

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOLEMANİTİN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Hacer YEŞİLÇİÇEK

**MAYIS 2016
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOLEMANİTİN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Hacer YEŞİLÇİÇEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 05 / 2016

Tezin Savunma Tarihi : 31 / 05 / 2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şeref ORUÇ

Trabzon 2016

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Hacer YEŞİLÇİÇEK Tarafından Hazırlanan**

**KOLEMANİTİN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

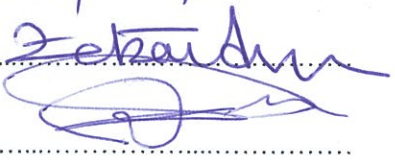
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 / 05 / 2016 gün ve 1652 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Şeref ORUÇ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Orhan KARPUZ


.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bor elementinin ticari öneme sahip olan minerallerinden olan kolemanitin, tesislerde işlenmesi sonucu oluşan kolemanit atığının tek başına ve kireçle birlikte, mühendislik açısından problemli Gümüşhane ilinin Köse ilçesinin Yaylın köyünden temin edilen doğal malzemenin plastisite, sıkışabilirlik ve taşıma gücü gibi özelliklerinde meydana gelen değişimler göz önüne alınarak, başarılı bir stabilizasyon yapıp yapılamayacağını ve stabilizasyonda en uygun performansı hangi katkı oranı/oranlarında gösterdiğini ortaya koymak için yapılan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek tez konumun belirlenmesinde ve çalışmalarımın yürütülmesi sırasında yönlendirmelerini ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, bana her zaman yardımcı olan ve yol gösteren, gerek insan olarak gerekse hoca olarak kendime örnek aldığım çok kıymetli hocam Doç. Dr. Şeref ORUÇ'a sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Laboratuar çalışmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen Kaya Mühendislik Zemin-Yapı Malzemeleri Laboratuvarı çalışanı jeoloji mühendisleri Ali BİRİNCİ ve Güler İSAK'a, malzeme temininde her türlü desteği veren sevgili amcam İnşaat Yüksek Mühendisi Bilal AYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştirip bugünlere gelmemi sağlayan, gerek lisans gerek yüksek lisans öğrenimim boyunca büyük fedakarlık ve sabırla beni destekleyen sevgili annem Havva AYDIN ve babam Ahmet AYDIN'a, sevgili kardeşlerim Esmâ AYDIN ve Ömer AYDIN'a, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, yüksek lisans çalışmam boyunca sabırla beni destekleyen sevgili eşim İnşaat Mühendisi Muhammed YEŞİLÇİÇEK'e en içten sevgiyle teşekkürlerimi sunarım.

Hacer YEŞİLÇİÇEK

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kolemanit Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.
31/05/2016

Hacer YEŞİLÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNEMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Taraması	3
1.2.1. Stabilizasyonla ilgili Literatür Taraması	3
1.2.2. Kolemanit ile ilgili Literatür Taraması	15
1.3. Amaç ve Tezin Organizasyonu	18
1.4. Karayolu	20
1.4.1. Karayolu Altyapısı	20
1.4.2. Karayolu Üstyapısı	21
1.4.2.1. Esnek Üstyapılar	21
1.4.2.1.1. Esnek Üstyapılarda Taban Zeminini	26
1.5. Stabilizasyon	28
1.5.1. Mekanik Stabilizasyon	30
1.5.2. Kimyasal Stabilizasyon	32
1.5.2.1. Kireç ile Zenin Stabilizasyon	37
1.6. Bor Elementi	43
1.7. Borun Tarihçesi	45
1.8. Bor Mineralleri	46
1.9. Dünyada ve Türkiye’de Bor	48
1.10. Bor Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları	50

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	53
2.1.	Deney Numunelerinin İsimlendirilmesi ve Hazırlanması	53
2.2.	Referans Alınan Deney Standartları	56
2.3.	Materyaller.....	56
2.3.1.	Doğal Malzeme.....	56
2.3.2.	Kireç	58
2.3.3.	Kolemanit	59
2.3.3.1.	Türkiye’de Kolemanit.....	61
2.4.	Yöntem	62
2.4.1.	Organik Madde Tayini.....	62
2.4.2.	Sülfat İçeriğinin Belirlenmesi.....	63
2.4.3.	pH Tayini.....	63
2.4.4.	Özgül Ağırlık.....	63
2.4.5.	Yıkamalı Elek Analizi Deneyi ve Hidrometre Deneyi.....	64
2.4.6.	Kıvam (Atterberg) Limitlerinin Belirlenmesi.....	67
2.4.7.	Standart Kompaksiyon Deneyi.....	72
2.4.8.	Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi.....	74
3.	BULGULAR VE İRDELEME	77
3.1.	Elek Analizi Bulguları ve İrdelenmesi	77
3.2.	Kıvam (Atterberg) Limiti Bulguları ve İrdelenmesi.....	78
3.3.	Optimum Su Muhtevası ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık Bulguları. 83	
3.4.	CBR-Şişme Yüzdesi Bulguları ve İrdelenmesi	87
3.5.	Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Bulguları ve İrdelenmesi	90
3.6.	Esnek Üstyapı Tasarımı (AASHTO-1986 Metodu ile)	93
3.6.1.	Esnek Üstyapı Tasarımında Takip Edilecek Sıra ve Yöntem.....	93
3.6.2.	Kolemanit ve Kireç Katkılarının Üstyapı Tasarımına Etkisi.....	94
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	99
5.	KAYNAKLAR.....	102
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans

ÖZET

KOLEMANİTİN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Hacer YEŞİLÇİÇEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Şeref ORUÇ
2016, 110 Sayfa

Zemin stabilizasyonunda amaç, zayıf zeminlerin belirli özelliklerinin (fiziksel, hidrolik, mekanik ve kimyasal) iyileştirilmesidir. Yol taban zeminlerinin üzerine inşa edilecek yol üstyapısının taşıma gücünü arttırmak ve deformasyonları (oturmaları) azaltmak için birçok zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli killi yol taban zemininin, bor minerali olan kolemanitin işlenmesi sonucu açığa çıkan atık ve kireç katkılarıyla stabilizasyonu deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaç için, %0, %5, %10, %15 ve %20 oranları ile kireçsiz ve %2.5, %5, %7.5 ve %10 kireçli karışımlar hazırlanmıştır. Yapılan deney sonuçları, kolemanit atığı ve kirecin kombinasyonunun zeminin işlenebilirlik, plastisite, sıkışabilirlik ve dayanım gibi mühendislik özelliklerini sadece kolemanit atığına göre daha çok iyileştirdiğini göstermiştir. Fakat sadece kireçli karışımlara göre daha az iyileştirme yaptığı belirlenmiştir. Bu deneysel çalışmada, %10 kolemanit ve %10 kireç içeren karışımın bu zeminin stabilizasyonunda en uygun çözüm olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, Kolemanit, Kireç, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Master Thesis

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF USING OF COLEMANITE IN SOIL STABILIZATION

Hacer YEŞİLÇİÇEK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Şeref ORUÇ
2016, 110 Pages

In soil stabilization aim is to heal improvement of physical, hydraulic, mechanical and chemical properties of weak soils. Many soil improvement methods has been developed to increase the bearing capacity of road pavements will be built on the subgrades and to reduce deformations (settlements). In this study, high plasticity clayey road subgrade soil was investigated was investigated experimentally its stabilization with lime and waste which obtained from processing of colemanite. For this purpose, test mixtures were prepared adding 0%, 5%,10%, 15% and 20% without lime and, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% with lime. According to results of the experiments, Combinatons of colemanite waste and lime showed higher improvement engineering properties of soil such as workability, plasticity, compressibility and resistance compared to only samples within colemanite waste. Otherwise it was determined that less improvement than only samples with lime. This experimantal study unveils that mixture containing 10% colemanite waste and 10% lime is the best convenient solution in the stabilization of soil.

Key Words: Soil stabilization, Colemanite, Lime, California Bearing Ratio (CBR)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Esnek üstyapı tabakalarındaki gerilme dağılışı	22
Şekil 1.2.	Yol üstyapısı tip enkesiti	22
Şekil 1.3.	Tipik bir esnek üstyapı ve ortalama tabaka kalınlıkları.....	26
Şekil 1.4.	İnce malzemenin zemin içindeki durumları	31
Şekil 1.5.	Zemin gradasyon üçgeni	33
Şekil 1.6.	Negatif yüklü kil yüzeyleri tarafından çekilen katyonlar ve su molekülleri	40
Şekil 1.7.	Çimentolaşma mekanizması	42
Şekil 1.8.	Borun kristal yapısı.....	43
Şekil 1.9.	Dünya bor üretiminin bölgelere göre dağılımı	49
Şekil 2.1.	CBR testi için numunelerin hazırlanması	55
Şekil 2.2.	Doğal malzemenin alındığı Yayılım köyünün konumu.....	57
Şekil 2.3.	Halkalı değirmene ait görseller.....	59
Şekil 2.4.	Deneylerde kullanılan iki farklı granülometrideki kolemanit atıkları	60
Şekil 2.5.	Doğal malzemenin organik madde tayinin için yapılan deney görselleri.....	62
Şekil 2.6.	Piknometre deney seti.....	63
Şekil 2.7.	Hidrometre deney görselleri	65
Şekil 2.8.	Doğal malzemenin granülometri eğrisi	66
Şekil 2.9.	Casagrande aleti ile likit limit değerinin belirlenmesi.....	69
Şekil 2.10.	Casagrande plastisite kartı ve doğal malzemenin plastisite kartındaki yeri	70
Şekil 2.11.	Rötre limitinin plastisite kartından bulunması.....	72
Şekil 2.12.	Standart kompaksiyon deney seti	73
Şekil 2.13.	CBR deney aleti.....	75
Şekil 3.1.	Doğal halde ve değişik ÖKT oranlarında Atterberg limitleri.....	80
Şekil 3.2.	Doğal halde ve değişik KT oranlarında Atterberg limitleri.....	81
Şekil 3.3.	Doğal halde ve değişik kireç oranlarında Atterberg limitleri	81
Şekil 3.4.	Doğal halde ve değişik ÖKT + K oranlarında Atterberg limitleri.....	82
Şekil 3.5.	ÖKT karışımlarının standart kompaksiyon eğrileri.....	84
Şekil 3.6.	KT karışımlarının standart kompaksiyon eğrileri.....	85

Şekil 3.7. K karışımlarının standart kompaksiyon eğrileri	85
Şekil 3.8. ÖKTK karışımlarının standart kompaksiyon eğrileri	86
Şekil 3.9. Doğal malzeme ve ÖKT karışımlarının şişme yüzdeleri.....	87
Şekil 3.10. Doğal malzeme ve KT karışımlarının şişme yüzdeleri.....	88
Şekil 3.11. Doğal malzeme ve K karışımlarının şişme yüzdeleri	88
Şekil 3.12. Doğal malzeme ve ÖKT-K karışımlarının şişme yüzdeleri	89
Şekil 3.13. Doğal malzeme ve ÖKT karışımlarının CBR değerleri	90
Şekil 3.14. Doğal malzeme ve ÖK karışımlarının CBR değerleri.....	90
Şekil 3.15. Doğal malzeme ve K karışımlarının CBR değerleri.....	91
Şekil 3.16. Doğal malzeme ve ÖKT-K karışımlarının CBR değerleri	91
Şekil 3.17. Yaş CBR değerlerinin katkı oranlarına göre değişim eğrileri	93
Şekil 3.18. Esnek üstyapılar için projelendirme abağı.....	96
Şekil 3.19. Yol üstyapısı malzemeleri için kullanılacak tabaka katsayıları.....	98

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Alttemel tabakası için granülometri şartları	23
Tablo 1.2.	Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri	23
Tablo 1.3.	Esnek üstyapılarda taban zemininin özellikleri	28
Tablo 1.4.	İnce malzemesinin granülometrisinin zemine etkileri	31
Tablo 1.5.	Zemin stabilizasyonu için stabilizör seçimi.....	34
Tablo 1.6.	Stabilizasyon metotları	35
Tablo 1.7.	Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları	36
Tablo 1.8.	Stabilizasyonda kullanılacak kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri	38
Tablo 1.9.	Kireç ile stabilize edilen zeminlerin sağlaması gereken minimum serbest basınç mukavemeti	38
Tablo 1.10.	Kireç ile stabilizasyonda sağlanması gereken durabilite kriterleri	39
Tablo 1.11.	Bor elementinin fiziksel özellikleri	45
Tablo 1.12.	Ticari önemi olan bor mineralleri	47
Tablo 1.13.	Dünya'daki bor rezervleri.....	49
Tablo 1.14.	Eti maden rezerv miktarları	50
Tablo 1.15.	Bazı bor ürünlerinin kullanım alanları.....	51
Tablo 2.1.	Deneyisel çalışmalarda kolemanit numunelerinin isimlendirilmesi.....	53
Tablo 2.2.	Deneyisel çalışmalarda 4 No.lu elekten geçen kolemanit numunelerinin İsimlendirilmesi	54
Tablo 2.3.	Deneyisel çalışmalarda kireç numunelerinin isimlendirilmesi	54
Tablo 2.4.	Deneyisel çalışmalarda öğütülmüş kolemanit ve kireç numunelerinin İsimlendirilmesi	54
Tablo 2.5.	Deneylerde referans alınan standartlar	56
Tablo 2.6.	Doğal malzemenin mühendislik özellikleri	57
Tablo 2.7.	Zeminlerin karakteristik özgül ağırlıkları	58
Tablo 2.8.	Deneylerde kullanılan kirecin fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 2.9.	Deneylerde kullanılan kirecin kimyasal özellikleri	59
Tablo 2.10.	Kolemanit atığının kimyasal özellikleri.....	60
Tablo 2.11.	Türkiye'de bor rezervlerinin dağılımı	62

Tablo 2.12. Doğal malzemenin elek analizi.....	64
Tablo 2.13. Doğal malzemenin hidrometre deney sonuçları	66
Tablo 2.14. Doğal malzemedeki ince tanelerin MIT ve USCS'ye göre yüzdeleri	67
Tablo 2.15. Penetrasyon derinliğine bağlı olarak standart gerilme miktarları.....	75
Tablo 2.16. CBR deneyinde kullanılan disk sayıları	75
Tablo 3.1. Tüm karışımlara ait zemin sınıfları.....	78
Tablo 3.2. ÖKT karışımlarının kıvam limitleri.....	79
Tablo 3.3. KT karışımlarının kıvam limitleri.....	79
Tablo 3.4. K karışımlarının kıvam limitleri	79
Tablo 3.5. ÖKT-K karışımlarının kıvam limitleri.....	79
Tablo 3.6. ÖKT karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	83
Tablo 3.7. KT karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	83
Tablo 3.8. K karışımlarının kompaksiyon parametreleri	83
Tablo 3.9. ÖKTK karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	84
Tablo 3.10. 20 yıllık analiz süresi için yoldan geçecek trafik sayısı	95
Tablo 3.11. Şerit dağıtma faktörü	95
Tablo 3.12. %9 CBR değeri için üstyapı tabakalarında kullanılacak malzeme cinsleri, tabaka kalınlıkları ve tabaka katsayıları.....	97
Tablo 3.13. %9 CBR değeri için önerilen alttemel kalınlığı.....	97
Tablo 3.14. %27.4 CBR değeri için üstyapı tabakalarında kullanılacak malzeme cinsleri, tabaka kalınlıkları ve tabaka katsayıları.....	99
Tablo 3.15. %27.4 CBR değeri için önerilen alttemel kalınlığı.....	99
Tablo 3.16. 20 yıllık analiz süresi için önerilen tabaka kalınlıkları.....	100

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Aktivite
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Asfalt çimentosu
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CAH	: Kalsiyum alümina hidrate
CASH	: Kalsiyum alümina-silika hidrate
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CH	: Yüksek plastisiteli inorganik kil
CI	: Orta plastisiteli inorganik kil
CL	: Düşük plastisiteli inorganik kil
CSH	: Kalsiyum silika hidrate
GC	: Killi çakıl
GM	: Siltli çakıl
GP	: Kötü derecelenmiş çakıl
GS	: Özgül ağırlık
GW	: İyi derecelenmiş çakıl
K	: Kireç
K-Ç-U	: Kireç, çimento ve puzolan kombinasyonu
KT	: 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığı
LL	: Likit limit
MH	: Yüksek plastisiteli inorganik silt
MI	: Orta plastisiteli inorganik silt
ML	: Düşük plastisiteli inorganik silt
MS	: Hadde tufalı
mm	: milimetre
NP	: Plastisite özelliği göstermeyen
ÖKT	: Öğütülmüş kolemanit atığı
pH	: Hidrojen gücü
PI	: Plastisite indisi

PL	: Plastik limit
ppm	: Miligram/Kilogram
SC	: Killi kum
SI	: Büzülme indisi
SKK	: Söndürölmüş kalker kireci
SL	: Büzölme (rötre) limiti
SM	: Siltli kum
SP	: Kötü derecelenmiş kum
SW	: İyi derecelenmiş kum
TS	: Türk Standartları
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
w _{opt}	: Optimum su içeriğı
°C	: Santigrat derece
µm	: Mikrometre
γ _{d,maks}	: Maksimum kuru yoğunluk

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yol kaplamalarının performansı, ömrü ve bakım masrafları vb. hususlar kaplamanın tasarımı, kullanılan malzemeler, yapım tekniği gibi hususlara bağlı olduğu kadar, zeminin taşıma gücüyle de doğrudan ilgilidir. Yol üst yapısı için uygun olmayan taban zeminleri iyileştirilerek yeterince stabil bir hale getirilmesi gerekir. Taban zemininin iyileştirilmesiyle kaplamanın performansı ve ömrü artarken kaplamanın kalınlığı da azalacaktır (Tunç, 2002).

Bir yolda taşıtların konforlu ve emniyetli olarak hareket etmelerini sağlayan kaplamalar (veya yol üstyapısı) ne kadar iyi tasarlanıp inşa edilirse edilsin, bir yol üstyapısının başarısı hem ömür hem performans bakımından üzerine oturduğu taban zeminine bağlıdır. Yapının oturduğu taban zemininin zayıf olması halinde kaplamadan beklenen hizmet ömrünün yeterli olmayacağını geçmiş çalışmalar ve tecrübeler göstermektedir. Bir yolun en göze çarpan tabakası aşınma tabakası olmasına rağmen, bir yol üstyapısının kalitesi daha çok o zeminin üzerine inşa edildiği taban zeminine bağlıdır. Özetle, zayıf bir taban zemini üzerine kalın bir üstyapı inşa etmek iyi bir üstyapı oluşturmaz. Bu nedenle üstyapı inşa edilmesinden önce mevcut olan zayıf zeminin en uygun stabilizasyon yöntemleri ile ıslah edilmesi gerekir. Zayıf zeminlerin ıslahı için uygulanabilir üç yöntem vardır. Bunlar; uygun olmayan zemini kazıp yerine uygun zemin koymak, uygun olmayan zemini ıslah etmek, uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etmektir. Birinci yöntem zayıf zeminin kazılması (iş makinesi kirası, akaryakıt giderleri, işçi giderleri), kazılan zeminin başka bir bölgeye taşınması (nakliye, boşaltma, depolama giderleri), yerine koyulacak uygun bir zemin için malzeme ocağı bulunması ve ocaktan malzeme alınması (iş makinesi kirası, akaryakıt giderleri, nakliye, işçi giderleri), alınan malzemenin uygun olmayan malzemenin yerine serilmesi, sıkıştırılması işlemleri hem çok yüksek maliyetlere neden olmakta hem de zaman almaktadır. İkinci yöntem; zemine ait bir takım özelliklerin uygun bir stabilizasyon yöntemi ile iyileştirilmesidir. Stabilizasyonla zemin; mukavemet, rijitlik, basınç dayanımı, geçirgenlik, şişme ve kabarma potansiyeli, drenaj ve donma hassasiyeti gibi birçok özelliğin iyileştirilmesi mümkündür. Yol alt yapısını stabil duruma getirmek için birçok stabilizasyon yöntemi mevcuttur. Ülkemizde

genellikle mekanik stabilizasyon yöntemi uygulanmaktadır. Karayollarında kirecin çok miktarda bulunması ve maliyetinin düşük olması nedeniyle en çok uygulanan stabilizasyon yöntemidir. Üçüncü yöntem ise zeminin zayıf özellikleri göz önüne alınarak kaplama tasarımını buna göre yapmaktır. Ancak aşırı kaplama kalınlığı gerektirdiğinden ekonomik olmayabilir (Şengül, 2010).

Çağımızın gereği olan hızlı üretim ve tüketim artışı, birçok sorunu da beraberinde getirerek mevcut hammadde kaynaklarına alternatif olabilecek ikincil hammadde kaynağı olarak görülen atıkların değerlendirilmesine yönelik çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Endüstrideki gelişmelere bağlı olarak atık miktarlarının artması çevre kirliliği, stoklama maliyeti, yer altı ve yer üstü sularının kirlenmesi gibi birçok probleme sebep olmaktadır. Bu nedenle atıkların değerlendirilmesi 20.yüzyılda olduğu gibi 21.yüzyılda da üzerinde yoğun olarak çalışılan konulardan biridir.

Atıklardan, yeni ürün elde edilmesi veya mevcut ürünlerde katkı maddesi şeklinde kullanılarak faydalanılmaktadır. Atık malzemelerin değerlendirilmesi sonucu hem kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımı azaltılarak doğanın tahrip edilmesi önlenmekte hem de atık malzemelerin depolanması durumunda oluşacak çevresel problemler en aza indirgenmektedir.

Birçok endüstri dalında yaygın bir kullanım alanına sahip bor madeni ve türevleri, 21.yüzyılın petrolü olarak adlandırılmakta olup, stratejik olarak da değerli olması nedeniyle bor minerallerine özel bir konum kazandırmıştır. Türkiye’de ticari öneme sahip olan başlıca bor mineralleri sodyum bazlı tinkal, kalsiyum bazlı kolemanit ve sodyum+kalsiyum bazlı üleksittir. Ülkemiz sahip olduğu bor mineralleri rezervlerinin büyüklüğü, niteliği ve çeşitliliği açısından dünya rezervlerinin 955.297 milyon ton (B_2O_3 bazında) ile yaklaşık %72’lik oranla birinci sırada yer almaktadır. Ancak ülkemizde bu büyük miktardaki üretimin getirdiği çevresel problemlerden biri olarak her yıl 600.000 ton atık bor ürünleri ortaya çıkmaktadır. Bor atıklarının zengin kil içerikli oluşu açığa çıkan atıkların değerlendirilmesine yönelik çalışmaları seramik başta olmak üzere, tuğla ve son yıllarda inşaat sektörüne yönlendirmiştir.

1.2. Literatür Taraması

1.2.1. Stabilizasyon ile İlgili Literatür Taraması

Al-Amoudi vd. (1995), Arap körfezi ve Kızıl Deniz sahillerinde büyük ölçüde yer alan sabkha adı verilen, içerisinde kum, silt veya kilden oluşan üzeri tuzla kabuk bağlamış zemin türü üzerinde çalışmışlardır. Bu zemin türünü deneylere tabi tutarken deniz suyu ve saf su kullanmışlardır. İlk olarak elek analizi ile zemin sınıfı SP-SW olarak belirlenip, zeminin özgül ağırlığını, X-Ray difraksiyon analizini ve kıvam limitlerini bulmuşlardır. 5 farklı katkı malzemesini (kireçtaşı tozu, kalkerli kil, asfalt emülsiyonu, kireç ve çimento) %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında zemine karıştırıp optimum su içeriğinde Standart proktor test aletiyle sıkıştırmışlardır. Proktor deneyinden sonra numunelerin nem oranlarının korunması için çift naylon ile sarıp 7 gün küre tabi tutmuşlar ve kürden sonra numunelere serbest basınç deneyini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, toz halindeki katkıların bazıları (kireçtaşı tozu ve çimento) zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığında artışa, optimum su içeriğinde azalmaya sebep olsa da çok etkili olmadığını görmüşlerdir. Deniz suyu ile hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri saf su ile hazırlanan numunelerinkinden yaklaşık %50 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun sebebini ise, deniz suyunun içerisindeki tuzun zayıf çimentolaşma maddesi gibi davranması şeklinde yorumlamışlardır. Ayrıca asfalt emülsiyonu ilavesinin de dayanımda düşüşe sebep olduğunu saptamışlardır.

Bell (1996), killi zeminlerin üç önemli bileşiği olan kaolin, montmorillonit ve ince taneli kuvars minerallerine %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kireç ilave ederek elde edilen karışım numunelerinin mühendislik özelliklerini incelemiştir. Bu karışım numuneleri üzerinde kıvam limitleri, proktor deneyi, CBR ve serbest basınç deneyi yapmıştır. Serbest basınç deneyini 1, 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda incelemiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, PL değerleri montmorillonit kilde çok, kaolinde az ve kuvars mineralinde ise önemli bir değişim olmadığını görmüştür. LL değerleri ise kaolin ve kuvars mineralinde artmış, montmorillonit de azalmıştır. Serbest basınç dayanımları ve CBR değerlerinin kür süresinin artmasıyla arttığını görmüştür.

Kizirgil (2001), Sivas demir-çelik fabrikası cürufunun yol stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmak için temel kazısından alınan zemine %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında çimento ilave edip standart proktor deneyine tabi tutmuştur. Deney

sonucunda optimum çimento oranının %4 olduğunu gözlemlemiştir. Daha sonra oranlarında katılan her bir çimento oranı için %1,%3, %5, %7 ve %9 oranlarında cüruf katılarak elde edilen numuneler üzerinde proktor deneyi yapılmıştır. Her bir çimento oranı için %5 cüruf oranında optimum su içeriğinin sağlandığını, zemin-çimento-cüruf karışımlarında cüruf oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığın da azaldığını görmüştür. Çimento ile cürufun stabilizasyonda belli oranlarda yer değiştirmesi sonucunda gerekli mukavemetlerin daha ekonomik olduğunu yapılan maliyet analizi sonuçlarına göre saptamıştır. Buna göre;

- ❖ %8 çimento ile elde edilen mukavemet, %4 çimento + %5 cüruf ile %40 daha ekonomik,
- ❖ %10 çimento ile elde edilen mukavemet değerleri, %6çimento + %5 cüruf ile %40 daha ekonomik,
- ❖ %8 çimento + %3 cüruf ile elde edilen mukavemet, %6 çimento + %5 cüruf ile %20 daha ekonomik olduğunu hesaplamıştır.

Al-Rawas (2002), zemin sınıfı MH olarak belirlenen zemine çimento atığı tozu, bakır cürufu, cürufllu çimento ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunu %3, %6 ve %9 oranlarında ekleyerek şişme basınçlarını ve şişme yüzdelere bakmıştır. Sadece bakır cürufu katkısının artmasıyla şişme yüzdesinin arttığını, dolayısıyla en yüksek şişme basıncına sahip deney sonuçlarını bu katkı türünün verdiğini belirlemiştir.

Zorluer ve Usta. (2003), yaptıkları çalışmalarda mermer fabrikalarının atığı olan mermer tozunun stabilizasyon için kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu kapsamda meşelik kili olarak adlandırılan zemin numunelerinin mühendislik özelliklerini belirlemişlerdir. İnce taneli ve düşük plastisiteli kil (CH) sınıfında yer alan numunelere standart kompaksiyon deneyi yapmışlardır. Standart kompaksiyon enerji seviyesinde ve 5 ayrı katkı seviyesinde (%1-3-5-7) hazırlanan numunelerin ödometre deneyi ile şişme yüzdelere bakmışlardır. Mermer tozu katkısının artması ile şişme yüzdesi değerlerinde azalma olduğunu, en az şişme yüzdesinin %5 katkı oranında olduğunu gözlemlemişlerdir. Endüstriyel bir atık olan ve kimyasal içeriğinde yaklaşık %50 CaO içermesinden dolayı kirece benzeyen mermer tozu atığının zeminlerin iyileştirmesinde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Fındık (2005), yaptığı çalışmalarda pomzaların ve volkanik cürufun alttemel tabakasında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Malzemelerin alttemel tabakasında mekanik stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliğini

belirlemek için dona karşı duyarlılık, sağlamlık, kıvam limitlerinin tayini ve CBR deneylerini uygulamıştır. Daha sonra ariyet malzemesi ile volkanik cüruf ve pomzayı çeşitli oranlarda (%10~35) karıştırarak numuneleri hazırlayıp, bu karışım numuneleri üzerinde kıvam limitleri tayini ve CBR deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, %30 pomza katkılı numunenin CBR değeri yaklaşık %60 oranında ve %20 volkanik cüruf katkılı numunenin CBR değerinin de yaklaşık %40 oranında arttığını görmüştür.

Süt (2006), kohezyonlu zeminlerin kireçle iyileştirilmesinin CBR değeri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yüksek plastisiteli kil içeren zemine kuru ağırlığının % 2, %4, %6 ve %8'i kadar sönmüş kireç ilave etmiştir. Doğal numune ve kireçli karışım numuneleri üzerinde elek analizi, Atterberg kıvam limitleri, özgül ağırlık, organik içerik, pH, kompaksiyon, serbest basınç, üç eksenli basınç (UU) ve CBR deneylerini uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, artan kireç yüzdesine bağlı olarak likit limitte azalma, plastik limitte azalma dolayısıyla plastisite indisinin de azaldığını belirlemiştir. Yine aynı şekilde artan kireç oranına bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken optimum su içeriğinin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca CBR deneyinde en büyük artışın % 4 kireç oranında olduğu görülmüştür.

Cömert vd. (2006), uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminlerde kür süresinin taşıma gücü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla Bilecik kili ile bentonit, uçucu kül, çimento ve kirecin farklı kombinasyonları ile karışım numuneleri hazırlamışlardır. Bu karışımlar üzerinde CBR deneyi için geleneksel olarak 24 saat desikatörde ve 4 gün suda bekletilen numuneler ile 28 gün hava sızdırmaz ortamda ve 4 gün suda bekletilen numunelerin CBR değerleri karşılaştırılmıştır. 28 gün sonunda 4 gün su havuzunda bekletilen karışım numunelerinin geleneksel CBR değerinden %104-200 arasından daha yüksek taşıma oranları elde etmişlerdir.

Üstümkol (2006), endüstriyel atıkların yol üstyapısında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla mermer tozu, uçucu kül, fosfojips ve cam tozu gibi atıkları asfalt beton kaplama karışımlarına %0-%7 arasında değişen değerlerde filler malzemesi olarak kullanmıştır. Marshall stabilite numuneleri hazırlayarak optimum bitüm yüzdesini belirlemiş ve Marshall stabilite deneyi uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, kullanılan endüstriyel atık filler malzemelerin yüksek sıcaklık ve değişen kür şartlarında, asfalt betonu kaplamalarda taş tozu filler yerine kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Karagül (2007), yol dolgularında geogrid kullanarak zemini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, geosentetiklerin yüksek taşıma gücüne sahip, zeminle

kenetlenme ve sürtünme ilkesine göre çalışan türü olan geogridleri kullanmıştır. Yol inşaatlarında geogrid kullanmanın amaçları; zemin stabilitesini arttırmak, kullanılacak dolgu kalınlığını azaltmak ve asfalt üzerinde oluşacak çatlakları önlemek ya da oluşmasını geciktirmek şeklinde sıralamaktadır. Çalışmalarında 20 m derinliğinde kil zemin üzerine oturan bir yol dolgusunu sonlu elemanlar yöntemini içeren Plaxis programıyla 5 tip analiz yaparak incelemiştir. Analiz sonuçlarına göre, geogrid donatı kullanılan sistemde geogrid kullanılmayan sisteme göre 10.4 cm, dolgu kalınlığı 40 cm ve bunlara bağlı olarak maliyetlerde yaklaşık %41 oranında azalma olduğunu saptamıştır. Böylece geogrid kullanımının yolun stabilitesini artırıp yolun ömrünü uzatırken maliyet olarak da ekonomi sağladığı sonucuna varmıştır.

Tülek (2007), yaptığı çalışmalarda kimyasal atık alçı sınıfında yer alan fosfojips, kalsiyum tuzlu borojips, sodyum tuzlu borojips ve desülfójipsin kohezyonlu zeminlerde stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Atık alçılar zemine % 5, %10 ve %15 oranlarında ilave edilerek karışım numunelerini hazırlamıştır. Karışım numuneleri üzerinde LL, PL, kompaksiyon, 2 ve 7 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; kohezyonlu zemine %5 ve %10 kalsiyum tuzlu borojips ve sodyum tuzlu borojips, %10 ve %15 fosfojips ve desülfójips katkıları genel olarak plastisite indisini düşürmüş, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve su ihtiyaçlarını arttırdığını gözlemlemiştir. Ayrıca en iyi serbest basınç dayanımlarının (7 günlük kür süresi sonunda) sırasıyla; % 59 artışla %10 fosfojips katkısı, %46 artışla %5 kalsiyum tuzlu borojips katkısı, %43 artışla %10 sodyum tuzlu borojips katkısı, %62 artışla %15 desülfójips katkısı ile elde edildiğini belirlemiştir.

Motor (2007), bir bor cevheri olan kolemanitten borik asit üretimi esnasında ortaya çıkan borojips atığının alttemel tabakasında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmasını araştırmıştır. Başlangıçta çimento ile borojipsli numuneler hazırlamış, fakat suya dayanımı olmayan numuneler üzerinde serbest basınç deneylerini uygulayamamıştır. Daha sonra alttemel malzemesi ile borojips %10, %20, %30, %40, %50 ve %100 oranlarında karıştırılarak CBR ve serbest basınç deneylerini uygulamıştır. %20 borojips ilaveli numunelerin serbest basınç dayanım değerlerinin ve %7 borojips ilaveli karışımların CBR değerlerinin maksimum olduğunu görmüştür. Ayrıca %100 granüler malzeme kullanılarak yapılan bir yol alttemelinin yerine %50 borojips kullanılarak alttemel inşa etmek, tabaka kalınlığını 35 cm'den 30 cm'ye düşürmüş, böylece kullanılan agrega miktarının %43, yol yapım maliyetinin tüm yol için %12, alttemel için %50 azaldığını belirlemiştir.

Khattab (2007), kireçle stabilize edilmiş plastik zeminlerin uzun dönem mühendislik özelliklerini araştırmıştır. İlk olarak şişme potansiyeli %20 olan zeminin optimum kireç oranını Eades ve Grim yöntemi ve Hilland Davidson yöntemine göre ayrı ayrı belirlemiştir. Optimum kireç yüzdesini ikinci yöntemde bulunan %4 olarak kabul edip deneylerini bu kireç yüzdesi üzerinden yapmıştır. Uzun dönem dayanımı görmek için uyguladığı deneyler; ıslanma-kuruma, donma-çözünme, cıvalı porozimetre deneyi ve kusma testi deneyleridir. Deney sonuçlarına göre, %4 kireç katkılı numunenin kayma mukavemetinin ve geçirimsizlik katsayısının arttığını ve şişme basıncının azaldığını gözlemlemiştir.

Kavlak (2008), yaptığı çalışmada ülkemizde yaygın yatakları bulunan volkanik kökenli bir kayaç türü olan Isparta-Gelincik pomzasının atık kısmının yol taban zemininde stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. İlk olarak 0-3 mm boyutunda kullanılan pomza üzerinde dona karşı duyarlılık, sağlamlık (aşınma), likit limit, plastisite indisi ve CBR deneylerini yapmıştır. Deney sonuçlarına göre pomzanın plastik olmayan bir malzeme olduğu, dona karşı dayanımının ve aşınma değerinin yol taban zemini standartları içinde olduğu ve CBR değerinin standart değer olan %10'dan çok yüksek (%26.52) olduğunu belirlemiştir. Daha sonra yüksek plastisiteli kil olan zemine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında pomza ilave ederek mekanik stabilizasyon uygulamıştır. Sonuç olarak, zayıf zeminin standartlara uygun hale getirildiği en uygun karışım oranı %40 olarak belirlenmiştir.

Gündüz (2008), şişme potansiyeli yüksek killi bir zemine %1, %3, %5, %7, %10 ve %20 oranlarında tinkal atığı karıştırarak stabilizasyonda iyileştirme yapıp yapmadığını araştırmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre, şişme yüzdesinin katkı miktarının artmasıyla genel olarak artmakta olduğunu, katkı miktarı arttıkça numunelerin serbest basınç dayanımlarında azalma olduğunu görmüştür. Bu nedenle tinkal atığının yüksek plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda uygun bir katkı malzemesi olarak kullanılamayacağını tespit etmiştir.

Kılıç (2008), çimento katkısının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini incelemek amacıyla üç farklı bölgeden alınan kil numunelerine %6, %10, %15, %20 ve %25 çimento ilave etmiştir. Hazırladığı %6, %10 ve %15 çimento katkılı karışım numuneleri üzerinde veyn ve üç eksenli basınç deneylerine, %20 ve %25 çimento katkılı numunelerde ise 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç deneyine tabi tutmuştur. Deney sonuçlarına göre, drenajsız kayma mukavemetinin %10 çimento

yüzdesine kadar arttığı, bu değerden sonra çimento yüzdesinde artışla birlikte drenajsız kayma mukavemetinde meydana gelen artış oranının düşük olduğunu gözlemlemiştir.

Garaisayev (2008), yaptığı çalışmada yüksek plastisiteli CH sınıfı kil olan ve kimyasal analiz sonuçlarına göre kilin montmorillonit tipi mineral içerdiğini gözlemlemiştir. Arazideki imalat şartlarını temsil etmek için kilin yeterince ufalanmamış olması, topraklar halinde kireç ile karıştırılması ve kompaksiyon öncesinde yeterince su ile ıslatılmaması/bekletilmemesi gibi iki parametre seçmiştir. İyileşme potansiyelini kıvam limitleri, kompaksiyon özellikleri, serbest basınç mukavemeti ve şişme potansiyeli gibi farklı geoteknik parametreler üzerinden ölçmüştür. Zeminin kireç ihtiyacını belirlemek için Eades ve Grim pH deneyini uygulamış ve kili stabilize etmek için gerekli kireç yüzdesini %5-6 civarında olduğunu belirlemiştir. Saf kile %3, %6 ve %9 oranlarında kireç ilave ederek üç farklı ufalama derecesi ve iki farklı ön ıslatma süresi ile karışım numuneleri üzerinde deneyler yapmıştır. Deney sonuçlarına göre, LL ve PL azalmakta, %9 kireç ilavesi ile zemin plastisitesi tamamen kaybolmuş ve zeminin silt gibi davranmaya başladığını gözlemlemiştir. Ayrıca ön ıslatma yapılmasının mukavemet değerini arttırıcı bir etkisi olduğunu, %6 ve %9 kireç ilavesi ile de şişme basıncı ve şişme yüzdesinin tamamen sıfır olduğunu ortaya koymuştur.

Yılmaz ve Civelekoğlu (2009), bentonit kiline alçıtaşı ilavesiyle kilin mühendislik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla bentonit kilinin kimyasal analizi ve XRD analizlerini yapmışlardır. Standart kompaksiyon deneyi ile optimum su içeriği belirlenen bentonit kiline % 2.5, %5, %7.5, %10 oranlarında alçı taşı ilave etmişlerdir. Bu karışım numuneleri üzerinde kıvam limitleri, şişme yüzdesi, katyon değiştirme kapasitesi ve serbest basınç deneyi uygulamışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre, %5 alçıtaşı ilavesiyle önemli artışlar sağlandığını, %5'ten daha fazla alçıtaşı kullanılmasının çok önemli artışlar sağlamadığını gözlemlemiştirler. Fakat kireçten 2-3 kat daha ucuz olan alçıtaşının şişen zeminlerin iyileştirilmesinde/stabilizasyonunda iyi bir alternatif olabileceği sonucuna varmışlardır.

Başer (2009), şişen zeminlerde kireçtaşı tozu ve dolomitik mermer tozu atığı ilave ederek iyileşme sağlayıp sağlamadığını araştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışmalarda %85 kaolin ve %15 bentonit kili içeren zeminin ve katkı maddelerinin elek analizi, kıvam limitleri, büzülme limiti ve indisi ile 7 ve 28 günlük kür süresi sonundaki şişme oranı ve şişme yüzdesini incelemiştir. Yüksek plastisiteli kil sınıfı olan CH olarak belirlenen zemine kuru ağırlığının %5-30 arasında kireçtaşı tozu ve dolomitik mermer tozu atığı ilave

edilmiştir. Karışım numuneleri üzerinde Atterberg kıvam limitleri ve şişme yüzdesinin tayini için deneyler uygulanmıştır. Sonuç olarak, katkı maddelerinin miktarı arttıkça LL, PI ve SI azaldığını, şişme yüzdesi ile şişme oranının kür süresi ile azaldığını ve şişme yüzdesinin kireç tozu atığındaki azalmadan daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

Demirbaş (2009), şişen zeminlerin Bigadiç zeoliti (bor yan ürünü) kullanarak stabilizasyonda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla, laboratuvar ortamında şişen zemine %85 bentonit ve %15 oranında kaolin ilave edip kuru ağırlığının %10'u kadar su karıştırılmasıyla katkısız numuneyi elde etmiştir. Daha sonra hazırlanan bu katkısız numuneye % 5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında kum ve Bigadiç zeoliti, %1, %3 ve %5 oranlarında kireç ve değişik oranlarda kireç ve Bigadiç zeolitinin karıştırılması ile 18 adet numune hazırlamıştır. Bu karışım numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre, Bigadiç zeoliti ilavesi ile gerek tek başına gerekse kireç ile kombinasyonunda likit limit, plastisite indisi ve büzülme indisinde azalma, büzülme limitinde artma, şişme potansiyelinde ve şişme hızında azalmalar olduğunu gözlemlemiştir. Böylece Bigadiç zeolidinin şişen zeminlerin ıslah edilmesinde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Yıldırım (2009), geogrid donatılı stabilize dolgu tabakası ile kil zeminlerin iyileştirmesini incelemiştir. 60 cm çaplı rijit dairesel plaka kullanmıştır. Dolgu malzemesi üzerinde elek analizi, kompaksiyon ve kesme kutusu deneyi yapmıştır. Stabilize edilen dolgu tabakasına imal edilen 24 kazık yerleştirip, kazıklar arası mesafeyi 2.5 m olarak belirlemiştir. Sonuç olarak, stabilize dolgu tabakası içerisine yerleştirilen donatının kil zeminin taşıma gücünü arttırdığını saptamıştır.

Aydın (2010), kireç ve uçucu külün yüksek plastisiteli killerin geoteknik özelliklerini iyileştirme etkisini araştırmıştır. Yenikent (Ankara) yerleşim alanını temsilen 5 farklı yerde açılan araştırma çukurlarından numuneler alarak, bu örselenmiş zemin örneklerinin mühendislik özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Yüksek şişme potansiyeline sahip CH sınıfı killere kuru ağırlıkça % 1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında kireç, %5 ve %10 oranlarında uçucu kül ilavesi ile numuneleri şişme deneylerine tabi tutmuştur. Ayrıca kullanılan katkı maddelerinin serbest basınç dayanımına etkisini belirlemek amacıyla %5 ve %10 kireç ve uçucu kül katkılı numuneler üzerinde 1, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde serbest basınç deneyi yapmıştır. Deney sonuçlarına göre, serbest basınç deneylerinde uygulanan kür sürelerine göre daha fazla dayanım, 28 günlük kür süresi sonunda %7 kireç katkılı numunede %130 oranında yüksek dayanım elde etmiştir.

Buna ek olarak kireç katkılı kil numunelerin uçucu kül katkılı kil numunelerine nazaran daha fazla dayanım kazandırdığını gözlemlemiştir.

Al-Mukhtar (2010), aşırı plastik killi zemine kireç ilavesinde yüksek kür sıcaklığındaki (50°C) doğal zemin ve karışım numunelerinin davranış ve mineralojisini incelemiştir. Yüksek sıcaklığın puzolonik reaksiyonları hızlandırdığı, 50°C’ deki kür süresinde ilk gün boyunca kireç tüketimini arttırdığını gözlemlemiştir. %6’dan sonraki kireç ilavesinde X-Ray difraksiyonunda ilk CAH, 7.gün CSH bileşiklerini görmüştür. Bu yeni hidratların kür süresi ve kireç ilavesiyle artmaya devam ettiğini belirlemiştir. Böylelikle sıcak bölgelerde kireç ilavesinin yüksek plastisiteli killeri iyileştirmede faydalı olabileceği sonucunu ortaya koymuştur.

Kızılcılık (2010), yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevasına sahip killi zeminin hem sönmüş kireç hem de sönmemiş kireç kullanarak stabilize edip hangi oranda başarı sağladığını araştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda doğal su muhtevasında sönmemiş kireç ile hazırlanan numunelerin serbest basınç değerleri anlık, 1 ve 7 günlük deney sonuçları sönmüş kireç ile hazırlanan numunelerin serbest basınç değerlerine göre biraz daha düşük kalmasına rağmen 28 günlük kür süreleri sonunda daha iyi sonuç verdiğini belirlemiştir. Yaş CBR deneylerinde %5 sönmüş kireçli numuneler doğal numuneye göre %4’ten %23’e kadar artmıştır. Buna göre, mukavemetin artması ve deformasyonlardaki azalma sayesinde yol altyapısında kullanılabilecek kireç karışımı yol kesitlerinde küçültme ve buna bağlı olarak da maliyetlerde azalma sağlayacağı sonucuna varmıştır.

Şengül (2010), yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerinin kireç ile stabilizasyonunu, hücresel dolgu teknikleriyle iyileştirilmesini ve bu iki farklı iyileştirme yönteminin karşılaştırılmasını yapmıştır. Bu amaçla optimum su muhtevası %20 arttırılarak yüksek su muhtevalı hale getirilmiş killi zemine %5, %10 ve %15 oranlarında kireç katılarak CBR deneyi yapmıştır. Kireç stabilizasyonu veya hücresel dolgu güçlendirme tekniklerinin tek başlarına oturmaları ve düşey gerilmeleri belirgin bir şekilde azaltmadığı, yatak katsayısı ve taşıma kapasitesini istenilen seviyede arttırmadığını görmüştür. Her iki iyileştirme yönteminin tek başına yeterli performans sağlayamayacağını gözlemlemiş, yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerinin önce kireçle ıslah edilip sonra da hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmesi durumunda yatak katsayısı ve taşıma kapasitesinde istenilen artış, oturma, düşey gerilemeler ve dolu kalınlığında istenilen azalmaları sağladığını tespit etmiştir.

Bilge (2011), bentonit kiline %10 kireç ve %5, %10 ve %15 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül, zeolit ilave ederek bu katkıların zemin stabilizasyonundaki etkilerini araştırmıştır. Karışım numuneleri üzerinde özgül ağırlık, kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri uygulamıştır. Sonuç olarak, CH sınıfı yüksek plastisiteli killi zeminlerde kullanılan katkı maddelerinin zemin stabilizasyonunda alternatif çözüm olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Çetin (2011), yüksek plastisiteli killi (CH) zeminlerin yüzeysel zemin stabilizasyonunda uçucu kül, polipropilen ve kopolimer gibi alternatif malzemelerin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla zeminin katkısız halinin yanı sıra %5, %10 ve %15 uçucu kül, bu katkılı karışımlara %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 polipropilen katkısı, %0.50, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 kopolimer katkısı ilave etmiştir. Bu karışım numuneleri üzerinde Harvard minyatür kompaksiyon deneyi ve serbest basınç deneyi uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında kullanılan katkıların çok az etki ettiğini gözlemlemiştir. Maksimum serbest basınç mukavemeti değerinin sırasıyla %10 uçucu kül, %1.00 kopolimer ve %0.75 polipropilen katkılı numunelerden elde edildiğini görmüştür. Propilen ve kopolimer fiberlerin düşük maliyetleri nedeniyle zemin stabilizasyonunda mukavemeti artırma amacı ile kullanılmalarının faydalı olabileceği sonucuna varmıştır.

Çalık (2012), perlitin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Perlitin aktif CaO eksikliğinden dolayı puzolanik karakteristiği olmasına rağmen çimentolaşma yeteneğinin çok az veya hiç olmamasından dolayı, zemin stabilizasyonunda ikinci bir bağlayıcı olarak kireç kullanmıştır. Yüksek plastisiteli killi bir zeminin %10, 20, 30, 40 ve 50 perlit oranları ile kirecsiz ve %8 (optimum kireç oranı) kireçli karışımlar hazırlamıştır. En optimum çözümü %30 perlit ve %8 kireç içeren karışım numunesinden elde etmiştir. Ayrıca perlit ve kireç kombinasyonunun; zeminin işlenebilirlik, plasitite, geçirimsizlik, sıkışabilirlik, dayanım ve durabilite gibi özelliklerinin sadece perlite ya da sadece kirece göre daha çok iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Etminan (2012), yaptığı çalışmada yüksek ve düşük plastisiteli killi zeminlerin uçucu kül, yapay polimerler (polipropilen, kopolimer ve Vhp fiber) ile stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışmasında ilk olarak, iki farklı özellikteki zeminlerin mühendislik özelliklerini belirledikten sonra uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerini, üç farklı fiberin fiziksel özelliklerini ayrı ayrı saptamıştır. İki farklı zemin sınıfına farklı oranlarda katkı maddelerini ekleyerek oluşturulan karışım numuneleri üzerinde kompaksiyon, CBR

ve serbest basınç deneylerini uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, katkı maddelerinin ayrı ayrı veya uçucu kül ile karıştırılarak deneye tabi tutulmalarının her iki zemin sınıfı için de mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini görmüştür.

Cömert (2012), yol altyapısında endüstriyel atık kum, mermer tozu ve uçucu külün stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu üç atığın her birini %5~40 oranlarında iki farklı doğal zemine karıştırmıştır. Kürlenmiş ve kürlenmemiş karışım numuneleri üzerinde dinamik, fiziksel ve kimyasal deneyler uygulamıştır. Kimyasal, fiziksel ve mineral özelliklerini belirlediği karışım numunelerini yaş CBR, serbest basınç dayanımı ve esneklik modülü deneylerine tabi tutmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, doğal haldeki yaş CBR değeri CI sınıfı zemin için %8, CL sınıfı zemin için %13 olan plastik zeminlerin iyileştirilmesinde bu üç katı atığın zemin/atık oranı olarak 85/15 oranında kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Koteswara vd., (2012), şişen zeminlerin stabilizasyonunda potasyum klorür (KCL) ve pirinç kabuğu külünün kullanılabilirliğini araştırmıştır. Zemin sınıfı CH olarak belirlenen zemine ait parametrelerin belirlenmesi için gerekli deneyleri uygulamıştır. KCL çözeltisi %0~3 arasında, pirinç kabuğu külünü %0~16 arasında zeminin kuru ağırlığınca ilave ederek şişme basıncı ve şişme yüzdeleri belirlemiştir. KCL oranı arttıkça LL değerinde ve şişme basıncında azalma olduğunu, %0.5 KCL ilavesi ile 14 günlük serbest basınç dayanım değerlerinin %100'den fazla arttığını belirlemiştir. Ayrıca KCL + pirinç kabuğu külü karışımlarını 1, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabi tutmuştur. Sonuç olarak, 28 gün küresi sonunda %1 KCL + %12 pirinç kabuğu külü karışım numunesinin mukavemet değerinin %515 arttığını bulmuştur.

Murthy (2012), şişen zeminlerin stabilizasyonunda %3, %5, %7, %10 ve %12 oranlarında hadde tufalı (MS) kullanarak deneyler yapmıştır. Katkı oranının artmasıyla geçirimsizlik katsayısı azalmıştır. %15 MS kullanılarak yapılan CBR testi sonucunda CBR değeri katkısız numuneye göre 3 kat arttığını gözlemlemiştir. %12 MS ilavesiyle plastisite %35.71'den %30.60'a kadar düştüğünü belirlemiştir.

Mutman (2013), zeytinyağı atığı olan prinanın 50°C' de 1 saat süre ile yüksek ısı fırınında yakılmasıyla elde edilen prina külünün saf bentonit kilinin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini incelemiştir. İlk olarak saf bentonit kilinin kimyasal ve minerolojik analizini yaptıktan sonra 0.425 mm elekten geçirdiği prina külünü %1 artışlarla %10 oranına kadar zemin numunesine ekleyerek kıvam limitleri ve kompaksiyon deneylerini yapmıştır. Optimum su içerikleri belirlenen karışım numuneleri 0, 1, 7 ve 28 günlük kür

sürelerinin sonunda serbest basınç deneyine tabi tutmuştur. Serbest basınç deneyi sonucunda en yüksek değeri veren katkılı numuneye konsolidasyon deneyi uygulamıştır. %5 prina külü oranına kadar LL değeri azalmakta sonra tekrar artmakta olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca şişme basıncı değeri saf bentonit kilinde daha yüksek iken, %1 prina külü katkılı numunede % 50 oranında azaldığını belirlemiştir.

Yuan vd. (2013), polipropilen lifini %0,1, %0,2 ve %0,3, çimentoyu %6, %8 ve %10 oranlarında kumlu zemine ilave edip deneylere tabi tutmuşlardır. Lifin uzunluğundan çok içeriğinin dayanıma etkisi olduğunu gözlemlemiştir. %10 çimento + %0,1 tek uzunluklu 12 mm lif ilavesi ile 7 günlük kür süresi sonunda serbest basınç dayanımında %83'lük artış olduğunu incelemiştir. Optimum numune olarak 12 mm uzunluğunda lif içeriği %0,2 ve çimento oranı %6 olan karışım numunesini belirlemiştir.

Joel ve Edeh (2014), kırmızı kile %2~10 oranlarında çimento ve kalsiyum karbit (CaC_2) atığı ilave ederek karışım numuneleri üzerinde kıvam limitleri, CBR, serbest basınç testi yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre doğal numunenin PI değerinin %14'ten %5'e kadar (minimum değer) %10 çimento + %10 kalsiyum karbit ilavesi ile azaldığını belirlemiştir. Ayrıca %10 çimento + %10 kalsiyum karbit ilavesi 7 günlük kür süresi sonunda serbest basınç dayanımı 534 kN/m^2 'den 3157 kN/m^2 'ye, CBR değerleri %28'den %180'e kadar arttığını gözlemlemiştir. Kırmızı kil için temel ve alttemel malzemeleri olarak tavsiye edilen karışım oranlarını ise sırasıyla %8 çimento + %10 kalsiyum karbit ve %10 çimento + %10 kalsiyum karbit olarak ortaya koymuşlardır.

Vibhuti ve Ramesh (2014), kil oranı yüksek (>%35), pH'sı nötre yakın ve aşırı derecede şişen bir zemine pirinç kabuğu külü ve kireç ilave etmişlerdir. Her iki katkı malzemesini zeminin kuru ağırlığının %3, %5, %8 ve %10'u olacak şekilde karışımlar hazırlamışlardır. Bu karışımlara kıvam limitleri, kompaksiyon testi, CBR ve serbest basınç testi yapmışlardır. Buna göre %10 olan katkılı numunenin serbest basınç dayanım değeri kontrol numunesine göre 4 kat arttığını, %8 katkılı numunenin CBR değerinin doğal zemine göre %39 artış sağladığını gözlemlemiştir.

Deewal (2014), boksitten alüminyum üretimi sırasında atık olarak meydana gelen kırmızı çamurun stabilizasyonunda kireç ve alçıtaşının kullanılabilirliğini araştırmıştır. Kırmızı çamura %4, %8 ve %12 oranlarında kireç ilave etmiş, daha sonra bu kireçli karışımlara %1 oranında alçıtaşı eklemiştir. Toplam 7 farklı numune üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre serbest basınç dayanım değeri en yüksek olan numune %12 kireç +

%1 alçıtaşı karışımlı numune olduğunu bu karışım numunesinin de %7.9 ile en yüksek CBR değerini verdiğini belirlemiştir.

Bello vd. (2015), laterit zeminlerde CPA'yı (cassava peel ash= manyok kabuğunun külü) stabilizör olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Üç farklı bölgeden zemin örnekleri (L1, L2, L3) alarak bu zeminlerin tanımlamak ve sınıflandırmak için deneylere tabi tutmuşlardır. %2~10 oranlarında katkı malzemesi ilave ederek CBR ve serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçları göstermiştir ki katkı maddesi ilavesi ile karışım numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları artarken optimum su içerikleri azalmıştır. Yaş CBR değerlerinde %8 CPA katkılı L1 nolu zeminde, %10 CPA katkılı L2 nolu zeminde ve %4 CPA katkılı L3 nolu zeminde artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Rajakumaran (2015), zemin sınıfı CH-MI olan şişen zeminlerin çelik cürufu ve uçucu kül ile iyileştirilmesini incelemiştir. Zeminde %3, %6 ve %9 uçucu küllü karışımlara %4, %8 ve %12 oranlarında çelik cürufu ilave etmiştir. Bu karışımlara kıvam limitleri, permeabilite testi, serbest basınç testi uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre maksimum kuru yoğunluk çelik cürufunun ve uçucu külün artmasıyla azaldığını, uçucu kül + çelik cürufu + zemin karışımlarının geçirimsizlik katsayı değerleri çelik cürufunun artmasıyla azaldığını, dayanım değerlerinin ise katkı oranlarının artmasıyla belli bir değere kadar arttığı sonra azaldığını gözlemlemiştir. Dayanımda en yüksek değeri %4 çelik cürufu + %6 uçucu kül oranı ile elde edildiğinden dolayı optimum karışım yüzdesi olduğuna karar vermiştir.

Rajakumar ve Meenambal (2015), yaptıkları çalışmada şeker fabrikalarında işlenen şeker kamışının lifli atık ürünü olan şeker kamışı küspesinin külünü (BA) şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılıp kullanılmayacağını araştırmışlardır. Bu amaçla, zemin sınıfı CI olan bir zeminin Atterberg kıvam limitleri, kompaksiyon deneyi ile maksimum kuru birim hacim ağırlığı ile optimum su içeriği, serbest basınç deneyi, kuru ve yaş CBR deneylerini uygulamışlardır. Daha sonra %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında BA ilave ederek karışım numuneleri üzerinde kıvam limitleri, şişme basıncı, pH, toplam çözünen katı madde, kation değiştirme kapasitesi tayini yapmışlardır. Sonuç olarak; katkı oranı arttıkça PI azaldığını, şişme basıncı katkı oranının artmasıyla %50'den %30'lara kadar düştüğünü belirlemişlerdir. Toplam çözünen katı madde miktarının katkı miktarının artmasıyla arttığını böylelikle bu katkı maddesinin bağlayıcılık özelliği olduğunu ortaya koymuşlardır.

1.2.2. Kolemanit ile İlgili Literatür Taraması

Erdoğan vd. (1998), iki farklı kolemanit atıklarını (kaba atık (CW) ve çamur (S)) Portland ve traslı çimentolara %1, %3, %5 ve %7 oranlarında ilave ederek çimento karışımları üzerinde fiziksel testler yapmışlardır. Bu testler priz süresi tayini, hacimsel genleşme, eğilme ve basınç dayanım testleridir. Deney sonuçlarına göre tüm numunelerin (%7 CW + %93 Portland çimentosu, %7 S + %93 Portland çimentosu hariç) priz süreleri ve tüm numunelerin basınç dayanımlarının standartların içinde kaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca Portland çimentolu karışımların eğilme dayanımlarının traslı çimentolu karışımların eğilme dayanımlarından daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Boncukçuoğlu vd. (2002), borik asit üretiminde kolemanit mineralinin sülfirik asitte çözündürülmesi sırasında meydana gelen atık olan borojipsin Portland çimentosu üretiminde priz geciktirici olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Bu amaçla, çimento üretmek için borojips etüvde kurutulduktan sonra klinkere %2.5, %5, %10, %15, %25, %40 ve %50 oranlarında ilave etmişlerdir. Daha sonra yapılan deneyler 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutmuşlardır. Borojipsli çimento ile hazırlanan betonun normal alçıtaşıyla hazırlanan çimentoya göre daha iyi mekanik sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. Çimentodaki borojips oranının artmasıyla serbest basınç mukavemet değeri ve çekme dayanım değeri düşmüştür. Çimentoya priz süresinin gecikmesi için %10'a kadar borojips ilavesi edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Targan vd. (2003), doğal puzolan, kolemanit atığı, kömür uçucu külü ve kömür taban külü gibi katkı maddelerin çimento ve beton üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla basınç dayanımı, eğilme dayanımı, hacim genleşmesi ve priz süresi testleri uygulamışlardır. Eğilme ve basınç dayanım testlerini 2, 7, 28, 60 ve 90 günlük kür süreleri sonunda yapmışlardır. Portland çimentosuna %5~30 arasında doğal puzolan, %4 kolemanit atığı, %10 kömür uçucu külü ve kömür taban külü ilavesi ile 30 farklı karışım kombinasyonu oluşturmuşlardır. Çimento karışımlarında doğal puzolan kullanımı son priz süresini (katılaşma süresi sonunda) genellikle arttırmıştır. Bunun yanı sıra doğal puzolanın kolemanit ile olan birleşimlerinde 28 günlük kür süresi sonunda önemli bir geciktirici etki yaptığını belirlemişlerdir. Portland çimentosuna %10 ve %15 doğal puzolan ilavesi (kolemanitin sabit olduğu durumda) 60 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesine göre eğilme dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Uslu ve Arol (2004), yaptıkları çalışmada kırmızı tuğla üretiminde katkı maddesi olarak bor bileşikleri açısından zengin olan atık kil kullanmışlardır. Tuğlanın bileşeni atık kilin ağırlığının %10~100 içerecek şekilde numuneleri hazırlayıp 1 hafta etüvde bekletmişlerdir. Her bir numune etüvden sonra 4.5 saat süreyle 700°C, 800°C ve 900°C’de fırınlanıp ardından yavaşça soğutarak renklerini ve görünüşlerini gözlemlemişlerdir. Buna göre, %30’a kadar atık kil ilavesi çekme dayanımı üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. 900°C’ nin altında bulunan pişirme sıcaklıklarında eğer atık kil katkı olarak kullanılırsa kabul edilebilir kalitede tuğlalar üretilebileceği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Kavas (2006), kil ve konsantratör tesislerinden borun ince atıklarının kırmızı tuğla üretiminde eritken olarak kullanımını araştırmışlardır. %5, %10 ve %15 oranlarında katılan katkı maddeleri ile 6 farklı seti üç farklı sıcaklık için oluşturmuşlardır. Eğilme ve basınç testi, su absorpsiyonu, zararlı kireç ve magnezya testi gibi testler uygulamışlardır. %15 kil atığı + %85 kırmızı tuğla çamuru ve %15 ince atık + %85 kırmızı tuğla çamuru numunelerinde en iyi eğilme ve basınç dayanım değerleri elde etmişlerdir.

Mazura ve Levistski (2008), sırlanmamış sırların kalitesini iyileştirmek için kolemanitin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kaplamanın içine %3’ten %15’e kadar değişen oranlarda kolemanit ilave ederek çeşitli testler uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, kolemanit kullanımı sıran erime sıcaklığını fazlasıyla düşürdüğünü, %6’dan fazla kolemanit kullanımı kaplamanın parlaklığını ve beyazlığını arttırdığını, %12’den fazla kolemanit kullanımı sıran aşırı fırınlanmasına sebep olduğunu gözlemlemişlerdir.

Şahin (2008), yaptığı çalışmada kolemanit atığını tuğla kiline ham ve kalsine olarak farklı oranlarda (%5~45) ilave ederek tuğla bünyesine etkilerini incelemiştir. Bun incelemeler sonucunda, tuğla bünyesinde ham kolemanit atığının parçalanmalara neden olduğu için kullanımının uygun olmadığı, kalsine kolemanit atığının ise mukavemeti arttırdığı, su emmeyi azalttığı için kullanıma uygun olduğunu belirlemiştir.

Gençel (2009), bor içerikli kolemanitin beton agregası olarak kullanılıp betonun fiziksel ve mekanik özellikleri ile birlikte radyasyona karşı bir kalkan olarak kullanılabilirliğinin araştırmıştır. Standartlara göre yapılan taze ve sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona kolemanit ilavesi ile betonun fiziksel ve mekanik özellikleri azalma gösterdiği ve kolemanit katkılı betonun zırhlama performansının nötronlara karşı daha etkin olduğunu belirlemiştir.

Binici vd. (2010), barit, kolemanit, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza içeren betonlarının dayanım ve dayanıklılığını araştırmışlardır. Bu amaçla çimento ile ince

agreganın yerine söz konusu malzemeleri ilave ederek kontrol numunesi ve katkıli betonların basınç dayanımı, sülfat dayanımı, aşınma dayanımı, donma-çözülme direnci ve permeabilite özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre, kolemanitin basınç dayanımını arttırdığı ve beton prizini engellediğini belirlemişlerdir.

Sevim (2010), kolemanit atığı ve Portland çimentosu içeren 5 farklı beton karışımı hazırlayarak basınç dayanımları 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonunda ölçmüştür. Sonuçlar göre %3 ve %5 kolemanit atığı içeren numunelerin kontrol numunesinden daha yüksek dayanım değerleri elde ettiğini gözlemiştir. Ayrıca kolemanit atığı yaklaşık %37 harcın kurulma-büzülmesini azaltmıştır. Buna göre %3 ve %5 kolemanit atığı kullanmanın büzülmeyi azaltıcı etki yaptığını saptamıştır.

Coşansu ve Coğun (2012), aşındırıcılı su jetlerinde kolemanit atığı tozunu aşındırıcı olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Su jetlerinde çoğunlukla kullanılan garnet tozuyla kolemanit atığı tozunu karşılaştırmak için garnet tozu da kullanmışlardır. Bu kapsamda 5 farklı malzeme (cam, mermer, alüminyum alaşımlı malzeme, titanyum alaşımlı malzeme ve kompozit malzeme) üzerinde 4 farklı garnet tozu ve kolemanit atığı tozu birleşimleri kullanmışlardır. Sonuç olarak, kolemanit tozu mermer, alüminyum alaşımlı malzeme ve kompozit malzeme üzerinde başarılı olduğunu ortaya koymuşlardır. Kolemanit tozunu yüksek oranda kullanmak daha yüksek makine maliyetine sebep olmasına rağmen kolemanit tozunun aşındırıcılı su jetlerinde alternatif toz olarak garnetin veya daha yüksek sertliğe sahip tozların kullanımının yerine uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Yılmaz ve Özaydın (2013), zemin sınıfı CH olan yüksek plastisiteli zemine %1, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında Portland çimentosu ve kolemanit atığı ile iyileştirilmiş belit çimentosu kullanarak stabilizasyonda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Belit çimentosunu kolemanit ile iyileştirmesindeki amaç C_3S oluşumunu engelleyip daha aktif ve daha stabil bir belit aşaması olan C_2S 'yi elde etmektir. Beliti iyileştirirken sıcaklık $1400^{\circ}C$ ' den $1325^{\circ}C$ ' ye düşmüş, CO_2 salınımını %25 azalttığını belirlemişlerdir. Bu da enerjiden yaklaşık olarak %8.6 oranında tasarruf edildiğini göstermiştir. Hazırlanan karışım numuneleri üzerinde serbest basınç testi, drenajsız üç eksenli kesme deneyi, sekant modülü testi yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre, %5'ten az çimento ilavesi dayanım üzerinde az bir etki ettiği ve her iki karışım türü için de sünek kırılma olduğunu belirlemişlerdir.

Eyyüboğlu (2013), üç farklı B_2O_3 oranlarına (%5.56, %10.47 ve %15.89) sahip kolemanit konsantratör atığını çimento katkı malzemesi olarak kullanmayı amaçlamıştır.

Kolemanit konsantratör atıkları ile klinker ve alçıtaşı kullanarak kompoze çimento karışımları oluşturmuştur. Klinker ve alçıtaşına ağırlıkça %1, %3, %5 ve %10 oranlarında, farklı B_2O_3 oranlarına sahip kolemanit konsantratör atığı ilave etmiştir. Ürettiği toplam 13 çeşit çimentonun kimyasal ve fiziksel analizlerini yapmıştır. Yaptığı deney sonuçlarına göre, B_2O_3 oranlarının farklı olması genellikle deney sonuçlarına önemli ölçüde etki etmediğini, katkı miktarının değişmesinin daha çok etkili olduğunu gözlemlemiştir.

Korçak (2014), kolemanit atıklarının doğal alçıtaşı yerine çimento üretiminde kullanılmasını ve çimentonun performans özelliklerindeki değişiklikleri incelemiştir. Bu amaçla, CEM I çimentosu klinkerine %3, %5, %7 ve %10 oranlarında kolemanit atığı ilave ederek çimento numuneleri hazırlamıştır. Bu numunelere standart kapsamında analizler yapmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, kolemanit katkısının çimentoda priz süresini arttırdığı, basınç dayanımını azalttığını belirlemiştir. Kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde çimentoda kolemanit atığının artması ile SO_3 oranının da arttığını gözlemlemiştir. Yüksek oranlardaki sülfatın zararlı etkisi bertaraf etmek için kolemanit katkılı çimentoya yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi ek katkı maddesi ilave edilebileceğini tespit etmiştir. %5 kolemanit atığının çimento içerisinde doğal alçıtaşına alternatif olarak priz süresini geciktirici katkı maddesi olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Yaltay (2015), kolemanit katkılı çimento ile üretilen hafif betonun fiziksel özelliklerini araştırmak amacıyla yaptığı çalışmada %0, %0.4, %0.6, %0.8, %1 ve %2 oranlarında çimento ile ikame edilen kolemanit katkısı ile hafif beton numuneleri üretmiştir. Beton karışımında iri ve ince agrega olarak pomza kullanmıştır. Beton numuneleri 28, 56 ve 360 gün kürlenmiş ve numuneler üzerinde porozite, kılcal su emme, ultrases hızlı geçiş, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı deneyleri yapmıştır. Deney verilerine göre, 360 günlük kür süresi sonunda kapiler su emme ve porozite değerlerinin sırasıyla %23.13-43.76 ve %9.6-23.8 seviyelerine düştüğünü, basınç dayanımında kolemanit katkısının özellikler ileri kür sürelerinde iyileşmeler gösterdiğini gözlemlemiştir.

1.3. Amaç ve Tezin Organizasyonu

Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda dünyadaki toplam rezervin yaklaşık %72'sinin ülkemizde bulunduğu bor madeninin bir minerali olan kolemanitin

stabilizasyonda kullanılmadığı görülmüştür. Bu amaçla bu tez kapsamında, Kütahya ili Emet ilçesinde yer alan Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen kolemanit atığının tek başına ve kireç ile birlikte mühendislik açısından problemli Gümüşhane ilinin Köse ilçesinde bulunan kil ocaklarından tedarik edilen doğal malzemenin stabilizasyonunda kullanılıp kullanılamayacağı ve stabilizasyonda en uygun performansı hangi katkı oranı ya da oranlarında gösterdiğinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Bu amaçlara uygun olarak Kaya Mühendislik Zemin-Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda deneysel bir yüksek lisans çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Emet Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen farklı boyutlardaki kolemanit atığı ile tek başına ve kireçle belli oranlarda karıştırılarak bu zeminin taşıma gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Zemine hangi granülometrideki kolemanit atığının daha iyi iyileştirme sağlayacağını belirlemek için iki farklı kolemanit boyutu ile zemin deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre öğütülmüş kolemanit atığının CBR değeri üzerindeki iyileştirmesi daha fazla olduğundan kireç ile hazırlanan karışımlarda da kirece ek olarak öğütülmüş kolemanit kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca yol projelendirmesinde daha çok dikkate alınan CBR değerlerine bakıldığında deney sonuçlarına göre % 20 oranında öğütülmüş kolemanit atığının CH sınıfı zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Yüksek lisans çalışmasında hedeflenen amaçlar ve tez içeriği ilgili detaylar, tez konusu ile yakından ilişkili olan zemin stabilizasyon yöntemlerine ait kapsamlı bilgiler, bor madeninin rezervi, kullanım alanları hakkında ayrıntılı bilgiler ve özellikle son 10 yılda zemin stabilizasyonu ve kolemanit ile ilgili literatür taraması Bölüm 1'de; deneysel çalışmanın metodolojisi ile ilgili ayrıntılar (laboratuvar testleri ile ilgili prosedürler, numune hazırlama, saklama ve isimlendirme vb.) ve çalışmada kullanılan materyallerle (doğal malzeme, kireç ve kolemanit atığı) ilgili bilgiler Bölüm 2'de; kolemanitin tek başına ve kireçle kullanılmasının etkilerini ortaya koyan deneylere ait sonuçlar, deney parametrelerinin değişim grafikleri, çalışma bulgularının irdelenmesi Bölüm 3'te; bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar ve bundan sonraki akademik çalışmalara kaynak olması amacıyla sunulan öneriler Bölüm 4'te ve tez kapsamında yararlanılan kaynaklar Bölüm 5'te olacak şekilde bu yüksek lisans tezi organize edilmiştir.

1.4. Karayolu

Ülkemizde karayolu yapımına Cumhuriyetin ilk yıllarında, dönemin en çağdaş teknolojisi olarak kabul edilen demiryolu yapımına ağırlık verilmiştir. Ancak demiryolunun tek başına yeterli olmadığı, ulaşım için karayoluna ihtiyaç olduğu görülerek 1929 yılında Bayındırlık Bakanlığı'na bağlı Şose ve Köpüler Reisliği kurularak yol yapım çalışmalarına başlanılmıştır. Uzun süren savaş döneminin getirdiği sıkıntılar, ekonomik kriz ve II. Dünya Savaşı'ndan sonra, karayolu çalışmaları için daha fazla yeniliğe ihtiyaç duyulmuş ve bu sebeple 1950 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü kurularak karayolları ile ilgili tüm çalışmalar bu kuruluşa devredilmiştir.

Karayolu, önceden belirlenen geometrik standartlara göre belirlenen bir güzergâh boyunca, doğal zeminin istenilen yüksekliklere getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanması amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Karayolu yapısı, görevi, yapım sırası ve özellikleri açısından alt ve üst yapı olarak incelenebilir (İlcalı vd, 2001).

1.4.1. Karayolu Altyapısı

Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki yolun esas taşıyıcı kısmına yol altyapısı adı verilir. Altyapı, yolun dolgu kesimlerinde dışarıdan getirilen toprak ile oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Ancak yarma kesimlerinde tesviye yüzeyini oluşturmak amacıyla yapılan dolgu çalışmaları da altyapı kapsamına girmektedir. Ayrıca; köprü, viyadük, tünel, menfez, drenaj tesisleri ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı kapsama girmektedir.

Altyapının görevleri; istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, üstyapı tarafından istenilen yükleri daha geniş bir alana yaymak ve az da olsa yolu dış etkilere korumaktır. Bu görevleri yerine getirebilmesi için trafik yükleri, don ve su etkilerine karşı dayanıklı olması gerekir. Altyapının oluşturulmasında, bitkisel toprak, çürük zemin ve sıkıştırmaya elverişli olmayan zeminlerin kullanılmaması gerekir. Bu nedenle altyapıyı oluşturan zemin özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir (İlcalı,1988).

1.4.2. Karayolu Üstyapısı

Üstyapı, yolun ekonomik ömrü boyunca üzerinden geçecek olan trafiğin büyük deformasyonlara, çatlamalara maruz kalmadan çevre ve iklim şartlarının etkisine dayanıklı olarak taşıyabilecek şekilde tasarlanıp inşa edilen kısım olarak tanımlanabilir. Üstyapı, sağlam bir altyapı üzerine yerleştirilen çoğunlukla alt temel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısındadır.

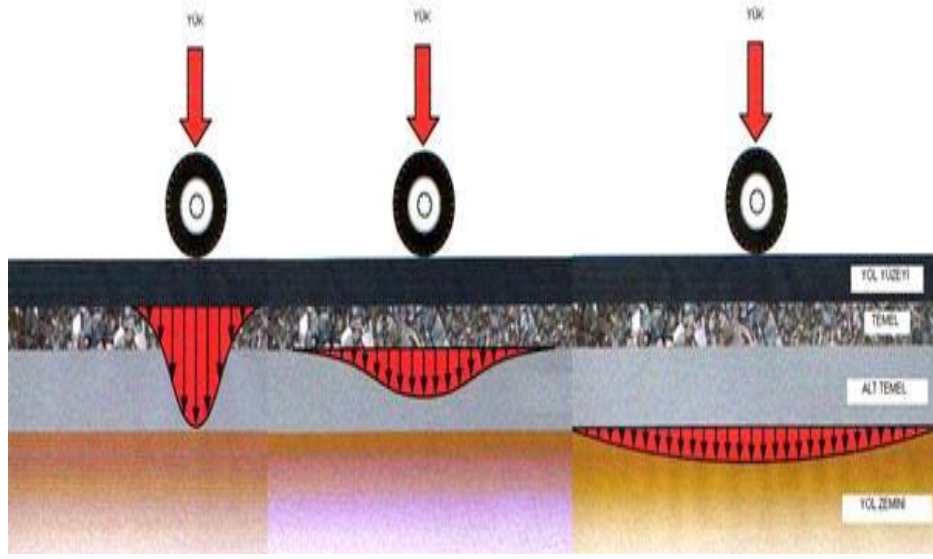
Kaplamalar, trafik ve çevre etkilerine karşı koyan ve trafik yüklerini zemine ileten yapılardır. Trafik yüklerini zemine iletme kabiliyetleri her bir tabakanın yük dağıtma özelliğine bağlıdır. Bu nedenle kaplama kalınlığı, zeminin taşıma gücüne ve kaplamanın tipine göre değişir.

Bir karayolu üstyapısı, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olarak iki gruba ayrılmaktadır. Uygun üstyapı tipi seçilirken; taban zemini, trafik, çevre şartları ve ekonomik faktörler dikkate alınmaktadır.

1.4.2.1. Esnek Üstyapılar

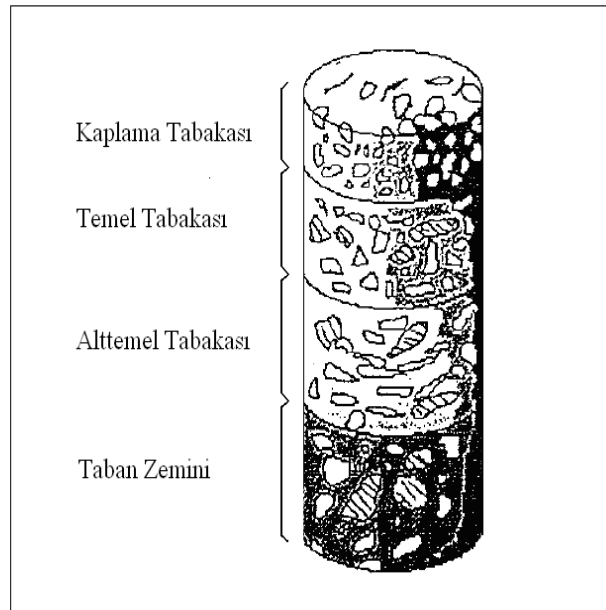
Esnek üstyapı, asfalt kaplama tabakalarıyla oluşturulan, en alttan en üste doğru nicelik ve taşıyıcılık bakımından daha iyi malzemelerden inşa edilen, stabilizesi, adezyon, dane sürtünmesi ve kohezyon gibi faktörlere bağlı olup tabakalar şeklinde inşa edilen bir üstyapıdır.

Esnek üstyapıda, trafik yükleri dağılımı alttemel, temel ve kaplama tabakalarından geçerek taban zeminine iletilmesi şeklinde olmaktadır. Yani tekerlek yükleri altında üstyapı deforme olur ve her tabaka üzerine gelen yükleri bir alt tabakaya yayarak iletir. Böylece taban zeminine ulaşan yük kısmen daha büyük bir alana yayılmış olur.



Şekil 1.1. Esnek üstyapı tabakalarındaki gerilme dağılışı

Bir esnek üstyapı denildiğinde sıkıştırılmış taban zemini üzerine inşa edilen ve dingil yüklerini taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde aktaran aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası ve alttemel tabakalarından oluşan bir üstyapı anlaşılmalıdır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Yol üstyapısı tip enkesiti (Ağar vd., 1998).

Taban zemini ile temel tabakası arasına yerleştirilip sıkıştırılmış taneli malzeme veya uygun bir bağlayıcı malzeme ile stabilize edilmiş malzeme tabakası alttemel tabakasıdır (Umar ve Ağar,1991). Alttemel tabakasının görevleri; zeminlerin don kabarması veya şişme ve büzülme gibi hacim değişimlerine karşı tampon bölge görevi yapmak, kaplama altında gerekli drenajı sağlamak, kaplamanın taşıma gücünü arttırmak, trafik yüklerinden meydana gelen gerilmelerin taban zemini üzerine yayılmasını sağlamaktır. Alttemel tabakası için granülometri şartları Tablo 1.1.'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Alttemel tabakası için granülometri şartları (KTŞ, 2006).

ELEK AÇIKLIĞI		TİP-A	TİP-B
mm	inç	% GEÇEN	% GEÇEN
75	3	100	
50	2	-	100
37.5	1 1/2	85 - 100	80 - 100
25	1	-	60 - 90
19	¾	70 - 100	-
9.5	3/8	45 - 80	30 - 70
4.75	No.4	30 - 75	25 - 60
2.00	No.10	-	15 - 40
0.425	No.40	10 - 25	10 - 20
0.075	No.200	0 - 12	0 - 12

Ayrıca malzemenin 0.075 mm eleği geçen kısmı 0.425 eleği geçen kısmının 2/3'ünden fazla olmayacaktır (KTŞ, 2006).

Alttemel inşası sırasında kullanılacak malzemelerin fiziksel özellikleri Tablo 1.2.'de verilen limitlere uygun şekilde olmalıdır.

Tablo 1.2. Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri (KTŞ, 2006).

2 mm elek üzerinden kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp, Maksimum %	20	TS - 3655 AASHTO T - 104
---	----	-----------------------------

Tablo 1.2'nin devamı

Aşınma kaybı (Los Angeles) Maksimum %	50	TS - 3694 AASHTO T - 96
Likit Limit, Maksimum %	25	TS - 1900 ASSHTO T - 89
Plastisite İndeksi, Maksimum %	6	TS - 1900 AASHTO T - 90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, Maksimum %	<u>İri Malzeme</u> (4.75 mm elek üstü) 2 <u>İnceMalzeme</u> (4.75 mm elek altı) 2	ASTM C -1 42
Organik Madde %	1	AASHTO T – 194

Modifiye Proktor Deneyi (AASHTO T193, TS 1900) ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığın %97'sine kadar sıkıştırılan numunelerin yaş CBR değerleri Tip-A için minimum %30, Tip-B için ise minimum %50 olacaktır.

Alttemel malzemesi, tesviyesi tamamlanarak hazırlanmış taban zemini üzerine minimum kalınlığı 20 cm'yi geçmeyecek şekilde tabakalar halinde serilip sıkıştırılmalıdır.

Temel tabakası, bağlayıcısız ya da bağlayıcı bir madde ile işlem görmüş olan belirli granülometrideki malzemelerin farklı tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla işlem görmüş malzeme tabakasıdır. Ana görevi; üstyapının yük taşıma kapasitesini arttırmaktır. Ayrıca, trafik hareketlerinden doğan yüksek kayma gerilemelerine karşı koyabilecek, drenaja yardımcı olabilecek ve don olaylarına karşı da koruma sağlayabilecek özelliklere sahip olmalıdır (İlıcılı vd, 2001).

Temel tabakasını trafik yüklerinden doğan yüksek kayma gerilemelerine karşı koyabilecek, yüksek nem oranında dengede kalabilmeli, drenaja yardımcı olmalı ve don etkisine karşı da ayrıca bir koruma sağlamalıdır (Umar ve Ağar, 1991). Bu nedenle

kullanılacak olan malzeme tipine göre Karayolları Teknik Şartnamesi'nde belirtilen temel tiplerinden birisi kullanılabilir.

Bu temel tipleri;

a) Granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf veya kırmataş ile ince malzeme kullanılarak şartnamede verilen gradasyon limitleri içerisinde hazırlanıp su ile karıştırılarak, taşıma gücü yeterli taban veya alttemel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. Minimum sıkışma modifiye proktorda %98'i sağlamalıdır. Minimum granüler temel kalınlığı 15 cm olmalıdır.

b) Plent-miks temel tabakası; kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere üç ayrı tane boyutlu malzemenin su ile karıştırılıp bir veya birde fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. Modifiye proktor ile minimum sıkışma %100 sağlanmalıdır. Plent-miks temel kalınlığı minimum 15 cm olmalıdır.

c) Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası; iyi derecelenmiş bir gradasyona sahip agregaya belirli oranda plentte çimento katarak optimum su içeriğinde karıştırarak bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. Çimento bağlayıcılı temel kalınlığı minimum 20 cm olmalıdır.

d) Penetrasyon makadam temel tabakası; alttemel tabakası üzerine şartnamede belirtilen gradasyon limitlerini sağlayan kaba agreganın serilip üzerine AC uygulanması ve ince malzemeye sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

e) Rolled asfalt temel tabakası; asfalt çimentosu, filler, ince ve kaba agreganın belli gradasyonlarda karıştırılıp sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

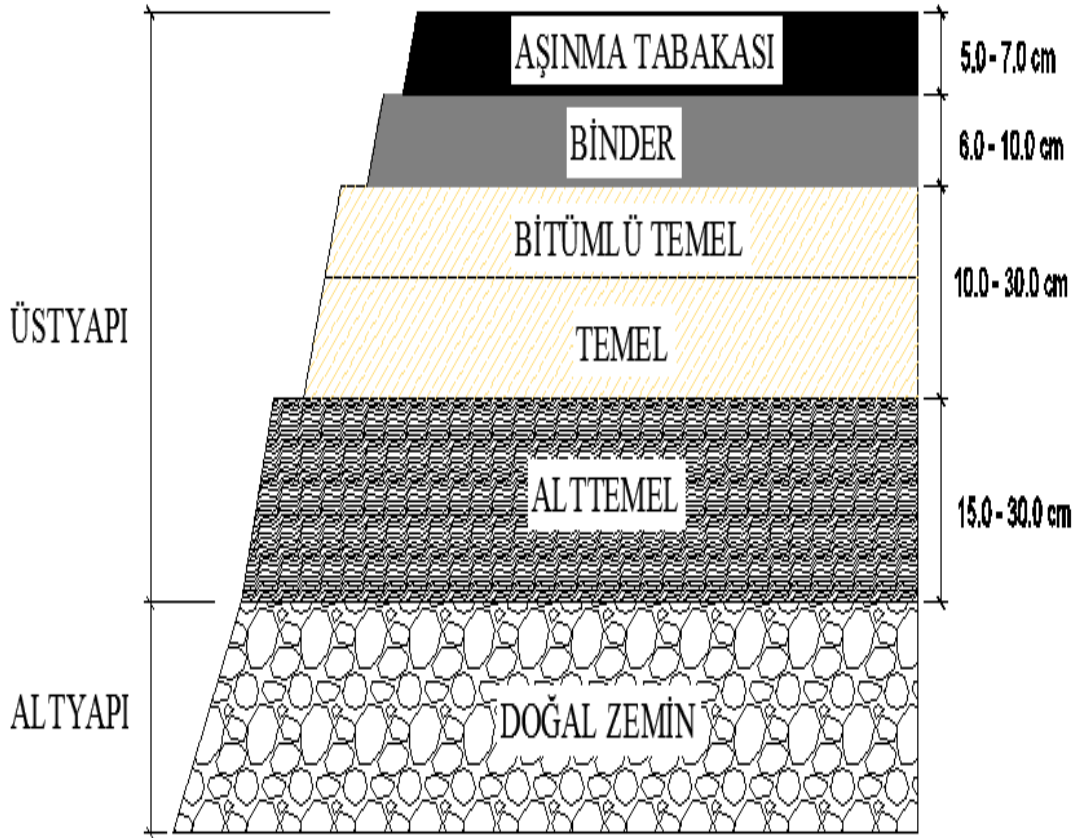
f) Bitümlü makadam temel tabakası; kırılmış taş ve cürufun ince agrega ve AC ile karıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

g) Bitümlü temel tabakası; kırılmış ve elenmiş kaba ve ince agrega, mineral filler ve bitüm karışımlarından oluşturulan tabakadır. Bitümlü temel kalınlığı trafik yüküne bağlı olarak genellikle 8-10 cm olmalıdır.

Esnek kaplamaların en üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, taşıtlara sürüş konforu ve emniyeti sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak, yapıya sızan yüzeysel su miktarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilemelerini azaltmak amacıyla yolun standardına göre temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır.

Kaplama tabakası, trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek olması nedeniyle üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olacak şekilde teşkil edilmelidir. Kaplama tabakasının kalınlığı arttıkça yolun trafik yüklerine karşı direnci de artar. Kaplama tabakası yüksek standartlı yollarda aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka olmak üzere bitümlü sıcak karışımlar halinde, düşük standartlı yollarda tek kat veya çift kat sathi (yüzeysel) kaplama olarak yapılmaktadır.

Tipik bir esnek üstyapı kesiti ve ortalama tabaka kalınlıkları Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 1.3. Tipik bir esnek üstyapı kesiti ve ortalama tabaka kalınlıkları

1.4.2.1.1. Esnek Üstyapılarda Taban Zemini

Yol üstyapısı ve banketlerin oturduğu altyapı zeminin üst yüzeyi olan tesviye yüzeyi altında kalan, sıkıştırılmış doğal zemin ya da dolgu malzemesinden oluşan tabakadır. Üstyapıya temel görevi gördüğü için yapısal olarak en önemli tabakadır.

Bir esnek üstyapının davranışı, taban zeminin fiziksel özellikleri ve taşıma gücü ile doğrudan ilişkilidir. Üstyapı kalınlığını arttırmak suretiyle taşıma gücü yeterli olmayan taban zemininin etkisini azaltmak mümkün olsa bile uygun bir üstyapı davranışının sağlanılabilmesi için taban zemininin de yeterli şartlarda inşa edilmesi gerekmektedir.

Taban zemini, zemin cinsine ve sıkıştırma ekipmanının kapasitesine uygun kalınlıklarda tabakalar halinde serilip, sıkıştırılmalıdır. Tabaka kalınlığı, killi zeminlerde genellikle 20-25 cm, granüler zeminlerde 30-40 cm düzeyindedir. Toprak yarmalarda tesviye yüzeyi altındaki 20 cm'lik kesim kabartılıp optimum su muhtevasında maksimum yoğunluğa erişinceye kadar sıkıştırılmalıdır. Kaya yarmalar tesviye yüzeyinin 15 cm altına kadar kazılıp bu kesim uygun dolgu malzemesi ile doldurulup düzeltilmelidir. Bu malzeme de optimum su muhtevasında maksimum yoğunluğa erişinceye kadar sıkıştırılmalıdır. Taban zeminlerinin maksimum kuru yoğunluğu 1.45 t/m^3 ten az olmamalı ve yer altı su seviyesi tesviye yüzeyinin en az 100 cm altında tutulmalıdır. Bunu sağlamak için uygun yer altı dreanajı uygulanmalıdır (Umar ve Ağar, 1985).

Su, taban zeminlerinin taşıma gücünün azalmasında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle suyun etkili ve kalıcı bir drenaj sistemiyle uygulama sırasında ve yolun ömrü boyunca taban zemininden ve üstyapı tabakalarının tümünden uzaklaştırılması gerekmektedir. Yol üstyapıları aşırı don kabarması ve tabanın donma-çözülme mevsiminde taşıma gücünün azalmasıyla zarar görebilmektedir. Don olayının taşıma gücüne olan etkisini azaltmak için üstyapı taban kalınlığı, zeminin dona karşı duyarlılığı, yer altı su seviyesinin üstyapı yüzeyinden ölçülen derinliği gibi etkenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Yol yapımında malzeme kalitesi, yukarıdan aşağıya doğru inildikçe azalmaktadır. Fakat trafik yükleri üstyapıda kaplama, temel ve alttemel tabakalarından yayılarak, en son taban zemini tarafından taşındığı için kullanılan zeminin özellikleri son derece önem arz etmektedir. Bu nedenle taban zemini özelliklerinin yol standartlarında olması gerekmektedir. Yol taban zemininde kullanılacak malzemenin taşıma gücü, dona hassaslığı, granülometrisi gibi özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak

da zeminin hangi zemin sınıfına girdiği, zeminin zayıf veya sağlam zemin sınıfında olup olmadığı belirlenmelidir.

Karayolları Genel Müdürlüğü'ne göre; zayıf zeminler işletme süresince yol üstyapısında ve yol yapılarında (dolgu, yarma, köprü, viyadük, temel vb.) problem çıkaracağı tespit edilen zeminlerdir. Üstyapıya temel görevi gören taban zemininin bu bakımdan bazı kriterlerde olması gerekmektedir. Esnek üstyapılarda taban zemininde kullanılacak malzemelerin özellikleri Tablo 1.3'te verilmiştir.

Tablo 1.3. Esnek üstyapılarda taban zemininin özellikleri (KTŞ, 2006).

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
0.0075 mm den geçen, %	< 50	TS 1900 AASHTO T - 11
Likit Limit (LL), %	< 40	TS 1900 AASHTO T - 89
Plastik İndeksi (PI), %	< 15	TS 1900 AASHTO T - 90
Yaş CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı), %	> 10	TS 1900 AASHTO T - 193

1.5. Stabilizasyon

Zeminlerin dirençlerini arttırmak veya belirli koşullarda sahip oldukları direnci her türlü hava koşullarında korumak, aynı zamanda değişken yük ve iklim koşullarının zararlı etkileri altında uzun zaman dayanacak hale getirilmelerini sağlamak amacıyla zemine herhangi bir katkı malzemesi karıştırmadan ya da çeşitli katkı malzemeleri karıştırarak kararlı hale getirilmesi işlemine stabilizasyon denir.

Stabilizasyonu gerektiren zemin özellikleri;

-Hacimsel Stabilité: Zeminin su içeriğindeki değişimler, şişme ve büzülme gibi hacimsel değişikliklere neden oluyorsa hacim değiştirmenin miktarına bağlı olarak problem var demektir. Bu problemin giderilmesi için yapılan stabilizasyon genellikle alternatif bir uygulamadır. Örneğin; kimyasal katkılar ile şişme potansiyeli yüksek bir killi zemini daha yoğun veya suya duyarlılığı daha az hale dönüştürmek veya zemini belirli bir

yükseklikte kazıp attıktan sonra yerine dren kabiliyeti yüksek bir seçme malzemesi ile doldurup yaratılan ilave yük ile şişme basınçlarını azaltmak da birer stabilizasyon tekniğidir.

- Mukavemet: Zeminin mukavemeti genel olarak kompaksiyon ile artırılır. Zemin mukavemeti ile ilgili sorunlar, genellikle yüksek oranda organik madde içeren zeminlerde karşılaşılmaktadır.

- Permeabilite: Zeminin permeabilite özelliğinin değiştirilmesinde en etkin yöntem kompaksiyon olmakla beraber kireç, jips, uçucu kül vb. katkıları ile zemin tanelerinin birbirine sıkıca bağlayarak çimentolaşması sağlanabilir.

- Sıkışabilirlik ve Konsolidasyon: Sıkışabilirlik özelliğinin iyileştirilmesinde kompaksiyon kullanılan etkin bir yöntemdir. Ancak aşırı konsolide olabilen zeminlerde konsolidasyon teknikleri uygulanmalıdır.

- Durabilite: Zeminlerin durabilite özelliği, yukarıdaki özelliklerden herhangi birinin olumsuz yönde değişimine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Günümüzde stabilize edilmiş zeminlerin durabilitesi ile ilgili herhangi bir kriter mevcut olmayıp, zeminin CBR, yatak katsayısı ve esneklik modülü gibi parametreler ölçü olarak göz önünde bulundurulabilir (Tunç, 2002).

Stabilizasyon teknikleri ilk anda masraflı gözükse de yapının güvenliğinin artırılmasının yanı sıra inşaatın kalan kısmının maliyetinin azalmasını sağlaması açısından gerekli olmaktadır. Zemin stabilizasyon teknikleri ile;

- ❖ Kayma direnci dolayısıyla taşıma gücü artırılır.
- ❖ Temellerin oturması azaltılır.
- ❖ Oturmaların azaltılması ve hacim stabilitesinin sağlanması ile üstyapıdaki deformasyonlar azalır.
- ❖ Geçirimlilik kontrol altına alınır.
- ❖ Yer altı suyunun dren edilmesi kolaylaştırılır ve/veya boşluk suyu basıncı azaltılır.
- ❖ Zeminlerin şişme ve büzülme kapasitesi azaltılır.
- ❖ Yamaçların, dolguların ve toprak barajların güvenliği artırılır (Çalık, 2012).

Yol altyapısını stabil hale getirmek için, birçok araştırmacı stabilizasyon tekniklerini mekanik stabilizasyon ve kimyasal stabilizasyon olmak üzere iki ana grup altında incelemektedirler.

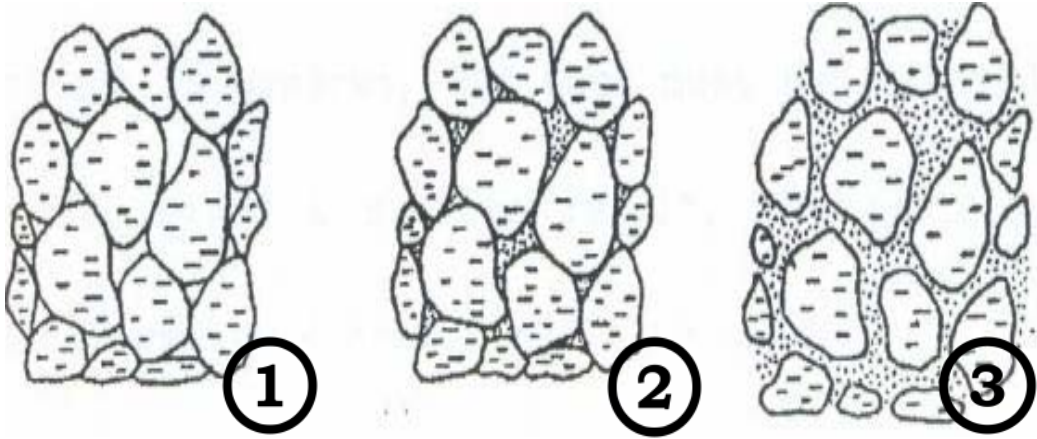
1.5.1. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik (granüler) stabilizasyon, zayıf zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için iki ya da daha fazla farklı malzemenin uygun oranlarda karıştırılarak istenilen şartları sağlayan bir zemin haline dönüştürülmesidir. Böylece zeminin yük altında kalıcı deformasyon yapması önlenmektedir. Zeminin karıştırılması yolda, sabit veya hareketli bir plentte ya da malzeme ocağında yapılır ve karışım yola serilerek klasik yöntemlerle kontrollü bir şekilde sıkıştırılır.

Mekanik stabilizasyon ile zeminin, gradasyonunun düzeltilmesi, LL veya PI indeksinin azaltılması, mukavemet ve durabilitenin artırılması, dren kabiliyetinin artırılması, uzun dönemli oturmaların artırılması ve don duyarlılığının azaltılması amaçlanmaktadır (Winterkorn ve Fang, 1975).

Mekanik stabilizasyonda kullanılacak malzemeleri karıştırmada karışım oranları için belli bir sistem ve/veya yöntem yoktur. Farklı tip zeminlerin farklı oranlardaki karışımları deneme-yanılma ile hazırlanmakta ve bu karışımların mühendislik özelliklerini incelemek amacıyla karar verilmektedir. Zeminlerde mekanik stabilizasyon, ince taneli (200 No.lu elekten geçen kısmı genellikle %50 den fazla olan) zeminlere, kaba taneli zemin (kum, çakıl, teras çakılı, kırma taş, yamaç molozu vb.) karıştırılarak zeminin mühendislik özellikleri ıslah edilmektedir. Zeminin kaba kısmının miktarı ile gradasyonu ve ince kısmının plastisite özellikleri mekanik stabilizasyonun başarısında en etkili rolü oynamaktadır. Zemindeki maksimum tane boyutunun çok büyük olması işlenebilirliği azalmakta ve kaba kısmının çok olması da segregasyona sebep olmaktadır. Gradasyon; zeminin yoğunluğu, geçirimsizliği, stabilitesi, su tutma yeteneği gibi özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Gradasyonun sürekli olması durumunda en yoğun zemin elde edilmektedir. Buna göre zeminin en yoğun zemin olması halinde segregasyon azalmakta ve işlenebilirlik artmaktadır.

Mekanik stabilizasyonda amaç, en büyük zemin yoğunluğunu elde etmek olduğu için zeminin sürekli gradasyona sahip olması oldukça önem arz etmektedir. Buna göre kaba ve ince malzemenin ortamdaki miktarlarına göre karşılaşılabilecek durumlar Şekil 1.4'de gösterilmiştir.



Şekil 1.4. İnce malzemenin zemin içindeki durumları (Kreps ve Walker, 1971)

Şekil 1.4'te (1)'de ince malzeme yok veya çok az olduğu , (2)'de boşlukları tam dolduracak kadar ince malzemenin olduğu, (3)'de aşırı ince malzemenin olduğu durum görülmektedir. Tablo 1.4'te bu üç durumdaki zeminin özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 1.4. İnce malzemenin granülometrisinin zemine etkileri

İnce malzeme yok veya çok az	Boşlukları tam dolduracak kadar ince malzeme var	Aşırı ince malzeme var
Taneler arası temas iyi ile vasat arasındadır. Değişken yoğunluğa sahiptir. Geçirgendir. Yüksek stabillitelidir. Çok zor sıkışır. Dona duyarsızdır. Sudan etkilenmez.	Deformasyona karşı direnç taneler arası temasla artar. Yoğunluk artar. Pratik olarak geçirgen değildir. Yüksek stabiliteye sahiptir. Orta derecede sıkışır. Dona duyarlıdır. Sudan az etkilenir.	Taneler ince malzeme içinde yüzdüğünden temas yoktur. Yoğunluk düşer. Geçirgen değildir. Düşük stabillitelidir. Kolay sıkışır. Dona çok duyarlıdır. Sudan çok fazla etkilenir.

Mekanik stabilizasyon ile ıslah edilen zeminlerin kaba kısmı hacimsel stabilite ve içsel sürtünme açısından sorumlu iken ince kısmı karışımın kohezyonundan yani kaba taneleri birbirine bağlayıcı olmasından sorumludur.

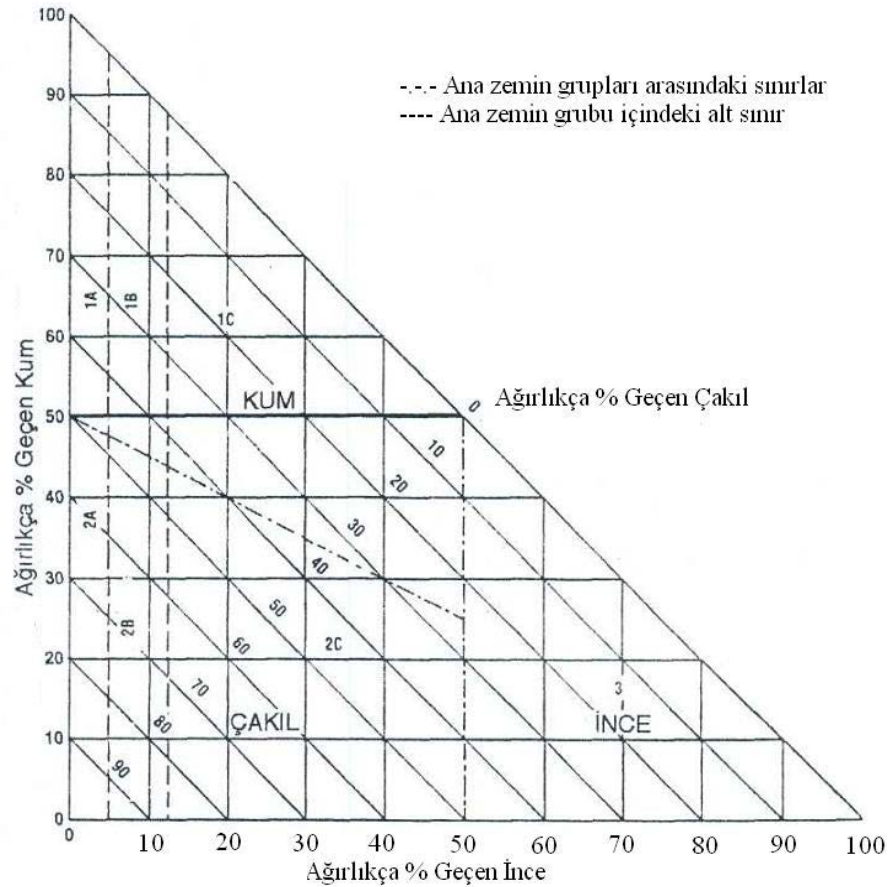
1.5.2. Kimyasal Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon ile ıslah edilemeyen zeminlere çeşitli katkı malzemesi (kireç, çimento, uçucu kül, bitüm vb.) karıştırılarak yapılan zemin iyileştirme işlemine kimyasal stabilizasyon denir. Bu stabilizasyon dayanımı arttırmak, geçirimsizliği azaltmak, hacim değişimi en aza indirmek gibi amaçlarla yapılmaktadır.

Kimyasal stabilizasyonda; stabilizör seçiminde, zemin cinsi, stabilizasyonun amacı (stabilite artışı, kaplama kalınlığının azalması vb.), zeminin hangi özelliğinin iyileştirileceği, maliyet ve malzeme temin etme kolaylığı gibi hususların göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Çalık, 2012).

Şekil 1.5'te görülen üçgen gradasyon nomogramı, zeminin ufalanma karakteristiği temel alınarak hazırlanmıştır. Bilindiği gibi, killi zeminler özellikle kuru halde iken değişik boyutta ve ufalanması güç olan katı topaklar halinde bulunurlar. Bu sebeple killi zeminlerde kimyasal stabilizasyonun etkili olabilmesi için zeminin parçalanarak ufalanması gerekmektedir. Böylece ilave edilecek stabilizör, zemin ile homojen bir karışım oluşturacaktır.

Şekil 1.5'teki üçgen nomogram ile zeminin Alan Numarası belirlenerek zeminin ufalanma karakteristiği belirlenir. Tespit edilen zemin karakteristiği ile PI, LL ve gradasyon özelliklerine bağlı olarak Tablo 1.5'ten en uygun stabilizör cinsi belirlenebilir.



Şekil 1.5. Zemin gradasyon üçgeni (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Örneğin, zeminin PI değeri 15, %67 çakıl, %26 kum ve %7 ince malzeme içeren zeminin Alan Numarası Şekil 1.5'ten 2B olarak bulunur. Tablo 1.5'e göre bu alandaki zemin için bitüm (asfalt), çimento, kireç ve K-Ç-U kombinasyonu olmak üzere 4 farklı stabilizör önerilmektedir. Ancak PI değerinin 10'dan büyük olması sebebiyle asfalt stabilizasyonu, 4 No.lu elekten geçen kısım ($\%26 + \%7 = \%33$) $< \%45$ olduğu için çimento stabilizasyonu bu tür zeminler için uygun olmamaktadır. Bu sebeple bu zemin için kireç ya da K-Ç-U kombinasyonu seçeneklerinden biri tercih edilmelidir.

Uygulamada kireç, çimento, uçucu kül, bitüm vb. katkıları tek başına kullanıldığı gibi bu karışımların bir ve ya birden fazla kombinasyonları (kireç-asfalt, kireç-çimento-uçucu kül vb.) şeklinde de kullanılabilir. Zemine katılan bu katkıların birlikte kullanılmaları tek başına kullanılmalarına göre daha çok avantaj sağlamaktadır. Örneğin kireç zeminin işlenebilirliğini artırırken plastisitesini düşürmektedir. Daha sonra ilave elden çimento ise zeminin mukavemetini hızla arttırmaktadır.

Tablo 1.5. Zemin stabilizasyonu için stabilizör seçimi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

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

* K-Ç-U: Kireç, çimento ve puzolan kombinasyonu

** $PI \leq 20 - ((50-200 \text{ No.lu elekten geçen yüzde})/4)$

Stabilizasyonda en uygun stabilizör madde seçiminde maliyet ve malzeme temininin kolay olması gibi hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. Belirlenen katkı maddesi ile arazide yapılacak iyileştirme işlemlerinin uygulanmasından önce laboratuarda numuneler hazırlanır ve yapılacak deneyler ile mühendislik özelliklerini iyileştirip iyileştirmediği kontrol edilir.

Zemin cinsine göre değişik amaçlar için uygulanacak stabilizasyon metotları Tablo 1.6'de ve Tablo 1.7'de zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları verilmiştir.

Tablo 1.6. Stabilizasyon metotları (Tunç, 2002).

AMAÇ	ZEMİN CİNSİ	STABİLİZASYON METODU
Yük taşıma ve deformasyon direncini arttırmak	İnce granüler	Asfalt, Çimento, Mekanik Karıştırma, Kompaksiyon
	Kaba granüler	Asfalt, Çimento, Mekanik Karıştırma, Kompaksiyon
	Düşük PI killer	Kompaksiyon, Çimento, Kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Don duyarlılığını azaltmak	İnce granüler	Çimento, Asfalt, Uçucu Kül
	Düşük PI killer	Çimento, Kireç
Su geçirimsizliği	Düşük PI killer	Çimento, Asfalt, Kireç
Kabarma – Büzülme kontrolü (Hacim Stabilesi)	Düşük PI killer	Çimento, Kompaksiyon, Kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Esnekliği azaltmak	Yüksek PI killer	Kireç
	Elastik kil veya siltle	Çimento

Tablo 1.7’de görüldüğü gibi değişik amaçlar için zemin cinsine bağlı olarak değişik stabilizasyon yöntemleri mevcuttur. Çizelgeye göre, stabilizasyon tipi seçilirken zeminin granülometrisi ve PI değeri göz önünde tutulmaktadır. Zeminin olumsuz özellikleri belirlendikten sonra uygun stabilizasyon yöntemine karar verilir.

Tablo 1.7’de belirtilen zemin bileşiklerinden kaolin, illit ve montmorillenit gibi killerin ticari değeri çok yüksek olduğundan dolayı bu tip killeriin içerik olarak çok fazla olan zeminlerden yol eksenini geçirmemek gerekir. Ayrıca bu tip killerin olumsuz özelliklerini (özellikle aşırı şişme) gidermek oldukça güçtür. Zemin stabilizasyonları ile zeminin olumsuz özellikleri ıslah edildiği gibi kaplama kalınlıklarında da önemli azalmalar söz konusudur. Aslında esnek kaplamalarda kullanılan çimento stabilizasyonu temeller ile

bitümlü temeller, granüler temel malzemesinin çimento veya bitümle stabilizasyonun ta kendisidir (Tunç, 2002).

Tablo 1.7. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları (Tunç, 2002).

Zemin bileşimi	Tavsiye edilen stabilizasyon	Amaç
Organik madde	Mekanik stabilizasyon	Diğer metotlar etkisizdir
Kum	Mekanik stabilizasyon Çimento Asfalt	-İnce plastik olmayan malzeme karıştırarak stabiliteyi arttırmak -Mukavemeti arttırmak -Kohezyon sağlamak
Silt	Mekanik veya Kimyasal stabilizasyon	Zemin özelliklerini iyileştirmek
-Alofenler -Kaolin -İllit -Montmorillenit	Kireç veya kireç – uçucu kül karışımı Kum ile mekanik stabilizasyon Çimento Kireç Çimento Kireç Kireç	-Mukavemeti arttırmak -Stabiliteyi arttırmak -Kısa süreli mukavemeti arttırmak -İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak -Kısa süreli mukavemet artışı -İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak -İşlenebilirlik ve kısa süreli mukavemeti arttırmak

1.5.2.1.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde en yaygın kullanılan kimyasal katkı kireçtir. Kireç ile yapılan iyileştirme çalışmalarında çoğunlukla sönmüş kireç (hidrate kireç, Ca(OH)_2) ve sönmemiş kireç (CaO) kullanılmaktadır.

Kirecin hammaddesi kireç taşıdır. Kireç taşının (kalker) öğütülerek 900°C 'nin üstünde döner fırınlarda pişirilmesi (kalsinasyon) ile (1.1)'deki tepkime meydana gelir:



(1.1)'deki reaksiyon sonucu oluşan CaO , sönmemiş kireçtir. Daha önce yapılan stabilizasyon çalışmalarında sönmemiş kirecin etkili olduğu gözlemlenmesine rağmen, sönmemiş kireç daha yüksek kür ısısı oluşturmaya ve sönmüş kirece göre daha çok su tüketmesinden dolayı tercih edilmemektedir. Ayrıca yakıcı ve tehlikeli özelliğe sahip olmasından dolayı arazide sönmemiş kireç ile yapılan stabilizasyon uygulamalarında çalışan personelin derilerinde yanık olma riski oldukça yüksektir.

CaO su ile karşılaştırılınca büyük miktarda ısı ($300-400^\circ\text{C}$) açığa çıkarak (1.2)'deki gibi bir kimyasal tepkime meydana gelmektedir. Bu işleme kirecin söndürülmesi ve Ca(OH)_2 'ye sönmüş kireç denir (Baradan, 2000). Bu reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı zeminin su içeriğinde önemli azalmalara neden olmaktadır. Sönmemiş kirecin bu kurutucu etkisi optimum su seviyesinden yüksek doğal su içeren zeminlerde bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.



Zemin sınıfı CH, CL, MH, ML, ML-CL, SC, SM-SC, SM, GC, GM-GC, GM olan zeminler, PI 10'dan büyük olan zeminler veya yaş CBR < 10 veya CBR şişme % si ≥ 3 olan zeminler kireç ile iyileştirilebilirler. Kireç; orta, ince ve çok ince taneli zeminlerle reaksiyona girerek plastisitenin düşmesine, işlenebilirliğin artmasına, şişmenin azalmasına ve mukavemetin artmasına, ortamın pH'nın düşmesine neden olmaktadır. Kireç stabilizasyonu genel olarak PI değeri 10 ile 50 arasında olan killi zeminler için çok iyi sonuçlar veren bir yöntemdir. Karayolları Teknik şartnamesine göre, stabilizasyonda kullanılacak sönmüş veya sönmemiş kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1.8'de

verilmiştir. Ayrıca karayolları teknik şartnamesinde, kireç ile stabilize edilecek taban zemininin; CBR değeri > 10 , serbest basınç mukavemeti değeri (q_u) $> 5 \text{ kg/cm}^2$, $PI < 10$ olmalıdır.

Tablo 1.8. Stabilizasyonda kullanılacak kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri (KTŞ,2006).

Özellik (TS EN 459-2)	Sönmemiş Kireç	Sönmüş Kireç
CO ₂ (Kızdırma Kaybı), %	≤ 7	≤ 7
Toplam (CaO + MgO), %	≥ 80	≥ 80
SO ₃ , %	≤ 2	≤ 2
MgO, %	≤ 10	≤ 10
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ + SO ₃ , %	≤ 5	≤ 5
Parçalar, mm	≤ 2	-
Ağırlıkça Elekte Kalan, %		0.09 mm ≤ 7 0.20 mm ≤ 2

Kireçle iyileştirilmiş zeminin 7 günlük minimum serbest basınç mukavemeti Tablo 1.9’da verilen değerlerin üstünde ve durabilitesinin de Tablo 1.10’da belirtilen şartları sağlamalıdır. Buna göre değişik kireç oranlarında numunelere hazırlanmalı ve kriterlere uyan en düşük kireç oranı deneme-yanılma yöntemi ile saptanmalıdır. Tablo 1.9’da verilen değerler, çimento stabilizasyonunda 7 günlük kürden sonraki; kireç, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonları ile yapılan iyileştirmelerde 28 günlük kürden sonraki serbest basınç mukavemeti değerleridir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Tablo 1.9. Kireç ile stabilize edilen zeminlerin sağlaması gereken minimum serbest basınç mukavemeti değerleri (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

	Esnek Kaplama	Rijit Kaplama
Yol temel tabakası	5.17 MPa	3.45 MPa
Yol alttemel, yol tabanı, dolgular	1.72 MPa	1.38 MPa

Tablo 1.10. Kireç ile stabilizasyonda sağlanması gereken durabilite kriterleri (U.S. Army Corp. Of Eng., 2003).

Zemin Türü	12 defa ıslanma-kuruma veya donma-çözülme periyodunun sonunda numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp, %
Granüler, PI<10	11-14
Granüler, PI>10	8-14
Silt	8-14
Kil	6-14
A-1, A-2-4, A-2-5, A-3	14
A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	10
A-6, A-7	4

Kireç suyla karıştırıldıktan sonra elde edilen sölusyonun pH değeri yaklaşık 12.4 civarındadır. Başlangıç kireç katkısı seçilirken zemin ve kireç katkısının toplam kütlesi 20 g olacak şekilde damıtık su ile süspansiyon hazırlanır. Hazırlanan süspansiyonun pH değeri belirlenir. Değişik miktarlardaki kireç katkısı ile hazırlanan süspansiyonun pH değerinin kireç oranına bağlı olarak değişimi bir grafik üzerinde çizilir. Yaklaşık pH değeri 12.4 olması durumundaki kireç miktarı başlangıç değeri olarak alınabilir. Daha sonra bu oranın bir miktar altında ve üstünde kireç oranları ile zemin özelliklerinin hangi kireç katkı oranında amaca uygun olduğu belirlenir (Aytekin, 2004).

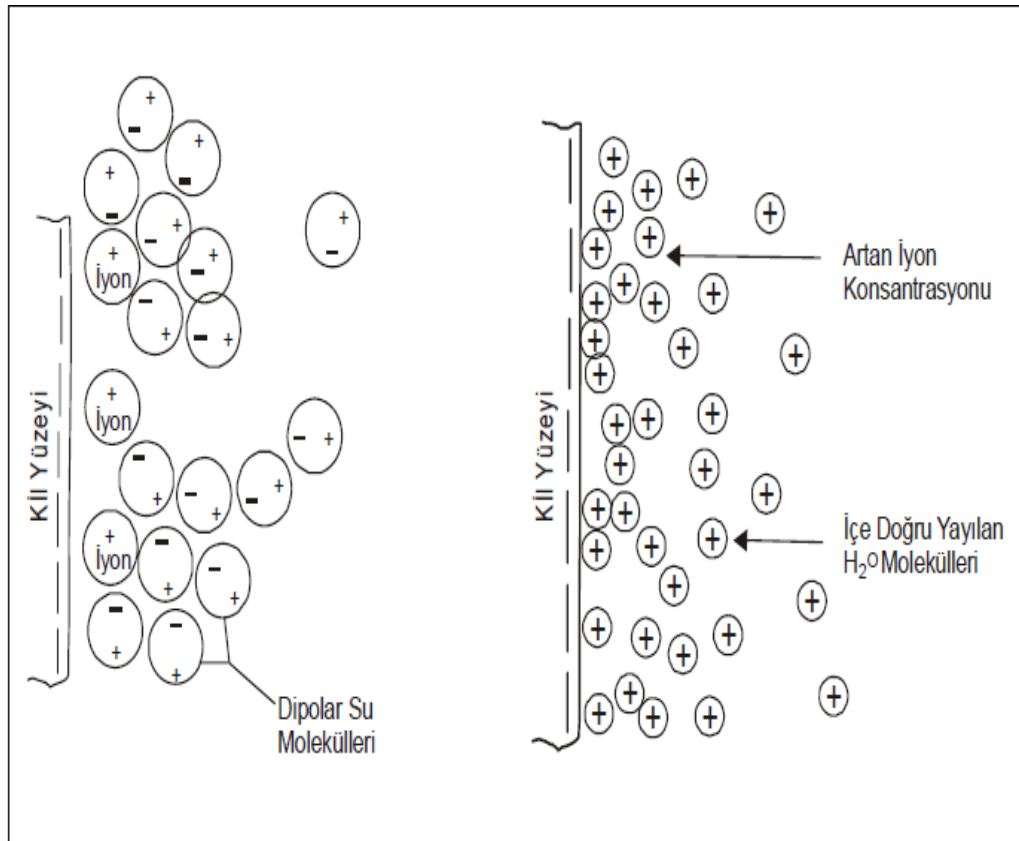
Sülfat içeren killerin kireçle stabilizasyonunda çimentolaşma ürünleri arasında etrenjit ve tomasitin oluşmasından dolayı zeminde şişme problemleri görülebilir (Mitchell, 1986 ve Hunter, 1988). Mitchell (1986), 5000 ppm (ppm:mg/kg) veya %0.5'ten daha fazla sülfat içeren zeminlerde kireç stabilizasyonunun kullanılmaması gerektiğini söylemiştir. Petry ve Little (1992), 1:1 su-zemin oranında 500 ppm veya %0.05, 1:10 su-zemin oranında 2000 ppm veya %0.2'ye kadar sülfat oranlarında da şişme problemi görülebileceğini belirtmişlerdir. Bundan dolayı zeminin sülfat içeriğinin tespiti kireç stabilizasyonunda gereken bir incelemedir.

Genel olarak fazla organik madde içeren zeminlerde kireçle stabilizasyon etkili değildir. Zemin içeriğindeki %5'ten fazla organik madde, kireç stabilizasyonunda gerçekleşen kimyasal reaksiyonları durdurucu etki yapmaktadır (Arman ve Moonfish,

1972). Ayrıca kireç stabilizasyonuna zarar verici etkisi de bulunabilmektedir. Organik madde ve sülfat iyonunun varlığı önceleri stabilizasyonu olumsuz etkilediğini belli etmemekte, ancak daha sonra kuruma-ıslanma periyotlarında zeminin ufalanarak dağılmasına neden olmaktadır (Nelson ve Debora, 1986).

Kireç ile zemin stabilizasyonunda gerçekleşen olaylar katyon değişimi, yumaklaşma (flokülleşme), agregasyon, çimentolaşma ve karbonatlaşma adı verilen dört farklı evrede gerçekleşmektedir.

Yüksek miktarda su tutma kapasitene sahip plastik kil taneleri, serbest katyonları (pozitif yüklü iyonlar) çeken yüksek negatif yüklü yüzeylere ve dipolar su tabakasına sahiptir. Yüksek difüzyona sahip su tabakası Şekil 1.6'da görüldüğü gibi kil tanelerinin etrafını sarak taneleri birbirinden ayırmaktadır. Bu durum kili daha zayıf bir hale getirmektedir (Dallas, 1995).



Şekil 1.6. Negatif yüklü kil yüzeyleri tarafından çekilen katyonlar ve su molekülleri

Stabilizasyon için ilave edilen kirecin zemin taneleri arasındaki boşluk suyunda (1.3)'te verildiği gibi iyonlaşma ortamındaki Ca^{+2} iyonu konsantrasyonu arttırırken, OH^- iyonları da ortamın pH değerini yükseltirler.



Genelde zeminlerde düşük değerlikli katyonlara sahip elementler yüksek değerlikli katyonlara sahip elementlerle yer değiştirmeye eğilimindedirler ve katyonlara ait tipik değişim serisi $\text{Li}^{+1} < \text{Na}^{+1} < \text{H}^{+1} < \text{K}^{+1} < \text{NH}_4^{+1} < \text{Mg}^{+2} < \text{Ca}^{+2} < \text{Al}^{+3} < \text{Si}^{+4}$ şeklinde olmaktadır (Hanchanloet, 1999). Ca^{+2} iyonunun, kil tanesinin yüzeyindeki negatif yüklerin etkisindeki Na^{+1} , K^{+1} ve Mg^{+2} gibi pozitif değerlikli iyonlardan daha kuvvetli değişim özelliğine sahip olmasından dolayı bu iyonlarla kalsiyum iyonları yer değiştirir ve kilin negatif yüklerini Na^{+1} , K^{+1} ve Mg^{+2} iyonları yerine artık Ca^{+2} iyonları dengelemeye başlar. Kirecin ortamın pH değerini yükseltmesi de zeminin katyon değişim kapasitesini arttırmaktadır. Genellikle birkaç saat sonunda hızlıca tamamlanan ve zeminin plastisite, işlenebilirlik ve şişme-büzülme karakteristiğinde önemli değişimleri başlatacak olan bu reaksiyonlara katyon değişim reaksiyonları denir (Bell, 1996).

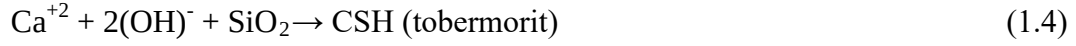
Katyon değişimi olayı ile kil tanelerinin yüzeyinde Ca^{+2} iyonlarının yoğun bir şekilde görülmesinden sonra zeminde yumaklaşma (flokülleşme) ve agregasyon olayları başlamaktadır.

Yumaklaşma ve agregasyon ile kil tanelerinin mikro yapısında ve efektif tane boyutunda değişimler meydana gelmektedir. Öyle ki kireç ile stabilizasyon sonucunda killi zeminler, siltli veya kumlu zemin davranışı gösterebilmektedir (İpek, 1998).

Zemin-kireç reaksiyonlarının ilk aşaması olan katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyon sonunda zeminin plastisinde, şişme-büzülme karakteristiğinde ve işlenebilirliği iyileşmeler gözlenmektedir. Ayrıca kireç eklenmesiyle pH değeri yaklaşık 12.4'e çıkan zeminin bir sonraki aşamada gerçekleşecek olan çimentolaşma (puzolanik) reaksiyonları için gerekli ortam sağlanmaktadır (Çalık, 2012).

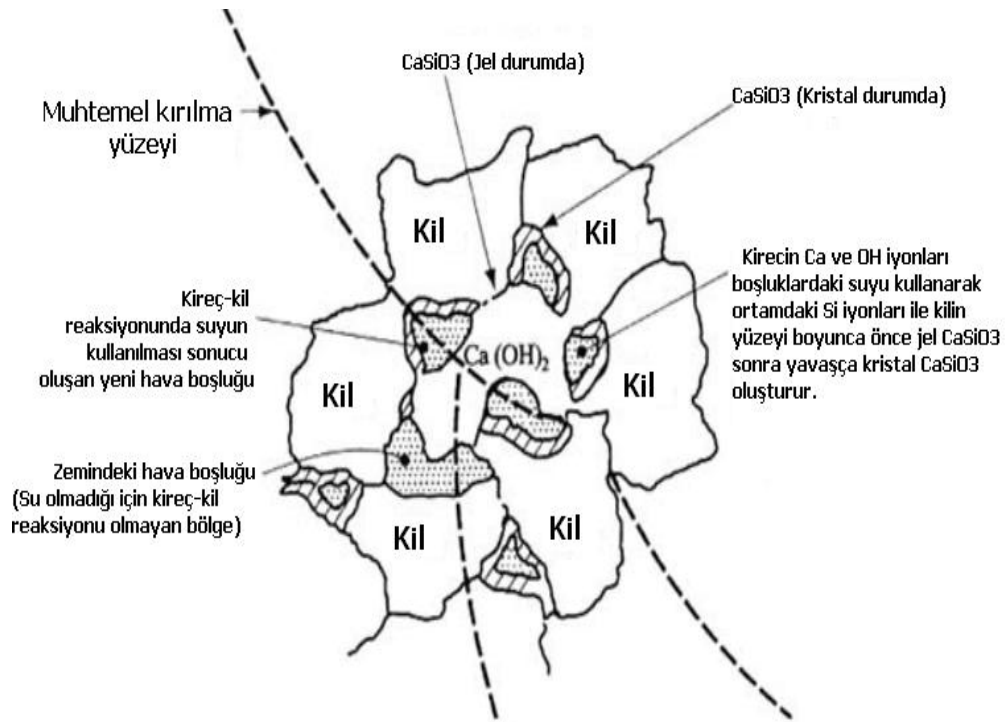
Silisyum, alüminyum ve/veya demir iyonları ile kirecin ortama verdiği bir iyon olan Ca^{+2} katyonu arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucunda kalsiyum silika hidrate (CSH), kalsiyum alümina hidrate (CAH) ve kalsiyum alümina-silika hidrate (CASH) gibi mukavemetli ürünler meydana gelmesine çimentolaşma denmektedir (Nalbantoğlu ve

Tuncer, 2001). Çimentolaşma aşamasındaki reaksiyonlara ait denklemler (1.4), (1.5) ve (1.6)'da verilmektedir.



Verilen denklemlerin tamamlanması birinci aşamanın aksine oldukça uzun bir zaman periyodunda gerçekleşmektedir.

Çimentolaşma ürünleri olan CSH, CAH ve CASH ilk meydana geldiklerinde jel kıvamındadırlar. Oluşan bu jel, zamanla büyüyerek zemin içerisindeki boşlukları tıkamaktadır. Zamanla CSH, CAH ve CASH jelleri kristalleşerek sertleşmektedirler. Yüksek mukavemetli, sert ve suda erimeyen bu kristal yapılar zeminin dayanımında ve durabilitesinde meydana gelecek iyileşmeleri sağlayan ürünlerdir. Bahsedilen bu olay Şekil 1.7'de görülmektedir.



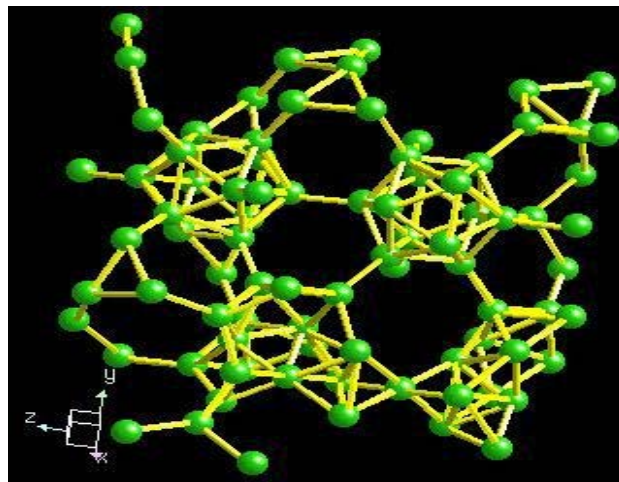
Şekil 1.7. Çimentolaşma mekanizması (CDIT, 2002).

Puzolanik reaksiyonlar, ortamın pH değeri 10.5'in üzerinde kaldığı sürece devam etmektedir. (1.3)'teki zeminin ayrışma reaksiyonu, (1.4), (1.5) ve (1.6)'daki çimentolaşma ürünlerinin oluşum reaksiyonları ortamın $(OH)^-$ iyonunu kullandığından zeminin pH değerini 10 seviyelerine indirebilmektedirler (Hunter, 1988).

Kireç ($Ca(OH)_2$) ile havanın karbondioksiti (CO_2) reaksiyona girerek kalsiyum karbonatı ($CaCO_3$) oluşturmasına karbonatlaşma denir. Kalsiyum karbonat; CSH, CAH ve CASH gibi çimentolaşma ürünlerinin sahip olduğu yüksek mukavemete sahip olmadığından ortamın kirecini harcayarak oluştuğu için puzolanik reaksiyonları olumsuz etkilemektedir. Azalan hatta durma noktasına gelen puzolanik reaksiyonlardan ötürü zemin gerekli iyileşmeleri sağlayamayacaktır. Ayrıca pH değerinin 10.5'in altına geldiği durumlarda havadan absorbe edilecek CO_2 ile çimentolaşma ürünleri arasında reaksiyonlar meydana gelerek silisli ve alüminyumlu karbonatlar oluşmaktadır. Bu nedenle zemine yeterli oranda kireç ilave ederek ortamın bazikliğinin 10.5'in altına düşmemesi gerekmektedir (Çetiner, 2004).

1.6. Bor Elementi

Kökeni Arapça da Buraq/Baurach ve Farsça da Burah kelimelerinden gelen, kimyasal sembolü B olan bor, periyodik cetvelin III A grubunda yer alan ve metal ametaller arası yarı iletken özelliğe sahip elementtir. Doğada bulunan bor, kütle numaraları 10 (%19.8) ve 11 (%80.2) olan iki kararlı izotoptan oluşmaktadır (Zorer, 2005).



Şekil 1.8. Borun kristal yapısı

Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. Alfa ve beta rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır. Alfa rombohedral strüktür ve 1200°C'nin üzerinde bozulur ve 1500°C'de beta rombohedral oluşur. Amorf form yaklaşık 1000°C'nin üzerinde beta rombohedrale dönüşür ve her türlü saf bor ergime noktasının üzerinde ısıtılıp tekrar kristalleştirildiğinde beta rombohedral forma dönüşür (Erdoğan, 2006).

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği genelde ortalama 10-20 ppm olmakla birlikte ABD'nin batı bölgeleri ve Akdeniz'den Kazakistan'a kadar uzanan yörede yüksek konsantrasyonlarda bulunur. Deniz suyunda 0.5-9.6 ppm, tatlı sularda ise 0.01-1.5 ppm aralığındadır. Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyuttaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikler olarak daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır (Woods, 1994).

Volkanik gazlar içinde ve sıcak kaynar sularında bor miktarının yüksek olduğu, bazı yerlerde ekonomik değişimlere ulaştığı bilinmektedir. Türkiye'de ve ABD'de bor yataklarının bulunduğu bölgelerdeki sıcak kaynak sularında bor miktarı 100 ppm üzerindedir. Araştırmacıların çoğu borun kaynağını magmaya bağlamaktadır. Borun çeşitli kayalarındaki dağılımına bakıldığında, denizsel tortulardaki bor içeriğinin magmatik kayalarındakinden daha fazla olduğu görülmektedir. Denizsel tortuların deniz suyundan aldıkları bor miktarı, denize karalardan taşınandan daha fazla olmaktadır (Erdoğan, 2006).

Bor doğada serbest halde bulunmaz. Bor minerallerinden elde edilen elementel bor ise iki farklı şekilde olabilir. Kristal halde olan ve parlak siyah renkli ve sert, amorf halde olan yeşilimsi sarı renkli, tatsız, kokusuz bir tuzdur. Su ile 100°C'nin üzerinde, oksijenle 700°C'de, hidrojenle 800°C'de reaksiyona girmektedir. Elementel olarak bor çok çeşitli bileşik yapma kapasitesine ve nötronları absorbe etme özelliğine sahiptir.

Bor elementinin kimyasal özellikleri, morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron boyutundaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken, kristal bor kolay reaksiyon vermez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve bazı diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyonu ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlayıcı olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur (DPT, 2001). Bor elementinin fiziksel özellikleri Tablo 1.11'de verilmiştir.

Tablo 1.11. Bor elementinin fiziksel özellikleri

Özellik	Değeri
Atom numarası	5
Atom ağırlığı	10.81±0.005 veya 0.007
Yoğunluk (kg/m ³)	2.46
İyonik çapı	0.23 ° A
Ergime noktası	2190±20 °C
Kaynama noktası	3660 °C
Isıl genleşme katsayısı (25-1050°C için)	5x10 ⁻⁶ – 7x10 ⁻⁶
Knoop sertliği	2100 – 2580 HK
Mohr sertliği (elmas-15)	11
Vicker sertliği	5000 HV

1.7. Borun Tarihçesi

Bor eski çağlardan beri bilinmekte ve kullanılmaktadır. Tarihte ilk olarak M.Ö.4000 yılında Babiller Uzak Doğu'dan boraks ithal edip altın işletmeciliğinde kullanmışlardır. Mısırlıların da boru, mumyalamada, tıpta ve metalurji uygulamalarında kullandıkları bilinmektedir. İlk boraks kaynağı Tibet Göllerinden elde edilmiştir. Boraks, koyunlara bağlanan torbalarda Himalayalar'dan Hindistan'a getirilmiştir. Eski Yunanlılar ve Romalılar boratları temizlik maddesi olarak kullanmıştır. İlaç olarak ilk kez Araplar tarafından M.S. 875 yılında kullanılmıştır. Borik asit 1700'lü yılların başında borakstan yapılmış, 1800'lü yılların başında ise elementel bor elde edilmiştir. Elementel bor 1808 yılında Fransız kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı SirHumphry Davy tarafından bulunmuştur.

Modern bor endüstrisi ise 13.yüzyılda Marco Polo tarafından Tibet'ten Avrupa'ya getirilmesiyle başlamıştır. 1771 yılında, İtalya'nın Tuscani bölgesindeki sıcak su kaynaklarında Sassolit bulunduğu anlaşılmış 1852 yılında Şili'de endüstriyel anlamda ilk boraks madenciliği başlamıştır. Nevada, California, Calik Mountain ve Kramer yöresindeki yatakların bulunarak işletilmesiyle ABD dünya bor gereksinimini karşılayan birinci ülke

haline gelmiştir. Türkiye’de ilk işletmenin 1861 yılında Maaddin Nizannamesi uyarınca 1865 yılında bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir (URL-1, 2016).

Anadolu’da bor minerallerinin bulunması ve kullanılması çok eski çağlara gitmektedir. İznik çinilerinin özel renkli sırlarında bor elementi bulunması bunun bir kanıtı olarak gösterilebilir. 1865 yılında Balıkesir-Susurluk-Azaziye bölgesinde Fransız “Compagnie Industrielle des Mazures” firması ve daha sonra Sultançayır bölgesinde İngiliz “The Borax Company” tarafından bor minerallerinin üretimi yapılmış, 1961 yılına kadar çalışmaları devam etmiştir. 1950’lerde özel maden şirketlerinin çalışmaları, MTA ve Etibank’ın kurulmasını takiben 1956’da da bu iki kurum arasındaki iş birliği ile işletmeye alınan kolemanit yataklarındaki üretim faaliyetleri sonucunda, Türkiye’nin bor ihracatındaki önemi artmıştır. 1957’de “Sputnik uzay” aracında bor yakıtı kullanıldığı varsayımıyla Nato tarafından bor mineralleri stratejik mineraller kapsamına alınmıştır. Ancak 1963’de Nato bor ihracatını serbest bıraktığında borun stratejik önemi ortadan kalkmıştır. 1966’dan itibaren Kırka ve Bandırma’da bor türevleri üretilmeye başlanmış, 1977’de tüm stratejik bor minerallerinin işletmesi Etibank’a devredilmiştir. Günümüzde hemen hemen hepsi Eti Holding tarafından ham cevher ve konsantreleri (kolemanit, tinkal, üleksit) ile rafine bor ürünleri ve türevleri (boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, borik asit, sodyum perborat) üretilmektedir (Kılınç vd., 2001).

1.8. Bor Mineralleri

Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren doğal bileşiklerdir. Doğada yaklaşık 230’dan fazla bor minerali mevcuttur. Bor kimyasal ürünleri B_2O_3 içeriğine göre adlandırılmaktadır. B_2O_3 içeriği arttıkça ürün değeri de artmaktadır. Bor elementi, doğada 150’den fazla mineralin yapısında yer almasına rağmen, ekonomik anlamda bor mineralleri kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementleri ile hidrat bileşikleri halinde bulunmaktadır (Uğurlu vd., 2004; Güyagüler, 2001). Bor minerallerinden ticari öneme sahip olanları; tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandemit, borasit, szaybelit ve hidroborasittir. Ticari öneme sahip bor minerallerinin formülü, içerdiği B_2O_3 miktarı ve bulundukları ülkeler Tablo 1.12’de verilmiştir.

Tablo 1.12. Ticari önemi olan bor mineralleri (DPT, 2001).

Mineral	Formülü	% B ₂ O ₃	Bulunduğu yer
Tinkal (Boraks)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36.6	Kırka, Emet, Bigadiç, ABD
Kernit (Razorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	51.0	Kırka, ABD, Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	43.0	Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin
Propertit	NaCaB ₅ O ₉ ·5H ₂ O	49.6	Kestelek, Emet, Arjantin
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	50.8	Emet, Bigadiç, Küçükler, ABD
Pandermit (Priseit)	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O	49.8	Sultançayır, Bigadiç
Borasil	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62.2	Almanya
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41.4	Bağımsız Devletler Topluluğu
Hidroborasil	CaMgBO ₁₁ ·6H ₂ O	50.5	Emet

-Tinkal (Boraks): Tabiatta genellikle renksiz ve saydam olarak bulunur. Ancak içindeki bazı maddeler nedeniyle pembe, sarımsı, gri renklerde de bulunabilir. Sertliği 2-2.5, özgül ağırlığı 1.7 gr/cm³'tür. Tinkal suyunu kaybederek kolaylıkla tinkalkonite dönüşebilir. Kille ara katkılı tinkalkonit ve üleksit bulunur. Ülkemizde Eskişehir-Kırka yataklarında üretilmektedir (DPT, 2001).

-Kernit (Razorit): Tabiatta renksiz, saydam uzunlamasına iğne şeklinde küme kristaller halinde bulunur. Sertliği 3, özgül ağırlığı 1.95 gr/cm³ ve B₂O₃ içeriği %51'dir. Soğuk suda az çözünür. Kırka'da Na-borat kütlelerinin alt kısımlarındadır. Dünyada ise Arjantin ve ABD'de bulunmaktadır (DPT, 2001).

-Üleksit: Tabiatta masif, karnabahar şeklinde, lifsi ve sütun şeklinde bulunur. Saf olanı, beyaz rengin tonlarındadır. İpek parlaklığında olanları da vardır. Genelde kolemanit, hidroboraksit ve propetit ile birlikte bulunur. B₂O₃ içeriği %43'tür. Ülkemizde Kırka, Bigadiç ve Emet yörelerinde, dünyada ise Arjantin'de bulunmaktadır (DPT, 2001).

-Propetit: Kirli beyaz, açık sarımsı renklerde olup ışınsal ve lifsi şekilli kristaller şeklinde bulunur. Kristal boyutları 5 mm ile 5 cm arasında değişir. B₂O₃ içeriği

%49.6'dır. Kestelek yataklarında üleksit ikincil mineral olarak gözlenir. Ancak Emet'te tekdüze tabakalı birincil olarak ve Doğanlar, İğdeköy bölgesinde kalın tabakalı olarak oluşmuştur (DPT, 2001).

-Kolemanit: Monoklinik sistemde kristallenir. Sertliği 4-4.5, özgül ağırlığı 2.42 gr/cm³ ve B₂O₃ içeriği %50.8'dir. Suda yavaş, HCl asitte hızlı çözünür. Bor bileşiklerinde em yaygın olanıdır. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestelek yataklarında, dünyada ABD'de bulunmaktadır (DPT, 2001).

-Pandermit (Priseit): Beyaz renkte ve yekpare olarak bulunup kireçtaşına benzemektedir. B₂O₃ içeriği %49.8'dir. Ülkemizde Sultançayır ve Bigadiç yataklarında görülmektedir (DPT, 2001).

-Hidroborasit: Bir merkezden ışınsal ve iğne şeklindeki kristallerin rastgele yönelmiş ve birbirini kesen kümeler halinde bulunur. Lifsi bir dokuya sahiptir. B₂O₃ içeriği %50.5'tir. Beyaz renkte, bazen içerisindeki safsızlıklara bağlı olarak sarı ve kırmızımsı renklerde (arsenik içeriğine göre)kolemanit, üleksit, propertit, tunalit ile birlikte bulunur. Ülkemizde en çok Emet, Doğanlar, İğdeköy yörelerinde ve Kestelek'te oluşmuştur (DPT, 2001).

1.9. Dünyada ve Türkiye'de Bor

Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve ABD de olup dünya ticari bor rezervleri 4 bölgede toplanmaktadır. Bunlar; ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan "Mojave Çölü", Güney Amerika'da yer alan "And Kemer", Türkiye'nin de yer aldığı "Güney-OrtaAsya Orojenik Kemer" ve Doğu Rusya'dır (Eti Maden, 2014).

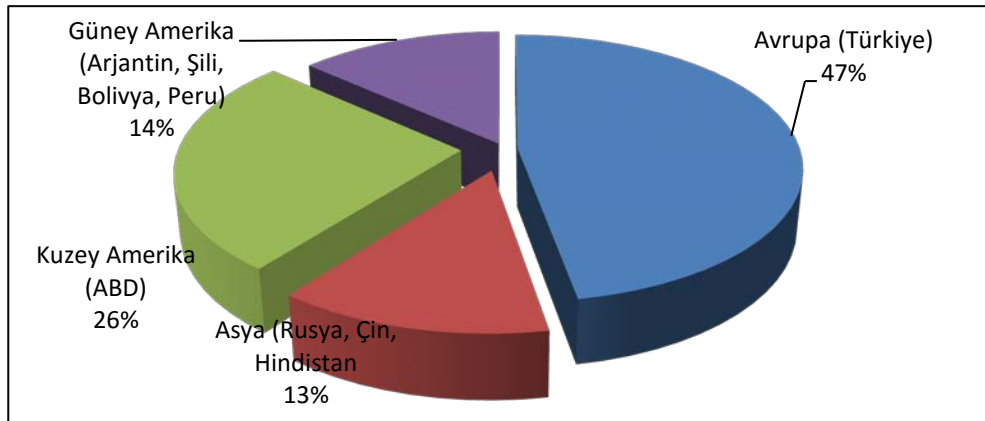
Dünyada en fazla bor minerali açık ocak yöntemiyle üretilmektedir. Amerika, Arjantin, Şili, Çin ve Rusya'da açık ocak yöntemi ile üretim yalpan ocaklar mevcuttur. Ayrıca Güney Amerika ve Çin'de üst kayacın alınmasından sonra el ile selektif madencilik yapılmakta olduğu bilinmektedir. Açık ocak yöntemine göre daha pahalı olan yeraltı madenciliği ise Türkiye (Bigadiç), Amerika (Billie madeni, Death Valley) ve Çin (Lioning)'de yapılmaktadır. Diğer bir yöntem olan çözelti madenciliği ile Amerika Searles Lake, Kaliforniya ve Çin-Qüinghai Basın'de ticari bor üretimi yapılmaktadır (Şahin, 2008).

Günümüzde belirlenmiş, dünya toplam bor rezervi yaklaşık 1.2 milyar ton olup bu rezervin %72.8'i Türkiye'de (953 300 milyon ton B₂O₃), %7.6'sı Rusya'da ve %6.1'i

ABD’de bulunmaktadır. Dünyadaki en önemli bor üreticileri Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü (Türkiye) ve Rio Tinto (ABD)’dur. Bu iki kuruluş dünya bor üretiminin yaklaşık %70’ini gerçekleştirmektedir. Tablo 1.13’te dünyadaki çeşitli ülkelerdeki mevcut bor rezervi görülmektedir. Ayrıca dünya bor üretiminin ülkelere göre dağılımı Şekil 1.9’da görülmektedir.

Tablo 1.13. Dünyadaki bor rezervleri (Eti Maden, 2014).

Ülkeler	Toplam Rezerv (Bin ton B ₂ O ₃)	Dağılım (%)
Türkiye	955 300	72.8
ABD	80 000	6.1
Rusya	100 000	7.6
Çin	47 000	3.6
Arjantin	9 000	0.7
Bolivya	19 000	1.4
Şili	41 000	3.2
Peru	22 000	1.7
Kazakistan	15 000	1.2
Sırbistan	24 000	1.7
Toplam	1 312 300	100



Şekil 1.9. Dünya bor üretiminin bölgelere göre dağılımı (Eti Maden, 2014).

Ülkemizde bor yatakları Zonguldak-Mersin hattının batısında kalan neojen göl tortulları içerisinde yer alır. Emet ve Bigadiç kolemanit yatakları ile Kırka'daki tinkal yatakları dünyanın zengin borat cevherleri olarak gösterilmektedirler. Bu borat oluşumları önemli ölçüde tinkal, kolemanit ve üleksit minerallerinden meydana gelmiştir. Bor minerallerinin bir kısmı bazı uygulamalarda doğrudan, büyük bir kısmı da tesislerde işlenerek konsantre tinkal, boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, susuz boraks, borik asit, sodyum perborat şeklinde yüksek boraks içeriğine sahip bor bileşikleri halinde sanayide kullanılmaktadır (Topçu vd., 2005).

Türkiye'nin bilinen bor yatakları Kırka/Eskişehir, Bigadiç/Balıkesir, Kestelek/Bursa ve Emet/Kütahya'da bulunmaktadır. Türkiye'de rezerv açısından en çok bulunan bor cevherleri tinkal ve kolemanittir Tablo 1.14'te Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nün mineral bazda rezerv miktarları verilmektedir.

Tablo 1.14. Eti maden rezerv miktarları (Eti Maden, 2014).

Cevher	Miktar (ton)
EMET (Kolemanit)	1 818 264 009
KIRKA (Tinkal)	838 152 732
BİGADİÇ (Kolemanit- Üleksit)	636 287 478
KESTELEK (Kolemanit)	5 420 009
TOPLAM	3 298 124 228

Dünyanın en büyük ve en iyi kalitede bor rezervlerine sahip olan, büyük bir iç tüketimin olmamasına rağmen ABD'den sonra en fazla bor üretimini gerçekleştiren ülkemiz satılabilir bor madeni üretiminin %80-85'ini, rafine bor ürünlerinin ise %60-70'ini ihraç etmektedir. Türkiye halen dünyada bor cevheri ihracatçısı olan tek ülke konumundadır.

1.10. Bor Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları

Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır. Ancak farklı olarak saf bor, karon gibi elektrik iletkenidir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri bakımından elmasa benzer ve

neredeyse elmas kadar serttir. Bor elementinin yer kabuğundaki dağılımı çok az olmasına rağmen, belli ortamlardaki bor konsatrasyonlarının çok fazla orandaki artışı ekonomik bor yataklarının oluşumuna sebep olur (Yıldız, 2008).

Bor bileşiği olarak, ilk tanınan ve kullanılan bileşik olan Tinkal'in (Sodyum tetraborat- Boraks) bazı medeniyetlerce çok eski zamanlardan beri kullanıldığı bilinmektedir (Zorer, 2005).

Bor ilave edildiği ürüne yüksek miktarda katma değer katmaktadır. Bu özelliğinden dolayı da “sanayinin tuzu” olarak adlandırılmaktadır. Bu durum bor madeninin önemini ve değerinin ortaya koymakla beraber, bor ürünlerinin kullanım alanlarını ve bora olan ihtiyaç oranını arttırarak borun stratejik bir maden olma özelliğini giderek daha da belirginleştirmektedir.

Bor ve borun türevleri, özellikle cam sanayi olmak üzere porselen-seramik sanayi, emaye-firit sanayi, tarımda gübre sanayi, metalürji sanayi, ilaç, kimya, tıp (sağlık), otomotiv sanayi, enerji sanayi, nükleer enerji, uzay ve havacılık sanayi, iletişim, haberleşme, elektronik, bilgisayar sanayi, deterjan, sabun sanayi, inşaat sektörü, yalıtım, izolasyon sanayi, tekstil sanayi, dericilik sanayi, fotoğrafçılık gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bazı bor ürünlerinin kullanım alanları Tablo 1.15'te verilmiştir.

Tablo 1.15. Bazı bor ürünlerinin kullanım alanları (DPT, 2001).

Ürünler	Kullanım Alanları
Amorf ve Kristal Bor	Askeri Piroteknik, Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç Reaktörlerinde Muhafaza, Metallerde Alaşım Elemanı ve Deoksidan, Bakır ve Alaşımlarda Gaz Giderici, Alüminyum Dökümlerinde Tane Rafinasyonu, Yarı İletkenlerde vb.
Bor Esterleri	Polimerizasyon Reaksiyonları için Katalit, Polimer Stabilizörleri, Yangın Geciktiriciler
Bor Flamentleri	Havacılık ve Spor Malzemeleri için Kompozitler
Bor Halidleri	İlaç Sanayi, Katalistler, Elektronik Parçalar, Bor Flamentleri ve Fiber Optikler
Bor Karbid	Kesme Ekipman Bileycileri, Endüstriyel Yataklar, Çok Yüksek Korozyon ve Oksitlenme direnci Gerektiren Ekipmanlar
Bor Karbür	Askeri Araçlarda Zırh Plakaları, Uzay Mekiklerinde Dış Yüzey Koruyucu, Tesviye Aksamaları, Yüzey Parlaticılar, Yüksek Aşınma Direnci ve Esnemezlik Gerektiren Diğer Alanlar

Tablo 1.15'in devamı

Borazon	Yüksek Hızlı Kesiciler
Borik Asit	Antiseptikler, Göz Damlaları, Bor Alaşımları, Nükler, Yangın Geciktirici, Naylon, Fotoğrafçılık, Tekstil, Dericilik, Gübre, Nikel Kaplama, Kimyasal Katalist, Cam, Cam Elyafı, Emaye, Sır vb.
Fluoborik Asit	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler
Kalsiyum Bor Cevheri (Kolemanit)	Tekstil Kalite Cam Elyafı, Bor Alaşımları, Cüruf Yapıcı, Nükleer Atık Muhafazası
Özel Sodyum Boratlar	Fotoğrafçılık Kimyasalları, Yapıştırıcılar, Tekstil, "Finishing" Bileşikleri, Deterjan ve Temizlik Malzemeleri, Yangın Geciktiriciler, Gübreler ve Zirai Araçlar
Sodyum Bor Cevheri (Üleksit ve Probertit)	Yalıtım Cam Elyafı, Borosilikat Cam
Sodyum Bor Hidrürler	Özel Kimyasalları Saflaştırma, Kâğıt Hamurunu Beyazlaştırma, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi
Sodyum Metaborat	Yapıştırıcı, Deterjan, Zirai İlaçlama, Fotoğrafçılık, Tekstil
Sodyum Pentaborat	Yangın Geciktirici, Gübre
Sodyum Perborat	Deterjan ve Beyazlatıcı, Tekstil
Sodyum Tetraborat (Boraks-Tinkal)	Lehim ve Kaynak İşlemlerinde, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi, Seramikler, Sırlama, Yüksek Mukavemetli Camlar
Susuz Boraks	Gübre, Cam, Cam Elyafı, Metalurjik Cüruf Yapıcı, Emaye, Sır, Yangın Geciktirici
Trimetil Borat	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yüksek lisans çalışması kapsamında kullanılan materyallerle (doğal malzeme, kolemanit ve kireç) hazırlanan karışımların fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin ortaya çıkarılması için yapılan zemin deneyleri, bu deneylerin gerçekleştirilmesinde baz alınan standartlar, deney numunelerinin hazırlanması ve isimlendirilmesi ile ilgili ayrıntılı bilgiler bu kısımda yer almaktadır.

2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve İsimlendirilmesi

Kullanılan katkıların (kolemanit, kireç) doğal malzemenin mühendislik özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimler standart zemin mekaniği deneyleri ile araştırılmıştır. Bu deney programı iki aşamalı olarak planlanmıştır. Birinci aşamada öğütülmüş kolemanit atığı ve 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığının stabilizasyona katkısı, ikinci aşamada ise öğütülmüş kolemanit atığının ve kirecin birlikte stabilizasyonda kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmalarda uygulanan tüm deneyler ASTM standartlarına göre yapılmıştır. Ayrıca değişik katkı oranlarında hazırlanan karışım numuneleri takip kolaylığı açısından isimlendirilmiştir.

Buna göre, Tablo 2.1’de öğütülmüş kolemanite ilişkin isimlendirmeler, Tablo 2.2’de 4 No.lu elekten geçen kolemanite ilişkin isimlendirmeler, Tablo 2.3’te kirece ilişkin isimlendirmeler ve öğütülmüş kolemanit ile kirecin birlikte kullanıldığı karışım oranları ve isimlendirilmeler Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.1. DeneySEL çalışmalarda kullanılan öğütülmüş kolemanit numunelerinin isimlendirilmesi

Doğal Malzeme	Öğütülmüş Kolemanit Atığı	Notasyon
%100	%0	ÖKT0
%95	%5	ÖKT5
%90	%10	ÖKT10
%85	%15	ÖKT15
%80	%20	ÖKT20

Tablo 2.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan 4 No.lu elekten geçen kolemanit numunelerinin isimlendirilmesi

Doğal Malzeme	4 No.lu Elekten Geçen Kolemanit Atığı	Notasyon
%100	%0	KT0
%95	%5	KT5
%90	%10	KT10
%85	%15	KT15
%80	%20	KT20

Tablo 2.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kireç numunelerinin isimlendirilmesi

Doğal Malzeme	Kireç	Notasyon
%100	%0	K0
%95	%5	K5
%90	%10	K10
%85	%15	K15
%80	%20	K20

Tablo 2.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan öğütülmüş kolemanit ve kireç karışımlarının isimlendirilmesi

Doğal Malzeme	Öğütülmüş Kolemanit Atığı	Kireç	Notasyon
%95	%2.5	%2.5	ÖKT+K-2.5
%90	%5	%5	ÖKT+K-5
%85	%7.5	%7.5	ÖKT+K-7.5
%80	%10	%10	ÖKT+K-10

Tablo 2.1, Tablo 2.2., Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'te görüldüğü gibi karışımları oluşturan üç materyal (doğal malzeme, kolemanit ve kireç) $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Doğal malzemeye ilave edilen katkı miktarları toplam karışımdaki kuru ağırlıkça yüzdeleri hesaplanarak ilave edilmiştir.

Laboratuara getirilen doğal malzeme etüvde kurutulduktan sonra plastisiteden dolayı topraklar haline gelmiştir. Bu nedenle deneyler için homojen karışımlar hazırlamak gerektiğinden numunenin tane özelliklerinin bozmayacak şekilde bu topraklar plastik tokmakla ezilerek ufalanmıştır. Her bir materyalden tablolarda verilen oranlarda olacak şekilde ezilmiş ve ufalanmış doğal malzemeye kolemanit atığı ve kireç katılarak hazırlanan karışım numuneleri deneylere hazır hale getirilmiştir.

Kaliforniya Taşıma Oranı testi için gereken numuneler optimum su içeriğinde maksimum kuru yoğunluğa sahip olacak şekilde hazırlanacağından her bir karışım ilk önce standart kompaksiyon testine tabi tutulmuştur. Böylece bu deney ile karışımların optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunlukları belirlenmiştir.

Optimum su içerikleri belirlenen karışımlar, bu içeriği muhafaza edecek şekilde nemlendirildikten sonra standart kompaksiyon kalıbında ASTM D 698'e (2007) göre sıkıştırılmıştır. Sonra numuneler kalıbın içerisinden çıkarılarak CBR testine tabi tutulmuştur. Burada örnek olarak Şekil 2.1'de CBR deneyi numunelerinin hazırlanma süreci ile ilgili resimler verilmiştir.



Şekil 2.1. CBR testi için numunelerin hazırlanması

2.2. Referans Alınan Standartlar

Tez kapsamında yapılan tüm zemin deneyleri ilgili olduğu standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.5’te deneylerin yapılmasında referans alınan ASTM standartları verilmiştir.

Tablo 2.5. Deneylerde referans alınan standartlar

Deneyin Adı	Standart
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D 854
Elek analizi - Hidrometre deneyi	ASTM D 422
Kıvam limitlerinin belirlenmesi	ASTM D 4318
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D 698
Organik madde tayini	ASTM D 2974
Sülfat içeriği	ASTM C 1580
Kaliforniya taşıma oranı	ASTM D 1883

2.3. Materyaller

Bu çalışma sırasında deneylerde kullanılan doğal malzeme, öğütülmüş kolemanit atığı, 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığı ve kirecin mühendislik özellikleri ile ilgili bilgiler bu kısımda yer almaktadır.

2.3.1. Doğal Malzeme

Yüksek lisans çalışmasında kullanılmak üzere Şekil 2.2’deki haritada görülen Gümüşhane ilinin Köse ilçesinin Yaylım köyünden doğal malzeme temin edilmiştir. Yaylım köyü, Gümüşhane’nin kuzeydoğusundaki Köse ilçesine 12 km uzaklıktadır. Yeterli miktarda tedarik edilen doğal malzeme Kaya Mühendislik Zemin ve Yapı Laboratuvarına getirilmiştir.



Şekil 2.2. Doğal malzemenin alındığı Yaylın köyünün konumu (URL-2, 2016).

Zeminlerin minerolojik yapısı; plastisite, şişme potansiyeli, sıkışma ve dayanım gibi özellikleri üzerinde etkin rol oynamaktadır. Ancak zeminin minerolojik yapısını incelemek yerine tane biçimi ve dağılımı ile mühendislik özellikleri saptanmaya çalışılmaktadır. Çünkü zeminin minerolojik yapısı ile geoteknik özellikleri arasında doğrudan ilişki olmadığından mühendislik uygulamalarında gerekli parametreleri saptayabilmek mümkün olmamaktadır (Çalık, 2012).

Doğal malzemenin Tablo 2.6’da mühendislik özellikleri yapılan deneyler ile özet şeklinde gösterilmiştir.

Tablo 2.6. Doğal malzemenin mühendislik özellikleri

Mühendislik parametreleri	
Renk	Kahverengi
Likit Limit, LL (%)	57.6
Plastik Limit, PL (%)	27.7
Büzülme Limiti, SL (%)	19.78
Plastisite İndisi, PI (%)	29.9
Özgül Ağırlık, G_s	2.54
pH	7.05
Sülfat İçeriği	0.31
Organik madde	-
Standart Kompaksiyon Parametreleri	
Optimum Su İçeriği, w_{opt} (%)	21.02

Tablo 2.6'nın devamı

Maksimum Kuru Yoğunluk, $\gamma_{d,maks}$ (Mg/m ³)	1.518
Sınıflandırma	
USCS	CH
AASHTO	A-7-6
Dayanım Parametresi	
CBR (%)	9

Özgül ağırlık deneyi, suyun ve su-zemin karışımının içinden havanın tam olarak alınamamasından dolayı laboratuarda yapılan en zor deneylerden bir tanesidir. Özgül ağırlık değerini değiştiren bir diğer faktörde zemin içindeki organik madde miktarıdır. Bu nedenlerle zeminin özgül ağırlığının zahmetli ve bir o kadarda hata yapmaya açık laboratuvar ölçümü yerine kil ağırlıklı karışımlarda 2.68, kum ağırlıklı karışımlarda 2.65 olarak alınması çoğunlukla tercih edilmektedir. Tablo 2.7'de zeminlerin karakteristik özgül ağırlıkları verilmektedir. Buna göre inorganik zeminlerin özgül ağırlıkları pratik olması açısından 2.65 ile 2.80 arasında olmaktadır.

Tablo 2.7. Zeminlerin karakteristik özgül ağırlıkları (Önalp, 2002).

Zemin Türleri	Özgül ağırlık
Çakıl ve kum	2.65-2.68
Silt	2.62-2.68
İnorganik kil	2.68-2.76
Organik kil	2.58-2.65

2.3.2. Kireç

Yüksek lisans tezi kapsamında öğütülmüş kolemanit atığıyla birlikte kullanılan kireç, Karsan Sanayi Ticaret A.Ş.'nin ürettiği SKK80-Söndürülmüş Kalker Kirecidir. Tablo 2.8'de bu kirece ait fiziksel özellikler ve Tablo 2.9'de kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 2.8. Deneylerde kullanılan kirecin fiziksel özellikleri

Fiziksel parametreler	
200 No.lu elek üstü	%3.8

Tablo 2.8'in devamı

Yoğunluk	0.48
Özgöl ağırlık	2.37
pH değeri	12.4

Tablo 2.9 Deneylerde kullanılacak kirecin kimyasal analizi

Kimyasal Bileşimi	Miktar, %
Ca(OH) ₂	85.80
Aktif CaO	65.00
MgO	1.40
SiO ₂	0.23
Al ₂ O ₃	0.11
Fe ₂ O ₃	0.40

2.3.3. Kolemanit

Kolemanit, Kütahya-Emet'te bulunan ETİ Bor A.Ş.'de bir takım prosesler sonucu ortaya çıkan endüstriyel bir atıktır. Rengi açık gri olup 4 No.lu elekten geçen ve öğütülmüş olarak iki farklı granülometride kolemanit atığı kullanılmıştır. Öğütme işlemi Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünde halkalı değirmenle gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3'te halkalı değirmene ait görseller verilmektedir.



Şekil 2.3. Halkalı değirmene ait görseller

Kolemanit, özel dokulu, killer içinde cevher boşluklarında iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunup radyoaktif element ve organik madde içermemektedir. Bu özelliklerine bakarak kimyasal olarak saf olarak nitelendirilebilir. Bor ile sürekli temas halinde borik asitin deriye zarar verdiği deney hayvanları, yetişkin ve çocuklar üzerinde yapılan araştırmalar ile ortaya çıkarılmıştır (Velioğlu ve Şimşek, 2003). Şekil 2.4'te kullanılan kolemanit atığına ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan iki farklı granülometrideki kolemanit

Deneylerde kullanılan Kütahya Emet kolemanit atığına ait kimyasal özellikleri Tablo 2.10'da verilmektedir.

Tablo 2.10. Kolemanit atığının kimyasal özellikleri

İçerik	Miktar, %
B ₂ O ₃	13.67
SiO ₂	30.56
CaO	13.35
SO ₃	0.70
K ₂ O	2.24
Fe ₂ O ₃	3.83
Al ₂ O ₃	6.51
MgO	9.0
Na ₂ O	0.04
Kızdırma Kaybı	20.1
Yoğunluk (g/cm ³)	2.34

2.3.3.1. Türkiye’de Kolemanit

Türkiye’de kolemanit yatakları Batı Anadolu Bölgesinde merkezleri Mustafa Kemal Paşa, Balıkesir, Bigadiç ve Emet olan sahalarda toplanmaktadır. Bursa’nın Mustafa Kemal Paşa ilçesine bağlı Kestelek köyünde bilinen tek borat yatağı kolemanit patatesleri ve yumrularından oluşmaktadır. Yumru ve patates içindeki kolemanit genellikle beyaz, renksiz ve cam parlaklığındadır. Bazılarında ortadaki boşlukta mavi renkli, uzun, ortorombik sölestin kristallerine rastlanır. Nadiren kompakt ve sütunsal yapı gösterir Siyah ve gri renkli killerin ara tabakalarında bulunmaktadır. Kolemanit içinde dev kazanları andıran boşluklar olup, bu boşluklarda 5-6 cm uzunluğunda monoklinal kolemanit kristalleri meydana gelmiştir. Bazı kolemanit patatesleri 500–1000 kg ağırlığına erişmektedir. Balıkesir’in Bigadiç ilçesi civarındaki borat yataklarında ana cevher kolemanit olmakla beraber, yatakların bazılarında inyoit, üleksit, pandemit, havlit, hidroborasit, meyerhofferitveterçit bulunmaktadır. Kütahya’nın Emet bölgesinde ana cevher kolemanit olup, bazı ocaklarda az miktarda üleksit, sölestin (SrSO_4), realgar (As_2S_2), orpiment (As_2S_3) ve kalsit (CaCO_3)’e rastlanmaktadır. Orpiment ve realgar, killerin boşluk ve çatlaklarında çok ufak kristal toplulukları şeklinde çökelmişlerdir. Kolemanit kristalleri monoklinik şekillerde olup, genellikle kısa prizmalar halinde bulunmaktadır. Kolemanit görünüşte feldspata, kalsite ve diğer bazı sparlara benzemektedir, fakat üfleme borusu (blow-pipe) testi ile onlardan ayırt edilebilmektedir. Kolemanit ısıtıldığı zaman su vermekte, üfleme borusu önünde ısıtıldığı zaman parçalanmakta ve alevi sarımsı yeşil bir renge boyamaktadır. Kolemanit, odun kömürü üzerinde ısıtıldığı zaman beyazlaşmaktadır. Kolemanitin sudaki çözünürlüğü 1100 kısım suda 1 kısım olarak bilinmektedir (Aydın, 2009).

Yaygın bir kalsiyum borat olan kolemanit, Kırka dışındaki tüm borat yataklarında egemen mineraldir. Türkiye, dünya’nın en büyük boraks, üleksit ve kolemanit yataklarına sahiptir. Tüm dünya ülkeleri, kolemanit üretimi yönünden tamamen, üleksit üretimi yönünden ise kısmen Türkiye’ye bağımlıdır (Helvacı, 2004).

Mevcut dünya bor üretiminin değişmeyeceği varsayıldığında, Türkiye’deki mevcut bor rezervi, tüm dünya için tek başına 400 yıl süre ile yeterli olabilecektir. Bu süre ikinci ve üçüncü büyük rezerve sahip ABD ve Rusya için 77 yıl civarındadır (Güyağüler, 2001).

Türkiye bor rezervlerinin mineral bazda dağılımı Tablo 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.11. Türkiye bor rezervlerinin dağılımı (DPT,2014).

Cevher Türü	Toplam (Ton)
Emet (Kolemanit-Üleksit)	1.815.291.000
Kırka (Tinkal)	832.676.000
Bigadiç (Kolemanit-Üleksit)	631.865.000
Kestelek (Kolemanit)	5.555.000
TOPLAM	3.285.037.000

2.4. Yöntem

2.4.1. Organik Madde Tayini

Doğal malzemenin organik madde içeriğini belirlemek için TS 3673'e göre %3'lük sodyum hidroksit çözeltisiyle yapılan deney sonucunda sıvı kısmın renk skalasına göre tayin edilmesidir. Buna göre sıvı kısmın kırmızı veya kahverengi olması organik madde içerdiğini, sarımtırak ya da açık renkte olması organik madde içermediğini göstermektedir.

Bu çalışmada deney sonucunda elde edilen sıvı kısmın açık renkte olduğu dolayısıyla zeminde zararlı madde olmadığı görülmüştür. Organik madde tayini deney resimlerinden bazıları Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Doğal malzemenin organik madde tayini için yapılan deney görselleri

2.4.2. Sülfat İçeriğinin Belirlenmesi

Suda çözülmüş sülfat içeriği hesaplanırken öncelikle etüvde kurutulmuş numuneyle 1:1 oranında su-zemin karışımı hazırlanır. Daha sonra karışım santrifüje edildikten sonra sülfat iyonu konsantrasyonu ölçülür. Sülfat içeriği her 1 kg'lık kuru zemin için mg olarak belirlenir (Jacobson, 2002; Geiman, 2005).

2.4.3. pH Tayini

Zeminlerin pH değeri hesaplanırken havalandırılarak kurutulmuş zemine damıtık su ilave edilerek su içeriği %100 olacak şekilde ayarlanır ve daha sonra kalibre edilmiş pH metreyle zeminin pH değeri ölçülür.

2.4.4. Özgül Yoğunluk

Özgül yoğunluk (G_s); tane yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Özgül yoğunluk maddenin kendisiyle aynı hacimdeki suya göre ne kadar ağır olduğunu ifade eder, birimsizdir.

Zemin numunesinin dane birim hacim ağırlığını belirlerken 100 cm³'lük piknometre denilen şişeler kullanılmıştır. Şekil 2.6'daki piknometre damıtık su ile doldurulup, dışı iyice kurutulup tartılmıştır (W_1). Kurutulmuş ve daneleşmiş zeminden belli bir miktar alınmıştır (W_k): miktarı belli olan bu zemin, piknometrenin içine kayıpsız olarak aktarılacak üzere damıtık su ile doldurulmuştur. Bağntı (2.1) ile zeminin özgül yoğunluğu hesaplanmıştır.



Şekil 2.6. Piknometre deney seti

$$\gamma_s = \frac{W_k}{W_k - (W_2 - W_1)} \quad (2.1)$$

Özgöl ağırlık, dane birim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı ile bulunmaktadır. Bağntı (2.2.) ile zeminin özgöl ağırlığı tespit edilmiştir.

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_{su}} \quad (2.2.)$$

2.4.5. Yıkamalı Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi

Araziden getirilen zeminden, elek analizi için bir miktar alınıp 24 saat $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde kurutulmuştur. Kurutulan zeminin tartıldıktan sonra tamamen ıslanması için kabın içinde yaklaşık 4-5 saat bekletilerek sık sık karıştırılmıştır. Numunenin karıştırılma süresi bittikten sonra, üzerine 2.5 mm'lik elek alarak 80 μm 'luk elekten elenip eleğin üzeri atılmıştır. Numuneye yeniden su katılarak karıştırılmıştır. Yıkama işlemine 80 μm 'luk elekten geçen su berrak olana kadar devam edilmiştir. Eleklerde kalan malzemenin tamamı tepsilere boşaltılıp etüve konarak kurumaya bırakılmıştır. Etüvde kurutulan malzeme uygun elek serisinden elenerek her bir elekten kalan miktarlar tartılıp kaydedilmiştir. Tablo 2.12'de elek analizi sonuçlarına göre toplam zeminin %72.79'u 200 No.lu elekten geçtiği görülmektedir..

Tablo 2.12. Doğal malzemenin elek analizi

Numunenin Toplam Ağırlığı			704.5	
Yıkama Esnasındaki Kayıp			512.81	
Elek No	Çap (mm)	Kalan Ağırlık (g)	Elekten Geçen	
			(g)	(%)
3/4	19.000	0.0	704.5	100
3/8	9.000	14.50	690.0	97.94
4	4.000	18.10	671.9	95.38
10	2.000	10.20	661.7	93.93
16	1.180	55.20	606.5	86.10
40	0.425	28.90	577.6	82.00
100	0.150	56.50	521.1	73.98
200	0.075	8.40	512.7	72.79

İnce taneli zeminleri eleklerden elemek ve çaplarına göre ayırmak, zemin tanelerinin gözle görülmeyecek kadar küçük olmalarından dolayı mümkün olmamaktadır. Bu sebepten dolayı bu tür zeminlerin (dane çapı 0.075 mm den küçük veya 200 No.lu elekten geçen) zeminler için ıslak analiz (hidrometre, pipet) yapılmaktadır. Hidrometre analizi bu tür zeminlerin dane sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, esası Stokes Yasası'na dayanmaktadır (TS 1900-1, 2006).

Stokes kanunu, danelerin küre şeklinde olduğunu kabul etmesine rağmen, gerçek zemin danelerinin ve özellikle kil minerallerinin küre şeklinde olmadığı bilinmektedir. Bu nedenle bu kanunun yaklaşık sonuçlar verdiği, daha doğru bir yöntem geliştirilmediği için uygulamada bu yöntem kullanılmaya devam edilmektedir.

Doğal malzemenin %72.79 oranında ince dane içermesinden dolayı hidrometre deneyi yapılmıştır. Deney için 200 No.lu elekten geçen zeminden 50 g alınarak, sodyum heksametafosfat ($(\text{NaPO}_3)_6$) çözeltisi içerisinde 24 saat bekletilerek kil ve silt boyutundaki danelerin tamamen ayrışması sağlanmıştır. 24. saat sonunda çözelti karıştırıcı ile karıştırılıp 1000 ml'lik süspansiyon silindrine dökülüp saf su ile 1000 ml'ye tamamlanmıştır. Karışım bir dakika süre ile çalkalanıp tam süspansiyon haline getirilip daha önceden hazırlanmış olan 20°C'deki sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilip okumlar alınmıştır. Hidrometre deneyi sonucunda ince danelerin boyutları belirlenmiş ve Tablo 2.13'te gösterilmiştir. Şekil 2.7'de hidrometre deney görselleri verilmiştir.

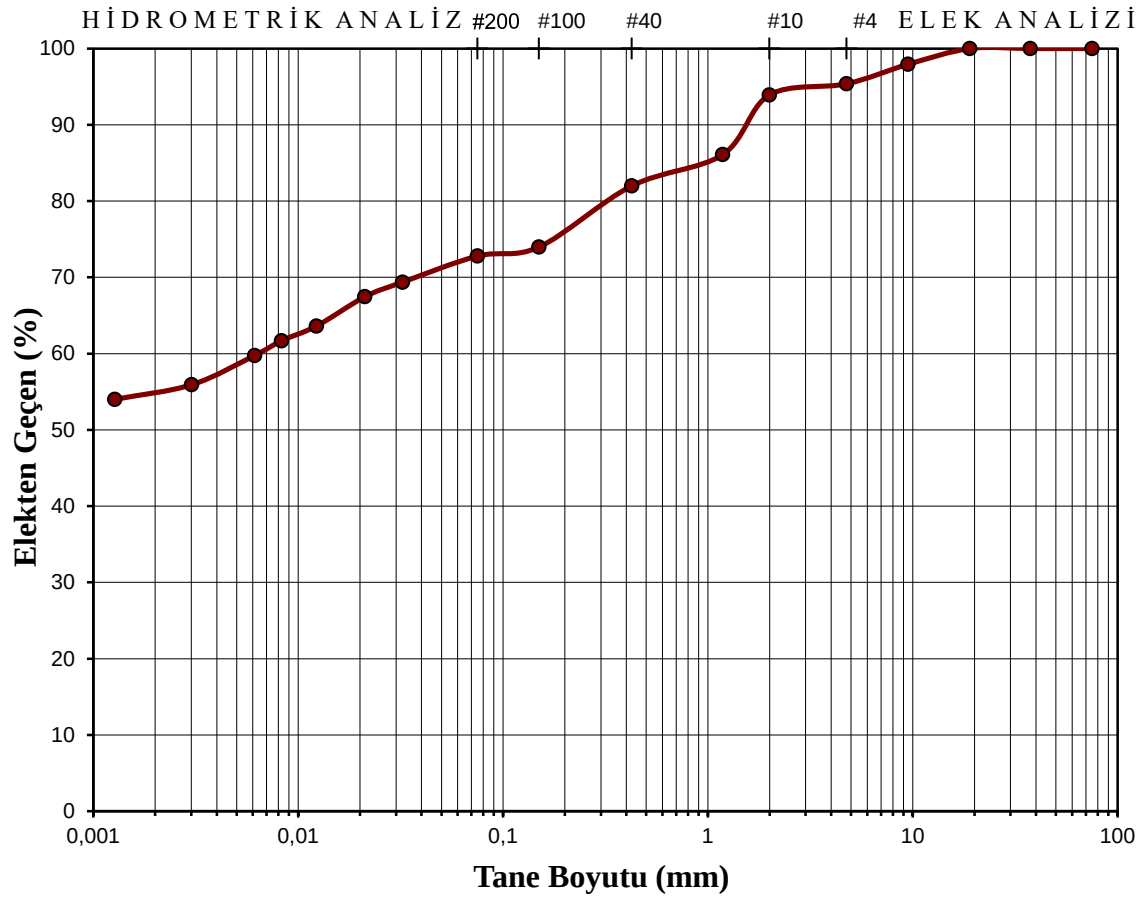


Şekil 2.7. Hidrometre deney görselleri

Tablo 2.13. Doğal malzemenin hidrometre deney sonuçları

Geçen Zaman (dakika)	Hidrometre Okuması (g/l)	Su Sıcaklığı (derece)	Maksimum Tane Çapı (mm)
2	43	20,1	0,040
5	42	20,2	0,026
15	40	20,3	0,015
30	39	20	0,010
60	38	20,1	0,0074
250	36	20	0,0036
1440	35	20	0,0015

Doğal malzemenin ıslak elek analizi ve hidrometre deney sonuçlarına göre granülometri eğrileri birleştirilerek Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Doğal malzemenin granülometri eğrisi

Doğal malzemenin tane boyutu dağılımı dikkate alınarak MIT ve USCS'ye göre çakıl, kum, silt ve kil yüzdeleri Tablo 2.14'te verilmiştir.

Tablo 2.14. Doğal malzemedeki ince tanelerin MIT ve USCS'ye göre yüzdeleri

Sınıflandırma Türü	Çakıl	Kum	Silt	Kil
MIT ve TS 1500	%4.6	%22.6	%17.99	%54.8
USCS*	%4.6	%22.6	%72.79 (silt + kil)	

*: USCS'de kil ve silt "ince taneler" olarak adlandırılmakta ve bu iki zemin türünü ayıran belli bir dane çapı verilmemektedir.

Türk standartları zemin sınıflandırma sistemi 1987, 2000 ve son olarak Mart 2006'da gözden geçirilmiştir. O güne kadar ASTM'nin bir tercümesi olan Türk Standartları'nda bazı revizyonlar öngörülmüştür. Bunlardan en önemlisi kabul edilen yeni çakıl ve kum sınır boyutudur. USCS'de çakıl-kum sınırı ASTM 4 No.lu elek (4.75 mm) olarak tariflenirken, MIT ve TS 1500'de (2000) bu sınır ASTM 10 No.lu eleğe (2 mm) çekilmiştir. Bu değişiklik daha önceden İngiliz ve Alman standartlarının yanı sıra 1990 yılında AASHTO sisteminde de gerçekleştirilmiş ve çakıl-kum sınırı 2 mm'ye indirilmiştir (Çalık, 2012).

2.4.6. Kıvam (Atterberg) Limitlerinin Belirlenmesi

Zeminlerin kıvamı, danecikler arasındaki adezyon kuvvetini yük karşısında kayma direnci stabilitesini ve hangi su içeriğinde hangi katılığa sahip olacağını belirleyen en temel özelliktir. Ayrıca birbirinden farklı zeminler aynı su içeriğinde farklı kıvamlılık gösterirken, katı halden sıva hale dönüşürken de birbirinden farklı suya ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle zeminlerin hangi su içeriğinde hangi kıvamda olacağını tespit etmek ve özellikle plastik ve likit kıvamlarındaki su içeriğinin bilinmesi önemlidir. Örneğin, granüler mineral malzemeler su içeriği değiştikçe hacimsel değişimler göstermediği gibi suyun varlığından ötürü yük altındaki davranışlarında da daha az değişim göstermektedirler. Granüler malzemelerin aksine kohezyonlu zeminler su içeriği

değiştikçe hacimsel değişimler gösterdiği gibi en önemlisi su içeriği arttıkça yüke karşı dirençleri düşmekte ve büyük deformasyonlar göstermektedirler. Kıvamın sistematik incelenmesi ilk kez 1911'de seramik endüstrisinde çalışan A. Atterberg tarafından yapılmıştır (Holtz ve Kovacs, 1981).

Kil içeren kuru karışımlar suyla karıştırıldığında katı-sert görünümünden çamura, su miktarının arttırılmasıyla sıvıya dönüşmektedirler. Kilin su ile gösterdiği bu özellik değişimi 'kıvam' olarak adlandırılmaktadır. Çakıl, kum ve silt içeren zeminler kıvam özelliği göstermezler. Killer ise kıvam özelliği gösteren yegâne zemin grubudur (Önalp, 2002).

Atterberg killerin suyla karıştırıldığında göstereceği davranışların en az iki parametre ile gösterilmesi gerekeceğini; viskoz akmanın üst limiti, viskoz akmanın alt limiti (likit limit), çamurun metale yapışma özelliğinin yitirmesi (yapışma limiti), kilin plastisite özeliğini yitirdiği limit (plastik limit), su kaybının hacim azalmasıyla doğru orantısının kaybı (rötre limiti) limitleriyle açıklamıştır (Atterberg, 1911).

Atterberg'in bu 5 limitinden kısmen faydalanarak inşaat mühendisliğinde önce 1920'lerde K.Terzaghi ardından 1930'larda Casagrande'nin katkılarıyla bugün kullandığımız 3 limit olan Atteberg (kıvam-konsistans) limitleri denilen likit limit, plastik limit ve rötre limiti karayolu inşaatlarında ve toprak işlerinde kullanılmaya başlanmıştır (Casagrande, 1932).

Likit limit, zeminin plastik durumundan akıcı duruma geçtiği andaki su içeriğinin sayısal değeridir. Başka bir ifade ile likit limit aletinin (Casagrande aleti) pirinç yarım küre şeklindeki tasa sıvıanan zeminde, standart bir boyutta açılan bir olukta 25 düşüş sonucunda 1 cm kapanmanın olduğu andaki su içeriğinin sayısal değeridir.

Likit limit deneyi, 40 No.lu elekten elenmiş bir miktar zemin, damıtık su ilave edilerek spatula yardımıyla iyice karıştırılmıştır. Karıştırılan zeminden bir miktar alınıp aletin tasına yerleştirilmiş ve üzeri tasın temas ettiği bloğun yüzeyine paralel olacak şekilde düzeltilmiştir. Standart oyuk açma bıçağı ile zemin ikiye bölünmüştür. Oyuk ters yamuk biçimli en kesite sahip olup tabanı 2 mm dir. Alet çalıştırıldığında pirinç tas, bloğa saniyede bir vuruş yapmaktadır. İkiye bölünmüş zemin 1 cm birleşinceye kadar alet çalıştırılmaya devam edilmiştir. 1 cm birleşim sağlandığı andaki vuruş sayısı kaydedilerek, zemin örneği tartılıp su muhtevası belirlenmek üzere etüve konuldu. Elde edilen sonuçlardan 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak alınmıştır. Bu deney değişik su muhtevalarında 5 kez tekrarlanarak likit limit değerleri belirlenmiştir.

Şekil 2.9’de likit limit değerini belirlemek için kullanılan Casagrande aleti gösterilmektedir.

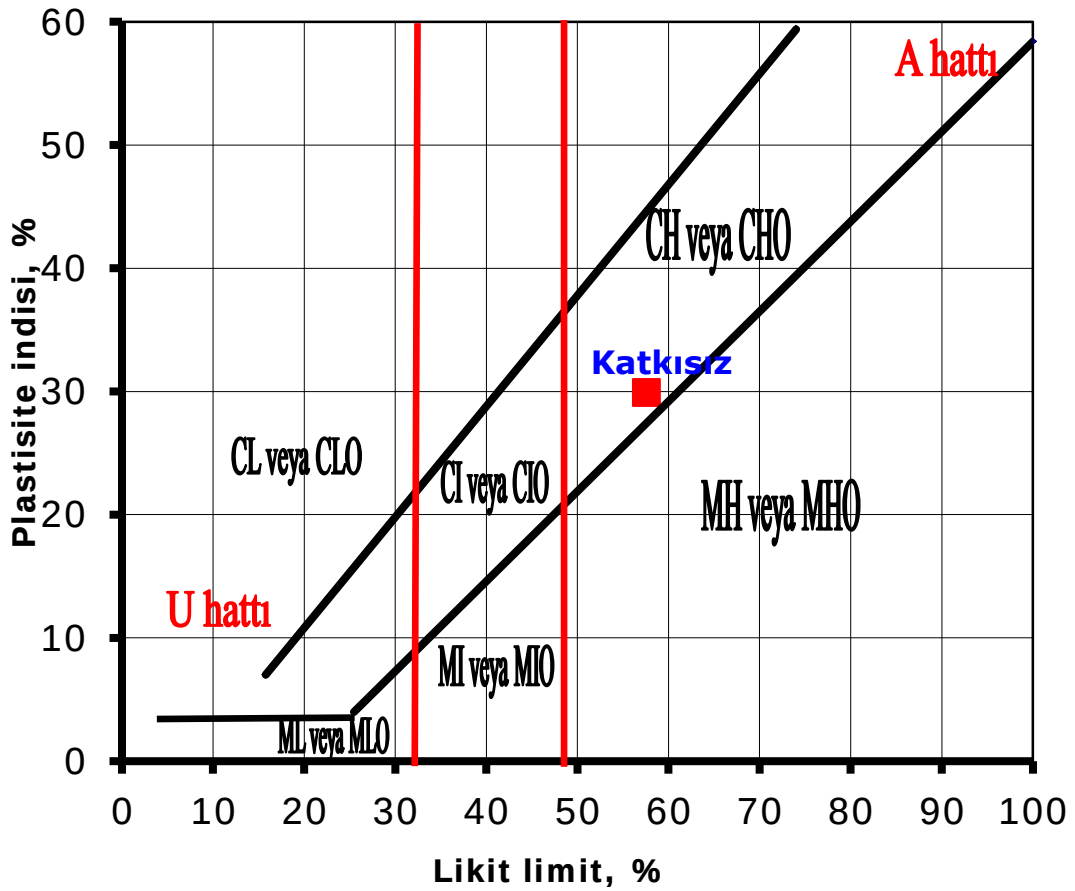


Şekil 2.9. Casagrande aleti ile likit limit değerinin belirlenmesi

Plastik limit, zeminin henüz plastik kıvamda bulunduğu en düşük su içeriğidir. Başka bir deyişle, zeminin 3 mm çapında silindirik çubuklar şeklinde yuvarlandığında, çubukların yüzeylerinde çatlamlar ve kopmalar olduğu andaki su içeriğinin sayısal değeridir.

Plastik limit deneyi, 40 No.lu elekten geçen bir miktar zemin alınıp su katılarak iyice karıştırılıp yoğrulmuştur. Hazırlanan zeminden bir miktar alınarak, bir cam plaka üzerinde el altında yuvarlanmıştır. Zemin çubuğunun çapı yaklaşık 3 mm olduğunda belli miktar su muhtevasında çubuklarda kopmalar meydana gelir. Bu durumdaki su içeriği zeminin plastik limitini verir. Plastik limit deneyi 3 kez yapıp, bulunan su içeriklerinin ortalaması alınıp plastik limit değeri belirlenmiştir.

Doğal malzemenin likit limit ($LL=57.6$) ve plastik limit ($PL=27.7$) değerleri belirlendikten sonra TS 1500’de (2000) yer alan plastisite kartından doğal malzemenin yeri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Casagrande plastisite kartı ve doğal malzemenin plastisite kartındaki yeri

Türk Standartları'na getirilen bir diğer önemli değişiklik ise plastisite kartıdır. Özellikle 1999 Marmara depreminden NP siltlerde görülen sıvılaşma olayı ince taneli zeminlerin düşük, orta ve yüksek plastisiteli olarak ayrılmasının daha doğru olacağını göstermiştir. Orta ve yüksek plastisiteli siltlerin ve killerin (MI-CI ve MH-CH) kesinlikle sıvılaşmayacağı şimdi söylenebilmektedir. Plastisite kartında düşük plastisiteli siltler (ML) ise kolayca sıvılaşma potansiyeli gösteren grup olarak anılmaktadır (Çalık, 2012).

TS 1500 (2000) revizyonundan sonra getirilen bir başka yenilikte CL-ML çift simgesinin kaldırılmasıdır. Çok kısıtlı bir alanda ve siltle kili bir arada tanımlayan çelişkili ve nadiren karşılaşılan bu durumu ortadan kaldırmak için A hattının üstündeki geniş alan düşük plastisiteli killere, içinde kil minerali bulunmayan bu nedenle plastik limiti ölçülemeyen (NP) siltler de A hattının altındaki kısıtlı bölgeye atanmıştır. Bu şekilde daha somut bir sınıflandırma yapılabilecektir. Ayrıca Türk Standartları'nın verdiği plastisite kartından görülen U hattı yaklaşık doğal zeminler için üst sınırı oluşturduğundan bu hattın

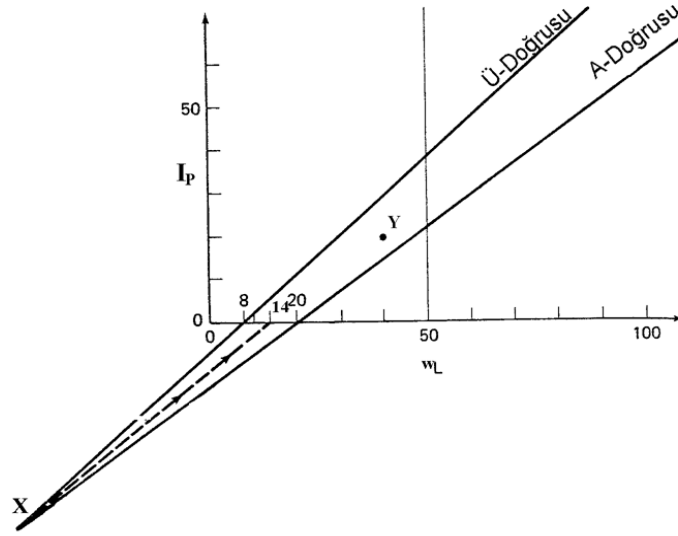
üzerine çıkılmamalıdır. TS 1500’de (2000) eğer U hattının üstüne çıkılıyorsa likit limit ve plastik limit deneylerinin tekrarlanması gerektiğini belirtmiştir (Çalık, 2012).

Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında plastik limit ve likit limit farkı olan plastisite indisi (PI) genellikle kullanılmaktadır. Zeminlerin plastisite özellikleri ve hacimsel değişme davranışı, direkt olarak zemin içindeki koloidal boyuttaki danelerin miktarı ile ilişkilidir. Koloidal terimi, hareketi yerçekimi kuvvetlerinden daha çok yüzey kuvvetleri ile kontrol edilen ve genellikle 0.001 mm’den küçük daneler için kullanılmaktadır. Birçok kil danesi düzensiz şekilleri ve büyük yüzey alanlarına sahip olmasından dolayı koloidal dane olarak dikkate alınabilir. Kil içeriği ile kıvam limitleri aktivite ile ifade edilebilir. Aktivite, kilin su ile etkileşiminin ne derece olduğuna yönelik bir ifade olup zeminin plastisite indisine ve kil yüzdesine bağlı olarak (2.3)’deki denklemden hesaplanmaktadır.

$$Aktivite, A = \frac{PI, \%}{Kil\ miktarı, \%} \quad (2.3)$$

Aktivite katsayısı 0.75’ten küçük olan killer aktif olmayan killer, 0.75-1.25 arasında olan normal killer, 1.25’ten büyük olanlar ise aktif killer olarak kabul edilmektedir (Skempton, 1953).

Rötre (büzülme) limiti, plastisite kartından dolaylı yoldan elde edilmektedir (Şekil 2.11). Bu yaklaşımda “A” ve “U” doğrularının kesişme noktası (X) ile kıvam limitleri arasındaki ilişki göz önüne alınmaktadır. Kesişme noktası X bulunduktan sonra likit limit-plastisite indisi işaretlenir (Y). X ve Y noktalarını birleştiren noktaların apsisi (w_l) kestiği değer rötre limiti olarak kabul edilir (Genç, 2011).



Şekil 2.11.Rötre limitinin plastisite kartından bulunması (Önalp, 2002).

2.4.7. Standart Kompaksiyon Deneyi

Zeminlerin taşıma gücünü artırmak, sabit, hareketli ve dinamik yükler altında meydana gelecek oturmaları azaltmak ve zeminin geçirimsizliğini azaltarak zeminlerin daha fazla su alıp hacimsel değişikliklerin önlenmesi amacıyla, zeminlerin tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar aracılığıyla su ve dane hacmi sabit iken havanın dışarı atılıp zemin danelerinin sıkıştırılması olayına kompaksiyon adı verilmektedir (TS 1900-1).

Kompaksiyon ile zeminin;

- ❖ Taşıma gücünün artması,
- ❖ Kayma mukavemetinin artması,
- ❖ Geçirimsizliğinin azalması,
- ❖ Hacim değiştirme direncinin artması,
- ❖ Oturmaların azalması,
- ❖ Şev stabilitesinin artması sağlanabilmektedir.

Kompaksiyon, zemin iyileştirme yöntemleri arasında en kolay, en ucuz ve özellikle en etkin olanıdır. Kompaksiyonun amacı, minimum seviyede hava boşluğunu sağlayarak maksimum yoğunluğu elde etmektir.

Zeminlerin kompaksiyon derecesi, belirli bir sıkıştırma enerjisi altında sahip olabileceği maksimum yoğunluğunun sıkıştırma sonunda elde edilen yoğunluğuna oranı ile

belirlenir. Kompaksiyon testi ile elde edilen maksimum kuru birim ağırlıktaki su içeriğine optimum su içeriği adı verilmektedir. Eğer zemin, deney yoluyla bulunan optimum su içeriği ile maksimum kuru birim ağırlığına kadar sıkıştırılırsa stabilitesi de maksimum olmaktadır.

Etüvde kurutulan zeminden yeterli miktarda alınarak bir miktar su ile karıştırılarak yoğrulmuştur. Yoğrulan zemin, çapı 10.16 cm, yüksekliği 11.64 cm olan standart kompaksiyon kalıbında eşit kalınlıkta üç tabaka halinde yerleştirilmiştir ve her tabaka 30.5 cm yükseklikten düşürülen 2.5 kg ağırlığındaki tokmakla 25 vuruşla sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıbın yakası çıkartılıp, numune yüzeyi çelik bir cetvel yardımıyla düzeltilmiştir (yaka çıkartıldıktan sonra kalıbın üzerinde kalan numune yüksekliği 6 mm'yi geçmemelidir). Kabın içindeki zemin yaş ağırlığı tartılarak kaydedilmiştir ve kabın hacmine bölünerek yaş birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır.

Deneye, uygun artırımlarda su katılarak, zemin ağırlığı azalma gösterinceye veya zemin çok yumuşak hale gelinceye kadar devam edilmektedir. Yapılan her deney için su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık belirlenir. Belirlenen bu değerlerle kompaksiyon eğrisi oluşturulur ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı veren su içeriği olarak belirlenmektedir.

Kompaksiyon deneyinde her bir karışım için 3000 g numune hazırlanmıştır. Deneylere %20 su miktarı ile başlanmıştır ve her tekrarda %10 su ilave edilmiştir. Şekil 2.12'de standart kompaksiyon deney seti verilmiştir.



Şekil 2.12. Standart kompaksiyon deney seti

2.4.8. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Bir zeminin dikkatle kontrol edilen yoğunluk ve rutubet şartları altında daneler arası direncinin bir ölçüsüdür. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), belli boyutları olan pistonun özel olarak sıkıştırılarak hazırlanmış bir numuneye belirli bir derinliğe kadar batması için gerekli basıncın, aynı pistonun düzgün bir gradasyonu olan kırmataştan hazırlanmış bir numunede aynı batmayı sağlayan basınca oranı olarak tanımlanan ve yüzde olarak ifade edilen bir sayıdır (Kavlak, 2008). Bu test, kohezyonlu zeminlere uygulandığı gibi 19 mm'den daha büyük kısmının çok az olan temel veya alttemel malzemelerinin mukavemetinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Yaş ve kuru olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Bu tez kapsamında yaş CBR deneyi yapılmıştır.

Zemin numuneleri, standart kompaksiyon testi sonucuna göre optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim ağırlığında 6 kg'lık numune olarak hazırlanmıştır. Sıkıştırma yöntemine göre 15.24 cm'lik CBR kalıbında sıkıştırılacak olan numune, şartnamesinde verilen sıkışmayı sağlayacak şekilde optimum rutubetin tolerans sınırları içindeki bir su içeriğinde sıkıştırılmıştır. 3 tabaka halinde her tabakaya 2.5 kg'lık standart kompaksiyon tokmağıyla 56 adet darbe yapılarak sıkıştırılmıştır. Boşlukların tamamen su ile dolduğu en düşük taşıma gücünü yani arazideki doğal koşulları birebir numunede saptayabilmek için CBR yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde hazırlanan numuneler 4 gün suda bekletilmiştir.

Bekletme süresince numune üzerine arazide üstüne 50 cm'lik üstyapı kalınlığı gelecek şekilde Karayolları Genel Müdürlüğü'nün belirlediği standartta yükü temsil eden 17.16 kg'lık (2.27 kg'lık ağırlıklarında toplam 8 disk) ağırlık konulmuştur. Tablo 2.16'da malzeme kalınlığına bağlı ağırlıklar verilmiştir. Dört gün boyunca numunedeki şişme miktarı her 24 saatte bir okunmuştur. Dört günün sonunda numune sudan çıkartılıp, serbest suyu drene olması beklenmiştir. Drene olan numune CBR aletine yerleştirilip (Şekil 2.13), yük ve penetrasyon pistonuna hızı dakikada yaklaşık 1.25 mm olacak şekilde yük uygulanmıştır. Standartta belirtilen penetrasyon değerlerinde yük okumaları tespit edilmiştir. Bu değerlerden gerekli düzeltmeler yapılarak basınç-penetrasyon eğrisi çizilmiştir.

Basınç-penetrasyon eğrisindeki düzeltmelerden sonra 2.54 mm ve 5.08 mm'lik penetrasyonlara karşılık gelen düzeltilmiş basınç değerleri yardımıyla Kaliforniya Taşıma Oranı bulunmuştur. Bu iki düzeltilmiş basınç değerleri birbirine oranlanıp 100 ile çarpılarak CBR değeri Bağlantı (2.4)'e göre bulunmuştur.

$$\text{CBR} = (\text{Düzeltilmiş Basınç} / \text{Standart Basınç}) * 100 \quad (2.4)$$

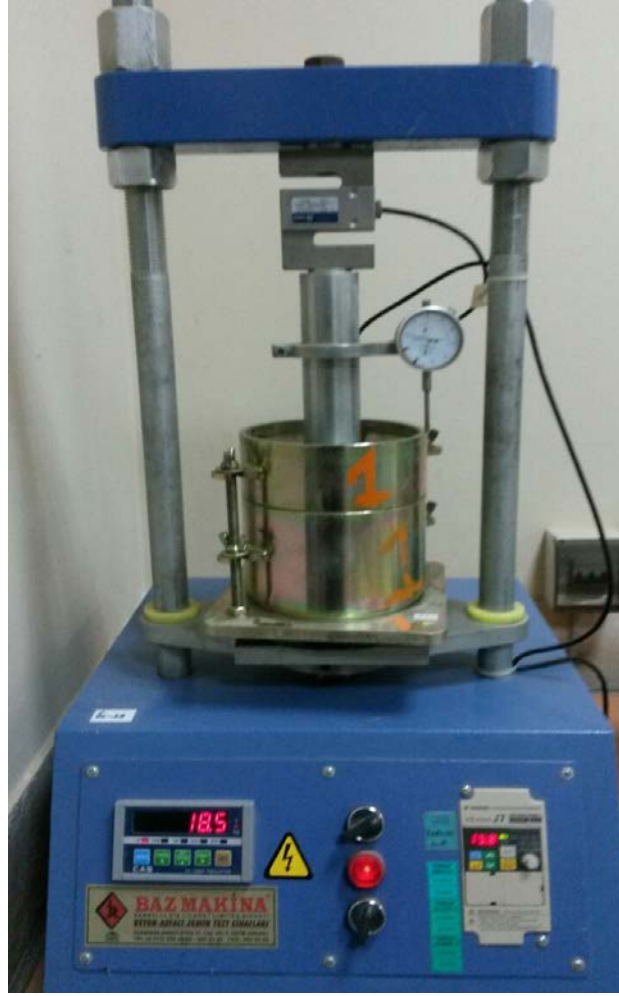
Bu denklemde CBR sayısı su içeriğinde hazırlanan zemin numunesinin üzerine belirli bir hızla batırılan penetrasyon pistonunun istenilen derinliğe ulaşabilmesi için uygulanan birim kuvvetin, kırma taşla yapılan deneyde aynı pistonun aynı derinliğe ulaşabilmesi için uygulanan standart gerilmeye oranı olarak tanımlanır. Penetrasyon derinliğine bağlı olarak standart gerilme miktarları Tablo 2.15'te verilmiştir.

Tablo 2.15. Penetrasyon derinliğine bağlı olarak standart gerilme miktarları

Penetrasyon Derinliği (mm)	Standart Gerilme (kgf/cm²)	Standart Yük (kgf)
2.54	70.4	1362.6
5.08	105.6	2034.9
7.62	133.7	2587.7
10.16	161.9	3133.5
12.7	183	3541.9

Tablo 2.16. CBR deneyinde kullanılan disk sayıları

Üzerindeki malzeme kalınlığı (cm)	2124 cm³ hacminde kalıp için ağırlık (kg)	2.27 kg'lık ağırlık adedi
10	3.43	2
15	5.15	2
20	6.86	3
25	8.60	4
30	10.30	5
35	12.01	5
40	13.73	6
45	15.45	7
50	17.16	8
55	18.88	8
60	20.59	9



Şekil 2.13. CBR deney aleti

Genel olarak, 2.54 mm batmaya karşılık gelen CBR değeri taşıma oranı olarak alınmaktadır. Şayet 5.08 mm batmadaki oran daha büyük ise deney tekrarlanmalıdır. Yine aynı sonuç elde ediliyorsa 5.08 mm'lik batmaya karşılık gelen oran CBR değeri olarak alınmaktadır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Zeminler, genel itibariyle homojen olmayan mühendislik özellikleri çevre koşullarına, jeolojik tarihçesine ve zamana bağlı olarak değişiklikler gösteren karmaşık yapıya sahip malzemelerdir. Bu nedenle zemin özelliklerinin her proje sahası için deneysel olarak belirlenmesi ve arazide geçerli olacak şartlara en uygun ortamın belirlenerek deneylerin yapılması gerekmektedir. Deneysel olarak belirlenen birçok zemin özelliğini belirli koşullarda geçerliliğini korumakta bu da deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçların yanıltıcı olmasına yol açabilmektedir.

Zeminler yapı yüklerini taşıyan, birçok zeminin hammaddesi olarak kullanıldıklarından dolayı bazı özelliklerinin deneysel çalışmalarla belirlenmesi zorunluluk ihtiva etmektedir. Yer kabuğunu oluşturan zemin ve kayaların taşıma gücü, mukavemet, hacimsel değişim davranışı (şişme-kabarma, büzülme, donma, sıkışma vb.) yarma ve dolgu şevlerinin stabilitesi, dren yeteneği, artan su içeriğindeki davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Yayılım göletinden temin edilen doğal malzemenin kolemanit atığı ve kireç kullanılarak yapılan bu stabilizasyon çalışması kapsamında mühendislik parametrelerinde göstereceği değişimleri ortaya koymak için zemin deneyleri yapılmıştır.

Bu bölümde, katkı maddeleri katılarak elde edilen karışımlara uygulanan deneyler doğrultusunda deney sonuçlarına ilişkin irdeleme ve değerlendirmeler yapılmaktadır.

3.1. Elek Analizi Bulguları ve İrdelenmesi

Doğal malzemeye katkı maddeleri (öğütülmüş kolemanit atığı, 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığı ve kireç) ilave edilerek oluşturulan tüm karışım numuneleri yıkamalı elek analizine tabi tutularak karışımlardaki ince daneli malzemenin (kil + silt) oranını belirlemek amaçlanmıştır. Buna göre hazırlanan tüm karışımlara ait ıslak analiz sonuçlarına göre belirlenen zemin sınıfları Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Tüm karışımlara ait zemin sınıfları

Katkısız	%0	CH
Öğütülmüş Kolemanit (ÖKT)	%5	CL
	%10	CL
	%15	CL
	%20	CL
4 No.lu Elekten Geçen Kolemanit (KT)	%5	CL
	%10	CL
	%15	CL
	%20	CL
Kireç (K)	%5	ML
	%10	MH
	%15	MH
	%20	MH
Öğütülmüş Kolemanit ve Kireç (ÖKTK)	%5	ML
	%10	ML
	%15	ML
	%20	ML

Yapılan elek analizi sonucuna göre öğütülmüş kolemanit atığı ve 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığı ilavesi ile doğal malzemenin sınıfı CH (yüksek plastisiteli kil) iken CL yani düşük plastisiteli kil sınıfına girmiştir. Kireç katkısı ilavesinde ise zemin sınıfında önemli bir değişiklik olduğu görülmektedir. Yani yüksek plastisiteli kil olan doğal malzeme silt gibi bir davranış sergilemiştir. Ayrıca öğütülmüş kolemanit atığı + kireç katkılı karışım numuneleri de CH zemin sınıfından ML zemin sınıfına değiştiği gözlenmiştir.

3.2. Kıvam (Atterberg) Limiti Bulguları ve İrdelenmesi

Doğal malzemeye kil miktarının kuru ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında öğütülmüş kolemanit atığı, 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığı, kireç ve öğütülmüş kolemanit atığı ile kireç karışımları yarı yarıya ilave edilerek kıvam limiti deneyleri yapılmıştır.

Doğal malzeme ve öğütülmüş kolemanit katkılı (ÖKT) karışımların likit limit, plastik limit ve rötre limiti deney sonuçları ile karışımların plastisite indisleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. ÖKT karışımlarının kıvam limitleri

	ÖKT0	ÖKT5	ÖKT10	ÖKT15	ÖKT20
LL, %	57.6	51.6	49.2	42.0	43.9
PL, %	27.7	21.7	20.8	20.1	23.9
SL, %	18.0	14.0	14.8	15.0	18.0
PI, %	29.9	29.9	28.4	21.9	20.0

Tablo 3.3'te 4 No.lu elekten geçen kolemanit (KT) ile doğal malzeme karışımlarının ve Tablo 3.4'te kireç ile doğal malzeme karışımlarının kıvam limitleri verilmiştir. Doğal malzeme, kireç ve öğütülmüş kolemanit karışımlarının (ÖKTK) likit limit, plastik limit ve rötre limiti deneylerine ait sonuçlar ile plastisite indisleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.3. KT karışımlarının kıvam limitleri

	KT0	KT5	KT10	KT15	KT20
LL, %	57.6	51.2	46.0	48.0	40.9
PL, %	27.7	21.7	23.2	26.6	22.6
SL, %	18.0	14.0	16.0	19.0	17.0
PI, %	29.9	29.5	22.8	21.4	18.3

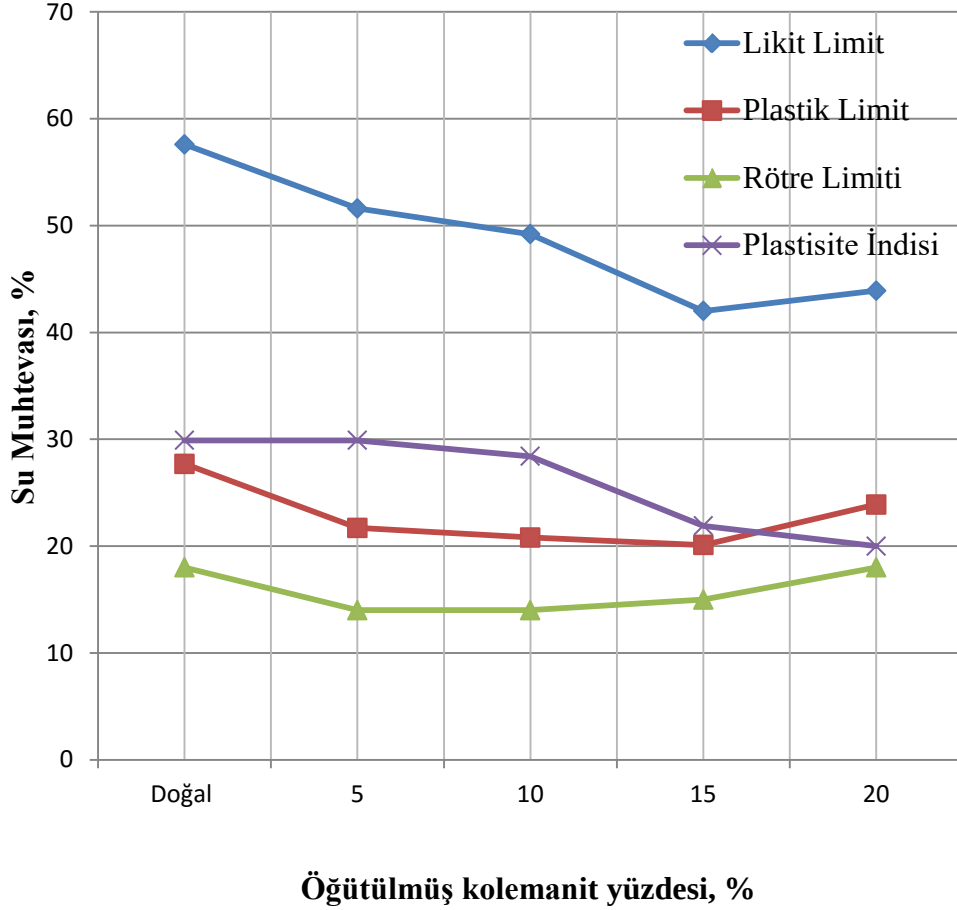
Tablo 3.4. K karışımlarının kıvam limitleri

	K0	K5	K10	K15	K20
LL, %	57.6	41.7	50.6	50.7	48.4
PL, %	27.7	31.3	38.3	38.7	34.0
SL, %	18.0	26.0	31.0	31.0	27.0
PI, %	29.9	10.4	12.3	12.0	14.4

Tablo 3.5. ÖKTK karışımların kıvam limitleri

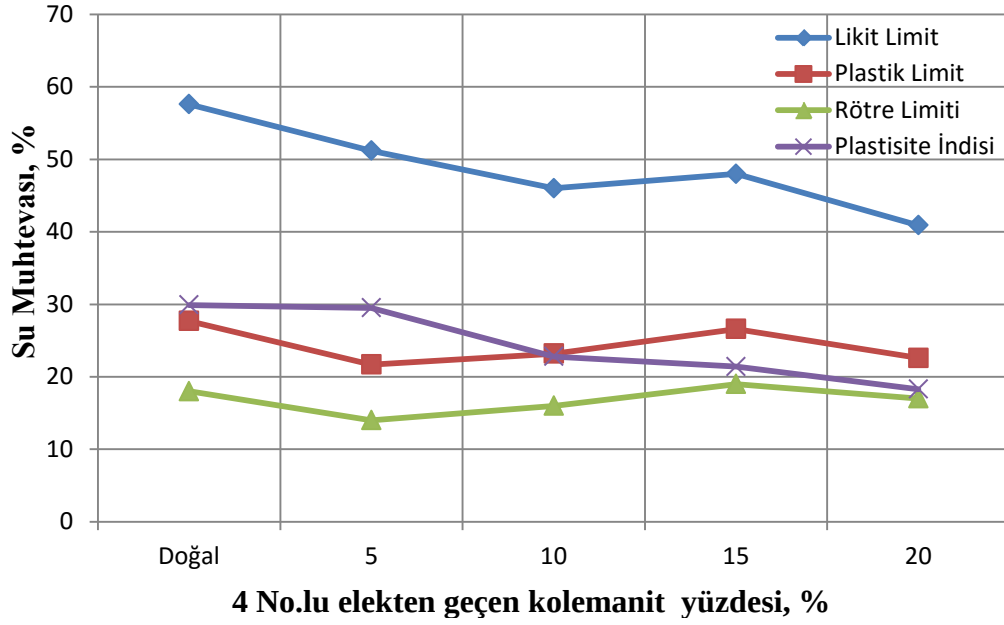
	ÖKTK0	ÖKTK2.5	ÖKTK5	ÖKTK7.5	ÖKTK10
LL, %	57.6	47.4	46.6	45.8	45.6
PL, %	27.7	34.2	34.8	32.4	34.3
SL, %	18.0	27.0	28.0	26.0	28.0
PI, %	29.9	13.2	11.8	13.4	11.3

ÖKT, KT, K ve ÖKTK karışımlarının likit limit, plastik limiti rötre limiti ve plastisite indislerindeki değişimler sırasıyla Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.



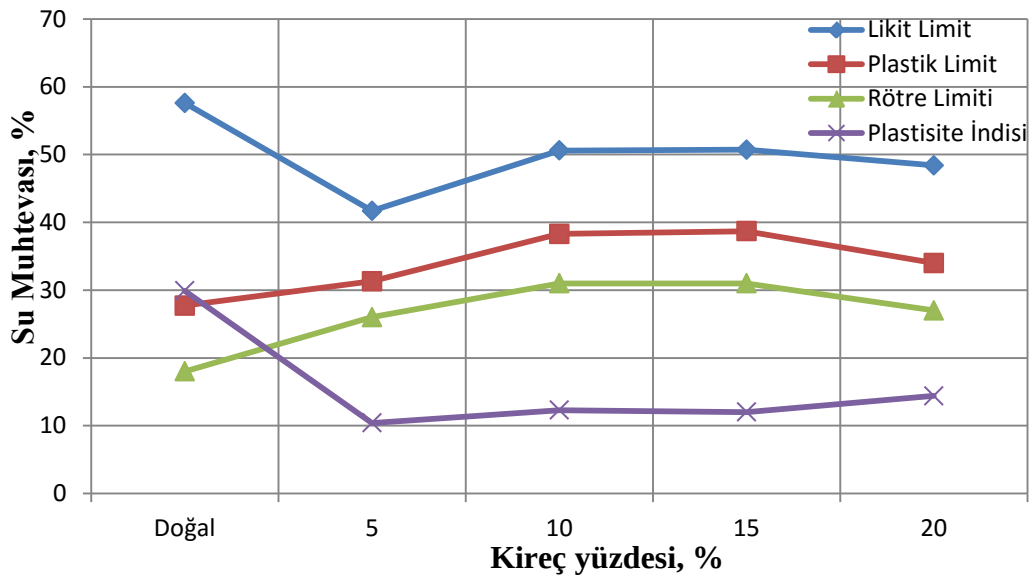
Şekil 3.1. Doğal halde ve değişik ÖKT oranlarında Atterberg limitleri

Şekil 3.1'den görüldüğü gibi killi bir malzemeye öğütülmüş kolemanit ilave edildiğinde likit limit, plastik limit ve plastisite indisi doğal malzemeye göre azalmaktadır. Zemin öğütülmüş kolemanit ile karıştırıldıktan sonra kıvam limitlerinde meydana gelen bu değişme zeminin plastik halden daha sert hale geçtiği ve dayanım kazandığı düşünülmektedir. Ayrıca karışımların rötre limiti %5, %10 ve %15 katkı oranlarının ilavesi ile azalırken, %20 katkı oranının ilavesiyle rötre limitinin değişmediği görülmektedir.



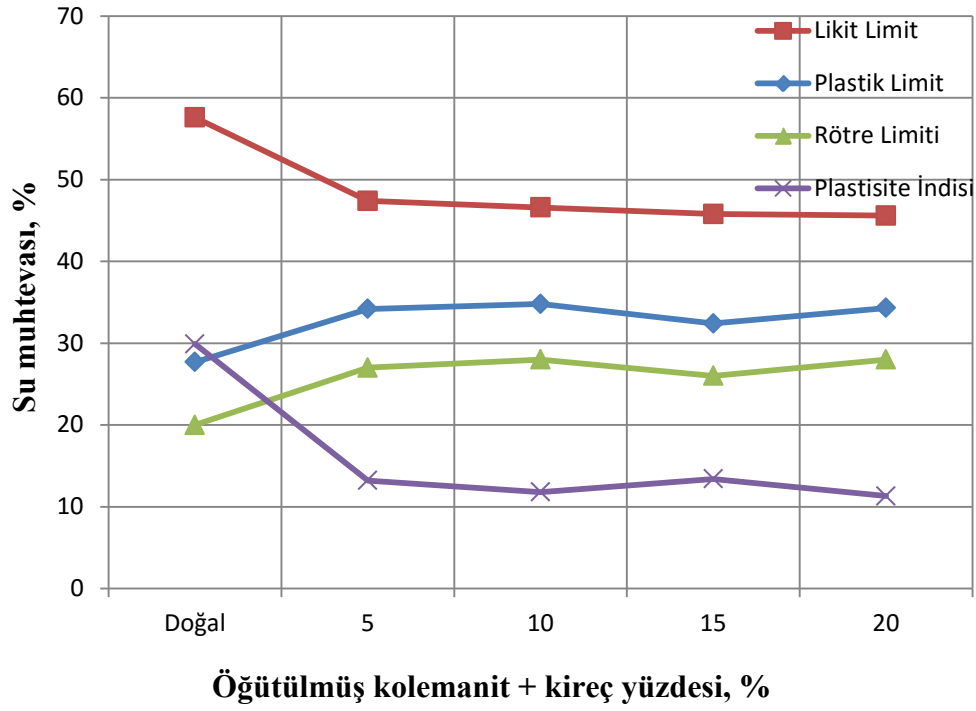
Şekil 3.2. Doğal halde ve değişik KT oranlarında Atterberg limitleri

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kum boyutunda kolemanit katkılı numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisinde doğal malzemeye göre azalma meydana gelmiştir. Doğal malzemeye %20 katkı malzemesi ilave edildiğinde kıvam limitlerinde en çok değişimin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.3. Doğal halde ve değişik kireç yüzdelerinde Atterberg limitleri

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi yüksek plastisiteli killi bir zemine kireç ilavesiyle daha önce yapılmış çalışmalara benzer şekilde likit limit düşmekte, plastik limit artmakta ve plastisite indisi düşmektedir. Zemine kireç eklendikçe plastik limiti artarak ve plastisite indisi düşerek, zemin esnek halden sert hale geçtiği ve dayanımının arttığı bilinmektedir.



Şekil 3.4. Doğal halde ve değişik ÖKT + K yüzdelerinde Atterberg limitleri

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi öğütülmüş kolemanit ile birlikte doğal zemine kireç ilavesi ile likit limit değerinde en çok azalma %10 katkı oranının ilavesi ile meydana geldiği, plastik limit değerlerinde artma olduğu görülmektedir. Toplamda %10 oranında ilave edilen katkıları plastisite indisinde önemli bir azalma gösterdiği, bunun yanı sıra rötre limitinde %5 katkı oranında artış sağlandığı görülmektedir.

3.3. Optimum Su Muhtevası ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık Bulguları

Doğal malzemeye katılan tüm karışımlara ait standart kompaksiyon deneylerinin sonuçlarından elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla Tablo 3.6, Tablo 3.7, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’da ve tüm karışımların standart kompaksiyon deneyi sonucunda meydana gelen değişimler Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. ÖKT karışımlarının kompaksiyon parametreleri

	Optimum su içeriği, %	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³
ÖKT0	21.02	1.518
ÖKT5	19.58	1.603
ÖKT10	17.48	1.693
ÖKT15	16.24	1.742
ÖKT20	13.94	1.752

Tablo 3.7. KT karışımlarının kompaksiyon parametreleri

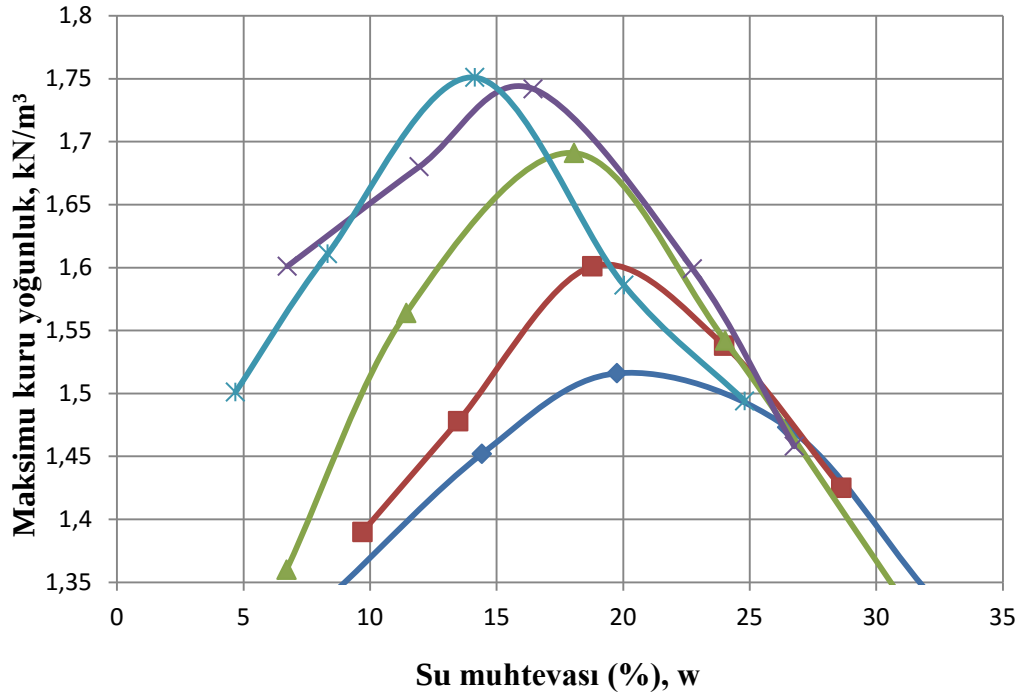
	Optimum su içeriği, %	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³
KT0	21.02	1.518
KT5	21.17	1.586
KT10	18.25	1.701
KT15	16.06	1.753
KT20	15.39	1.767

Tablo 3.8. K karışımlarının kompaksiyon parametreleri

	Optimum su içeriği, %	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³
K0	21.02	1.518
K5	20.32	1.500
K10	20.63	1.494
K15	23.08	1.480
K20	26.22	1.465

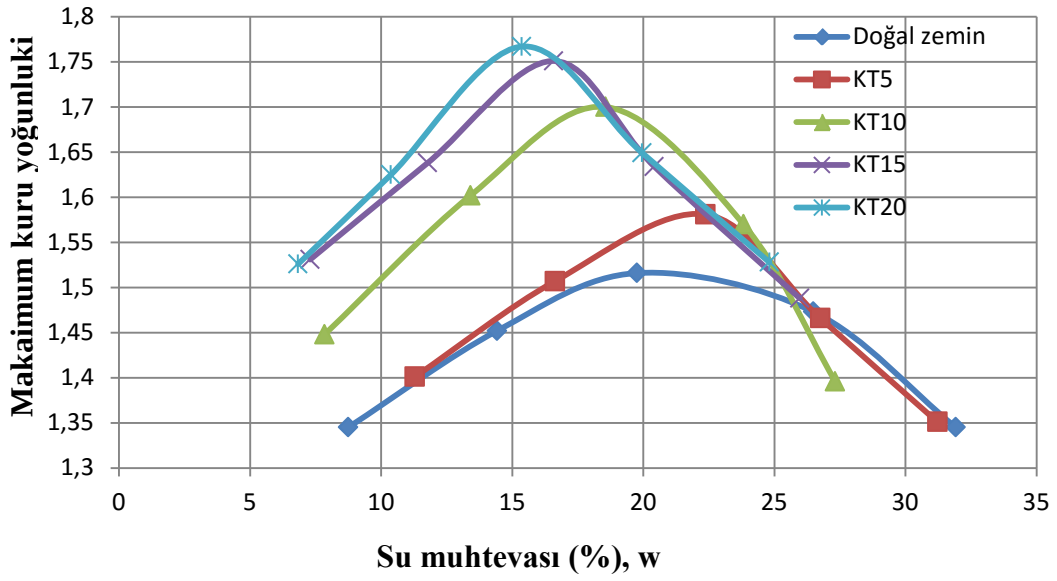
Tablo 3.9. ÖKTK karışımlarının kompaksiyon parametreleri

	Optimum su içeriği, %	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³
ÖKT-K0	21.02	1.518
ÖKT-K5	20.09	1.521
ÖKT-K10	21.89	1.545
ÖKT-K15	22.10	1.559
ÖKT-K20	22.33	1.547



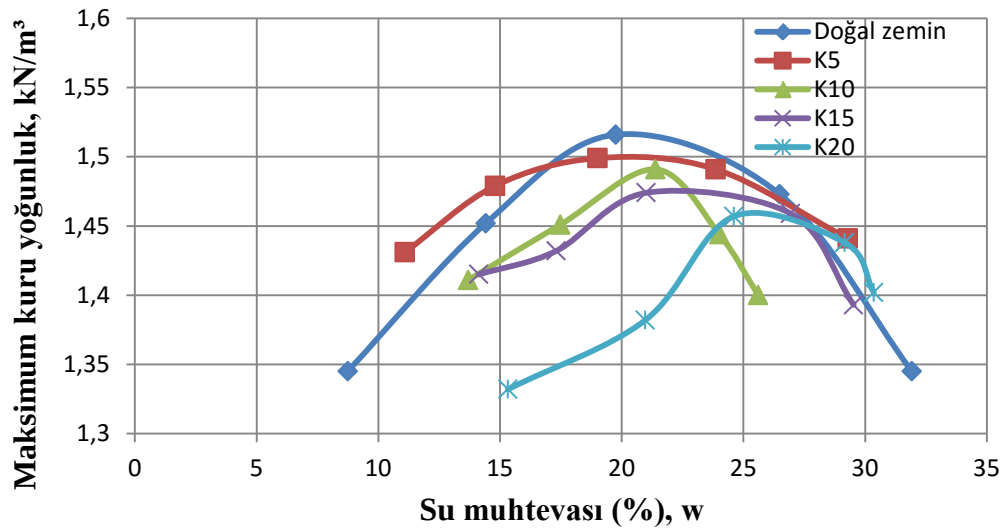
Şekil 3.5. ÖKT karışımlarının standart kompaksiyon eğrileri

Standart kompaksiyon eğrisi incelendiğinde, doğal malzemenin doğal halde maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.518 (kN/m³), optimum su muhtevası %21.02 olduğu görülmüştür. Zemine ilave edilen öğütülmüş kolemanit atığı miktarı arttıkça kuru birim hacim ağırlıklarda artma, optimum su içeriklerinde azalma olduğu görülmektedir. Öğütülmüş kolemanit atığı zemindeki su içeriğini kimyasal bir katkı gibi emmeyip optimum su içeriğini arttırdığı için maksimum kuru birim hacim ağırlığı azaltmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlıkta %20 öğütülmüş kolemanit atığı ilavesi ile önemli bir artış meydana gelmediği dolayısıyla %20 katkı oranının pek fazla etki etmediği görülmektedir.



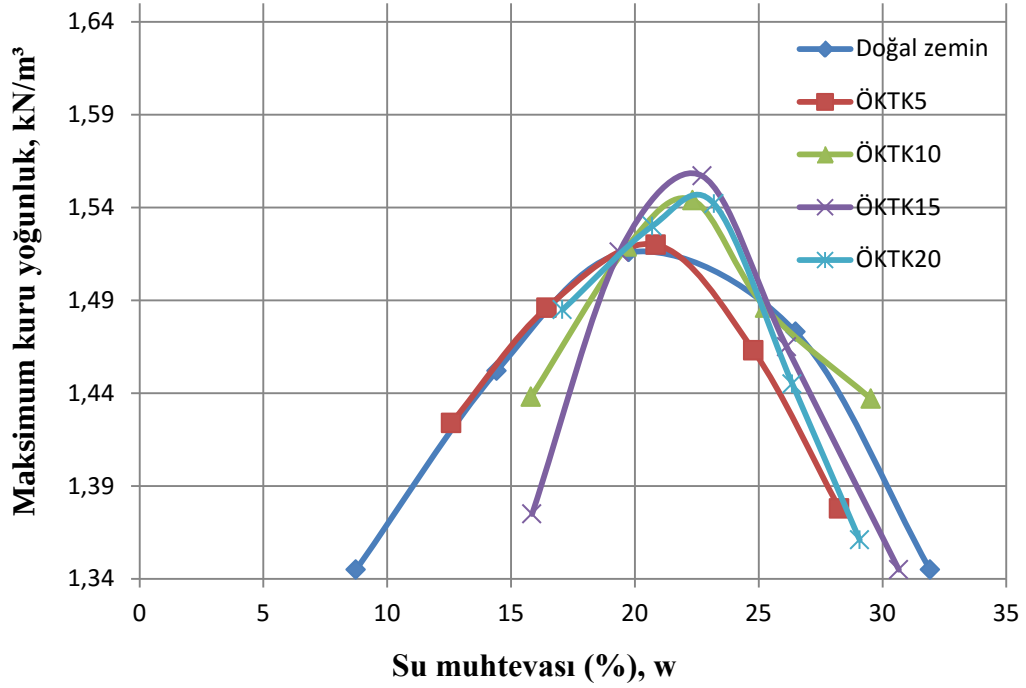
Şekil 3.6. KT karışımlarının kompaksiyon eğrileri

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi zemine ilave edilen 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığı ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlık doğal numuneye göre artarken optimum su içeriği azalmaktadır. Şekil 3.5'te ilave edilen öğütülmüş kolemanit atığı ile 4No.lu elekten geçen kolemanit atığının optimum su içerikleri karşılaştırılınca ,%20 öğütülmüş kolemanit atığı katkılı numunenin optimum su içeriğindeki azalmanın doğal numuneye göre yaklaşık % 33 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.7. K karışımlarının kompaksiyon eğrileri

Şekil 3.7’de yüksek plastisiteli kile ilave edilen kireç miktarıyla kuru birim hacim ağırlık azalırken, optimum su içeriği artmıştır. Bunun nedeni kireç zemindeki suyu absorbe ederek zemindeki su içeriğini azalttığı için optimum su muhtevası artmakta dolayısıyla maksimum kuru birim hacim ağırlıkta azalmaktadır.

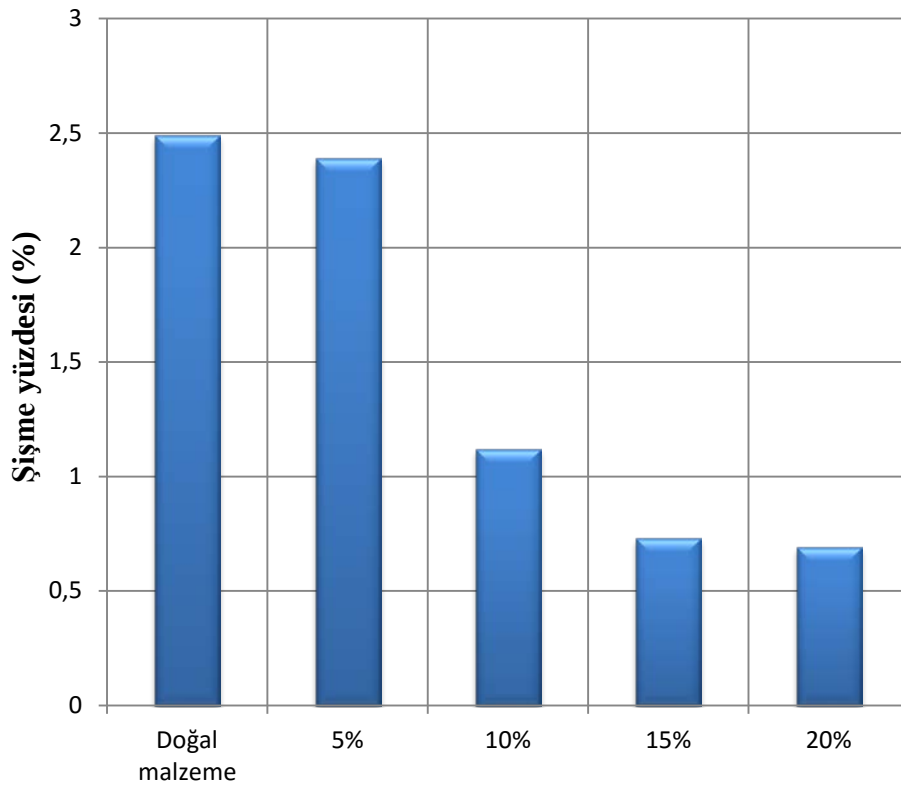


Şekil 3.8. ÖKT-K karışımlarının kompaksiyon eğrileri

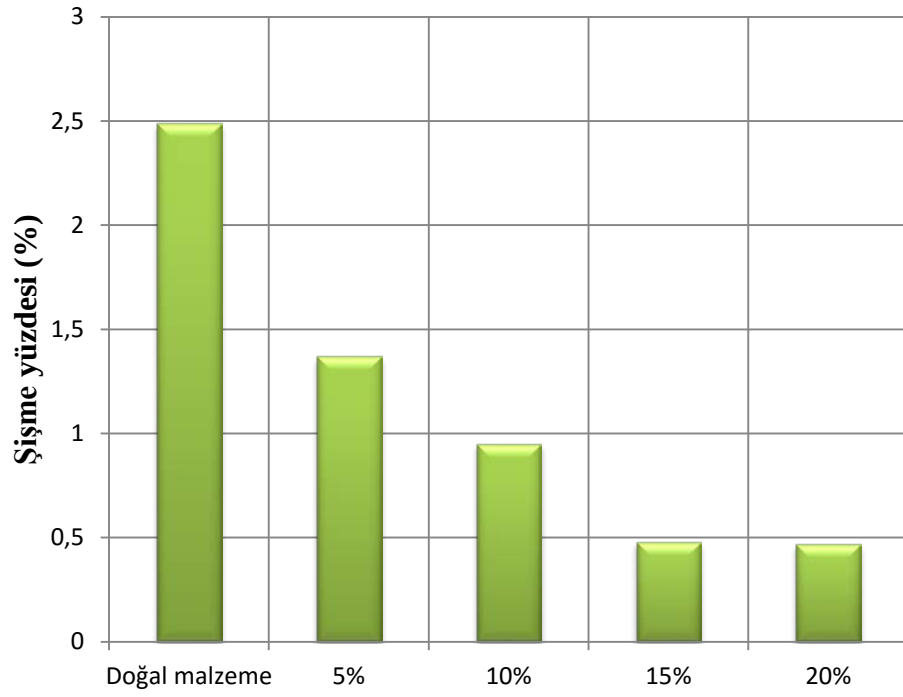
Şekil 3.8’de görülen öğütülmüş kolemanit + kireç karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlıkları doğal numuneye göre artmakta, en çok artış sağlayan %7.5 ÖKT + %7.5 K (toplam %15) katkılını numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Karışım numunelerinin optimum su içerikleri genel olarak katkısız numuneye göre artış sağlamıştır. Optimum su içeriğinde en çok artışı sağlayan numune %10 ÖKT + %10 K olarak görülmektedir. Bunun sebebi olarak artan katkı oranı ile birlikte zemindeki su absorbe edilerek maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriğinde artış sağladığı görülmektedir.

3.4. CBR-Şişme Yüzdesi Bulguları ve İrdelenmesi

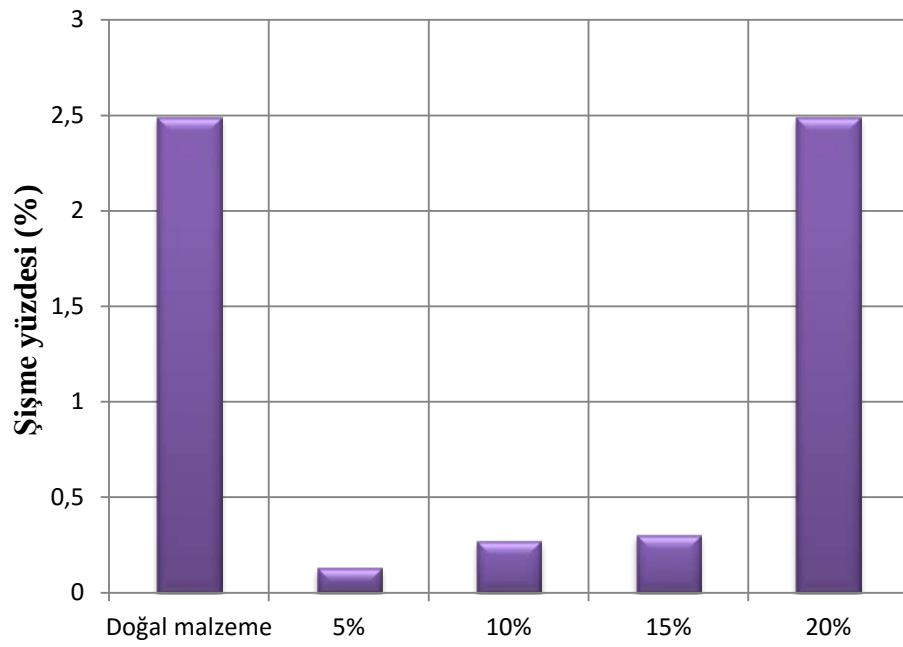
Yaş CBR yapılmadan önce oluşabilecek en kötü çevre şartları dikkate alınarak su içinde bekletilen tüm karışım numunelerinin 4 gün sonunda oluşan şişme yüzdeleri şişme değerlerine ait değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir. Şişme yüzdeleri doğal duruma göre,%5 ÖKT ilavesi ile % 2.39’a, %10 ÖKT ilavesi ile %1.12’ye,%15 ÖKT ilavesi ile %0.73’e, %20 ÖKT ilavesi ile %0.69’a ve %20 KT ilavesi ile %0.47’ye kadar düşmüştür. %5 kireç ilavesi ile şişme yüzdesi % 0.13’e kadar düşerken, bu katkı oranından sonra şişme yüzdesi genel bir artış göstererek %20 kireç ilavesinde doğal numuneyle aynı şişme oranını vermiştir. ÖKT + K karışımlarına gelince %5’lik karışımda %0.06’ya düşerken daha sonraki karışım oranlarında artma olduğu, fakat bu artışın doğal numuneye göre yine daha az olduğu görülmektedir.



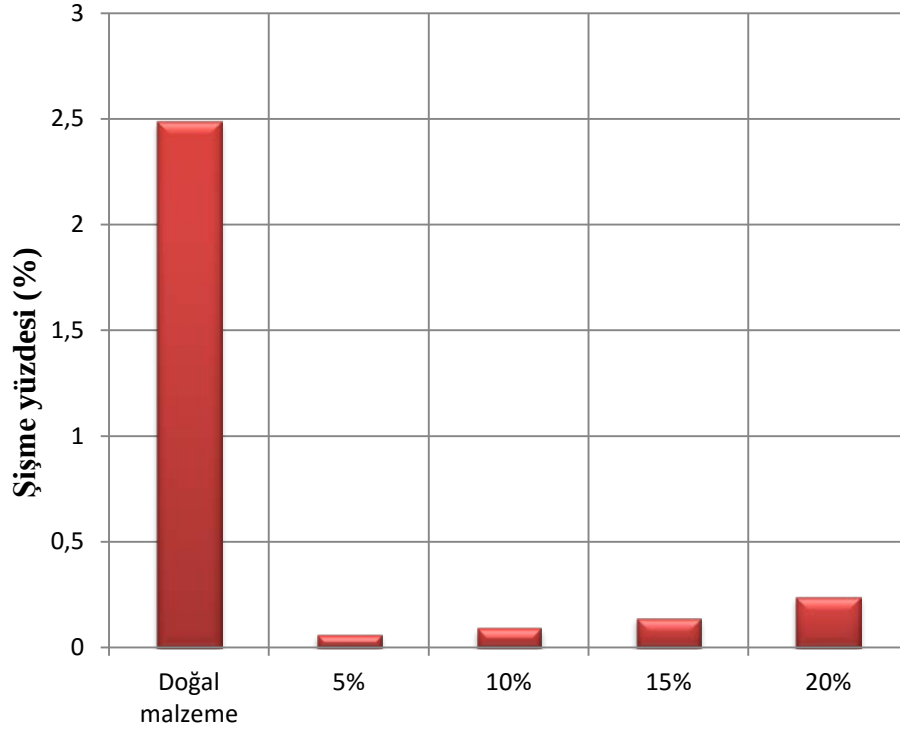
Şekil 3.9. Doğal malzeme ve ÖKT karışımlarının şişme yüzdeleri



Şekil 3.10. Doğal malzeme ve KT karışımlarının şişme yüzdeleri



Şekil 3.11. Doğal malzeme ve K karışımlarının şişme yüzdeleri

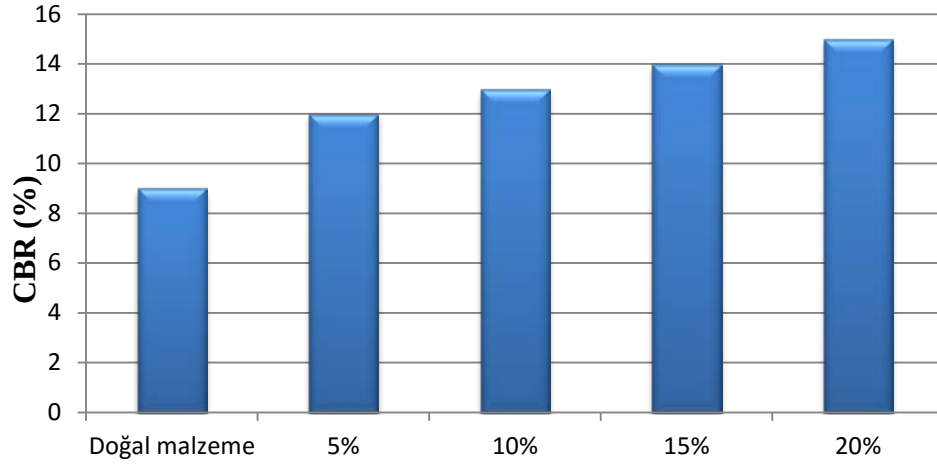


Şekil 3.12. Doğal malzeme ve ÖTKK karışımlarının şişme yüzdesi

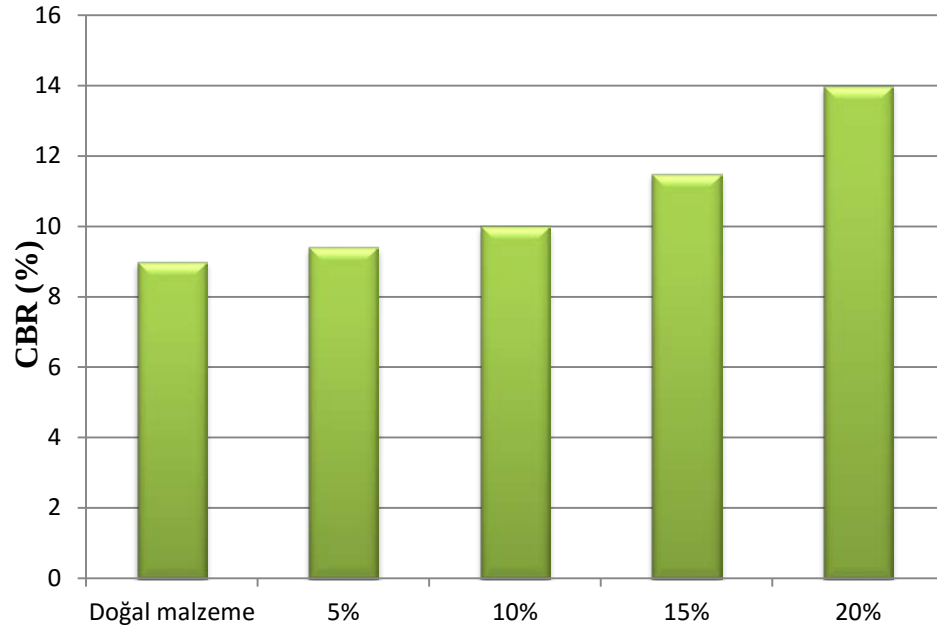
Bu deneyden elde edilen şişme yüzdesi sonuçlarına bakıldığında, kolemanit ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı için mevcut sonuçları vermekle kalınmıştır. Fakat killi zemine kireç ilavesiyle yapılan daha önceki çalışmalara bakıldığında şişme yüzdesinde önemli ölçüdeki azalmalar olduğu görülmüştür. Dolayısıyla sonuçlar önceki çalışmalarla paralellik göstermektedir. %20 kireç ilavesi ile zeminin şişme yüzdesinin doğal malzemenin şişme yüzdesine eşit olduğu görülmektedir. Bu durum belli bir orandan sonra kireç ilavesinin olumsuz etki ettiği görülmüştür. Ayrıca Karayolları Teknik Şartnamesi'nde dolgular için şişme yüzdesi $< \%2$ olmalıdır. Buna göre doğal zemin bu şartı sağlamazken, ilave edilen tüm katkı maddeleriyle (%20 kireç katkılı numune hariç) oluşturulan karışım numunelerinin bu şartı sağladığı görülmektedir.

3.5. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Bulguları ve İrdelenmesi

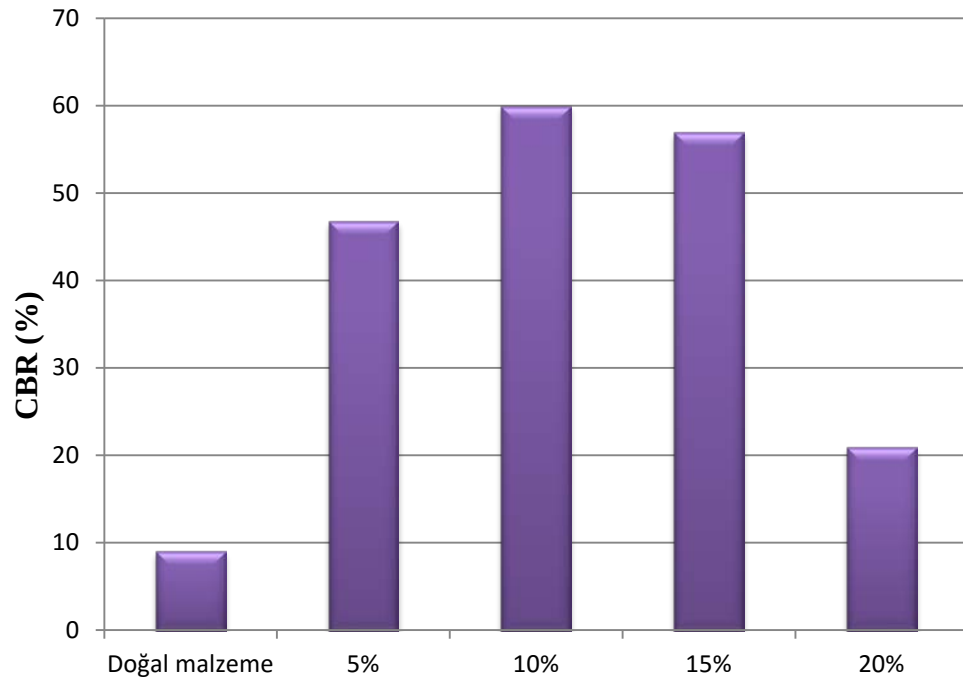
Yüksek su muhtevalı bir zemin üzerinde farklı katkı maddelerinin farklı oranlarda (%5-10-15-20) ilave edilmesi sonucu yapılan yaş CBR deney sonuçları sırasıyla Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.14 ve Şekil 3.16’da verilmiştir.



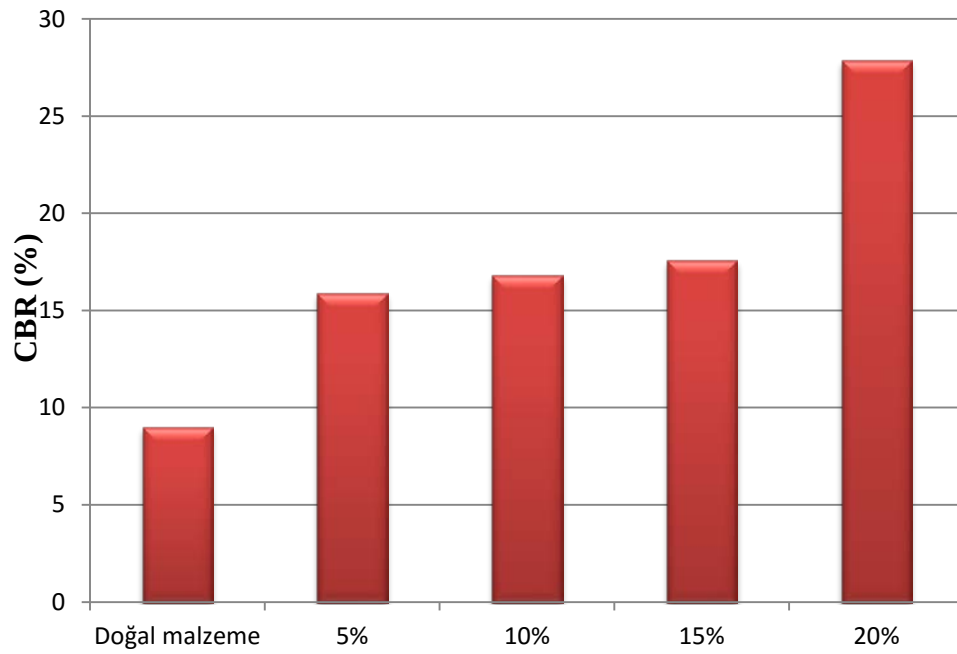
Şekil 3.13. Doğal malzeme ve ÖKT karışımlarının CBR değerleri



Şekil 3.14. Doğal malzeme ve KT karışımlarının CBR değerleri



Şekil 3.15. Doğal malzeme ve K karışımlarının CBR değerleri



Şekil 3.16. Doğal malzeme ve ÖKTK karışımlarının CBR değerleri

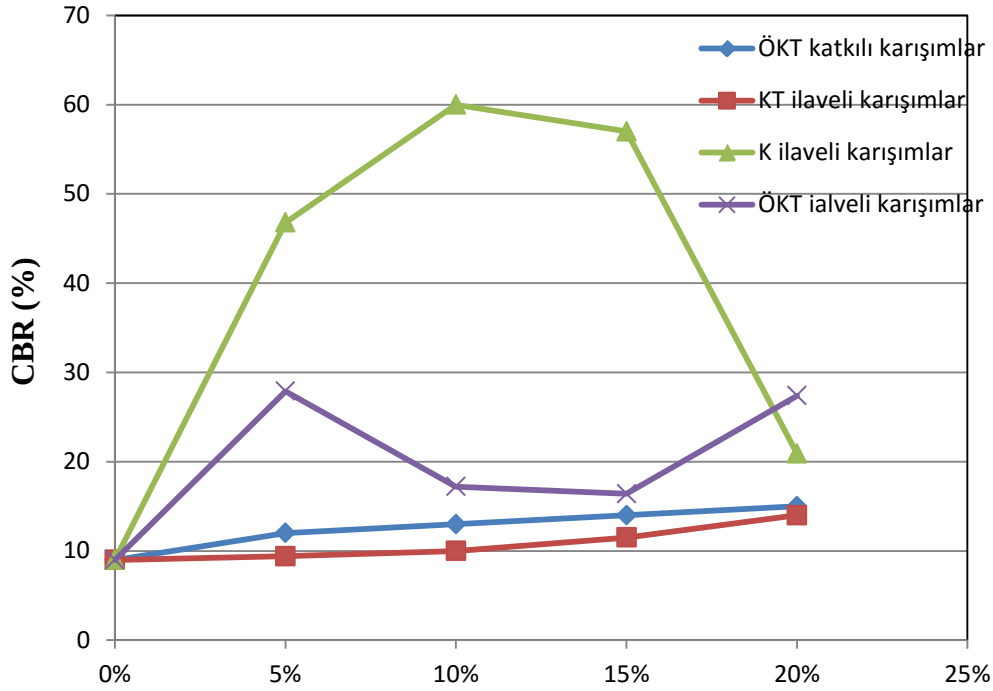
Şekillerden görüldüğü gibi yüksek su muhtevalı killi bir zemine kolemanit atığı ve kireç karıştırıldığında CBR değerleri artmıştır. Doğal malzemenin CBR değeri %9 iken %20 öğütülmüş kolemanit atığı ilavesi ile %15'e, %20 4 No.lu elekten geçen kolemanit atığı ilavesiyle de %14'e yükselmiştir. Ancak en yüksek artış sadece kireç ilaveli numunelerde olmuştur. %5, %10 ve %15 kireç katkılı numunelerin taşıma gücü değerleri tüm karışım numuneleri içinden en yüksek sonucu vermiştir. Kireç ve öğütülmüş kolemanit katkılı numunelerin CBR değerleri, ÖKTK2.5 karışım numunesinin CBR değeri %27.9'a, ÖKTK5 karışım numunesinin CBR değeri %17.2'ye, ÖKTK7.5 karışım numunesinin CBR değeri %16.4'e ve ÖKTK10 karışım numunesinin CBR değeri %27.4' yükselmiştir.

%15 kireç oranından sonra zemine katılan kireç mukavemet artışı sağlamadığı, %20 kireç ilavesiyle CBR değerinde çok az bir artış sağladığı görülmüştür. Bu durum, doğal malzemedeki filler malzeme miktarını arttırarak sıkışabilirliği azalttığı için mukavemet artışı sağlamadığı şeklinde açıklanabilir. Zemine ilave edilen kireç kil taneleri ile reaksiyona girmekte ve belli bir kireç oranından sonra katılan kireç artık reaksiyon gerçekleştirmemekte dolayısıyla zeminde mukavemet artışı olmamaktadır.

Kolemanit ilave edilen karışımların CBR değerleri kireç ilave edilen karışımlara göre düşük olmasının nedeni, kolemanit atığının su içindeki bekletilmesine bağlı olarak yapısının bozulması olarak düşünülmektedir. Nitekim öğütülmüş kolemanit atığı + kireç katkılı numunelerin CBR değerlerine baktığımızda kireç katkılı numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada elde edilen CBR değerlerinin artan katkı oranlarına göre değişim grafikleri Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Buna göre, yüksek plastisiteli bir malzemeye kolemanit, kireç ve bu ikisinin karışımı ilave edildiğinde doğal malzemeye göre CBR değerlerinde tüm karışımlarda artış olmuştur. En fazla artış %10 kireç ilavesiyle katkısız numuneye göre yaklaşık 7 kat artış sağlamıştır. Ancak tüm karışımlara değer olarak bakıldığında Karayolları Teknik Şartnamesi'nde belirtilen zayıf zeminler için $CBR < 10$ şartının üstünde olduğu görülmüştür. Bu bilgi dâhilinde değerlendirme yapılacak olursa, kolemanit atığı ve kireç ilaveli numunelerin CBR değerini arttırdığı görülmüştür.

Şekil 3.17'de tüm karışımların yaş CBR değerlerine ait değişim eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.17. Yaş CBR değerlerinin katkı oranlarına göre değişim eğrileri

3.6. Esnek Üstyapı Tasarımı (AASHTO-1986 Metodu ile)

Amerika’da AASHTO tarafından 1960 yılının ikinci yarısında başlatılıp 1970 yılı ilk yarısında tamamlanan AASHTO deneyleri sonunda, AASHTO proje komitesi tarafından, 1972 yılında ise aynı komite tarafından geliştirilmiş olarak ‘AASHTO Üstyapıların Projelendirilmesi Geçici Rehberi’ çıkarılmıştır. 1981 yılında aynı komite tarafından 1972 baskısı revize edilerek 1986 yılında son baskısı yayınlanmıştır. Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 1971’de ‘Karayolu Esnek Üstyapılarını Projelendirme Kuralları’ adlı teknik bültenle AASHTO metodu kullanılmaya başlanmıştır. 1984 yılında ise ülkemizde AASHTO metodu resmi olarak uygulanmaya başlanmıştır.

3.6.1. Esnek Üstyapı Tasarımında Takip Edilecek Sıra ve Yöntem

Esnek üstyapı tasarımı için AASHTO-1986 Rehberinde takip edilecek sıra; asfalt betonu veya sathi kaplamalı esnek üstyapıların tasarımında ana yaklaşım, hizmet ömrü

içinde dingil yüklerinin üstyapıda oluşturacağı bozulmaları önleyerek bir üstyapı sayısının (SN) belirlenmesidir.

Esnek üstyapıyı oluşturan tabaka kalınlıklarının tespitinde;

$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \dots + a_n D_n m_n$ formülü kullanılacaktır.

Burada;

SN : üstyapı sayısı (inç veya cm olarak).

a_n : n. tabaka katsayısı.

D_n : n. tabaka kalınlığı (inç veya cm olarak).

m_n : n. tabaka drenaj katsayısı.

Üstyapı tasarımında ilk önce taban zemini için daha sonra aynı şekilde temel ve alttemel tabakaları için SN değerleri hesaplanır. Tavsiye edilen asgari kalınlıklar, uygulanacak inşaatın çevre koşullarına ve iklimine bağlıdır. Kaplama tabakası kalınlığı için SN değeri bulunmamaktadır.

3.6.2. Kolemanit ve Kireç Katkılarının Üstyapı Tasarımına Etkisi

Bu çalışmada kullanılan değerler Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi adlı kaynaktan alınmıştır. %10 kolemanit + %10 kireç katkılı numunenin taban zemininde kullanılması durumunda, üstyapı tasarımında meydana gelecek değişiklikler verilmiştir.

ÖRNEK: Yapılan deney sonuçlarına göre bulunan değerler için bir üstyapıyı AASHTO metoduna göre projelendirelim.

-Yol $2 \times 2 = 4$ şeritli devlet karayolu

-Bölge faktörü, $R = 1.0$

-Proje başlangıç yılındaki (2014) trafik değerleri (Y.O.G.T):

Treyler :1371

Kamyon :971

Otobüs :324

Otomobil :5769

-Yıllık trafik artış yüzdeleri

Kamyon ve Treyler için : %5

Otobüs ve Otomobil için : %4

Taban CBR değeri : %9

%10 kolemanit + %10 kireç için CBR değeri : %27.4

ÇÖZÜM:

-Yol 4 şeritli devlet yolu olduğundan $P_t = 2.5$ alınır.

-20 yıllık analiz süresi için yoldan geçecek trafik sayısı $t_t = t_0(1+r)^t$ ve $t_p = 0.4343(t_t - t_0)/\log(t_t/t_0)$ formülleri kullanılarak hesaplanır. Tablo 3.10'da 20 yıllık analiz süresi için yoldan geçecek trafik sayısı verilmiştir.

Tablo 3.10. 20 yıllık analiz süresi için yoldan geçecek trafik sayısı

Taşıt Grubu	İlk Trafik Günlük(t_0)	Son Trafik Günlük (t_t)	Ortalama Günlük Trafik Proje Trafiği (t_p)	20 yıllık toplam trafik
Treyler	1371	3505	2274	16 600 200
Kamyon	971	2576	1645	12 008 500
Otobüs	324	710	492	3 591 600
Otomobil	5769	12641	8760	63 948 000

Ladometre çalışması sonucu taşıt eşdeğerlik faktörleri bulunmuştur.

Treyler	: 4.10 standart dingil/araç
Kamyon	: 2.90 standart dingil/araç
Otobüs	: 3.20 standart dingil/araç
Otomobil	: 0.0006 standart dingil/araç

Tablo 3.11. Şerit dağıtma faktörü

İki Yöndeki Şerit Sayısı	Şerit Dağıtma Faktörü
2	1.0
4	0.90
6 veya daha fazla	0.80

Tablo 3.11'den şerit dağıtma faktörü 0.90 olarak alınır. (Yön dağıtma faktörü = $\frac{1}{2}$)
Hesap şeridindeki ortalama günlük ve toplam standart dingil sayıları:

Treyler	: $\frac{1}{2} \times 0.90 \times 4.10 \times 2274$	= 4196
Kamyon	: $\frac{1}{2} \times 0.90 \times 2.90 \times 1645$	= 2147
Otobüs	: $\frac{1}{2} \times 0.90 \times 3.20 \times 492$	= 708

Tablo 3.12. %9 CBR değeri için üstyapı tabakalarında kullanılacak malzeme cinsleri, tabaka kalınlıkları ve tabaka katsayıları

Tabaka adı	Kullanılacak malzeme cinsi	Önerilen tabaka kalınlığı (cm)	Tabaka katsayısı	SN
Aşınma	Asfalt betonu	5	$a_1 = 0.42$	2.10
Binder	Asfalt betonu	6	$a_1 = 0.40$	2.4
Temel	Sıcak bitümlü karışım	15	$a_2 = 0.32$	4.8
Temel	Plent-miks	15	$a_2 = 0.15$	2.25
Alttemel	Kum - çakıl	-	$a_3 = 0.11$	-
Toplam SN =				11.50

Tablo 3.13. %9 CBR değeri için önerilen alttemel kalınlığı

Tabanın CBR değeri	Mevcut SN	Gerekli SN	ΔSN	$\frac{\Delta SN}{a_3}$	Önerilen alttemel kalınlığı
%9	11.50	14.50	3.00	$\frac{3.00}{0.11}$	30 cm

Bulunan kalınlıkların kontrolü:

Şekil 3.19'dan plent-miks kırmataş temelin CBR değeri %100, kum-çakıl alttemelin CBR değeri %30 olarak bulunur. Bu tabakalar üstüne gerekli SN değerleri sırasıyla SN_1 ve SN_2 olsun.

Şekil 3.18'deki nomograftan;

$$SN_1 = 8.30$$

$$SN_2 = 11.30 \text{ bulunur.}$$

Plent – miks kırmataş temel üzerindeki tabakaların SN'leri toplamı SN_1^* , 1 hesaplayalım:

$$SN_1^* = 5 \times 0.42 + 6 \times 0.40 + 15 \times 0.32 = 9.3$$

$$(SN_1^* = 9.3) > (SN_1 = 8.30) \text{ uygundur.}$$

Kum-çakıl alttemel için tabakaların SN'leri toplamı SN_2^* 'yi hesaplayalım:

$$SN_2^* = 5 \times 0.42 + 6 \times 0.40 + 15 \times 0.32 + 15 \times 0.15 = 11.55$$

$$(SN_2^* = 11.55) > (SN_2 = 11.30) \text{ uygundur.}$$

Taban zemini üzerindeki tabakaların SN'leri toplamı SN_3^* 'ü hesaplayalım:

$$SN_3^* = SN_2^* + a_3 \times D_3 = 11.55 + 30 \times 0.11 = 14.85$$

$(SN_3^*=14.85) > (SN_3=14.50)$ uygundur.

TABAKA KATSAYILARI

TABAKA TİPİ	M.S. (kg)	CBR %	SBD kg/cm ²	a katsayısı
a) BSK TABAKALARI				
Taş Mastik Asfalt (TMA)				0.44
Asfalt Betonu Aşınma	≥ 900			0.42
Asfalt Betonu Binder	≥ 750			0.40
Bitümlü Temel	≥ 600			0.36
b) TEMEL TABAKASI				
Çimento Bağlayıcı Granüler Temel			35-55	0.23
Plent-Miks Temel		≥ 120		0.15
Granüler Temel		≥ 100		0.14
c) ALTTEMEL TABAKASI				
Kırmataş Alttemel		≥ 50		0.13
Kum-Çakıl Alttemel		≥ 30		0.11

Şekil 3.19. Yol üstyapısı malzemeleri için kullanılacak tabaka katsayıları

%10 kolemanit + %10 kireç ilaveli taban zeminin CBR değeri %27.4, $W_g = 7324$, $R = 1.0$ için Şekil 3.18'deki nomograftan gerekli SN değeri bulunur.

<u>KM</u>	<u>Tabanın CBR değeri</u>	<u>SN</u>
25+000-45+000	%27.4	11.80

Bu yolda, üstyapı tabakalarında kullanılacak malzeme cinsleri, tabaka kalınlıkları ve tabaka katsayıları Tablo 3.14'te belirtilen şekilde seçilmiştir. Tablo 3.15'te hesaplamalara göre belirlenen alttemel kalınlığı verilmiştir.

Tablo 3.14. %27.4 CBR değeri için üstyapı tabakalarında kullanılacak malzeme cinsleri, tabaka kalınlıkları ve tabaka katsayıları

Tabaka adı	Kullanılacak malzeme cinsi	Önerilen tabaka kalınlığı (cm)	Tabaka katsayısı	SN
Aşınma	Asfalt betonu	5	$a_1 = 0.42$	2.10
Binder	Asfalt betonu	6	$a_1 = 0.40$	2.4
Temel	Sıcak bitümlü karışım	15	$a_2 = 0.32$	4.8
Temel	Plent-miks	15	$a_2 = 0.15$	2.25
Alttemel	Kum - çakıl	-	$a_3 = 0.11$	-
Toplam SN = 11.50				

Tablo 3.15. %27.4 CBR değeri için önerilen alttemel kalınlığı

Tabanın CBR değeri	Mevcut SN	Gerekli SN	ΔSN	$\frac{\Delta SN}{a_3}$	Önerilen alttemel kalınlığı
%27.4.	11.50	11.80	0.30	$\frac{0.3}{0.11}$	20 cm

$\Delta SN/a_3 = 0.3/0.11 = 2.72$ cm bulunur. Ancak Karayolları Teknik Şartnamesine göre kum-çakıl alttemel tabakası için belirtilen minimum kalınlık 20 cm şartından dolayı önerilen alttemel kalınlığı 20 cmdir.

20 yıllık analiz süresi için önerilen tabaka kalınlıkları Tablo 3.16’da verilmiştir.

Tablo 3.16. 20 yıllık analiz süresi için önerilen tabaka kalınlıkları

Tabanın CBR, %	Alttemel kalınlığı (cm)	Plent-miks temel kalınlığı (cm)	Sıcak bitümlü temel kalınlığı (cm)	Asfalt binder kalınlığı (cm)	Asfalt aşınma kalınlığı (cm)
%9	30	15	15	6	5
%27.4	20				

Tablo 3.16’dan %10 kolemanit + %10 kireç katkılı numune kullanıldığında esnek üstyapı tabaka kalınlıklarında alttemel tabakası için azalma olurken, temel ve kaplama tabakalarında minimum kalınlıkların yeterli olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde, mekanik ve kimyasal stabilizasyonu sağlayan yöntemlerin en ekonomik ve uzun dönemde en etkili çözümler olması beklenmektedir. Bu açıdan bu çalışmada kullanılan iki farklı granülomtride kolemanit atığı ve kirecin tek başına ve birlikte kullanılması durumunda taşıma gücü düşük problemlili bir zemin üzerindeki etkileri teknik açıdan incelenmiştir.

Gümüşhane ilinden temin edilen yüksek plastisiteli kil olan doğal malzemenin stabilizasyonunda %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında toplam 17 tane numune hazırlanarak bunların geoteknik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneylerden elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- ❖ Sadece kolemanit atığının katkı olarak kullanıldığı ÖKT ve KT karışımlarının plastisite özelliğinin göstergeleri olan LL ve PI değerlerinde, kullanılan kolemanit katkısı arttıkça, katkı miktarındaki artışa bağlı olarak orantılı bir düşüş kaydedilmiştir.
- ❖ Sadece kireç katkısı kullanılan karışım numunelerinin LL ve PI değerlerinde azalma olmuştur. Killi zemine katılan kireç, plastisite indisini azalttığı için zemin plastik halden katı hale geçerek mukavemetinin artacağı anlaşılmaktadır. Ancak belli bir katkı miktarından sonra ilave edilen kirecin (bu çalışma için %15) önemli ölçüde mukavemet artışı sağlamadığı anlaşılmıştır.
- ❖ ÖKTK karışımlarında öğütülmüş kolemanitin ve kirecin birlikte kullanımı ile LL ve PI değerlerinde azalma, PL değerinde artma olmuştur. En düşük plastisite indisi, %10 ÖKT + %10 K karışımında elde edilmiştir. Plastisite indisinin azalması işlenebilirliği artırır, bu istenilen bir özelliktir. Zeminin plastisitesinin artması, sıkışma ve şişme potansiyelinin artmasına, kazı ve dolgu işlerinde zorlukların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.
- ❖ Kil oranı yüksek bir malzemenin kolemanit atığı (her iki granülometri için) ile stabilizasyonunda maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artma ve optimum su içeriklerinde azalma olmuştur. Sadece kireç katkılı numunelerin kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlıkta azalma ve optimum su içeriğinde artma meydana gelmiştir. Kuru birim hacim

ağırlıktaki azalmanın kirecin özgül ağırlığının doğal malzemenin özgül ağırlığından düşük olmasından ileri geldiği düşünülmektedir.

- ❖ Standart kompaksiyon deneyinden elde edilen en düşük optimum su içeriği ÖKT20 karışımında görülmüştür. Dolayısıyla her iki kolemanitin de hidratlaşma için daha fazla suya ihtiyaç duymadığı yani zemin ile herhangi bir kimyasal reaksiyon vermediği düşünülmektedir.
- ❖ Karışımlar üzerinde yapılan kompaksiyon deneylerinde maksimum kuru birim hacim ağırlıklar tüm karışım numunelerinde (sadece kireç katkılı numuneler hariç) artmıştır. Kuru birim hacim ağırlıktaki artış zeminin taşıma gücünün artmasına, geçirimsizliğin, boşluk oranı ve porozitenin azalmasına ve oturmaların engellenmesine neden olur. ÖKT ve KT karışımlarına göre ÖKT-K karışımlarının genel olarak kirecin katkısıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığı düşürdüğü görülmüştür.
- ❖ Sadece kolemanit atığı kullanılarak yapılan CBR deneyinde en fazla artışı ÖKT20 karışımı sağlamıştır. Dolayısıyla kireçle birlikte oluşturulan karışımlara öğütülmüş kolemanit ilave edilerek CBR deneyi yapılmıştır. Sadece kireç kullanılarak yapılan CBR deneyi ile %10 oranında ilave edilen kireç katkısının yaklaşık 7 kat daha fazla taşıma gücünü arttırdığı görülmüştür. ÖKT + K karışımlarının CBR değerleri doğal malzemeye göre artış sağlarken, en yüksek artışı sağlayan karışım %10 ÖKT + %10 K numunesidir.
- ❖ %27.4 CBR değerine sahip ÖKTK10 numunesi ve %9 CBR değerine sahip doğal numunenin kullanılması durumlarında yapılan ayrı ayrı AASHTO esnek üstyapı tasarımı sonuçlarından, katkı kullanılmaması halinde alttemel kalınlığı minimum 30 cm, ÖKTK10 katkılı numune kullanılması durumunda alttemel kalınlığının minimum 20 cm olduğu hesaplanmıştır. Buna göre, üstyapı tabaka kalınlıklarında kolemanit ve kirecin birlikte kullanılması durumunda tabaka kalınlıklarında yaklaşık %33 oranında azalma olduğu görülmüştür.
- ❖ Yüksek plastisiteli zeminin stabilizasyonu için işlenebilirlik, plastisite, sıkışma ve dayanım açısından bakıldığında bu çalışma için en uygun karışımın ÖKTK10 olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu konuda yapılabilecek daha sonraki çalışmalara ışık tutması açısından aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- ❖ Bu yüksek lisans çalışmasında kolemanit atığının kireç ile birlikte etkileşimi incelenmiştir. Aynı şekilde zemin stabilizasyon çalışmalarında kolemanit atığının ve çimentonun ilişkisi de bir inceleme alanıdır.
- ❖ Farklı bir zemin sınıfı kullanılarak kolemanit atığının kireç ile birlikte meydana getireceği iyileşme incelenebilir.
- ❖ Kolemanitin, yol alttemel veya yol temel tabakalarında farklı granülometride kullanılması halinde yapacağı etki araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO, 2003. Standart Method of Test for The California Bearing Ratio, AASHTO T193, USA, 93-99.
- Al-Amoudi, O., S., Asi, İ., M. ve El-Naggar, Z., R., 1995. Stabilization of Arid, Saline Sabhkha Soil Using Additives, Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 369-379.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. ve Alcover, J, 2010. Behaviour and Minerology Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 50°C, Applied Clay Science, 50, 199-200.
- Al-Rawas, A., 2002. Microfabric and Mineralogical Studies on the Stabilization of and Expansive Soil Using Cement By-pass Dust and Some Types of Canadian Geotechnical Journal, 39, 5, 1150-1167.
- Ağar, E., Sutas, İ. ve Öztaş, G. 1998. Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları), İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Arman, A. ve Moonfish, G., A., 1972. Lime Stabilization of Organic Soils, Research Record No.381, Highway Research REcord, Washington, 37-45.
- ASTM D 422, 2014. Standart Test Methods for Particle-Size Analysis of Soil, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 854, 2014. Standart Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 698, 2015. Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standart Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM C 1580, 2015. Standart Test Methods for Water-Soluble Sulfate in Soil, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 1883, 2015. Standart Test Methods for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory - Compacted Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2974, 2014. Standart Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, 2014. Standart Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- Atterberg, A., 1911. The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity, Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift, 50, 2, 132-158.

- Aydın S., 2010. Yenikent (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin Kireç ve Uçucu Külle Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aydın, U.,2009. Kolemanit Atığının Beton Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara, 321-329.
- Baradan, B., 2000. Yapı Malzemesi II, Mühendislik Fakültesi Yayınları No. 207, Dokuz Eylül Üniversitesi Matbaası, İzmir, 1-7.
- Başer, O., 2009. Stabilization of Expansive Soils Using Waste Marble Dust, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Bell, F., G., 1996. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, Engineering Geology, 42, 223-237.
- Bello, A., Ige, J. ve Ayodele H., 2015. Stabilization of Lateritic Soil with Cassava Peel Ash, British Journal of Applied Science And Technology, 7,6, 642-650.
- Boncukçuoğlu, R., Yılmaz, M., T., Kocakerim, M., M., ve Tosunoğlu, V., 2002. Utilization of Trommel Sieve Wastes As An Additive in Portland Cement Poduction ,Cement and Concrete Research, 32, 35-39.
- Bilge, T., 2011. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Binici, H., Sevinç, A., H. ve Durgun, Y., M., 2010. Barit, Bazaltik Pomza, Kolemanit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkımlı Betonların Özellikleri, KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 1.
- CDIT, 2002. The Deep Mixing Method: Princeples, Design and Construction, Coastal Development Institute of Technology, AA Balkema, Netherlands.
- Coşansu, G., ve Çoğun, C., 2012. An Inverstigation on Use of Colemanite Powder as Abrasive in Abrasive Waterjet Cutting (AWJT), Journal of Mechanic Science and Techology, 25, 8, 2371-2380 s.
- Cömert, A., T., Koyuncu, H., Fırat, S. ve Sümer, M., 2006. Uçucu Kül ile Stabilize Edilmiş Zeminlerde Kür Süresinin Taşıma Gücü Üzerindeki Etkileri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Eylül, Trabzon, 153-164.
- Cömert, A., T., 2012. Uçucu Kül, Mermer Tozu ve Endüstriyel Atık Kumu .Yol Altyapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Çalık, Ü., 2012. Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çetin, A., Y., 2011. Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çetiner, S., L., 2004. Stabilization of Expansive Soil by Çayırhan Fly Ash and Desulphogypsum, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, Ankara.
- Dallas, N., L., 1995. Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall/Hunt, USA, 7-19, 29-43, 50-53, 75-87.
- Demirbaş, G., 2009. Stabilization of Expansive Soils Using Bigadic Zeolite (Boron By-Product), Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Deewal, K., Dharavath, K., ve Kulshreshtha M., 2014. Stabilization of Red Mud By Lime, Gypsum and Investigating Its Possible Use As A Geotechnical Material in the Civil Construction, International Journal of Advances in Engineering and Technology, 7,4, 1238-1244.
- DPT, 2001. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Devlet Planlama Teşkilatı Yayın No: 2822, Başbakanlık Basımevi. Ankara, 1-65.
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2014. Bor Sektörü Raporu 2013.
- Etminan, E., 2012. Soft Soil Stabilization Using Fly Ash, Polypropylene, Copolymer and Vhp, Master Thesis, İstanbul Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, İstanbul.
- Erdoğan, Y., Zeybek, M., S., ve Demirbaş, A., 1998. Cement Mixes Containing Colemanite From Concentrator Wastes, Cement and Concrete Research, 28, 4, 605-609.
- Erdoğan, E., 2006. Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eyüboğlu, S., 2013. Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Fındık, F., S., 2005. Karayolu Esnek Üstyapıları Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Garaisayev, S., 2008. Şişen Zeminlerin Kimyasal Yöntemlerle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Geiman, C., M., 2005. Stabilization of Soft Clay Sungrades in Virginia Phase I Laboratory Study, Master of Science in Civil Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 3-6, 10-16.
- Genç, D., 2011. Zemin Mekaniği ve Temeller, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Yayın No: 100, Ankara, 121s.
- Gençel, O., 2009. Hamile Ratlarda Oksidatif Strese neden Olan Radyasyona Karşı Kolemanitli Betonun Koruyucu Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Güyağüler, T., 2001. Türkiye Bor Potansiyeli, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Ekim, Kütahya, 1-6s.
- Gündüz, O., 2008. Şişen Zeminlerin Tinkal Atığı ile Stabilizasyonu ve Meşelik Killerine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Hanchanloet, S., 1999. Evaluation of a New Chemical Stabilization Method on Physical and Strength Properties of Cohesive Soils, Master Thesis, The University of Texas, USA.
- Helvacı, C., 2004. Türkiye Borat Yatakları Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Mayıs, İzmir, 11-27s.
- Hunter, D., 1988. Lime Induced HEave in Sulfate Bearing Clays, Journal of Geotechnical Engineering, 114, 2, 150-167.
- Holtz, R., ve Kovacs, W., D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 96-102.
- Ilıcalı, M., 1988. Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., ve Eren, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.
- İpek, T., 1998. Stabilization of Expansive Soils Using Lime, Cement and Fly Ash, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

- Jacobson, J., 2002. Factors Affecting Strength Gain in Lime-Cement Columns and Development of a Laboratory Testing Procedures, MAster of Science in Civil Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 3-4, 7, 13-14, 18.
- Joel, M., ve Edeh E., J., 2014. Stabilization of Ikpayongo Laterite with Cement and Calsium Carbide Waste, Global Journal of Pure and Applied Sicence, 20, 49-55s.
- Karagül, B., Ç., 2007. Yol Dolgularının Geogrid Kullanılarak İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kavas, T., 2006. Use of Boron Waste as a Fluxing Agent in Production of Red Mud Brick, Building and Environment 41, 1779-1783.
- Kavlak, Y., 2008. Isparta Gelincik Pomzasının Karayolu Esnek Üstyapıları Taban Zemini Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Khattab, S., A., A., Al_Mukhtar, M., ve Fleureau, J., M., 2007. Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil, Journal of Materials in Civil Engineering, 19, 4, 358-366.
- Kılıç, G., 2008. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılınç, E., Mordoğan, H., ve Tanrıverdi, M., 2001. Bor Minerallerinin Önemi, Potansiyeli, Üretimi ve Ekonomisi, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ekim, İzmir, 226-234 s.
- Kızılçelik, M., M., 2010. Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kızirgil, M., E., 2001. Sivas Demir-Çelik Fabrikası Cürufunun Yol Stabilizasyonunda Kullanılmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Korçak, Ö., 2014. Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Kullanılması ve Çimentonun Performans Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Koteswara, R., Pranav, P., R., T., ve Venkatesh, G., 2012. A Laboratory Study on The Efficacy of Rice Husk Ash and Potassium Chloride For The Stabilization of Expansive Soil, International Journal of Engineering Science and Technology, 4, 97-108s.
- Kreps, R., D., ve Walker, R., D., 1971. Highway Materials, McGraw Hill, USA.

- KTŞ, 2006. Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler), Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Mazura, N., V., ve Levistkii, I., A., 2008. Use of Colemanite for Improving The Quality of Unfritted Glazes, Springer Science and Business Media, 1, 20-23.
- Motor, E. 2007. Borojipsin Alttemel Tabaksında Stabilizasyon Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Murthy, Y., I., 2012. Stabilization of Expansive Soil Using Mll Scale, International Journal of Engineering Science and Technology, 4,2, 629-632.
- Mutman, U., 2013. Bentonit Kilinin Prina Külü ile Stabilizasyonu, 5. Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Adana, Aralık, 19-28.
- Mitchel, J., K., 1986. Practical Problems from Suprising Soil Behavior, Journal of Geotechnical Engineering, 112, 3, 259-289.
- Nalbantoğlu, Z. ve Tuncer, E., R., 2001. Compressibility and Hydraulic Conductivity of a Chemically Treated Expansive Clay, Canadian Geotechnical Journal, 38, 154-160.
- Önalp, A., 2002. Geoteknik Bilgisi I: Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 206-243.
- Nelson, J., ve Debora, J., M., 1992. Expansive Soil-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Willey&Sons Inc., London, 259-261.
- Petry, T., M., ve Little, D., N., 1992. Update on Sulfate Induced Heave in Treated Clay Soils: Problematic Sulfate Leves, Record No. 1362, Transportation Research Board, Washington.
- Rajakumar, C., ve Meenambal, T., 2015. Experimental Study of Bagasse Ash Utilisation for Road Application on Expansive Soil, International Quarterly Scientific Journal, 14,4, 903-908.
- Rajakumaran, K., 2015. An Experimental Analysis on Stabilization of Expansive Soil with Steel Slag and Fly Ash, International Journal of Advances in Engineering and Technology, 7,6, 1745-1752.
- Sevim, U., K., 2011. Colemanite Ore Waste Concrete with Low Shrinkage and High Split Tensile Strength, Materials and Structures, , 44, 187-193.
- Skempton, A., W., 1953. The Colloidal Activity of Clays, 3rd Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation, Zurich University, August, Switzerland, 57-61.

- Süt, İ., 2006. Kohezyonlu Zeminlerin Kireçle İyileştirilmesinin CBR Değeri Üzerindeki Etkisinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Şahin, Ş., E., 2008. Ham ve Kalsine Kolemanit Atıklarının Tuğla Yapımında Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Şengül, E., 2010. Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B., ve Sevinç, V., 2003. Influence of Natural Pozzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash and Fly Ash on the Properties of Portland Cement, Cement And Concrete Research, 33, 8, 1175-1182.
- Topçu, İ., B. ve Boğa, A., R., 2005. Bor Atıklı Çimento Harçlarının Dayanıklılığı, 1. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Ankara.
- TS 1500, 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması I. Baskı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 6-10.
- TSE 1900 - 1, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri Bölüm I: Fiziksel Özellikler, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Tunç, A., 2002. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, Ankara.
- Tülek, M., 2007. Kimyasal Atık Alçıların Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Uğurlu, A., Özdemir, M., ve Topçu, İ., 2004, Bor İçeren Kil Atıklarının Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi, 2. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Eylül, Eskişehir, 405-411s.
- Umar, F. ve Açar, E., 1991, Yol üstyapısı, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Uslu, T., ve Arol, A., I., 2004. Use of Boron Waste As an Additive in Red Bricks, Waste Manangement, 24, 217-220 s.
- U.S. Army Corps. of Eng., 2003. Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities, Research No. 20314-1000, Department of Army, Washington.
- URL-1, www.mta.gov.tr/tr/page/kurumsal-hakkimizda, 15 Mart 2016.
- URL-2, maps.google.com, Yaylım Göleti Haritası, 15 Nisan 2016.

- Üstümkol, F., N, 2006. Endüstriyel Atıkların Esnek Yol Üstyapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Velioğlu, S., Şimşek, A., 2003. İnsan Sağlığı ve Beslenme Açısından Bor, Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 2, 123-130.
- Vibhuti, R., R., ve Ramesh, R., 2014. Stabilization of Black Cotton Soil Using Lime and Rice Husk Ash, International Journal of Engineering Science and Technoledge, 2, 6, 71-73.
- Winterkorn, H., F., ve Fang, H., Y., 1975. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Publication, London, 176 s.
- Woods, 1994. Ten Reasons Why TQM Doesn't Always Work, 6-7, McGraw-Hill, New York.
- Yaltay, N., 2015. Kolemanit Katkılı Çimento ile Üretilen Pomza Agregalı Hafif Betonun Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yıldırım, D, 2009. Geogrid Donatılı Stabilize Dolgu Tabakası ile Kil Zeminlerin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yıldız, S., 2008. Emet Bor İşletme Hisarcık Konsantratör Atıklarının Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Yılmaz, Y., ve Özeydin, V., 2013. Compaction and Shear Strength Characteristics of Colemanite Ore Waste Modified Active Belite Cemen Stabilized High Plasticity Soil, Engeneeing Geology 155, 45-45.
- Yılmaz, I, ve Civelekoğlu, B., 2009, Gypsum: an Additive for Stabilization of Swelling Clay Soils, Applied Clay Science, 44, 166-172.
- Yuan, Y., Guo, T., Li, X., ve Li, W., 2013. Performances of Sandy Soil Stabilization with Fiber and Cement, Applied Mechanics and Materials, 438-439, 266-269s.
- Zorer, Y., 2005, Kolemanit Katkılı Çimento Üretiminde Öğütülebilirliğin İncelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Zorluer, İ. ve Usta, M., 2003. Zeminlerin Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi, Türkiye 4. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Aralık, Afyon, 305-311.

ÖZGEÇMİŞ

Hacer YEŞİLÇİÇEK, 1990 yılında Trabzon ili Çaykara ilçesinde doğdu. 2007 yılında Trabzon Fatih Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında girdiği, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında inşaat mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversite Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı.

Kasım 2014'te Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak meslek hayatına başlayan Hacer YEŞİLÇİÇEK iyi derecede İngilizce bilmektedir.