, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında, iki değişik termik santralden elde edilen (Soma ve Tunçbilek) uçucu kül (Clas C) ilave ederek, kimyasal ve mineralojik yapı tane dağılımı, kıvam limitleri, şişme gerilmesi özelliklerini belirlemiştir. Sonuçta; uçucu kül ilavesiyle zeminlerin kil fraksiyonunun, plastisitesinin ve genişlemesinin azaldığı, şişme gerilmesinin arttığı, ancak % 20 ile % 25 uçucu kül oranları arasında küçük bir azalma olduğu, optimum sonucun ise % 20 uçucu kül oranında olduğu, bütün bunlara dayalı olarak uçucu küllerin şişen zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Miller ve Azad (2000) yaptıkları çalışmada, yüksek ısıda fırınlanmış çimento tozunun zemin stabilizeri olarak kullanma imkanı araştırmışlardır. Bu çalışma için portland çimento üretimi sırasında geri dönüşüm ünitesinden elde edilen fırınlanmış çimento tozunu mühendislik özellikleri farklı 3 değişik zeminin stabilizasyonu için kullanılmışlardır. Çalışma sonunda, fırınlanmış çimento tozu ilavesiyle zeminlerin basınç dayanımlarının arttığını, Plastisite İndeks değeri yüksek olan zeminlerde iyileşme sağladığı ve çimento ilavesiyle zeminlerin pH'sında olumlu değişimler meydana geldiğini ortaya koymuşlardır.

## **1.5. Orman Yolları**

### **1.5.1. Orman Yollarının Yapım Yönünden Sınıflandırılması**

#### **1.5.1.1. Toprak Yollar**

Toprak yollar en düşük tipte bir yol yapısını ifade eder. Bununla birlikte üretim alanlarını tüketim merkezlerine bağlamaları nedeniyle önemlidirler. Genellikle bir orman yolunun taşımacılıktaki rolü büyük değilse, doğrudan doğruya tesviye yüzeyi platform olarak kullanılıyorsa yani üstü yapı yoksa bu yol bir toprak yol veya ham yol olarak kabul edilir. Bu tür toprak yolların yapımı için ilk koşul zeminin yeterli bir taşıma yeteneği ve stabilite göstermesidir. Yol platformu oluşturulduktan sonra yol yüzeyi tesviye edilir ve

yola % 4-6 bombe verilerek taşımaya açılır. Bu yolların en olumlu yönü yapımının ucuz ve kısa sürede gerçekleştirilmesidir.

Toprak yolların olumsuz yönü, taşımanın kuru periyotlarda yapılması zorunluluğudur. Toprak yollar açıldıktan en az bir yıl sonra kullanılmalı, yeteri kadar oturması için bir süre üzerinde taşıma yapılmamalıdır. Yine bu süre içinde yol üst yüzeyindeki siltli tabaka yıkanarak taşınır ve geriye kalan kumlu çakıl, yolu daha stabil hale getirir. Toprak yollar erozyona neden oldukları için eğimleri az olmalı, terasları düz açılmalıdır. Bu yollar için en önemli noktalardan birisi de suların akıtılması probleminin çözülmesidir. Bu nedenle yola doğru bombe verilmeli ve kenar hendekleri mutlaka yapılmalıdır (Erdaş, 1997).

#### 1.5.1.2. Stabilize Yollar

Bir yolun alt ve üst yapısı, yeryüzünün üst yüzeyinde iklim koşullarından oldukça etkilenen çok ince bir tabaka teşkil ederler. İklim koşulları olarak özellikle yumuşama kuruma haliyle zemini etkileyen yağış, donma çözülme haliyle zeminin etkilenmesine neden olan don olayı söylenebilir. Bu etkiler zeminde bir hacim değişmesi ve zeminin direncinin azalması sonucunu doğururlar. Böylece zeminde bir stabilite problemi ortaya çıkar (Erdaş, 1997).

Stabilize yollar, yol inşaatından sonra oluşan ham orman yolu üzerine, belli oranlarda, kum-çakıl ve diğer malzemeler serilip sıkıştırılarak veya ham zeminin çeşitli katkılarla stabilize edilmesiyle oluşan yollardır. İlerleyen bölümlerde bu yolların oluşturulmasında kullanılan yöntem ve tekniklere değinileceğinden ayrıntılı bilgi bu bölümde verilmemiştir.

Stabilize yolların bakımında, yağmur mevsiminden sonra yüzeysel suların ve trafiğin etkisi ile oluşan izler greyderle tesviye edilerek yol yüzeyine parabol şeklinde ve iki tarafa doğru % 3-5 eğimde bombe verilmelidir. Yol yüzeyi mümkün olduğu kadar düzgün sıkıştırılmış olmalı ve yol yüzeyinde gevşek malzeme bulunmamalıdır. Gevşek malzemenin fazlası yol kenarında bırakılır ve genellikle yağışlı havalarda veya malzeme nemli iken tekrar serilir. Bunun için malzeme bıçakla kenardan ortaya doğru getirilerek çukurluklara doldurulur ve fazlası yine kenara çekilir. Bu amaçla banket boyunca yeteri kadar malzeme hazır bulundurulabilir ve bu malzemelerin zeminle iyi kaynaşması için serilmesi ilkbaharın ilk aylarında yapılmalıdır (Bayoğlu, 1997).

### 1.5.1.3. Asfalt Kaplamalı Yollar

Öncelikle çok yoğun trafiğe sahip yollarda, yol temel tabakasının suların ve özellikle yatay kesme kuvvetlerinin etkilerine karşı korunması ve direncinin artırılması için, temel tabakası üzerine çoğu kez hidrokarbonlu karışımlardan oluşan bir kaplama tabakası konulur. Asıl olarak kaplama tabakası içinde hidrokarbonlu bağlayıcıların kullanıldığı ve ülkemizde daha çok bir tabaka hidrokarbonlu yüzeysel kaplama, iki tabaka hidrokarbonlu yüzeysel kaplama, asfalt betonu gibi değişik şekillerde yapılan yollara kısaca asfalt kaplamalı yollar denilmektedir. Kaplama tabakaları ince olduğunda yol gövdesi içinde sayılmazlar. Fakat kalın iseler temel tabakasını pekiştirirler ve temel tabakasını olumsuz etkilerden koruma yanında onunla birlikte yol direncinin artmasını da sağlarlar (Erdaş 1997).

Asfalt betonu kaplama tabakasında tekerleğin gezdiği üst kısmına aşınma tabakası, temele komşu olan alt kısmına ise bağlantı tabakası veya binder denir. Kaplama tabakasının üzerine oturtulduğu tabakalar stabilize yol gövdesi ve taş yol gövdesi olarak 2 değişik şekilde inşa edilebilir. Çoğunlukla stabilize yol gövdesi üzerine kaplama tabakasının inşa edilmesiyle oluşturulan asfalt kaplamalı yolların yapımında oldukça dikkatli olma zorunluluğu vardır (Erdaş, 1997).

Stabilize yolların alttemel tabakalarının yapımı genellikle kolaydır. Bir çok zemin ya oldukları gibi ya da sadece basit düzenlemelerle alttemel olarak kullanılabilir. Alttemel yapımında kullanılan malzemelerin nitelikleri KGM yollar Fenni Şartnamesinde belirlenmiştir.

### 1.5.1.4. Beton Yollar

Ormancılığımızda kullanım alanı oldukça sınırlı bulunan beton yollar, zemin ve alttemel tabakası üzerine, beton malzemenin hazırlanıp dökülmesi ve tesviye edilmesi ile inşa edilir. Başlangıç oturmalarının yok edilmesi ve taşıma gücünün artırılması için gerekli zemin sıkıştırmasının çok hesaplı yapılması ve sonradan fazla sıkışmadan doğacak zemin dağılımlarına engel olunması gerekir. Zeminde oluşabilecek zararlı etkileri önlemek için, çoğu kez beton dökümü öncesinde alttemel tabakası oluşturulur. Bu tabakada malzeme olarak, genellikle konkasörle kırılmış yarı sert kaya veya balast kullanılmaktadır. Burada malzeme kesinlikle suya duyarlı olmamalı ve ayrıca çok iyi sıkıştırılmış olmalıdır.

Malzeme kumlu ise vibrasyonlu silindir kullanılması tercih edilmelidir. Gerekirse alttemel için çimento ve bitüm stabilizasyonu da uygulanabilir (Erdaş,1997).

Çoğunlukla yol inşaatlarında kullanılan betonun kuru elemanlarının karıştırılması hazırlıkları süresiz çalışan dozaj merkezlerinde yapılır. Betoniyerler bu merkezlere bağlı olarak karışımı tamamlarlar. Genellikle taze beton bu tip bir merkezde hazırlanır ve işyerine götürülür. Fakat bazen hareketli betoniyerlerle iş yerinde de hazırlanabilir. Bu durumda kuru karışım dozaj merkezinden kamyonlarla işyerindeki betoniyerlerle götürülür ve su burada eklenir.

Türkiye’de orman yollarında pek rastlanmayan ancak köy yollarında düşünülen beton yollar Avrupa ülkelerindeki orman yollarında oldukça uygulama alanı bulmaktadır (Erdaş, 1997).

### **1.5.2. Orman Yollarının Planlanması ve Projelendirilmesi**

Orman yolu geçki belirlemesi, orman yolu planlama çalışmalarının en önemli ve en zor aşamasını oluşturmaktadır. Bir yolun geçmesi zorunlu bulunan kontrol noktaları arasında, birden fazla geçki söz konusu olabilir. Bu nedenle geçki araştırması yaparak en uygun olanı seçmek gerekir. Aslında, bilinen iki kontrol noktasını birbirine bağlayacak geçki sayısı ilk bakışta çok gibi görünse de, çeşitli engel ve sınırlamalar nedeniyle bunların sayısı fazla değildir; hatta bazı durumlarda karşılaştırma yapmak için ikinci bir alternatif geçki bulmak bile olanaksız olabilir (Seçkin, 1984).

Son gelişmeler doğrultusunda orman yollarının planlanmasında yeni teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Coğrafi bilgi sistemlerinin orman yollarının planlanmasında kullanımına ilişkin ilk çalışmaları 1990’lı yılların başlarına rastlamaktadır. Yapılan ilk çalışmalarda orman yollarının planlanmasında kriter olarak kullanılacak değerlerin coğrafi veri tabanından elde edilip hızlı ve doğru bir şekilde planların üretimi amaçlanmıştır. Sayısal fotogrametri destekli sayısal arazi modelleri tekniği bir çok ülkede, endüstri bölgelerinin, hava limanlarının, otoyol, demiryolu ve orman yolu ağlarının planlanmasında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ülkemizde de son yıllarda otoyolların planlanmasında kullanılan sayısal fotogrametri destekli sayısal arazi modellerinin; büyük bir bölümü dağlık bölgelerde bulunan, ülkemiz orman yollarının plan ve proje çalışmalarında kullanılması para ve zaman bakımından yapılan harcamaları büyük ölçüde azaltacağı için ekonomik ve mantıklı bir yaklaşım olacaktır. Çünkü, yapılan araştırmalar

sayısal veriler ile bilgisayar ortamında çalışmanın, klasik yöntemle göre çok daha ucuz olduğunu göstermektedir (Bayoğlu vd., 1995).

Orman yolu planlanacak alanının tanımlanması ve yol ağı planlaması açısından önemli olan faktörlerin arazide kontrol edilmesi için araziye çıkılır. Arazi çalışmaları sırasında topoğrafik harita, mevcut yol ağı planı, meşcere haritası ve hava fotoğrafları hazır bulundurulur ve haritalar ile arazi karşılaştırılarak herhangi bir uyumsuzluğun olup olmadığı kontrol edilir.

Veri tabanının oluşturulması için, sayısallaştırması yapılan meşcere tipleri ve bölmelerin yer aldığı katmanlar üzerinde, önce gerekli düzeltme işlemleri yapılır. Daha sonra meşcere tipleri haritasında yer alan poligonlara meşcere tipi sembolleri atanır. Meşcere tipleri sınırlarının yer aldığı bu katman bölme sınırlarının, yol ve derelerin bulunduğu katmanlarla birleştirilerek planlama birimi için sayısal meşcere haritası elde edilir (Acar vd., 2001).

Mevcut yol ağı planının işaretlenmesinden sonra yapılan gözlem ve analizler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek ve mevcut yol ağı planına yeni yol parçaları eklenerek alternatif plan hazırlanır. Yeni yol planlama aşamasında, ana orman yollarının dar vadilerden geçirilmemesine özen gösterilir (Acar, 1993).

Yolların planlanması sırasında genellikle güney bakılar düşünölmeli ancak planlama birimi alanının genel bakışının kuzey olduğu yerlerde ise kuzey bakılar kullanılır. Gözlem olarak, yamaç uzunlukları ölçümleri yapılır. Analizler ise; işletmeye açılmayan alanların tespiti ve bu alanların servet durumlarının belirlenmesi şeklinde yapılır. Bu işlem coğrafi bilgi sistemi konumsal analizleri ve veri tabanı sorgulaması ile gerçekleştirilir. Bu veriler doğrultusunda orman yollarının planlanması yapılır.

Bakı haritası sayısal arazi modeli kullanılarak oluşturulur. Sayısal arazi modelinden, öznitelik bilgisi olarak 0-360 derece bakı değerlerini bulduran yeni bir katman elde edilir. Bu katman üzerinde yeniden sınıflandırma fonksiyonu kullanılarak açı değeri olarak verilen bakılar sekiz yön olarak gruplandırılır. 337,5° - 22,5° Kuzey olmak üzere 45° lik dilimler oluşturulur.

Tablo 1. Orman yolu geçkilerini etkileyen faktörler ve puanlandırma sistemi (Gümüş,1997).

Katman Adı	Grup açıklaması	Puan
Eğim	E* < % 45	3
	% 45 < E < % 65	2
	%65 < E < % 75	-2
	E > % 75	-3
Bakı	Kuzey bakılar (K, KD, KB)	-1
	Doğu ve Batı bakıları	0
	Güney bakılar ( G, GD, GB)	+1
Servetin Dağılışı	Orman toprağı	+1
	H.S** < 100m <sup>3</sup>	+1
	100 m <sup>3</sup> < H.S < 250 m <sup>3</sup>	+2
	H.S > 250 m <sup>3</sup>	+3
	Ziraat ve mera alanı	-3
Kayalık ve Yerleşim	Kayalıklar ve yerleşim alanları	-3
Akarsu Yatakları	Akarsu yatakları	-3

\* E : Eğim

\*\* H.S : Hektardaki servet

Düzenlenen haritalar overlay işlemi ile üst üste çakıştırılarak, öznelik tablosunda bütün bilgileri bulunduran temel sorgulama katmanı elde edilir. Orman Yolu Geçki Etüdü Haritası şeklinde adlandırılan bu katmanda, her kapalı alan için yukarıda açıklanan puanlandırma sisteminden kaynaklanan beş adet değişik puan bulunmaktadır. Bu puanlar öznelik tablosunda toplatılarak her alan için bir puan elde edilir. Orman yolu geçişinin en az maliyet ve en fazla fayda oluşturacağı alanlar; orman yolunun geçmesinde değişik faktörlerin olumlu ve olumsuz etkilerinin dengelendiği alanlar ve orman yolu için fazlaca maliyet oluşturacağı, çevre tahribatının en fazla olacağı alanlar şeklinde oluşturulur. Bu düşünceden hareketle - 1'den daha düşük puan alan alanlar orman yolu için uygun olmayan alanlar; -1 ile +1 arasında puan alan alanlar orman yolunun geçişinde fazlaca sorun oluşturmayacak alanlar; +1'den daha yüksek puan alan alanlar ise yol geçkisi için en uygun olan alanlar olarak değerlendirilir (Gümüş, 1997).

Orman yollarının projelendirilmesi esasları önceden klasik yöntemlerle yapılırken günümüzde, teknolojik gelişmelere paralel olarak bilgisayar destekli yapılmaya başlanmıştır. Orman yollarının haritalanması ve projelendirilmesinde Microsoft Windows<sup>TM</sup> içinde RoadEng programından yararlanılır. Ayrıca yatay ve düşey kurpların yerleştirilmesinde, enine profil, eğim kazıkları ile materyal hacim ve denge hesaplarının yapılmasında kullanılır.



Arazide ölçülen güzergaha ait bilgiler, sıfır hattını oluşturan veriler ve enine profillerin alınacağı noktalardaki arazi verileri Survey/Map modeline girilir. Enine profiller yolun her iki tarafındaki bir çok noktayı içerir. Akarsu yerleri zemin bilgileri de toplanarak programa girilir. Orman yolunda yapılacak ölçümler kumpas zincir ve klizimetre ile yapılmaktadır.

Orman yolunun projelendirmesine başlamadan önce bilgisayarda standart profiller oluşturulur. Bu işlem yapılırken orman yolunun genişliği, hendek boyutları, üstyapı kalınlığı ve kazı-dolgu eğimleri dikkate alınır.

Daha sonra yolun enine profilleri yardımıyla yol inşaat alanları bilgisayar tarafından otomatik olarak belirlenir. Bu yapılırken daha önce oluşturulan arazi çizgisine göre yani arazinin eğiminden yararlanarak ayrıca kot farkları ve standart profillerin oluşturulmasından sonra kazı şevinin başlangıcından dolgu şevinin sonuna kadar olan alan dikkate alınarak bilgisayar tarafından oluşturulur.

Bu program yardımıyla proje içerisinde istediğimiz veriye kolayca ulaşabiliriz. Ayrıca yaptığımız proje sonunda elde edeceğimiz kazı dolgu miktarları materyal açığı veya fazlası geriye dönülerek projeye yapılacak müdahalelerle olumsuzluklar önceden giderilebilir (Acar vd., 2001).

### **1.5.3. Orman Yollarının İnşaatı**

Orman yollarının yapımına öncelikle şantiye oluşturma ile başlanır. Orman yolları genellikle dağlık alanlarda ve yerleşim biriminden uzak yerlerdeki ormanları işletmeye açmak için planlandığından bu yolların yapımını gerçekleştirmek için yol yapım yerinin yakınında bir barınma yeri ile bazı araç gereçlerin korunduğu yerleri içeren dar anlamda bir şantiye kurmak gereklidir.

Şantiye kurulmasından sonra, altyapı çalışmalarının yapılması gerekir. Bunun için inşaat alanının temizlenmesi bağlamında ağaçların kesilmesi, kütüklerin çıkarılması, gerekli olan yerlerde uygun yöntem ve malzeme kullanılarak patlayıcı maddeler ile kayaların parçalanması, değişik kazı metotları kullanılarak platform teşkili için toprak düzlemesi, kazı ve dolgu şevlerinin belirlenmesi ile kontrolü işlemleri sırasıyla gerçekleştirilir.

Bütün karayollarında olduğu gibi orman yollarında da çalışmalar 3 aşamada tamamlanır. Bunlardan birinci aşama, yolların planlanması, ikinci aşama planlanan yolların



altyapı çalışmalarının tamamlanması ve üçüncü aşamada ise üstyapı cinsinin seçilmesi, boyutlandırılması ve uygulanmasıdır.

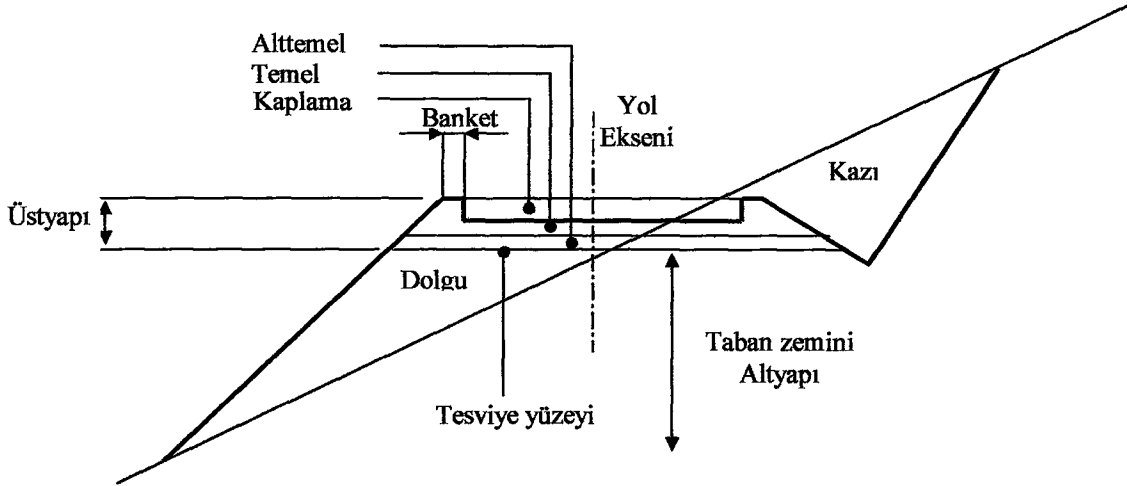
Yolun toprak işi sonunda, daha önceden saptanan kot ve enkesit şekline getirilmiş kısmın altyapı denir. Menfez, drenaj tesisleri ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da alt yapı içine girer. Altyapı yolun esas taşıyıcı kısmıdır. Ancak alt yapının taşıyıcılık görevini iyi şekilde yapabilmesi için üzerine başka tabakaların da inşa olunması zorunluluğu vardır.

Yolun, trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde taban yüzeyine dağıtmak üzere altyapı üzerine inşa edilen ve alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan kısmı ise üstyapı olarak tanımlanır (Umar ve Yayla, 1986).

Kaplama tabakası, motorlu araçların ve özel durumlarda diğer araçların istenilen hızda, konforda ve emniyette geçmesine yarayan hidrokarbonlu karışımlar, beton, kil-kum vb. gibi malzeme ile yapılan en üst tabakadır.

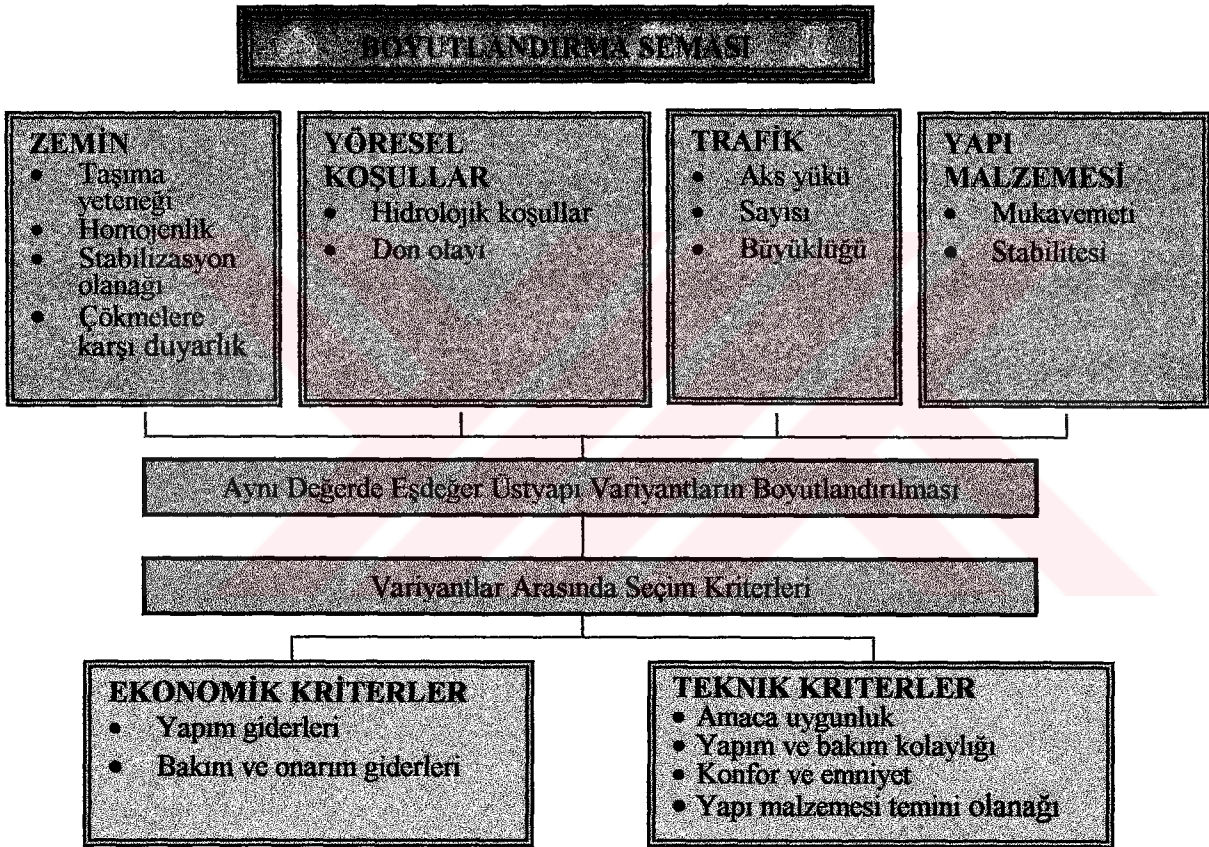
Temel tabakası, taşıt tekerleklerinden kaplama tabakasına gelen ve oradan alta yayılan dinamik ve statik kuvvetlerin meydana getirdiği gerilmeleri alan ve onların homojen dağılımını sağlayarak bunları alttemele geçiren yolun en önemli tabakasıdır. Genellikle kırmataştan imal edilir.

Alttemel tabakası ise, temel tabakasından gelen gerilmeleri temele göre daha ucuz bir yapı ile altyapıya geçirmek üzere, altyapıyla temel tabakası arasında konan tabakadır. Bu tabaka kum, stabilize malzeme, kırmataş gibi materyalden meydana gelir.



Şekil 1. Orman yolu yapı elemanları

Orman yollarında yukarıda sözü edilen üç tabakanın hangi malzemelerden ve hangi kalınlıkta seçilmesi gerekliliği bir başka ifade ile boyutlandırılması üstyapının en önemli konusudur. Üstyapının boyutlandırılmasından amaç ise yapı malzemesi, trafik, yöresel koşullar ve zemin gibi boyutlandırma faktörlerinin göz önüne alınarak aynı değerde çeşitli alternatiflerin bulunması ve bunlardan bir tanesinin seçilmesidir. Aynı değerde çeşitli alternatiflerden birisinin seçilmesi ise teknik olanaklara, amaca uygunluğa, taşımadaki konfor ve emniyete, yol bakım ve onarım olanakları ile yol yapım, bakım ve onarım giderlerinin ekonomikliğine bağlıdır (Erdaş, 1997).



Şekil 2. Orman yollarında üstyapının boyutlandırılması ve seçimini etkileyen faktörler (Erdaş, 1997).

Bugün üstyapı kalınlıklarının belirlenmesi çoğunlukla amprik yöntemlerle yapılmaktadır. Bu yöntemler esas itibariyle daha önce yapılmış bulunan yolların etüdü ile deneme yollarında yapılan araştırmaların neticesinden ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla bu amaçla başvurulabilecek en basit yol evvelce yapılmış bir yolun bozulmamış olmasını esas alarak o yol üzerindeki döşeme kalınlığının diğer yollara da uygulanmasıdır. Ancak bu

yöntem her zaman için ekonomik olmaz. Zira iyi cins bir zemin üzerine zayıf zeminde uygulanmış malzeme kalınlığının uygulanması veya aksi her zaman için mümkündür (Bayoğlu, 1997).

Üstyapının tayini için kıyaslama, üstyapı sayısı, zemin taşıma yeteneği (CBR) ve grup indeksi metotları kullanılmaktadır. Bunlardan grup indeksi yöntemi sadeliği ve tatbik kolaylığı nedeniyle bugün köy ve il yolları yapımında uygulanmaktadır. Teknik özellikler bakımından birbirine yakınlığı dolayısıyla, orman yolları yapımında da üstyapı kalınlıklarının saptanması için bu yöntemden yararlanmak mümkündür (Aykut, 1978).

Grup indeksi esas itibariyle ampirik bir sabitedir ve bir zeminin kendi dahil bulunduğu grup içerisinde temel zemin malzemesi olarak elverişlilik derecesinin ölçüsüdür. Dolayısıyla grup indeksi tek başına bir zeminin hangi gruba dahil olduğunu tayine yaramaktadır. Bir zeminin grubu her şeyden önce elek analizi neticesi ile likit limit ve plastisite indekslerinin değerleri ile ortaya çıkmaktadır. Bir zeminin grup indeksi değeri yükseldikçe buna paralel olarak evsafi da düşmektedir. Grup indeksi bir formül yardımıyla hesap edilmekte olup bu esas itibariyle toprağın 200 nolu standart elekten geçen miktarı ile likit limit ve plastisite indekslerinin bir fonksiyonudur (Bayoğlu, 1968b).

#### **1.5.4. Orman Yolları İnşaatı Açısından Zeminin İncelenmesi**

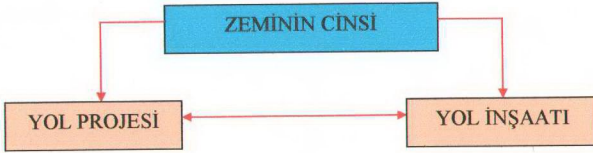
Orman yolları ormanlık alanlarda değişik yapıdaki zeminlerin üzerinde inşa edilmektedir. Bu zeminler ıslak veya kuru halde killi, siltli, kumlu veya çakıllı malzemelerden veya bunların karışımlarından oluşabilmektedir.

Orman yollarında yolun dikey yapısı yönünden altyapı ve üstyapının birbirinden ayrılması gerekmektedir. Bunlar gerek inşaat tarz ve şekillerinin başka olması, gördükleri işlevlerin farklı olması ve gerekse, özellikle orman yollarında yolun bir an önce hizmete açılmasının istenmesi nedeniyle inşaat zamanlarının farklılığı ve birinin diğerini takip etmesi nedeniyle birbirlerinden ayrılır.

Orman yolları için zeminler mühendislik yönünden çok önem taşımaya rağmen uygulamada orman yolları ile ilgili çalışmalara bir göz atıldığında bu konunun büyük ölçüde göz ardı edildiği açıkça görülmektedir. Gerçekten yolların üstyapı ve tabanında meydana gelen deformasyonlar, heyelanlar, yol gövdelerinin sularla yıkanıp götürülmesi, artan bakım, onarım ve yenileme giderleri ile trafikteki aksamalar hep bu ihmalin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Bayoğlu, 1997).

### 1.5.4.1. Zeminin Mekanik Yönden İncelenmesi

Orman yol yapımı çalışmaları sırasında zeminin cinsi, yol projesi ve yol inşaatı devamlı ve karşılıklı ilişki halinde olup birbirlerini karşılıklı etkilerler. Bu etkileşim şu şekilde gösterilebilir (Şekil 3).

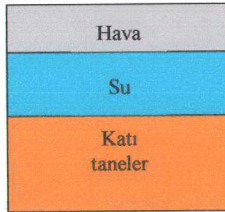


Şekil 3. Yol proje ve inşaatı ile zemin ilişkisi (Erdaş, 1997).

Orman yolları, orman topraklarının yeterli taşıma yeteneği göstermemesi, belli kalınlıkta humus tabakası içermesi veya herhangi bir doğrultudaki kesitin üzerinde bir taşıtın hareketine olanak sağlamayacak kadar dalgalı olması nedeni ile hiçbir zaman doğrudan doğruya zemin üzerine oturtulamaz.

Herhangi bir anda ve yerde zemine yapılan bir yüklenme zeminin dengesini yani zemin içindeki kuvvetler ilişkisini bozduğu taktirde zeminin yapısı bozulmakta ve o ana kadar kuvvet taşımayan tanelerin bir bölümünün de kuvvet taşıma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Diğer taraftan zemin içerisindeki su kuvvetlerden etkilenmekte, gazlar ise basınca katılmaktadır. Bu ifadelerden de anlaşılacağı gibi zemin katı, sıvı ve gaz fazlarından ibaret bir sistemdir (Erdaş, 1997).



Şekil 4. Üç fazlı sistem olarak zemin (Erdaş, 1997).



Zeminlerin mekanik yönden sınıflandırılmasında en yaygın olarak kullanılan sistem USCS (Unified Soil Classification System) dir. Bu sistemde zeminler, tane dağılım eğrisi, plastisite özellikleri ve organik maddeler esas alınarak, kalitatif özelliklerine göre 15 ana tipte toplanmıştır.

Tane dağılım eğrisi esas alınarak yapılan sınıflandırmada tane büyüklüklerinden tane dağılım eğrisine ulaşılır. Buna göre orman yolları yapımında zemini tanımak için tane dağılım eğrisini ortaya çıkarmak amacıyla zemindeki tane büyüklükleri şu şekildedir (Erdaş, 1997).

0	-	0.002	mm	Kil
0.002	-	0.006	mm	Silt
0.06	-	2	mm	Kum
2	-	60	mm	Çakıl
60	-	200	mm	Taş
	>	200	mm	Blok

Plastisite özellikleri arazide el denemeleri ile laboratuvarda ise belli deneylerle tespit edilir. Arazide zeminin incelenmesi sırasında zemin içindeki organik maddeler esmer rengi, kokusu ve süngerimsi yapısı ile tanınır.

Kaba taneli zeminler yani zemini oluşturan tanelerin % 50'sinden fazlası 0.06 mm'den büyük bir çapa sahip olan zeminlerde çakıl ve kum hakim demektir.

İnce taneli zeminlerin sınıflandırılmasında sarsma deneyi, ezme deneyi ve kuru direncin tespiti deneyleri uygulanır. Ağırlık itibarıyla % 50'den daha fazla ince tane ihtiva eden zeminler ince taneli olarak sınıflandırılır. Plastisite sınırlarının tespit edilmesinden sonra plasitite diyagramı yardımıyla zemin sınıflandırılır.

Zeminin mekanik özellikleri genellikle su muhtevasına bağlıdır. Taşıma yeteneği ve kesme direnci su muhtevası azaldıkça artar. Su muhtevası belli bir değerden sonra artmaya devam ettiği taktirde sıkıştırılabilme yeteneğinin azalacağı ve kohezyonun düşeceği ifade edilmektedir (Erdaş, 1997).

**Zeminlerin su içeriği;** doğal halde ihtiva ettiği su miktarı ve en iyi sıkıştırılabildiği anda ihtiva ettiği su miktarı olarak değerlendirilir. Zeminin su muhtevası kurutma metodu, benzin metodu ve CaCO<sub>3</sub> metodu gibi değişik yöntemlerle belirlenir.

**Zeminlerin plastik özellikleri;** herhangi bir kil zemini su ile doyurulur ve çamur haline getirildikten sonra eğik bir yüzey üzerinde akmaya terk edilirse kendi ağırlığı etkisiyle akar. Bu halde iç kohezyonu etkisiz olup değeri sıfırdır. Materyal biraz

kurutulursa akıcı durumdan yavaş yavaş plastik bir duruma dönüşür. Daha fazla kurutulursa sert bir durum alır. Her ne kadar bir zeminin kıvamı onun su muhtevasına bağlı ise de, bir durumdan diğer duruma geçmesi zeminin cinsi ile yakından ilgilidir.

Atterberg zeminlerin kıvamlarını ve bu kıvamlar arasındaki sınırları şöyle tanımlamıştır;

- Likit durumu : Zeminin bir çamur kıvamında olduğu durumdur (akıcı durum)
- Plastik durum : Zemin elle şekillendirilebilir hamur kıvamında olduğu durumdur.
- Katı durum : Zeminin katı sert durumda olup kurutulunca büzülme gösterdiği veya göstermediği durumdur.

**Zeminin kesme mukavemeti;** Herhangi bir zemin, özellikle kaba taneli zeminler, bir kesme yüzeyi boyunca kesmeye zorlanırsa, zemini meydana getiren taneler arasındaki dokunma ve kilitleme kesme kuvvetine karşı koyar. Zeminin kesme mukavemeti taneler arasındaki dokunma yüzeylerinin artması oranında artar. Böyle hallerde kesme mukavemetinin büyüklüğü zemindeki boşluk oranına ve iç sürtünmeye göre değişir.

Zeminin kesme mukavemeti, zemini meydana getiren taneler arasındaki kilitlemeden ileri gelen mukavemet ile iç sürtünme elemanı ve zemin içindeki ince taneleri birlikte tutmaya çalışan iç kuvvetlerden meydana gelen mukavemet yani kohezyon elemanlarından oluşmaktadır.

**Zeminin taşıma yeteneği;** Zeminin taşıma yeteneği “zeminin, herhangi bir yüklenmeyi deformasyon veya oturmalar belli bir sınır içinde kalmak şartıyla taşıyabilme yeteneğidir” şeklinde tarif edilebilir.

Gerek altyapıda veya orman içinde taşıma sırasında taşıtlardan meydana gelen yüklenmeyi zeminde deformasyonun belli bir sınır içinde kalarak taşınmasının arzu edilmesi, gerekse yol üstü yapı tabakalarının oturmaması ve böylece yolun zarara uğramaması yönünden zeminin taşıma yeteneği yol yapımında çok önemlidir (Erdaş, 1997).

Genel olarak, orman yolu yapımında zeminin taşıma yeteneği CBR-deneyi veya zeminin sınıflandırılmasını esas alan tahmine dayalı yöntemle bulunur.

**Zeminin sıkıştırılabilirlik özelliği;** Herhangi bir zemine tatbik edilen bir yüklenme zeminde iç gerilmelere neden olur. Bu gerilmeler zemin içindeki tanelerin yapısına, zemin içindeki su ve hava miktarına bağlı olarak zeminin derinliklerine iletilmektedir.

Zemin su ile doygun ise yüklenme sonucu oluşan iç gerilmelerin etkisiyle zemin yoğrulur ve zeminde bir sıkışma söz konusu olmaz. Lastik tekerlekli taşıtların altında böyle



hallerde derin bir tekerlek izi ortaya çıkar. Zemin su ile doygun değilse yüklenme sonucu iç gerilmelerin de ortaya koyduğu basınç ile zemindeki hava uzaklaştırılabilir ve uzaklaştırılabilme oranında zemin sıkıştırılabilir.

Herhangi bir zeminin sıkıştırılabilmesi zeminin özelliklerine (zeminin cinsi, plastisite özellikleri, strüktürü) ve zemine uygulanan basınca (basınç enerjisine, basıncın cins ve şekline) bağlıdır. Zeminin sıkıştırılması ile zemindeki katı, sıvı ve gazdan ibaret üç fazlı sistem bir değişikliğe uğrar. Bu değişiklik laboratuarda ve arazide oluşturulabilir ve kontrol edilebilir.

Özgül ağırlık ile su muhtevası arasındaki ilişkiyi bulmak ve zeminin optimal bir sıkışma gösterdiği optimal su muhtevasını ortaya çıkarabilmek için laboratuarda proktor deneyi yapılır. Proktor deneyi normal ve geliştirilmiş olarak iki değişik şekilde yapılmaktadır (Erdaş, 1997).

#### 1.5.4.2. Zeminin Morfolojik Olarak İncelenmesi

Orman yolları yapımında esas olarak 3 zemin tipi söz konusu olup bunlar toprak, küskülük ve kaya olarak adlandırılır. Toprak zeminler kendi içinde su muhtevası yüksek olan ve bu suyu kolay bırakmayan akıcı ve yapışkan nitelikte bataklık ve balçık, bel küreği ve kürekle kazılabilen yumuşak toprak ve kazmanın yassı ve ara sıra sivri ucu ile kazılabilen sert toprak olarak incelenebilir.

Küskülük zeminler de; yumuşak ve sert küskülük olarak ele alınabilir. Yumuşak küskülük, kazmanın sivri ucu, bazen de küskü ile kazılabilen toprak, sert kil, yumuşak marn ile 0.1 m<sup>3</sup>'e kadar büyüklükteki her cins moloz taşlarını içermektedir. Sert küskülük ise kazmanın sivri ucu, küskü, kama ve kırıcı tabanca ile kazılabilen, çok ayrılmış yapıdaki granit, andezit, dasit, trakit, serpantin ve benzerleri; zayıf çimentolu ve yumuşak yapıdaki gre, konglomera, anglomera ve benzerleri; konsolide marn, kompakt kil, çok çatlaklı şist ile 0.100-0.400 m<sup>3</sup> büyüklükteki her cins kaya parçalarıdır.

Kaya olarak adlandırılan zeminler ise yumuşak sert ve çok sert kaya olarak sınıflandırılabilir. Yumuşak kaya; küskü, kırıcı tabanca veya patlayıcı madde kullanılarak kazılabilen, konglomera, gre, şistler, alçı taşı, yumuşak marnlı kalkerler, çatlaklı ve ayrılmış gnays, taşlanmış marn ve kil taşları ile 0.400 m<sup>3</sup>'den büyük aynı cins blok kayalar yumuşak kaya olarak adlandırılır. Sert kaya; patlayıcı madde kullanılarak atılabilen, kırıcı tabanca ile parçalanıp sökülebilen, kalın tabaka ve kitle halindeki gre ve benzerleri ile

0.400 m<sup>3</sup>'den büyük aynı cins kaya blokları sert kaya olarak adlandırılır. Çok sert kaya ise fazla miktarda patlayıcı kullanılarak atılabilen veya kırıcı tabanca ile parçalanıp sökülebilen, ayrışmamış granit ve benzeri kayalar, bazalt, mermer ve benzerleri ile 0.400 m<sup>3</sup>'den büyük aynı cins kaya parçaları çok sert kaya olarak adlandırılır (Erdaş, 1997).

### **1.5.5. Orman Yollarının Üstyapı Bakımından Ülkemizdeki ve Dünyadaki Durumu**

Ormancılık teknoloji ve tekniklerinin gelişmesi, rasyonel ormancılığın istekleri ve plan uygulamaları ile elde edilen sonuçlar ülkemizdeki orman yol planlarının revize edilmesini gündeme getirmiştir. Bu yeni düzenleme ile toplam orman yolu uzunluğu 201 810 km olarak planlanmış ve 2000 yılı itibariyle 132 515 km'si yani % 65.66'sı inşa edilmiştir. Yapımı gerçekleştirilen orman yollarının 54 724 km'sinde üstyapı inşaatı planlanmış olup, ancak bunun 23 277 km'lik kısmı tamamlanabilmiştir. Bu durum, ülke genelinde planlanan orman yollarının yaklaşık % 11.5'inde üstyapının tamamlanmış olduğunu göstermektedir (Aykut vd., 1998 ve DPT, 2001).

Orman Genel Müdürlüğü ülke genelinde yapılan beş yıllık kalkınma planları çerçevesinde her yıl orman yollarının yapımı, onarımı ve üstyapı inşaatı gibi kalemlere ödenek ayırmakta ve bu ödenekler belli oranlarda kullanılmaktadır (DPT, 2001).

Özellikle dağlık bölgelerde yapımı çok masraflı olan orman yolları planlara göre inşa edilmektedir. Önemli derecede maliyetli olan orman yolları tekniğine uygun inşa edilmediği takdirde çevresel etkilerle ve bunun yanında maruz kaldığı aşırı yüklenmenin etkisiyle deformasyonlara uğramaktadır. Böylece, kısa zamanda yapılan yollar tahrip olmakta ve kullanılamaz hale gelmektedir. Bu yollardan tekrar yararlanmak için bakım yapılması zorunludur. Bu da bakım masrafları olarak karşımıza çıkmakta ve oldukça önemli mali kayıplara neden olmaktadır.

Orman yollarının çevresel etkilerden ve aşırı yüklenmeden dolayı kısa zamanda bozulup kullanılamaz hale gelmesini önlemek için zeminin cinsine, trafik yoğunluğuna, arazi yapısına, iklim şartlarına, mevcut malzeme imkanlarına, ekonomik duruma ve amaca göre üstyapısı doğru boyutlarda ve uygun malzeme seçilerek yapılmasına dikkat edilmelidir.

Amerika ve Avrupa’da orman yollarında üstyapı konusuna önem verilmiş ve değişik stabilizasyon teknikleri ile yolların iyileştirilmesi veya stabilize edilmesi yoluna gidilmiştir.

Bazı ülkelerde asfalt ve beton gibi değişik kaplamalar kullanılarak orman yollarında üstyapı inşa edilmiştir. Bunun yanında orman yollarının stabilizasyonunda klasik stabilizasyon yöntemleri ile birlikte değişik kimyasalların ve geotekstillerin kullanıldığı modern yöntemler geliştirilmiştir. Klasik yöntem olarak, mekanik veya granüler stabilizasyon, kireç veya çimentoyla stabilizasyon teknikleri kullanılırken, modern yöntem olarak RRP, WEGS, Perm-Zyme, geonet, geokompost ve geosentetikler gibi geotekstiller kullanım alanı bulmuştur (Acar ve Eker 2001).

### 1.6. Stabilizasyon ve İyileştirme

Zeminlerin çeşitli fiziksel ve mekaniksel davranışlarının istenilen yönde değiştirilmesi; zeminlere değişik katkı malzemelerinin katılmasıyla gerçekleştiriliyorsa bu olay stabilizasyon olarak tanımlanır. Bu bağlamda; stabilizasyon; “zeminlerin iyileştirilmesi” kavramına göre daha dar anlamı olmaktadır. Stabilizasyon, kullanılacak katkının zemine eklenmesini, optimum su içeriğine ulaşmak için yeterli suyun katılmasını, karışımın sıkıştırılmasını ve arzu edilen dayanım potansiyeline ulaşabilmek için kür işlemini içermektedir (Aksoy, 2002).

Katkı maddeleri kullanılarak elde edilen karışımlarda önemli sayılabilecek mekanik dayanım artışı olmadığı halde, bazı mühendislik özelliklerinde olumlu gelişmeler elde edilmesine “iyileştirme” denir. Bu anlam içinde, iyileştirmeyi karakterize eden değişiklikler plastisite indisinin düzenli sıkıştırma işleminde optimum su muhtevası, süspansiyonlarda deflokülasyona karşı direnç ve kohezyonun artmasıdır. Bu sırada mekanik dayanım da belirgin ölçüde artmışsa sistemde elde edilen özellik değiştirilmenin, iyileştirmeden de öteye geçtiği kabul edilir. Stabilizasyon terimiyle anlatılmak istenen de bu ikinci aşamadır (Balta, 1984).

Yolların stabilizasyonu eski çağlardan beri ilkel olarak yapılmaktadır. Orman yollarında stabilizasyona olan ihtiyaç ormancılık çalışmalarının zor iklim şartları ve kötü zeminler üzerinde yapılmasının gerekliliğine paralel olarak, son iki yüzyıldan beri orta Avrupa ormanlarında açıkça ortaya çıkmıştır. Konuyla ilgili ilk yaklaşım 50, yıl kadar önce

stabilizasyon için kireç, kireç+tüf, kireç+NaCl karışımları, portland çimentosu ve RRP-235 içeren malzemelerin kullanılması ile ortaya çıkmıştır.

### 1.7. Stabilizasyon Yöntemleri

Zeminin olumsuz etkilerini gidererek kaplamada oluşabilecek bozulmaları önlemek veya zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirerek kaplama kalınlığını azaltmak amacıyla zemine çimento, kireç, uçucu kül, tabii puzolan, vb gibi maddeler katılarak yapılan zemin ıslahına kimyasal stabilizasyon adı verilmektedir. Her iki amacın da zeminde stabiliteyi ve deformasyona karşı direnci artırdığı ifade edilmektedir (Tunç, A., 2001).

Zeminlerin içine değişik katkı maddeleri karıştırarak bazı fiziksel özelliklerini değiştirmek ve buna bağlı olarak belirli mühendislik özelliklerini iyileştirmek mümkün olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri arasında kireç, çimento, uçucu kül, asfalt ve bazı kimyasal maddeler sayılabilir (Özaydın, 1989).

#### 1.7.1. Derin Kompaksiyon

Derin kompaksiyon, kohezyonsuz gevşek zemin kitlelerinin titreşimler sonucu sıkılarak hacim kaybına uğraması probleminin çözümünde başvurulan bir yöntemdir. Kompaksiyon genel titreşim verilerek veya dinamik sonda yardımıyla yapılmaktadır. Bu işlemler sonucu bazen zeminin hacim kaybı öylesine büyüktür ki, boşluk ve çukurların çakılla doldurulması gerekebilir. Derin kompaksiyon patlama, sondalama ve tokmaktama olarak 3 ayrı biçimde uygulanır. Bu işlemler, zemin tabakasını gevşettiği için işlemler tamamlandıktan sonra üst tabakanın yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

#### 1.7.2. Önceden Yükleme İle İyileştirme

Önceden yükleme ile iyileştirmenin 4 değişik yöntemle yapılabileceği ifade edilmektedir (Tüdeş, 1996). Bunlar;

*Ön Konsolidasyon*; ön konsolidasyon siltli ve killi zeminlerin taşıma gücünü arttırmak amacıyla zeminin kullanımdan önce yüklenmesiyle uzun sürede oluşacak

oturumların hızla oluşturulmasıdır. Bu ön yükleme sonucunda zemin belirli bir miktar sıkışacağından yani aşırı konsolide olacağından yapı yükleri altında az oturma oluşacaktır.

*Drenler yardımıyla konsolidasyonun hızlandırılması;* ön konsolidasyon için yeterli zamanın olmaması ve araziye yığılması, gerekli dolgu yüksekliğinin ekonomik sınırlar içinde kalmaması durumunda, ön konsolidasyonun düşey drenlerle hızlandırılması yoluna gidilebilir. Bu yöntemin birincil konsolidasyonun etkin olduğu zeminlerde uygulanabileceği organik kil ve siltler gibi ikincil konsolidasyonun etkin olduğu zeminlerde ise uygulanamayacağı belirtilmektedir.

*Kireç kuyularıyla stabilizasyon;* Su muhtevasının % 50'nin üzerindeki siltli ve killi siltlerde verimli bir stabilizasyon tekniği olarak kabul edilir. Bunun için belirli aralık, çap ve derinliklerde kuyular açılarak içleri sönmemiş kireç ile doldurulmaktadır. Kireç su ile karşılaşınca CaO su emmekte ve hacmi artan kireç kuyu duvarlarına yanal basınç uygulamaktadır. Öte yandan bu hacim artışının kontrol altında tutulması gerekliliği üzerinde durulmaktadır (Tüdeş, 1996).

*Elektro-Osmoz;* daha çok siltli zeminlerin drenajı ve ön konsolidasyonu için kullanılan bir yöntemdir. Teorik çözümü başarı ile yapılmış olduğundan proje maliyeti uygulamadan önce çok iyi tahmin edilebilirken, uygulaması oldukça ustalık istemekte ve kısıtlı hacimlerde uygulanabileceği ifade edilmektedir (Stamatopoulos ve Kotzias, 1985).

### 1.7.3. Enjeksiyon Teknikleri

Zeminin kayma direncini arttırmak ve geçirimsizliğini azaltmak için zemin kitlesine basınçla sıvı yollama işlemine enjeksiyon denir. Bu işlem, kayaç çatlakları ve zemin boşluklarının doldurulması, kısmen gevşek zemin bölgesinin sıkıştırılması için uygulanabilmekte, bu işlemler için 5 değişik şekil önerilmektedir..

*Taneli Enjeksiyon;* En çok kullanılan enjeksiyon sıvıları saf çimento-kil karışımlarıdır. Karışımın su-çimento oranı 1/2'den 6/1'e kadar yükselebilir. Bu konuda dikkat edilecek husus, eğer sızıntı enjeksiyonu isteniyorsa seçilecek karışımın özelliklerinin ortamınki ile bağdaşmasıdır.

*Kimyasal karışım enjeksiyonu;* kimyasal enjeksiyon türleri daha ince zeminlerde sızıntıyla uygulanabildiği ve viskoziteleri daha düşük olduğu için taneli enjeksiyona üstünlük sağlar. Viskozitelerinin düşük olması malzemenin donma zamanını belirlemekte faydalı olmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan maddeler silikatlar, lignin, reçine

akrilamid ve üretandır. Ortamdaki ince taneler ( $<74\mu\text{m}$ ) % 10'dan azsa sızıntı enjeksiyonu tercih edilir. Eğer ortamda % 20'den fazla silt ve kil mevcutsa kimyasal enjeksiyon daha uygundur. Kimyasal enjeksiyon Joosten ya da Guttman yöntemi olarak adlandırılan iki kademeli sistem ve tek kademeli sistem olmak üzere iki değişik yöntemle uygulanır.

*Kompaksiyonlu enjeksiyon;* bu yöntemde enjeksiyon malzemesi olarak çok yüksek viskoziteli kil, çimento vb. gibi maddeler kullanılmaktadır. Zemine gönderilen enjeksiyon malzemesi yüksek basınçta ampullerle çevredeki zeminin konsolide olmasını ve sıkışmasını sağlamaktadır. Enjeksiyon malzemeleri yönünden ekonomik, enjeksiyon pompasının temini yönünden pahalı olan bu yöntem, özellikle uygun bir katman yükü altındaki silt ve kumlu siltlerde verimli olmaktadır (Van Impe, 1989).

*Jet enjeksiyonu;* Japonya'da geliştirilen ve başarı ile uygulandığı ileri sürülen bu sistem çıkış basıncı 150-700 atmosfer olan su jetinden esinlenerek geliştirilmiştir. Düşey basınçla sondaj deliği istenilen derinliğe indirildikten sonra, yanal olarak yönlendirilen su jeti vasıtasıyla 3 m çaplara ulaşabilen kuyularda zemin ile katkı malzemesi karıştırılır. Yöntem, hem kum hem de killerde uygulanabilmesi ve yerinde gerçekleştirilerek ortamın kontrolünün de sağlanması bakımından önem arz etmektedir (Tüdeş, 1996).

#### 1.7.4. Işıl İşlemler

Doygun olmayan silt ve killer buldukları ortamın sıcaklığının limitlerin üzerine çıkarılması ile dayanım kazanabilmektedir. Bu konuda iki yöntem önerilmektedir (Tüdeş, 1996).

*Yüksek sıcaklıkta stabilizasyon;* Ortam  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtıldığında zeminin suya isteği azalacağından bu belki ilk aşamada düşünülebilecek geçici bir çözüm olabilmektedir. Killer  $400\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda büyük ölçüde nem almayacak konuma gelmekte,  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ise faz değiştirerek tuğla haline dönüşmektedir.

*Dondurma yöntemleri;* Kuyu temel ya da tünel gibi önemli kazılarda eğer zemin kısa bir süre için bile kendini tutamayacak durumda ise bölgenin dondurulması yoluna gidilmektedir. Bu durumda dondurma işlemi devam ettiği sürece zemine kayma direnci kazandırmaktadır.

Dondurma işleminde öncelikle ortamın ısı ile ilgili özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu bilgiler ışığında soğutma sisteminin özellikleri belirlenmelidir. Daha sonra



dondurulmuş ortamın oluşacak gerilmeler altında yapım süresince dengede kalıp kalamayacağı araştırılmalıdır.

### 1.7.5. Ortamın Donatılması

Donatı günlük hayatımıza yerleşmiş bir kavramdır. Kerpicin içindeki saman, arabamın çamurda yürütmesi için yola serilen dallar donatının en basit örnekleridir. Betonarme veya donatılı zemin ise bu konuda bilimselliği kabul edilmiş yöntemlerdir. Zemin için serbest ya da ön gerilme ile yerleştirilen yabancı cismin, son karışımda basınç, çekme, eğilme ve makaslama direncini artırması ve geçirimsizlikle, sıkışabilirliği azaltması istenmektedir. Taş kazıkları, ankraj, kök kazıkları, çivileme, donatı ve geotekstil uygulamaları en çok bilinen donatı yöntemleridir.

*Taş kazıkları;* 0,6-1 m çaplı olarak imal edilen taş kazıkları, su jeti ya da kuru titreşen silindirlerin zemine indirilmesi sonucu elde edilen kuyularda inşa edilmektedir. 20 m derinliğe kadar uygulanabilen taş kazıklarında, dolgu malzemesinin tipik çapı 20-75 mm arasındadır. Yumuşak zeminlerde taş kazıklar basınca çalışarak normal kazıkların işlevini arada bağlantı olmaksızın yerine getirebilirler. Dolgu altında ve yamaçlarda kullanıldıklarında ise makaslama direnci gösterirler. Ayrıca kazıkların diğer işlevi olan düşey yükleri taşıma da taş kazıklar tarafından yerine getirilir.

*Ankraj ve çivileme tekniği;* daha önce genellikle tünellerde kullanılmakta olan ankraj sistemleri temel mühendisliğindeki gelişmeler sonucunda aynı sistemin tünel dışında uygulanmasını gündeme getirmiştir. Ankraj sistemleri yüzeyler arasında sürtünmeyi sağlama, arttırma yanında, çevredeki zemine yapışmayı sağlama işlevine de sahiptirler. Ankraj, zemine bir şekilde bağlanıp sonradan gergi verilen, esas itibariyle bir çekme kazığı görevi yapan yapı elemanıdır. Ortamın düşey dengesini sağlamak ve kayma direnci yükseltmek amacıyla kullanılırlar. Bu sistem, baraj gövdesinden, perde duvara kadar değişen geniş bir kullanım alanına sahiptir (Van Impe, 1989).

*Kök kazıklar;* bu kazıklar genellikle ortalarında bir demir yerleştirilerek, yaklaşık 75-250 mm çaplarında yerinde dökülerek elde edilmektedir. Donatının etrafı yüksek dozlu küçük agregalı betonla doldurulmakta, çivileme tekniğinden farklı olarak delme sırasında kaplama borusu deliğe indirilmekte ve dışarı alınırken ek beton basınçla pompalanmaktadır.

*Donatılı zemin*; kısaca belirli kompaksiyon ve tane dağılımlarında basınca dayanımlı zeminle, çekmeye dayanımlı yabancı malzemelerin bir araya getirilmesidir. Bu yöntem, genelde dayanma yapılarında kullanılmakla birlikte köprü ayakları, dolgu ve küçük barajlar, yol temelleri, depo vb. gibi yapılarda da uygulanabilmektedir. Burada kullanılan donatı çelik, alüminyum ve plastik olabilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde uygun olmayan yöntem için zeminin plastisite indisi 6'dan küçük ve tane çapının % 85'i 15 mikrondan büyük olması gerekmektedir (Tüdeş, 1986).

### **1.7.6. Katkı Maddeleri İle Stabilizasyon**

Eski çağlardan günümüze kadar insanoğlu elindeki problemlili zeminlerin içerisine değişik malzemeler karıştırarak bu sorunları ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. Geçirimsizliği ve suya isteği azaltmak, hacim değişimini en aza indirmek, kayma direncini arttırmak adına yapılan bu çalışmalarda her türlü madde (hint yağı, fosforik asit, saman, tuz vb.) kullanılmış ve bir çoğunda ise bilimsellikten uzaklaşmıştır.

Sonuçta edinilen tecrübeler, bu alanda hem ucuzluk hem de bulunabilme kolaylığı açısından çimento, kireç, bitüm, fosforik asit, reçine, polimerler ve kalsiyum bileşikleri gibi maddelerin üstünlüklerini ortaya koymuştur. Bu tür stabilizasyon öncelikle ulaşım mühendisliğinde uygulama görmüştür. Üstyapıda veya temel gibi yerlerde başarıyla kullanılmış, mühendisler ve karayolu çalışanları yerel ve en düşük masrafla çözüm için bu yolu tercih etmişlerdir (Tüdeş, 1989).

#### **1.7.6.1. Kireçle Stabilizasyon**

İnce taneli zeminlere kireç karıştırılması, zeminin plastisitesinin azalmasına ayrıca kil mineralleri ile kireç arasında ortaya çıkan pozzolanik reaksiyon sonucu meydana gelen bir çeşit çimentolanma nedeni ile zeminin mukavemetinin artmasına yol açmaktadır. Söz konusu kimyasal reaksiyonlar çevre koşullarının (nemlilik ve ısı gibi) etkisi altında zamana bağlı olarak değiştiği için zeminin mukavemeti de zamanla artmaktadır.

Genel olarak, kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, kabarma potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını, dayanıklılığının artmasını (çevre koşulları etkisi altında zeminin özelliklerinin

bozulmasının daha sınırlı kalmasının) sağlamaktadır. Ayrıca, plastisitenin azalmasına yol açtığı için arazi çalışma koşullarının iyileşmesi sonucunu doğurmaktadır. Kireç stabilizasyonu daha yaygın olarak killi zeminlerden yapılan dolgularda (özellikle yol inşaatlarında) kullanılmaktadır (Özaydın, 1989).

Kireç stabilizasyonunda en zararlı etken zeminde bulunabilecek organik malzemedir. Organik madde ve sülfat iyonunun varlığı önceleri olumsuz etkisini belli etmemekte, ancak daha sonra kuruma-ıslanma olduğunda zemin ufalanmaktadır (Van Impe, 1989).

Geniş kapsamlı bir projede uygulanacak katkı oranına karar verebilmek için bir ön çalışma yapmak gerekir. Bu konuda yapılan çalışmalar özellikle % 5-10 arasındaki oranlarda kireç katkısının, kür sürelerine bağlı olarak en verimli oranlar olduğunu ortaya koymuştur (Tüdeş, 1996).

Kireç pillerini, killi zeminlerin, hem düz zeminde hem de şevlerde yerinde stabilizasyonu için yapılan bir çalışma sonunda, sönmüş ve sönmemiş kireç kullanımının zemin şartlarına bağlı olarak önemli derecede stabilite sağladığı ve yine sönmemiş kireç pillerinin araziye enjekte edilmesiyle killerin su içeriğine bağlı olarak 400-500 kPa taşıma mukavemeti sağladığı belirtilmektedir (Rogers ve Glendinning, 1997).

Hieckel (1997), yaptığı çalışmada kurutulmuş kireç çamuru ve sönmüş kirecin killi toprak, siltli killi balçık, killi balçık ve siltli kil zeminlerin zemin türüne ve nem içeriğine bağlı olarak iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Kireç zemin mühendisliği özelliklerinin iyileştirilmesinde ve yapılarda oluşabilecek hasarları önlemek için etkili bir şekilde kullanılmakta, kohesif zeminler kireçle muamele edildiğinde genellikle şişmenin azaldığını, plastiklik, elle şekillendirme özelliği ve taşıma kapasitesini iyileştirdiği ifade edilmektedir (Locat vd., 1990).

Bağlayıcı zeminlerin özelliklerinin düzeltilmesi amacıyla uygulanan kireç stabilizasyonu yol inşaatında; birinci olarak altyapıda zemin özelliklerinin düzeltilmesi, ikinci olarak da yol alt ve üstyapısındaki bir tabakanın stabilize edilmesi amacıyla kullanılır. Birinci halde materyalin stabilitesi optimal sıkıştırma suretiyle elde edilirken, ikincinin de ise zeminin stabilitesi, katkı maddesinin etkisiyle ortaya çıkmaktadır (Erdaş, 1997).

### 1.7.6.2. Çimento ile Stabilizasyon

Çimento çok yüzeysel organik topraklar ve ağır killere haricinde hemen hemen bütün zeminlerde stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilir. Çimentonun kendi bünyesinde bulunan silika, stabilizasyon için gerekli puzolanik maddeyi oluşturduğundan, kireçteki gibi zeminin silika içermesine gerek yoktur.

Çimento stabilizasyonu bir dereceye kadar diğer stabilizasyon şekillerinden farklıdır. Çimento gerçekten zemini sertleştirir ve malzemenin su yalıtımı, içsel sürtünme ve kohezyonundan daha ziyade yapısal direncinde etkili olur (Tüdeş, 1996).

Karışımın karakteristiği ile ilişkili olarak çimento içeriği, orijinal zeminin veya hidrasyon ürününün özellikleri ile saptanmaktadır. Karışımındaki çimento oranı arttığında, dayanım da artacaktır. Dayanım, süreyle de artış gösterecektir. Yapımdan sonraki birinci ve ikinci günde bu artış hızlı olup, sonra tabakanın küre olması ile dayanım artış hızı azalacaktır. Çimento içeriğinin seçimi; gereken dayanıma, karışımın durabilitesine ve agreganın sağlamlığına bağlı olmaktadır (Aksoy, 2002).

Çimento katkı yüzdesi 2-4-6-8 olarak seçilebilir. Karışım tamamlanır tamamlanmaz sıkıştırılmalıdır. Sıkıştırılmada gecikme kaybı, malzemenin sıkıştırılma karakteristiklerine yansımaktadır. Stabilize malzemenin sıkıştırılmadaki gecikmelere karşı olan duyarlılığını saptama, karışım tamamlandıktan iki saat süre sonunda diğer bir sette uygulanan deneylerle belirlenir (Transport Research Laboratory, 1993).

Çimento ile zemin stabilizasyonu konusunda yapılan bir çalışmada çimentonun %5 ile %10 arasında katılmasıyla zeminlerde çok iyi bir direnç ortaya çıktığı belirtilmektedir (Aytekin ve Nas, 1998).

Çimento ile stabilizasyon orman yolları inşaatında alt ve üstyapıda kolaylıkla uygulanabilir. Altyapıda kaide olarak en üst tabaka çimento ile stabilize edilir. Üstyapıda çimento stabilizasyon tabakası ana zeminden yol tabakalarının geçiş tabakası olarak, temel tabakasının üst kısmında ve bütün temel tabakası olarak uygulanabilir (Erdaş, 1997).

### 1.7.6.3. Bitümlü Stabilizasyon

Taneli malzemelerde kohezyon sağlayan bitüm genellikle yollarda ve temel malzemesine uygulanan bir stabilizasyon çeşididir. Çimento ve kirece karşı daha pahalı olması nedeniyle daha az uygulama alanı bulmuştur.

Bitümlü stabilizasyon serbest basınç, CBR, Florida taşıma ve koni stabilite deneyleri ile değerlendirilmektedir. En uygun katkı yüzdesi ya da minimum direnç bu şekilde saptanmaktadır.

Özellikle, plastisite indisi 18'den küçük olan zeminler ile tane çapının % 10-50'si 76 mikrondan küçük olan zeminler için daha uygun bir yöntemdir. Bu büyüklükteki taneler rahatça asfaltla kaplanacağı gibi bitüm boşluklarını tıkama işlevini de yerine getirecektir (Tüdeş, 1996).

Genellikle kum çakıl gibi nispeten ince taneli materyal içeren zeminler bitümlü bağlayıcılarla stabilize edilirler. Stabilize edilecek materyal bir ön hazırlığa tabii tutulmaz. Fakat ince tanelerin bağlanması ve bağlayıcı maddenin tutuculuk niteliğini artırmak için genellikle kalsiyum hidroksit  $\text{Ca(OH)}_2$  karıştırılır (Erdaş, 1997).

#### 1.7.6.4. Diğer Katkı Maddeleri İle Stabilizasyon

Çimento, kireç ve bitüm dışındaki tüm malzemeler, zeminlere ancak özel şartlar altında ve kısıtlı hacimlerde ilave edilebilmektedir. Günümüze kadar önerilmiş olan bir çok katkı maddesinden ekonomik olarak tercih edilmiş olanlar uçucu kül, fosforik asit, fosfor tuzları, reçine ve polimerler,  $\text{CaCl}_2$  ve  $\text{NaCl}$  tuzları, lignin ve kostik soda, olarak sıralanabilir.

Uçucu külle, siltli ve kumlu zeminler karıştırılarak elde edilen karışımlar üzerinde % 3, 6 ve 9 oranlarında çimento ilave edilerek yapılan stabilizasyon çalışmalarında, basınç dayanımı zamana bağlı hiperbolik bir yapı göstermekte, iyileşme, çimento oranının artmasıyla ve uçucu kül oranının azalmasıyla artmaktadır (Karinaj ve Havanagi 1999).

ASTM C sınıfı uçucu külü tek başına kullanılabilceği gibi, çimento veya kireç ile birlikte de kumlu ve killi zeminlerin stabilize edilmesinde kullanılabilir. ASTM C Sınıfı uçucu külün yalnız veya portland çimentosu ile birlikte, kumlu zeminlerde granülasyona bağlı olarak kullanılması mümkündür. Uçucu külün yalnız başına, siltli kum veya kumlu silt zeminlerdeki stabilizasyonunun başarısı ise iyi granülasyona sahip materyallerin reaksiyon özelliklerine bağlı bulunmaktadır. Bunun yanında, killi zeminlerde ise uçucu kül miktarının artmasına paralel olarak iyileşmenin ileri boyutlara ulaştığı ifade edilmektedir (McManis ve Arman, 1987).



Yapılan bir çalışmada kağıt fabrikası atığı olan kireç çamurunun, % 5-10 arasındaki oranlarda katkıli çimentoya (KÇ 32.5) katılmasıyla oluşturulan numunelerin iyi basınç dayanımı gösterdiği söylenmektedir. Buna bağlı olarak kireç çamuru orman yolları üstyapısında kaplama tabakasında kullanılabilceği belirtilmektedir (Eroğlu vd., 2003a).

NaCl ve CaCl<sub>2</sub> tuzları zeminin birim ağırlığını dolayısıyla kayma direncini arttırdığından yollarda kullanılabilceği, boşluk suyunda artan tuz yoğunluğu nedeniyle, donma derecesini düşürmekte, buna bağlı olarak donma sonucu oluşacak zararlar ise azalmaktadır.

Ticari adı Calgon olan sodyum fosfor tuzlarının donmaya karşı duyarlı olan zeminlerde etkin olduğu ileri sürülerek stabilizasyon malzemesi olarak önerilmiştir. Bu tuzlardan sodyum tripolifosfat donmaya karşı en duyarlı zeminlerde bile etkili olmuştur.

Reçineler % 1-2'lik uygulama ile zeminin suya karşı isteğini azaltabilen stabilite malzemeleridir. Daha çok Avrupa ülkelerindeki uygulamalarda kullanılan doğal reçineler organik ayrışmaya uğraması nedeniyle daha sonra yapay reçineyle yer değiştirmiştir.

Polimerler ise çok çeşitlidir. İşlevleri birbirinden farklı olan polimerler katyon, anyon ve iyonik olmayan biçiminde üç ayrı grupta toplanabilir (Tüdeş, 1996).

Kağıt endüstrisi atığı olan kireç çamurunun kumlu kil, balçıklı kil ve ağır killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir. Kireç çamuru katkısı bu zeminlerin Atterberg limitlerini, kesme mukavemetlerini, sıkışabilirlik ve permeabilite özelliklerini iyileştirmektedir (Eroğlu vd., 2003b).

Bir çok kimyasal bileşimin kumlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanım imkanı bulunduğu söylenmektedir. Bu bileşikler; üre formaldehit, üre-fenol formaldehit, üre furfurool formaldehit, polivinil alkol, polivinil asetat, fenietilen butatien kauçuk, sülfanatlı üre melamin formaldehit, üre formaldehit, sodyum klorit ve sodyum karbonat bileşiklerdir. % 2 oranında sülfanatlı üre melamin formaldehit ve üre formaldehit karışımı ile % 0.25 oranında NaCl 2.4 N/mm<sup>2</sup> basınç dayanımı vermektedir. Bu değer de yol stabilizasyonunda oldukça geçerli bir basınç dayanımı anlamına gelmektedir (Shawqui ve Neaz 1998). Ayrıca magnezyum oksit (Mg(OH)<sub>2</sub>), şişen killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir. Magnezyum oksit kullanımı sonucu, değişik kimyasal etkileşimler meydana geldiği ve killi zeminlerin şişme özelliğini azalttığını belirtmiştir (Xeidakis 1996).

Odun Endüstrisinde değerlendirme bakımından kendinden iyi bir şekilde yararlanılmayan bir madde de lignin olmaktadır. Kağıt üretiminde kullanılan odun



hammaddesinin aşağı yukarı yarısı lignin maddesi halinde ya atık sularında kalmakta ya da fabrika ocaklarında yakılarak ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. 1960 yılındaki dünya selüloz üretimi toplamını oluşturan 40 milyon ton selülozun elde edilişi sırasında en az 25 milyon ton lignin geriye kalmıştır. Bu rakamın günümüzde daha ileri boyutlara ulaştığı bilinmektedir. Buna karşılık ortaya çıkan bu büyük miktardaki ligninin ancak % 0.5'inden sepi maddesi, kauçuk üretiminde dolgu maddesi, şehir yollarında meydana gelen tozları tutan bir madde olarak yararlanılabilmektedir (URL-1, 2003).

Ligninin büyük ölçüde kullanılabilmesini sağlamak amacıyla şimdiye kadar alınmış 2000 patent dahi bu problemi çözmeye yetmediği gibi Amerika'da ve diğer ülke firmaları tarafından lignin araştırmaları için milyonlarca dolar harcanmış ve bu ise doyurucu bir sonuç olamamıştır (URL-1, 2003).

### 1.8. Türkiye'deki Seka İşletmeleri

Ülkemizde Seka Genel Müdürlüğüne bağlı olarak 7 İşletme Müdürlüğü faaliyet göstermektedir. Bunlar; Afyon, Akdeniz, Aksu, Balıkesir, Çaycuma, İzmit ve Kastamonu İşletmeleridir. Bu işletmelerin ürettikleri ürün ve üretim kapasiteleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Ülkemizdeki Seka İşletmeleri, üretim türleri ve kapasiteleri

İşletme Adı	Üretim Türü	Üretim Kapasitesi (ton/yıl)
Afyon	Saman ve Kamış Selülozu	50 000
Akdeniz	% 100 Kraft Selülozundan üretilen Kraft Layner	155 000
	Kraft Torba Kağıdı	90 000
	Kraft Selülozu	83 700
	Kraft Layner Selülozu	145 700
Aksu	Gazete Kağıdı	82 500
	Mekaniksel Odun Hamuru	66 000
Balıkesir	Gazete Kağıdı	100 000
	CTMP	80 000
Çaycuma	Çimento Torba Kağıdı	75 000
	Esmer Kraft Selülozu	70 000
İzmit	Kağıt Karton	120 000
	Eski Kağıt Kullanımı	45 000
Kastamonu	Sigara ve Filtre Kağıtları	10 200
	Kendir Selülozu	4 160
<b>Toplam Üretim Miktarı</b>		<b>1 177 260</b>

### 1.8.1. Seka Afyon-Çay İşletme Müdürlüğü ve Atık Özellikleri

SEKA Afyon İşletme Müdürlüğü 1 Mayıs 1979 tarihinde işletmeye açılmış olup, bu işletme, kamyş ve samandan selüloz üretmek amacıyla kurulmuştur. 4 Mayıs 1979 tarihinde deneme üretimine başlamış, düzenli üretime ise 1980 yılı Şubat ayından itibaren geçmiştir. SEKA'nın yedi müessesesi arasında yalnızca selüloz üreten tek fabrikadır.



Şekil 5. Afyon/Çay Seka İşletmesi

Afyon/Çay Seka İşletmesinde alkali pişirme yöntemlerinden olan sülfat (Kraft) yöntemine göre selüloz üretilmektedir. Bu işletmede % 65 buğday sapı, % 35 göl kamyş kullanılmaktadır. Buğday sapındaki silis miktarı % 4.5 (Deniz, 1994) göl kamyşındaki silis oranı ise % 3.38'dir (Kırcı, 2000). Bu silis miktarları odundaki silis miktarının % 1'den aşağıda olduğu düşünülürse çok yüksektir.

Kağıt hamuru üretimi için buğday sapları ve göl kamyş sülfat yöntemiyle pişirildiğinde, hammadde bünyesindeki silis bileşenleri çözünerek siyah çözeltiye geçerler ve özellikle geri kazanma ünitesinde bir çok probleme neden olurlar. Buğday saplarındaki silis bileşenlerinin neden olduğu problemlerden kurtulmak için; saplar fabrikaya girmeden ön desilikasyondan geçirilmiş ve silis % 4.5 dan % 1.7'e düşürülmüştür (Eroğlu ve Deniz, 1993). Afyon/Çay Seka İşletmesinde siyah çözeltide pH:11-12, NaOH: 6-8 g/lt, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: 9-11 g/lt, silika: 4-5 g/lt, Na<sub>2</sub>S: % 1-2 ve toplam katılar % 9-11 arasındadır (Deniz, 1994).

Siyah çözeltideki yüksek silis miktarı ve düşük alkali oranı, çözeltinin istenen katı madde konsantrasyonuna kadar buharlaştırılmasını engeller. Siyah çözelti belli katı madde

konsantrasyonuna kadar buharlaştırıldıktan sonra soda kazanında yakılarak buhar üretimi sağlanır. Siyah çözeltide bulunan 4.32 g/L silisin, 0.88 g miktarı buharlaştırıcılardaki biriken tabakada 4.34 g miktarı da kostikleştirme işleminde çöken ve dışarıya depolanan kireç çamurunda kalmaktadır. Silisin buharlaştırma kademesinde çökmemesi için alkali oranının çözeltide 10 g/L den yukarı olması gerekir. Fabrikada siyah çözelti çoklu buharlaştırıcılara % 10 katı madde konsantrasyonunda girer. % 46 konsantrasyonunda çıkar. Sirkülasyon için santrifüjlü pompalar kullanılır. Daha sonra direkt buharlaştırıcılarda konsantrasyon % 55-58'e çıkartılır. Oduna dayalı kağıt hamuru fabrikalarında buharlaştırma ünitelerindeki kabuk maddesinin % 50 den fazlası sodyum karbonat ve sodyum sülfattan meydana gelir. Konsantre siyah çözelti soda kazanında püskürtücü spreylere kazan içerisine püskürtülerek termokimyasal bir reaksiyonla yakılır. Konsantrasyon ve viskozite silisten dolayı istenen seviyede yüksek tutulmadığından ilave fuel-oil'e ihtiyaç duyulur. Soda kazanına giren kaskatın pH'sı 11.1, kuru maddesi % 53.5'tir. Yanma sonucu elde edilen külde NaOH oranı % 13, Na<sub>2</sub>S % 17.5, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> % 51.5, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> % 2.4 oranındadır (Deniz, 1994).

Afyon/Çay Seka İşletmesinde günde 200 ton konsantre siyah çözelti işlenmekte, 12-13 m<sup>3</sup> siyah çözelti bir saatte yakılmakta ve bu miktar için 1 ton fuel oil harcanmaktadır. Elde edilen küller suda çözündürülerek yeşil renkli çözelti elde edilmektedir. Bu çözelti Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve NS den meydana gelmekle birlikte safsızlıklardan arındırmak yeşil çözeltiye sönmüş kireç Ca(OH)<sub>2</sub> katılarak çözeltideki Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aşağıdaki reaksiyonla NaOH'e dönüştürülmektedir. Bu NaOH pişirmede tekrar kullanılır ve beyaz renklidir.



Çökelerek ayrılan CaCO<sub>3</sub> kireç fırınına yakılarak sönmemiş kirece (CaO) çevrilir. Yeşil çözeltide 8 gr/lt den daha yüksek oranda silis bileşenleri bulunduğundan NaOH çözeltisindeki CaCO<sub>3</sub> oranı artış gösterir. Ayrıca yeşil çözelti kostikleştirmeden sonra çökme özelliği gösterir. Çökelen çamur yüksek oranda sodyum oksit (Na<sub>2</sub>O) içerir. Afyon/Çay Seka İşletmesinde çökelen çamurun içinde yüksek oranda sodyum dioksit bulunması nedeniyle SiO<sub>2</sub>, CaO ile CaSiO<sub>3</sub> formunda birleşerek kirecin üstünü camsı bir yapıda kaplar ve bu durumda kireç suyla tam reaksiyona giremez. Kireç çamurunun yakılması yüksek oranda SiO<sub>2</sub> den dolayı mümkün olmadığından kireç fırınına her devirde % 17 oranında kireç verilir. Fabrikada kostikleştirme kademesinden sonra kireç çamurunda

% 11.8 silis, % 33 yanma kaybı, % 35.5 CaO, % 5.5 Na<sub>2</sub>O bulunmaktadır. Bu yüksek silisli kireç, kireç fırınında istenen oranda yakılamadığından bir miktarı araziye depolanmaktadır. Afyon/Çay Seka İşletmesinde günde 3.5 ton kireç çamuru araziye depolanmaktadır (Deniz, 1994).

Bu durum işletme için çamurun taşınıp depolanması ve depolanacak yerin temini konularında problem oluşturmaktadır. Ayrıca, kireç çamurunda % 2-3 oranında NaOH bulunduğundan yer altı ve yer üstü sularının kirlenmesi tehlikesi ortaya çıkmaktadır. Bu yönüyle kireç çamurunun orman yolları için stabilizasyon amaçlı kullanımı sonunda, çevreye olan zararlı etkisi azaltılabilecek ve işletme için ekonomik fayda sağlanacaktır.

### 1.8.2. Odun Hamuru Üretim Yöntemleri

Kağıt hamuru; mekanik, yarı kimyasal ve kimyasal hamur üretimi olmak üzere başlıca 3 değişik yöntemle yapılmaktadır. Mekanik odun hamuru üretimi, taşlı liflendiricilerde ve rafinörde yapılmaktadır. Yarı kimyasal odun üretiminde, nötral sülfat, yarı kimyasal asit sülfat, yarı kimyasal bisülfat, yarıkimyasal kraft hamuru şeklinde değişik yöntemler mevcuttur. Kimyasal kağıt üretiminde ise sülfat (Kraft), sülfat yöntemi olmak üzere iki değişik yöntemle yapılmaktadır. Çalışmalarda kullanılan kireç çamurunun alındığı Seka Afyon-Çay İşletmesi Sülfat (Kraft) yöntemle selüloz ürettiğinden, burada bu yöntem kısaca anlatılmıştır.

Sülfat yönteminde kullanılan kimyasal maddeler NaOH ve Na<sub>2</sub>S olup kimyasal madde oranı yarı kimyasal kağıt hamuru elde edildiğinde % 6-10 ve kimyasal hamuru elde etmek için de % 10-15 arasında alınmaktadır. Maksimum sıcaklık 165-170 °C ve sıcaklıkta pişirme süresi 2 saattir. Endüstriyel uygulamalarda çözelti/sap oranı 3/1 ile 3.5/1 dolayındadır.

Toplam kimyasal madde oranı % 6-16 arasında değiştirilerek 170 °C'de 2 saat süre ile çözelti/sap oranı 7/1 alınarak buğday saplarından yapılan laboratuvar denemelerinde kullanılan kimyasal madde oranı arttıkça verimin azaldığı belirtilmektedir. En az kimyasal madde ihtiyacı % 12 olmuştur. Elde edilen kağıt hamuru soda yöntemi ile elde edilenden daha zor ağartılmakta, verim soda yönteminden daha yüksek olmaktadır (Trivedi ve Meghawati, 1987).

Toplam % 15 oranında kimyasal madde kullanılarak 100-140 °C sıcaklıklarda yapılan denemelerle sülfat yönteminde süre, sıcaklık gibi etkenlerin lignin çözünmesi ve

karbonhidratlar üzerine etkisi incelenmiştir. Buna göre lignin çözünmesi sıcaklığa bağlı olup ilk 60 dakikadan sonra çözünme artmamaktadır. Oysa süre uzadıkça karbonhidratların çözünmesi devam etmekte, dolayısıyla pişirme süresi karbonhidratların çözünmesine önemli oranda etki yapmaktadır. Diğer taraftan, sıcaklığın artması kağıdın kopma uzunluğuna olumsuz yönde etki etmektedir. 140 °C’de 7710 m olan kopma uzunluğu, 170 °C’de 6800 m’ye düşmektedir. Eğer sıcaklık yüksek tutuluyorsa bu durumda sürenin kısa tutulması tavsiye edilmektedir (Atchinson, 1987).

**Sülfat yönteminin avantajları;**

- Bütün odun türleri hammadde olarak değerlendirilebilir.
- Pişirme süresi kısadır.
- Hamur yüksek direnç özelliklerine sahiptir.
- Atık çözelti (Siyah çözelti) içinde pişirmede kullanılan kimyasal maddeleri geri kazanmak kolaydır.
- Kağıt hamuru üretimi sırasında Tall-oil ve sülfat terebentin yağı gibi reçine kaynaklı kıymetli yan ürünler elde edilmektedir.

**Sülfat yönteminin önemli problemleri ise şunlardır;**

- Ekonomik ölçekte çalışan bir fabrikanın kuruluş masrafları yüksektir.
- Hamurun rengi koyudur ve ağartılması zordur. Tam ağartılmış kağıt hamuru elde edebilmek için klorlu bileşiklerin kullanılması kaçınılmazdır.
- İğne yapraklı ağaç odunları kullanıldığında sülfat yöntemine göre verim daha düşüktür.
- Pişirme sırasında “uçucu kükürt bileşiklerinden” kaynaklanan kötü kokulu gazlar havayı kirletir.
- Hamurun dövülme kabiliyeti yavaş olup, dövme işlemi sırasında fazla enerji tüketilir (Kırcı, 2000).

## **1.9. Çimento**

Çimento hidrolik bir bağlayıcıdır. Yani su ile reaksiyonu sonucu sertleşir ve sertleştikten sonra suyla temas edecek olursa yumuşamaz (Oruç, 2002). Günümüzde bir çok çimento türü olup bunlar; portland çimentoları, puzolanik katkılı portland çimentoları ve diğer çimentolar olmak üzere üç ana grupta toplanabilir (Oruç, 2002).



Portland çimentosu üretiminde kullanılan maddeler dört grupta toplanabilir. Bunlar; kireçli (CaO) maddeler, silisli (SiO<sub>2</sub>) maddeler, alüminli (killi) (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) maddeler ve demirli (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) maddelerdir (Oruç, 2002). Doğadaki taşların bir çoğunun bileşiminde bu maddelerin tümü az ya da çok bulunmakta ise de uygun miktarlarda bulunmamaktadır. O nedenle çimento üretiminde uygun bileşimli taş kullanılması yerine kireç, silis, kil ve demir bakımından zengin maddelerin ayrı ayrı sağlanıp uygun oranlarda karıştırılması yoluna gidilir (Oruç, 2002).

Portland çimentosunun hammaddesi kireçtaşı, yani kalker, kil, silis kumu, demir filizi ve alçı taşı yani jips'dir. Bu maddelerin saf olmaması nedeniyle bileşiminde bir miktar da MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O ve bazı diğer maddeler bulunur. Görüldüğü gibi çimento çeşitli kesitlerden oluşmaktadır. Portland çimentosunda CaO önemli yer tutmakta ve SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile birlikte çimentonun yaklaşık % 90-95'ini oluşturmaktadır (Oruç, 2002).

Çimento, su agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin bir araya getirilmesi ile oluşan betonda, çimento ve suyun birleşmesi ile çimento hamuru bağlayıcılık görevi yapmaktadır. Çimento hamuru, agrega tanelerinin yüzeyini kaplamakta, taneler arasındaki boşlukları doldurmakta ve beton kütesini oluşturan malzemenin bir bütün olarak bir arada kalmasını sağlamaktadır.

Çimento, kalkerli ve killi hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp öğüttükten sonra en az sinterleşmeye kadar pişirilmesi ile oluşan klinkerin, en az miktarda (%3-6) alçıtaşı (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O) ile birlikte çok ince öğütülmesi sonucu elde edilen ve su ile birleştiğinde "hidrolik bağlayıcı" özellik kazanan bir üründür (Neville, 1990).

Günümüz teknolojisinin gelişmesine paralel olarak çimento teknolojisi de gelişmektedir. Bu gelişmeler özellikle, yeni çimento karışımları, araştırma, geliştirme ve bunların standardizasyonu alanında olmaktadır. Bir taraftan, basınç dayanımı yüksek, korozyona dayanıklı, plastisitesi yüksek, kimyasal etkilere dayanıklı, yoğunluğu düşük pahalı çimentolar üretilmeye çalışılırken; diğer yünden, çevre kirleten bir çok sanayi atığının katı maddesi olarak kullanılmasını amaçlayan, fakat daha ucuza mal olan çimentoların üretilmesi üzerinde durulmaktadır (Aslan, 1998).

### 1.9.1. Portland Çimentosunun Dünya ve Türkiye'de Tarihi Gelişimi

Çimento türleri arasında en çok bilineni, Portland çimentosudur. Çimento imali amacıyla ilk ve orijinal patent İngiltere'de, 1824 yılında Joseph Aspdin tarafından



alınmıştır. Aspdin killi kireç taşlarının kalsinasyonu havasız bir yerde ve su altında çözünmeyen bir bağlayıcı madde elde edilebildiğini görmüştür. Bu ürüne rengi ve özelliği itibariyle inşaatlarda kullanılan ve adına “Portland Taşı” denen maddeye benzediğinden portland çimentosu adını vermiştir.

Aspdin işleminde kireçtaşı ve kilin “spesifik kullanılan miktarlarını” belirtiyordu. Fakat kullanılan miktarlar spesifik değildi. Ayrıca ne kilin özellikleri ne de yanma sıcaklığı hakkında bilgi mevcut değildi. Bununla beraber, Aspdin “portland çimentosu” adını ilk kez kullanmış oluyordu. Aspdin’in buluşu Halstead tarafından eşine az rastlanan bir çalışma olarak nitelendirildi (Neville, 1990).

Türkiye’de çimento üretimi 1911 yılında İstanbul Darıca ve Eskişehir’de kurulan 20 000 ton/yıl kapasiteli bir fabrika ile başlamıştır. Daha sonra bu fabrika genişletilerek 40 000 ton/yıl kapasiteye yükseltilmiştir. 1997 yılı itibariyle ülkemizde 11’i yalnız öğütme ve paketleme tesisi olmak üzere 5 adet çimento fabrikası vardır. Toplam çimento üretimi potansiyeli 35.000.000 ton/yıl kapasiteye ulaşmış olup Avrupa’da ikinci Dünya’da ise sekizinci büyük üretici konumuna gelmiştir (Aslan, 1998).

### 1.9.2. Endüstride Çimento Üretimi

Çimento üretiminde, pişirme sırasında portland çimentosunun ana bileşenleri eriyerek birleşir ve çeşitli katı eriyikler oluştururlar. Çimento bileşiminde 20 dolayındaki katı eriyikten dört tanesi çok önemli olup, Tablo 3’de verilen bu bileşenler çimentonun ana bileşenleri olarak adlandırılırlar (Oruç, 2002).

Tablo 3. Portland çimentosunun ana bileşenleri

Ana Bileşen Adı	Kimyasal Bileşimi	Simgesi
Trikalsiyum silikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Dikalsiyum silikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Trikalsiyum alüminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Tetrakalsiyum alüminoferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{AF}$

Çimento veya betonda uygun puzolanların uygun miktarlarda, bilinçli bir şekilde kullanılması bir çok çevresel, teknik ve ekonomik faydalar sağlamaktadır. Bilindiği gibi ülkemiz zengin doğal puzolan yataklarına sahiptir (Erdoğan vd., 2002).

Tablo 4. Türkiye Çimento Standartları (Tokyay, 2001).

Sınıf Sembolü	Klinker % ağırlık	Yüksek fırın cürufu (%)	Tras (%)	Uçucu Kül (%)	Priz Süresi		Hacim Genleşmesi (mm)	BASINÇ DAYANIMI (N/mm <sup>2</sup> )		
					İlk Priz (dak.)	Son Priz (saat)		2. gün	7. gün	28. gün
PÇ 32.5	100	-	-	-	60	10	10.0	10.0	21.0	32.5
PÇ 42.5	100	-	-	-	60	10	10.0	20.0	31.5	42.5
PÇ 52.5	100	-	-	-	60	10	10.0	25.0	35.5	52.5
KÇ 32.5	Min 81	(c)	(c)	(c)	60	10	10.0	10.0	21.0	32.5
TÇ 32.5	80-60	-	20-40	-	60	10	10.0	10.0	21.0	32.5
SDÇ 32.5	100	-	-	-	60	10	10.0	10.0	21.0	32.5
BPC 32.5 (a)	100	-	-	-	45	10	10.0	10.0	21.0	32.5
BPC 42.5 (b)	20-80	-	-	-	45	10	10.0	20.0	31.5	42.5
CC 32.5	20-80	80-20	-	-	60	10	10.0	10.0	16.0	32.5
CC 42.5	Max 35	80-20	-	-	60	10	10.0	10.0	21.0	42.5
SSÇ 32.5	100	Min 65	-	-	45	10	5.0	10.0	21.0	32.5
EYÇ 52.5	90-70	-	-	-	45	6	10.0	30.0	40.0	52.5
UKÇ 32.5	Min 40	-	-	10-30	60	10	10.0	10.0	21.0	32.5
HÇ 16		(d)	(d)	(d)	60	24	10.0	-	10.0	16.0

a) Beyaz portland çimentosu, beyazlık derecesine göre BPC 32.5-70 ve BPC 32.5-85 iki değişik tip vardır.

b) Beyaz portland çimentosu, beyazlık derecesine göre BPC 42.5-70 ve BPC 42.5-85 iki değişik tip vardır.

c) Maksimum puzolan içeriği % 19

d) Maksimum puzolan içeriği % 60

Çalışmada kullanılan çimento, Trabzon Çimento Fabrikasından temin edilen KÇ 32.5 tipi Portland çimentosudur. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri, Trabzon Çimento Fabrikası'nda yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri ile kimyasal analiz sonuçları bulgular ve tartışma bölümünde verilmiştir.

Çimento bileşiminde ana bileşenler dışında yer alan diğer maddelere tali bileşenler denir. Bunlar, serbest kireç, asitte çözünmeyen mineraller, ısıtılınca buharlaşan bazı maddeler ile magnezyumoksit (MgO), sülfür (SO<sub>3</sub>) ve alkaliler (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O) dir. Uçabilir maddeler, çimentonun kızdırılmasıyla yani 1000 °C'nin üstünde ısıtılmasıyla kaybolan CO<sub>2</sub> ve su gibi maddelerdir. Kızdırma sonucu kaybolan bu maddelere kızdırma kaybı adı verilir (Oruç, 2002).

Çimentonun suyla karıştırılmasıyla elde edilen bileşime çimento hamuru, bu karışımın içinde meydana gelen çimento-su reaksiyonuna ise hidrasyon denir. Çimento hamuru hidrasyon sonucu önce katılaşır yani plastikliğini kaybeder. Buna çimentonun priz yapması denir Çimento hamuru daha sonra hidrasyonun ilerlemesiyle sağlamlaşarak mukavemet kazanır (Oruç, 2002).

Çimento bileşenlerinden  $C_3S$ , suyla temas ettiğinde hızla reaksiyona girer. Bu hızlı reaksiyondan dolayı önemli miktarda ısı açığa çıkar. Ayrıca, çimento hamuru kısa sürede mukavemet kazanır. Bu reaksiyonlar bir hafta sonunda büyük ölçüde tamamlanır.  $C_2S$ 'ın hidratasyonu da çimento hamurunun sağlamlaşmasına katkıda bulunur. Ancak,  $C_3S$ 'ın ki kadar hızla gelişemez ve dolayısıyla açığa fazla ısı çıkmaz. Buna karşılık mukavemet artışı uzun bir süre (örneğin aylarca) devam edebilir.  $C_3A$ 'nın hidratasyonunun çimento hamurunun mukavemetine katkısı yok denecek kadar azdır. Ayrıca,  $C_3A$ 'nın hidratasyon ürünleri sülfatların etkisine dayanıksızdır. Ancak,  $C_3A$  suyla çok hızlı reaksiyon yapar ve bu arada açığa çok fazla miktarda ısı çıkar. Hızlı reaksiyon nedeniyle çimento hamuru çok kısa bir sürede katılaşabilir.  $C_4AF$  suyla çok hızlı bir şekilde reaksiyona girer. Hidratasyon ısı yüksek olup çimento hamurunun mukavemetine katkısı oldukça azdır (Oruç, 2002).

Çimento endüstrisi çeşitli hammaddelere dayanan bir endüstridir. O nedenle bir fabrika kurulmadan önce hammadde kaynaklarının çok iyi etüt edilerek değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çimento sanayiinde çimento üretimi; hammaddelerin parçalanması, kırılması ve öğütülmesi, klinker üretilmesi ve klinkerin öğütülmesi, mineral katkıların ve alçı taşının ilavesi olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır.

Çimento sanayiinde Portland Çimentosu ve değişik tip çimentoların üretiminde kullanılan iki ana hammadde vardır.

1. Kalkerli malzemeler, kireçtaşı, marn gibi malzemelerdir. Kalker,  $CaCO_3$  olan kalsit ve organik şekilsiz talaşmış türlerdir. Saf kalker % 56 CaO ve % 44  $CO_2$ 'den ibarettir. Fakat kalker genellikle saf bir yapı arz etmeyip içerisinde az miktarda Si, Mg, Al ve Mn ihtiva eder. Marn, kil ve kalkerin çeşitli oranlarda karışımından meydana gelmiş kütlelerdir. Marn, dolomitli, jipsli bitümlü ve kumlu gibi türlere sahiptir.

2. Killi malzemeler; içerisinde önemli miktarda silis bulunan kil, şeyl, şist, kum gibi maddelerdir (Erdoğan, 1995).

Çimento endüstrisinde üretilen çimentoya % 3-6 oranında jips (alçıtaşı,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ilave edilerek çimentonun ana bileşenlerinden trikalsiyum alüminat ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ )'in hızla sertleşmesine mani olur.

Kalkerli ve killi hammadde karışımı, silindir şeklindeki döner fırınlarda, 1350 -1450 °C civarında pişirilir. Döner fırındaki hammaddeler, uygulanan sıcaklığın etkisiyle, meydana gelen kimyasal olaylar sonucunda klinker adı verilen ürüne dönüşmektedir. Döner fırın içerisindeki tüm reaksiyonlar ısı işlemiyle meydana gelmektedir.

Kireç (CaO), alümin ( $Al_2O_3$ ), demir ( $Fe_2O_3$ ) ve silis ( $SiO_2$ ) bileşimli hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp yüksek sıcaklıkta, sinterleşmeye (topaklaşma) kadar (1350-1450 °C) pişirilmesi sonucunda elde edilen ürüne “klinker” adı verilmektedir.

Döner fırından çıkarılan klinker soğutuculardan sonra toz gibi ince bir şekilde öğütülür. Klinkerin öğütülmesi esnasında küçük bir miktar (%3-6 oranında) alçıtaşı eklenerek öğütme işlemi birlikte yapılır. Elde edilen ürüne “Potland Çimentosu” adı verilir.

Tablo 5. Döner fırınlarda meydana gelen reaksiyonlar

Sıcaklık (°C)	Reaksiyonlar	Isı Değişimi
100	Serbest suyun buharlaşması	Endotermik (ısı gerekli)
500'den sonra	Kilden yapı suyunun çıkması	Endotermik (ısı gerekli)
900'den sonra	Dehidrasyon ürünlerinin kristalleşmesi	Ekzotermik (ısı açığa çıkar)
900-1200	Kireç ile kil arasındaki ana reaksiyon	Ekzotermik (ısı açığa çıkar)
1250-1280	Sıvı faz oluşumunun başlaması	Endotermik (ısı gerekli)
1280'den sonra	Çimento bileşenlerinin oluşumu	Endotermik (ısı gerekli)

Çimento üretiminde 1000 kg klinker için toplam 1670 – 2220 kcal ısı harcanmaktadır. Tablo 5’de görüldüğü gibi; sarf edilen bu ısı, döner fırında reaksiyonların yürütmesini sağlamaktadır (Erdoğan, 1995).

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Materyal**

Bu çalışmada, orman yolları için alternatif üstyapı malzemesi olarak kullanılmak üzere Seka Afyon-Çay İşletmesinin atık ürünü olan kireç çamuru kullanılmıştır. Bu çamurun stabilizasyon amaçlı kullanılabilirliğini ortaya koyabilmek için Trabzon Çimento Fabrikasında üretilen Katkılı Çimento (KÇ) ile karıştırılmış ve numuneler üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Ayrıca tezin ikinci bölümünü oluşturan değişik zeminlerin stabilizasyonu üzerinde kireç çamurunun etkilerini araştırmak amacıyla yapılan denemelerde; Artvin, Borçka ve Trabzon yöresinden alınan üç değişik zemin türü (Kumlu Kil Zemin (Z1), Balçıklı Kil Zemin (Z2) ve Ağır Kil Zemin (Z3)) kullanılmıştır.

#### **2.1.1. Seka Afyon-Çay Atık Kireç Çamuru**

Seka Afyon-Çay İşletme Müdürlüğünde selüloz üretiminde işlem sonunda atık olarak açığa çıkan ve doğaya terk edilen kireç çamuru, çalışma kapsamında yapılan stabilizasyon denemelerinde katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Bu işletme kuzeyden güneye doğru uzanan bir doğru boyunca Akharım ve Karacaören köyleri arasındaki Çay-Isparta yolu üzerinde geniş bir sahada kurulmuştur. Hammadde olarak buğday (*Triticum questivum* L.) samanı ve göl kamışı (*Phragmites australis*) kullanılmaktadır. Göl kamışı Eber ve Karamık göllerinden temin edilmektedir. Buğday samanı arazide balyalandıktan sonra fabrikaya getirilmektedir. İlk zamanlarda arpa ve buğday samanı kullanılırken arpa samanının dayanıksızlığı yüzünden arpa samanının hammadde olarak kullanımından vazgeçilmiştir. Fabrikanın hammadde ihtiyacı, Ankara, Polatlı, Eskişehir, Afyon, Kütahya, Konya, Akşehir'deki çiftçilerden satın alınarak karşılanmaktadır.



### 2.1.1.1. Seka Afyon-Çay İşletme Müdürlüğü Çalışma Sisteminin Akış Şeması

İşletmede hammadde olarak göl kamışı ve sap-saman (yıllık bitkiler) kullanılmak suretiyle kısa elyafli beyazlatılmış saman- kamış selülozu üretimi yapılmaktadır. Üretilen bu selüloz, diğer Seka fabrikalarına gönderilip kağıt ve karton yapımında kullanılmaktadır.

İşletme tesislerini üç ana grup halinde inceleyebiliriz;

#### A- Selüloz Üretim Üniteleri

- 1- Hammadde Stok Sahası (Hammadde stoklama ve sevk Ünitesi): Burada stoklanmış sap-samanlar ve göl kamışları işçiler tarafından traktör römorklarına yüklenerek kesim ünitesi olan hammadde hazırlama ünitesine gönderilir.
- 2- Hammadde Hazırlama Ünitesi: Römorklar vasıtası ile gelen hammaddeler burada bulunan 4 adet kesme makinesi tarafından 3-4 cm uzunluğunda kesilir. Hammaddenin beraberinde bulunan boğum, kım, yaprak, püskül ve yabancı otlardan temizlenir. Kesilmiş ve temizlenmiş olan bu hammaddeler emiş aspiratörü vasıtasıyla pişirme ünitesine nakledilir.
- 3- Pişirme, Yıkama, Sortir ve Tersiyer hazırlama ünitesi (Esmer Hamur Üretim Ünitesi): Pişirme kazanına alınan hammadde sülfat metoduyla 4 ana proses kademesinden geçirilerek esmer selüloz üretimi yapılır.

Bu kademeler:

- a- Hammaddelerin beyaz ve siyah likörlerle emdirildiği ön doyurma kademesi
- b- Buharlama kabında yapılan ön buharlama kademesi
- c- Pişirme kazanında (kamyır) 155-160 °C sıcaklıkta 5 atü basınç altında 50-90 dakika pişirmeye tabi tutulma kademesi
- d- Pişirme işlemleri tamamlandıktan sonra pişirme kazanının taban bölgesinde siyah likör verilerek soğutma ve seyreltmeye tabi tutularak ve basınç altında hamurun boşaltılarak, boşaltma tankına alınması kademesidir.



Bu boşaltma tankında pompa vasıtasıyla alınan esmer hamur 3 kademeli ters yıkama akım prensibine göre çalışan esmer hamur yıkama filtrelerine verilir. Bu filtrelerde pişirme prosesi sırasında teşekkül eden zayıf likörden arındırılmış esmer hamur 3 kademeli temizleyicilerden geçirilerek hamur içinde bulunan reject diye tabir edilen pişmemiş yabancı maddelerden arındırılır.

Bu kademelerde;

- a- Kaba ve iri rejectlerin ayrıldığı sarsak elek grubu
  - b- Küçük ve ince rejectlerin ayrıldığı döner silindir elekler grubu (Kovan sortir grubu)
  - c- Çok küçük reject ve kumların ayrıldığı santrifüj temizleyici grubu (Sentikliner grubu)
- 4- Beyazlatma Ünitesi Beyaz Hamur Üretim Ünitesi): Temizlenmiş olan bu esmer selüloz 4 kademeli beyazlatma ünitesinde 85-87 Elrepho derecesine kadar beyazlatılmaktadır.
- 1- Klorlama kademesi
  - 2- Ekstraksiyon kademesi
  - 3- Birinci hipoklori kademesi
  - 4- İkinci hipoklorit kademesi

Bu kademelerden sonra beyazlatılmış selüloz pompa vasıtasıyla beyaz hamur stok kulelerine gönderilir.

- 5- Kimyevi Madde Hazırlama Ünitesi: Beyazlatma kademeleri için gerekli olan klor, sodyumhidroksit, Kalsiyum hipo-klorit ve kükürtdioksit kimyasal maddeleri, kimyasal madde hazırlama ünitesinde hazırlanarak beyazlatma ünitesine gönderilir.
- 6- Teksif Kurutma ve Balyalama Ünitesi: Beyaz hamur kulelerinde birikmiş olan beyazlatılmış selüloz bu üniteye sonsuz elek üzerinden ve preslerden geçirilerek kapalı kurutmaya verilir. %90 kurulukta kapalı kurutmadan çıkan selüloz safhası 60-80 cm ebadında kesilerek 200 kg'lık balyalar halinde sevke hazır hale getirilir.

B- Geri Kazanma Üniteleri:

- 1- Oksidasyon-Evaporasyon Ünitesi (Zayıf siyah likör kesifleştirme ünitesi): Pişirme esnasında ortaya çıkan zayıf siyah likör, esmer hamur

yıkama filtrelerinde esmer hamurdan ayrılır. Ayrılan bu siyah likör evaporasyon ünitesine gönderilerek konsantrasyonu % 54-56 kuru madde değerine yükseltilir. Böylece kesif siyah likör (organik ve inorganik maddeler içerir) elde edilir.

- 2- Soda Kazanı Ünitesi (Kesif siyah likör yakma ünitesi): Üretilen kesif siyah likör, Soda Kazanına fuel-oil'le birlikte yakılır. İşletmenin ihtiyacı olan buhar üretimi ve kimyasal madde geri kazanma işlemleri gerçekleştirilir.
- 3- Kostikleştirme Ünitesi (Pişirme Mahlülü-Beyaz Likör-Üretim Ünitesi): Soda kazanında yakılan siyah likörde yanmayan inorganik kimyasal maddeler yeşil likör halinde kostikleştirme ünitesine sevk edilir. Yeşil likör, kireçle muamele edilerek pişirme işleminde tekrar kullanılan beyaz likör üretimi gerçekleştirilir.
- 4- Döner Kireç Fırını Ünitesi (Yanmış kireç-sönmemiş kireç üretim ünitesi): Fırında üretilen sönmemiş kireç; su hazırlama, kalsiyum hipoklorit çözeltisi hazırlama ve kostikleştirme işlemlerinde kullanılmaktadır.

#### C- Enerji Üretim Üniteleri:

- 1- Su Temin Ünitesi: Fabrikanın ihtiyacı olan su, işletmeye 25 km uzaklıktaki karamık göltü kenarındaki Genelli köyünden temin edilmektedir.
- 2- Buhar Kazanı (Yağ Kazanı): Kazanda yakıt olarak sadece fuel-oil kullanılmakta olup işletme ünitelerinin buhar ihtiyacı karşılanmaktadır.
- 3- Türbin Ünitesi: İşletmenin elektrik ihtiyacının %70'i tesiste mevcut 1 adet turbo jeneratörden, %30'u ise fabrika sahası içerisinde bulunan şebeke elektrik trafo istasyonundan karşılanmaktadır.

#### 2.1.1.2. Atık Kireç Çamuru

Kraft yöntemiyle selüloz üreten Seka Afyon Çay İşletmesinden alınan kireç çamuru kostikleştirme işleminden sonra beyaz mahlülün durutulması işlemi ve çamur yıkamanın ardından çamur filtresinden çıkan kireç çamurudur. Bu atık diğer kağıt fabrikalarında tekrar işleme konurken, Seka Afyon-Çay İşletmesinde hammadde olarak kullanılan kamış ve

samanın özelliğinden dolayı fazla oranda silisyum içerdiğinden geri kazanım ünitesinde kullanılamamakta ve doğaya atılmaktadır. Atık kireç çamurunda % 9.19 SiO<sub>2</sub>, % 0.10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 0.07 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 40.09 CaO, % 0.11 MgO, % 3.01 Na<sub>2</sub>O ve % 0.19 K<sub>2</sub>O gibi bileşikler ve Ba, Ni, Sr ve Zr gibi elementler bulunmaktadır.



Şekil 7. Fabrikanın kostikleştirme ünitesinden atılan kireç çamuru

### 2.1.2. Katkılı Çimento (KÇ)

Orman yollarının üstyapısında kaplamada kullanılabilme imkanlarını araştırmak için yapılan beton denemelerinde kullanılan çimento, Trabzon çimento fabrikasının ürettiği katkılı çimentodur (KÇ 32.5). Bu çimentonun Trabzon çimento fabrikasında yapılan kimyasal analizlerinden elde edilen özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Katkılı çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşikler (%)	Miktar
CaO	54.01
SiO <sub>2</sub>	27.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.88
MgO	1.23
SO <sub>3</sub>	2.19
Kızdırma Kaybı	3.56



### 2.1.3. Stabilizasyon Çalışmalarında Kullanılan Zeminler

Tezin ikinci kısmını oluşturan zemin stabilizasyonunda denemelerin yapıldığı zeminler Doğu Karadeniz Bölgesinden toplanmıştır. Bu amaç için üç değişik fiziksel özelliklere sahip zeminler seçilmiştir. Zeminlerin ikisi Artvin ili sınırları içinde yapılan Artvin Deriner Baraj inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılan ve derin kazılardan elde edilen Kumlu Kil Zemin (KKZ) (Z1) ve Borçka Baraj inşaatında kullanılan ve derin kazıdan elde edilen Balçıklı Kil Zemin (BKZ) (Z2) dir. Üçüncüsü ise Trabzon ili sınırları içerisinde Bostancı mevkiinde, yol yarmasından alınan Ağır Kil Zemin (AKZ) (Z3). Bu zeminlerin kum, kil ve toz oranları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Zeminlerin içerdiği kum-kil-toz oranları

Oran (%)	ZEMİNLER		
	Z1	Z2	Z3
Kum	60.76	50.76	33.76
Kil	28.24	40.24	56.24
Toz	11.00	9.00	10.00

### 2.1.4. Çalışmalarda Kullanılan Araç-Gereçler

Çalışmalar Trabzon Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Laboratuvarı, DSİ Trabzon Bölge Müdürlüğü Laboratuvarı, Trabzon Orman Toprak Laboratuvarı, KTÜ Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarı ve Fizik Bölümü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuvarlarda yapılan deney ve analizlerde kullanılan makine ve teçhizatlar hakkında detaylı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

#### 2.1.4.1. Çimento Deneylerinde Kullanılan Araç-Gereçler

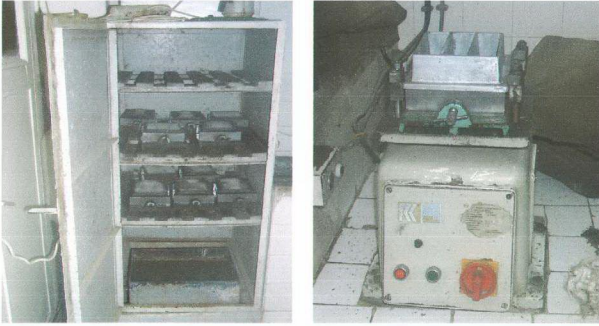
Katkılı çimentoya (KÇ 32.5) kireç çamuru katılarak yapılan deneyler, Trabzon Çimento Fabrikası Kalite Kontrol laboratuvarında yapılmıştır. Kullanılan araç-gereç ve deney düzenekleri aşağıda verilmiştir.

### 2.1.4.1.1. Rilem - Cembureau Harç Karıştırıcısı ve Harç Kalıpları

Mukavemet deneyleri için Rilem-Cembureau harç karıştırıcısı ve harç kalıpları kullanılmıştır. Hazırlanan harcın karıştırılması Şekil 8'de gösterilen Rilem-Cembureau harç karıştırıcısı ile yapılır. Rilem-Cembureau harç kalıpları; en az 400 vickers sertliğinde çelikten imal edilmiş olup kalıplarda numune prizmasını aynı anda hazırlayabilmek için üç ayrı bölme bulunmaktadır. Şekil 9'da verilen kalıpların boyutları; 160 mm  $\pm$  0.4 mm uzunlukta, 40 mm  $\pm$  0.1 mm genişlikte, 40 mm  $\pm$  0.1 mm yükseklikte en az 10 mm et kalınlığında ve 90°  $\pm$  0,5° açılara sahiptir. Kalıpların üzerine, harcın kalıplar içine doldurulmasını sağlayan bir başlık takılır. Başlığın yüksekliği 20 – 40 mm'dir.



Şekil 8. Rilem - Cembureau harç karıştırıcısı



Şekil 9. Rilem - Cembureau harç kalıpları

### 2.1.4.1.2. Basınç Dayanım Aleti

Harçlar kalıplara döküldükten sonra sarsma aleti yardımıyla harçların hava boşluğunu en aza indirecek kadar sarsılır. Sarsma aleti esas itibariyle dikdörtgen bir sarsma tablasından ibarettir. Tabla, altında bulunan eksantrik bir disk vasıtasıyla 15 mm yüksekliğe kaldırılır ve serbest olarak düşürülür. Elektrik motoruyla hareket ettirilen disk saniyede bir devir yapar ve 60 düşme yaptıktan sonra otomatik olarak durur.

Basınç dayanımlarını ölçmek için basınç mukavemeti aleti kullanılır. Numunelerin yerleştirildiği düzenek ve okumanın yapıldığı ayardan oluşmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Basınç dayanım aleti

Prizmalar Şekil 10'da gösterilen ve presin alt ve üst tablaları arasına yerleştirilen kırma başlığı yardımı ile kırılır.

### 2.1.4.1.3. Vicat Aleti

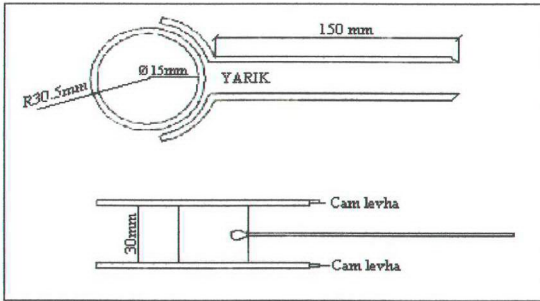
Priz başlama ve sona erme süresini ortaya koymak için Vicat aleti kullanılmıştır. Bu alet silindirik çubuk ve sonda, iğne ve eklenecek ağırlıktan oluşmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. Vicat aleti

### 2.1.4.1.4. Le Chatelier Aleti

Çimento hacminin değişimi Şekil 12’de verilen pirinçten yapılmış Le Chatelier aleti ile tayin edilmiştir. Silindirik halka eksenine doğrultusunda yarıktır.



Şekil 12. Le Chatellier hacim sabitliği tayin aleti

#### 2.1.4.1.5. Elek Sarsma Aleti

Tane büyüklüğünün tayini için göz açıklığı 200  $\mu\text{m}$  ve 90  $\mu\text{m}$  olan, TS 1227'ye uygun, elek sarsma makinesi kullanılarak yapılmıştır.

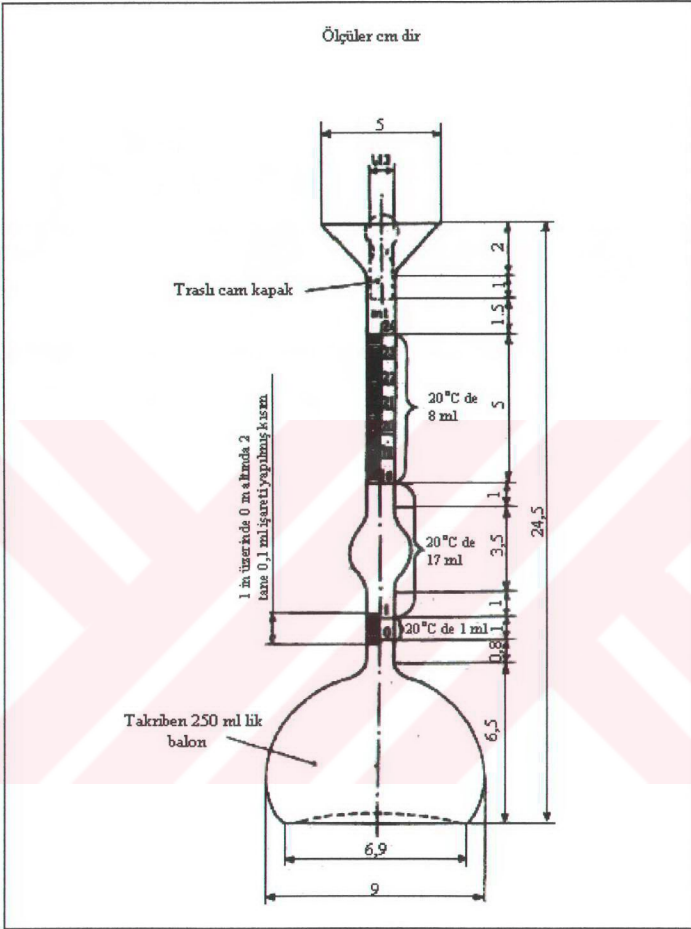


Şekil 13. Elek Sarsma Aleti

#### 2.1.4.1.6. Le Chatellier Balonu

Çimentonun ve numunenin yoğunluğu, biçimi ve boyutları Şekil 14'deki Le Chatellier balonu yardımıyla tayin edilir.

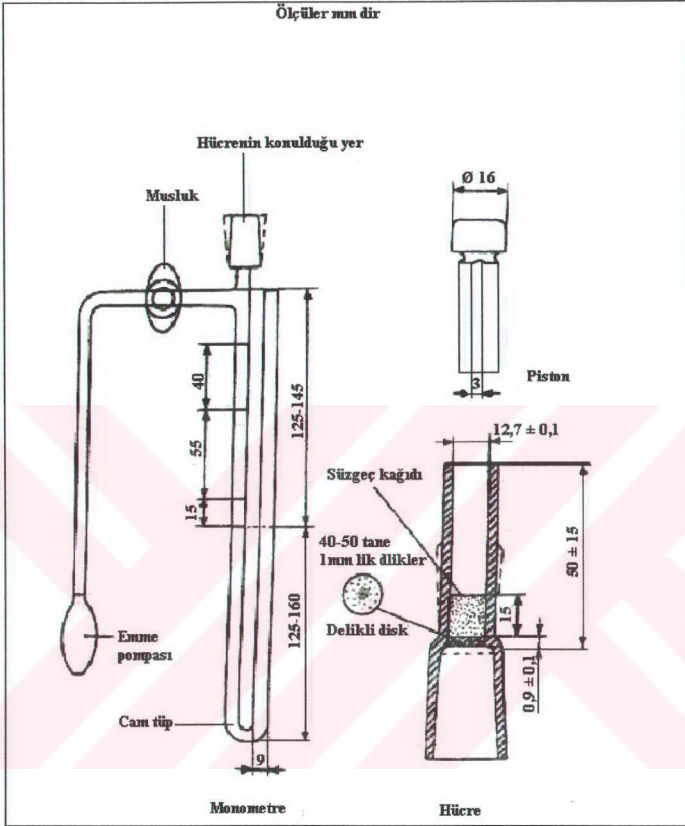




Şekil 14. Le Chatelier balonu

#### 2.1.4.1.7. Blain Aleti

Özgül yüzey tayin etmek için hava geçirgenliği prensibine dayanarak çalışan Blaine aleti kullanılmıştır. Blaine aleti, delikli disk, piston ve manometreden oluşur.



Şekil 15. Blaine aleti

#### 2.1.4.1.8. Taramalı Elektron Mikroskop

Çimento ile atık kireç çamurunun karıştırılması ile oluşturulan beton prizmaların basınç dayanımları ölçüldükten sonra, bu prizmalardaki puzolanik etkileşimi görebilmek için KTÜ Müh. Mim. Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskopta fotoğrafları çekilmiştir. Bu iş için JSM 6400 marka taramalı elektron mikroskop kullanılmıştır (Şekil 16).



Şekil 16. JSM 6400 taramalı elektron mikroskop

Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir.

#### 2.1.4.2. Zemin Stabilizasyonunda Kullanılan Araç-Gereçler

Çalışmada kullanılan 3 değişik zemin türü ve katkı olarak kireç çamuru ile oluşturulan karışımlar üzerinde yapılan zemin stabilizasyon deneyleri DSİ Trabzon Bölge Müdürlüğü Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Zeminler üzerinde yapılan kimyasal analizler ve bazı özelliklerinin tespiti, Orman Toprak Araştırma Laboratuvarı ve KTÜ Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

### 2.1.4.2.1. Enerji Dispersiv X-ışını Floresans Spektroskopisi (EDXRF)

Kireç çamuru atığının bünyesindeki elementlerin varlığını kimyasal analiz sonuçlarını da destekleyecek şekilde, bünyesindeki elementleri gösteren X-ışını spektrumlarını elde etmek için EDXRF kullanılmıştır.

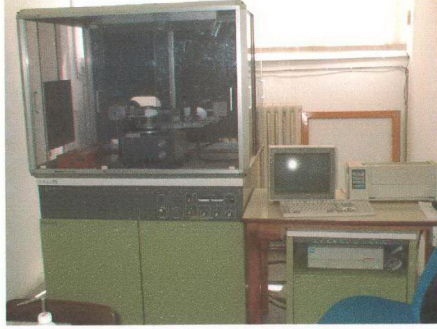
Genelde X-ışını floresans sistemi, bir radyasyon uyarıcı kaynak (bir X-ışını tüpü veya bir radyoaktif kaynak), numuneden gelen radyasyonu bulmak için bir radyasyon dedektörü, spektrum çıkışlarını düzenleyici ve görüntüleyici birimlerden oluşur.



Şekil 17. X-ışını floresans sistemi

### 2.1.4.2.2. X-ışınları Toz Difraktometresi (XRD)

Zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılan 3 değişik zeminin mineralojik yapısını belirleyebilmek için KTÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan Rigaku marka D/Max-3C model XRD cihazı kullanılmış olup, kırınım desenleri, bakır hedefe, 35 kV'luk gerilim ve 25 mA'lik akım uygulanarak elde edilen  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) ışınını kullanarak ölçülmüştür. Ölçümler, oda sıcaklığında,  $3^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$  aralığı boyunca  $3^\circ/\text{dak}$ . tarama hızı ve  $0,02^\circ$  örnekleme aralığı seçilerek yapıldı.  $\text{Cu-K}\alpha$  ve dalga boyu  $1,542 \text{ \AA}$  dur.



Şekil 18. X-ışın difraktometre sistemi

#### 2.1.4.2.3. Elek Sarsma Aleti ve Elekler

Granülometri eğrisini belirlemek için zeminler kurutulmuş, değişik çaplardan oluşan bir elek serisinde elenmiştir. Elek analizi için bir elek takımı eleklerin temizlenmesi için fırçalar, duyarlılığı en az 0.1 gr olan terazi, etüv, geniş bir buharlaşma tabağı ve damıtık su ile dolu bir şişe kullanılmıştır.

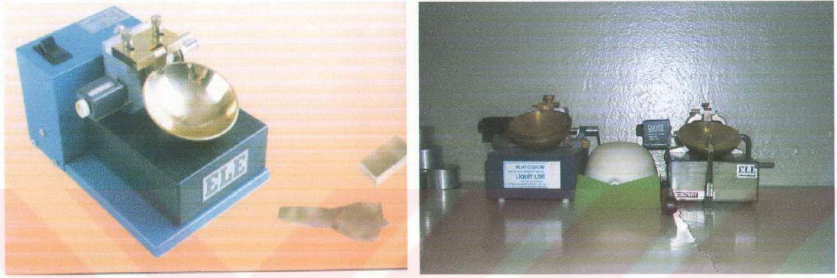


Şekil 19. Elekler ve elek sarsma aleti



#### 2.1.4.2.4. Casagrande Likit Limit Aleti

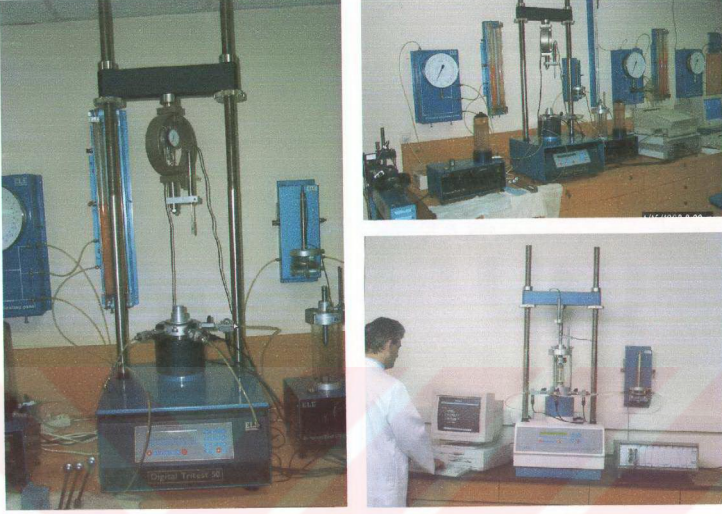
Zeminlerin Atterberg limitlerini belirlemek için Casagrande likit limit aleti kullanılmıştır (şekil 20). Ağırlığı 5 kg'dır. Deney yapılışında ayrıca standart oyuk açma bıçağı yarı logaritmik grafik kağıdı ve spatula kullanılmıştır.



şekil 20. Casagrande likit limit aleti

#### 2.1.4.2.5. Üç Eksenli Basınç Deney Aleti

Üç eksenli basınç deneyinde, silindirik bir zemin numunesi bir hücre içine yerleştirilmekte ve hücreye uygulanan basınç (hava veya su basıncı) vasıtası ile zemin numunesi üzerinde hidrostatik bir basınç oluşturulmaktadır. Numune etrafına geçirilen bir lastik kılıf zeminin hücreyi dolduran su ile temas etmesini önlemekte ve numune içine ve dışına ayrı ayrı basınçlar uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Numune üst başlığına temas eden bir piston vasıtası ile eksenel gerilme uygulanmakta numune alt ve üst başlıklarına bağlı ince kanallar vasıtası ile de deney sırasında drenaj durumu (zemin suyunun dışarı çıkıp çıkması) kontrol edilebilmektedir. Bu deney için şekil 21'de görünen ELE marka Digital Tritest 50 aleti kullanılmıştır.



Şekil 21. Üç eksenli basınç deney aleti

#### 2.1.4.2.6. Konsolidasyon Deney Aleti (Ödometre)

Konsolidasyon deneyi için konsolidasyon aleti (ödometre) ve yükleme boyunduruğu, zemin numunesinin kesilmesi ve düzeltilmesi için gereken aletler 0.01 gr hassaşlığında terazi su muhtevasını belirlemede kullanılacak küçük cam kaplar, kronometre geniş bir su haznesi (yaklaşık 15 cm çapında) deformasyon saati gereklidir.

Bu deney için ELE marka EL25-0402 modellenli konsolidasyon aleti kullanılmıştır. Bu alet 610 x 915 x 865 mm boyutlarında ve 50 kg ağırlığındadır (Şekil 22).



Şekil 22. Konsolidasyon deney aleti (ödometre)

#### 2.1.4.2.7. Standart Kompaksiyon Aleti

Standart proctor deneyi düzeneginde 11.64 cm yüksekliğinde 10.16 cm iç çapında taban plakası ve yakası ile kompaksiyon kabı, 2.5 kg ağırlığında kompaksiyon tokmağı (30.5 cm den serbest düşme ile sıkıştırma yapar) ve su muhtevasını belirlemek için cam kaplar, karıştırma leğeni, spatula ve bıçak, numune çıkartıcı etüv ve terazi bulunmaktadır.



Şekil 23. Standart kompaksiyon deney aletleri

#### 2.1.4.2.1.8. Diğer Araç-Gereçler

Zeminlerin kum-kil-toz içeriklerini tayin edebilmek için yapılan mekanik analiz yönteminde, etüv, havan, elek, elektronik tartı, mikser, Bouyoucus silindiri ve zaman okuma saati kullanılmıştır (Şekil 24).



Şekil 24. Mekanik analizde kullanılan araç-gereç



Zeminlerin organik madde miktarlarını belirlemek için kullanılan Walkley-Black yağ yakma düzeneği Şekil 25’de görülmektedir.



Şekil 25. Walkley-Black yağ yakma düzeneği

Zemin örneklerinin pH’larını belirlemek için Şekil 26’da görülen pH metre kullanılmıştır.



Şekil 26. pH Metre

Zemin örneklerinin elektriksel iletkenliklerini ölçmek için Philips PW-9526 marka dijital kondüktivimetre aleti kullanılmıştır (Şekil 27). Zeminlerin bünyesinde bulunan fosfor miktarını belirlemek için Milton Roy Spectronic 20D marka spectrophotometer fosfor ölçme aleti kullanılmıştır (Şekil 28).



Şekil 27. Elektriksel iletkenlik ölçme aleti



Şekil 28. Fosfor miktarını ölçme aleti

Zeminlerin içerdiği Ca, Mg, K, Na, Cu, Mn, Zn ve Fe element miktarlarının belirlenmesinde A-6601F Atomic Absorption Flame Emission Spectrophotometer aleti kullanılmıştır (Şekil 29).

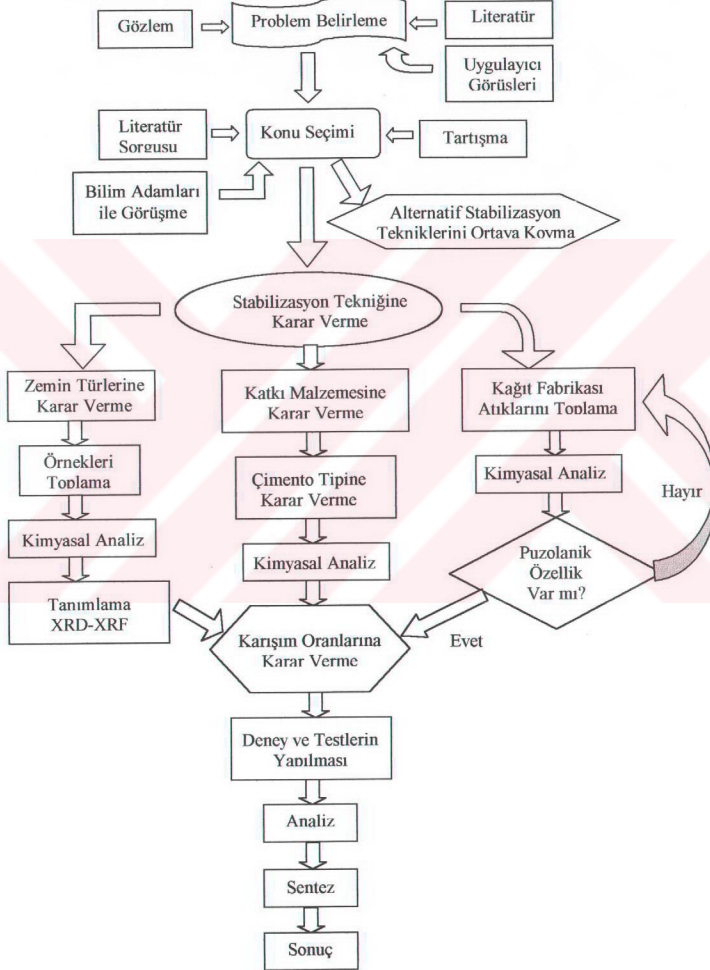


Şekil 29. Atomik absorpsiyon aleti



## 2.2. Yöntem

Çalışma konusuna karar vermeden sonuçların çıkarılmasına kadar olan aşamalar bir akış şeması olarak Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. Çalışma aşamalarını gösteren akış şeması

### 2.2.1. Çalışmada Kullanılacak Malzemelerin Seçimi ve Alınması

Bu çalışmada orman yollarının üstyapısında kaplama tabakasında kullanılmak üzere ve yolların geçtiği değişik taban zeminlerin stabilize edilmesine yönelik alternatif malzeme ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bunun için geniş çaplı literatür çalışmasının ardından orman yolları üstyapılarının kaplama tabakasında ve yol taban zeminlerinde iyileştirmeler sağlayabilecek konular üzerinde durulmuştur. Sonuçta, zemin stabilizasyonu konusunda yapılan klasik çalışmalara (çimento, uçucu kül veya kireçle stabilizasyon) paralel ama farklı özellikte ormancılık yan ürünü olan malzemeler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu amaçla Seka kağıt fabrikaları mercek altına alınmış ve Giresun-Aksu, Zonguldak-Çaycuma Seka işletmeleri atıkları incelenmiş ve sonuçta Afyon-Çay Seka işletmesi atığı kireç çamurunun stabilizasyon malzemesi olarak hem kaplama tabakasında beton amaçlı çimento katkısı olarak hem de direkt altyapıda zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilen olanaklarının araştırılmasına karar verilmiştir.

Üstyapıda, oluşturulacak beton için ihtiyaç duyulan çimento Doğu Karadeniz Bölgesinde faaliyet gösteren Trabzon Çimento Fabrikasında üretilen Katkılı Çimento (KÇ 32.5) ile karşılanmıştır. Bunun tercih edilmesinde zemin kolaylığı ve ekonomik amaçlara uygunluğu etkili olmuştur.

Tezin ikinci kısmında orman yollarının problemlili olan altyapılarında stabilizasyonu sağlayabilmek amacıyla kireç çamuru atığı kullanılmıştır. Bu amaçla, fiziksel özellikleri birbirinden farklı olan kumlu balçık, balçıklı kil ve ağır kil zemin türlerine ilişkin örnekler doğadan temin edilmiştir.

Atık kireç çamuru çalışmanın amacına yönelik ve tekniğine uygun olarak fabrikadan alınmış, hava almayan kapalı kaplarda taşınarak laboratuara getirilmiştir.

### 2.2.2. Çimento Deneyleri

Beton denemeleri için Trabzon Çimento fabrikasında üretilen Katkılı Çimentoya ilave malzeme olarak atık kireç çamuru katılarak oluşturulan karışımlar ve harçlardan elde edilen malzeme üzerinde deney, analiz ve testler yapılmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinde; kireç çamuru ilavesiz katkılı çimento (KÇ) ve % 5' den başlayarak %10, 15, 20, 25 ve % 30'a kadar kireç çamuru ilavesi ile oluşturulan karışımlarla hazırlanan prizmalar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen karışımların basınç dayanımları 1, 2,

7, 28, 35, 45, 60, 75, 85, 90 günlük kür sürelerinde prizmalar kırılarak değişimler zamana bağlı olarak ortaya konulmuştur. Bu karışımlara yapılan basınç dayanım testleri, deney ve analizleri aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

Anlatıma geçmeden önce bazı tanımları vermek yararlı olacaktır;

Normal Kıvam:

Normal kıvam, vicat aletinin sondasının serbest bırakıldığı andan itibaren yarım dakika içinde çimento hamuru içine, cam levhaya 5-7 mm uzaklık kalıncaya kadar batabilmesini sağlayan kıvamdır.

1. Priz Başlama Süresi:

Priz başlama süresi, çimento ile suyun karıştırıldığı andan itibaren vicat iğnesinin cam levhaya 3-5 mm uzaklık kalıncaya kadar inmesine neden olan kıvama ulaşması için geçen zamandır.

2. Priz Bitme Süresi:

Priz bitme süresi, çimento ile suyun karıştırıldığı andan itibaren vicat iğnesinin hamura 1 mm'den fazla giremeyeceği kıvama ulaştığı ana kadar geçen zamandır.

3. Özgül yüzey:

Özgül yüzey, 1 gram çimentonun içindeki tanelerin  $\text{cm}^2$  olarak yüzeylerinin toplamıdır.

4. Çimento yoğunluğu:

Çimento yoğunluğu,  $1 \text{ cm}^3$  hacmindeki boşluksuz çimentonun gram olarak kütesidir.

5. Gözeneklilik:

Bir cismin ihtiva ettiği boşluk hacminin cismin toplam hacmine oranıdır (TS 2434, TS 24).

### 2.2.2.1. Basınç Dayanım Testi (Rilem- Cembureau Metodu)

Basınç dayanım testi için deney numunesinin hazırlanması aşağıda özetlenmiştir.

Harcın bileşimi; ağırlıkça 1 kısım çimento, 3 kısım TS 819'da verilen kum ve 1/2 kısım suyun karıştırılması ile hazırlanır. Su olarak içilebilir bir su kullanılır.

Harcın hazırlanışı;

Üç numune için 450 g (1 kısım) çimento, 1350 g (3 kısım;  $3 \times 450$ ) kum, 225 g (1/2 kısım;  $450 \times 1/2$ ) su 1 gram hassasiyetli terazide tartılır. Harcın karıştırılması özel bir karıştırıcı ile yapılır. Harç, sıcaklığı  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  olan odada hazırlanır. Çimento, standart

kum, su, kalıplar ve karıştırıcının da aynı sıcaklıkta olması için bu oda içinde en az 12 saat bekletilmelidir. Deney yapılan odanın nispi nemi %50- %60 arasında olmalıdır.

Harçların karıştırılması;

Karıştırma kabına 225 g su konur. Üzerine 450 g çimento ilave edilir. Karıştırıcı düşük hızda 30 saniye çalıştırılır. Bu sürenin sonunda 1350 g kum, karıştırma devam ederken, yavaş yavaş katılır. Kumun katılması bir dakika sonunda bitmiş olmalıdır. Bir dakika sonunda karıştırıcı yüksek hıza ayar edilerek 30 saniye daha karıştırılır.

Bu 90 saniyelik karıştırılmadan sonra karıştırıcı durdurulur. Karıştırıcı durdurulduktan sonra 15 saniye içinde, karıştırıcı kabının cidarlarına ve karıştırıcıya bulaşmış olan harç kauçuk başlı bir çubuk ile kabin içine kazınır. Kabin üzeri örtülerek 75 saniye beklenir. Bu süre sonunda karıştırıcı yüksek hızla yeniden bir dakika daha çalıştırılır. Böylece toplam 4 dakika sonra harç kalıplarına konulmak üzere hazır hale getirilmiş olur.

Kalıplar; en az 400 vickers sertliğinde çelikten imal edilmiş olup kalıplarda numune prizmasını aynı anda hazırlayabilmek için üç ayrı bölme bulunmaktadır. Kalıpların boyutları; 160 mm  $\pm$  0.4 mm uzunlukta, 40 mm  $\pm$  0.1 mm genişlikte, 40 mm  $\pm$  0.1 mm yükseklikte, en az 10 mm et kalınlığında ve 90°  $\pm$  0,5° açılara sahiptir.

Kalıpların üzerine, harcın kalıplar içine doldurulmasını sağlamak üzere bir başlık takılır. Başlığın dik kenarlarının yüksekliği 20 – 40 mm olmalıdır.

Sarsma aleti; esas itibarıyla dikdörtgen bir sarsma tablasından ibarettir. Tabla, altında bulunan eksantrik bir disk vasıtasıyla 15 mm yüksekliğe kaldırılır ve serbest olarak düşürülür. Elektrik motoruyla hareket ettirilen disk saniyede bir devir yapar ve 60 düşme gerçekleştirildikten sonra otomatik olarak durur.

Kalıpların doldurulması;

Kalıpların içi ince bir yağ ile hafifçe yağlanır. Kalıplar önce sarsma aletine yerleştirilir, daha sonra bağlama vidaları sıkıştırılır ve kalıp başlığı takılır. Kalıpların ek yerleri dış taraftan 3 kısım parafin 1 kısım reçine karışımı veya benzeri bir malzeme ile geçirimsiz hale getirilir.

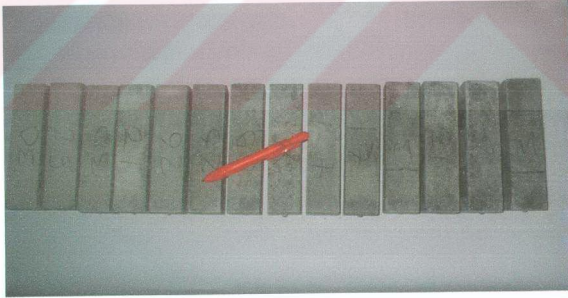
Kalıp bölmelerinde her biri içine yaklaşık olarak 320 g harç (kalıp hacimlerinin yarısı) doldurulur. Bu işlem ölçüsü belli bir kaşık ile yapılır. Kalıp içine konan harç, kaşık ile ileri geri yayılarak harcın kalıp içine aynı kalınlıkta dağılması sağlanır. Sarsma aleti çalıştırılır ve 60 saniye içinde 60 sarsma yapılır. Alet durduktan sonra harcın ikinci tabakası da aynı şekilde yerleştirilerek yeniden 60 sarsma yapılır.



Kalıp sarsma tablasından alındıktan sonra üzerindeki kalıp başlığı çıkarılır. Harcı fazla metal bir master ile sıyırılır. Kalıp üst yüzü aynı master ile düzlenir. Kalıplar numaralandıktan sonra nem odasına alınır.

Numunenin bekletilmesi; suyun buharlaşarak kaybolmasını önlemek için kalıp üzerleri çelik veya lastik bir plaka ile örtülür. Kalıplar  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve en az % 90 nemli bir oda içinde bekletilir. Dökümden itibaren 20 – 24 saat sonra kalıplar sökülür. Kalıptan çıkan harç prizması kontrol için tartılır ve yüzleri numaralanır (Gülay, 2002, TS 2434, TS 24).

Harç prizmaları daha sonra  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik içilebilir musluk suyu içinde kırılacakları güne kadar bekletilir. Kırılmalar dökümden itibaren 1, 2, 7, 28, 35, 45, 60, 75, 85 ve 90 gün sonra yapılır. Döküm esnasında üste gelen yüzeyler, bekletilme sırasında da aynı durumda kalmalıdır. Prizmalar su içinde bütün yüzeylerine su değecek şekilde ve birbirinden ayrı olarak durmalıdır. Bekletilme suyu her 14 günde bir değiştirilir. Prizmalar deneyden 15 dakika kadar önce sudan çıkarılıp bir bezle kurulandıktan sonra, eğilme çekme mukavemetleri ölçülmek üzere kırma altına yerleştirilir. Şekil 23'de numune olarak kullanılan kalıptan çıkarılmış prizmalar görülmektedir. Prizmaların renklerindeki koyuluk veya açıklık içerdikleri katkı maddesi oranına göre değişmektedir.



Şekil 31. Kalıptan çıkarılmış prizmalar

Basınç dayanım değerleri  $\text{N/mm}^2$  olarak verilmelidir. Her dayanım deneyinde aynı harç harmanından hazırlanmış en fazla iki prizma kullanılmalıdır.

Kırma presinin duyarlılığı en küçük yüklerde bile en az %1,5 olmalıdır. Presin yük göstergesi biri 4 ton veya 5 ton diğeri 15 ton veya 25 ton olmak üzere en az iki kademeli olmalıdır.

Prizmalar presin alt ve üst tablaları arasına yerleştirilen kırma başlığı yardımı ile kırılır. Kırma başlığı, yükü herhangi bir sürtünmeye sebep olmadan prizmaya iletmelidir. Prizma kırıldıktan sonra kırma başlığı otomatik olarak eski halini almalıdır.

Yükleme, basınç saniyede 10-20 N/mm<sup>2</sup> artacak şekilde yapılır. Hiçbir halde kırma süresi 10 saniyeden az olmamalıdır.

Sonuçların değerlendirilmesi, çimentonun basınç mukavemeti, 6 basınç deneyinde elde edilen değerlerin ayrı ayrı ortalaması alınıp tam sayıya yuvarlatılarak yapılır. Ortalama değerler %10'dan fazla gösteren mukavemet değerleri ise hesaba katılmamalıdır. %10'dan farklı değer sayısı basınç mukavemetinde ikiden çok olduğu takdirde deney bu şartlar sağlanıncaya kadar tekrarlanmalıdır (Gülay, 2002, TS 2434, TS 24).

#### **2.2.2.2. Priz Başlama ve Sona Erme Sürelerinin Tayini**

Priz süresi tayini deneyi 20 °C ± 2 °C sıcaklıkta ve nispi nemi % 50-60 olan bir oda içinde yapılır. Deney esnasında vicat halkası içindeki hamur her türlü sarsıntıya karşı korunur. Vicat aletine iğne takılır ve üst tablasına 27.5 gramlık bir ağırlık konur. Aletin göstergesi, iğne cam levhaya değdiği zaman sıfırı gösterecek şekilde takılmalıdır. Normal kıvamda hazırlanan numune (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında ayrı ayrı hazırlanan çimento+Kireç çamuru) vicat halkasının içine yerleştirilir. Vicat iğnesi halka içindeki hamurun üst yüzeyine dokunacak kadar indirilir ve yan taraftaki vida ile sıkıştırılır. Sonra vida gevşetilerek iğnenin hamur içine serbest olarak girmesi sağlanır. Başlangıçtaki hamur yumuşak olduğundan vida hafifçe gevşetilmeli ve iğnenin birden düşmesi önlenmelidir.

Priz başlangıç süresinin tespiti için iğne her 5 dakikada bir hamura batırılır. İğnenin bir defa girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için vicat halkasının durumu her batırıldıktan sonra değiştirilir.

Çimento hamuruna batan iğne, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı zaman priz başlamış sayılır. Çimento ile suyun karıştırıldığı andan prizın başlangıç anına kadar geçen zaman, priz başlama süresini vermektedir.



Prizin sona erme süresinin tespiti için, prizin başlamasından sonra iğne her 15 dakikada bir batırılır. İğnenin bir kez girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için vicat halkasının durumu her batırılıştan sonra değiştirilir. İğne her batırılıştan sonra bir kez süzgeç kağıdı ile iyice silinmelidir. İğnenin hamura en çok 1 mm girebildiği kıvam hasıl oluncaya kadar batırılışlara devam edilerek priz bitme süresi tayin edilir (Gülây, 2002).

### 2.2.2.3. Hacim Genleşmesi Tayini

Çimento hacminin değişimi pirinçten yapılmış Le Chatelier aleti ile tayin edilir. Silindirik halka eksenine doğrultusunda yarıktır. Yarığın her iki tarafında ve silindirin tam ortasına gelmek üzere iki çubuk lehimlenmiştir. Silindir halkanın açılabilme özelliğinin ayarlanması için, Le Chatellier aletinin çubuklarından bir tanesi lehim yanında bir mengeneyle sıkıştırılır ve diğer çubuk yatay vaziyette alta getirilir. Bu sırada çubuklar arasındaki uzaklık uçlarından ölçülür.

Deneyin yapılışı:

İlk önce normal kıvamda numune hamur hale getirilerek hazırlanır. Deney başlamadan önce, silindir halkanın yarık kenarları birbirine değmiş olmalıdır. Çimento hamuru doldurulurken çubukların arasının açılmaması için çubuklar lehim yanından ipele veya iki yuvarlak deliği bulunan bir pul ile bağlanır.

Halka, yağlanmış bir cam levha üzerine konur ve içi normal kıvamda çimento hamuru ile doldurulur. Halka üst yüzeyi, bir spatula ile kenar seviyesinde düzelterek üst yüzey bir cam levha ile kapatılır. Cam levha üstüne ağırlık konur ve çubuklara bağlanmış ipler veya pullar çözülür. İpler veya pullar çözüldükten sonra çubuk uçlarının açıklığı 0,1 mm hassasiyetle ölçülür (a) ve kalıplar, çubukların durumu bozulmaksızın, sıcaklığı 20 °C  $\pm$  2 °C olan su içine dikkatle daldırılır.

Hamur kalıba konulduktan 24 saat sonra çubuk uçlarının açıklığı (b) yeniden ölçülür. Kalıpların üzerindeki cam levha itinayla kaldırılarak çubuklar yukarı gelecek şekilde tekrar bir beher içindeki suya daldırılır. Bundan sonra içinde kalıpların bulunduğu su dolu beher, 30-45 dakika içinde kaynamaya başlayacak şekilde yavaş yavaş ısıtılır. Kaynamaya 4 saat devam edilir. Suyun buharlaşarak kaybolmasını önlemek ve kaba soğuk su katmamak için kabın üstü kaynama süresince daima kapalı kalmalıdır. Dört saat kaynama sonunda numuneler laboratuvar sıcaklığına kadar çubuk uçlarının açıklığı (c) tekrar ölçülür.

Hesaplama:

(b-a), (c-b) ve (c-a) mm cinsinden ayrı ayrı hesap edilir. (c-a) mm cinsinden toplam hacim genişmesini verir. Her çimento için bu deney 3 kez yapılarak aritmetik ortalaması alınmalı, sonuçlar tam sayıya yuvarlatılarak belirtilmelidir (Gülay, 2002, TS 2434, TS 24).

#### 2.2.2.4. Tane Büyüklüğü Tayini

Tane büyüklüğünün tayini; göz açıklığı 200  $\mu\text{m}$  ve 90  $\mu\text{m}$  olan, TS 1227'ye uygun, elek sarsma makinesi kullanılarak yapılır.

Deneyin yapılışı;

Deneye, 105  $^{\circ}\text{C} \pm 5$   $^{\circ}\text{C}$ 'lık etüvde kurutulmuş numuneden 0,1 g hassasiyetli bir terazide 100 g tartılarak başlanır. Tartılan numune, en üste 200  $\mu\text{m}$  göz açıklığı olan elek, onun altına 90  $\mu\text{m}$  göz açıklığı olan elek ve en altta toplama tavası olmak üzere sıralanmış elek dizisinin üzerine konur ve elek dizisinin üstü kapakla kapatılır. Numunenin içinde topraklar varsa, bunlar eleğe konulmadan önce el ile ufalanmalıdır. Taneler eleğin içinde parmak ile ezilmelidir. Elek dizisi içindeki çimento 15 dakika elek sarsma makinesinde elenir. Bu süre sonunda 200  $\mu\text{m}$  göz açıklığı ( $m_2$ ) olan elek-üstü kalıntısı gram olarak kaydedilir.

Göz açıklığı 90  $\mu\text{m}$  olan elek üstü kalıntısı darası belli bir kaba alınarak tartılır. Kalıntı tekrar 90  $\mu\text{m}$  göz açıklığı olan eleğe konur. Beş dakika daha el ile elenerek yeniden tartılır. Her iki tartı arasındaki fark 0,1 gramdan daha az oluncaya kadar el ile elemeye devam edilir. Göz açıklığı 90  $\mu\text{m}$  olan elek-üstü kalıntısı elek-üstü toplam kalıntısı ( $m_1$ ), ( $m_1 = m + m_2$ ) olarak bulunur (Gülay, 2002, TS 2434, TS 24).

#### 2.2.2.5. Yoğunluk Tayini

Le Chatelier şişesi, içinde su bulunmayan gazyağı veya petrol ile 0 – 1 mm işaretleri arasında bir noktaya kadar doldurulur. Balon, oda sıcaklığında olan ve sıcaklığı deney süresince  $20 \pm 0,2$   $^{\circ}\text{C}$  den fazla değişmeyen bir su banyosu içine kaldırılır.

Balon ve içindekiler banyo sıcaklığına gelinceye kadar beklenir ve hacim okunur ( $V_1$ ). Bundan sonra 0.1 mg hassasiyetle tartılan 64 g ( $m$ ) çimento numunesi kuru bir cam

huniden yavaş yavaş ve dikkatle balon içerisine akıtılır. Numune doldurulurken balon hafifçe çalkalanarak çimentonun balonun boynuna yapışması önlenir.

Bütün çimentonun balona aktarılmasından sonra huni alınarak, şişenin kapağı kapatılır. Balon kendi ekseninde döndürülerek havanın sıvı yüzeyine çıkması sağlanır. Hava kabarcıkları tamamen uzaklaştıktan sonra balon tekrar sabit sıcaklıktaki su banyosuna konularak balon ve içindekilerin banyo ile aynı sıcaklığa ulaşması için beklenir. Bu süre yaklaşık bir saattir. Bu süre sonunda sıvı hacmi tekrar okunur ( $V_2$ ).

İlk ve son okumalar arasındaki hacim farkı, deneyde kullanılan çimento ile yer değiştiren sıvının hacmini gösterir. Çimentonun yoğunluğu aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$d = m / (V_2 - V_1)$$

Burada;

d: çimentonun yoğunluğu ( $g/cm^3$ ),

m: çimentonun kütlesi (g),

$V_1$ : ilk okunan hacim ( $cm^3$ ),

$V_2$ : son okunan hacim ( $cm^3$ ) olarak ifade edilmiştir.

Çimentonun yoğunluğu, 64 gram çimento numunesi ile yukarıda verilen şekilde tekrar tayin edilir. İki deney arasındaki fark % 1'den büyük olmamalıdır. Fark bu değere eşit veya büyük ise deney, bu şart sağlanıncaya kadar yeni numunelere uygulanmalıdır. Bu deneyler sonunda birbirinden %1'den daha fazla fark etmeyen en yakın iki değerlerin ortalaması deney sonucu olarak alınır (Gülşay, 2002, TS 2434, TS 24).

### 2.2.2.6. Özgül Yüzey Tayini

Özgül yüzeyi tayin etmek için hava geçirgenliği prensibine dayanarak çalışan Blaine aleti kullanılmıştır. Blaine aleti, delikli disk, piston ve manometreden oluşur. Alet kullanılmadan önce, inceliği bilinen bir ayar numunesi ile kalibre edilmelidir. Kalibrasyon sonunda her alet için bir K sabiti tayin edilir.

Özgül yüzey tayininde kullanılacak numunenin ne kadarının kullanılacağı belirlenmesi gerekir. Bu iş için cıva delikli disk hücre içine yerleştirilir. Sonra disk üzerine iki filtre kağıdı düzgünce konur. Hücre hiçbir hava kabarcığı kalmayacak şekilde cıva ile doldurulur. Cam bir lamel ile cıvanın fazlası alınır. Hücre içindeki cıva, darası alınmış bir kaba boşaltılarak 0,0001 g hassasiyetli bir terazide tartılır ( $m_1$ ).

Ayar numunesi olarak 2.80 gram çimento, hücre içine iki filtre kağıdı arasına yerleştirilir. Hücrenin boş kalan üst kısmı cıva ile doldurulur. Yüzeydeki fazla cıva bir cam lamel ile atılır. Hücre içindeki cıva, darası belli bir kap içine alınarak tartılır ( $m_2$ ).

Çimento numunesinin hacmi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$V = (m_1 - m_2) / D$$

Burada;

V: Numune hacmi ( $\text{cm}^3$ ),

$m_1$ : çimento yokken tartımın cıva kütlesi (g),

$m_2$ : çimento varken tartımın cıva kütlesi (g),

D: cıvanın deney sıcaklığındaki yoğunluğu (bu değer TS 24'de bulunan çizelgeler yardımı ile bulunur) ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) olarak ifade edilmiştir.

Aletin K sabitinin tayini; özgül yüzeyi ve yoğunluğu bilinen bir ayar numunesi kullanılarak yapılır. Ayar numunesi miktarı; cam ampul içinde bulunan ve oda sıcaklığında olan ayar numunesi iki dakika aşağı yukarı sallanarak homojen hale getirilir. Bu süre sonunda ampul kesilir ve aşağıda açıklandığı şekilde hesaplanacak miktarda numune tartılır.

$$m = d \cdot V (1-e)$$

Burada;

m: alınacak numune kütlesi (g),

d: numunenin yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

V: numune hacmi ( $\text{cm}^3$ ),

e: Hücre içine yerleştirilmiş olan numunenin gözenekliliği; 0.5 (bu değer TS 24'de hazırlanmış çizelgeler yardımı ile bulunur (Gülay, 2002, TS 2434, TS 24).

Deneyin yapılışı;

Numune tabakası hazırlandıktan sonra manometredeki sıvı seviyesinin U borusunun en alt çizgisinde olup olmadığı kontrol edilir. Hücre dışına vazelin sürüldükten sonra manometrenin üstündeki yerine yerleştirilir. Deney sırasında numune tabakasının durumu hiçbir şekilde bozulmamalıdır.

Hücrenin ağzı sol elin baş parmağı ile hava geçirmeyecek şekilde kapatılır. Manometre borusundaki sıvı seviyesi en üst çizgiye gelinceye kadar lastik pompa vasıtası ile manometre içindeki hava emilir. Musluk kapatılarak sıvı bu seviyede tutulur. Sol elin baş parmağı hücrenin ağzından çekilir. Sıvı seviyesi ikinci çizgiye geldiği anda kronometre

çalıştırılır. Sıvı seviyesi üçüncü çizgiye gelince kronometre durdurulur. Akış süresi (t) saniye olarak tespit edilir. Oda sıcaklığı kaydedilir.

Akış süreleri, iki yeni ayar numunesi ile yukarıda verilen şekilde tekrar tayin edilir.

Üç deneyin aritmetik ortalaması akış süresi (t) olarak alınır.

K sabiti;  $K = S.D.(1-e) \sqrt{\eta} / \sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}$  bağıntısı ile hesap edilir.

Burada;

K: alet sabiti,

S: ayar numunesi özgül yüzeyi ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),

d: ayar numunesi yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

e: gözeneklilik (0,5),

$\eta$ : deney sıcaklığında hava viskozitesi (poise), (bu değer TS 24'de hazırlanmış çizelgeler yardımı ile bulunur),

t: ölçülen akış süresi (sn).

Hesaplama ve değerlendirme;

Çimento numunesinin özgül yüzeyi, tam sayıya yuvarlatılarak

$S = K \cdot (\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}) / d \cdot (1-e) \cdot \sqrt{\eta}$  bağıntısı ile hesap edilir.

Burada;

S; çimento numunesinin özgül yüzeyi ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),

K; alet sabiti,

e; gözeneklilik (sn),

d; çimento numunesinin yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

$\eta$ ; deney sıcaklığında hava viskozitesi (poise),

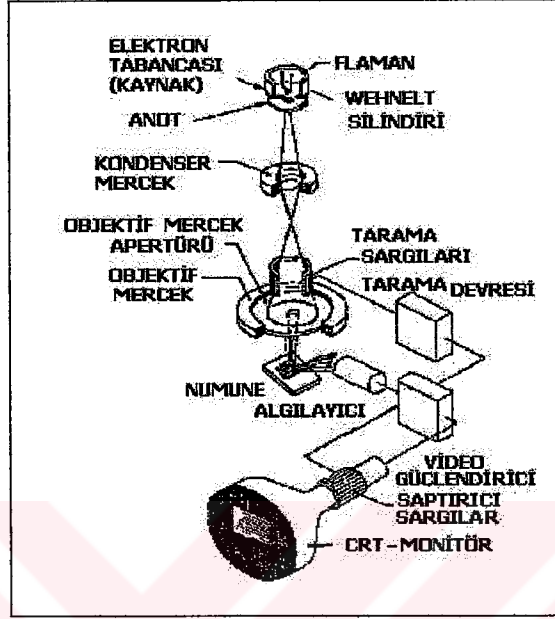
Çimento özgül yüzeyi aynı çimentodan alınan yeni bir numune ile yukarıda verilen şekliyle tekrar tayin edilir. İki deney arasındaki fark %2'den büyük olmamalıdır. Fark bu değere eşit veya büyük ise deney, bu şart sağlanıncaya kadar yeni numunelere uygulanmalıdır. Bu deney sonunda birbirinden % 2'den daha fazla fark etmeyen en yakın iki değerlerin ortalaması deney sonucu olarak alınır (Gülay, 2002, TS 2434, TS 24).

### 2.2.2.7. Taramalı Elektron Mikroskopla Fotoğrafların Çekimi

Taramalı elektron mikroskopta, katkılı çimento ve kireç çamuru karışımlarının pozolanik etkileşimi araştırılmıştır. Bunun için % 0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 kireç çamuru



katkılı ve 1, 2, 7, 28, 35, 45, 60, 75, 85 ve 90 kür süreli örneklerden oluşan 70 numuneden 15 tanesine fotoğraf çekilmiştir. Fotoğraf çekilen numuneler; 28 kür süreli ve % 0, 5, 10, 15, 25 katkı, 60 kür süreli ve % 0, 5, 10, 15, 20 katkı ve 90 kür süreli ve % 0, 5, 10, 20, 25 katkı örneklerdir.



Şekil 32. Taramalı elektron mikroskopun şematik yapısı

Taramalı Elektron Mikroskobu Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır

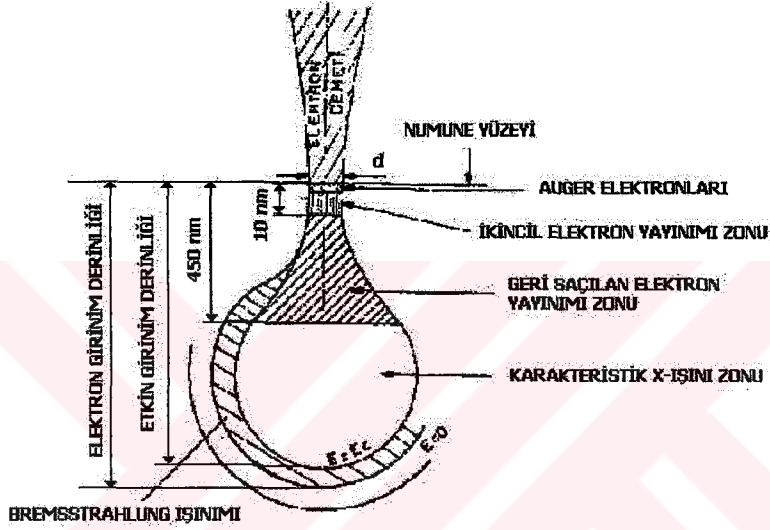
Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için kondenser mercekleri, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apertürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklanmaktadır.

Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.

Yüksek voltaj altında ivmelendirilen elektron demeti ile numune arasındaki etkileşim sonuçları Şekil 33'de şematik olarak gösterilmektedir. Yüksek enerjili demet elektronları



numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır ve Auger Spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektron (seconder electrons) olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir.



Şekil 33. Elektron demeti ve numune etkileşimi

Ayrıca numune atomları ile elektron demeti arasında elastik olmayan girişimler sonucu numunede karakteristik X-ışınları ve sürekli ışınlar da meydana gelmektedir. Karakteristik ışınlar, dalga boyu veya enerji dağılımlı X-ışını analitik sistemlerde değerlendirildiğinde, numunenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi vermektedir. Bu yöntem Elektron Mikroskop Analizi olarak bilinir.

Mikroskopta bir seferde 10 mm yüksekliğinde, 9 mm çapında, 4 adet numune incelenebilmektedir. Mikroskopta yapılacak incelemelerde numuneler genellikle inorganik ve organik olarak iki grupta toplanabilir. Ayrıca inorganik numuneler de metal ve metal-olmayanlar şeklinde iki gruba ayrılabilir. Metal numuneler iletken oldukları için yüzeyleri kaplama yapılmadan incelenebilir. Ancak metal olmayan yalıtkan numunelerin yüzeyleri iletkenliği sağlayan altın veya karbon ile kaplanması gerekmektedir. Karbon kaplama

genellikle X-ışınları ile yapılacak analizlerde uygulanır. Mevcut sistemimizde her iki kaplama ünitesi de bulunmaktadır. Yüksek çözünürlüğe ve kontrasta sahip numune görüntüsü elde etmek için, incelenecek numuneler metal olsa bile yüzeylerine altın kaplama işlemi uygulanmaktadır.

Organik numunelerin incelenebilmesi için numunelerin yüksek vakuma dayanıklı olması gerekmektedir. Özellikle böcek türleri, polenler, selüloz türü organik numuneler kurutulduktan ve altın kaplandıktan sonra düşük voltaj altında incelenebilir. Ancak hücre incelemesi yapılamamaktadır. Organik numune incelemeleri yapmak isteyenlerin önceden mikroskop sorumlularından bu konuda bilgi almaları tavsiye edilir.

### **2.2.3. Zemin Stabilizasyon Deneyleri**

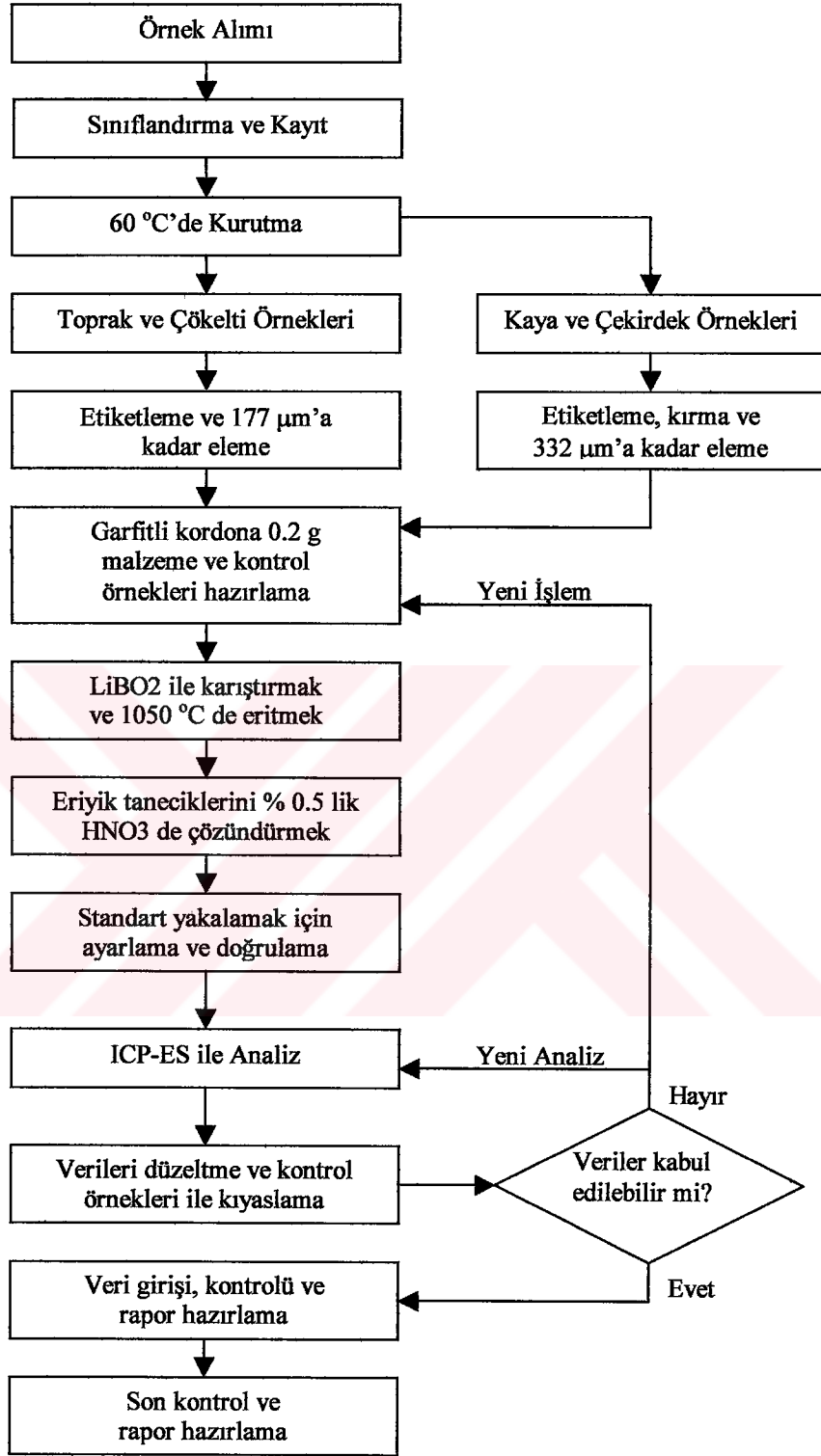
Tezin ikinci kısmını oluşturan ve yol altyapısının stabilizasyonuna yönelik çalışmalarda kullanılmak üzere doğadan 3 değişik zemin türü seçilmiş ve bu zeminlere kireç çamuru % 5, 10 ve 15 olmak üzere katılarak zeminler üzerindeki fiziksel değişimler ortaya konulmuştur. Bu çalışmaların yapılış yöntemleri aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

#### **2.2.3.1. Zeminlerin Tanımlanması**

Çalışmada kullanılan kireç çamuru ve katkıli çimento ayrıca, kumlu kil, balçıklı kil ve ağır kil zeminlerinin bazı kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirlemek için aşağıda verilen deney ve analizler yapılmıştır.

##### **2.2.3.1.1. Kimyasal Analizler**

Çalışmada kullanılan kireç çamuru atığının kimyasal analizi Kanada'da faaliyet gösteren ACME Analytical Laboratories Ltd.'de yaptırılmıştır. Bu laboratuarda yapılan kimyasal analiz için çalışma esasları Şekil 22'de akış şeması olarak verilmiştir. Kısaca anlatmak gerekirse; zemin veya sediment örneği 60 °C'de kurutulur ve 80 (177 µm) numaralı elekte elenir. Daha sonra 0.2 g numune tartılır ve kرافit kaba konularak 1.5 g LiBO<sub>2</sub> tozu ile karıştırılır. QA/QC standartlarına göre analitik olarak tam sonuçları elde edebilmek için çift örnek üzerinde çalışılır.



Şekil 34. ACME laboratuvarı çalışma esasları akış şeması

Hazırlanan örnekler 1050 °C'de 15 dakika yakılır. Erimiş örnek % 5'lik HNO<sub>3</sub> içerisinde çözündürülür. Örnek çözeltileri ICP emisyon spektrometresinde (Jarrel Ash AtomComp Model 975) 18 ana oksit ve elementi (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ba, Nb, Ni, Sr, Sc, Y ve Zr) belirlemek için işleme tabi tutulur. Ayrıca isteğe bağlı olarak Ce, Co, Cu, Ta ve Zn de belirlenebilir. Tavlama kaybı için 1 g örnek 950 °C' de 90 dakika yakılarak ağırlık farkı ölçülür. Toplam karbon ve sülfür Leco metodu yardımıyla belirlenir.

Zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılan 3 değişik zemin türünün kimyasal analizi, Trabzon Orman Toprak Laboratuvarında, Katkılı Çimentonun kimyasal analizi ise Trabzon Çimento Fabrikasında yapılmıştır.

### 2.2.3.1.2. Elek Analizi

Granülometri eğrisi belirlenmek istenen zemin kurutularak değişik çaplardan oluşan bir elek serisinde elenir. Elek analizi için bir elek takımı eleklerin temizlenmesi için fırçalar, duyarlılığı en az 0.1 gr olan terazi, etüv, geniş bir buharlaşma tabağı ve damıtık su ile dolu bir şişe gereklidir.

Elek analizinde her bir eleğin ağırlığı kuru zemin numunenin ağırlığı, her bir eleğin üzerinde kalan zeminle birlikte ağırlığı ve 200 nolu elekten geçen kısmın etüvde 24 saat kurutulduktan sonraki ağırlığı ölçülür.

Elek analizi yapılırken izlenen yol aşağıdaki gibidir

- Zemin karıştırılarak ve beklenerek hava kurusu hale getirilir
- Kullanılacak elek serisindeki her bir elek yıkanarak temizlenir ve kurutulur. Numunenin toplam ağırlığının 100 gr'dan az olması halinde ya da 3 inch çaplı eleklerin kullanılmaması halinde, her bir elek tek tek 0.1 gr duyarlılık terazide tartılarak ağırlıkları kaydedilir. Aksi takdirde 1 gr duyarlılık terazi kullanılır.

- Zemin kütlelerini temsil edecek bir miktar havada kurutulmuş zemin numunesi dikkatlice alınır.

- Seçilen numune terazide tartılır ve en üstteki eleğin içine dökülür ve bu eleğin üzerindeki kapak kapatılır. Elekler, elle veya sarsma tablası ile sarsılmak suretiyle zeminin elenerek her bir elek üzerinde çaplarına ayrılması sağlanır.

- Sarsma işlemi durdurularak her elek içinde kalan zeminler eleklerle birlikte tartılır.

- 200 nolu elekten geçen kısım alınarak ıslak analizde kullanılmak üzere saklanır.
- Çok hassas bir granülometri eğrisi elde edilmek isteniyorsa; 200 nolu elek üstünde bulunan zeminler, her bir elek üstünde kalan zemin ayrı ayrı olmak üzere, 200 nolu elek üzerine konularak damıtık su ile yıkanır. Akan su ve ince malzeme dışarıya akıtılmadan ağırlığı önceden tartılmış geniş buharlaştırma kapları içinde toplanır.

Buharlaştırma kapları  $110 \pm 5$  °C sıcaklıktaki etüve konulur. Suyun tamamen buharlaşarak gitmesi sağlanır. Sonra buharlaştırma kapları etüvden alınarak tartılır. 200 nolu elekten geçmiş olan malzemelerin ağırlıkları kaydedilir. Her bir ağırlık ait olduğu elekteki zemin ağırlığından çıkarılır ve 200 nolu elekten geçmiş olarak dikkate alınır (Aytekin, 2000, Özyayın, 1989).

#### **2.2.3.1.3. Mekanik Analiz (Tekstür Tayini)**

Araziden alınan zemin örnekleri laboratuarda kağıt üzerine serilerek hava kurusu hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Hava kurusu hale gelen toprak örnekleri, porselen havanda öğütülmüş ve 2 mm'lik elekten geçirildikten sonra naylon torbalara doldurularak analize hazır hale getirilmiştir.

2 mm'lik elekten geçirilmiş toprak örneklerinde Bouyoucos'un hidrometre yöntemi kullanılarak kum, toz ve kil yüzdeleri bulunmuştur (İrmak, 1954., Gülçur, 1972., Arp, 1999.) Toprak türü ise Uluslararası tekstür üçgenine göre belirlenmiştir (Çepel, 1988.)

#### **2.2.3.1.4. Organik Madde Tayini**

Organik madde tayini, Walkley-Black ıslak yakma yöntemine göre yapılmıştır. Organik karbondan gidilerek organik madde miktarı hesaplanmıştır (İrmak, 1954, Özyuvacı, 1971).

#### **2.2.3.1.5. pH Tayini**

1 / 2.5 oranında toprak-saf su karışımı bir gece bekletilmek suretiyle Beckman pH metresinde ölçülmüştür (İrmak, 1954).



### 2.2.3.1.6. Elektriksel İletkenlik Tayini

Elektriksel iletkenlik  $ms/cm^{-1}$  olarak 1/2.5 torak/su oranında hazırlanan ekstratın, bir gece beklendikten sonra Philips PW-9526 digital Conductivimeter cihazı ile ölçülmüştür (Kalra ve Maynard, 1991).

### 2.2.3.1.7. X-ışını Difraktometrisi (XRD)

Kayaçların mineralojik yapısının belirlenmesinde çoğunlukla kullanılan bir yöntemdir. Genellikle elde edilen bilgiler başka muayene metotlarıyla desteklenir. X ışınları analizinde toz haline getirilmiş numune; cam, alüminyum plaka veya örnek kutusuna konularak X-ışınları aletinin yuvasına yerleştirilir. X ışınları sabit bir kaynaktan gelecek şekilde alet çalıştırılır. Bu sırada numune sabit bir hızla dönmektedir. Bu dönme sırasında X ışınının açısı herhangi bir düzlemde Bragg eşitliğini vermediği sürece kaydedici sadece temel X ışınlarını kaydetmiştir. Bragg eşitliği sağlandığı anda X ışınının şiddeti yükselmiş ve bu değer grafik kağıdında pik olarak gözükümüştür. Numune sürekli döndüğü için değişik zamanlarda pikler tekrarlanmıştır. Grafik kağıdındaki piklerin  $2\theta$  açıları okunarak her bir pik d mesafesi, Bragg eşitliği;

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{formülü ile hesaplanır.}$$

Burada; d kristallerde atomik düzlemler arası mesafe,  $\lambda$ , X ışınının dalga boyu ve n tamsayı olarak gösterilmiştir. Numune, eldeki d mesafelerine göre hazırlanmış katalog veya bilgisayar programlarından belirlenir. Değerlendirme; XRD Menu Programı ile gerçekleştirilmiştir (Aksoy, 2001).

Deneylerde kullanılan Afyon-Çay Seka Selüloz Fabrikası Atık Çamurunun (ASSFAÇ) mineralojik bileşimini belirlemek için KTÜ Jeoloji Bölümünde RIGAKU marka D-Max-C model XRD (X ışınları toz difraksiyon metodu) cihazı kullanılmış olup, ışın tüpü Cu-K $\alpha$  ve dalga boyu 1.542 Å'dır. Bu metot için ASSF'dan çıkan kireç çamuru kurutulmuş ve kurutulan örnekler öğütülerek ince boyutlara indirgenmiştir. İki metal disk arasına sıkıştırılarak, iki yüzü düz tavla puluna benzer şekle getirilmiş, daha sonra difraksiyona tabi tutulmuştur.

X-ışınları, yüksek hızla hareket eden elektronlar bir metalik engelin atomlarına yani numune tozları veya kristal yüzeyine çarptığı zaman doğar. X- ışınları tüpü bu çarpışmayı sağlar. Flamentten çıkan elektronları hızlandırmak için tüp boyunca yüksek voltaj verilir. X-ışınları anodda elektronların çarptığı noktada meydana gelirler ve her yönde ışınlar. Büyük bir kısmı pencereden dışarı çıkar. Çıkan enerjinin ancak % 1'i X ışınına dönüşür. Gerisi ısı olarak tüpün soğutulması ile kaybolur (Akıncı, 1999).

X-ışınları, ışık gibi elektromanyetik dalgalar olup dalga boyları 0.02-100 Å arasında değişir. Elektromanyetik spektrumun diğer üyeleri gibi ikili bir yapıya sahiptirler. Bunlar bazı şartlarda dalga gibi davranmaktadır. X-ışınları difraksiyon yöntemleri de bu özellik üzerine kurulmuş bulunmaktadır.

#### 2.2.3.1.8. Enerji Dispersiv X-ışını Floresans Spektroskopisi (EDXRF)

Kireç çamuru atığının bünyesindeki elementlerin varlığını kimyasal analiz sonuçlarını da destekleyecek şekilde, bünyesindeki elementleri gösteren X-ışını spektrumlarını elde etmek için EDXRF kullanılmıştır.

Uyarma ve sayma bakımından karakteristik X-ışınlarının şiddetlerini etkileyen faktörlerden birisi deney geometrisidir. Numuneler deneye hazır hale getirildikten sonra 50 mCi şiddetindeki filtre edilmiş Fe-55 radyoizotop halka kaynağından çıkan 5.96keV'lik  $\gamma$ -ışınlarıyla uyarılmışlardır. Numuneler 6000 saniyelik gerçek sayma zamanı süresince sayılmışlardır. Karakteristik X-ışınlarının sayılmasında yarı maksimum tam genişliği (rezolüsyonu) 5.89 keV'de 147 eV olan LEGe dedektörü kullanılmıştır.

EDXRF sisteminin diğer analitik sistemlere göre avantajları;

1- Tahrip edici değildir. Analiz edilmiş numunelerin durumlarının büyük çoğunluğunda, X-ışınlarının etkisiyle değişme ve tahribat oluşmamaktadır. Böylece numuneler referans olarak ve başka testler için tekrar kullanılabilir.

2- Numunelerin kolay hazırlanması: Çoğu numune miktarının az olması veya ön hazırlık yapılması gibi durumlara gerek duyulmaksızın incelenebilir. Diğer alternatif yöntemlerde ise asit veya diğer ayrıştırıcılara ihtiyaç duyulacağından hem zaman hem de maliyet bakımından negatif yönleri daha çoktur.

3- Zaman bakımından hızlıdır: X-ışını spektroskopisi kimyasal bileşikleri saniyeler içinde incelenmesine imkan sağlar. Örneğin Berkeley Spectrace aletinde, Ti-Nb elementlerinin analizi numune başına 250 saniye alır.

4- Kullanımı kolaydır: Modern aletler, elde ölçümleri yapılan ve sonuçlarının hesapları etkili yazılımlarla bulunabilen bilgisayarların kontrolü altında çalışırlar. Bu sonuçlar ister bir analizin kontrolünde elde hesaplanabilir veya tamamen otomatik biçimde değerlendirilebilir.

### **2.2.3.2. Atterberg Limitleri**

Likit limit değerlerinin saptanması TS1900:1975 Deney 2A'ya göre Casagrande'nin yöntemi ve Bs1377:1975 Dey 2A'ya göre koni penetrasyonu yöntemi uygulanmış, tüm sonuçlar arasında uyum olmakla birlikte, tekrarlanabilirliği daha üstün görülen ikinci yöntemin değerleri kullanılmıştır. Plastik limit ve plastisite indisi değerlerinin belirlenebilmesinde TS1900:1975'e uyulmuştur. Yine bu standarda uygun olarak tek eksenli büzülme ve ASTM D427'ye uygun olarak da büzülme limiti değerleri saptanmıştır.

### **2.2.3.3. Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi**

Arazide bir yapı temeli, toprak dolgu veya herhangi bir yüklenmenin etkisi altında kalacak zemin tabakalarının gerilme-şekil değiştirme davranışlarını ve kayma mukavemetlerini belirlemek amacıyla, bu tabakalardan numune almak ve bunları laboratuvar ortamında deneye tabi tutmak için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir. Bunlar arasında, daha yaygın olarak kullanılan yöntemler;

- 1- Kesme kutusu deneyi
- 2- Serbest basınç deneyi
- 3- Üç eksenli basınç deneyi
- 4- Laboratuvar veyn ve düşen koni deneyleri şeklinde özetlenebilir.

Bu çalışmada katkı malzemesi değişik zeminler üzerinde belirtilen oranlarda katılmış elde edilen numuneler üzerinde mukavemet değerlerini ölçmek için üç eksenli basınç deneyi kullanılmıştır. Zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri arasında üç eksenli basınç deneyi en gelişmiş deneylerden biridir. Bu deney düzeni ile, zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemetini gerçeğe en yakın olarak belirlemek mümkün olmaktadır. Üç eksenli basınç deneyinde kontrol edilebilen ve/veya ölçülebilen parametreler şu şekilde sıralanabilir;

- Zemin numunesi arazi gerilmeleri altında konsolide edilmekte ve suya doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir.
- Yanal ve eksenel gerilmeler uygulamak sureti ile arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler yapılabilmektedir.
- Eksenel yükleme sırasında drenajsız veya drenajlı koşullar geçerli kılınabilmektedir.
- Drenajsız yüklemelerde numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışları, drenajlı deneylerde ise meydana gelen hacim değişimleri ölçülebilmektedir.

Üç eksenli basınç deneyinde, silindirik bir zemin numunesi bir hücre içine yerleştirilmekte ve hücreye uygulanan hava veya su basıncı vasıtası ile zemin numunesi üzerinde hidrostatik bir basınç uygulanabilmektedir. Numune etrafına geçirilen bir lastik kılıf zeminin hücreyi dolduran su ile temas etmesini önlemekte, numune içine ve dışına ayrı ayrı basınçlar uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Numune üst başlığına temas eden bir piston vasıtası ile eksenel gerilme uygulanmakta, numune alt ve üst başlıklarına bağlı ince kanallar vasıtası ile de deney sırasında drenaj durumu (zemin suyunun dışarı çıkıp çıkmaması) kontrol edilebilmektedir (Özaydın, 1989).

Üç eksenli basınç deneyi iki aşamadan oluşmaktadır:

1. Aşama: Zemin numunesi üzerine arazide yüklenmeden önce etkileyen gerilmelerin hücre basıncı vasıtası ile uygulanması. Bu aşamada drenaja izin verilirse numune konsolide edilebilmektedir.

2. Aşama: Eksenel basınç uygulanması. Bu aşama drenajlı ve drenajsız olarak gerçekleştirilmektedir. Drenajlı deney yapılması durumunda, yükleme hızının zeminin permeabilitesine göre seçilerek, zemin içindeki suyun rahatlıkla dışarı çıkmasına, dolayısıyla boşluk suyu basıncı artışları oluşmamasına dikkat etmek gerekmektedir.

Yukarıdaki aşamaların her ikisinde de drenaj durumu kontrol edilerek, üç değişik türde üç eksenli basınç deneyi yürütmek mümkün olmaktadır.

1- Konsolidasyonsuz-Drenajsız deneyler (UU-deneyleri): Bu tür deneyde, zemin suyunun gerek hücre basıncı uygulamasında gerekse eksenel yükleme sırasında numuneden dışarı çıkmasına izin verilmemektedir.

2- Konsolidasyonlu-drenajsız deneyler (CU-deneyleri): Birinci aşamada hidrostatik basınç altında zemin suyunun dışarı çıkmasına (numunenin konsolide olmasına) izin verildikten sonra, ikinci aşamada drenajsız durumda eksenel yükleme yapılan deneylerdir.

3- Konsolidasyonlu-drenajlı deneyler (CD-deneyleri): Her iki aşamada da (hidrostalik hücre basıncı uygulanması ve eksenel yükleme) drenaja izin verilen bir tür deneydir.

Değişik türde üç eksenli basınç deneyleri uygulayarak, arazideki zemin tabakalarının farklı yükleme ve drenaj koşulları altında gösterecekleri gerilme-şekil değiştirme davranışlarını ve kayma mukavemetlerini belirlemek mümkün olmaktadır. Bu deneylerde farklı zeminler için gözlenen davranış biçimleri aşağıda incelenmiştir (Aytekin, 2000).

#### 2.2.3.4. Konsolidasyon Deneyi

Zemine ait oturmalarda oturma oranının, permeabilitenin ve sıkışma katsayısının ( $a_v$ ) hesaplanmasıdır. E-log(p) eğrilerinin çizilmesinde yaygın olarak kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar Logaritma zaman ve karekök-zaman yöntemleridir.

Konsolidasyon deneyi için örnek alma halkası zemine çakılarak zemin numunesi alınmalıdır. Deneye başlamadan önce poröz taşlar 20-30 dakika damıtık su içinde tutularak doymun hale getirilmelidir. Deney süresince zemin numunesi su altında kalmalı ve yükleme başlığı eksantrik yüklemeyi önlemek bakımından tamamen yatay duruma getirilmelidir.

Konsolidasyon deneyi için, konsolidasyon aleti (ödometre), yükleme boyunduruğu, zemin numunesinin kesilmesi ve düzeltilmesi için gereken aletler 0.01 g hassaslığında terazi, su muhtevası belirlemede kullanılacak küçük cam kaplar, kronometre, geniş bir su haznesi (yaklaşık 15 cm çapında) ve deformasyon saati gereklidir.

Deneyde zemin numunesinin deney başlangıcındaki su muhtevası ( $w_i$ ), zemin numunesinin deney başlangıcındaki ağırlığı ( $W_{si}$ ), zemin numunesinin deney başlangıcındaki kalınlığı ( $H_o$ ), zemin numunesinin tane birim ağırlığı ( $\gamma_s$ ), değişik gerilme kademelerinde ve zaman aralıklarındaki zemine ait kalınlıklar ( $H_i$ ), zemin örneğinin deney sonundaki kalınlığı ( $H_f$ ), zemin tanelerinin ağırlığı ( $W_s$ ) ve zeminin deney sonundaki su muhtevası ( $w_f$ ) ölçülür.

Deney düzeneğinin hazırlanması; yükleme halkası poröz taşın üzerine yerleştirilir. Yükleme yapıldıktan sonra poröz taşın konsolidasyon halkası ile arasında sıkışma olmaması sağlanır. Okuma saati düşey oturmaları (hareketleri) ölçebilecek şekilde yükleme halkasının üzerine yerleştirilerek, okuma saatinden ilk okuma ( $dz$ ) alınır (Aytekin, 2000).

Zemin numunesi doymun durumda deneye tabi tutulacaksa hazne damıtık su ile doldurulur. Numune doymun koşullarda denenmeyecek ise zemin numunesi halka, poröz



taşlar ve kağıt filtreler gevşek bir plastik torba içinde yerine yerleştirilerek su kaybının önlenmesi sağlanır.

Zemin numunesinin çok yumuşak olmaması halinde, çok düşük bir düşey gerilme ( $0.25 \text{ kg/cm}^2$ ) deney başlangıcında uygulanır ve adım 5'de verilen zaman aralıklarında okuma saatinden okumalar alınır.

Okuma saatinden  $\sigma$  ( $0.25 \text{ kg/cm}^2$ ) = 0.25 - 0.50 - 1.0 - 2.0 - 4.0 - 8.0 - 4.0 - 2.0 - 4.0 - 8.0 - 16.0 - 32.0 gerilme kademelerinin her biri için, kullanılacak hesap yöntemine göre; Logaritma zaman yöntemi için 0.0, 1/4, 1/2, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0, 30.0 dakikalarda ve 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 24.0 saatlerde, Karekök-zaman yöntemi için, 0.0, 1/4, 1.0, 2.25, 4.0, 6.25, 9.0, 12.25, 16.0, 25.0, 64.0, 144.0, 225.0, 625.0, 900.0, 1444.0 dakikalarda okumalar yapılır ve her bir gerilme kademesinde oturmalar duruncaya kadar işleme devam edilir.

Zemin numunesinin yük kalktıktan sonraki davranışı bulunmak isteniyorsa, aşağıdaki işlemleri de bu arada yapılması önerilmektedir (Aytekin, 2000)

- Uygulanan gerilmeler aynı gerilme kademeleri kullanılarak boşaltılır.
- Her iki durumda da (a ve b) okuma saatinden numunedeki oturma ve kabarmalar okunarak yukarıda verilen zaman aralıklarında kaydedilir.
- Uygulanan gerilme kademeleri tamamlandıktan sonra yükler kaldırılır, numune halkası içinde zeminle birlikte alınır, üzerinde bulunan sular uzaklaştırılarak zemin numunesinin ıslak ağırlığı belirlenir. Sonra numune etüve konularak 24 saat kurutulur ve numunenin kuru ağırlığı tartılarak bulunur ve su muhtevası hesaplanır ( $w_f$ ).

Deneye başlamadan önce zemin numunesinin kalınlığı ve çapı, başlangıçtaki su muhtevası, zeminin tane birim ağırlığı ölçülmeli ve okuma saatindeki sıfır okuması yapılmalıdır.

Deney süresince; okuma saatinden  $s$  ( $0.25 \text{ kg/cm}^2$ ) = 0.25 - 0.50 - 1.0 - 2.0 - 4.0 - 8.0 - 4.0 - 2.0 - 4.0 - 8.0 - 16.0 - 32.0 gerilme kademelerinin her biri için, kullanılacak hesap yöntemine göre; Logaritma zaman yöntemi için 0.0, 1/4, 1/2, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0, 30.0 dakikalarda ve 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 24.0 saatlerde, Karekök-zaman yöntemi için 0.0, 1/4, 1.0, 2.25, 4.0, 6.25, 9.0, 12.25, 16.0, 25.0, 64.0, 144.0, 225.0, 625.0, 900.0, 1444.0 dakikalarda okumalar yapılır ve her bir gerilme kademesinde oturmalar duruncaya kadar işleme devam edilir. Uygulanan gerilme kademeleri ve yapılan okumalar kaydedilir. Deney süresince suyun ısısı oda sıcaklığında sabit tutulamıyorsa ölçülerek kaydedilir. Çünkü

suyun viskozitesinin yüksek ısı değişimlerine bağlı olarak değişim gösterdiği ifade edilmektedir (Özaydın, 1989).

**Deneyin yapılışı;**

**Zemin numunesinin hazırlanması**

1. Zemin numunesine yük uygulamasında kullanılan boyunduruk ayarlanamayan cinsten ise zemin numunesine uygulanacak yük olarak dikkate alınmalıdır.

2. Poröz taşlar damıtık su içine konulup birkaç dakika beklenerek doğgun hale getirilmeli ve zemin numunesinde su emmesi önlenmelidir.

3. Zemin numunesinin ödometre aletine yerleştirilmesi örselenmiş numuneler ve örselenmemiş numuneler için farklıdır. Örselenmiş bir zemin numunesi ile deney yapılacaksa 4 no'lu adımdan devam edilir. Numunenin örselenmiş olması durumunda, ödometre halkasına göre zemin numunesi kesilerek hazırlanır. Hazırlanan numune konsolidasyon halkasına dikkatlice yerleştirilir. Numunenin alt ve üst yüzeyleri tamamen düzgün olmalı ve bu işlemlerin yapılması sırasında su muhtevasının değişmemesine özen gösterilmelidir. Numune konsolidasyon halkasına yerleştirildikten sonra halkayla birlikte tartılır ( $W_{si}$ ) ve 5 no-lu adımdan devam edilir.

4. Örselenmiş zemin numunesi istenilen su muhtevasında konsolidasyon halkasına el ve spatüla kullanılarak yerleştirilir. Bu arada numune içinde hava boşluğu kalmamasına dikkat edilir. Numunenin alt ve üst yüzeyleri düzgün hale getirilir. Numune ve halka birlikte tartılır ( $W_{si}$ ).

5. Zemin numunesinin ince taneli olması halinde alt ve üst yüzeylerde kullanılan poröz taşlarla numune arasına filtre kağıdı konulmalıdır. Böylece poröz taşların gözeneklerinin dolması önlenmiş olur.

6. Zemin numunesinin başlangıç su muhtevası alt ve üst yüzeylerinin düzeltilmesi sırasında çıkan zemin kullanılarak belirlenebilir. Ya da arta kalan zeminden kullanılarak su muhtevası ( $w_i$ ) belirlenebilir.

7. Konsolidasyon halkası içinde zemin numunesi ile ödometrenin içine yerleştirilir. Yükleme boyunduruğu yerine konulur. Deneye başlamadan önce numunenin yüklenmemesi için gerekli önlemler alınır (Aytekin, 2000).

Konsolidasyon deneyi; arazideki zemin tabakalarının düşey yüklemeler altında sıkışması esas olarak tek boyutlu bir sıkışma (düşey doğrultuda) problemi oluşturduğu için laboratuvar deney düzeninde zeminin yanal genişlemesine izin verilmekte ve belirli düşey

yükler altında zeminin boy kısılması ölçülmektedir. Ödometre aletinde zemin numunesi rijit bir çelik halka içine yerleştirilmektedir.

Numunenin alt ve üst yüzeylerine konan poröz taşlardan zemin içindeki suyun düşey doğrultuda hareketle dışarı çıkması sağlanmakta, uygulanan sabit bir yük altında meydana gelen düşey şekil değiştirmeler hassas bir okuma saati vasıtası ile zamana bağlı olarak sürekli ölçülmektedir. Zemin numunesinin alanı sabit alındığı için boy kısılması ölçümlerinden hacim değişimleri de kolaylıkla hesaplanabilmektedir (Aytekin, 2000, Özaydın, 1989).

### 2.2.3.5. Standart Kompaksiyon (Proctor) Deneyi

Kompaksiyon deneyinin amacı; zeminin sıkıştırılması ile maksimum kuru birim ağırlığının elde edildiği su muhtevasının belirlenmesidir. Zeminlerin birim hacim ağırlıklarının artırılması ile genellikle kayma dirençleri artmakta geçirimsizlikleri ile oturmaları azalmaktadır.

Deney için kompaksiyon kabının hacmi, kompaksiyon kabının boş ağırlığı, kompaksiyon kabın + zemin ağırlığı ve kompaksiyonu yapılan zeminin su muhtevası ölçülür.

Zemin kütlelerini temsil eden bir miktar havada kurutulmuş zemin 4 no'lu elekten geçirilerek elenir. Zemin numunesinin öğütülmesi gerekiyorsa, bu işlem yapılırken zemin taneciklerinin kırılmamasına, sadece birbirinden ayrılmasına özen gösterilmelidir.

En az dört adet olmak üzere değişik su muhtevalarında zemin numuneleri damıtık sular karıştırılarak hazırlanır. Numunelerin damıtık su ilave edilerek karıştırılması sırasında plastisite özelliklerine (likit limit ve plastik limit değerlerine) bakılarak optimum su muhtevasının ne olabileceği kabaca tahmin edilebilmektedir. Fazla sayıda kompaksiyon deneyi yapmamak için alınan tahmini optimum su muhtevasının, kuru zemin ağırlığına oranı cinsinden % 4-5'in altındaki bir su muhtevasından, % 4-5'in üstündeki bir su muhtevasına kadar % 1.5-2 oranında su ilave edilerek numuneler hazırlanır.

Her bir zemin numunesi iyice karıştırılarak suyun homojen bir biçimde dağılması sağlanır. Zemin numunelerinin içinde buldukları kapların ağızları kapatılarak nem odasında kür için zeminin sınıfına bağlı olarak belli bir süre bekletilmelidir. Numunelerdeki su muhtevası düşükten yükseğe doğru değiştirilmeli ve kuru birim hacim ağırlıkları önce artmalı sonra da azalmalıdır. Deneyler için seçilen su muhtevalarında,

maksimum kuru birim hacim ağırlığının elde edilebilmesi için yeterli miktarda numune bulundurulmalıdır. Su muhtevası-kuru birim hacim ilişkisini gösteren eğrideki deneylerden elde edilmiş noktalardan en az iki tanesi optimum su muhtevasının sağında, iki tanesinin de solunda yer alması gerekir.

Kompaksiyon silindiri sert bir yüzey üzerine yerleştirilir. Zemin numunesi birbirine eşit olacak üç tabaka halinde kompaksiyon silindirinin içine serilerek her tabaka 2.5 kg ağırlığındaki tokmağın 30.5 cm yükseklikten serbest düşüşü ile yatayda homojen olarak dağıtılan 25 vuruş ile sıkıştırılır. En üstteki tabaka sıkıştırıldıktan sonra yaka çıkarılır. Sıkıştırılmış haldeki son tabakanın silindirik kaptan yukarıya taşan kısmı 0.5-1.0 cm arasında olmalıdır. Bu fazlalık kısım bıçak ve spatula kullanılarak kesilip temizlenir.

Kompaksiyon kabının üst yüzeyi iyice düzeltildikten sonra yan yüzleri de iyice temizlenir. İçi sıkıştırılmış zeminle dolu kap yakasız olarak 1 gr. duyarlıklı terazide tartılır. Silindirik kap numune çıkarma aygıtına takılarak içerisindeki sıkıştırılmış zemin, kolun çevrilmesi ile çıkartılır. Numunenin su muhtevasını belirlemek için silindirik kaptan çıkarılan numune, dilimlenerek ortasından üst kısmına ve alt kısmına yakın yerlerden yaklaşık 100'er gram numune alınarak etüve konulur. Bu üç parçanın su muhtevasının ortalaması, sıkıştırılmış silindirik numunenin su muhtevası olarak kaydedilir. Yapılacak her kompaksiyon için işlemler tekrar edilerek maksimum kuru birim hacim ağırlığına ulaşılmaya çalışılır. Sonuçta su muhtevası – kuru birim hacim ağırlık ilişkisini gösteren eğri çizilir. Bu eğrinin pik noktası belirlenir ve bu pik noktasının yatay eksenindeki karşılığı optimum su muhtevasını, düşey eksenindeki ise maksimum kuru birim hacim ağırlığını gösterir (Özaydın, 1989).

### **2.2.3.6. Su Muhtevası ve Kıvam Limitlerinin Ölçümü**

Su muhtevası ölçümünün gerçekleştirildiği etüvde kurutma yöntemi, katkılı örnekler için bazen çok hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu yolla belirlenen su miktarındaki hata, katkı madde miktarının beşte birine kadar çıkabilmektedir. Katkı maddesi ile killerin etkileşimi sonucu meydana gelen ürünlerin hidratlandıkları bilinmektedir. Bu hidratlanma suyu, yöntem gereği uygulanan sıcaklıkta buharlaşmamakta, bu sıcaklıklarda söz konusu etkileşim ürünleri daha da çoğalmaktadır. Elektromanyetik mikrodalga fırınlarında kurutarak en çok bir çeyrek saatte buharlaşmayı sona erdirdiği, böylece yeni ürünlerin oluşumuna fırsat verilmediği bildirilmiştir. Çalışma kapsamında böyle bir olguya

rastlanılmadığı için kızılötesi ışınları ile çabuk kurutma sağlayan bir nem terazisinin kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu terazide uygulanan güç ayarıyla sağlanacak kurutma hızının alınacak sonuçlar üzerinde etkili olacağı bilinmektedir. Ayrıca, yöntemin ölçme hassasiyeti de oldukça sınırlıdır. Bu nedenlerle bir kalibrasyon çalışması yapılarak optimum alet ayarlarının bulunması gerekmiştir.

#### **2.2.4. Sonuçları Değerlendirme Yöntemi**

Çalışmadan elde edilen bulgular, çimento deneylerine ait olan bulgular ve zemin stabilizasyonuna ait deneylerden elde edilen bulgular olarak iki grup altında toplanmış ve tartışılmıştır. Değerlendirmeler Microsoft Excel Paket programı kullanılarak grafiksel olarak yapılmıştır. Grafik çizimleri esnasında literatüre uyumlu olması açısından benzer literatür ve diğer kaynaklardan yararlanılmış ve bir standart oluşturulmaya çalışılmıştır. Daha sonra bu grafikler yorumlanmış ve literatürle tartışılarak değerlendirilmiştir.

Orman yollarının üstyapısında, kaplama tabakasına yönelik yapılan stabilizasyon çalışmalarından elde edilen bulgular, deneylere göre sınıflandırılmış ve benzer çalışmaların yapıldığı literatürle tartışılmıştır. Öncelikle kireç çamuru ve katkıli çimentonun bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri belirlenmiş, daha sonra karışımlar üzerindeki değişimlerin ortaya konduğu bulgularla ilişkiye getirilmiştir. Kireç çamurunun katkıli çimentoyla karıştırılmasından elde edilen bulgular kür süresine ve katkı oranına bağlı olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar Taramalı Elektron Mikroskop görüntüleri ile desteklenmiştir.

Orman yolları altyapısında, taban zeminlerin stabilizasyonuna yönelik yapılan çalışmalarda, öncelikle doğadan elde edilen zeminlerin tanımlanması ve bazı kimyasal ve fiziksel özelliklerinin tespiti yapılmıştır. Bundan sonra kireç çamuru katılarak oluşturulan numuneler üzerinden yapılan deneylerden elde edilen bulgularla zemin özellikleri ilişkiye getirilmiştir. Bu amaçla yapılan değerlendirmeler katkı oranına ve zemin cinsine bağlı olarak yapılmıştır. Elde edilen bulgular benzer malzeme ve zeminlerin kullanıldığı çalışmalarla tartışılmıştır.

Araştırmada yapılan stabilizasyon çalışmaları laboratuvar koşullarında deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan deney ve yöntemlerin, elde edilen sonuçlar ışığında arazide inşa edilecek olan kireç çamuru katkıli beton kaplamanın ve kireç çamuru ile stabilize edilmiş altyapının (taban zemini) arazideki orman yollarında maruz kalabilecek olduğu tüm yüklenme ve gerilmeleri temsil etmesine dikkat edilmiştir.



### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

#### 3.1. Çimento Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma

##### 3.1.1. Kireç Çamuru ve Katkılı Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu

Çimentoya katkı olarak kullanılan ve Afyon Seka-Çay İşletmesinden temin edilen kireç çamurunun kimyasal içeriğinin tespiti hava kurusu ve yakılarak ACME Analytical Laboratories Ltd.'de yaptırılmış ve analiz sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Kireç Çamuruna Ait Kimyasal Analiz Sonuçları

Bileşen	Hava kurusu	Yanmış
SiO <sub>2</sub> (%)	9.19	12.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.10	0.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.07	0.11
MgO (%)	0.15	0.19
CaO (%)	40.09	51.54
Na <sub>2</sub> O (%)	3.01	3.9
K <sub>2</sub> O (%)	0.19	0.51
SO <sub>3</sub>	0.02	
Tavlama Kaybı (%)	47.0	0
TiO <sub>2</sub> (%)	< 0.01	< 0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.18	0.22
MnO (%)	<0.01	<0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.004	0.003
Ba (ppm)	13	17
Ni (ppm)	33	<20
Sr (ppm)	130	178
Zr (ppm)	<10	<10
Y (ppm)	<10	<10
Nb (ppm)	<10	<10
Sc (ppm)		<1
Toplam C (%)	8.53	8.12
Toplam S (%)	0.50	0.59
CO <sub>2</sub> (%)	30.27	
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.43	
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	4664	
Tane Büyüklüğü (90-200 µm) % geçen	39.8-80	

Ayrıca çimento deneylerinin yapıldığı Trabzon çimento fabrikasında; kireç çamuru, katkı çimento ve çimento ile kireç çamuru karışımlarına kimyasal analizler TS 687'ye göre yapılmış ve sonuçlar da Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Katkılı Çimento (KÇ), Kireç Çamuru (KÇa) ve karışımların kimyasal analiz sonuçları

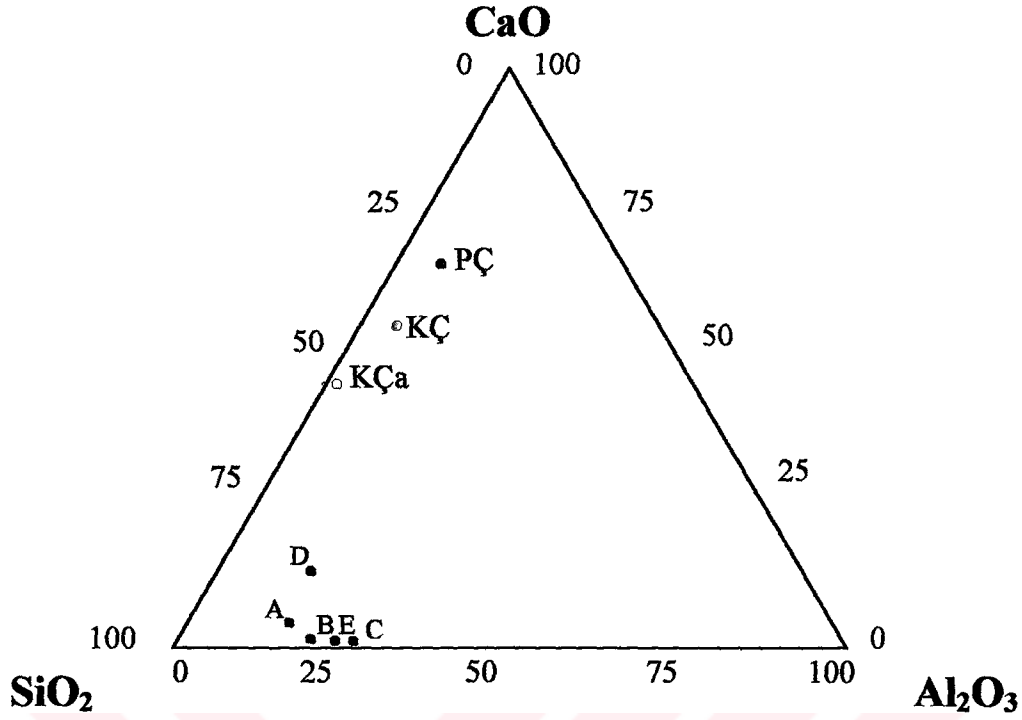
Çimento Tipi	Özgül Yüzey	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	Tav.K. %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	S. CaO %	Toplam %
KÇ	3457	27.19	5.39	3.88	54.01	1.23	2.19	3.56	0.82	1.01	2.68	99.28
KÇa	4664	10.09	-	0.63	45.55	2.02	0.02	33.84	4.96	0.34	-	97.45
5KKÇ	3440	25.87	5.02	3.91	53.42	1.60	2.20	4.55	1.00	1.19	2.07	98.72
10KKÇ	3255	25.64	4.71	3.55	52.83	1.29	2.08	5.50	1.05	1.14	2.25	97.79
15KKÇ	2703	25.61	4.44	3.08	52.41	2.14	2.08	6.11	1.22	1.00	2.30	98.09
20KKÇ	2859	23.85	4.30	3.19	51.77	0.86	1.91	9.19	1.51	0.91	0.78	97.49
25KKÇ	2943	21.92	3.85	2.57	49.84	1.10	1.98	12.22	1.77	0.80	1.97	96.65
30KKÇ	3042	19.80	3.27	2.11	48.90	1.19	1.76	16.34	2.60	0.71	2.02	96.58
TS19	≥2800					≤5	≤3.5					
TS10156	≥2800					≤5	≤3.5					
TS640	≥2800					≤5	≤4					

\* KÇ: Katkılı Çimento

\* KÇa: Kireç Çamuru

Kireç çamurunun kimyasal içeriğine bakıldığında, CaO en yüksek oranda bulunduğu ve puzolanik özelliğe etkisi olan Al<sup>+3</sup> ve Fe<sup>+3</sup> iyonlarını içeren Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşiklerini 0.10 ve 0.07 oranında içerdiği görülmektedir.

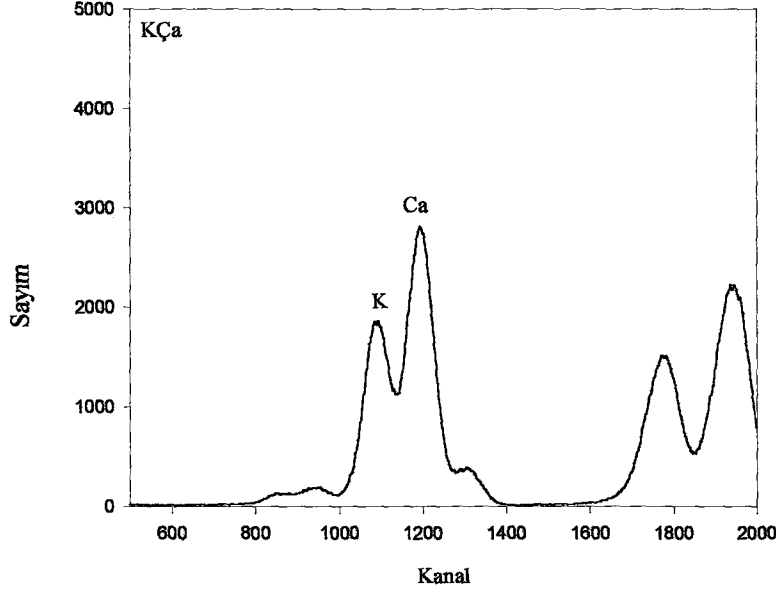
Çalışmada kapsamında kullanılan Afyon-Çay Seka işletmesinden alınan kireç çamuru atığının CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diyagramındaki yeri Şekil 35'de gösterilmiştir. Ayrıca bu diyagramda, standart portland çimentosu (PÇ 42.5) ve katkı çimentonun (KÇ 32.5) yeri de belirtilmiştir. Yapılan basınç dayanım testlerinden elde edilen bulguları tartışabilmek için değişik çalışmalarda kullanılan ve termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin yerleri de gösterilmiştir. Rajghat uçucu külü, Hindistan'ın Delhi kenti yakınlarında faaliyet gösteren bir termik santralden, Baumineral uçucu külü ise Almanya'nın Bochum kenti yakınlarındaki bir termik santralden alınan uçucu küldür (Karinaj ve Havanagi, 1999). Başka bir çalışmada kullanılmış olan ve ülkemizdeki Çayırhan ve Çatalağzı termik santralden alınan uçucu küllerde (Türker ve Erdoğan, 1997) sonuçların tartışılması amacıyla diyagramda gösterilmiştir.



- KÇa : Kireç Çamuru  
 PÇ : Standart Portland Çimentosu PÇ 42.5  
 KÇ : Katkılı Çimento KÇ 32.5  
 A : Trabzon İçmesuyu Arıtma Tesisi Çamuru  
 B : Baumineral Termik Santralinden çıkan uçucu külü  
 C : Rajghat Termik Santralinden çıkan uçucu külü  
 D : Çayırhan Termik Santralinden çıkan uçucu külü  
 E : Çatalağzı Termik Santralinden çıkan uçucu külü

Şekil 35. CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diyagramında kireç çamurunun yeri

Kireç çamurunun kimyasal yapısında bulunan Ca ve K elementlerinin varlığı EDXRF cihazında çekilen X-ışınları spektrumunda görülmektedir (Şekil 35). Elde edilen grafikten kireç çamurunun çok fazla Ca içerdiği Ca pikinden anlaşılmaktadır.



Şekil 36. Kireç çamuru için K-X ışını spektrumu

### 3.1.2. Basınç Dayanım Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma

Orman yolları üstyapısında kaplama tabakasında kullanım imkanlarını belirlemek için kireç çamuru atığının çimentoya katılarak üretilen yeni çimentonun özellikleri ortaya konulmuştur. Bu amaçla kullanılan çimento Trabzon çimento fabrikasında üretilen katkı çimento (KÇ) olup, özellikleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Kullanılan katkı çimento ve standart portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikleri		Kullanılan Katkılı Çimento KÇ 32.5	Standart Portland Çimentosu PÇ 32.5 (TS19)
SO <sub>3</sub> miktarı		% 2.19	en çok %3.5
MgO miktarı		%1.23	en çok %5
Klorür miktarı			en çok %0.1
İncelik, özgül yüzey		3457 cm <sup>2</sup> /gr	2800-4000 cm <sup>2</sup> /gr
Priz süresi başlama		2.05	en az 1 saat
Priz sona erme		4.55	en çok 10 saat
Hacim genişmesi		1 mm	en çok 10 mm
Kızdırma kaybı		% 3.56	en çok %4
Çözünmeyen kalıntı			en çok %1.5
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	2 günlük	15.6	min. 10
	7 günlük	28.7	min. 21
	28 günlük	41.3	min. 32.5

Trabzon çimento fabrikasında üretilen ve deneylerde kullanılan katkıli çimentonun bünyesinde katkı maddesi olarak bulunan trasın özellikleri Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Tras standartları

Özellik	Miktar (%)
Kimyasal	
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO <sub>3</sub>	En az 70
MgO	Max. % 5.0
SO <sub>3</sub>	Max. % 3.0
Rutubet	Max. % 10
Kızdırma kaybı	Max. % 1.5
Fiziksel	
7. gün eğilme dayanımı	1 N/mm <sup>2</sup>
7. gün basınç dayanımı	4 N/mm <sup>2</sup>

Bu deneyler için oluşturulan beton karışımlarda agrega olarak TS 819 Rilem Cembureau standart kumu kullanılmış olup özellikleri Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo12 . TS 819 Rilem Cembureau Standart Kumu Özellikleri

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Üzerinde Kalan (%)
0.08	98 ± 2
0.16	87 ± 2
0.50	67 ± 2
1.00	33 ± 2
1.60	9 ± 2
2.00	0
Özgül Ağırlık	3.03-3.15 (gr/cm <sup>3</sup> )

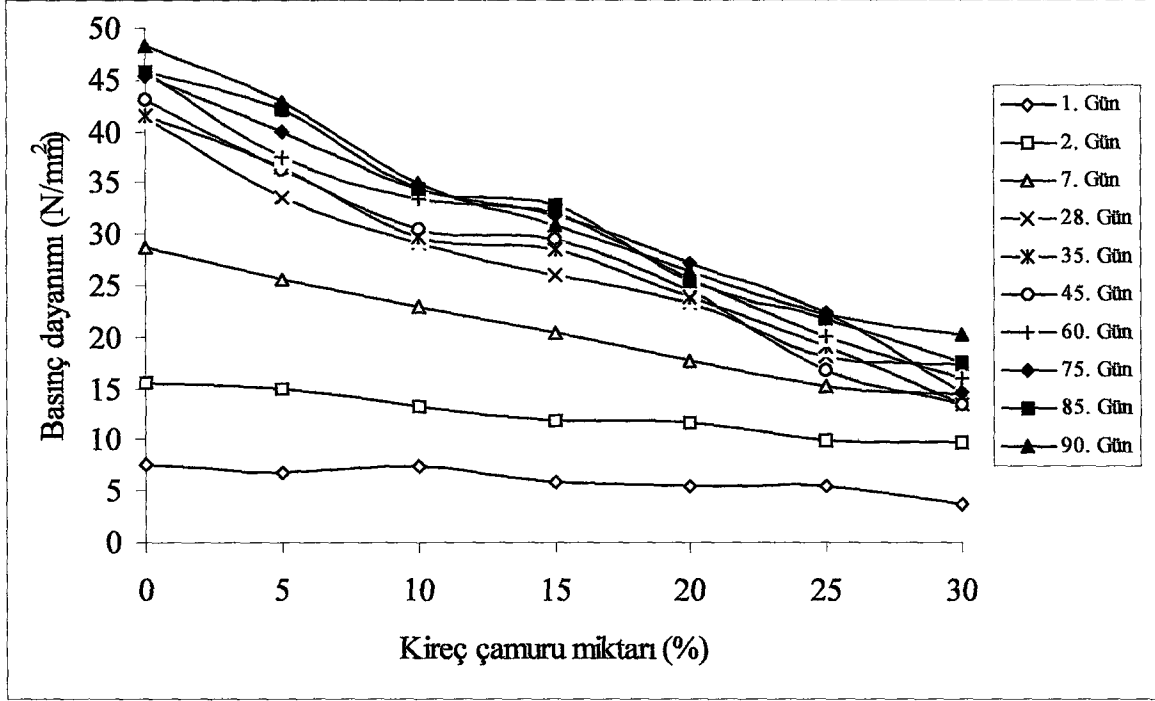
Yapılan deneylerde numuneler 2 kg olarak hazırlanmıştır. Bu numunelerde katkı oranları ayarlanırken örneğin % 5 katkıli numunede 100 gr kireç çamuru, 1900 gr çimento + agrega kullanılarak numuneler hazırlanmış ve harç kalıplarına tekniğine uygun olarak dökülmüştür. Buna katkı olarak % 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında kireç çamuru katılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



Tablo 13. Kireç Çamurunun (KÇa) Katkılı Çimentoyla (KÇ) Karıştırılmasıyla Elde Edilen Basınç Dayanımları

Numune	% Kireç Çamuru Miktarı	Gün	Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Numune	% Kireç Çamuru Miktarı	Gün	Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
K1 % 5 100 g KÇa, 1900 g Çimento + Agregat	5	1	6.7	K4 % 20 400 g KÇa, 1600 g Çimento + Agregat	20	1	5.5
		2	14.9			2	11.7
		7	25.6			7	17.6
		28	33.6			28	23.3
		35	36.4			35	23.9
		45	36.3			45	24.4
		60	37.5			60	25.5
		75	40.0			75	27.2
		85	42.1			85	25.3
90	42.9	90	26.3				
K2 % 10 200 g KÇa, 1800 g Çimento + Agregat	10	1	7.4	K5 % 25 500 g KÇa 1500 g Çimento + Agregat	25	1	5.5
		2	13.2			2	9.9
		7	22.8			7	15.1
		28	29.0			28	18.0
		35	29.7			35	18.9
		45	30.5			45	16.7
		60	33.4			60	20.0
		75	34.3			75	22.3
		85	34.3			85	21.8
90	34.9	90	22.0				
K3 % 15 300 g KÇa, 1700 g Çimento + Agregat	15	1	5.8	K6 % 30 600 g KÇa, 1400 g Çimento + Agregat	30	1	3.6
		2	11.8			2	9.7
		7	20.3			7	14.3
		28	26.0			28	17.3
		35	28.4			35	13.3
		45	29.5			45	13.3
		60	32.0			60	15.9
		75	31.8			75	14.6
		85	32.7			85	17.4
90	30.8	90	20.2				
KÇ Katkılı Çimento + Agregat	-	1	7.6				
		2	15.6				
		7	28.7				
		28	41.3				
		35	41.5				
		45	43.0				
		60	45.8				
		75	45.4				
85	45.8						
90	48.2						

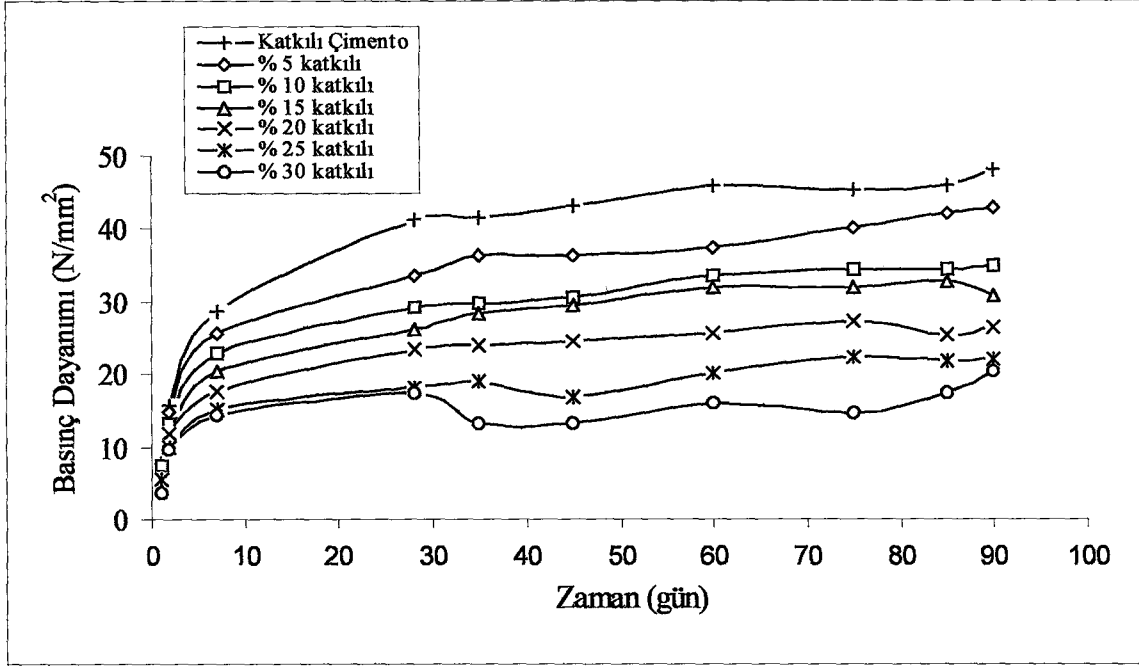
Tablo 13'deki verilerden yararlanarak kireç çamuru ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi ortaya koyan grafik Şekil 37'de verilmiştir.



Şekil 37. Kireç çamuru-katkılı çimento örneklerinin katkı oranına göre basınç dayanımları.

Şekil 37'den görüldüğü gibi karışımdaki kireç çamuru oranının artmasıyla basınç dayanımı azalmaktadır. Basınç dayanımı değerleri 28.güne kadar hızlı bir artış göstermiş bundan sonraki zamanlarda bu artış daha yavaş olmuştur. Genel olarak katkı oranı arttıkça basınç dayanım değerleri azalmıştır. Basınç dayanım değerleri % 5 ve % 10 katkılı numunelerde 1 günlük kür süresinde katkılı çimentoya çok yakın değerler göstermiştir. Bundan sonraki kür sürelerinde basınç dayanım değerleri KÇ 32.5'den daha küçük değerlere sahip olmakla birlikte, % 5 kireç çamuru katkılı karışımların basınç dayanım değerleri, katkılı çimentonun değerlerine yakındır. Basınç dayanım değerlerinin zamana bağlı olarak ve katkı miktarlarına göre değişimleri Şekil 38'de verilmiştir.

Şekil 38 incelendiğinde bütün katkı oranlarındaki basınç dayanımları kür süresine bağlı olarak artmaktadır. Basınç dayanımındaki artış 28. güne kadar düzenli iken bundan sonraki günlerde biraz değişkenlik göstererek artmaktadır. % 5 ile % 10 arasındaki katkı içeren numunelerin basınç dayanımları katkılı çimentoya göre az olmakla birlikte çimento teknolojisi açısından uygun değerler verdiği görülmektedir.



Şekil 38. Zaman - Basınç dayanım grafiği

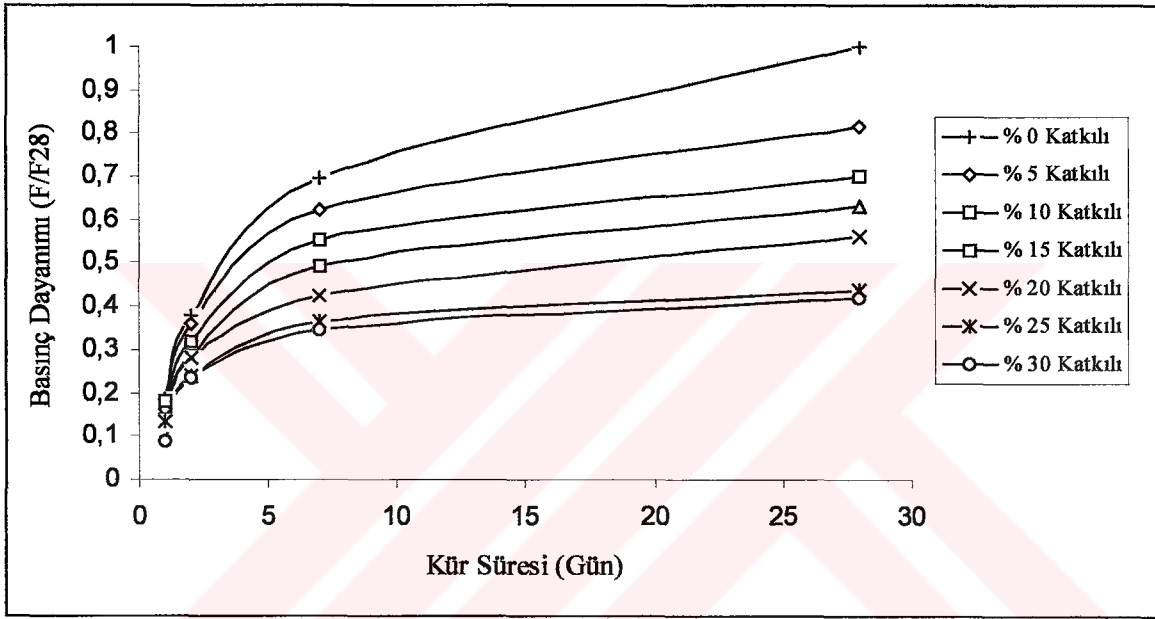
Trabzon İçme Suyu Arıtma Tesislerinden elde edilen çamurun kullanıldığı bir çalışmada, Portland çimentosuna (PÇ 42.5) belirli oranlarda çamur ilavesi yapılmış ve çalışmanın sonunda 28. günde % 5 ile % 15 arasındaki katkı oranlarında yaklaşık 35.5-31.9 N/mm<sup>2</sup> basınç dayanımı elde edilmiştir (Gülay, 2002).

Uçucu külün katkı maddesi olarak kullanıldığı bir başka çalışmada, portland çimentosuna (PÇ 32.5) % 25 oranında 2 değişik uçucu kül katılmış ve basınç dayanımının kür süresine bağlı olarak arttığı, ayrıca uçucu küllerin öğütülerek tane çaplarının küçülmesiyle basınç dayanımının arttığını ortaya koymuşlardır. Uçucu küllerin, bu çalışmada kullanılan kireç çamuru gibi portland çimentosuna belirli oranda katılabileceğini belirtmişlerdir (Türker ve Erdoğan, 1997).

Puzolanik Aktivite değerleri incelendiğinde; TS 639' a göre 28. gün için puzolanik aktivite % 70 den az olmamalıdır. ASTM 311 puzolanik aktiviteyi 7 ve 28. günlerde tayin eder ve her iki kür süresi için de puzolanik aktivitenin en az % 75 olması gereklidir.

$$\text{Puzolanik Aktivite} = \frac{\text{Kireç çamuru numunelerinin ortalama basınç dayanımı}}{\text{Kontrol numunesi ortalama basınç dayanımı}}$$

Yukarıdaki kriterlere göre yapılan değerlendirmede Şekil 39'da da görüleceği gibi, 28. Gün için puzolanik aktivite % 5 katkı için % 80'i; % 10 katkı için % 70'i ve % 15 katkı için de % 60'ı aşmaktadır. Katkı oranı % 15'den daha fazla olduğu değerlerde ise puzolanik aktivite % 60'ların altına düşmektedir. Puzolanik aktivite değerlerine 7. gün süresinde % 5 katkı için % 60'dan, %10 katkı için % 55'den, %15 katkı için ise % 50'den büyük olduğu bundan sonraki kür sürelerinde ise % 50 değerinden aşağıda kaldığı görülmektedir.



Şekil 39. Zamana bağlı basınç dayanımı oramı (puzolanik aktivite)

Puzolanik aktivite  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriğiyle yakından ilgilidir.  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranıyla puzolanik aktivite arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bir çalışmada, her üç bileşiğin oranının artmasıyla puzolanik aktivitenin arttığı bu oranın % 88 olduğu durumda puzolanik aktivitenin % 80'lere ulaştığı belirlenmiştir (Bayoğlu, 1997). Kireç katkısının % 5-10 arasında olduğu numunelerde  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriğinin yaklaşık % 33 ile 34 arasında bulunduğu (Tablo 9) bu oranlarda puzolanik aktivitenin ise % 70 civarında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulguların literatürle benzerlik gösterdiği ortaya çıkmıştır.

### 3.1.3. Diğer Çimento Deneilerine Ait Bulgular ve Tartışma

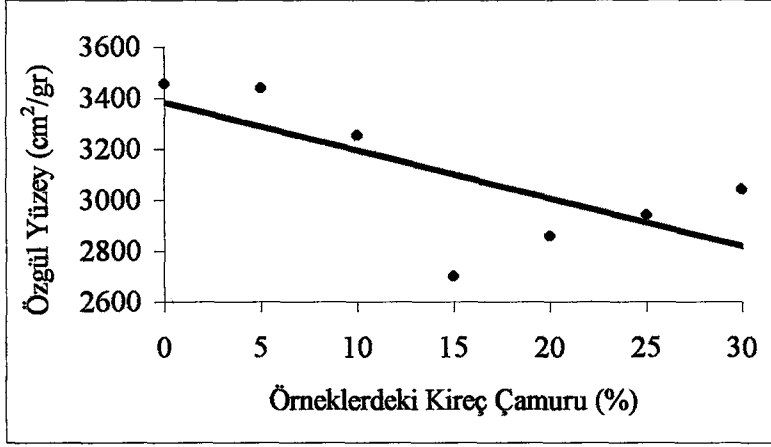
Katkılı çimentoya değişik oranlarda kireç çamurunun katılmasıyla elde edilen karışımlar üzerinde yapılan tane büyüklüğü, priz süresi başlangıç ve sona erme süreleri, su muhtevası, özgül ağırlık, hacim genişmesi ve özgül yüzey deneylerinde elde edilen sonuçlar Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Kireç çamurunun (KÇa) Katkılı Çimentoyla (KÇ) karıştırılmasıyla elde edilen deney sonuçları

Numune	Tane büyüklüğü 200-90 $\mu$	Priz süresi başlangıcı-sonu (saat)	% Su	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Hacim Genleşmesi (mm)	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)
K1 % 5 100 g KÇa. 1900 g Çimento + Agregat	% 0.5/7.3	3.05 – 5.05	29.50	2.90	3	3440
K2 % 10 200 g KÇa. 1800 g Çimento + Agregat	% 2.1/8.0	3.15 – 5.40	31.00	2.85	3	3255
K3 % 15 300 g KÇa. 1700 g Çimento + Agregat	% 2.7/8.4	4.25 – 6.10	31.00	2.84	5	2703
K4 % 20 400 g KÇa. 1600 g Çimento + Agregat	% 6.2/12.3	4.55 – 6.45	32.50	2.80	1	2859
K5 % 25 500 g KÇa. 1500 g Çimento + Agregat	% 10.1/17.0	5.30 – 7.10	35.00	2.70	2	2943
K6 % 30 600 g KÇa. 1400 g Çimento + Agregat	% 13.2/26.2	6.05 – 7.45	36.25	2.62	1	3042
KÇ Katkılı Çimento + Agregat	% 0.2/3.9	2.40 – 4.55	28.00	2.94	1	3457

Kireç çamurunun % 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında katılması ile elde edilen çimento karışımlarında yapılan özgül yüzey tayininden elde edilen değerlere bakıldığında kireç çamuru katkısının artırılmasıyla özgül yüzey değerinin azaldığı gözlenmiştir (Şekil 40). Kireç çamurunun özgül yüzey değeri (4664 cm<sup>2</sup>/gr) katkı çimentodan (3457 cm<sup>2</sup>/gr) daha büyüktür. Katkı oranının artmasıyla karışımların özgül yüzey değerlerinde bir artış beklenirken burada tersi bir durum gözlenmiştir. Bu durumun kireç çamurunun kimyasal yapısı ve floklaşma özelliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Bütün katkı oranlarında elde edilen özgül yüzey değerleri portland çimentosu standardına (2800-4000 cm<sup>2</sup>/gr) uygun olduğu tespit edilmiştir.

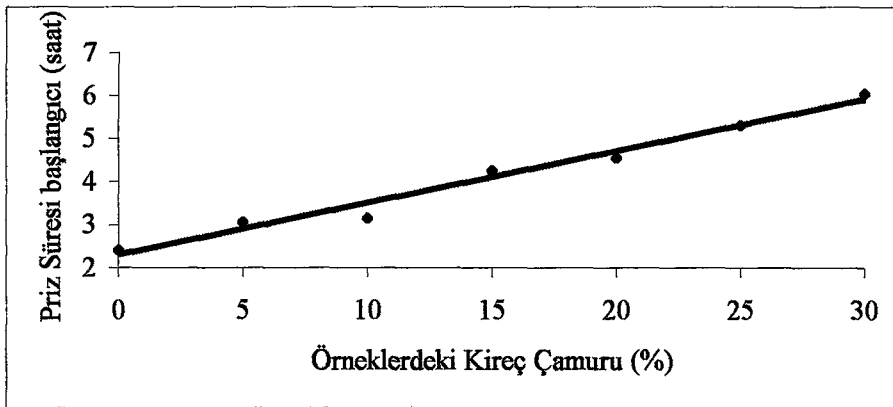




Şekil 40. Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkılı örneklerdeki özgül yüzey grafiği

Yapılan benzer bir çalışmada uçucu kül katkısının artmasıyla özgül yüzey değerinin azaldığı belirtilmektedir (Turanlı ve Erdoğan, 1997). Bu çalışmada kullanılan uçucu külün içeriğinde % 44.76 SiO<sub>2</sub>, % 29.48 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve % 18.42 CaO bulunmaktadır. Bakıldığında kireç çamurundan daha farklı bir yapı gösteren uçucu kül ile kireç çamuru özgül yüzey değeri açısından benzer değişimi göstermiştir.

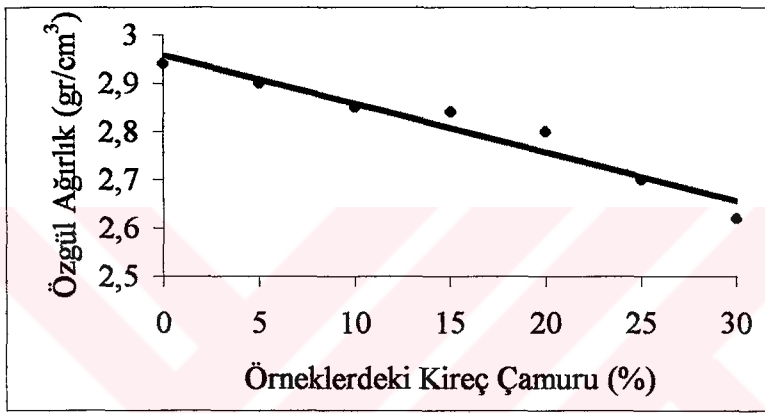
Karışımların priz başlangıç süreleri incelendiğinde katkı oranının artırılmasıyla priz başlangıç süresinin arttığı gözlenmiştir. Bütün katkı oranlarında elde edilen priz başlangıç süresi çimento standartlarının en fazla 10 saat değerinden düşük olduğu ortaya çıkmıştır. (Şekil 41). Priz süresinin uzaması betonda sertleşmenin geç olmasına neden olur. Ayrıca betonun bağlayıcılık değerini etkiler. Priz süresinin kısa olması ise, beton karışımın hazırlanmasından sonra taze betonun taşınabilmesi, kalıba yerleştirilmesi ve sıkıştırılması vb. gibi hususları etkiler.



Şekil 41. Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkılı örneklerdeki priz başlama süresi eğrisi

Turanlı ve Erdoğan'ın (1997) uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada kül miktarının artışıyla priz başlangıç süresinde artış olmuştur. Kireç çamuru katkısı ise priz başlangıç süresini azaltmıştır.

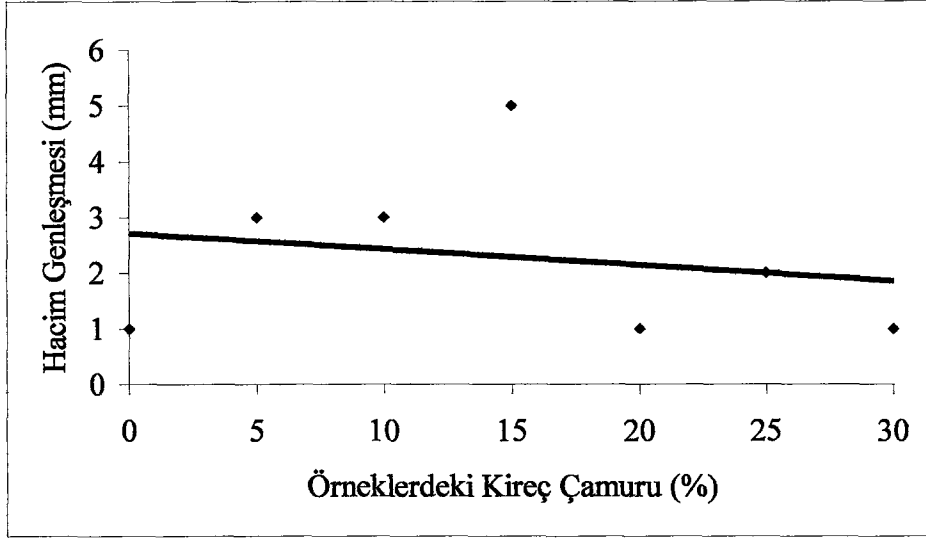
Şekil 42'de görüldüğü gibi genel olarak numunelerin özgül ağırlık değerlerinin kireç çamuru katkı oranı arttıkça azaldığı belirlenmiştir. Deneyleerde elde edilen özgül ağırlık değerleri Standart Portland Çimentosunun özgül ağırlık değerleri ile karşılaştırıldığında, deneyleerde bulunan değerler 3.10-3.16 arasında olan standartların altında olduğu görülmektedir.



Şekil 42. Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkılı örneklerdeki özgül ağırlık grafiği

Özgül ağırlık değeri, çimentonun bazı dolgu maddeleri ile karıştırılıp karıştırılmadığını ve kuru bir yerde muhafaza edilmediği zaman meydana gelebilecek hidrasyonun başlayıp başlamadığı hakkında fikir verebilmektedir. Ayrıca, özgül ağırlık çimento kalitesini doğrudan göstermemekle birlikte beton karışımında malzeme oranlarının hesaplanmasında kullanılması yönünden oldukça önemlidir (Erdoğan, 1995).

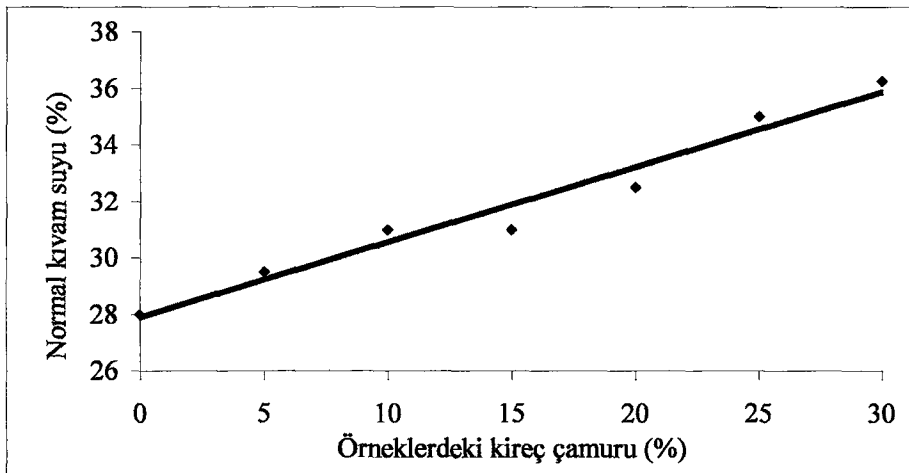
Şekil 43'e bakıldığında kireç çamuru oranının artmasıyla hacim genişmesi azalmaktadır. Deneyleerden elde edilen değerlerin tümü standartların öngördüğü en fazla 10 mm hacim genişlemesi değerinden düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 43. Kireç çamuru ile KÇ 32.5 katkıli örneklerdeki hacim genişmesi grafiği

Şekil 44'de de görüldüğü gibi numunelerdeki kireç çamuru oranı arttıkça normal kıvam suyu artmaktadır. Bunun nedeni Kireç çamurunda bulunan  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  gibi alkalilerin miktarlarının katkıli çimentodan yüksek olmasıdır (Tablo 14).

Alkali miktarı yüksek olan çimentolar, bünyesinde reaktif silis bulunan agregalarla birlikte beton yapımında kullanıldıklarında alkali-agrega reaksiyonuna neden olmaktadır. Bu reaksiyon sonucu su emme kapasitesi çok yüksek olan bir jel meydana gelmektedir (Erdoğan, 1995).

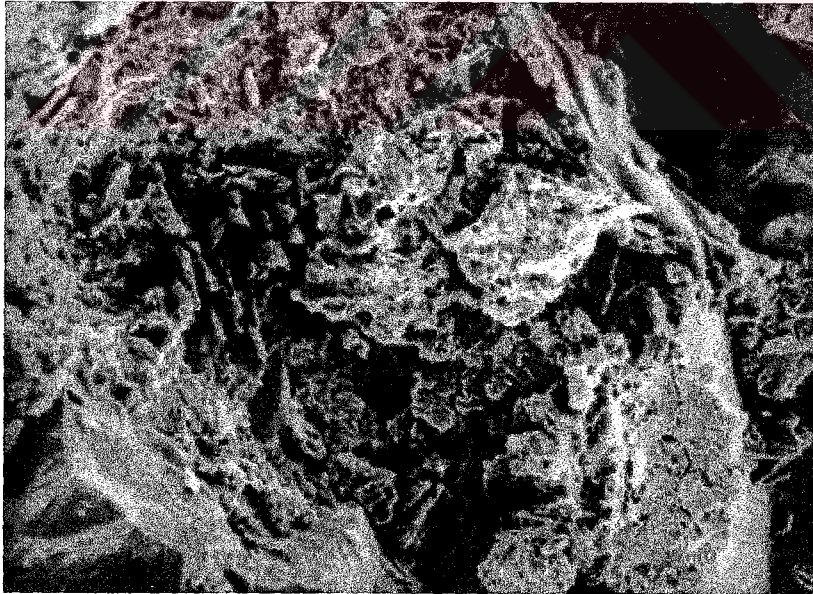


Şekil 44. Kireç çamuru katkıli KÇ 32.5 örneklerinin normal kıvam suyu grafiği

### 3.1.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Kullanılarak Elde Edilen Bulgular ve Tartışılması

Basınç dayanımını ölçmek için kireç çamuru ve katkıli çimentodan oluşan karışımlardan elde edilen prizmalar, basınç dayanımı aletinde kırıldıktan sonra yapılarındaki puzolanik aktiviteyi inceleyebilmek için örnekler alınmış, taramalı elektron mikroskopta resimler çekilmiştir. Örneklerde kür süresine ve katkı oranına dikkat edilerek seçim yapılmıştır. Daha önceden belirli kür sürelerinde kırılan beton prizmalar oda şartlarında saklandıktan sonra uygun şekil ve boyutta fotoğraf çekimi için numune alınmıştır. Bu fotoğraflarda basınç dayanımı için dikkat edilen kür sürelerinde değişim olduğu için katkı miktarının puzolanik aktivite üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çekimlerden elde edilen resimler Şekil 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, ve 59'da verilmiştir.

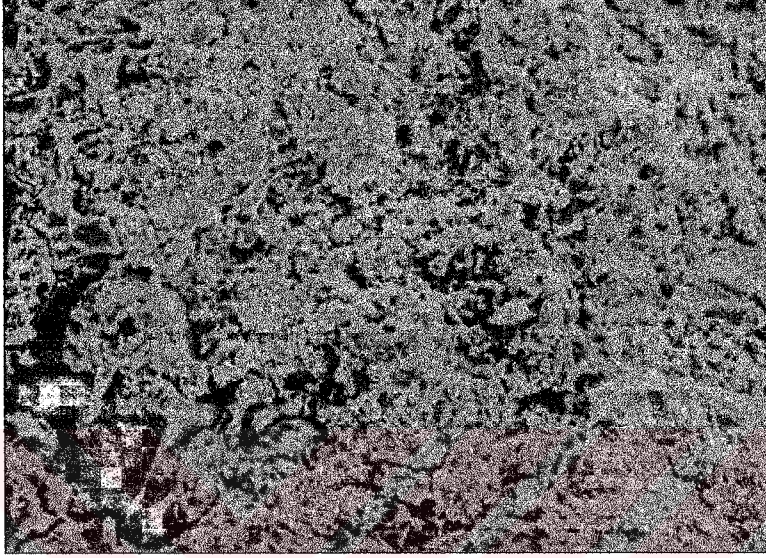
Şekil 45'de katkısız olarak hazırlanmış ve 28 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 650 kez büyütme yapılarak ve 3.6 cm uzaklıktan çekilmiştir. Çimentonun yapısı katkıli örneklere göre farklılık göstermektedir. Bu durumu kristal yapısından rahatlıkla görebilmek mümkündür.



Şekil 45. Kireç çamuru katkısız ve 28 günlük örneğe ait görüntü

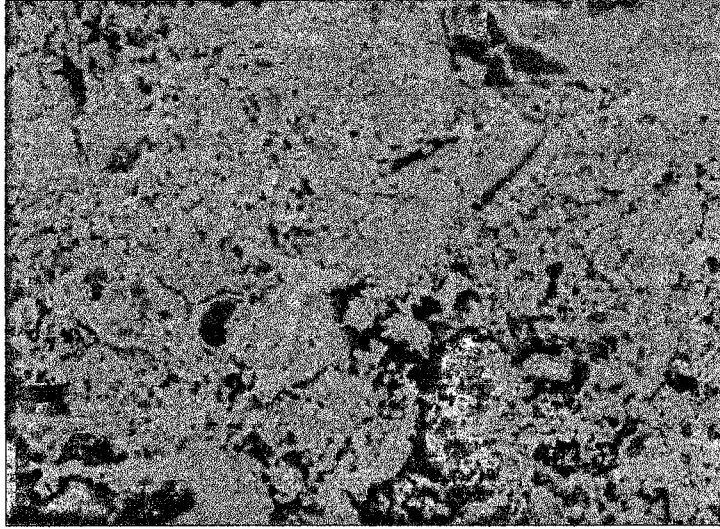


Şekil 46'da % 5 katkıli olarak hazırlanmış ve 28 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 750 kez büyütme yapılarak ve 3.8 cm uzaklıktan çekilmiştir. Resimde küçük kalsiyum silikatların hidrat taneciklerinden oluştuğu görülmektedir.



Şekil 46. % 5 Kireç çamuru katkıli ve 28 günlük örneğe ait görüntü

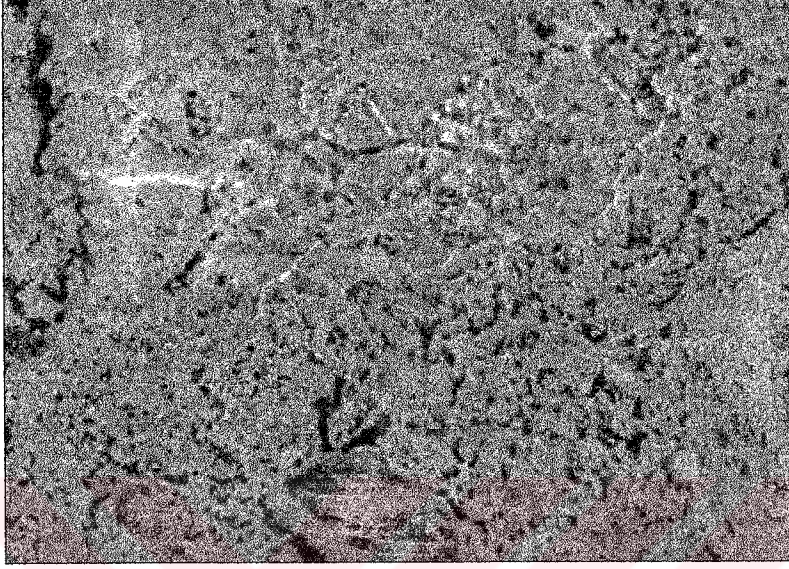
Şekil 47'de % 10 katkıli olarak hazırlanmış ve 28 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 750 kez büyütme yapılarak ve 3.8 cm uzaklıktan çekilmiştir.



Şekil 47. % 10 Kireç çamuru katkıli ve 28 günlük örneğe ait görüntü

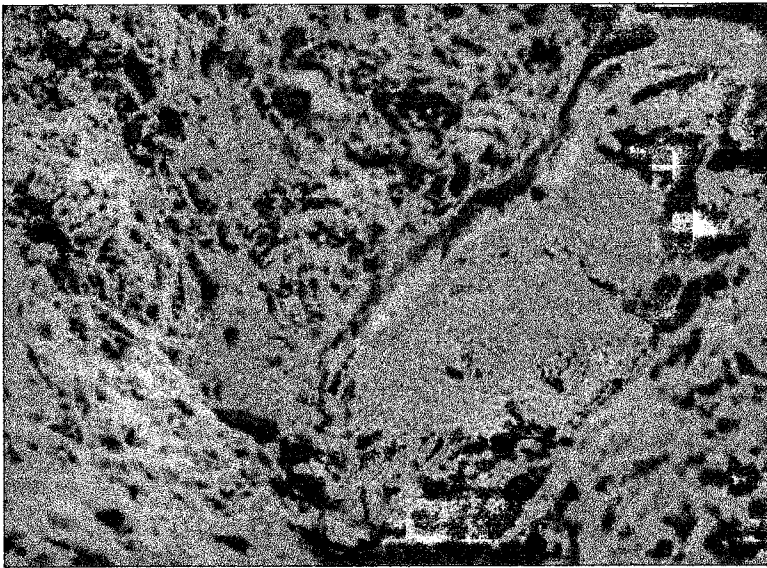


Şekil 48'de % 15 katkıli olarak hazırlanmış ve 28 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 600 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.9 cm uzaklıktan çekilmiştir.



Şekil 48. % 15 Kireç çamuru katkıli ve 28 günlük örneğe ait görüntü

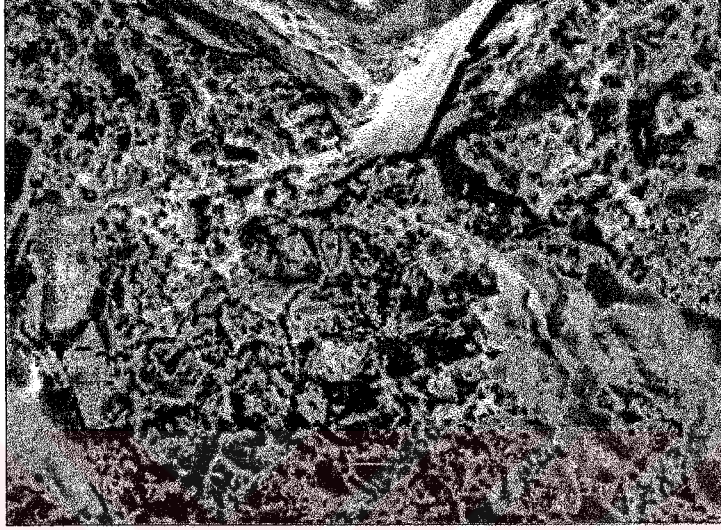
Şekil 49'da % 25 katkıli olarak hazırlanmış ve 28 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 750 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.9 cm uzaklıktan çekilmiştir.



Şekil 49. % 25 Kireç çamuru katkıli ve 28 günlük örneğe ait görüntü

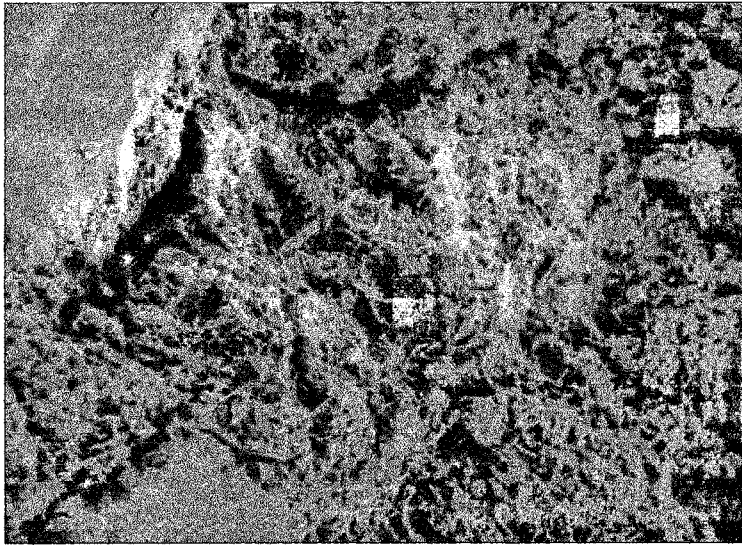


Şekil 50'de katkısız olarak hazırlanmış ve 60 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 750 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.8 cm uzaklıktan çekilmiştir. Çimentonun yapısı katkılı örneklerle göre farklılık göstermektedir. Bu durumu kristal yapısından rahatlıkla görebilmek mümkündür.



Şekil 50. Kireç çamuru katkısız ve 60 günlük örneğe ait görüntü

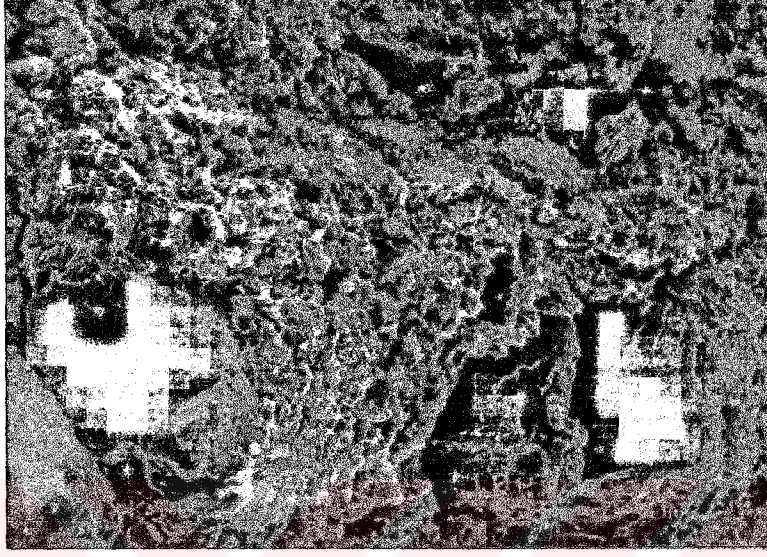
Şekil 51'de % 5 katkılı olarak hazırlanmış ve 60 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 1500 kez büyütme yapılarak ve numuneye 1.8 cm uzaklıktan çekilmiştir.



Şekil 51. % 5 Kireç çamuru katkılı ve 60 günlük örneğe ait görüntü

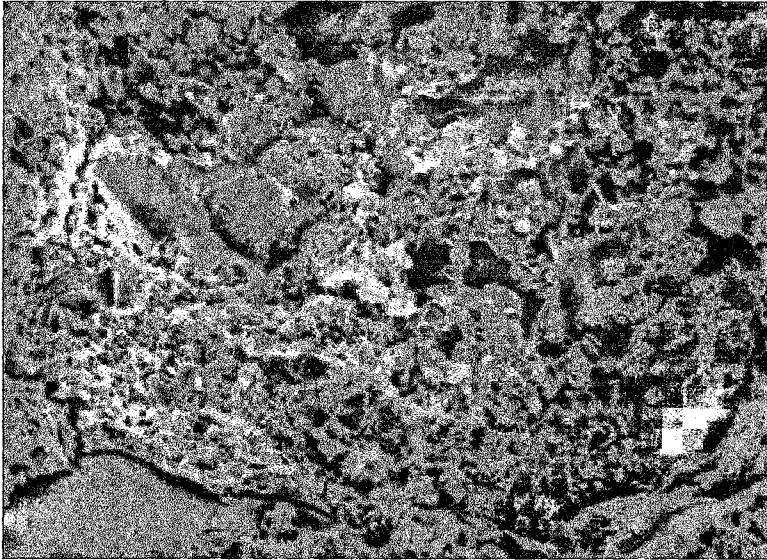


Şekil 52'de % 10 katkıli olarak hazırlanmış ve 60 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 650 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.9 cm uzaklıktan çekilmiştir.



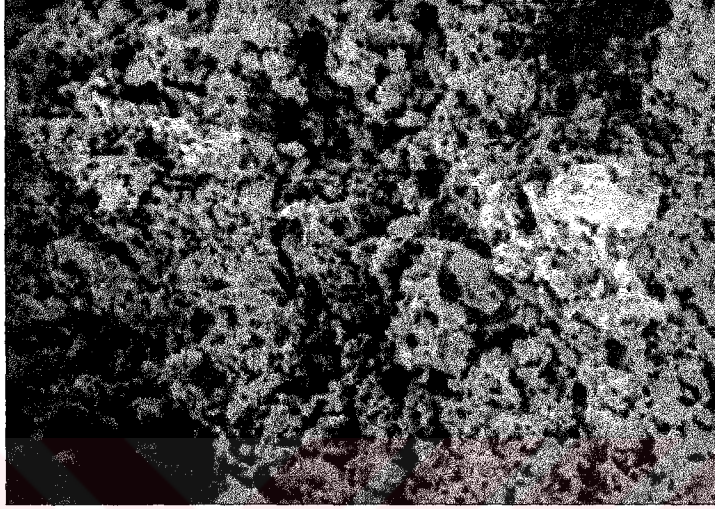
Şekil 52. % 10 Kireç çamuru katkıli ve 60 günlük örneğe ait görüntü

Şekil 53'de % 15 katkıli olarak hazırlanmış ve 60 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 700 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.9 cm uzaklıktan çekilmiştir.



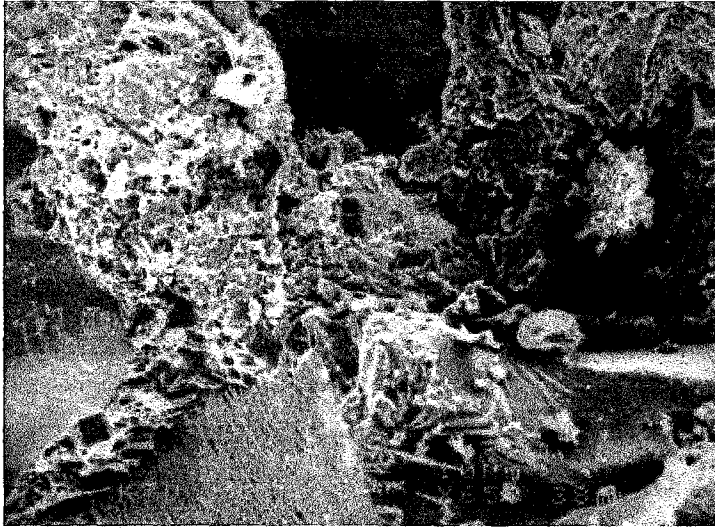
Şekil 53 . % 15 Kireç çamuru katkıli ve 60 günlük örneğe ait görüntü

Şekil 54'de % 20 katkıli olarak hazırlanmış ve 60 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 2000 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.6 cm uzaklıktan çekilmiştir. Resimde görülen çok boşluklu yapı tazına bol kireçli atık katkısı sebep olabilir.



Şekil 54. % 20 Kireç çamuru katkıli ve 60 günlük örneğe ait görüntü

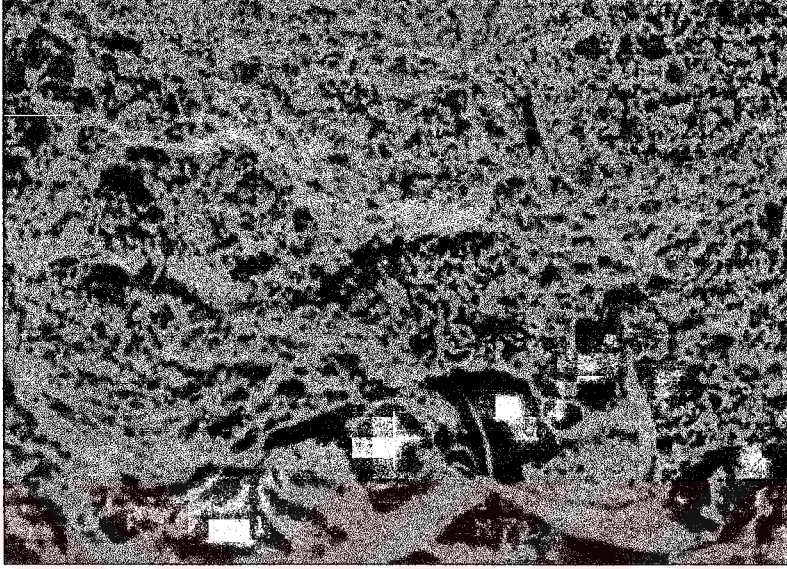
Şekil 55'de katkısiz olarak hazırlanmış ve 90 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 650 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.8 cm uzaklıktan çekilmiştir. Çimentonun yapısı katkıli örneklere göre farklılık göstermektedir. Bu durumu kristal yapısından rahatlıkla görebilmek mümkündür.



Şekil 55. Kireç çamuru katkısiz ve 90 günlük örneğe ait görüntü

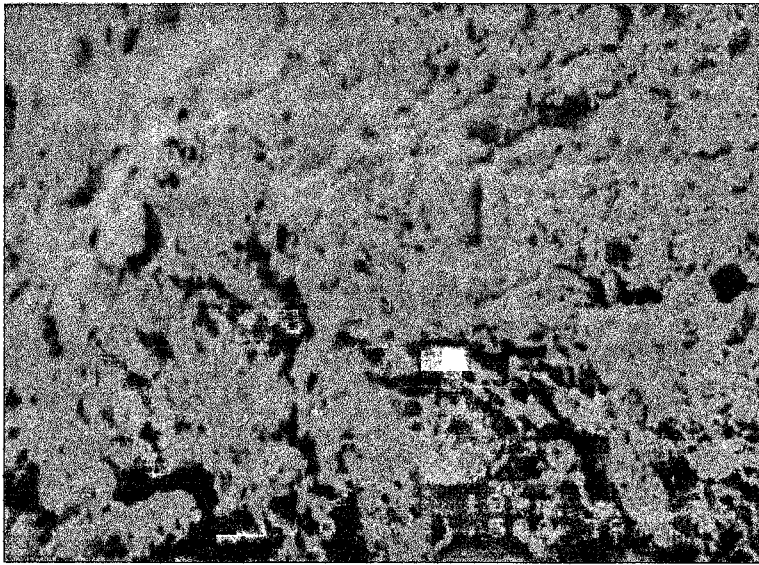


Şekil 56'da % 5 katkıli olarak hazırlanmış ve 90 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 700 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.8 cm uzaklıktan çekilmiştir.



Şekil 56. % 5 Kireç çamuru katkıli ve 90 günlük örneğe ait görüntü

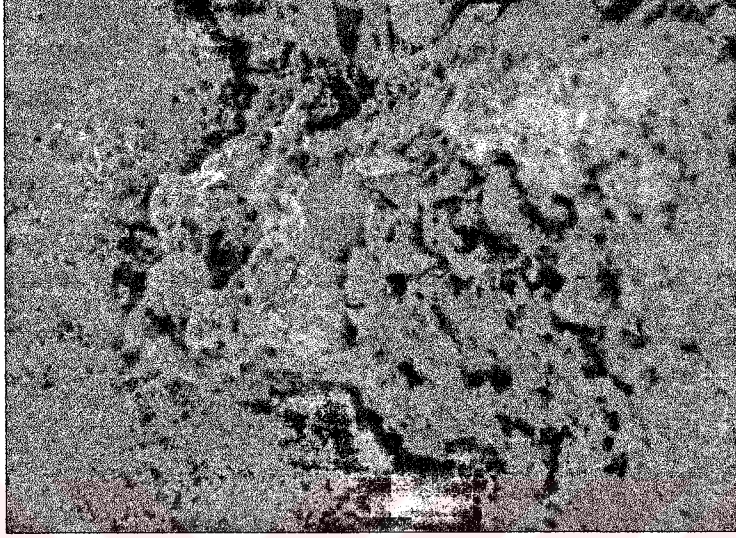
Şekil 57'de % 10 katkıli olarak hazırlanmış ve 90 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 1500 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.8 cm uzaklıktan çekilmiştir.



Şekil 57. % 10 Kireç çamuru katkıli ve 90 günlük örneğe ait görüntü

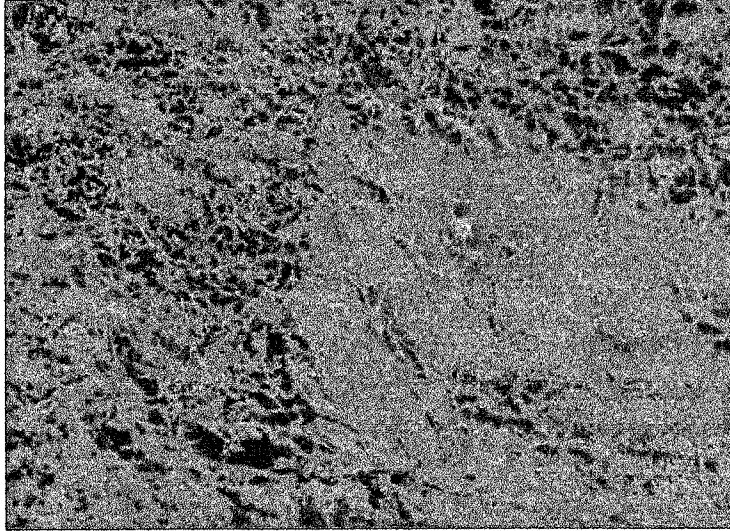


Şekil 58'de % 20 katkıli olarak hazırlanmış ve 90 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 1500 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.9 cm uzaklıktan çekilmiştir.



Şekil 58. % 20 Kireç çamuru katkıli ve 90 günlük örneğe ait görüntü

Şekil 59'da % 25 katkıli olarak hazırlanmış ve 90 gün kür süresinde kırılmış prizmadan alınan numuneye çekilmiş resim görülmektedir. Fotoğraf 1500 kez büyütme yapılarak ve numuneye 3.8 cm uzaklıktan çekilmiştir. Resimde lifli bir yapı görülmektedir ve kalsit taneciklerinin çevresinde hidratasyon ürünlerinde bir artış söz konusudur.



Şekil 59. % 25 Kireç çamuru katkıli ve 90 günlük örneğe ait görüntü

Beton numunelerine taramalı elektron mikroskopta çekilen resimlerdeki görüntülerden ve katkı oranına bağlı olarak elde edilen basınç dayanım eğrileri de dikkate alınarak katkı oranının artmasıyla puzolanik aktivitenin tanecikler arasında azaldığı ancak % 10 katkı oranına kadar çimentoya yakın bir seviyede olduğu söylenebilir.

### 3.2. Zemin Stabilizasyonuna Ait Bulgular ve Tartışma

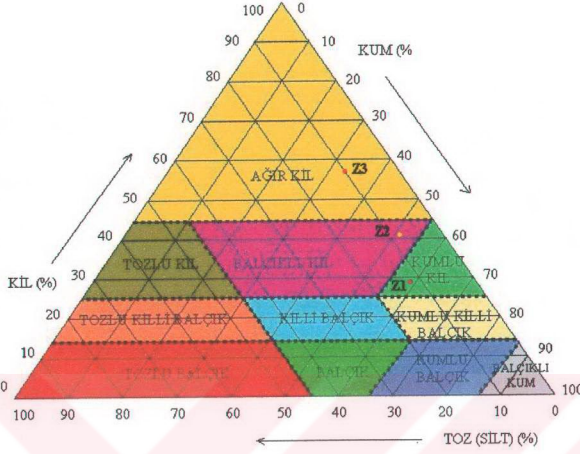
#### 3.2.1. Kullanılan Zeminlerin Tanımlanmasına Ait Bulgular ve Tartışma

Orman yollarının altyapısında taban zeminlerin stabilizasyonuna yönelik kağıt fabrikası atığı olan kireç çamuru katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalarda yapılan deneylerde üç değişik zemin türü kullanılmıştır. Bunlar Z1; Artvin'den alınan Kumlu Kil Zemin, Z2; Borçka'dan alınan Balçıklı Kil Zemin ve Z3; Trabzon'dan alınan Ağır Kil Zemindir. Bu zemin türlerinin tanımlanması amacıyla yapılan deney ve analiz sonucu elde edilen bulgular Tablo 15 ve Şekil 60, 61, 62 ve 63'de verilmiştir.

Tablo 15. Zeminlerin kimyasal içerikleri ve bazı fiziksel özellikleri

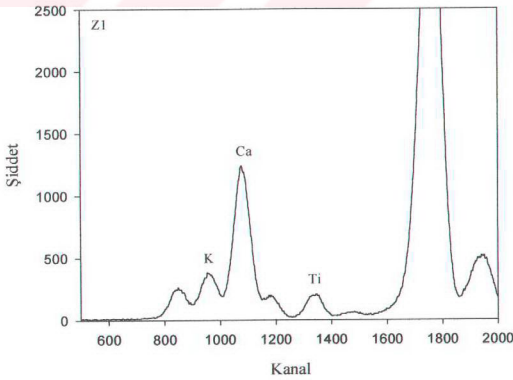
Özellik	Z1	Z2	Z3
Kum Oranı (%)	60.76	50.76	33.76
Kil Oranı (%)	28.24	40.24	56.24
Toz Oranı (%)	11.00	9.00	10.00
Elektriksel İletkenlik mS/cm <sup>-1</sup>	0.033	0.192	0.144
Organik madde (%)	0.39	0.81	1.13
Likit limit (%)	34.5	53.6	33.9
Plastik limit (%)	21.8	28.4	19.2
Plastisite İndisi (%)	12.7	25.2	14.7
pH	4.81	6.30	7.03
CaCO <sub>3</sub> (%)	1.60	1.60	0.80
P (%)	0.16	0.02	0.02
Ca (%)	0.76	0.33	0.52
Mg (%)	0.04	0.04	0.04
K (%)	0.017	0.007	0.009
Na (%)	0.013	0.006	0.009
Cu (ppm)	0.404	0.175	0.019
Mn (%)	0.008	0.005	0.008
Zn (%)	0.0001	0.0001	0.0001
Fe (%)	0.0002	0.0014	0.0001

Şekil 60'da zemin örneklerinin kum-kil-toz diyagramındaki yerleri görülmektedir. Bu diyagrama göre Z1 zemini kumlu kil, Z2 zemini balçıklı kil, Z3 zemini ise ağır kil sınıfına girmektedir.



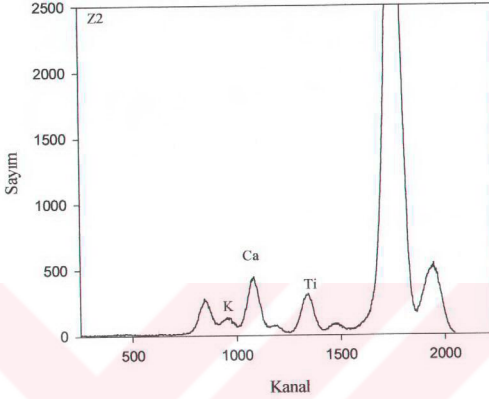
Şekil 60. Zeminlerin Kum-Kil-Toz diyagramındaki yerleri

Şekil 61'de Z1 zeminin EDXRF cihazında çekilmiş X-ışını spektrumu verilmiştir. Grafikteki piklerden Z1 zeminin kimyasal yapısında Ca, K ve Ti elementlerinin varlığı görülmektedir.



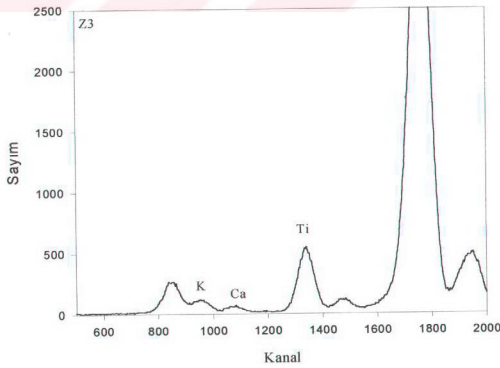
Şekil 61. Z1 zeminine ait K-X ışını spektrumu

Şekil 62'de Z2 zeminin EDXRF cihazında çekilmiş X-ışını spektrumu verilmiştir. Grafikteki piklerden Z1 zeminin kimyasal yapısında Ca, K ve Ti elementlerinin varlığı görülmektedir.



Şekil 62. Z2 zeminine ait K-X ışını spektrumu

Şekil 63'de Z3 zeminin EDXRF cihazında çekilmiş X-ışını spektrumu verilmiştir. Grafikteki piklerden Z3 zeminin kimyasal yapısında Ca, K ve Ti elementlerinin varlığı görülmektedir.

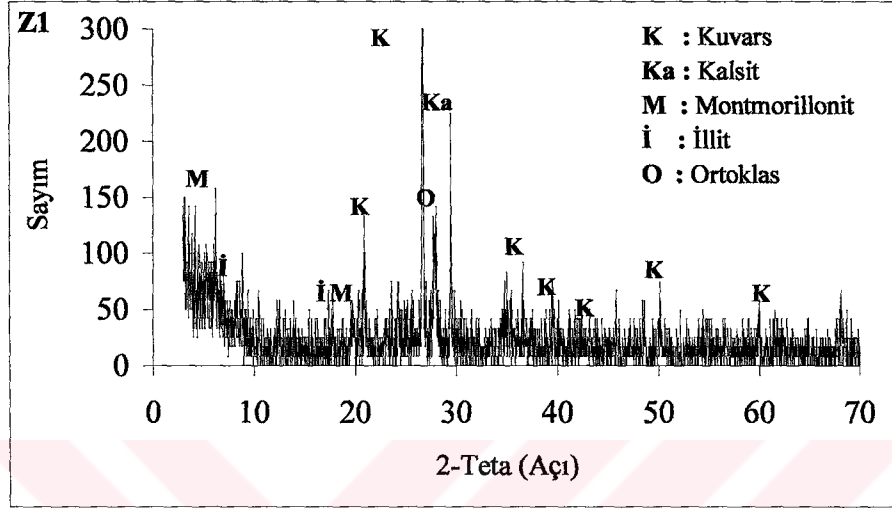


Şekil 63. Z3 zeminine ait K-X ışını spektrumu



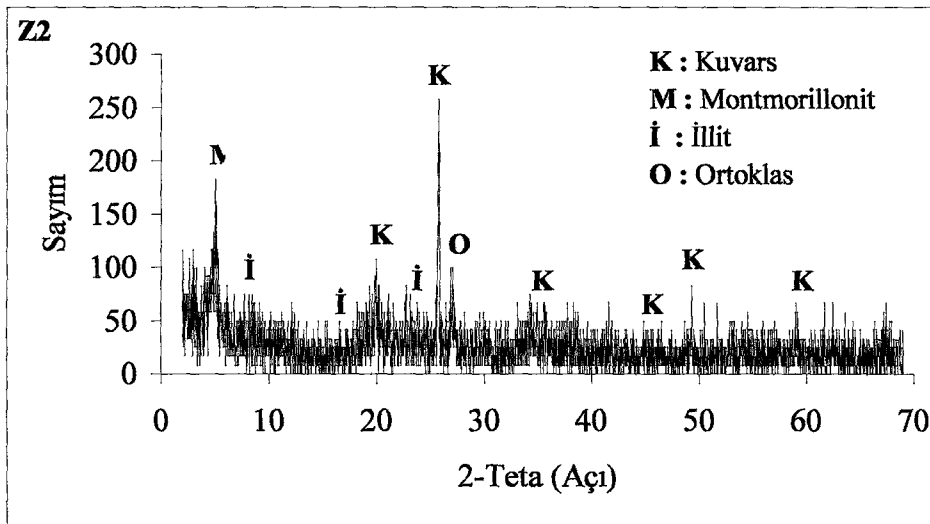
Z1, Z2 ve Z3 zeminlerinin yapısındaki mineralojik yapıyı görmek amacıyla çekilmiş X-ışınları difraktometlerinden elde edilen grafikler Şekil 64, 65 ve 66'da verilmiştir.

Z1 zeminin mineralojik yapısında, kuvars, kalsit, montmorillonit, illit ve ortoklas mineralleri bulunmaktadır (Şekil 64).



Şekil 64. Z1 zeminine ait X-ışını difraktogramı

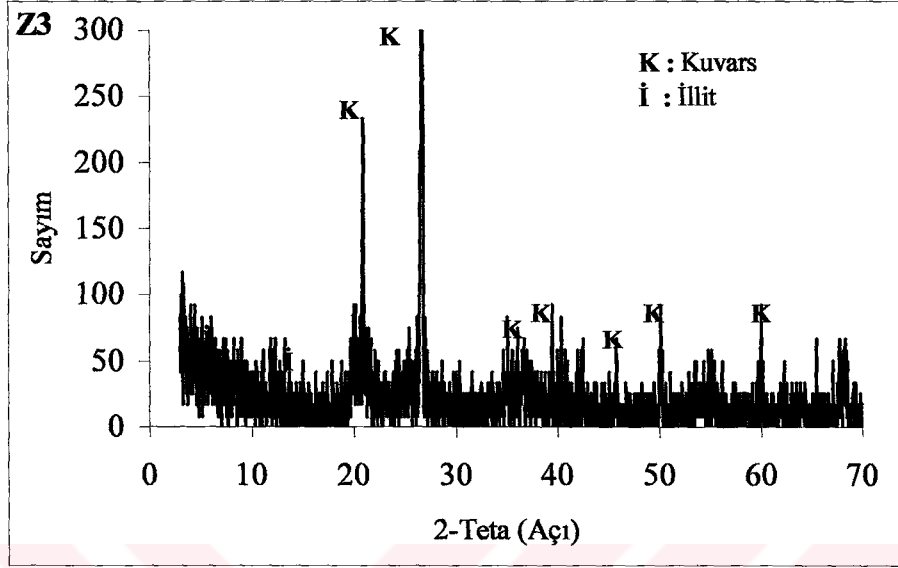
Z2 zeminin mineralojik yapısında, kuvars, montmorillonit, illit ve ortoklas mineralleri bulunmaktadır (Şekil 65).



Şekil 65. Z2 zeminine ait X-ışını difraktogramı



Z3 zeminin mineralojik yapısında, kuvars ve illit mineralleri bulunduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 66).



Şekil 66. Z3 zeminine ait X-ışını difraktogramı

Çalışmada kullanılan zeminlerin yapısında bulunan minerallerin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

Kuvars, kimyasal bileşimi  $\text{SiO}_2$  olan genellikle beyaz, yeşil, siyah, sarı ve mor türleri olabilen düşük yansımaya özelliği sertliği, saflığı ve dilinimsiz oluşu, öz şekilli boyuna ve enine kesitler halinde parlak kesitlerde ilk oluşan mineraldir (Akıncı, 1999).

Montmorillonit, kimyasal bileşimi  $(\text{Al}_2(\text{OH})_2 \text{SiO}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O})$ , rengi beyazımsı veya sarımsı, özgül ağırlığı 1.7-2.7 arasında, elle ovalanabilir, su ile kabarr fakat plastik olmaz, bileşiminde Ca ve Mg da bulunur. Bu mineralin emdiği su miktarı çok değişir ve bundan dolayı özelliği de değişir. Su yerine ara sıra kısmen yağları, gazları, renk maddelerini ve bazları da emer (Akıncı, 1999).

Kalsit, kimyasal bileşimi,  $\text{CaCO}_3$ , renksiz veya beyaz, gri, sarı, pembemsi ve yeşil-mavi olabilir. Bütün asitlerden etkilendiği için dolomitten ayrılır. HCl ile hatta asedik asitle köpürür Mükemmel romboedrik dilinimi ve beyaz-gri rengi ile tanınır (Akıncı, 1999).

İllit mineralleri, esas itibari ile mikaların pulcularının aralanması ve bu aralıkların su alıp şişebilir bir duruma gelmesi ile oluşurlar. Tane çapları 0.002 mm'den küçük olup pek az kristalleşmiş olup % 4-6 oranında potasyum içerirler ve fazla miktarda kristal suyu ihtiva ederler (Kantarıcı, 2000).

Ortoklas, kimyasal bileşimi  $K Al Si_3 O_8$ , camsı, su aldığı beyaz pembe, gri renkte, iyi teşekkül etmiş ikiz kristalleri olan birbirine  $90^\circ$  dik iki dilinim yüzeyi gösteren ve sertliği 6, özgül ağırlığı  $2.56 \text{ gr/cm}^3$  olan bir feldspattır. (Kantarıcı, 2000).

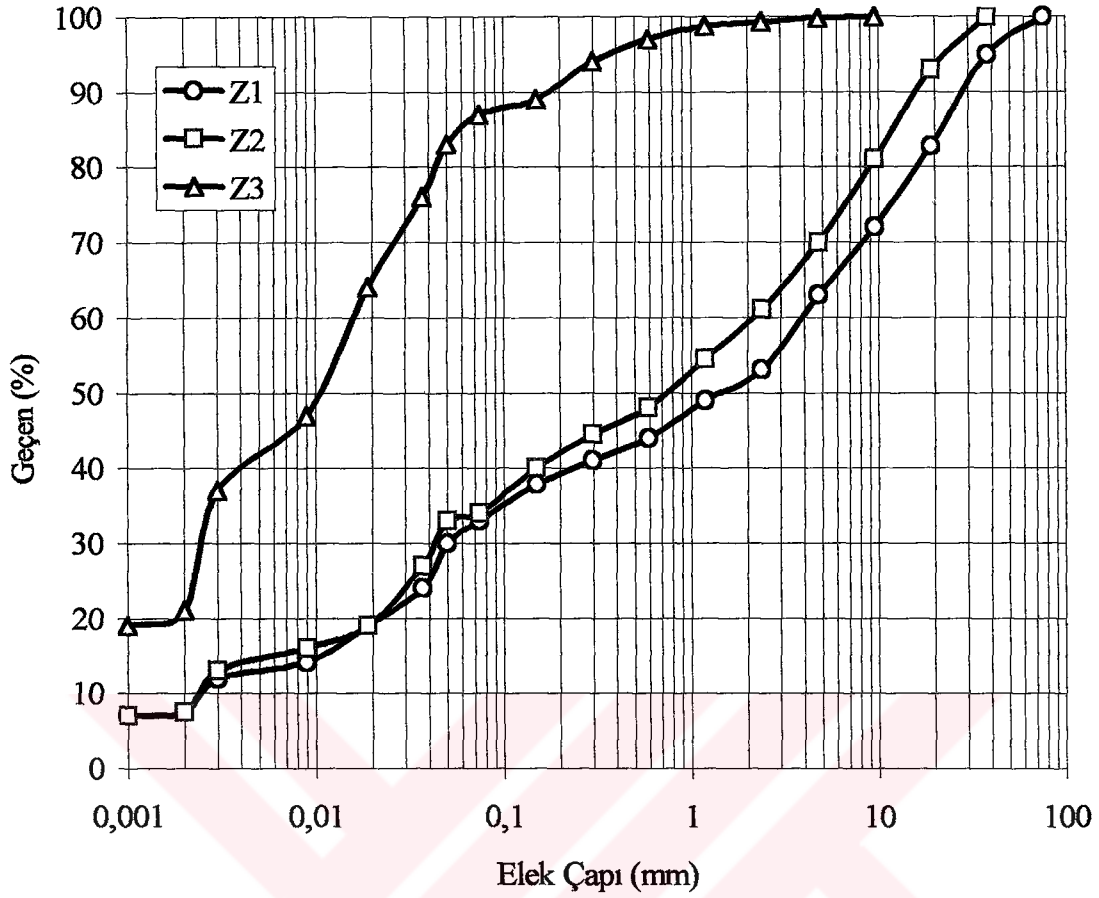
### 3.2.2. Elek ve Hidrolik Analizlerine Ait Bulgular ve Tartışma

Zeminler üzerinde yapılan elek ve hidrolik analiz sonucu elde edilen granülometri değerleri Tablo 16'da, bu değerlere ait granülometri eğrileri de Şekil 67'de verilmiştir.

Tablo 16. Deneyleerde kullanılan zeminlerin granülometrisi

Elek Boyutu		Zemin Granülometrisi					
		Z1		Z2		Z3	
		Toplam Geçen	Elek Üzerinde Kalan	Toplam Geçen	Elek Üzerinde Kalan	Toplam Geçen	Elek Üzerinde Kalan
Inch	mm	%	%	%	%	%	%
	76.2	100	0	100	0	100	0
1.5	38.1	95	5	93	7	99.5	0.5
(3/4)	19.05	82.5	7.5	81	19	99	1
(3/8)	9.52	72	28	70	30	98.5	1.5
No.4	4.76	63	37	61	39	97	3
No.8	2.38	53	47	54.5	45.5	94	6
No.16	1.19	49	51	48	52	89	11
No.30	0.590	44	56	44.5	55.5	87	13
No.50	0.297	41	59	40	60	83	17
No.100	0.149	37.5	62.5	34	66	76	24
No.200	0.074	33	67	33	67	64	36
No.270	0.053	30	70	27	73	47	553
No.400	0.037	24	76	19	81	37	63
	0.019	19	81	16	84	21	79
	0.009	14.5	85.5	13	87	19	81
	0.003	12	88	7.5	92.5		
	0.002	7.5	92.5	7	93		
	0.001	7	93				

Yapılan elek ve hidrolik analiz sonuçlarına göre Tablo 16 ve Şekil 67'den de görüldüğü gibi Z3 zemini yani ağır kil zemin, diğerlerine oranla daha ince bir granülometri göstermektedir. Z2 zemini yani balçıklı kil zemin ikinci incelikte ve Z1 yani kumlu kil zemin ise kullanılan zemin türleri içinde en kaba taneli zemin olarak bulunmuştur.



Şekil 67. Çalışmada kullanılan zeminlerin granülometri eğrileri

### 3.2.3. Atterberg Limitlerine Ait Bulgular ve Tartışma

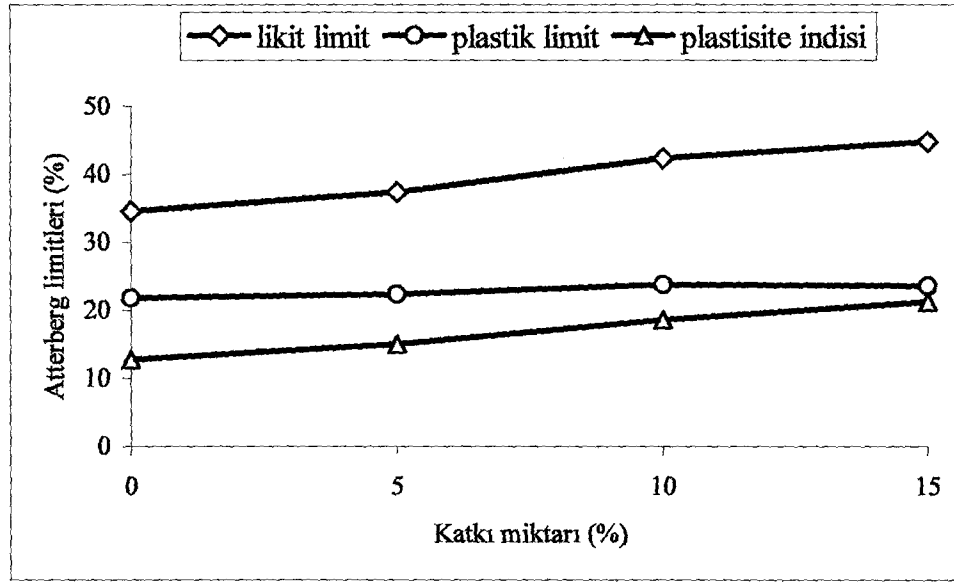
Kullanılan Kireç Çamuru katkısının zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki değişimini incelemek üzere üç değişik zemin türüne % 0, 5, 10 ve 15 oranlarında kireç çamuru ilave edilerek, Atterberg limitlerindeki değişimler incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen veriler Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. Zemin ve Zemin + Kireç Çamuru karışımların atterberg limitleri

Zemin Türü	Katkı Miktarı	Atterberg Limitleri		
		Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
	%	%	%	%
Z1	0	34.5	21.8	12.7
	5	37.4	22.4	15.0
	10	42.4	23.8	18.6
	15	44.8	23.6	21.2
Z2	0	33.9	19.2	14.7
	5	37.3	21.0	16.3
	10	39.0	21.2	17.8
	15	41.6	22.7	18.9
Z3	0	53.6	28.4	25.2
	5	55.0	29.8	25.2
	10	54.4	29.4	25.0
	15	54.0	30.9	23.1

Tablo 17'deki zeminlerin Atterberg limitleri üzerindeki değişimleri incelendiğinde; Z1, Z2 ve Z3 zeminlerine ilişkin likit limit ve plastik limit değerlerinin katkı maddesinin miktarına bağlı olarak artış gösterdiği görülecektir. Plastisite indisi değerleri bakımından Z1 ve Z2 zemin türlerinde katkı oranına bağlı olarak bir artış gözlenirken, Z3 zemininde ise bir azalış söz konusudur.

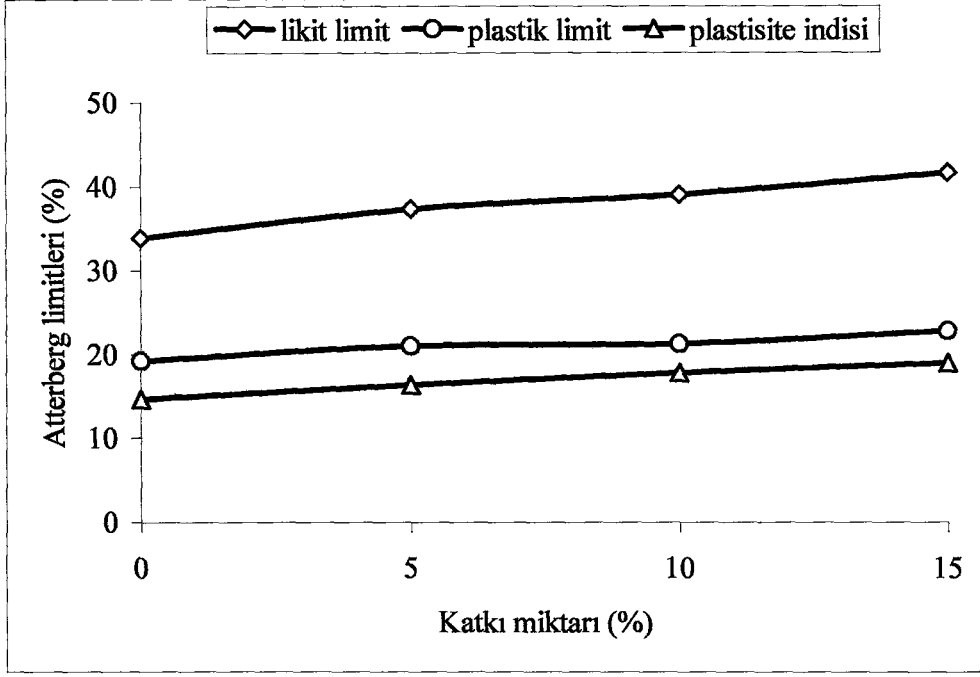
Z1 zemin türünde likit limit değeri % 34.5 iken katkı miktarının % 15 olduğu durumda bu değer % 44.8'e ulaşmıştır. Yani % 15 katkı oranında en fazla iyileşme sağlanmış ve bu iyileşme miktarı % 30 oranında gerçekleşmiştir. Z1'in plastik limit değerine bakıldığında yine katkı miktarına bağlı olarak bir artış olduğu, % 21.8'den % 15 kireç çamuru katkısıyla % 23.6 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum plastik limit değerinde % 8 oranında artış olduğunu göstermektedir. Likit limit ve plastik limit değerlerindeki artışa paralel olarak Plastisite İndisinde de katkı oranına bağlı olarak bir iyileşme olmaktadır. Katkısız durumda Z1'in plastisite indisi % 12.70 iken, % 15 katkı bu değer % 67 oranında artarak % 21.2 değerine yükselmiştir. (Şekil 68).



Şekil 68. Z1 zemin türünde katkı miktarına göre atterberg limitlerinin değişimi

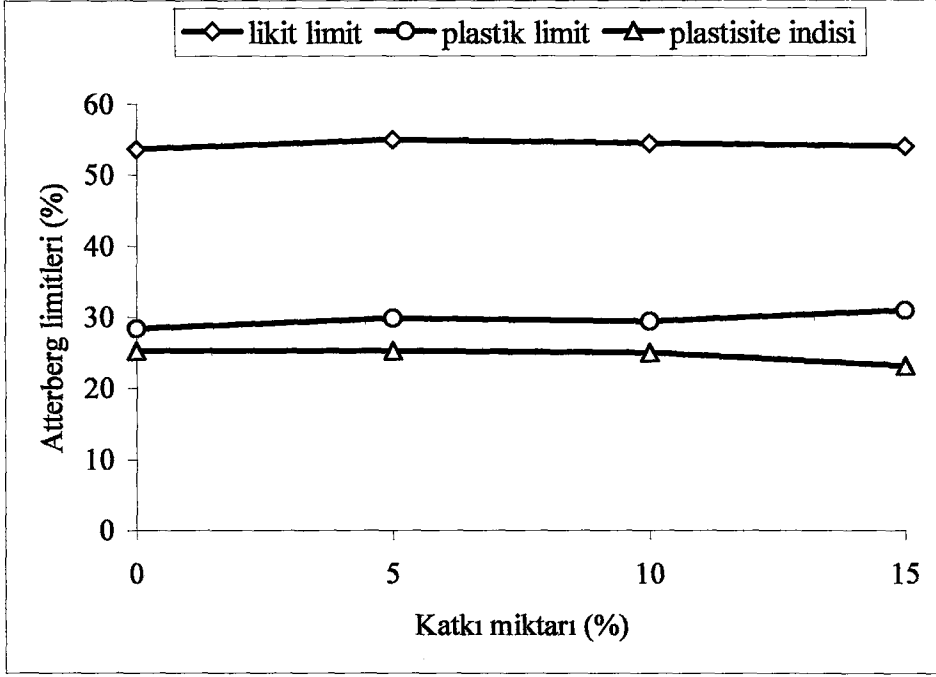
Z2 zemin türünün atterberg limitlerindeki değişimi incelendiğinde; katkısız durumda likit limit değeri 33.9 iken, katkı miktarının % 15'e çıktığı durumda bu değer % 41.6'ya ulaşmıştır. Yani % 15 katkı oranında likit limit değerleri için en fazla iyileşme sağlanmış ve bu iyileşme miktarı % 23 olarak gerçekleşmiştir. Z2 zemininin plastik limit değerine bakıldığında yine katkı miktarına bağlı olarak bir artış olduğu plastik limit değerinin % 19.2'den % 15 kireç çamuru katkısıyla % 22.7 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu plastik limit değerinde % 18 oranında artış olduğunu göstermektedir. Likit limit ve plastik limit değerlerindeki artışa paralel olarak plastisite indisinde de katkı oranına bağlı olarak bir iyileşme olmaktadır. Katkısız durumda plastisite indisi % 14.70 iken, % 15 kireç çamuru katkılı örneklerde bu değer % 29 oranında artarak % 21.2 değerine yükselmiştir. (Şekil 69).





Şekil 69. Z2 zemin türünde katkı miktarına göre atterberg limitlerinin değişimi

Z3 zemin türünün atterberg limitlerindeki değişimi incelendiğinde; katkısız durumda %53.6 olan likit limit değeri % 5 kireç çamuru katıldığında likit limit değeri % 55.0 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Katkı oranı % 10'a çıktığı zaman likit limit değeri % 54.4'e gerilemiş, katkı oranının % 15'e çıkarılması sonucunda ise bu değer % 54'e gerilemiştir. Ancak bütün katkı oranlarında ki likit limit değerleri katkısız örneklerin likit limit değerlerinden yüksek çıkmıştır. Z3 zemin türü için en iyi likit limit değeri % 5 katkı oranında bulunmuştur. Z3 zemininin plastik limit değerine bakıldığında genelde katkı miktarına bağlı olarak bir artış olduğu, katkısız durumda ise % 28.4 olan plastik limit değerinin % 15 kireç çamuru katkı oranında % 30.9 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum plastik limit değerinde % 5 oranında artış olduğunu göstermektedir. Likit limit ve plastik limit değerlerindeki değişimlere bağlı olarak, katkı oranını artmasıyla Plastisite İndisinde bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Katkısız durumda Z3 zemininin plastisite indisi % 25.2 iken, % 15 katkı oranında bu değer % 23.1 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 70).



Şekil 70. Z3 zemin türünde katkı miktarına göre atterberg limitlerinin değişimi

Genel olarak bakıldığında katkı oranındaki artışa bağlı olarak atterberg limitlerinde en fazla iyileşmenin Z1 zemin türünde meydana geldiği onu takiben Z2 zemin türünde iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Z3 zemin türünde ise; katkı miktarının artmasıyla likit limit değerlerinde önce artış sonra azalış, plastik limit değerinde artış söz konusu iken plastisite indisi değerlerinde ise katkı oranının artmasıyla azalma meydana gelmiştir.

Yüksek ısıda fırınlanmış çimento tozu ile 3 değişik zemin üzerinde yapılmış denemeler sonucunda fırınlanmış çimento tozu ilavesiyle CH zeminindeki likit limit değerlerinde azalma, plastik limit değerlerinde ise artış, CL zemininde likit limit değerlerinde önce artış sonra azalış, plastik limit değerlerinde artış ve ML zemininde ise hem plastik limit hem de likit limit değerlerinde artış belirlenmiştir (Miller ve Azad, 2000).

Çalışmamızda, Kireç çamuru ilavesi yapılan Z1 ve Z2 zeminlerinin hem likit limit hem de plastik limit değerlerinde artış gözlenirken, Z3 zemininde ise her iki limit değerlerinde de azalış görülmüştür. Bu durum, katkı miktarının artmasıyla zeminlerin atterberg limitleri değerlerindeki değişimin, zeminlerin özelliklerine göre farklılık gösterdiği anlamına gelmektedir.

Katkı oranına bağlı olarak Z1 ve Z2 zeminlerinin atterberg limitleri değerlerinde artış olması buna karşın Z3 zemininde ise azalış olmasının nedeni, Z3 zemininin diğer iki

zemine göre en ince taneli granülometriye sahip olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Z3 zemin türünün kum oranına bakıldığında diğer zeminlere göre daha az olduğu görülmektedir.

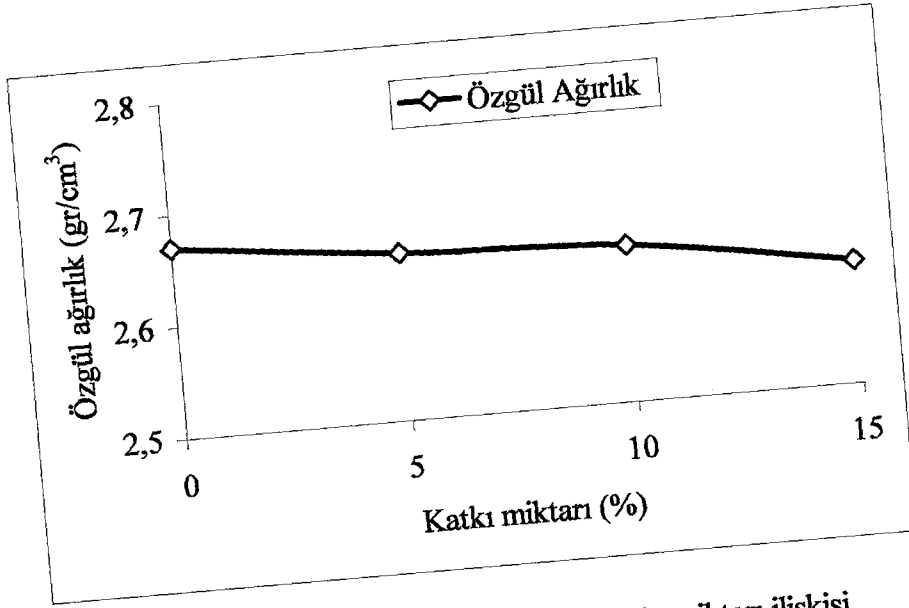
### 3.2.4. Özgül Ağırlık Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma

Katkı miktarına bağlı olarak zeminlerin özgül ağırlığındaki değişim incelendiğinde; Z1, Z2 ve Z3 zeminlerinde özgül ağırlık değerlerinde bir azalış gözlenmiştir. (Tablo 18).

Tablo 18. Zemin ve Zemin + Kireç Çamuru karışımların özgül ağırlıkları

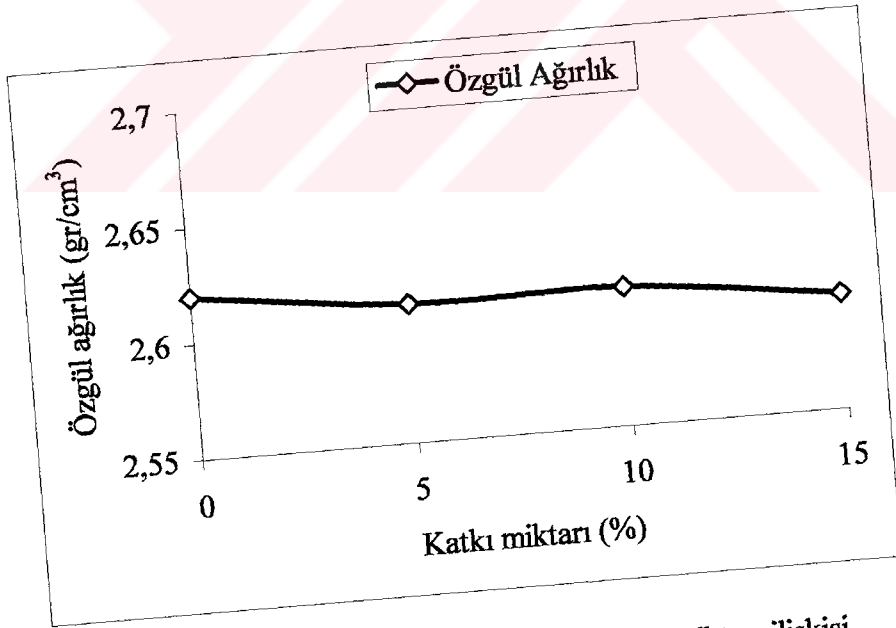
Zemin Türü	Katkı Miktarı	Özgül Ağırlık
	%	gr/cm <sup>3</sup>
Z1	0	2.67
	5	2.65
	10	2.64
	15	2.61
Z2	0	2.62
	5	2.61
	10	2.61
	15	2.60
Z3	0	2.67
	5	2.64
	10	2.61
	15	2.60

Z1 zemininde katkısız olarak 2.67 gr/cm<sup>3</sup> olan normal özgül ağırlık değeri, katkı oranlarına göre sırasıyla % 5 katkıda 2.65 gr/cm<sup>3</sup>'e, % 10 katkıda 2.64 gr/cm<sup>3</sup>'e, % 15 katkıda ise 2.61 gr/cm<sup>3</sup>'e gerilemiştir (Şekil 71).



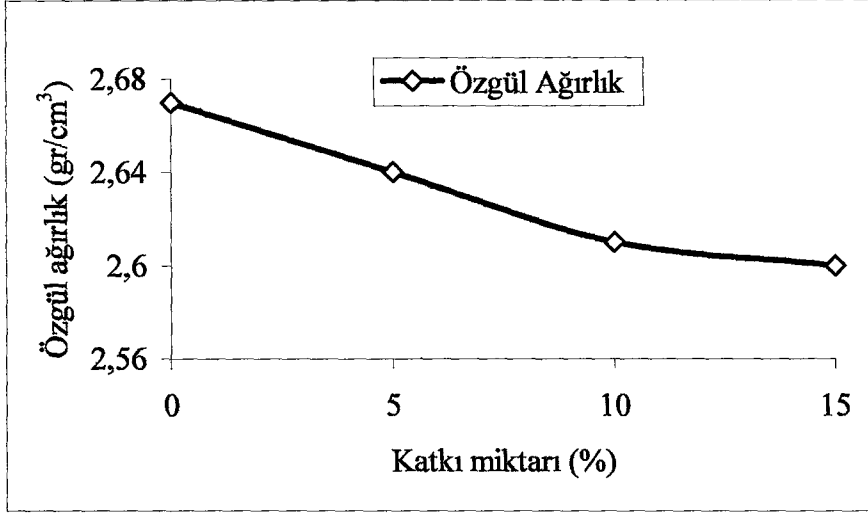
Şekil 71. Z1 zemin türüne ait özgül ağırlık katkı miktarı ilişkisi

Z2 zemininde katkısız olarak  $2.62 \text{ gr/cm}^3$  olan normal özgül ağırlık değeri % 5 katkıda  $2.61 \text{ gr/cm}^3$ 'e, % 10 katkı miktarında  $2.61 \text{ gr/cm}^3$ 'e, % 15 katkı miktarında ise  $2.60 \text{ gr/cm}^3$ 'e düşmüştür (Şekil 72).



Şekil 72. Z2 zemin türüne ait özgül ağırlık katkı miktarı ilişkisi

Z3 zemininde katkısız olarak  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  olan normal özgül ağırlık değeri % 5 katkıda  $2.64 \text{ gr/cm}^3$ 'e, % 10 katkı miktarında  $2.61 \text{ gr/cm}^3$ 'e ve % 15 katkı miktarında ise  $2.60 \text{ gr/cm}^3$ 'e düşmüştür (Şekil 73).



Şekil 73. Z3 zemin türüne ait özgül ağırlık katkı miktarı ilişkisi

Zemin türlerinin özgül ağırlık değerlerindeki kireç katkısına bağlı olarak değişim miktarlarının farklı ve birbirinden değişik yönlü olması, zeminlerin mineralojik yapılarından, içerdikleri kil, kum ve toz miktarından kaynaklanabilir. Bilindiği gibi bazı kil türleri yapı olarak birbirinden farklı özellikler gösterir ve müdahaleler karşısında değişik tepkiler verebilirler.

### 3.2.5. Üç Eksenli Basınç Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma

Kullanılan zeminlerden hazırlanan, katkısız ve % 5, 10 ve 15 kireç katkılı numuneler üzerinde yapılan üç eksenli kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 19'da verilmiştir.

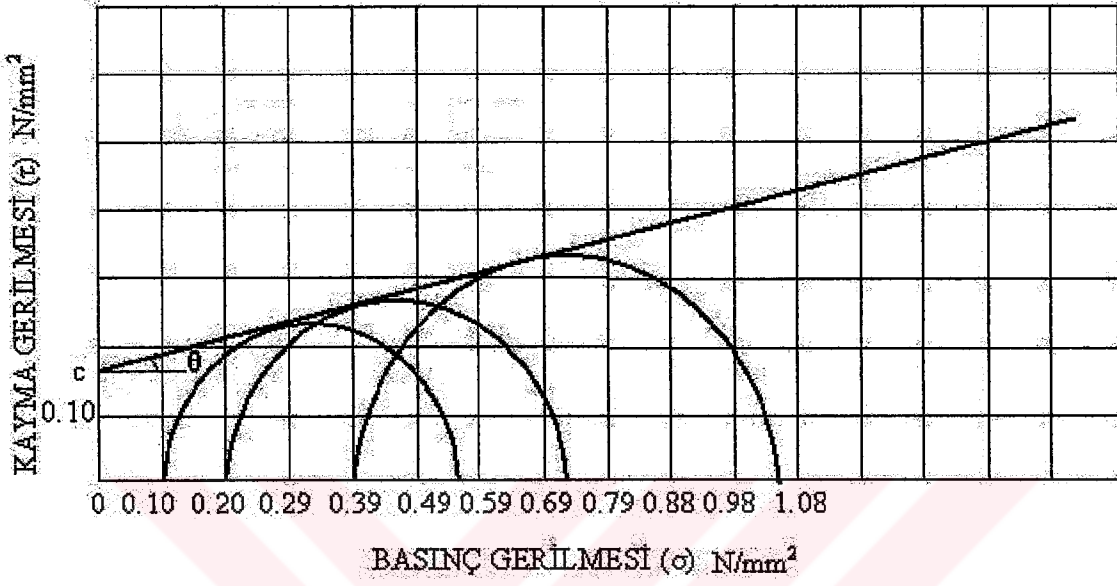


Tablo 19. Üç eksenli kesme deney sonuçları

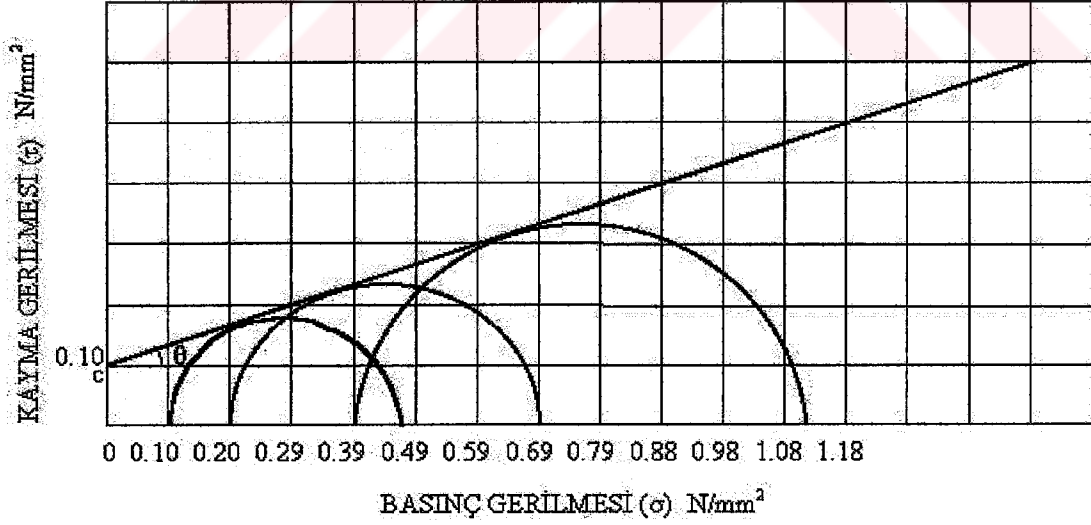
Zemin Numunesi	Katkı Miktarı %	C N/mm <sup>2</sup>	$\Phi$ Derece	$\sigma_3$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_1$ N/mm <sup>2</sup>	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ N/mm <sup>2</sup>	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ N/mm <sup>2</sup>
Z1	0	0.152	14	0.098	0.561	0.330	0.231
				0.196	0.733	0.466	0.270
				0.392	1.030	0.711	0.318
	5	0,098	21	0.098	0.483	0.290	0.192
				0.196	0.685	0.440	0.244
				0.392	1.105	0.749	0.356
	10	0.088	27	0.098	0,557	0.328	0.229
				0.196	0.823	0.509	0.313
	15	0.074	28	0.392	1.329	0,890	0.497
				0.098	0.522	0.310	0.212
				0.196	0.755	0.476	0.378
	Z2	0	0.058	25	0.392	1.298	0.845
0.098					0.445	0.271	0.173
0.196					0.658	0.427	0.231
5		0.088	19	0.392	1.172	0.780	0.388
				0.098	0.419	0.258	0.160
				0.196	0.648	0.422	0.226
10		0.137	23	0.392	0.995	0.694	0.302
				0.098	0.653	0.376	0.277
15		0.108	21	0.196	0.913	0.555	0.358
				0.392	1.327	0.860	0.467
				0.098	0.536	0.317	0.219
Z3		0	0.093	19	0.196	0.767	0.482
	0.392				1.166	0.779	0.387
	0.098				0.450	0.274	0.176
	5	0.118	19	0.196	0.680	0.438	0.241
				0.392	1.046	0.719	0.327
				0.098	0.495	0.297	0.198
	10	0.132	19	0.196	0.697	0.447	0.250
				0.392	1.014	0.703	0.311
	15	0.142	24	0.098	0.582	0.340	0.242
				0.196	0.796	0,496	0.300
				0.392	1.384	0.776	0.384
					0.098	0.662	0.380
				0.196	0.930	0.568	0.371
				0.392	1.384	0.888	0.496

Üç eksenli kesme deneyleri sonunda, üç numune üzerinde ve üç farklı hücre basıncı altında, numunelerin gerilme durumlarını gösteren Mohr daireleri çizilmiştir. Ayrıca, üç Mohr dairesine teğet olacak şekilde kırılma zarfı eğrileri çizilmiştir. Eğrinin yatayla yaptığı açı kayma direnci açısı ( $\Phi$ ) (içsel sürtünme açısı) dır. Eğrinin kayma direnci eksenini kestiği nokta ise zemine ait kohezyon (C) değerini vermektedir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil

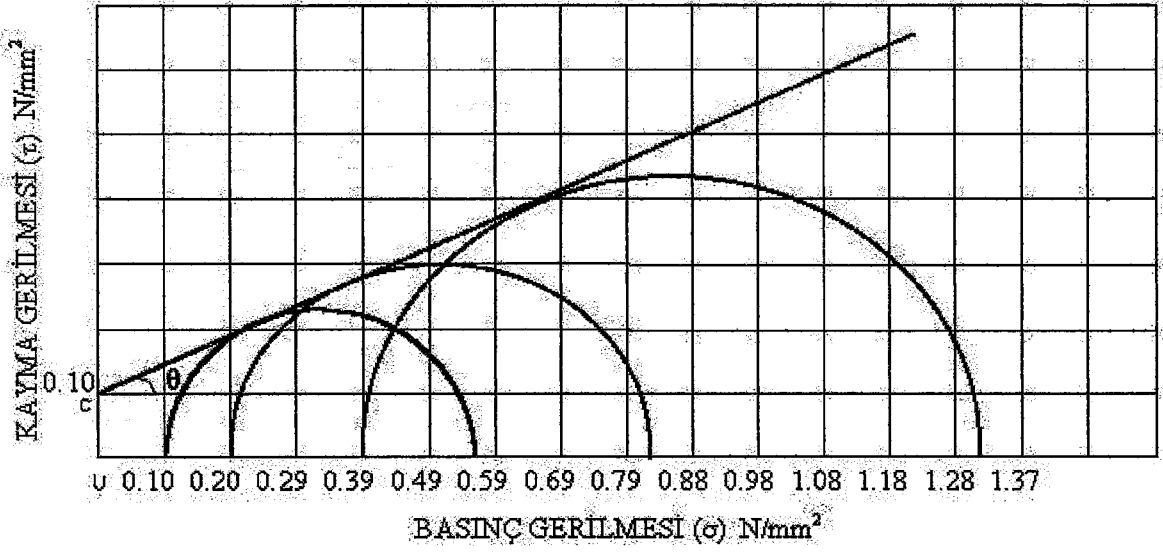
74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84 ve 85) sırasıyla Z1, Z2 ve Z3 zeminlerinin katkısız ve % 5, 10, 15 kireç çamuru katkıli numunelerine üç değişik gerilme uygulanarak yapılan üç eksenli kesme deneylerinde elde edilen mohr daireleri verilmiştir.



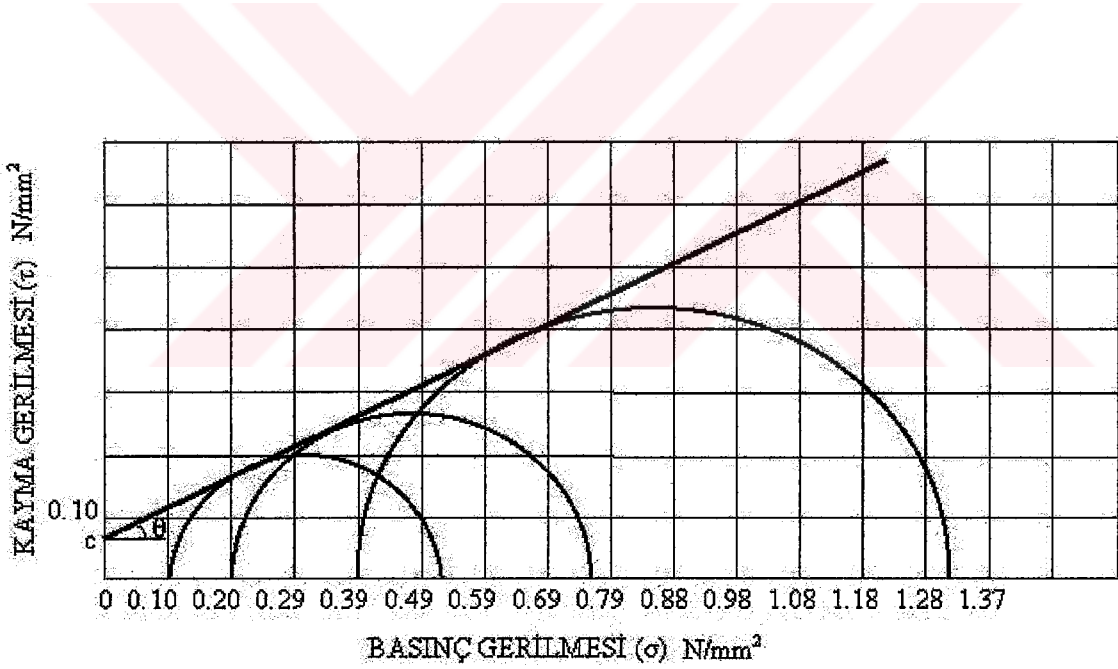
Şekil 74. Z1 zemin türünün katkısız numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri



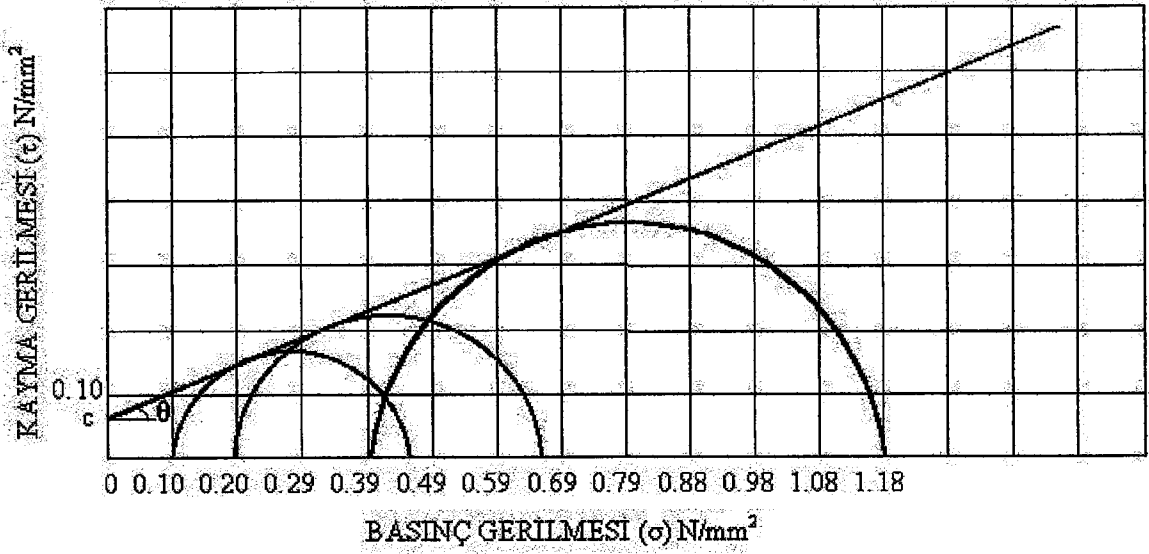
Şekil 75. Z1 zemin türünün % 5 katkıli numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri



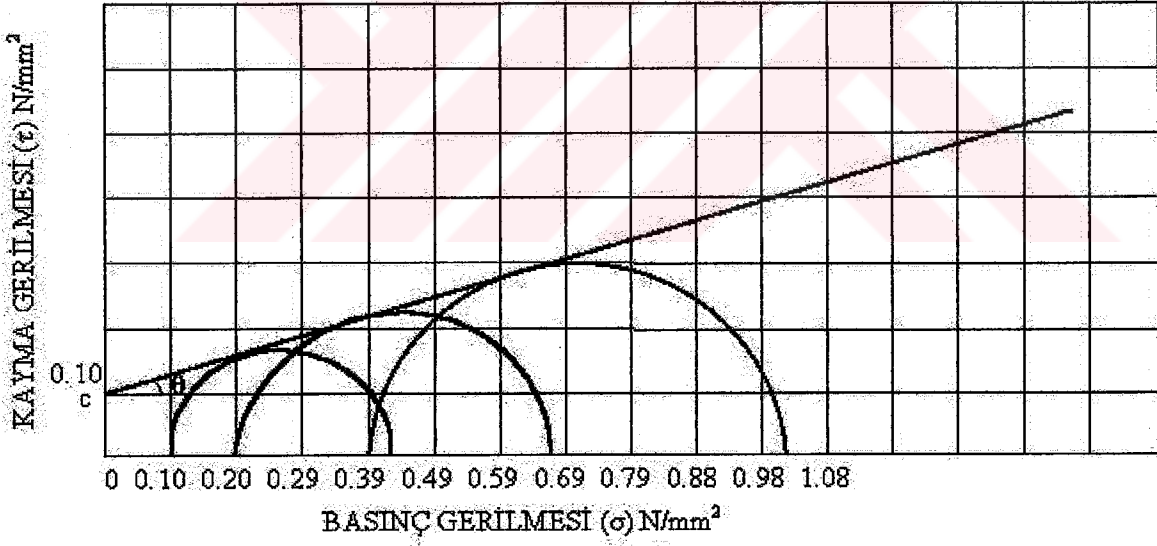
Şekil 76. Z1 zemin türünün % 10 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri



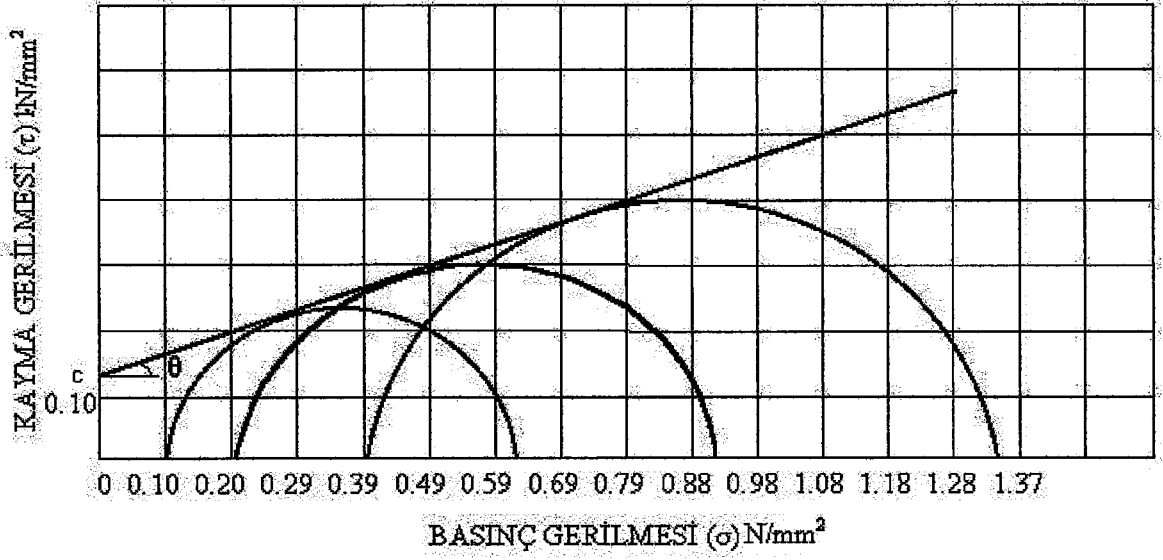
Şekil 77. Z1 zemin türünün % 15 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri



Şekil 78. Z2 zemin türünün katkısız numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri



Şekil 79. Z2 zemin türünün % 5 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri

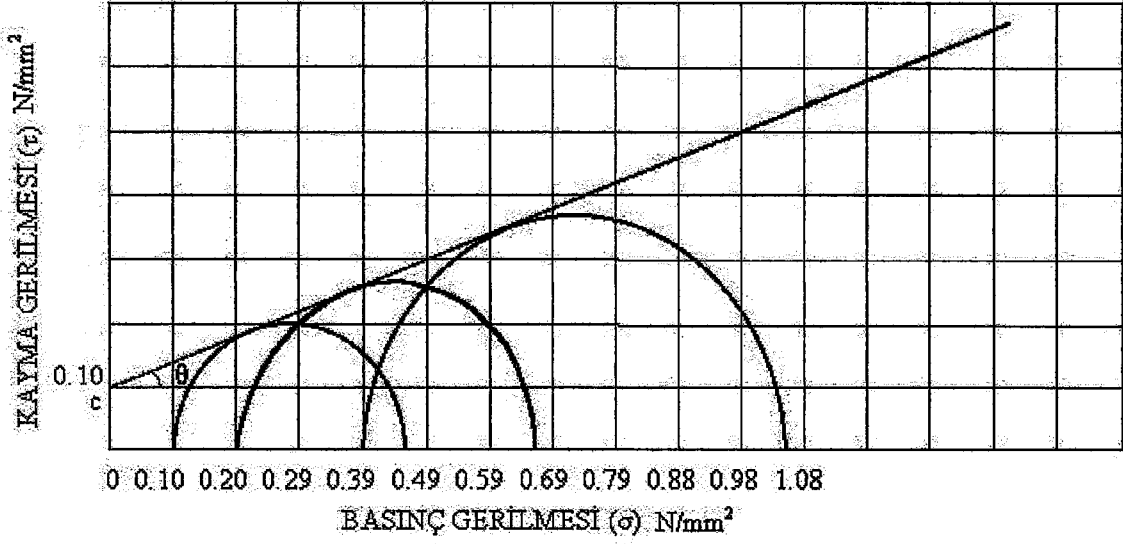


Şekil 80. Z2 zemin türünün % 10 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri

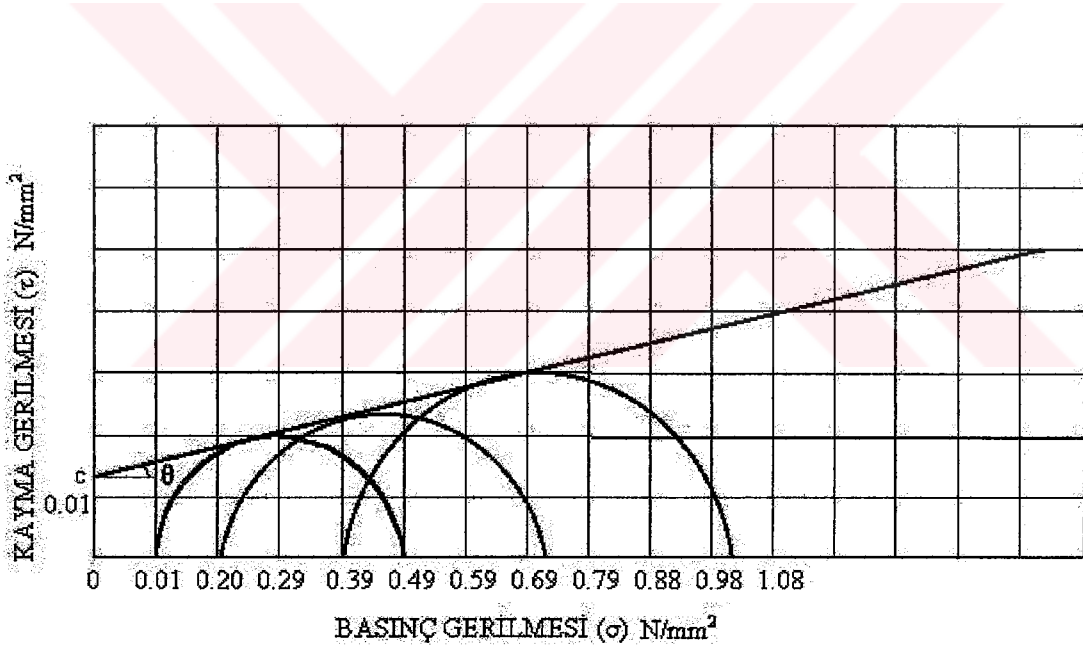


Şekil 81. Z2 zemin türünün % 15 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri

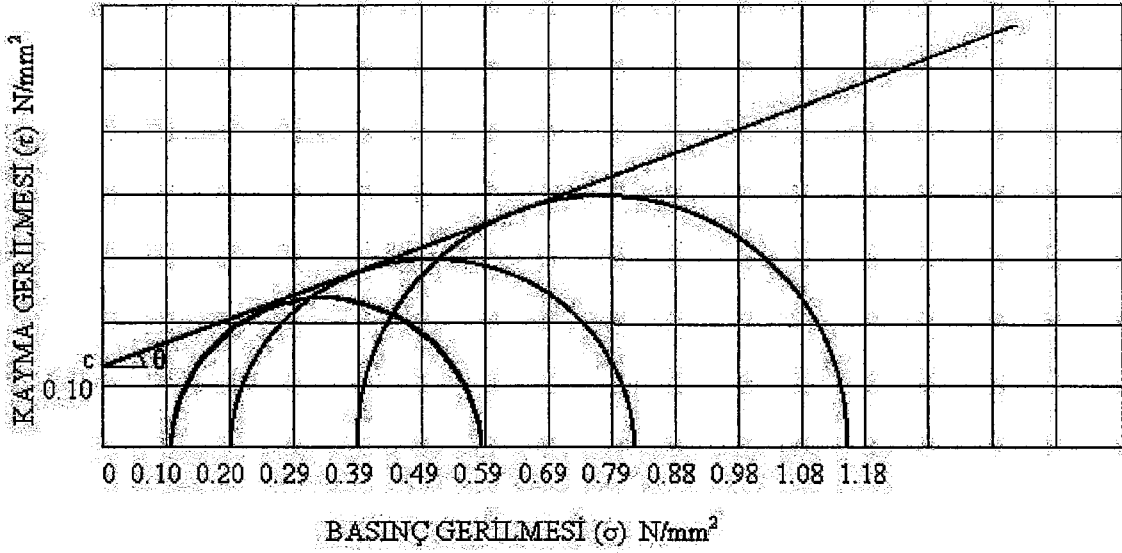




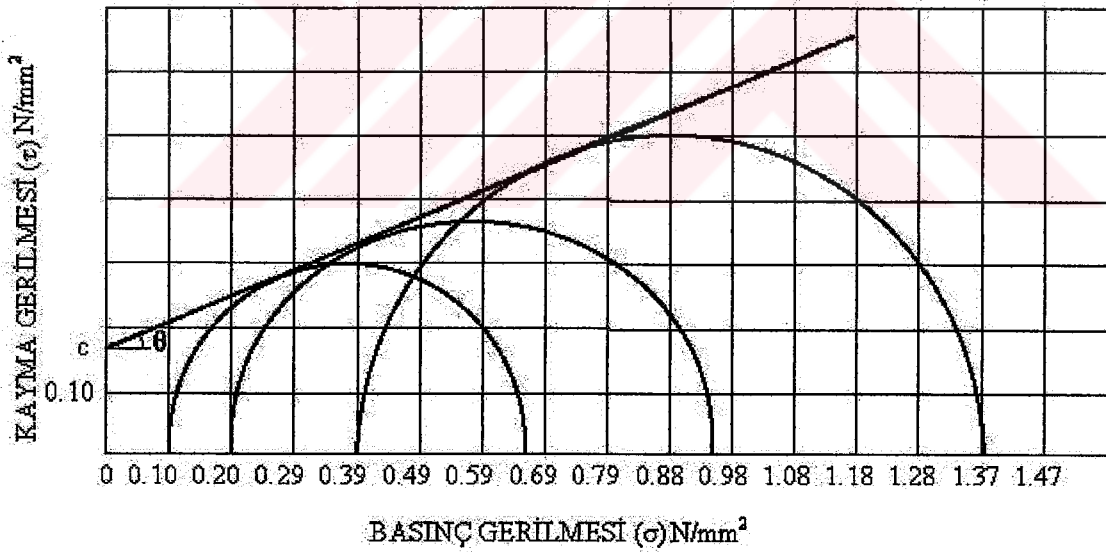
Şekil 82. Z3 zemin türünün katkısız numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri



Şekil 83. Z3 zemin türünün % 5 katkılı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri

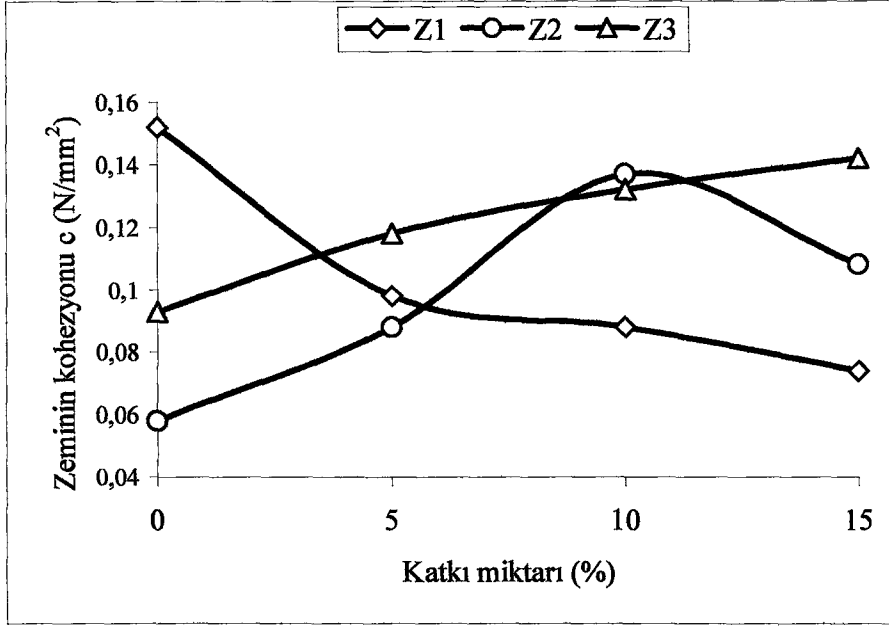


Şekil 84. Z3 zemin türünün % 10 katkı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri



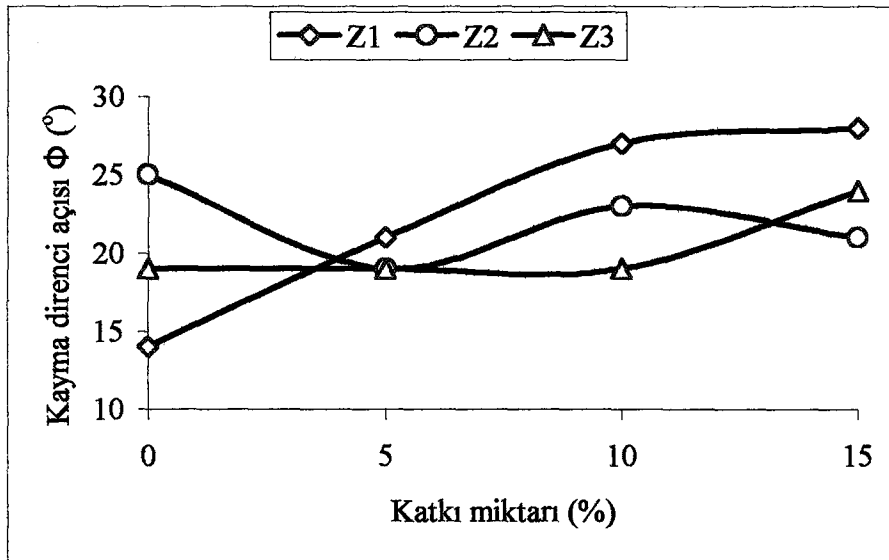
Şekil 85. Z3 zemin türünün % 15 katkı numunesine yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri

Zeminlerin katkı oranına bağlı olarak kohezyon değerlerindeki değişimi incelendiğinde, Z1 zemininde katkı oranına bağlı olarak kohezyon azalmakta, Z3 zemininde artmakta ve Z2 zemininde ise % 10 kireç çamuru katkısına kadar artmakta sonra azalmaktadır (Şekil 86).



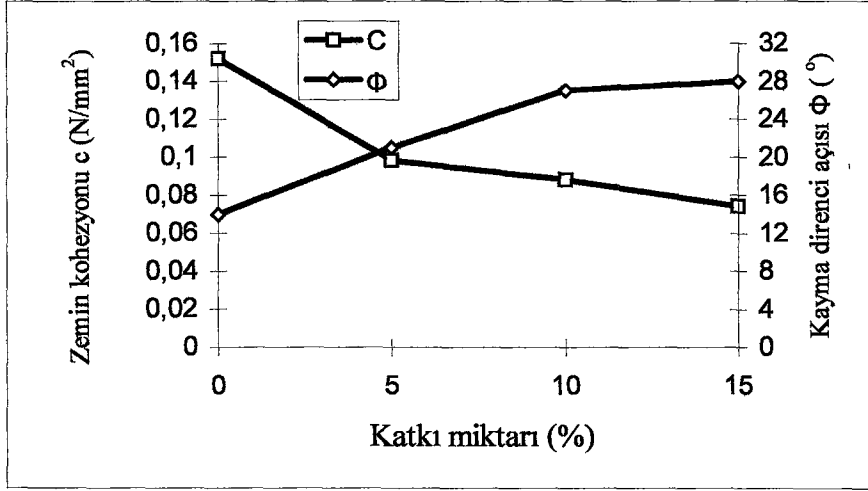
Şekil 86. Zeminlerin katkı miktarına göre zemin kohezyonu değişimi

Zeminlerin katkı oranına bağlı olarak kayma direnci açılarındaki değişim dikkate alındığında, Z1 zemininde katkı oranı arttıkça kayma direnci artmakta, Z2 zemininde % 5 kireç çamuru katkısında, kayma direnci azalmakta, % 5 ile % 10 katkı oranı arasında ise önce artmakta ve daha sonra azalmakta ve Z3 zemininde ise % 5 ve % 10 kireç çamuru katkısında kayma direnci sabit kalmakta, % 15 katkı oranında ise artmaktadır (Şekil 87).



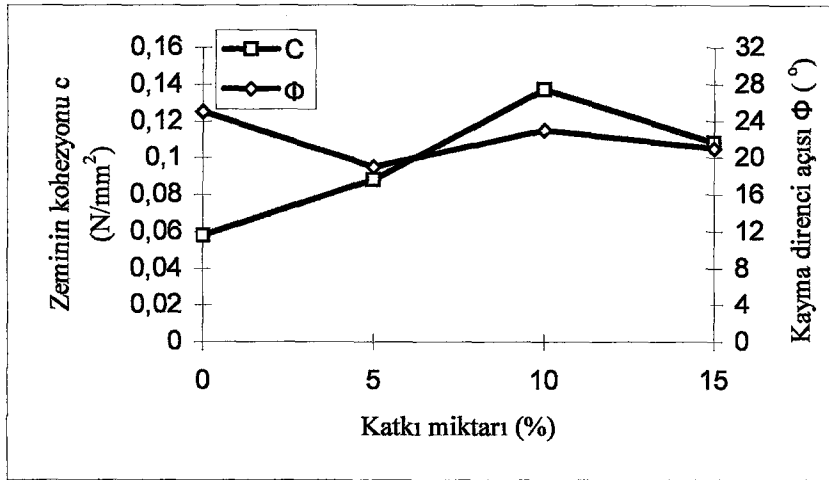
Şekil 87. Zeminlerin katkı miktarına göre kayma direnci açısı değişimi

Şekil 88’de, Z1 zemininin katkı oranına bağlı olarak kohezyon değerlerindeki ve kayma direnci açıları arasındaki ilişki görülmektedir. Katkı oranına bağlı olarak zemin kohezyonu azalırken, kayma direnci açısı artmaktadır.



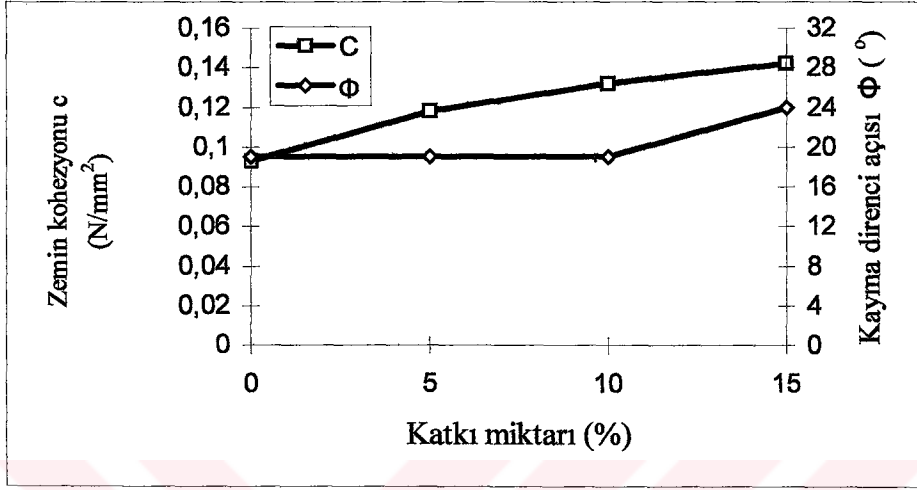
Şekil 88. Z1 zemin türünde katkı miktarına bağlı olarak kayma direnci ve kohezyon ilişkisi

Şekil 89’da Z2 zemininin katkı oranına bağlı olarak kohezyon değerlerindeki ve kayma direnci açıları arasındaki ilişki görülmektedir. Katkı oranına bağlı olarak zemin kohezyonu % 10 kireç çamuru katkı oranına kadar artmakta, daha sonra azalmaktadır. Buna karşın kayma direnci ise % 5 kireç çamuru katkı oranına kadar azalmakta, bunu takiben % 10 kireç çamuru katkı oranına kadar hemen hemen değişmeden kalmakta, % 10 katkı oranından itibaren ise azalmaktadır.



Şekil 89. Z2 zemin türünde katkı miktarına bağlı olarak kayma direnci ve kohezyon ilişkisi

Şekil 90'da Z3 zemininin katkı oranına bağlı olarak kohezyon değerlerindeki ve kayma direnci açıları arasındaki ilişki görülmektedir. Katkı oranına bağlı olarak zemin kohezyonu artmakta, kayma direnci açısı % 10 kireç çamuru katkısına kadar sabit kalmakta, bundan sonra artış göstermektedir.



Şekil 90. Z3 zemin türünde katkı miktarına bağlı olarak kayma direnci ve kohezyon ilişkisi

Yapılan üç eksenli kesme deneyi sonuçlarından elde edilen  $\Phi$  (kayma direnci açısı) ve  $c$  (zeminlerin kohezyonu) değerleri kayma mukavemeti parametreleridir. Bir zeminin kayma mukavemeti bu iki parametrenin kullanıldığı aşağıdaki formülle hesaplanır

$$\tau_f = c + \sigma \tan \Phi \quad \text{formülü ile bulunur.}$$

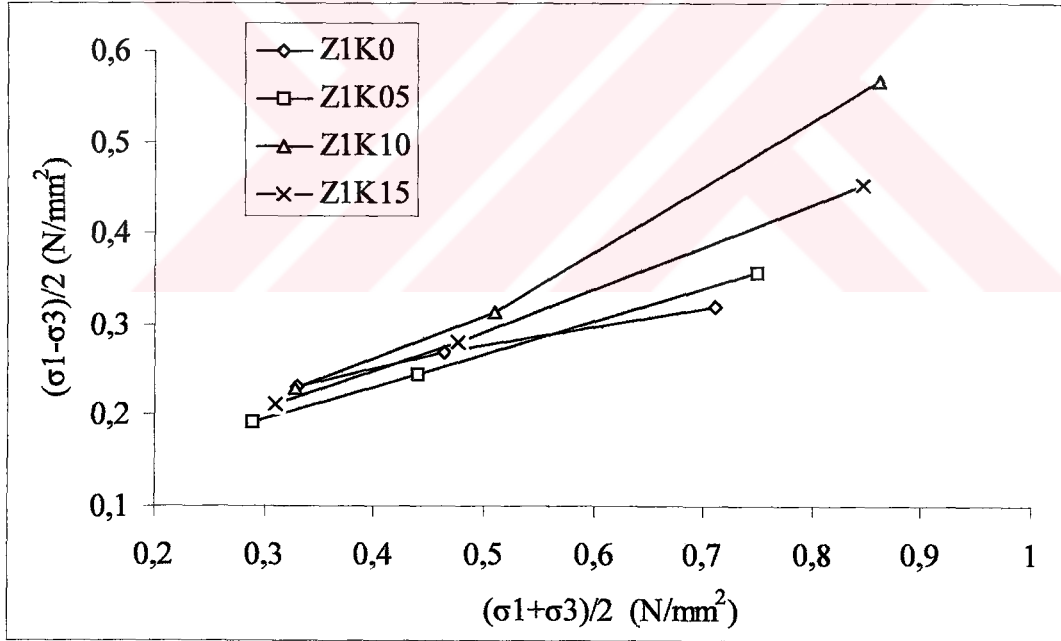
Bu formülden de anlaşıldığı gibi zemin kohezyonu ( $c$ ) ve kesme direnci açısı ( $\Phi$ ) ne kadar büyük olursa zeminlerin kesme mukavemeti de o kadar büyük olur. Kesme direnci açısı ( $\Phi$ ), sadece tane yüzeyleri arası sürtünmeden kaynaklanan direnci değil, aynı zamanda tanelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitleme etkisini de içeren toplam direnci temsil etmektedir. Diğer kayma mukavemeti parametresi olan  $c$  (zemin kohezyonu) ise genellikle kohezyon katsayısı olarak nitelendirilmekle beraber, gerçek fiziksel anlamı çok iyi açıklığa kavuşmuş değildir. Bu katsayı yaygın bir görüşe göre tanelerin birbirini tutma özelliğinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Fakat bazen aynı zeminin değişik konularda yüklemeye tabi tutulması ile bu katsayı çok farklı değer alabilmektedir. Bu özelliği dikkate alan araştırmacılar bu parametrenin zeminin fiziksel özelliği olmadığı,



yalnızca belli koşullarda sürtünme direncini ifade etmek için kullanılan bir katsayı olarak düşünülmesi gerektiği kanısındadırlar (Özaydın, 1989).

Bu açıdan çalışma sonucunda elde edilen ( $\Phi$ ) ve (C) katsayılarının kireç katkı oranına bağlı olarak değişimi incelendiğinde, her üç zemin içinde katkı oranının artmasıyla ( $\Phi$ ) kesme direnci katsayısının arttığı, yani kireç çamuru katkısının zeminlerin kesme direnci özelliği üzerinde olumlu etki yaptığı görülmektedir. Kohezyon katsayısı (C) değerinin değişiminde ise literatürle benzer olarak bazı durumlarda farklı değerler aldığı, fakat genel olarak bu katsayıda da katkıya bağlı olarak bir iyileşmenin söz konusu olduğu görülmektedir. Yani kireç katkı oranının artmasıyla zeminlerin sürtünme dirençlerinde bir iyileşme söz konusu olduğu söylenebilir.

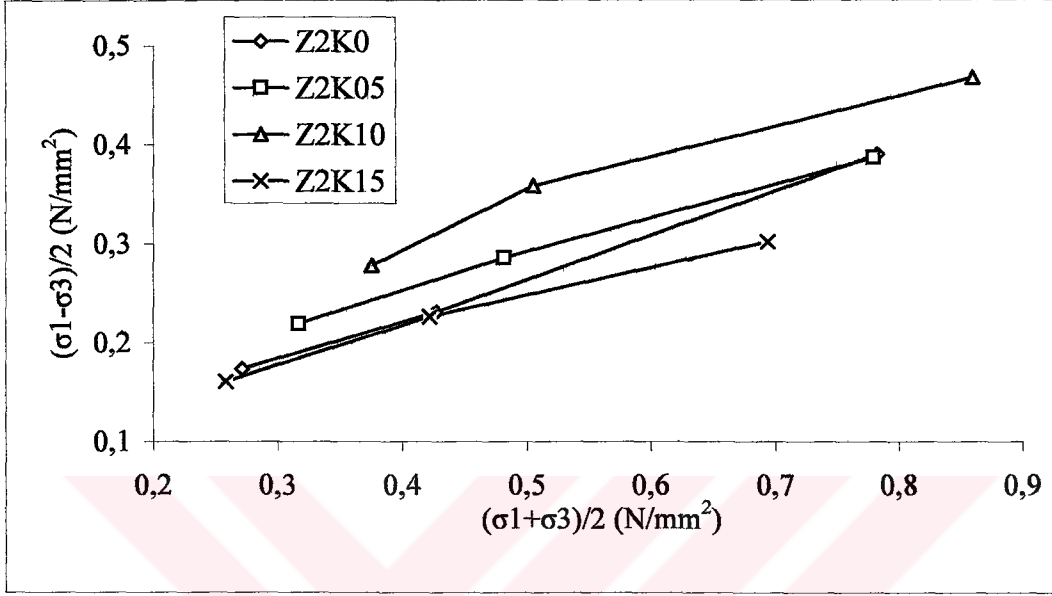
Yapılan üç eksenli basınç deneylerinden sonra oluşturulan Mohr dairelerinden yararlanarak basınç geriliminin artırılmasıyla katkı oranına bağlı olarak asal gerilmelerdeki değişimleri ortaya koyabilmek için aşağıdaki şekiller oluşturulmuştur.



Şekil 91. Z1 zeminin gözlenen gerilme ile aksenal şekil değiştirme davranışı

Şekil 91 incelendiğinde, Z1 zemini asal gerilme değerlerinde katkı oranının artmasıyla bir artış söz konusu olmaktadır. % 5 kireç katkısı oranında asal gerilme katkısız örneklere göre daha fazla olmakta, artış % 10 katkı oranına kadar devam etmekte ve % 15 katkı oranında ise tekrar azalmaktadır. Ancak % 15 kireç çamuru katkı oranında dahi asal

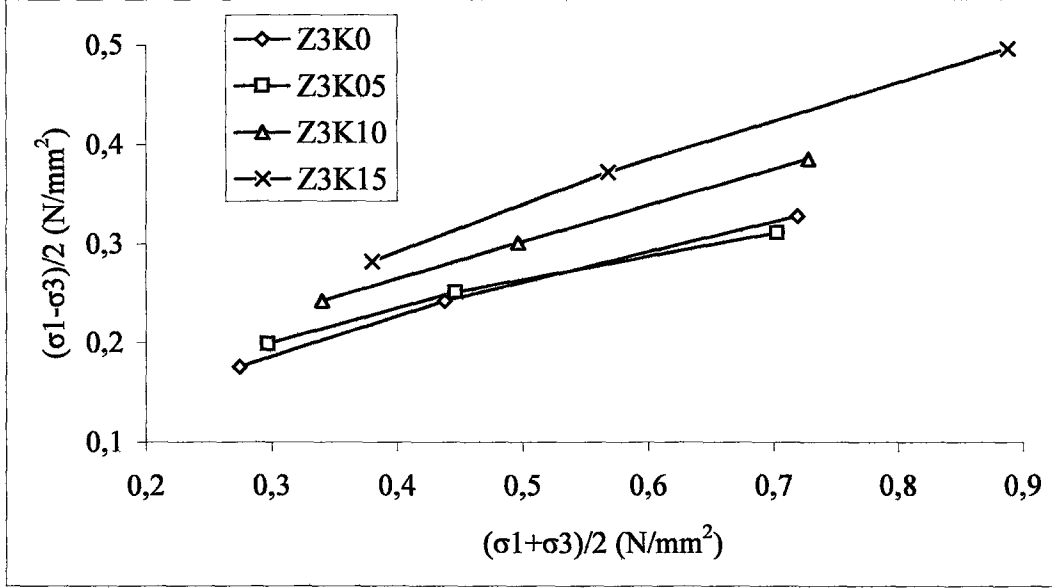
gerilme değerleri katkısız ve % 5 katkılı örneklerden daha fazla olmaktadır. Kısaca Z1 zemininde kireç katkısı basınç dayanımı açısından olumlu etki yapmakta en iyi değerler % 10 kireç çamuru katkısında elde edilmiştir.



Şekil 92. Z2 zeminin gözlenen gerilme ile eksenel şekil değiştirme davranışı

Z2 zeminde katkı oranının artmasıyla asal gerilimler artmaktadır. Kireç katkısı % 5 oranına çıktığında asal gerilme değerleri katkısız numunelerden daha yüksek değerler almakta, katkı oranının % 10 düzeyine çıkmasıyla asal gerilme değerlerindeki artış devam etmekte ve % 15 katkı oranında ise bir azalma söz konusu olmaktadır. % 15 kireç katkısı oranındaki asal gerilme değerleri, katkısız örneklerin asal gerilme değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Kısaca Z2 zemininde kireç katkısı belli bir düzeye kadar basınç dayanımı açısından olumlu etki yapmakta ve en iyi değerleri % 10 kireç çamuru katkısında vermektedir (Şekil 92).

Z3 zeminde katkı oranının artmasıyla asal gerilimler artmaktadır. Kireç katkısı % 5 oranında iken asal gerilme değerlerinde artış başlamakta ve % 10 ve % 15 katkı oranlarında da devam etmektedir. Z3 zemininin dayanımı kireç çamuru katkı oranına bağlı olarak artış göstermekte ve en yüksek değerini % 15 kireç çamuru oranına aldığı görülmektedir (Şekil 93).



Şekil 93. Z3 zeminin gözlenen gerilme ile aksel şekil değiştirme davranışı

Üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan örnekler kuru olarak alınmış yani drene olmuş numunelerdir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere göre, belirli orana kadar kireç katkısının bütün zemin örnekleri için asal gerilmeleri arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum bize zeminin iyileştiğini göstermektedir. Yine deney sonuçlarından zemin kohezyonlarının ve kayma direnci açılarının (içsel sürtünme açılarının) artması kireç çamurunun zeminler üzerinde çimentolaşma ve puzolanik özelliklerin ve dolayısıyla zeminlerin dayanımlarını arttırdığını göstermektedir.

Bütün karışımlardaki numuneler kürlenmemiş olarak hazırlanmıştır. Eğer kürlenerek deneyler yapılsaydı içsel sürtünme açılarında daha çok artmaların meydana gelmesi söz konusu olabilecektir. Böylece yukarıdaki grafiklerdeki eğrilerin açıları daha da büyük olacaktır.

Kireç ve çimentoyla beş değişik zemin türü üzerinde yapılan bir stabilizasyon çalışmasında, her iki katkının da zeminlerin serbest basınç ve çekme dayanımlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir (Balta, 1985). Yine yapılan başka bir çalışmada iki değişik termik santralden elde edilen uçucu küllerle şişme eğilimi fazla olan zeminler üzerinde denemeler yapılmış ve bu çalışmada örnekler 7 ve 28 gün kürlenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, şişme özelliklerinde uçucu kül katkısıyla 4 zemin için iyileşme sağlanmıştır (Çokça, 1999). Buna benzer bir çok çalışmada da kireç çamurunda olduğu gibi zeminlerin mühendislik özelliklerinde iyileşme sağlanmış, bu iyileşmenin

derecesinde kullanılan katkıının kimyası, karışıma girme oranı ve zeminlerin özellikleri etkili olmuştur.

### 3.2.5. Kompaksiyon Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma

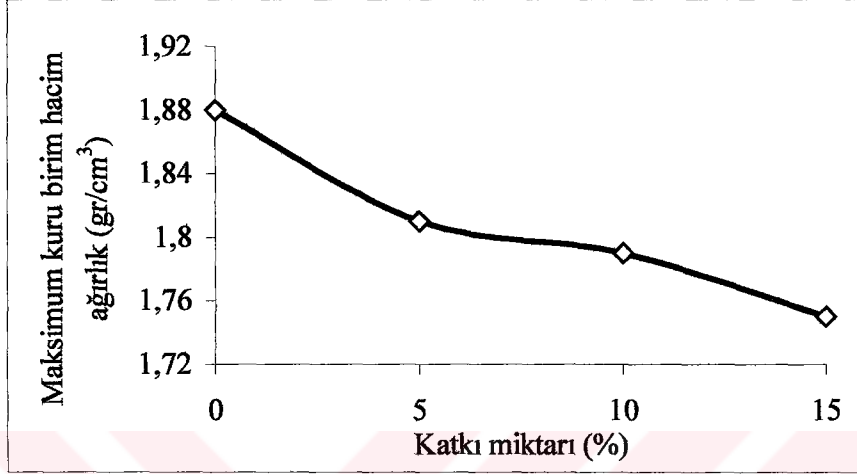
Yapılan kompaksiyon deneylerinde zemin numunelerine önce katkısız sonra % 5, % 10 ve % 15 oranında kireç çamuru ilave edilerek kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası değerleri elde edilmiştir. Burada yapılan zeminlerin hangi su muhtevasında en iyi sıkıştırılabildiğinin tespiti ve kireç çamuru katkısının kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği ilişkisini nasıl değiştirdiğini ortaya koymaktır. Aşağıdaki grafiklerde kompaksiyon deneyleri yapılarak hem katkısız hem de katkı oranının % 5, 10 ve 15 olarak artırılmasıyla elde edilen numunelerin optimum su içerikleri ile kuru birim hacim ağırlık değerlerinin değişimi gösterilmiştir.

Katkısız olarak zeminler ve kireç çamuru ile zemin örnekleri karıştırılarak oluşturulan numuneler üzerinde yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda hem zeminler hem de karışımları için elde edilen optimum su içeriği ve kuru birim hacim değerleri Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Zemin ve Zemin + Kireç Çamuru karışımların kompaksiyon değerleri

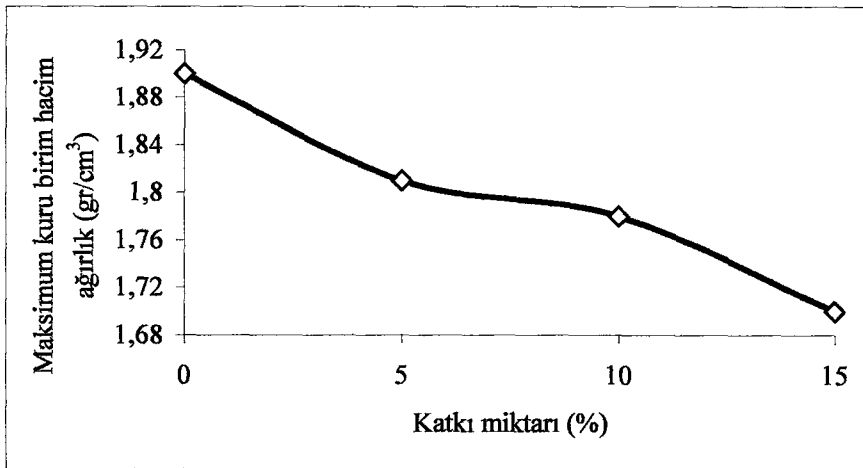
Zemin Türü	Katkı Miktarı	Kompaksiyon	
		Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık $\gamma_k$ gr/cm <sup>3</sup>	Optimum Su İçeriği W <sub>opt.</sub> %
Z1	0	1.88	14.00
	5	1.81	15.00
	10	1.79	16.20
	15	1.75	18.20
Z2	0	1.54	24.80
	5	1.50	27.20
	10	1.48	27.00
	15	1.46	27.50
Z3	0	1.90	13.90
	5	1.81	16.00
	10	1.78	16.30
	15	1.70	19.00

Z1 zemininde katkı oranına bağılı olarak kuru birim hacim ağırlık değerindeki değişim incelendiğinde; katkısız numunede kuru birim hacim ağırlık değeri  $1.88 \text{ gr/cm}^3$  iken, katkı oranının artmasına paralel olarak kuru birim ağırlık azalmaya başlamıştır. % 15 katkı oranında ise % 7 dolayında azalma ile bu değer  $1.75 \text{ gr/cm}^3$ 'e inmiştir (Şekil 94).



Şekil 94. Z1 zemin türüne ait katkı miktarı maksimum kuru birim hacim ağırlık ilişkisi

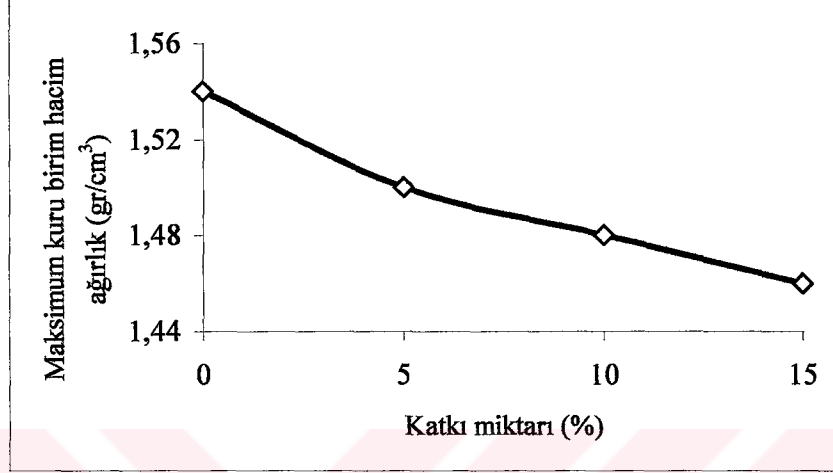
Z2 zemininde de katkı oranına bağılı olarak kuru birim hacim ağırlık değerinde azalma ortaya çıkmıştır. Katkısız numunede kuru birim hacim ağırlık değeri  $1.90 \text{ gr/cm}^3$  iken, katkı oranının artmasıyla bu değer azalmış ve % 15 katkı oranında % 11 dolayında azalarak  $1.75 \text{ gr/cm}^3$  değerine inmiştir (Şekil 95).



Şekil 95. Z2 zemin türüne ait katkı miktarı kuru birim hacim ağırlık ilişkisi



Z3 zemininde katkı oranına bağılı olarak kuru birim hacim ağırlık değerindeki değişim incelendiğinde (Şekil 96); katkısız numunede kuru birim hacim ağırlık değeri katkı oranına bağılı olarak azalmıştır. Katkısız numunelerde bu değer  $1.54 \text{ gr/cm}^3$  iken, % 15 kireç çamuru katkı oranında % 5 dolayında azalarak  $1.46 \text{ gr/cm}^3$ 'e inmiştir.

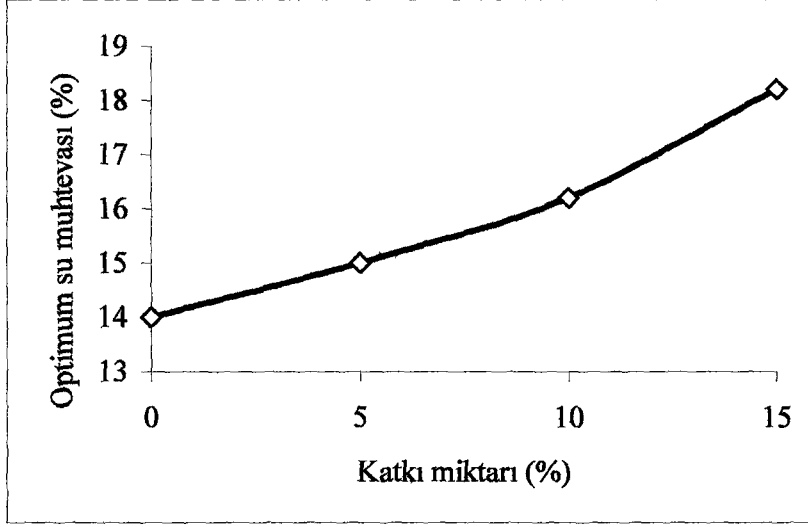


Şekil 96. Z2 zemin türüne ait katkı miktarı maksimum kuru birim hacim ağırlık ilişkisi

Kompaksiyon deneyinin amacı; zeminin sıkıştırılması ile maksimum kuru birim ağırlığın elde edildiği su muhtevasının ortaya konulmasıdır. Zeminlerin birim hacim ağırlıklarının artırılması ile genellikle kayma dirençleri artırılırken, geçirimsizlikleri (permeabiliteleri) ve oturmaları azalmaktadır (Aytekin, 2000). Yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde katkı oranının artmasıyla kuru birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülecektir. Bu durum, zeminlerin kireç çamuru katkısıyla kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığını, buna bağılı olarak kayma dirençlerinin de azalacağını ve geçirimsizlikleri ile oturmalarının artacağını göstermektedir.

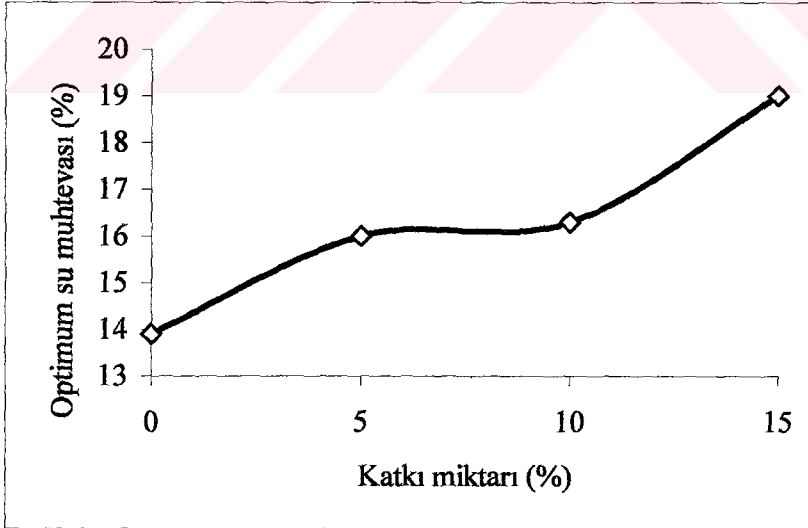
Yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda, katkı oranına bağılı olarak numunelerin optimum su tutma kapasiteleri belirlenmiştir. Her üç zemin türünde de katkı oranına bağılı olarak su tutma kapasiteleri yani optimum su seviyeleri artmıştır.

Kireç çamuru katkısının Z1 zemininin optimum su kapasitesi üzerindeki etkisi incelendiğinde, katkısız durumda % 14 olan optimum su değeri, katkı oranının artmasıyla artmış ve % 15 katkı oranında % 30 dolayında artarak % 18.2 değerine ulaşmıştır (Şekil 97).



Şekil 97. Z1 zemin türüne ait katkı miktarı optimum su muhtevası ilişkisi

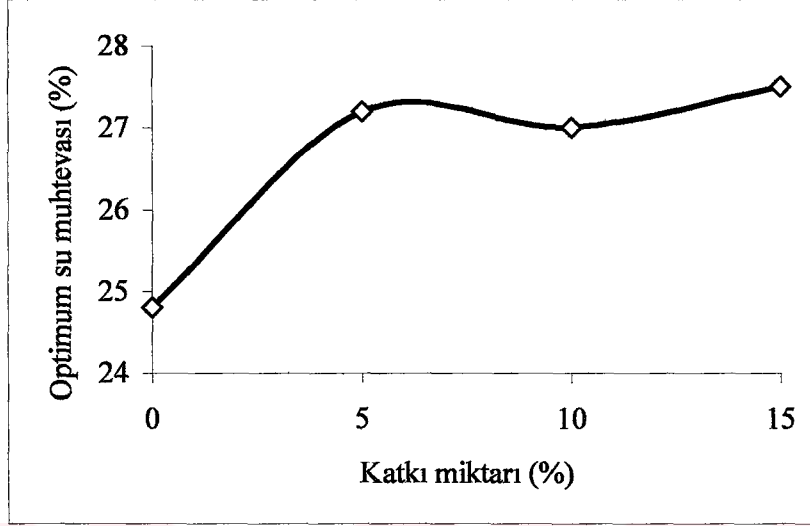
Z2 zemininde katkı oranına bağlı olarak optimum su kapasitesi değerinde bir artış ortaya çıkmıştır. Katkısız durumda % 13.9 olan optimum su değeri, katkı oranının artmasıyla artmış ve % 15 katkı oranında % 37 dolayında artarak % 19 değerine ulaşmıştır (Şekil 98).



Şekil 98. Z2 zemin türüne ait katkı miktarı optimum su muhtevası ilişkisi

Z3 zemininde de katkı oranına bağlı olarak optimum su kapasitesi değerinde artış belirlenmiştir. Katkısız durumda % 24.8 olan optimum su değeri, katkı oranının artmasıyla

artmış ve % 15 katkı oranında % 11 dolayında artarak % 27.5 değerine ulaşmıştır (Şekil 99).

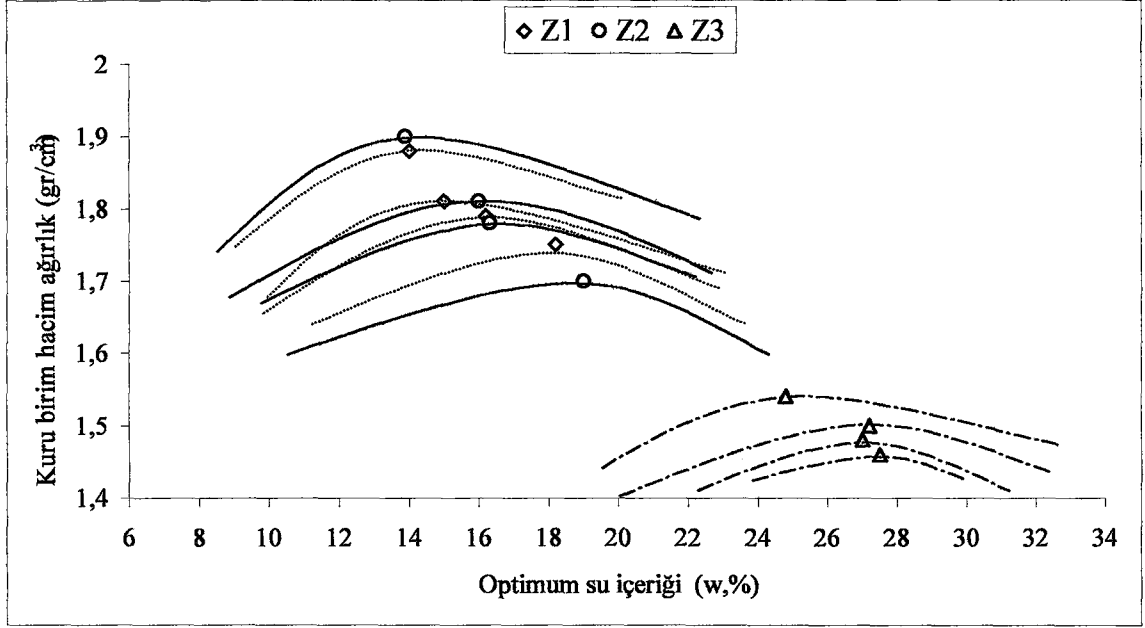


Şekil 99. Z3 zemin türüne ait katkı miktarı optimum su muhtevası ilişkisi

Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi karışımlarda kireç çamuru oranının artmasıyla beraber optimum su içeriği artmıştır. Bu durum karışımların daha fazla su içeriğinde maksimum kuru birim hacim ağırlığına ulaştığı anlamına gelmektedir.

Zeminlerin sıkışabilirliği, içindeki su miktarı ile yakından ilgili olup her zemin cinsi için optimum su muhtevasında en iyi sıkışma yani kompaksiyon sağlanabilir. Zeminlerin sıkışması, üzerlerinde yapılacak yapıların sağlam ve uzun ömürlü olması, dışarıdan gelecek yüklere karşı dayanıklılığı açısından önemlidir (Özaydın, 1989).

Bu araştırmada kullanılan zeminler üzerinde kireç çamuru katkısının artırılmasıyla zeminlerin optimum su içerikleri artmış, kuru birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Yani karışımlarda katkı oranının artmasıyla numunelerin daha fazla su içeriğiyle maksimum kuru birim hacim ağırlığına sahip olacağı ve katkı oranına bağlı olarak kuru birim hacim ağırlık değerlerinde bir azalma olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 103'de maksimum kuru birim hacim ağırlık ile optimum su muhtevası arasındaki ilişkinin katkı oranına bağlı olarak azalışı görülmektedir.



Şekil 100. Maksimum kuru birim hacim ağırlık-optimum su içeriği ilişkisi

### 3.2.6. Konsolidasyon Deneylerine Ait Bulgular ve Tartışma

Konsolidasyon deneyleri sonunda elde edilen konsolidasyon katsayıları ( $C_v$ ) ve hacimsel sıkışma katsayıları ( $M_v$ ) katkı oranlarına ve yapılan yüklemelere göre Tablo 21 ve 22'de verilmiştir.

Tablo 21. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen konsolidasyon katsayıları

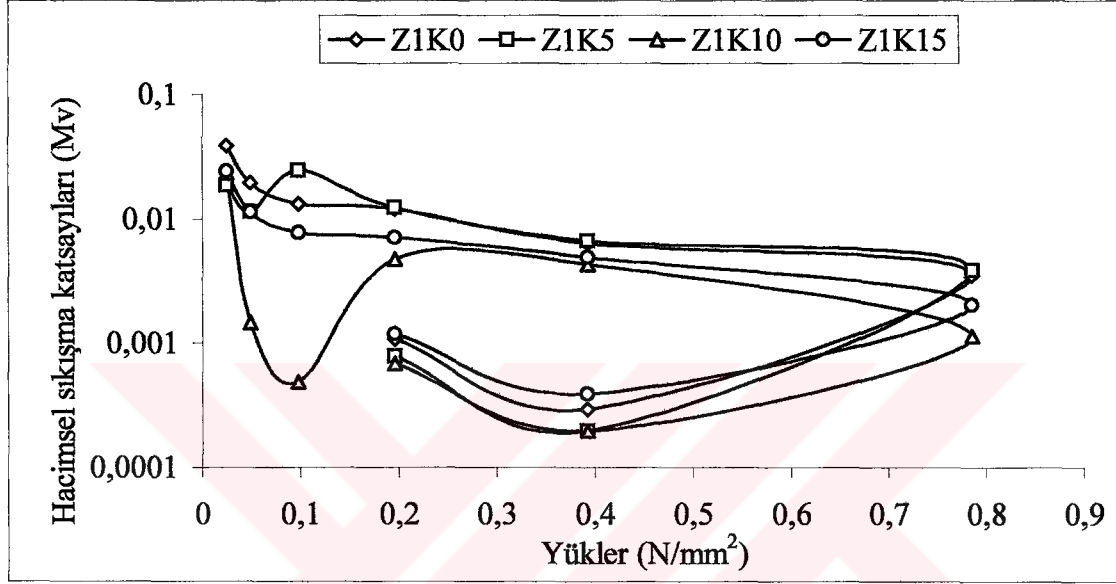
Zemin Türü	Katkı Oranı %	Yükler (N/mm <sup>2</sup> )									
		0.00-0.025	0.025-0.049	0.049-0.098	0.098-0.196	0.196-0.392	0.392-0.785	0.785-0.392	0.392-0.196		
Z1	0	2.93x10 <sup>-3</sup>	5.61x10 <sup>-4</sup>	9.70x10 <sup>-4</sup>	3.04x10 <sup>-4</sup>	9.67x10 <sup>-4</sup>	6.21x10 <sup>-4</sup>	0.00	0.00	4.98x10 <sup>-3</sup>	
	5	0.00	3.71x10 <sup>-4</sup>	6.85x10 <sup>-3</sup>	1.60x10 <sup>-3</sup>	6.88x10 <sup>-4</sup>	-	0.00	0.00	2.00x10 <sup>-3</sup>	
	10	1.06x10 <sup>-2</sup>	0.00	0.00	1.39x10 <sup>-4</sup>	1.81x10 <sup>-3</sup>	-	0.00	0.00	0.00	
	15	0.00	2.85x10 <sup>-4</sup>	8.50x10 <sup>-4</sup>	7.86x10 <sup>-4</sup>	9.76x10 <sup>-4</sup>	-	0.00	0.00	0.00	
Z2	0	6.06x10 <sup>-3</sup>	4.25x10 <sup>-4</sup>	8.84x10 <sup>-4</sup>	1.14x10 <sup>-3</sup>	1.14x10 <sup>-3</sup>	0.00	0.00	0.00	1.31x10 <sup>-3</sup>	
	5	7.32x10 <sup>-4</sup>	0.00	9.22x10 <sup>-4</sup>	2.18x10 <sup>-3</sup>	7.61x10 <sup>-4</sup>	6.15x10 <sup>-4</sup>	0.00	0.00	2.56x10 <sup>-3</sup>	
	10	0.00	0.00	5.07x10 <sup>-3</sup>	3.14x10 <sup>-4</sup>	1.64x10 <sup>-3</sup>	1.00x10 <sup>-3</sup>	4.40x10 <sup>-3</sup>	0.00	0.00	
	15	9.48x10 <sup>-4</sup>	0.00	0.00	2.18x10 <sup>-3</sup>	1.04x10 <sup>-3</sup>	1.98x10 <sup>-3</sup>	1.80x10 <sup>-3</sup>	0.00	0.00	
Z3	0	5.59x10 <sup>-3</sup>	8.50x10 <sup>-4</sup>	4.82x10 <sup>-3</sup>	4.56x10 <sup>-3</sup>	3.31x10 <sup>-3</sup>	2.77x10 <sup>-3</sup>	0.00	0.00	5.55x10 <sup>-4</sup>	
	5	1.35x10 <sup>-3</sup>	1.15x10 <sup>-3</sup>	5.33x10 <sup>-4</sup>	1.03x10 <sup>-3</sup>	1.02x10 <sup>-3</sup>	1.13x10 <sup>-3</sup>	0.00	0.00	0.00	
	10	3.77x10 <sup>-4</sup>	6.37x10 <sup>-4</sup>	1.03x10 <sup>-3</sup>	1.87x10 <sup>-3</sup>	1.25x10 <sup>-3</sup>	9.29x10 <sup>-4</sup>	0.00	0.00	0.00	
	15	3.17x10 <sup>-4</sup>	1.07x10 <sup>-3</sup>	2.49x10 <sup>-3</sup>	8.30x10 <sup>-4</sup>	6.66x10 <sup>-4</sup>	2.52x10 <sup>-3</sup>	0.00	0.00	0.00	



Tablo 22. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen hacimsel sıkışma katsayıları

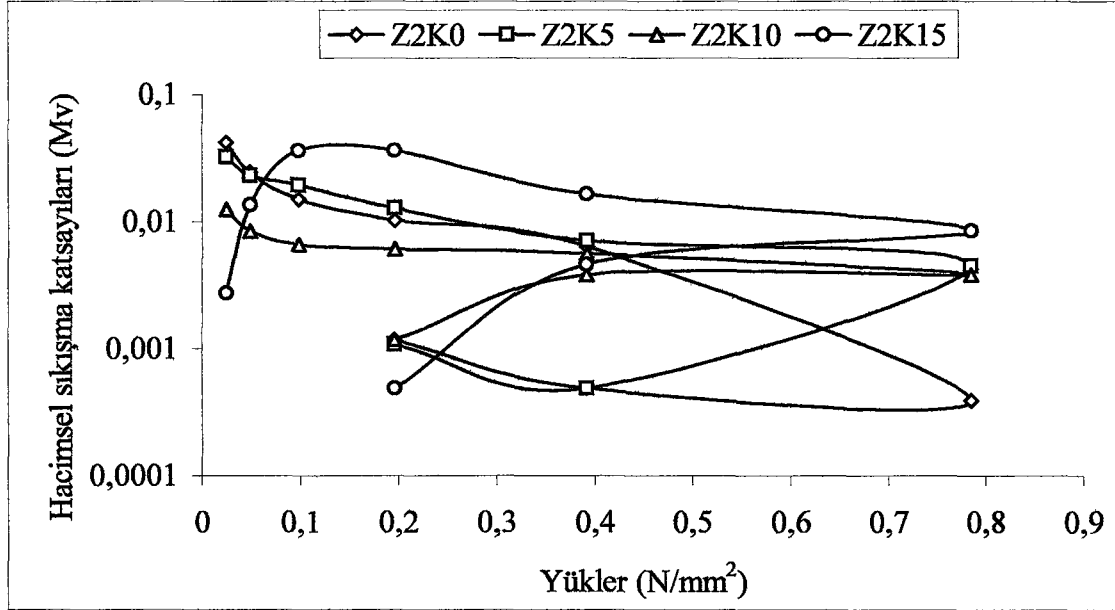
Zemin Türü	Katkı Oranı %	Yükler (N/mm <sup>2</sup> )									
		0.00-0.025	0.025-0.049	0.049-0.098	0.098-0.196	0.196-0.392	0.392-0.785	0.785-0.392	0.392-0.196		
Z1	0	3.90x10 <sup>-2</sup>	1.96x10 <sup>-2</sup>	1.32x10 <sup>-2</sup>	1.20x10 <sup>-2</sup>	6.37x10 <sup>-3</sup>	3.53x10 <sup>-3</sup>	2.94x10 <sup>-4</sup>	1.08x10 <sup>-3</sup>		
	5	1.87x10 <sup>-2</sup>	1.15x10 <sup>-2</sup>	6.85x10 <sup>-2</sup>	1.23x10 <sup>-2</sup>	6.66x10 <sup>-3</sup>	-	1.96x10 <sup>-4</sup>	7.84x10 <sup>-3</sup>		
	10	2.33x10 <sup>-2</sup>	1.47x10 <sup>-3</sup>	4.90x10 <sup>-4</sup>	4.70x10 <sup>-3</sup>	4.31x10 <sup>-3</sup>	-	1.96x10 <sup>-4</sup>	6.86x10 <sup>-3</sup>		
	15	2.43 x10 <sup>-2</sup>	1.14x10 <sup>-2</sup>	7.74x10 <sup>-3</sup>	7.06x10 <sup>-3</sup>	4.90x10 <sup>-3</sup>	-	3.92x10 <sup>-4</sup>	1.18x10 <sup>-3</sup>		
Z2	0	4.18x10 <sup>-2</sup>	2.43x10 <sup>-2</sup>	1.50x10 <sup>-2</sup>	1.02x10 <sup>-2</sup>	6.37x10 <sup>-3</sup>	3.92 x10 <sup>-4</sup>	4.90x10 <sup>-4</sup>	1.18x10 <sup>-3</sup>		
	5	3.21x10 <sup>-2</sup>	2.30x10 <sup>-2</sup>	1.93x10 <sup>-2</sup>	1.27x10 <sup>-2</sup>	7.06x10 <sup>-2</sup>	4.51x10 <sup>-3</sup>	4.90x10 <sup>-4</sup>	1.08x10 <sup>-3</sup>		
	10	1.24 x10 <sup>-2</sup>	8.43x10 <sup>-3</sup>	6.57x10 <sup>-3</sup>	6.06x10 <sup>-3</sup>	5.59x10 <sup>-3</sup>	3.82x10 <sup>-3</sup>	0.00	1.18x10 <sup>-3</sup>		
	15	2.74x10 <sup>-3</sup>	1.35x10 <sup>-2</sup>	3.61 x10 <sup>-2</sup>	0.00	1.64x10 <sup>-2</sup>	8.53x10 <sup>-3</sup>	4.61x10 <sup>-3</sup>	4.90x10 <sup>-4</sup>		
Z3	0	4.49x10 <sup>-2</sup>	2.50x10 <sup>-2</sup>	1.62x10 <sup>-2</sup>	1.21x10 <sup>-2</sup>	8.53x10 <sup>-3</sup>	5.39x10 <sup>-3</sup>	3.92x10 <sup>-4</sup>	1.67x10 <sup>-3</sup>		
	5	2.08x10 <sup>-2</sup>	2.23x10 <sup>-2</sup>	2.01x10 <sup>-2</sup>	2.03x10 <sup>-2</sup>	1.21x10 <sup>-2</sup>	6.86x10 <sup>-3</sup>	7.84x10 <sup>-4</sup>	1.76x10 <sup>-3</sup>		
	10	1.44x10 <sup>-2</sup>	1.86x10 <sup>-2</sup>	1.43x10 <sup>-2</sup>	1.18x10 <sup>-2</sup>	8.04x10 <sup>-3</sup>	3.39x10 <sup>-3</sup>	5.88x10 <sup>-4</sup>	1.47x10 <sup>-3</sup>		
	15	3.82x10 <sup>-3</sup>	7.15x10 <sup>-3</sup>	7.74x10 <sup>-3</sup>	6.47x10 <sup>-3</sup>	4.70x10 <sup>-3</sup>	4.50x10 <sup>-3</sup>	5.88x10 <sup>-4</sup>	1.08x10 <sup>-3</sup>		

Tablo 20 ve 21'deki değerlerden yararlanarak hacimsel sıkışma katsayısı ve konsolidasyon katsayısı ile basınç değerleri arasındaki ilişki katkı oranına göre aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sırasında yükler  $0.025 \text{ N/mm}^2$ 'den başlayarak sırasıyla  $0.049$ ,  $0.098$ ,  $0.196$ ,  $0.392$  ve  $0.785 \text{ N/mm}^2$ 'ye kadar çıkmış ve sonra tekrar  $0.392 \text{ N/mm}^2$ 'ye ve  $0.196 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşürülmüştür.



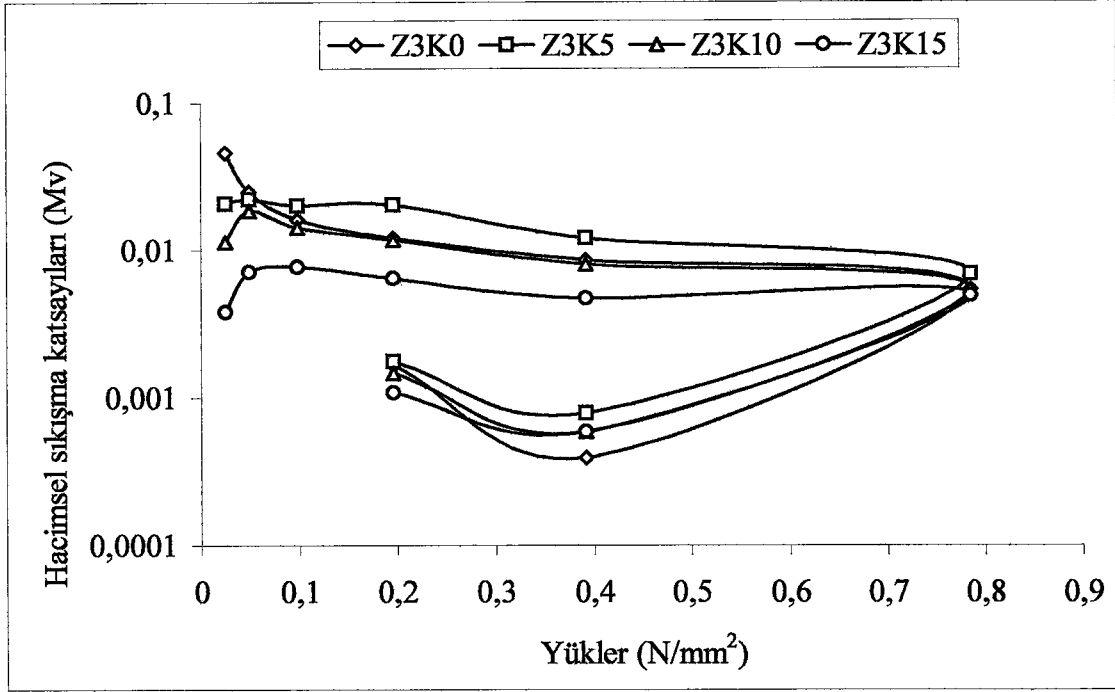
Şekil 101. Z1 zemininin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma özelliğindeki değişim

Şekil 101'de Z1 zeminin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma katsayılarındaki değişim görülmektedir. Genel olarak  $0.785 \text{ N/mm}^2$  yüklemeye kadar sıkışma katsayısı giderek azalmakta, bu azalma yükün tekrar  $0.392 \text{ N/mm}^2$ 'ye indirilmesiyle devam etmekte ancak yükün  $0.196 \text{ N/mm}^2$ 'ye indirilmesiyle tekrar artışa geçmektedir. Katkı oranının Z1 zeminini için sıkışma katsayısında etkisi incelendiğinde, % 5 kireç çamuru katkılı örneklerin hacimsel sıkışma katsayıları katkısız örneklere göre daha büyüktür. Ancak % 10 ve % 15 katkı oranlarında ise hacimsel sıkışma katsayılarının katkısız örneklere göre daha düşük değerler aldığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 102. Z2 zemininin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma özelliğindeki değişim

Şekil 102'de Z2 zeminin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma katsayılarındaki değişim görülmektedir. Bu zemin türünde yüklerin arttırılması ve tekrar azaltılmasıyla elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarının değişimi Z1 zemininde olduğu gibi % 5 kireç çamuru katkılı örneklerde hacimsel sıkışma katsayıları katkısız örneklere göre daha büyüktür. Ancak % 10 ve % 15 katkı oranlarında ise hacimsel sıkışma katsayılarının katkısız örneklere göre daha düşük değerler aldığı ortaya çıkmıştır. Yüklemenin artmasıyla hacimsel sıkışma katsayılarında genel olarak bir azalma, yüklerin azaltılmasıyla bazı katkı oranlarında önce azalma olurken, bazılarında da sadece artış gözlenmiştir. % 5 ve 10 kireç çamuru katkılı örneklerin hacimsel sıkışma katsayıları yüklerin 0,785 N/mm<sup>2</sup> değerine kadar, azalmış, yüklerin 0,785 N/mm<sup>2</sup>'den 0,196 N/mm<sup>2</sup>'ye kadar düşürülmesiyle değişmemiştir. % 15 katkılı örneklerde hacimsel sıkışma katsayı değerleri katkısız örneklere göre daha yüksektir.



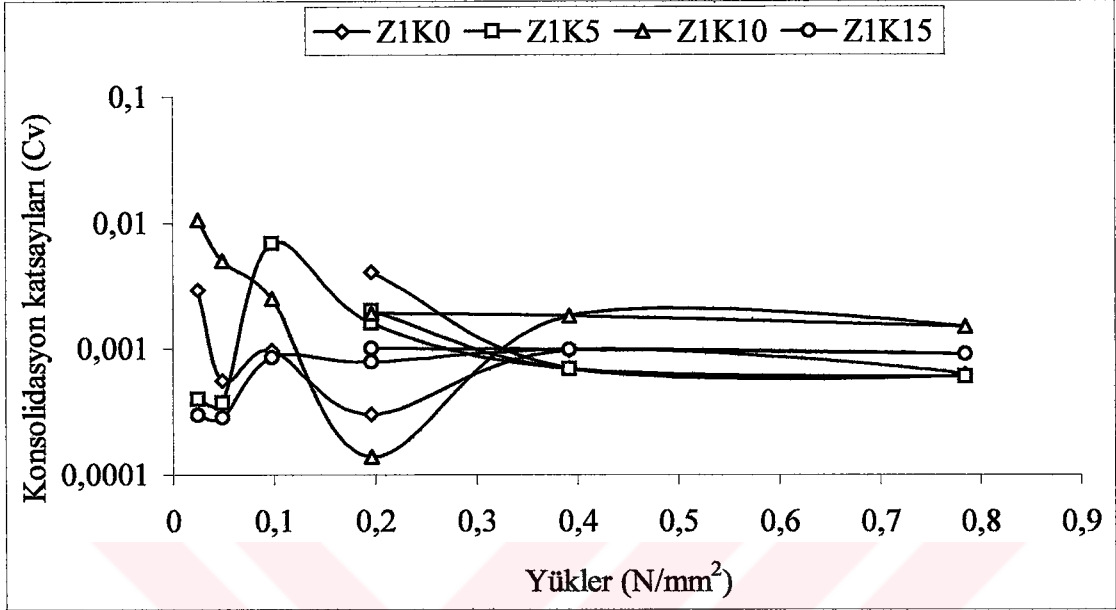
Şekil 103. Z3 zemininin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma özelliğindeki değişim

Şekil 103'de Z3 zeminin yük kademelerine göre hacimsel sıkışma katsayılarındaki değişim görülmektedir. Genel olarak  $0.785 \text{ N/mm}^2$  yüklemeye kadar sıkışma katsayısı giderek azalmakta, bu azalma yükün tekrar  $0.392 \text{ N/mm}^2$ 'ye indirilmesiyle devam etmekte ve yükün  $0.196 \text{ N/mm}^2$ 'ye indirilmesiyle tekrar artışa geçmektedir. Katkı oranının Z3 zemini için sıkışma katsayısında etkisi incelendiğinde Z1 ve Z2 zeminlerinde olduğu gibi % 5 kireç çamuru katkılı örneklerde hacimsel sıkışma katsayıları katkısız örneklere göre daha büyüktür. Ancak % 10 ve % 15 katkı oranlarında ise hacimsel sıkışma katsayılarının katkısız örneklere göre daha düşük değerler aldığı ortaya çıkmıştır.

Ödometre deney sonuçlarından zeminin basınç altında sıkışma ve hacim değiştirme özelliğini tanımlayan zeminin hacimsel sıkışma katsayısı (Mv) elde edilir. Bu katsayıdaki artış zeminlerin daha iyi sıkışabildiği anlamına gelmektedir (Özaydın, 1989). Bu çalışma ödometre deneylerinden elde edilen bulgulara göre Z1 ve Z3 zeminleri için kireç çamurunun % 5 katıldığı numunelerin hacimsel sıkışma katsayıları katkısız örneklerden büyük ve Z2 zemini için % 10 ve % 15 kireç çamuru katkılı örneklerin hacimsel sıkışma katsayıları katkısız örneklerden büyük olduğu tespit edilmiştir.

Konsolidasyon deney sonuçlarından yararlanılarak belirlenen bir diğer katsayı da konsolidasyon katsayısıdır. Konsolidasyon katsayısı her yük kademesi için ayrı ayrı

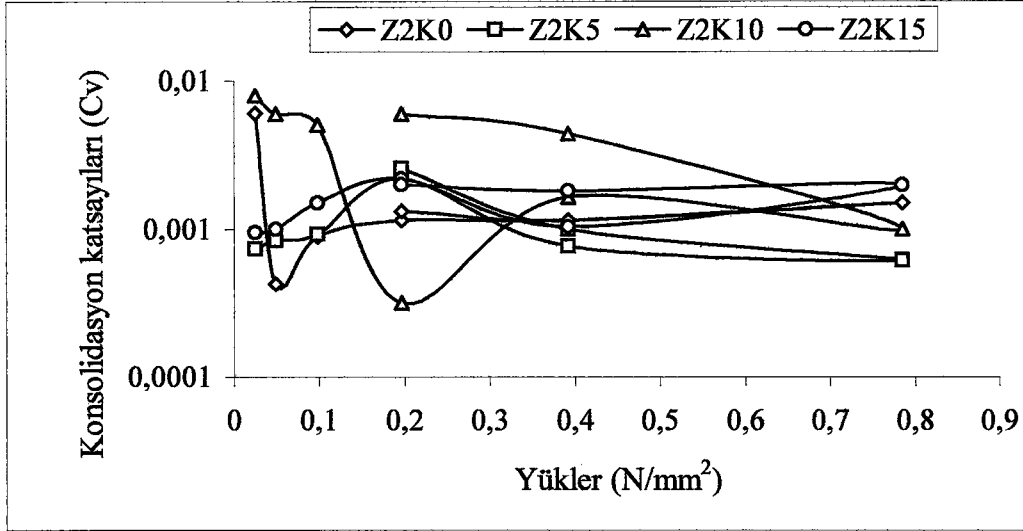
bulunmuştur. Bulunan bu katsayıların her üç zemin türü içinde yük kademelerine göre değişimleri aşağıdaki Şekil 104, 105 ve 106'da verilmiştir.



Şekil 104. Z1 zemininin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarının değişimi

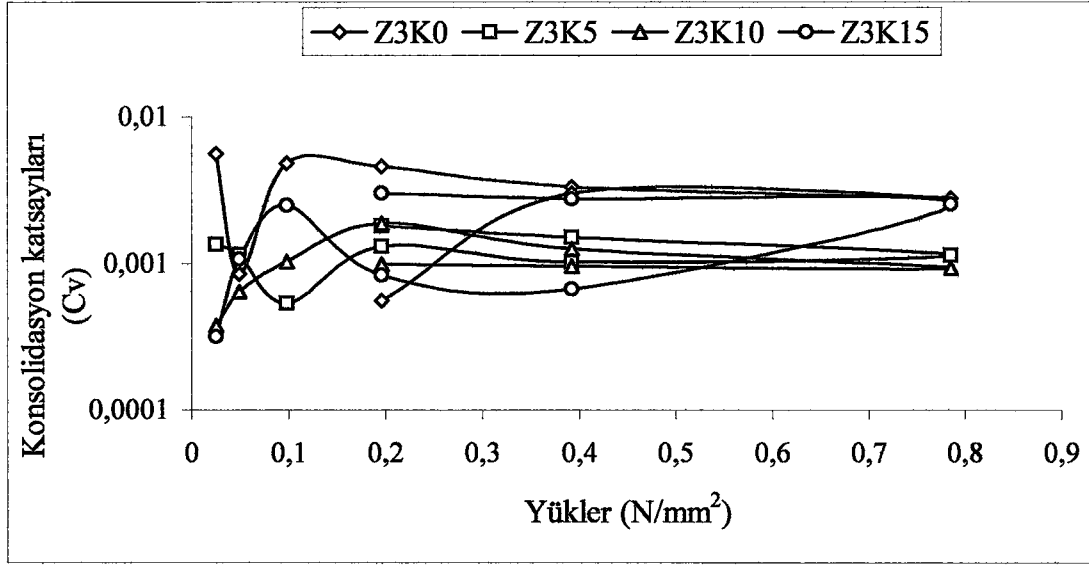
Şekil 104'de Z1 zeminin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarındaki değişim görülmektedir. Genel olarak  $0,785 \text{ N/mm}^2$  yükleme kadar konsolidasyon katsayısı giderek azalmış, bu azalma yükün tekrar  $0,392 \text{ N/mm}^2$ 'ye ve  $0,196 \text{ N/mm}^2$ 'ye indirilmesiyle tekrar artmıştır. Katkı oranının Z1 zemini için konsolidasyon katsayısına etkisine bakıldığında, % 5 kireç çamuru katkılı örneklerin konsolidasyon katsayıları katkısız örneklere göre daha büyük değerler almıştır. Ancak diğer katkı oranlarında ise konsolidasyon katsayıları katkısız örneklere göre daha düşük değerler almıştır.





Şekil 105. Z2 zemininin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarının değişimi

Şekil 105’de Z2 zeminin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarındaki değişim görülmektedir. Genel olarak  $0,785 \text{ N/mm}^2$  yüklemeye kadar konsolidasyon katsayısı giderek azalmış, bu azalma yükün tekrar  $0,392 \text{ N/mm}^2$ ’ye ve  $0,196 \text{ N/mm}^2$ ’ye indirilmesiyle tekrar artmıştır. Katkı oranının Z2 zemini için konsolidasyon katsayısına etkisine bakıldığında % 5 ve 10 kireç çamuru katkılı örneklerin konsolidasyon katsayıları katkısız örneklere göre daha büyüktür. Ancak % 15 katkı oranında ise konsolidasyon katsayıları katkısız örneklere göre daha düşüktür.



Şekil 106. Z3 zemininin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarının değişimi

Şekil 106'da Z3 zeminin yük kademelerine göre konsolidasyon katsayılarındaki değişim görülmektedir. Genel olarak 0.785 N/mm<sup>2</sup> yüklemeye kadar konsolidasyon katsayısı giderek azalmış, bu azalma yükün tekrar 0.392 N/mm<sup>2</sup>'ye ve 0.196 N/mm<sup>2</sup>'ye indirilmesiyle tekrar artmıştır. Bu durum katkısız örneklerde sürekli azalma şeklinde olup diğer örneklerden farklıdır. Katkı oranının Z3 zemini için konsolidasyon katsayısına etkisine bakıldığında, katkısız örneklerin konsolidasyon katsayıları 0.785 N/mm<sup>2</sup> yüklemeye kadar en yüksek değerlere sahipken yüklemenin azaltılmaya başladığı noktadan sonra bütün oranlardaki katkılı örneklerden düşük değerler göstermektedir.

Genellikle bir zeminde meydana gelecek olan toplam konsolidasyon oturması kadar konsolidasyon oranının da bilinmesi önemli olmaktadır. Bu iki değer ve zemine ait geçirimsizlik (permeabilite) laboratuvarında yapılan konsolidasyon deneyleri ile belirlenir. Konsolidasyon deneyleri işlemlerinde belirlenecek olan en önemli zemin özelliklerinden biri de konsolidasyon katsayısıdır. Konsolidasyon katsayısı zemin tabakasına uygulanan efektif gerilmelerin ve zeminin geçirimsizliğinin bir fonksiyonudur. Bu katsayıdaki artış oturmaların ve geçirimsizliğin azalması anlamına gelmektedir (Aytekin, 2000). Bu açıdan bakıldığında Z1 zemini için % 5, Z2 zemini için % 5 ve % 10 kireç çamuru katkılı örneklerin konsolidasyon katsayıları katkısız örneklerden büyük olduğu Z3 zemininde ise yüklemenin arttırıldığı bölgede katkısız örneklerin konsolidasyon katsayılarının katkılı örneklerden büyük yüklemenin azaltıldığı bölgede ise küçük olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan konsolidasyon deneylerinden elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde; katkı oranlarının artışına bağlı olarak zeminlerin sıkışabilirlik ve geçirimsizlik özellikleri değişmektedir. Bu değişim hem katkı oranlarına bağlı olarak meydana gelmekte hem de zeminin cinsine bağlı olmaktadır.

### 3.3. Bulgularının Orman Yolları Açısından Değerlendirilmesi

Ülkemizde orman yolları genellikle taşıma kapasitesi düşük toprak yol niteliğindedir. Bu yolların temel zeminleri veya üst yapı elemanlarına yönelik iyileştirilme çalışmaları yapılmamaktadır. Bu durum araçların geçişi açısından problemler oluşturmaktadır. Buna karşın gelişmiş ülkelerde orman yollarının hem altyapısında hem de üstyapısında stabilizasyona yönelik başarılı çalışmalar vardır.

Orman yollarının iyileştirilmesi açısından zeminlerin stabilize edilmesi çalışmalarında çok değişik malzeme ve yöntemler kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar ışığında endüstri atıklarının bu amaçlar için kullanılabilirdiği göz önüne alındığında, bu çalışmada kullanılan kağıt fabrikası atığı olan kireç çamuru bu malzemelere bir örnek teşkil etmektedir.

Çalışma iki ana bölümden oluşturularak, orman yolları üstyapısının kaplama tabakasına yönelik ve altyapıda taban zeminlerin stabilizasyonuna yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Bilindiği gibi orman yolları üstyapı tekniği açısından beton, asfalt ve bitüm vb. kaplamalı olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmada beton kaplamalı yollara yönelik, beton yapımında kullanılan çimentoya katkı malzemesi araştırması yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kireç çamuru, % 5 ile % 10 arasındaki katkılarıyla oluşturulacak çimento kullanılarak beton kaplamalarda standartların öngördüğü sınırlar içerisinde basınç dayanımı sağlanabilir.

Orman yollarının üzerinde inşa edildiği zeminler çok çeşitli sınıfta ve özelliklere sahip olabilmektedir. Bu zeminler üzerinde inşa edilen orman yolları genellikle taşıma kapasitesi düşük ve kolayca deformasyona uğrayabilen nitelikte olmaktadır. Bu zeminler üzerinden orman yollarının geçişinde bir çok problem ortaya çıkacağından, zeminleri yerinde iyileştirmek veya stabilize etmek önemlidir.

Bu yönüyle bakıldığında çalışmada kullanılan kireç çamuru; kumlu kil, killi balçık ve ağır kil zeminlerinin bazı mühendislik özelliklerini iyileştirmiştir. Doğada bu türdeki

zeminler sıkça rastlandığı için bu zeminlerin stabilizasyonunda kireç çamuru kullanılabilir. Bu zeminlerden farklı özellik gösteren zeminler için de denemeler yapılarak kireç çamurunun kullanılabilirliği ortaya konulabilir.

Afyon-Çay Seka İşletmesi'nden çıkan kireç çamuru atığı hiçbir yerde değerlendirilmeyip doğaya terk edilmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için işletme nakliye şirketlerine kamyonlarla taşıtarak ve onlara ücret ödeyerek kireç çamurunu belirli derinliklerde yapılan kazılarla toprak altında depolamaktadır. Derin kazı yapılmasının nedeni kireç çamurunun doğaya olan zararlı etkisidir. Yapılan bu çalışma ışığında kireç çamurunun doğaya olan zararının önüne geçilebilecek, ve hiçbir yerde kullanılmayan kireç çamuru değerlendirilecek, hem orman yollarında bir probleme alternatif çözüm olacak hem de ekonomiye katkıda bulunulacaktır.



#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, orman yollarının üstyapı elamanlarından kaplama tabakasında ve altyapıda taban zemininde Afyon Seka-Çay kağıt fabrikası atık kireç çamurunun stabilizasyon amaçlı kullanım imkanları araştırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle, kaplama tabakasında kullanılması düşünülen kireç çamuru atığı katkılı çimentoya ilave edilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen prizmaların basınç dayanımının nasıl etkilendiğini ortaya koyabilmek için çimento deneyleri yapılmıştır. İkinci olarak taban zeminlerde kireç çamurunun etkilerini araştırmak için; kumlu kil, balçıklı kil ve ağır killi zeminlerin mühendislik özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Yapılan deney ve analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

##### 1. Kireç çamurunun katkılı çimentoya ilave edilmesi sonucu elde edilen sonuçlar;

- Kireç çamuru katkısının artmasıyla basınç dayanımı azalmış, kür süresi uzadıkça basınç dayanımı artmıştır.
- % 5 kireç çamuru katılmış örneklerde 28. günde basınç dayanımı  $33.6 \text{ N/mm}^2$  değerini alırken, % 10 katkı oranı için bu değer  $29.0 \text{ N/mm}^2$  olarak bulunmuştur. Bu değer kireç çamuru katılmamış katkılı çimento için  $41.3 \text{ N/mm}^2$  olarak ölçülmüştür. Bu bulgulara göre % 5 ile 10 arasında kireç çamurunun standartların getirmiş olduğu basınç dayanımının altına düşmemek kaydıyla çimentoya katkı malzemesi olarak katılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Kireç çamurunun, katkılı çimentoya % 15 ve daha fazla oranlarda katıldığı numunelerde, kür süresi uzadıkça basınç dayanımı artmıştır. Ancak bu oranlar için elde edilen basınç dayanımları, % 5 ve % 10 kireç çamuru katkılı numunelerden daha düşük olduğundan, % 15 ve daha yukarı oranlarda kireç çamuru katkısı dayanım açısından uygun sonuçlar vermemiştir.
- Puzolanik aktivite, 28. günde % 5 katkı için % 80'i, % 10 katkı için % 70'i ve % 15 katkı için de % 60'ı aştığı tespit edilmiştir. Katkı oranı % 15' den daha fazla olduğu değerlerde ise puzolanik aktivite % 60'ların altına düşmektedir.



- Puzolanik aktivite değerlerine 7. günde, % 5 katkı için % 60'dan, %10 katkı için % 55'den, %15 katkı için ise % 50'den büyük olduğu bundan sonraki kür sürelerinde ise % 50 değerinden aşağıda kaldığı belirlenmiştir.
- Kireç çamuru katkısı artırıldığında numunelerdeki özgül yüzey değerleri genel olarak azalmıştır..
- Kireç çamuru taneleri ile katkılı çimento taneleri boyut olarak farklılık gösterdiğinden hidrasyona girmesi ve dolayısıyla da priz sürelerinin değişmesine neden olmuştur.
- Örneklerdeki kireç çamuru içeriği arttıkça özgül ağırlık değerleri düştüğü tespit edilmiştir.
- Örneklerdeki kireç çamuru katkısının artmasıyla hacim genişlemesi azalmıştır. Bütün katkı oranlarında tespit edilen hacim genişmesi değerleri standartların öngördüğü en fazla 10 mm değerinden düşük olduğu belirlenmiştir.
- Örneklerdeki kireç çamuru içeriği arttıkça normal kıvam suyu oranı artmaktadır.
- Taramalı elektron mikroskopta numunelere çekilen fotoğraflardan da kireç çamuru katkısının artmasıyla basınç dayanımında azalma olduğu bulgusu desteklenmiş, kireç çamuru oranının fazla olduğu fotoğraflarda boşluk oranının arttığı, az olduğu fotoğraflarda ise iyi bir yapışma özelliği görülmüştür.
- Çimento üretimde alternatif katkı olarak endüstriyel atıkların kullanımı yaygındır. Bu çalışma sonucunda kağıt fabrikası atığı olan kireç çamurunun % 5 ile 10 oranında çimentoya katılabileceği böylece daha ucuz çimento ve buna bağlı olarak beton elde edilebileceği, ayrıca çevreye zararlı etkisi olan kireç çamurunun depolandığı yerlerdeki olumsuz etkilerinin azalmasının sağlanacağı düşünülebilir.

## 2. Kireç çamurunun zeminlere katılmasıyla yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar;

- Zeminlerin Atterberg limitleri üzerindeki değişime bakıldığında; kireç çamuru katkı oranının artmasıyla Z1, Z2 ve Z3 zeminlerine ait likit limit ve plastik limit değerlerinde artış olduğu ve buna bağlı olarak Z1 ve Z3 zemin türlerinin plastisite indisi değerleri de artış göstermiştir.

- Z1 zemininin katkısız örneklerinde plasitite indisi 12.70 iken, % 15 katkı oranında bu değer % 67 oranında artarak 21.2 değerine yükselmiştir. Z2 zemininde plasitite indisi % 25.2'den % 15 kireç çamuru katkısı ile % 23.1 değerine düşmüştür. Z3 zemininde ise katkısız örneklerde plasitite indisi 14.70 bulunmuş bu oran % 15 kireç çamuru katkılı örneklerde % 29 oranında artarak % 21,2 değerine yükselmiştir.
- Zeminlerin katkı oranına bağlı olarak kohezyon değerleri, Z1 zemininde azalmakta, Z2 zemininde artmakta ve Z3 zemininde ise % 10 kireç çamuru katkısına kadar artmakta daha sonra azalmaktadır.
- Zeminlerin katkı oranına bağlı olarak kayma direnci açıları, Z1 zemininde artmakta, Z2 zemininde % 5 ve % 10 kireç çamuru katkısında sabit kalmakta, % 15 katkı oranında ise artmaktadır. Z3 zemininde % 5 kireç çamuru katkısında azalmakta, % 5 ile % 10 katkı oranı arasında artmakta ve daha sonra azalmaktadır.
- Her üç zemin için de katkı oranının artmasıyla kesme direnci katsayısının ( $\Phi$ ) arttığı, yani kireç çamuru katkısının zeminlerin kesme direnci özelliği üzerinde olumlu etki yaptığı görülmektedir. Kohezyon katsayısı (C) değerinin değişimde ise literatürle benzer olarak bazı durumlarda farklı değerler aldığı, fakat genel olarak bu katsayıda da katkıya bağlı olarak bir iyileşme söz konusu olduğu görülmektedir.
- Kireç çamurunun % 15'e kadar ilave edilmesiyle, zeminlerin şişme potansiyelleri azalmaktadır. Fiziki olarak hazırlamada şişme ile ilgili olarak tane dağılımı orijinal numuneden uzaklaştıkça, yani çapın küçülmesi durumunda kimyasal reaksiyonların kil partikülleri tarafından arttığı ve dolayısıyla puzolanik (kendi kendine sertleşme) aktivitenin arttığı diğer bir şekilde çamurun formasyonunun çimentolaşmaya doğru gittiğini göstermektedir.
- Literatür bazında yapılan araştırmaya göre bu çalışmada kullanılan kireç çamurun yüksek kalsiyum ihtiva eden çamur olduğu ortaya çıkmaktadır. Kullanılan zeminler Doğu Karadeniz Bölgesinde en yaygın olarak bulunan killer olduğu düşünüldüğünde, bunların iyileştirilmesi ve stabilize edilmesi gerekir. Kağıt endüstrisi atığı olan kireç çamuru ekonomik bir stabilize maddesi olarak kullanılabilir. Örneğin, temellerde inşaatlar için, kara yollarında, su

kanalları yapımında, reserve yapılarında, sulama sistemlerinde, su yollarında, atık su kanallarında, çevreye zarar vermeyen, çevreci bir malzeme olarak kullanılabilir.

- Kireç çamuru ilavesiyle Z1, Z2 ve Z3 zemin örneklerinde özgül ağırlık değerleri azalmıştır.
- Kompaksiyon deneyleri sonucunda, kireç çamuru katkı oranının artmasıyla her üç zemin türünde de kuru birim hacim ağırlık değeri azalmış, optimum su içerikleri artmıştır. Karışımlarda yüksek kuru birim hacim ağırlığı elde etmek için daha fazla su içeriği gerekmiştir. Katkı oranının artmasıyla kuru birim hacim ağırlık değerlerinde meydana gelen azalma, kireç katkısının ilave edilmesiyle zeminlerin sıkışabilirlik özelliklerinde de azalmaya neden olacağı anlamına gelmektedir.
- Yapılan konsolidasyon deneylerinden elde edilen verilere göre katkı oranlarına bağlı olarak zeminlerin sıkışabilirlik ve geçirimsizlik özellikleri değişmektedir. Bu durumun, katkı oranlarına ve zemin cinsine bağlı olarak değişim gösterdiği ortaya çıkmıştır. Deney sonuçlarına göre % 5 ile % 10 kireç çamuru katkılan zeminlerde sıkışabilirlik özelliğinin iyileştiği ve permeabilite değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.
- Çevresel etkilere ve aşırı yüklenmelere bağlı olarak orman yolları sürekli deformasyona uğramaktadır. Bu sebeple orman yollarının iyileştirilmesi ve taşıma kapasitesinin artırılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada kullanılan kireç çamuru orman yollarının üstyapıda kaplama tabakasında ve altyapıda taban zeminlerde belirli oranlarda kullanılabilme özelliğine sahiptir.

## 5. ÖNERİLER

Çalışma kapsamında elde edilen bilgiler ışığında aşağıdaki öneriler yapılabilir.

- Orman yollarının üstyapı tesisinde kaplama tabakasında oluşturulacak betonda kullanılacak çimentoya % 5 ile 10 oranında kağıt fabrikası atığı olan ve doğaya terk edilen kireç çamuru kullanılması dayanım açısından standartları aşmamak üzere uygun olabilir.
- Yine orman yollarının altyapısına yönelik taban zeminler için stabilizasyon amaçlı olarak çalışmada kullanılan ağır kil, kumlu balçık ve killi balçık toprak türüne sahip zeminlerde kireç çamurunun belirli oranlarda kullanılması yararlı olabilir.
- Kireç çamuru ile çimento karışımları üzerinde yapılan basınç dayanım deneyleri sonucunda, kireç çamurunun yakıldıktan sonra oluşacak kül ile katkılı çimentonun karıştırılarak yapılması yakılmadan kullanılan kireç çamuruna oranla daha iyi dayanım sağlayabilecektir. Zira CaO oranının artmasıyla basınç dayanımının muhtemel artışı gözlemek açısından bu uygulama gereklidir.
- Basınç dayanım deneyleri için hazırlanıp belirli kür sürelerinde kırılan prizmalardaki puzolanik etkileşimi görebilmek için taramalı elektron mikroskopunda çekilen fotoğraflar, puzolanik aktivitenin zamana ve katkı oranına bağlı olarak daha iyi görülebilmesi için kırıldıktan kısa bir zaman sonra fotoğraflarının çekilmesi gereklidir. Bu çalışmada, çekilen fotoğraflar zamana bağlı değişimden ziyade, katkı oranına göre gelişen değişimi ortaya koymuştur.
- Çalışmada kullanılan zemin türlerinden farklı özellik gösteren zeminlerde, deneyler yapıldıktan sonra stabilizasyon amaçlı olarak kireç çamurunun katılıp katılamayacağına karar verilmelidir.
- Orman yollarının hem üstyapı hem de altyapısı için, stabilizasyon amaçlı malzeme kullanımı araştırılmalıdır. Bu amaç için kullanılacak malzemelerden yeterli miktarda temin edilebilecek endüstriyel atıklara öncelik verilmesinin sosyal, ekonomik ve ekolojik açıdan çok büyük önem arz ettiği unutulmamalıdır.
- Çalışmada kullanılan kireç çamurunun üstyapı elemanlarından temel ve alttemel tabakalarının stabilizasyonunda kullanılması dayanım açısından değişimi gözlemek için bundan sonraki çalışmalarda uygun olabilir.

- Bu çalışmada zemin stabilizasyonuna yönelik çalışmalarda hazırlanan numuneler kürlenmeden deneylere tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler belirli zamanlarda kürlenerek deneylere tabi tutulursa değişimler daha belirgin olarak ortaya çıkabileceğinden bundan sonraki çalışmalarda bu konuya ağırlık verilmesi yerinde olacaktır.
- Bu çalışmada yapılan dayanım ve diğer deneyler arazide yollar üzerinde kamyonların etkisiyle oluşabilecek yükleri simule etmesi yanında, zeminler üzerinde meydana gelen çevresel gerilimleri de hesaba katmaktadır. Buna rağmen, bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığı altında kireç çamuru, orman yollarında doğal şartlar ve yükler altında denenerek gözlenmesi bundan sonraki çalışmalarda düşünölmelidir.





## 6. KAYNAKLAR

- Acar, H. H. ve Eker, M., 2001. Orman Yolu Stabilizasyon Metotlarında Yeni Gelişmeler ve Ülkemizdeki Durum, I. Ulusal Ormancılık Kongresi Bildiriler Kitabı, 19-20 Mart, Ankara.
- Acar, H. H., 1993. Maçka Orman İşletme Müdürlüğünde 1990 Yılı Sel Felaketi Sonrası Orman Yollarında Oluşan Zararlar ve Bunun Orman Transportu Üzerine Olan Etkileri, Ekoloji Çevre Dergisi, 6-7, 14-17.
- Acar, H.H., Eroğlu, H. ve Gümüş, S., 2001. Orman Yollarının Plan ve Projelendirilmesi Çalışmalarındaki Yeni Gelişmeler, I. Ulusal Ormancılık Kongresi, Bildiriler Kitabı, 618-627, 19-20 Mart, Ankara.
- Akıncı, Ö., T, 1999. Cevher Mikrobiyolojisi ve Mineral Tanımlamaları, SDÜ Yayını, No: 4, Isparta.
- Aksoy, A. 2001, Asfalt Kaplamalarda Kireçtaşı Petrografisi-Soyulma İlişkisi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aksoy, A., 2002. Avrupa Ülkelerinde Asfalt Kaplama Uygulamalarına Genel Bir Bakış, Yalıtım Dergisi, Yıl:6, Sayı:36, 43-47.
- Apaydın, G., 2002. 69<Z<92 Bölgesindeki Bazı Elementlerin M Kabuğuna Ait Tesir Kesitlerinin Ortalama Floresans Verimlerinin ve Diferansiyel Tesir Kesitlerinin Ölçümü, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon
- Arp, P.A., 1999. Soils for Plant Growth Field and Laboratory Manual, Faculty of Forestry and Environmental Management, University of New Brunswick.
- Aruntaş, H.Y. ve Tokyay, M., 1997. Central Anatolian Diatomites for Producing Puzzolanic Cement, Proceeding of I. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 193-197, 6-9 November, İstanbul.
- Aslan, A., 1998. Termik Santral ve Biyokütle Atıkları ile Tras Katkılarının Çimentonun Mekanik Dayanım ve Hidratasyon Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aslaner, M., 1995. Mineroloji I (Kristalografi), KTÜ Basımevi, Yayın No: 53, Trabzon.
- Atchinson, J. E., 1987. Data on Nonwood Plants Fibers, The Secondary Fibers and Nonwood Pulping, Edited by Hamilton, F., Third Edition, Tappi Press, Atlanta.
- Aykut, T., 1978. Kastamonu Mıntıkası Orman Yollarında Üstyapı Tekniği Üzerine Araştırmalar, İÜ Orman Fakültesi Yayını, No:238, 119, İstanbul.

- Aykut, T., Şentürk, N. ve Demir, M., 1998. Cumhuriyetimizin 75.Yılında Orman Yollarının Durumu, Cumhuriyetimizin 75.Yılında Ormancılığımız Sempozyumu, 21-23 Ekim, 425-434, İstanbul.
- Aytekin, M., 2000. Deneysel Zemin Mekaniği, Akademi Yayınevi, Trabzon.
- Aytekin, M. ve Nas, E., 1998. Soil Stabilization With Lime and Cement, Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers, Volume 9, 471-477 Issue DEC.
- Balcı A.N., 1984. Toprak Koruması Ders Notları, İÜ Orman Fakültesi, İstanbul.
- Balta, İ., 1984. Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Bayoğlu S., 1997. Orman Transport Tesisleri ve Taşıtları (Orman Yolları), Yayın no: 3969-434, ISBN. 975-404-430-9, İstanbul.
- Bayoğlu, S. (a), 1968., Yol İnşaatı Yönünden Toprakların Sınıflandırılması, İÜ Orman Fakültesi Dergisi, Seri: B, Cilt: 18, Sayı:2, 12.
- Bayoğlu, S. (b), 1968. Yol İnşaatında Zemin Etütleri, İÜ Orman Fakültesi Dergisi, Seri: B, Cilt: 18, Sayı:1, 20.
- Bayoğlu, A. S., 1997. Evaluation of the Reactivity of the Pozzolanas, Proceeding of I. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 45-58, 6-9 November, İstanbul.
- Bayoğlu, S., Seçkin, Ö. ve Şentürk N., 1995. Orman Yollarının Bilgisayar Ortamında Projelendirilmesi, I. Ulusal Karadeniz Ormancılık Kongresi, Trabzon, Bildiriler Kitabı, Cilt 4, 248-255.
- Benayyat, İ., 1975. Portland Çimentosu Üretim Tekniğine Giriş, Makine Mühendisleri Odası, Yayın No. 63, Ankara
- Bowman, J. K., McCrea, R. B. ve Fomesbeck, C. I., 1975. A Method of Field Design Applied to Forest Roads, Low-Volume Roads, National Academy of Sciences, Washington, 186-197, 1975 (Proceeding of a Workshop 16-19 June, Boise, Idaho.
- Cimilli, T., 1986. Yapı Malzemesi, KTÜ Basımevi, Trabzon.
- Çepel, N., 1988. Orman Ekolojisi, İÜ Orman Fakültesi Yayınları, Yayın no:399 İstanbul.
- Çokça, E., 1999. Effect of Fly Ash on Swell Pressure of an Expansive Soil, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol.4.
- Deniz, İ., 1994. Buğday (*Triticum aestivum* L.) Saplarının Ön Desilikasyonu ve Bu İşlemin O<sub>2</sub>NaOH Kağıt Hamurları Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- DPT, 2001. VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ormancılık Özel İhtisas Komisyonu Raporu.

- Edward, S. ve Eugene, L., 1975. Construction, and Performance of a Forest Service Asphalt-Stabilized Sand Test Road, National Academy of Sciences, Washington, Proceeding of a Workshop 16-19 June, Boise, Idaho, 166-179.
- Erdaş, O., 1978. Tabii Orman Zeminlerinin Taşıma Kabiliyetinin Zemin Mekanik Yönünden İncelenmesi ve Bunun Orman Ürünleri Taşımacılığındaki Önemi, İÜ Orman Fakültesi Dergisi, Seri: A, Cilt: 28, Sayı:1, 157-171.
- Erdaş, O., 1983. Orman Yol Yapımında Bazı Teknik ve Yönetmel Sorunlar, KTÜ Orman Fakültesi Dergisi, Cilt.6, Sayı 1.
- Erdaş, O., Acar, H. H., Tunay, M. ve Karaman, A., 1995. Türkiye'de Orman İşçiliği ve Üretim, Orman Yolları, Orman Ürünleri Transportu, Ormancılıkta Mekanizasyon ve Mülkiyet – Kadastro ile İlgili Sorunlar ve Çözüm Önerileri, Türkiye Ormancılık Raporu, KTÜ Orman Fakültesi Yayın No:48, Trabzon,
- Erdaş, O., 1997. Orman Yolları, KTÜ, Orman Fakültesi, Yayın no:188-26, Cilt II, Trabzon.
- Erdoğan, T.Y., 1995. Betonun Oluşturan Malzemeler Çimentolar, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Erdoğdu, K., Tokyay, M. ve Türker, P., 2002. Traslara ve Traslı Çimentolar, TÇMB/AR-GE/Y99-2
- Erickson, L. F., 1975. Low-Volume Road Pavement, Low-Volume Roads, Special Report 160, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, Proceeding of a Workshop 16-19 June, Boise, Idaho, 204-209.
- Eroğlu, H., 1983. Soda-Oxygen Pulping of Wheat Straw, Nonwood Plant Fiber Pulping Conference, October, Houston, Tappi Press, Progress Report no: 14, 99-106.
- Eroğlu, H. ve Deniz, İ., 1993. Predesilication of Wheat Straw with NaOH, Das Papier, 47, 11 (1993), 645-650.
- Eroğlu, H., Üçüncü, O. ve Acar, H.H., 2003a. Compressive Strength of Cement Stabilized Sludge-Ash of Pulp-Paper Industry Solid Waste (PISW), Fifth International Conference on The Fate and Effect of Pulp and Paper Mill Effluents. 1-4 June 2003, Seattle, Washington.
- Eroğlu, H., Acar, H.H. ve Üçüncü, O., 2003b. Soil Stabilization With Waste of Paper Industry (WPI) For Sub-Base Of Forest Roads, Hihg Tech Forest Operations for Mountainous Terrain, 5-9 October, Schlegl, Austria (baskıda).
- Eskioglou, P. ve Efthymiou, P. N., 1996. Alternative Stabilization Methods of Forest Roads for an Efficient and Gentle Mechanization of Wood Harvesting Systems, Proceedings of the Seminar on Environmentally Sound Roads and Wood Transport, Sinaia, Romania, 184-194.

- Evans, J.C. ve Pancoski, S.E. 1989a. Stabilization of Petroleum Sludges, Proceeding of The 10th National Conference, November 27-29, Washington. USA
- Evans J.C. ve Pancoski, S.E., 1989b. Organically Modified Clays, Transportation Research Board 68th Annual Meeting, January 22-26, Washington USA.
- Foltz, R. B., 1996. Traffic and no-Traffic on an Aggregate Surfaced road: Sediment Production Differences, Proceedings of the Seminar on Environmentally Sound Roads and Wood Transport, Sinaia, Romania, 195-204.
- Gülay, M., 2002. İçmesuyu Arıtma Tesislerinden Çıkan Çamur Atıklarının Değerlendirilmesi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Gülçur, F., 1972. Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Analiz Metotları, İÜ Orman Fakültesi Yayınları, Yayın No: 201, İstanbul.
- Gümüş, S., 1997. Orman Yol Geçkilerinin Belirlenmesinde Coğrafi Bilgi Sistemlerinden Yararlanma İmkanları Üzerine Araştırmalar, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hieckel, G., 1997. Alternative Materials for the Modification and Stabilization of Unstable Soils, Laboratory Testing Report, Illinois Department of Transportation, Bureau of Materials and Physical Research Springfield, Illinois, May, USA.
- Jegede, G., 2000. Effect of Soil Properties on Pavement Failures Along the F209 Highway at Ado-Ekiti, Southwestern Nigeria, Construction and Building Materials, 14, 311-315.
- Kalra, Y.P ve Maynard, D.G., 1999. Methods Manuel for Forest Soil and Plant Analysis, Forestry Canada Northwest-Region Northern Forestry Center, Kanada.
- Kamon, M., Katsumi, T. ve Sano, Y., 2000. MSW Flay Ash Stabilized With Coal Ash For Geotechnical Application, Journal of Hazardous Materials, 76, 265-283.
- Kantarıcı, D., 2000. Toprak İlimi, İ.Ü. Orman Fakültesi Yayın No: 462, İstanbul.
- Karinaj, S.R. ve Havanagi, V.G., 1999. Compressive Strength of Cement Stabilized fly ash-Soil Mixtures, Cement and Concrete Research, 29, 673-677.
- Kırcı, H., 2000. Kağıt Hamuru Endüstrisi, Ders Notları, KTÜ Orman Fakültesi, Yayın no: 63, Trabzon.
- Kosmatka, S.H. ve Panarese, W.C., 1988. Design and Control of Concrete Mixtures, 13th Edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
- Kumar, S., Puri, V.K., Das, B. M. ve Devkota, B.C., 1999. Geotechnical Properties of fly Ash and Lime-Fly Ash Stabilized Coal Mine Refuse, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol.4.
- Kumbasar, V., ve Kip, F., 1984. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği No: 26/3-4, İstanbul.

- Locat, J., Berube, M. A. ve Choquette, M., 1990. Laboratory Investigations on The Lime Stabilization of Sensitive Clays Shear Strength Development, Canadian Geotechnical Journal, 27: 294-304.
- Martin, A. M., Owende, P. M. O., O'Mahony M.J. ve Ward, S.M., 1998. Estimation of the Serviceability of Forest Access Roads, Journal of Forest Engineering, 55-61
- McFarlane, H. W., Paterson, W. G. ve Dohaney, W. J., 1975. Experience with the Benkelman Beam on Canadian Forest Roads, National Academy of Sciences, Washington, Proceeding of a Workshop 16-19 June, Boise, Idaho, 210-217.
- Mcmanis, K. L. ve Arman, A., 1987. Class C Fly Ash a Full or Partial Replacement for Portland Cement or Lime, Transportation Research Record, 1219, 69-81, USA.
- Miller, G. A. ve Azad, S., 2000. Influence Of Soil Type On Stabilization With Cement Kiln Dust, Construction and Building Materials 14, 89-97.
- Mullick, A. K., 1997. Blended Cements in India-Manufacture and Use, Proceeding of I. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 23-36, 6-9 November, İstanbul.
- Mullick, A. K., Mohan, K., Handoo, S.K. ve Kumar, S., 1997. Use of Fly Ash as a Component of Raw Mix for Cement Manufacture, Proceeding of 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 138-146, 6-9 November, İstanbul.
- Nalbantoğlu, Z. ve Tuncer, E. R., 2001. Compressibility and Hydraulic Conductivity of a Chemically Treated Expansive Clay, Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, Feb.
- Neville, A.M., 1990. Properties of Concrete, Third Edition, Wilwy and Sons, New York, USA.
- Oruç, Ş. 2002. Yoğun Granülometrili Emülsifiye Asfalt Betonu'nda Çimentonun Karışım Performansı Üzerindeki Etkisi, Doktora tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Önalp, A., 1982. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, KTÜ Müh. Mim. Fak., Trabzon.
- Öney, N., 1997. The Behavior of Mineral Additive Cements in Sulfated Environments, Proceeding of 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 59-65, 6-9 November, İstanbul.
- Özaydın K., 1989. Zemin Mekanığı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Öztaş, G., 2002. Türkiye Karayollarında Yüksek Kalite Seçimi: Beton Yollar, Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, Mart-Nisan, Sayı: 36.
- Özyuvacı N., 1971. Topraklarda Erozyon Eğiliminin Tespitinde Kullanılan Bazı Önemli İndeksler, İÜ Orman Fakültesi Dergisi, B. 21, 1, 190-207.



- Özyuvacı, N., 1978. Kocaeli Yarımadası Topraklarında Erozyon Eğilimlerinin Hidrolojik Toprak Özelliklerine Bağlı Olarak Değişimi, İÜ Orman Fakültesi Yayınları, Yayın no:233, İstanbul.
- Powrie, W., 1997. Soil Mechanics Concepts and Applications, E&FN SPON, An Imprint of Chapman & Hall, England.
- Ramyar, K., 1997. The Performance of a High-Lime Fly Ash as a Interground Admixture in Cement, Proceeding of I. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 184-192, 6-9 November, İstanbul.
- Rogers, C.D.F. ve Glendinning, S., 1999. Improvement of Clay Soils In-Situ Using Lime Piles in the UK, Engineering Geology, 47, 243-257.
- Seçkin, Ö.B., 1984. Bir Orman Yol Projesinde Güzergah Planının Hazırlanması, İÜ Orman Fakültesi Dergisi, Seri B, Sayı 3, 92 – 108.
- Shawqui, M. L. ve Neaz, A., 1998. Effect of New Soil Stabilizers on the Compressive Strength of Dune Sand, Construction and Building Materials 12, 321-328.
- Stamatopoulos, .C. ve Kotzias, P.C., 1985, Soil Improveent by Preloading, John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Sungjin L., Wangi J., Jaebok L., Kwanho L., ve Namho K., 2002. Engineering Properties of Water/Wastewater-Treatment Sludge Modified by Hydrated Lime, Fly Ash and Loess, Water Research, 36, 4177-4184.
- The Asphalt Institute, 1973. Sub-grade Preparation for Full-Depth Asphalt Pavement.
- Thompson, M.R., 1975. Soil Lime Mixtures for Construction of Low-Volume Roads, National Academy of Sciences, Washington, 149-165, 1975 (Proceeding of a Workshop 16-19 June, Boise, Idaho.
- Tokyay, M., 1999. Türk Çimento Standartları (Mevcut ve Yeni Standartlar ENV197-1 İle Karşılaştırmalar, TÇMB, AR-GE, Y99-2.
- Transport Research Laboratory, 1993. A Guide to the Structural Design of Bitumen-surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Countries, Overseas Road Note, 31, 75, Crowthorne, Berkshire, United Kingdom.
- Trivedi, M. K. ve Meghawat, M., 1987. Alkaline Pulping of Straws With Anthraquinone, IPPTA Seminar, June, Vol. 45, No: 7, 267-269
- TS 24, 1985. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 28.
- TS 2434, 1985. Türk Standartları Enstitüsü, Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metotları, Ankara.
- Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, İstanbul.

- Turanlı, L. ve Erdoğan, T.Y., 1997a. Effect of Natural Pozzolan Addition on Heat of Hydration and Other Properties of Portland-Pozzolan Cement, Proceeding of 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 99-105, 6-9 November, İstanbul.
- Turanlı, L. ve Erdoğan, T.Y., 1997b. The Effects of Fly Ash Inclusion Methods on Various properties of Portland Cement and Fly Ash System, Proceeding of 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 176-183, 6-9 November, İstanbul.
- Turner, J. P., 1997. Evaluation of Western Coal Fly Ashes for Stabilized of Low-Volume Roads, Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials, ASTM STP 1275, Mark A. Wasemiller, Keith B. Hodinott, Ads., American Society for Testing and Materials
- Tüdeş, E., 1996. Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı ile Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Türker, P. ve Erdoğan, K., 1997. Effects of Different Particle Size Fractions of Fly Ash on Strength of Fly Ash Incorporated Mortars, Proceeding of 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, 117-124, 6-9 November, İstanbul.
- Ubbriaco, P. ve Calabrese, D., 1998. Solidification and Stabilization of Cement Paste Containing Fly Ash From Municipal Solid Waste, *Thermochemica Acta* 321, 143-150.
- Umar, F. ve Yayla, N., 1986. Yol İnşaatı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, Sayı:1333.
- URL-1, [www.lignin.info/whatis.html](http://www.lignin.info/whatis.html), Lignins--Products With Many Uses, 25 Mayıs 2003.
- USDA Forest Service, 2000. Forest Road Stabilization With a Tall-Oil Emulsion, Current Project Record 00-01.
- Van Impe, W.F., 1989. Soil Improvement Techniques and Their Evolution, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., 1998. Effects of Partial Substitution of Lime With Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Strength Properties of Lime-Stabilized Sulphate-Bearing Clay Soils, *Engineering Geology*, 51, 37-53.
- Xeidakis, G.S., 1996. Stabilization of Swelling Clays by  $Mg(OH)_2$ , Factors Affecting Hydroxy-Mg-Interlayering in Swelling Clays, *Engineering Geology*, Volume 44, Issues 1-4, 93-106.

## ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladıktan sonra, 1989 yılında KTÜ Orman Fakültesi Orman Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 1993 yılında mezun oldu ve aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans Programına başladı.

1994 yılında Kafkas Üniversitesi Artvin Orman Fakültesinde açılan sınavı kazanarak, Orman İnşaatı-Geodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı.

1997 yılı Şubat ayında Yüksek Lisans programından mezun oldu. 1998 yılı Şubat ayında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Doktora programına başladı. 1999 yılı Mart ayında kadrosu 2547 sayılı Yüksek Öğretim Kurulu'nun kanununun 35. maddesine göre KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsüne geçici olarak nakledilmiştir.

09-19.11.2000 tarihleri arasında Hırvatistan Cumhuriyeti, Zagreb Orman Fakültesi, Orman Üretimi ve Mekanizasyon Anabilim Dalınca düzenlenen bir çalışma programına katıldı.

KTÜ Araştırma Fonu ve Çevre ve Orman Bakanlığına bağlı Orman Genel Müdürlüğü tarafından desteklenen 1'er adet proje kapsamında yardımcı araştırmacı olarak çalışmaktadır.

Çalışma konuları ile ilgili olarak bir çok ulusal ve uluslararası kongre ve sempozyumlara bildirili olarak katılmıştır. Yurt içinde ve yurt dışında yayınlanan 20'nin üzerinde makale ve bildiriye sahiptir.

Halen KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora eğitimine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babası olup, İngilizce bilmektedir.