

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YÜKSEK SU MUHTEVALI KİLLİ YOL TABAN ZEMİNİNİN
KİREÇ STABİLİZASYONU VE HÜCRESEL DOLGU SİSTEMİYLE
İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren ŞENGÜL

HAZİRAN 2010

TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YÜKSEK SU MUHTEVALI KİLLİ YOL TABAN ZEMİNİN
KİREÇ STABİLİZASYONU VE HÜCRESEL DOLGU SİSTEMİYLE
İYİLEŞTİRİLMESİ**

İnş. Müh. Eren ŞENGÜL

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22.04.2010
Tezin Savunma Tarihi : 02.06.2010**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. H. Hulusi ACAR
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamı bana tavsiye eden ve çalışmalarımın her aşamasında kendi teziymiş gibi ilgilenen, yakın destek ve yardımlarını gördüğüm, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, değerli vakitlerini büyük bir fedakârlık gösterip bana ayıran hocam Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR' a, mastır öğrenimim boyunca ulaştırma konularında önemli birikim ve tecrübelerini paylaşan Ulaştırma Ana Bilim Dalı Başkanımız Prof. Dr. Fazıl ÇELİK' e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Laboratuar çalışmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen Geoteknik ve Ulaştırma Labarauvar görevlileri Ali SEMERCİ ve Fikret BÜLBÜL' e, plaka yükleme deney düzeneğinin çalıştırılmasında yardımlarını gördüğüm İnşaat Müh. Bölümü öğrencisi Ufuk UZUN ve M.Akif AKSOY'a, ayrıca hiçbir zaman benden desteğini esirgemeyen Emine CUMUR' a teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştirip bugünlere gelmemi sağlayan ve gerek lisans gerekse yüksek lisans öğrenimim boyunca büyük fedakârlık ve sabırla beni destekleyen aileme en içten sevgiyle teşekkürlerimi sunarım.

Eren ŞENGÜL
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Taraması.....	4
1.2.1. Katkı Maddeleri ile Stabilizasyonla İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	4
1.2.2. Hücresel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemleri (Geocell) ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	10
1.3. Taban Zemini.....	13
1.3.1. Yol Taban Zeminlerinin Mukavemeti (Taşıma Kapasitesi).....	15
1.3.1.1. Kaliforniya Taşıma Oranı(CBR).....	15
1.3.1.2. Plaka Yükleme Testi.....	18
1.3.1.2.1. Yatak Katsayısı (Taban Reaksiyon Modülü, K).....	20
1.3.1.3. Esneklik Modülü ve Esneklik Modülü Testi.....	22
1.3.2. Yol Taban Zemini Taşıma Kapasitesi ve Tabaka Kalınlıklarının Hesabı.....	25
1.4. Stabilizasyon Kavramı.....	32
1.4.1. Stabilizasyon Yöntemleri.....	32
1.5. Zayıf Yol Taban Zeminlerinin Katkı Maddeleri ile Stabilizasyonu.....	35
1.5.1. Zemin-Kireç Stabilizasyonu.....	35
1.5.2. Zemin-Çimento Stabilizasyonu.....	41
1.5.3. Zemin-Uçucu Kül Stabilizasyonu.....	43
1.5.4. Zemin-Uçucu Kül- Kireç Stabilizasyonu.....	44
1.5.5. Zemin-Bitüm Stabilizasyonu.....	45

1.5.6.	Zemin-Kireç-Çimento, Kireç-Asfalt ve Kireç-Çimento-Uçucu Kül Kombinasyonları ile Stabilizasyon.....	46
1.6.	Hücrel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemleri ile Zemin Güçlendirilmesi.....	48
1.6.1.	Hücrel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemi Kavramı.....	48
1.6.2.	Hücrel Yük Taşıma Sistemi Sisteminin Bileşenleri.....	49
1.6.3.	Hücrel Dolgu ve Yük Taşıma Sisteminin Faydaları.....	51
2.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	54
2.1.	Çalışmanın Planlanması ve Sınırlandırılması.....	54
2.2.	Kullanılan Malzemeler.....	55
2.2.1.	Kireç.....	55
2.2.2.	Hücrel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemi (Geocell).....	55
2.2.3.	Kum.....	55
2.2.4.	Geotekstil.....	56
2.2.5.	Zemin.....	56
2.2.5.1.	Zeminin Sınıflandırılması.....	56
2.2.5.1.1.	Islak Elek Analizi.....	56
2.2.5.1.2.	Hidrometre Analizi.....	58
2.2.5.1.3.	Kıvam Limitlerinin Belirlenmesi.....	59
2.3.	Yapılan Deney Yöntemleri.....	61
2.3.1.	Modifiye Proktor Deneyi.....	61
2.3.2.	Kaliforniya Taşıma Oranı (C.B.R.) Deneyi.....	61
2.3.3.	Model Plaka Yükleme Deneyleri.....	63
2.3.3.1.	Deney Aleti.....	63
2.3.3.2.	Deneyin Yapılışı.....	64
2.3.3.2.1.	Killi Zeminin Yüksek Su Muhtevalı Duruma Getirilmesi.....	64
2.3.3.2.2.	Yüksek Su Muhtevalı Killi Zeminin Test Kutusuna Yerleştirilmesi ve Hücrel Dolgu Sistemi (Geocell) ile Güçlendirilmesi.....	65
2.3.3.2.3.	Yüksek Su Muhtevalı Killi Zeminin Kireçle Stabilize Edilmesi ve Test Kutusuna Yerleştirilmesi.....	69
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	71
3.1.	Kıvam (Atterbeg) Limiti Bulguları.....	71
3.2.	Optimum Su Muhtevası ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık Bulguları...	72
3.3.	CBR- Şişme Yüzdesi Bulguları ve İrdelenmesi.....	73

3.4.	CBR Deneyi Yük-Penetrasyon Bulguları ve İrdelenmesi.....	75
3.5.	Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Bulguları ve İrdelenmesi.....	77
3.6.	Yük- Deformasyon Bulguları ve İrdelenmesi.....	80
3.7.	Düşey Gerilmedeki Azalma Bulguları ve İrdelenmesi.....	82
3.8.	Yatak Katsayısı Bulguları ve İrdelenmesi.....	86
3.9.	Yatak Katsayısına Karşılık Gelen Yaklaşık CBR Değeri ile Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyinden Elde Edilen CBR Bulguların Karşılaştırılması.....	89
3.10.	Taşıma Kapasitesi ve Dolgu Kalınlığı Bulgularının İrdelenmesi.....	89
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
5.	KAYNAKLAR.....	97

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Yumuşak killi yol taban zeminleri üzerine inşa edilecek yol üst yapısının taşıma gücünü artırmak, deformasyonları (oturmaları) azaltmak ve diğer mukavemet özelliklerini (CBR, K , M_R değerleri vb) artırmak için birçok zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada, yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerinin kireç stabilizasyonu ve hücresel dolgu teknikleriyle iyileştirilmesi ve bu iki farklı iyileştirme yönteminin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaçla, optimum su muhtevası % 20 artırılarak yüksek su muhtevalı hale getirilmiş killi zemine % 5, % 10, % 15 oranlarında kireç karıştırılarak CBR deneyleri yapılmıştır. Yapılan CBR deneyleri sonucunda doğal durumda CBR değeri % 0,2 iken % 15 kireçle stabilize edildikten sonra % 7'lere yükselmiştir. Yine aynı şekilde yüksek su muhtevalı zemin % 5, % 10, % 15 oranlarında kireçle, hücresel dolguyla değişik oranlarda kireç ve hücresel dolgu teknikleri ile iyileştirilerek plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Kireç stabilizasyonu veya hücresel dolgu güçlendirme tekniklerinin tek başlarına oturmaları ve düşey gerilmeleri belirgin bir şekilde azaltmadığı, yatak katsayısı ve taşıma kapasitesini istenilen seviyede artırmadığı görülmüştür. Bu nedenle her iki iyileştirme yönteminin de yüksek su muhtevalı zeminlerde tek başlarına yeterli performans sağlamayacağı anlaşılmıştır. Yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerinin önce kireçle stabilize edilip sonra da hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmesi durumunda yatak katsayısı ve taşıma kapasitesinde istenilen artış ile oturma, düşey gerilmeler ve dolgu kalınlığında istenilen azalmalar sağlanmıştır. Kireç ve hücresel dolgu sistemi ile iyileştirmenin yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerinde olumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hücresel Dolgu Sistemi, Kireç Stabilizasyonu, Taşıma Kapasitesi
CBR, Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemini

SUMMARY

Improvement with Lime Stabilization and Geocell Reinforcement of Clayey Pavement Subgrade at High Water Content

Various subgrade improvement methods are developed for decreasing deformations, vertical stresses, increasing the bearing capacity, and the other stiffness characterizations (California Bearing Ratio (CBR), Resilient Modulus (M_r), Modulus of Subgrade Reaction (K) values) of soft clayey subgrade. In this thesis study, pavement subgrade stabilization with lime stabilization and geocell reinforcement are investigated. Lime stabilization and geocell reinforcement techniques were investigated for clayey type pavement subgrade with high water content and finally a comparison of these techniques were made. For this purpose, CBR tests were conducted on clayey subgrade soil with 20 % water content higher than its optimum water content and mixed with different percentages of hydrate lime (%5, %10, %15 dry weight of the soil). The wet CBR values of % 15 lime stabilized soil were increased from % 0,2 to % 7 compared to its natural condition. Plate loading tests were performed on the same soil conditions. The test results indicate that lime stabilization or geocell reinforcement alone does not significantly reduce the deformation and vertical stresses, and does not increase subgrade reaction coefficient (K) and bearing capacity values. However, it was found that when both techniques are used together promising results are obtained on stabilization of the pavement with high water content clayey subgrade.

Key words: Geocell Reinforcement System, Lime Stabilization, Pavement Subgrade, Bearing Capacity, CBR, Clayey Subgrade with High Water Content

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. % 4 kireç stabilize edilen kaolin serbest basınç değerinin azalması.....	5
Şekil 1.2. % 4 kireç stabilize edilen bentonitin serbest basınç değerinin zamanla değişimi.....	5
Şekil 1.3. Yaş CBR değerlerinin grafik halinde gösterilmesi.....	7
Şekil 1.4. Plaka yükleme deney sonuçları.....	8
Şekil 1.5. CBR ve tabaka kalınlıkları arasındaki ilişki.....	18
Şekil 1.6. Plaka yükleme deneyinde oluşan şekil değiştirmeler.....	19
Şekil 1.7. Plaka yükleme testi, yük-defleksiyon eğrisi.....	20
Şekil 1.8. CBR-K ilişkisi.....	22
Şekil 1.9. Tekerrürlü yük testi.....	24
Şekil 1.10. Tipik plaka yükleme-oturma grafiği.....	26
Şekil 1.11. Kireç İçeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi.....	38
Şekil 1.12. Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı.....	39
Şekil 1.13. Serbest basınç deneyleri.....	40
Şekil 1.14. Çimento stabilizasyon mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi.....	42
Şekil 1.15. Hücresel dolgu sisteminin arazide uygulanışı.....	48
Şekil 1.16. Hücresel yük taşıma sisteminin bileşenleri.....	51
Şekil 1.17. Hücresel dolgu sistemi ve çalışma prensibi.....	52
Şekil 2.1. Killi zeminin gradasyon eğrisi.....	58
Şekil 2.2. Casagrande aleti ile likit limit değerinin belirlenmesi.....	59
Şekil 2.3. Numunelerin yük altında su içinde bekletilmesi.....	62
Şekil 2.4. CBR deney aleti.....	62
Şekil 2.5. Model plaka yükleme deney aleti.....	64
Şekil 2.6. Test kutusunun dışında hazırlanan yüksek su muhtevalı (% 45) zemin.....	65
Şekil 2.7. Gerilme ölçme (pressure gauge) ve birim şekil değiştirme ölçme (strain-guage) aletlerinin yerleştirilmesi.....	66
Şekil 2.8. Kenarlardaki deplasmanların ölçülmesi.....	67
Şekil 2.9. Geocell altına yerleştirilen geotekstil.....	68

Şekil 2.10. Taban zemini üzerine yerleştirilen geocell ve içinin kum ile doldurulması.....	68
Şekil 2.11. Zeminin % 45 su muhtevasına getirilmesi.....	69
Şekil 2.12. % 45 su muhtevalı zeminin kireç ile stabilize edilmesi.....	69
Şekil 3.1. Doğal halde ve değişik kireç yüzdelerinde Atterbeg limitleri.....	71
Şekil 3.2. Doğal ve % 15 kireçli zemin için modifiye proktor eğrileri.....	73
Şekil 3.3. Değişik kireç oranlarında ve doğal durumdaki şişme yüzdelerinin karşılaştırılması.....	74
Şekil 3.4. Şişme yüzdesinin artan kireç miktarına bağlı olarak değişimi.....	75
Şekil 3.5. Doğal durumda ve değişik kireç yüzdelerinde bulunan yük- batma değerlerinin grafik halinde gösterilmesi (numune 1).....	76
Şekil 3.6. Doğal durumda ve değişik kireç yüzdelerinde bulunan yük- batma değerlerin grafik halinde gösterilmesi (numune2).....	77
Şekil 3.7. Kireçsiz ve kireçli durumlarda yapılan yaş CBR deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	78
Şekil 3.8. Yaş CBR değerinin kireç miktarına bağlı olarak değişimi.....	79
Şekil 3.9. Plaka yükleme deneylerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri.....	81
Şekil 3.10. Güçlendirilmemiş taban ve geocell ile güçlendirilmiş taban durumda geocell alt seviyesindeki gerilmeler.....	85
Şekil 3.11. Değişik kireç yüzdelerinde stabilize edilmiş taban yüzeyinden 30 cm aşağıdaki düşey gerilmeler.....	85
Şekil 3.12. Geocell ve değişik kireç oranlarında yatak katsayısı değerlerinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 3.13. Yatak katsayısının kireç miktarına bağlı olarak değişimi.....	88
Şekil 3.14. Geocell ve değişik kireç oranlarında yatak katsayısı değerlerinin değişimi.....	88
Şekil 3.15. Değişik kireç oranlarında ve geocell güçlendirme durumunda elden edilen taşıma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması.....	91
Şekil 3.16. Kireç içeriğine göre taşıma kapasitesinin değişimi.....	92
Şekil 3.17. Geocell ve değişik kireç oranlarında taşıma kapasitesinin değişimi.....	92
Şekil 3.18. Değişik kireç oranlarında ve geocell güçlendirme durumunda elde edilen dolgu kalınlıklarının karşılaştırılması.....	94

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. CBR ve şişme değerleri.....	17
Tablo 1.2. Zemin cinslerine göre yaklaşık K değerleri.....	21
Tablo 1.3. Seçilmiş taban mukavemet /sertlik korelasyon eşitlikleri.....	25
Tablo 1.4. Kohezyonlu topraklar için taban toprak dayanım parametreleri korelasyonu....	28
Tablo 1.5. Tavsiye edilen geocell hücre duvarı/ dolgu pik sürtünme açısı oranı.....	31
Tablo 1.6. Stabilizasyon metotları.....	33
Tablo 1.7. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları.....	34
Tablo 1.8. Stabilizasyonda kullanılacak kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 1.9. Zemin cinsine göre yaklaşık kireç miktarı.....	37
Tablo 1.10. Stabilizör seçimi için rehber.....	47
Tablo 2.1. Kirecin kimyasal analizi (%).....	55
Tablo 2.2. Islak elek analizi (numune1).....	56
Tablo 2.3. Islak elek analizi (numune2).....	57
Tablo 2.4. Islak elek analizi (numune3).....	57
Tablo 2.5. Karışım elek analizi sonuçları.....	57
Tablo 2.6. Hidrometre Analizi.....	58
Tablo 2.7. Doğal zemin için ve kireçli durum için likit limit ve plastik limit deneyleri....	60
Tablo 3.1. Modifiye proktor deneyi sonuçları.....	72
Tablo 3.2. Şişme değerlerinin tablo halinde gösterilmesi.....	74
Tablo 3.3. Doğal durumda ve değişik kireç yüzdelerinde bulunan yük- batma değerlerin tablo halinde gösterilmesi.....	76
Tablo 3.4. Yaş CBR değerleri.....	78
Tablo 3.5. Yük deformasyon değerleri.....	80
Tablo 3.6. Doğal halde yüzeyden 30 cm aşağıdaki düşey gerilmeler.....	82
Tablo 3.7. Hücresel dolgu sistemi (geocell) alt seviyesindeki düşey gerilmeler.....	83
Tablo 3.8. Değişik kireç oranlarında yüzeyden 30 cm aşağıdaki düşey gerilmeler.....	84
Tablo 3.9. Yatak katsayısı değerleri.....	86
Tablo 3.10. Yatak katsayısına karşılık gelen yaklaşık CBR değerleri.....	89

Tablo 3.11. Taşıma kapasitesi değerleri.....	90
Tablo 3.12. Değişik iyileştirme durumları için hesaplanmış minimum dolgu kalınlığı.....	93

SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	: Amerika Eyalet Yolları ve Ulaşım Çalışmaları Kurumu
ASTM	: Amerika Test ve Malzeme Kurumu
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
CH	: Yüksek plasiteli kil
D	: Hücresel dolgu (geocell) çapı
D _{bsk}	: Bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı
EN	: Avrupa Standartları
H	: Hücresel dolgu (geocell) yüksekliği
K	: Yatak katsayısı
K _a	: Aktif toprak basınç katsayısı
k	: Derinlik düzeltme faktörü,
LL	: Likit limit
LVDT	: Deformasyon ölçme cihazı
M _R	: Esneklik modülü
N _c	: Taşıma kapasitesi faktörü
No 200	: 200 Nolu ekleten geçen malzeme yüzdesi
No 4	: 4 Nolu ekleten geçen malzeme yüzdesi
P	: Tekerlek yükü
p	: Tekerlek şişme basıncı
PL	: Plastik limit
PI	: Plastisite indeksi
q _c	: Koni penetrasyon direnci deneyi ile bulunan koni direnci
q _r	: Geogirid ile güçlendirilmiş durumda taban zemini taşıma kapasitesi
q _u	: Güçlendirilmemiş durumdaki taşıma kapasitesi
R	: Esneklik değeri,
R	: Yüklenmiş alanın yarıçapı
r	: Tavsiye edilen geocell hücre duvarı/dolgu pik sürtünme açısı oranı
SHRP	: Stratejik Karayolu Araştırma Programı
T	: Hücre duvarları ve dolgu arasındaki kesme gerilmesi

TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu kül
W_{opt}	: Optimum rutubet
Z	: Kaplama derinliği
\emptyset	: Geocell dolgu malzemesinin sürtünme açısı
γ_{maxs}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
δ	: Geocell hücre duvarları ile granüler dolgu arasındaki kesme direnci açısı
ϵ_R	: Eksenel deformasyon
σ_1	: Toplam eksenel gerilme
σ_3	: Toplam yanıl gerilme
σ_t	: CBR-test basıncı
σ_s	: CBR-standart basınç
σ_{avge}	: Geocell duvarlarındaki ortalama gerilme
σ_D	: Devilatör gerilme
σ_G	: Geocellin taşıma kapasitesi
σ_{hb}	: Geocell döşek altındaki yatay gerilme
σ_{ht}	: Geocell döşek üstündeki yatay gerilme
σ_R	: Geocell bölüm içerisindeki gerilme azalması
σ_z	: z derinliğindeki düşey gerilme
σ_{zb}	: Hücresel dolgu bölümünün altındaki düşey gerilme
σ_{zt}	: Hücresel dolgu (geocell) bölümünün üzerindeki düşey gerilme
q_u	: Serbest basınç mukavemeti ya da taşıma kapasitesi
Δq	: Gerilme- oturma eğrisinde iki nokta arasındaki gerilme farkı
Δs	: Gerilme- oturma eğrisinde iki nokta arasındaki oturma farkı
Δt	: Zaman farkı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda gelişen makine teknolojisi ve mühendislik uygulamalarının (araştırma ve projelerin) artması problemlili zeminlerde yeni çözümlerin bulunmasına neden olmuştur. Bu çözümler zemin ıslahı veya zemin iyileştirilmesi yapılarak problemlili zeminlerin ortadan kaldırılmasıdır. Zemin ıslahı veya iyileştirilmesi yöntemiyle derin temel sistemlerinden çok daha ekonomik ve daha kısa sürede yapılabilen geoteknik çözümler elde edilmektedir.

Yol kaplamalarının taşıma kapasitesi ve performansı üzerine oturduğu zeminin özelliklerine önemli ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, taban zeminleri trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmelere emniyetle karşı koyabilmelidir. Taban zeminin taşıma kapasitesi genellikle toprak tipi, su içeriği, sıkışma derecesi tarafından etkilenir. Taban zeminin şişmesi ya da kabarması onun nem içeriğine bağlıdır. Bu tip taban zeminleri üzerine inşa edilen hiçbir üst yapı çatlamalara ve oturmalara karşı koyamaz. Şişme-büzülme, don kabarması, su içeriği gibi zemin özelliklerin değişmesi, taşıma gücünde azalmalar, aşırı oturmalar, ilave gerilmeler; bir yol taban zemininde oluşması istenmeyen özelliklerdir, şayet oluşursa da üst yapının zarar görmemesi gerekir. Genellikle, taban zeminleri aşırı oturma olmadan yüksek bir miktarda yüklemeyi destekleyebilmelidir [1].

Yol kaplamalarının performansı, ömrü ve bakım masrafları, vb. hususlar kaplamanın tasarımı, kullanılan malzemeler, yapım tekniği gibi hususlara bağlı olduğu kadar, zeminin stabilizesiyle de doğrudan ilgilidir. Yol üst yapısı için uygun olmayan taban zeminleri iyileştirilerek yeterince stabil bir hale getirilmesi gerekir. Taban zeminin iyileştirilmesiyle taşıma kapasitesi artmakta, oturmalar azalmakta ve dolayısıyla kaplama kalınlığı azalmakta, kaplamanın performansı ve ömrü artmaktadır [1].

Bir yolda taşıtların konforlu ve emniyetli olarak hareket etmelerini sağlayan kaplamalar (veya yol üst yapısı) ne kadar iyi tasarlanırsa tasarlansın, bir üst yapının başarısı gerek ömür, gerek performans bakımından üzerine oturduğu taban zeminine bağlıdır. Taban zeminin uygun olmaması halinde kaplamadan beklenen hizmetin yeterli olamayacağı geçmiş tecrübelerden bilinmektedir. Her ne kadar bir yolun aşınma tabakası en göze çarpan kısmı olmasına rağmen, bir üst yapının başarısı daha çok o üst yapının üzerine inşa edildiği taban zeminine bağlıdır. Kısacası, zayıf bir taban üzerine kalın bir döşeme yapılması

mutlaka iyi bir üst yapı oluşturmaz. Bu nedenle, zemini gerektiğinde uygun bir stabilizasyon yöntemi ile iyileştirmek gerekir. Zayıf taban zeminlerinden mümkünse kaçınılmalıdır. Fakat zayıf topraklar üzerine inşa etmek gerekiyorsa taban zemininin performansını arttırmak için uygulanabilir üç metot vardır. Bunlar; uygun olmayan zemini atıp yerine uygun zemin koymak, uygun olmayan zemini ıslah etmek, uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etmektir.

Birinci alternatif; uygun olmayan zeminin (zayıf zemin) kazılması (iş makinesi kirası, akaryakıt giderleri, işçi giderleri), kazılan zemin 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 zeminin yerine serilmesi, sıkıştırılması işlemleri hem çok yüksek maliyetlere neden olmakta hem de zaman almaktadır. İkinci alternatif ise zemine ait bir takım özelliklerin uygun bir stabilizasyon yöntemi ile değiştirilerek iyileştirilmesidir. Stabilizasyonla zeminin; mukavemet, rijitlik, basınç dayanımı, geçirgenlik, şişme ve kabarma potansiyeli drenaj ve donma hassasiyeti gibi bir özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür. Yol alt yapısını stabil duruma getirmek için birçok stabilizasyon metodu mevcuttur. Ülkemizde genellikle mekanik stabilizasyon metodu uygulanmaktadır. Kireç çok miktarda bulunması maliyetinin ucuz olması nedeniyle karayollarında en çok uygulanan stabilizasyon metodu zemin-kireç stabilizasyonudur. Kireç stabilizasyonu uygulaması için zemine karıştırılacak kireç miktarı zemindeki malzemenin kil oranına göre değişmektedir. 1 ton malzemenin kireç ile iyileştirilmesi için yaklaşık 18–30 kg kireç yeterli olmaktadır. Kireç ile iyileştireme birinci alternatife göre % 40'lara varan ekonomi sağlamaktadır. Kireç stabilizasyonu sonucunda zeminin geoteknik özelliklerin değişmesi yanında özellikle mukavemetinde çok keskin artışlar olmaktadır. Kireç stabilizasyonu, zeminin mukavemetinde yüksek artışlar sağlamanın yanında davranışını da değiştirmektedir. Elastisite modülü belirgin halde artmakta, esnek halden rijit hale geçerek üst yapı tabaka kalınlıklarını azaltmaktadır. Üçüncü alternatif, zeminin zayıf özellikleri göz önüne alınarak kaplama tasarımını buna göre yapmaktır. Ancak aşırı kaplama kalınlığı gerektirdiğinden ekonomik olmayabilir. Ayrıca zeminin bazı fiziksel özelliklerinin kaplamada yaratacağı olumsuz etkiler kaplama kalınlığı ile giderilemeyebilir. Böyle bir zemin durumunda, özellikle su muhtevası yüksek (balçık) zemini stabilizasyon yöntemleri ile iyileştirmek yetersiz kalmaktadır. Zemin özelliklerini iyileştirmek için yapılan zemin stabilizasyonu, genellikle zeminin PI değerini

ve şişme potansiyelini düşürerek mukavemet artışı sağlamaktadır. Kireç ile zemin stabilizasyonu genellikle optimum su muhtevasında uygulanır ve belli bir kireç yüzdesinden sonra zeminde mukavemet artışı sağlamamaktadır. Su muhtevası yüksek çok zayıf (balçık) bir zemini kireç ile iyileştirmenin tamamen mümkün olmayacağı düşünülmektedir. Bu duruma alternatif olarak; henüz Türkiye’de karayollarında uygulamaya geçmemiş, fakat son yıllarda bazı dünya ülkelerinde uygulanmakta olan hücresel dolgu ve yük taşıma sistemi (geocell, miracell vb) geliştirtmiştir.

Hücresel dolgu sistemi, zayıf dolgu malzemelerini en zor yük taşıma koşullarında kullanılmasını sağlar. Pahalı dolgu malzemesi yerine aplikasyon sahasında bulunan doğal dolgu malzemesinin kullanılmasına ve taban zeminin olduğu gibi kabul edilmesine olanak verir. Başka türlü bir iyileştirme yönteminde ihtiyaç duyulan dolgu malzemesi miktarına oranla daha az dolgu malzemesi kullanılmasını sağlar. Hücresel dolgu sistemi üst yapıdan gelen yükleri geniş bir alana yayarak alt temel seviyesindeki gerilmeleri % 50’e varan oranlarda azaltarak yük taşıma kapasitesini arttırmakta, oturmaları azaltmakta ve tabaka kalınlıklarını azaltmaktadır.

Bu tez kapsamında, yüksek su muhtevalı killi bir yol taban zemini üzerinde çalışılmıştır. Böyle bir zeminin kireç ile iyileştirilmesi veya hücresel dolgu sistemi (geocell, miracell vb.) ile güçlendirilmesi konusu incelenmiştir. Zemine değişik oranlarda kireç karıştırılması durumunda ve geocelle güçlendirilmesi durumunda, Kaliforniya Taşıma Oranı ve plaka yükleme deneyleri yapılarak zemin özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Zeminin iyileştirilmesiyle, oturmaların azalması, taşıma kapasitesinin artması ve dolgu kalınlığının azalması incelenerek kireç stabilizasyonu ile hücresel dolgu ve yük taşıma sistemlerinin bir karşılaştırması yapılmıştır.

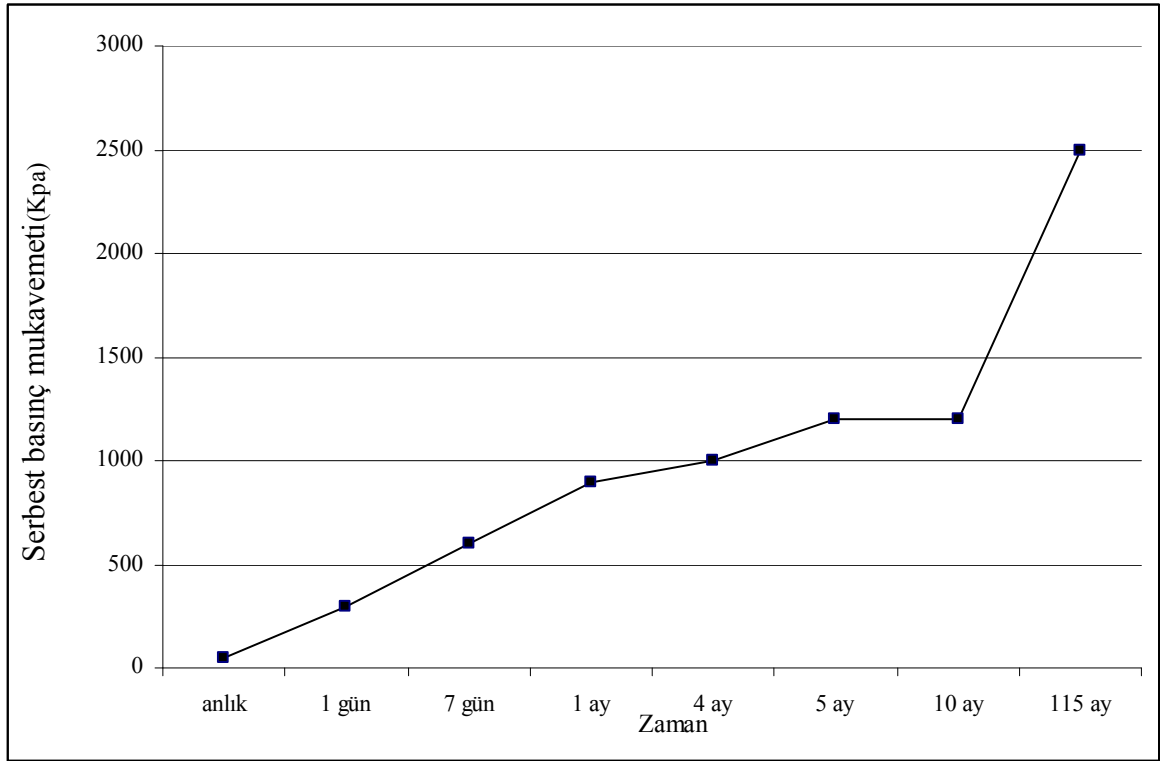
Birinci bölümde, öncelikle konu ile ilgili yapılan önceki çalışmalar taranmış ve elde edilen bulgular değerlendirilmesi ve ardından ulaşım yapılarının üzerine oturduğu taban zemini ve taban zemini mukavemetini belirlemede kullanılan test metotları, CBR, yatak kat sayısı, esneklik modülü ve yük taşıma kapasitesi kavramları, stabilizasyon kavramı ve katkı maddeleri ile stabilizasyon ve hücresel yük taşıma ve sıkıştırma sistemleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde tez çalışmasında yapılan kıvam limiti, modifiye proktor, California taşıma oranı, model plaka yükleme deneylerinin nasıl yapıldıkları anlatılmıştır. Üçüncü bölümde deneylerden elde edilen bulgular irdelenmiştir. Dördüncü bölümde ise bulgulardan elde edilen sonuçlar açıklanmıştır.

1.2. Literatür Taraması

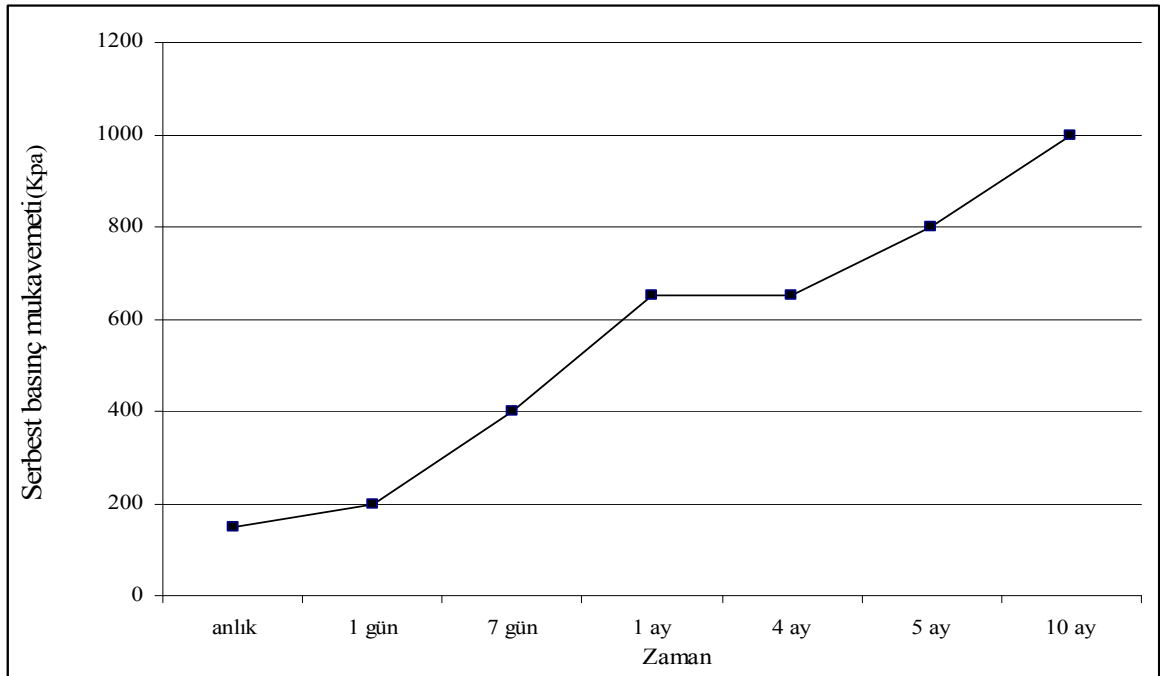
1.2.1. Katkı Maddeleri ile Stabilizasyonla İlgili Yapılmış Çalışmalar

Dinçer ve Berilgen (1991) tarafından yapılan bir araştırmada İstanbul Zekeriya köy mevkiinden alınan volkanik kökenli ayrılmış tüflerden oluşan yüksek plastisiteli, killi silt bir zeminin, stabilizasyon özelliklerini incelemiştir. Zemine, % 4 ve % 6,5 oranlarında kireç katılmış ve yedi ile yirmi sekiz gün küre tabi tutulmuştur. Yapılan deney sonuçlarında, zemine % 4 kireç katılmasıyla, likit limiti % 76, plastik limiti % 37 olan zemin non-plastik hale gelmiştir. Yapılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) şişme deneyleri sonucunda, kireç katkılı numunelerde şişme potansiyeli % 0,1'e düşmüştür. Yapılan serbest basınç deneyleri ve CBR deneyleri sonucunda zemine kireç karıştırılmasıyla başlangıçta mukavemette azalma olmuştur. Artan kireç yüzdelere bağlı olarak, serbest basınç mukavemeti de artmıştır. CBR deney sonuçlarına göre, zemine kireç katılması sonucu CBR değeri % 11,63'den % 29,75'e kadar yükselmiştir. Zemine kireç katılmasıyla, deformasyon özelliklerindeki değişimi göstermek amacıyla yapılan ödometre deney sonuçlarında, kireç yüzdesi arttıkça konsolidasyon oturmalarının azaldığı, yük kaldırıldığında ise şişme miktarlarında büyük azalmalar olduğu görülmüştür [2].

Kavak (1996) Boğaziçi Üniversitesinde verdiği "silindirik yükleme altında kireç stabilize edilmiş killerin davranışı" adlı doktora tezinde, saf bentonit ve kaolin killeri kireçle stabilize edilerek serbest basınç mukavemetleri inceledi. Bu deneyler sonucunda kilin serbest basınç mukavemeti bentonit için 1 ayda 6 kat, kaolin için ise 12 kata varan artışlar gözlenmiştir. Uzun dönemde de mukavemet artışlarının devam ettiği görülmüştür. Şekil 1.1'de kaolin kiline kireç karıştırılarak çeşitli zaman aralıklarında kür edilen numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 1.2'de bentonit kiline kireç karıştırılarak çeşitli zaman aralıklarında kür edilen numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları verilmiştir [3]



Şekil 1.1. % 4 kireç stabilize edilen kaolinin serbest basınç değerinin değişimi



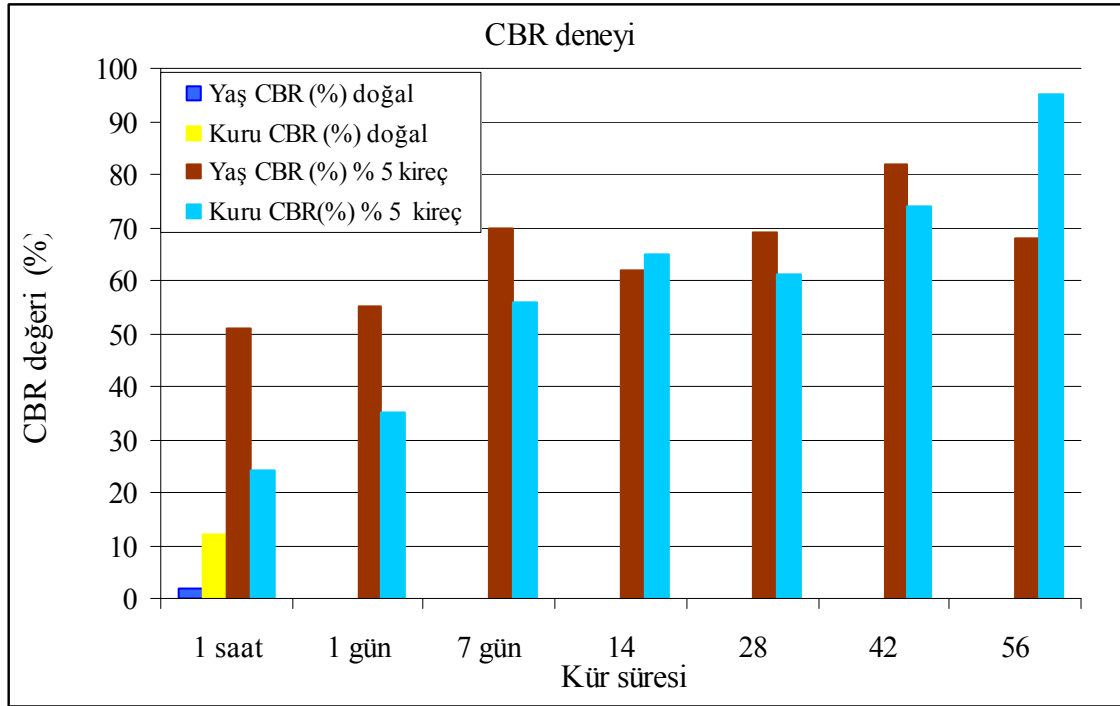
Şekil 1.2. % 4 kireç stabilize edilen bentonitin serbest basınç değerinin zamanla değişimi

Veith (2000)'in killerde % 5 kireç, % 1 yüksek fırın cürufu (Y.F.C.) kullanarak yaptığı çalışmalarda ve Wild ve Diğ. (1998)'in kaolinde değişik oranlarda kireç ve Y.F.C. kullanarak yaptığı çalışmalarda; cürufun yol alt yapısında kullanma durumu değerlendirilmiş ve laboratuvar koşullarında hazırlanan numunelere değişik oranlarda Y.F.C. katılmak suretiyle, Y.F.C.'nün killerde katkı malzemesi olarak uygunluğu araştırmışlardır. Killerin kimyasal yapısında oluşan değişimler incelenmekte ve cürufun, killerin şişme potansiyellerini önemli ölçüde azalttığı ve güçlendirdiği savunulmaktadır [4,5].

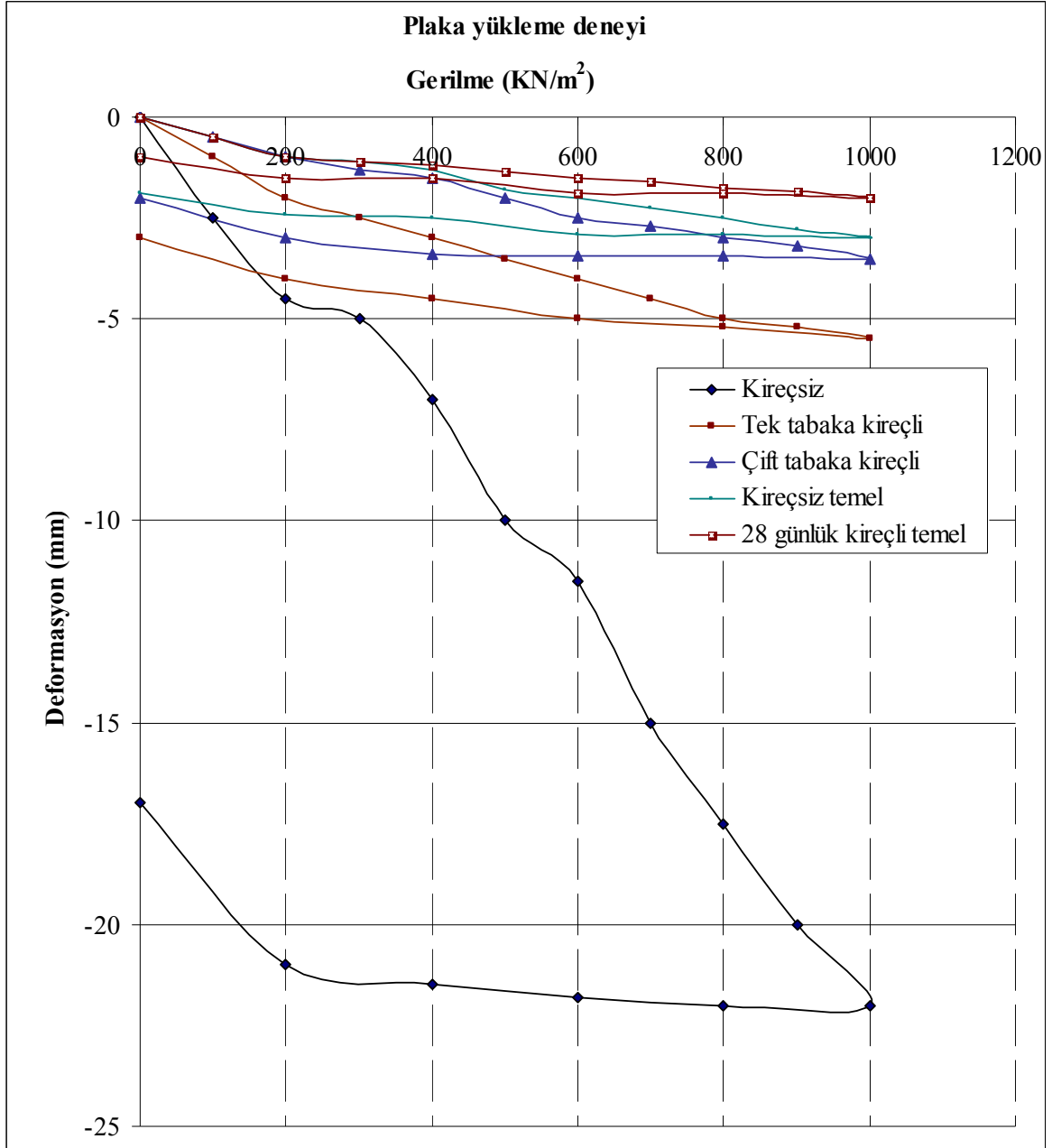
Sivapullaiah ve vd. (2002) yılında yapılan çalışmalarında, kırmızı toprak zemine % 20 bentonit, % 1 çimento ve % 1 kireç katarak davranışını incelediler. Kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su muhtevasına göre numuneler hazırladılar. Değişik katkı oranları ile hazırlanan numuneler 0,7 ve 28 gün kür edilerek konsolidasyon, serbest basınç deneyi gibi deneylere tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda, zeminin kompaksiyon özelliklerinin değiştiği görülmüştür. Optimum su muhtevasında bir değişiklik olmazken kuru birim hacim ağırlık artmaktadır. Kireç veya çimento zeminin stabilitesini arttırmadığı, sıkışabilirliği kirecin çimentodan daha fazla arttırdığı, bentonit-kireç karışımı 7 günden daha sonra dayanımını artırırken; çimento-bentonit karışımı 7 gün içinde dayanımını hızla artırdığı sonucuna varmışlardır [6].

Kavak vd.(2004) yaptıkları çalışmalarda, Karayolları bölünmüş yol çalışmaları kapsamında bulunan, Ankara- Bala ayrımı- Kulu ayrımı bölünmüş yol Km: 44+200–44+560 arasında kireç stabilizasyonun gerçek bir yol üzerinde performansını incelemiştir. Bu çalışma taşıma gücü düşük zemin ağırlığının % 1, % 2, % 3, % 4, % 5'i oranlarında zemine kireç stabilize edilerek kireç stabilizasyonun gerçek bir yol üzerinde zaman ve trafik içindeki davranışı incelenmiştir. Çalışmanın toplam 40 cm'lik kısımda uygulanması yapılmıştır. Kireç Stabilizasyonu 20 şer cm'lik 2 tabaka halinde uygulanmıştır. İyileştirilme yapılan yolun genişliği yaklaşık olarak 14 metredir Seçilen kireç miktarı KGM, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı Şefliği tarafından kuru zemin ağırlığının % 5'i olarak tespit edilmiştir. Uygulama sonrasında malzemeye kireç karıştırıldığında malzemenin laboratuvar CBR değerlerinde büyük artışlar meydana gelmiştir. 56 gün sonunda % 5 kireç karıştırılan malzemenin doğal malzemeye oranla kuru CBR değerlerinde 8 kat, yaş CBR değerlerinde ise 34 kata varan artışlar meydana geldiği (Şekil 1.3) görülmüştür. Uygulama sonrasında yeterli sıkıştırma değerleri elde edildikten sonra plaka yükleme deneyleri yapılarak kireçli

ve kireçsiz durumlar için karşılaştırmalar yapılmıştır. Plaka yükleme deneylerinde maksimum deformasyon 22,18 mm den 3,58 mm'ye, Kalıcı deformasyonlar ise tek tabaka için 17,15 mm den 2,63 mm'ye, çift tabaka için ise 1,58 mm'ye düşmüştür (Şekil 1.4). Yatak katsayısı değerleri incelendiğinde kireçli durumda, kireçsiz duruma oranla 6 katlık bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada yol kesit tasarımıyla ilgili bir çalışma yapılmamasına rağmen yüksek CBR değerlerinin yol kesitini küçülterek ekonomi sağlayacağı, taban zemini killi bir zemin olduğu için yerinde kazılarak kireç ile iyileştirilerek tekrar serilip sıkıştırılarak sonuç alınmıştır. Kalitesi yeterli olmayan dışarıdan gelen kil oranı yüksek stabilize malzemelerde kireçle özellikleri iyileştirilerek uygun hale getirilebileceği, plaka yükleme deneyleri sonucunda bulunan kalıcı deformasyonların azlığı ve yüksek yatak katsayıları zeminin trafik altında da deformasyonlarının son derece az olacağı, kazıda bazı killi bölgelerde su muhtevasının yüksekliğinden dolayı taban zeminde oynamalar gözükmesine karşılık kireç stabilizasyonu sonucunda bu kısımlarda oynamalar gözlenmediği sonuçlarına varılmıştır [7].



Şekil 1.3. Yaş CBR değerlerinin grafik halinde gösterilmesi [7].



Şekil 1.4. Plaka yükleme deneyi sonuçları [7].

Kavak ve Bilgen (2005), kireç ve yüksek fırın cüruf (Y.F.C) yol altyapısında kullanılabilirliğini araştırdılar. Çalışmada öncelikle kil numuneleri üzerinde Atterberg limitleri, elek analizleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Daha sonra ise kil stabilizasyonu için değişik oranlarda öğütülmüş yüksek fırın curufu ve sönmüş kireç katkı malzemesi olarak kullanmışlar ve uygun karışımın bulunması amacıyla serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda bir yıl içinde % 5 kireç ve %

3.33 curuf katkı malzemesi olarak kullanıldığında kür edilen numunelerin mukavemetlerinde 5–6 katlık artışlar gözlenmiştir. Aynı oranlarda katkı kullanıldığında stabilize edilen kilde yaş CBR deneylerindeki artışın 36 kata kadar çıktığı gözlenmiştir. Stabilize edilen zemin daha sert (rijit) bir yapıya sahip olmuştur. CBR değerlerindeki yüksek artışlar yol yapımında alt temel veya taban zeminde kullanılması durumunda zemindeki deformasyonları azaltarak yol kesitlerinde küçülme, buna bağlı olarak da maliyetlerde azalma sağlayabileceği sonuçlarına varmışlardır [8].

Yıldırım vd. (2006) zemin-asfalt karışımları üzerinde deneyler yaptılar. Yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinde, maksimum serbest basınç mukavemetini veren optimum asfalt miktarının % 3 olduğu görülmüştür. Yine yapılan CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) deneyinde, zeminin CBR değeri % 11, zemin-asfalt karışımının ise % 20 olarak bulunmuştur. Örnek alınan bir yol kesiti, trafik yükü ve CBR deneyi sonucuna göre stabilizasyonsuz ve stabilizasyon yapıldığı takdirde olması gereken üstyapı kalınlıkları AASHO metoduyla hesaplanmıştır. Stabilizasyondan önce ve sonra üstyapı maliyeti hesaplanmış, zemin-asfalt stabilizasyonundan dolayı üstyapı maliyetinde % 5.2 ekonomi sağlandığı görülmüştür [9].

Keskin ve Kavak (2003) yaptıkları çalışmada, su muhtevası optimum su muhtevasının çok üzerinde olan ve kil oranı yüksek (CH tipi killi zemin) bir yol taban zeminin kireç stabilizasyonu ile iyileştirilmesinin bir yol kesiti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, kireç stabilizasyonu genellikle optimum su muhtevasında yapıldığı ve kilin su muhtevasının optimumundan çok yüksek olduğu durumlarda kireç stabilizasyonunun etkilerinin az olacağı düşünülmüştür. Bu etki dikkate alınarak, su muhtevası (% 35) optimum su muhtevasından %12 fazla olan killi yol taban zeminin alt temel altındaki 40 cm kalınlığındaki kısmı inşaat sahasında kireçle iyileştirilmiştir. Kireçle stabilize edilen kilin optimum su muhtevası % 23 olmasına karşılık arazide kilin doğal su muhtevası % 35 civarındadır. İnşaat sahasındaki kireçle stabilize edilen zeminin yaş CBR değerleri 5'den 28 gün içerisinde % 40'a çıkmış ve su muhtevası optimumdan % 12 fazla olmasına rağmen, 8 kata varan artışlar meydana geldiği ve kireç stabilizasyonunun yüksek su muhtevası içeren killerde de iyi sonuç verebileceği, yaş CBR değerlerine göre yapılan tasarım sonucunda, tipik yol kesiti için dolgu kalınlığı 38 cm'den 15 cm'ye düştüğü ve maliyetlerin % 40 azaldığı sonuçlarına varılmıştır [10].

1.2.2. Hücresel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemleri (Geocell) ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Moghadas ve Dawson (2009) yaptıkları çalışmada, Geocell ile güçlendirilmiş kum üzerindeki yapılan bir şerit temel (plaka) ile bir planar tip geotekstil ile güçlendirilmiş bir kum üzerine yapılan şerit temelinin taşıma kapasitesinin karşılaştırmasını laboratuvar model testleri kullanarak incelediler. Test programı güçlendirme genişliği, planar tabakaların sayısı ve temel altındaki geocellin yüksekliği gibi çeşitli parametreleri kapsamaktadır. Planer güçlendirilmiş tabakaların sayısı, geocell güçlendirmenin yüksekliği ve güçlendirme genişliği arttıkça güçlendirme veriminin azaldığı, kum tabaka içinde geocell güçlendirme takdim etme ile yük taşıma kapasitesini önemli bir şekilde arttığı ve oturmaları azalttığı ve aynı karakteristik ve kullanılan aynı yığın ile planar güçlendirmeye göre daha fazla temel yatağının yüzey kabarmasını azalttığı, farklı güçlendirme genişlikleri ile yapılan testler (kısa, orta, uzun güçlendirme genişlikleri) geocell ve planar güçlendirme için sırasıyla temel genişliğinin 4,2 ve 5,5 katından daha fazla güçlendirme genişliğini arttırdığı, fakat ne taşıma kapasitesinde daha fazla bir artış ne de temel oturmasında daha fazla bir azalma sağlamadığı; pratik uygulamalarda tolerans tanınan oturma miktarına göre planar güçlendirme ile taşıma kapasitesinde % 150 artış ve oturmada % 64 azalma sağlanırken, geocell güçlendirme ile taşıma kapasitesinde % 200'den daha fazla artış ve oturmada % 75 kadar bir düşmeye ulaşabileceği sonucuna varmışlardır [11].

Dash vd (2003) yaptıkları çalışmada, yumuşak kil yatakları üzerine serilen granüller dolgu içine yerleştirilen geocell güçlendirmenin etkisini laboratuvarda küçük ölçekli model test ile araştırmışlardır. Test yatakları rijit bir dairesel temel ile yüklemeye tabi tutuldu. Dolgu üzerindeki temel yükü, temel oturması ve deformasyon test boyunda ölçüldü. Sistemin geniş kapsamlı performansı üzerinde geocell temelindeki bir planar geogrid tabakanın ki kadar iyi olan geocell döşegenin genişliği ve yüksekliğinin etkisi bir test serileri sayesinde sistematik bir şekilde incelenmiş; geocell güçlendirme takviyesi ile taşıma kapasitesinde artış ve temel yatağın yüzey şişmesinde azalmaya göre gülcü bir performans geliştirme elde edilebileceği, geocell döşegenin temelindeki yerleştirilen ek bir geogrid tabaka temel yatağın mukavemetini ve yük taşıma kapasitesini daha fazla arttırdığı geocell yüksekliğindeki artış geocellin faydalı etkisini azalttığı, yumuşak kil altına serilen kum yatak içindeki bir geogrid ile birlikte geocell güçlendirme dairesel temelin taşıma kapasitesinde yedi kat bir artış sağlayacağı sonuçlarına varmışlardır [12].

Sireesh vd. (2008) yaptıkları çalışmada, bir laboratuvar ölçekli model test serisi sayesinde boşluklu kil taban üzerine geocell güçlendirilmiş kum yatağın potansiyel faydasını araştırmışlar. Test performansında çeşitlendirilmiş parametreler; kil yatak üzerindeki güçlendirilmemiş kum tabakanın kalınlığını geocell döşüğün yükseklik ve genişliği, geocell içindeki kum dolgunun relative yoğunluğunu ve geocell altına yerleştirilen ek bir planar geogrid tabakanın etkisini kapsamaktadır. Performansta güçlü bir gelişme, boşluklu kil taban üzerine yeterli boyutta geocell döşek takdimi ile sağlanabileceğini, en az boşluk çapına eşit bir mesafede boşluk ötesine geçilmesi gerektiği, temel performansı üzerinde boşluğun etkisini azaltan kritik bir geocell döşek yüksekliğinin var olduğunu, boşluklu yumuşak taban üzerine yerleştirilen granüler dolgu tabakası içindeki basal geogrid ve geocell güçlendirme ile performansta 3,4 kat bir gelişme olabileceği, yalnız boşluklu yumuşak kil tabana kıyasla temelin yük taşıma kapasitesi yaklaşık 40 kata kadar arttığı sonuçlarına varmışlardır [13].

Zhoo vd. (2009) toprak set mühendisliğinde geocell güçlendirmenin taşıma kapasitesi adlı yaptıkları çalışmada, yumuşak taban üzerinde geocell desteklendirilmiş toprak set bir model ve bir basit taşıma kapasitesi hesaplama modülü yol toprak seti içindeki bir geocell tabakanın güçlendirme fonksiyonları çalışmasına dayandırılarak ileri sürmüşler. Çalışmada, model ve hesaplama prosedürleri hem geocell güçlendirmenin düşey gerilme dağılım etkisi ve hem de ince zan etkisi hesaba katılarak bir laboratuvar deneyi ile kanıtlandı ve Koerner metodu ile karşılaştırıldı. Mevcut metottan elde edilen hesaplanmış sonuçlar temel oturması büyük iken Koerner metodundakinden deneysel sonuçlara çok daha yakın olduğu, ezilmiş taş yastık içine yerleştirilen geocell donanımının yumuşak tabanın taşıma kapasitesini önemli bir şekilde arttırdığı belirtilmiştir [14].

Madhavi ve Wanshi (2008) yaptıkları çalışmada, geosentetik güçlendirilmiş kum yatak üzerine yerleştirilen kare plakalar üzerinde laboratuvar model yükleme testleri ve sayısal çalışmalar yaptılar, kum yatak üzerine oturtulan kare plakanın deformasyon azalmasında ve taşıma kapasitesini arttırmada farklı tip güçlendirmenin (geocell, planar tabakalar ve rasgele dağıtılmış ağ gözlü elemanlar) rölatif performansını deneysel ve sayısal çalışmalar sayesinde incelemişlerdir. Güçlendirme miktarı farklı güçlendirmeli testle de aynı tutulmuş ve güçlendirilmiş durumdaki laboratuvar yükleme testleri bir sayısal model içinde taklit edilmiş ve plaka altındaki gerilmeleri ve deplasman dağılımlarını daha iyi almak için sonuçları analiz edilmiştir. Taşıma gücü faktörünün güçlendirme şekli tarafından önemli bir şekilde etkilediği, geocellin yükleme boyunca malzeme kopması olmamak şartıyla bu

güçlendirme şekilleri içerisinde avantajlı olduğunu hem deneysel hem sayısal çalışmaların gösterdiği, rasgele dağıtılmış ağ gözlü elemanlar şeklinde kullanılan geogrid diğer iki şeklin altında bulunduğu sonuçlarına varılmıştır. Geocell tabaka ile temel yükü daha derin toprak tabakalarına transfer edilerek taşıma kapasitesini arttıracak ve böylece temel altındaki gerilmeler ve birim şekil değişimleri azalacak ve yüzey şişmesinin tamamen önüne geçilebileceğini önemsemişlerdir [15].

Dash vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada, bir geocell döşek ile güçlendirilmiş bir kum yatak tarafından desteklenen bir şerit plaka üzerinde laboratuvar model yükleme testi ile sonuçları incelenmiştir. Geocell oluşumun deseni, cep boyutu, geocell döşüğün yüksekliği ve genişliği, geocellin üstüne serilen malzemenin kalınlığı, geocell döşüğün imalatında kullanılan geogridin mukavemeti ve kumun relative yoğunluğu gibi çeşitli parametrelerin etkisi test programında incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda, geocell-güçlendirilmiş kum üzerine yerleştirilen şerit plakanın gerilme- oturma davranış yaklaşık yükleme plakasının genişliğinin % 50'sine kadar bir oturmada bile doğrusal olduğu ve güçlendirilmemiş duruma kıyasla taşıma kapasitesini 8 kat yükseldiği gözlenmiştir. Geocell döşüğün performansını değerlendirmede geocell döşüğün yapımında kullanılan geogridin çekme gerilmesinin önemli bir parametre olmadığı, fakat geogridin yönlendirme şeritleri ve boşluk boyutunun geocell güçlendirme temel yatağın yük taşıma kapasitesinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır ve performanstaki gelişme değerlendirilirken onun katkısı dikkate alınması gerektiği önerilmiştir. Plaka (temel) genişliğinin iki katına eşit bir geocell yüksekliğine kadar performansta önemli bir gelişme olduğu gözlemlenmiş ve maksimum fayda elde etmek için geocell üstündeki kalınlık plakanın altından 0,1B bir derinlikte olması gerektiği önerilmiştir [16].

Zhao ve Wen (2007) tarafından yapılan yumuşak toprak üzerine geogrid ya da geocell güçlendirilmiş kum yatak üzerinde model çalışmalar adlı çalışmada, karma tabakalara yol açmak için bir kum yastık içine yerleştirilen geosentetik malzemedan dolayı yumuşak toprağın taşıma kapasitesinin gelişmesini incelemek için dört test sonuçları rapor edildi. Geocell güçlendirilmiş kum yastık takviyesi ile geocellin altındaki yumuşak toprağın oturmasında önemli bir azalma olduğu, taban reaksiyon katsayı (K) 3000'ne kadar azaldığı ve deformasyon % 44'e kadar azaldığı, güçlendirilmemiş kum yastıkların yüzey toprak gerilmeleri güçlendirilmiş gruplarından daha büyük olduğu (özellikle geocell güçlendirilmiş yastıklar için) sonuçlarına varmışlardır [17].

Zhang vd. (2009) yılında yaptıkları çalışmada, tasarım süresi boyunca en önemli sonuçlardan biri olan deformasyon hesaplamasını Winkler temel modelini kullanarak ve iç yüzey direnç etkisini göz önünde tutarak hem düşey sistematik yükler altında geocell ile güçlendirilmiş döşek için bir deformasyon kontrol diferansiyel eşitliğini incelemişlerdir. Hem de deplasmanlar için uygun güç serileri yarı analitik çözümler ve geocell güçlendirmenin iç etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca, geocell güçlendirmenin uzunluk ve esneklik rijitliği, geocell güçlendirmenin gerilme- deformasyon karakteristikleri üzerinde iç yüzey direnci ve taban reaksiyon katsayısı yükler gibi etki faktörleri tartışıldı. Geocell güçlendirmenin deformasyon üzerindeki iç yüzey direnç etkisinin mühendislik tasarımında dikkate alınması önerilmiştir [18].

Dash ve vd. (2001) yaptıkları ek planar güçlendirmeli geocell güçlendirilmiş kum yatak üzerindeki şerit plaka adlı çalışmalarında, şerit plaka üzerinde laboratuvar model test sonuçlarını incelediler. Geocell döşek altına yerleştirilen bir planar geogrid tabaka dönmeye karşı stabiliteyi ve yük taşıma kapasitesine göre temel performansını daha çok artırdığı sonucuna varmışlardır [19].

Emersleben ve Meyer (2008) yaptıkları bir çalışmada, geocell kullanarak yol inşaatlarında kullanılan çakıl temelin taşıma kapasitesini artırdığını göstermek için plaka yükleme testi yapmışlardır. Farklı hücre çaplı, farklı hücre yükseklikli ve farklı malzemelerden yapılan hücresel dolgular 2 m yüksekliğinde, 2 m genişliğinde ve 2 m iç çaplı bir test kutusunda test edilmiştir. Alt temel malzemesini taklit etmek için “ Glyben diye adlandırılan yapay karışmış taşıma kapasitesi düşük bir toprak kullanıldı. Yükleme boyunca alt temel tabakası üzerindeki düşey gerilmeleri ölçtüler. Alt temel üzerine yerleştirilen kuru kum ile doldurulmuş geocell tabaka aynı kalınlıkta güçlendirilmemiş kum tabakaya kıyasla düşey deformasyonun azaldığı, düşey gerilmelerin % 45 azaldığı ve taşıma kapasitesinin 3 kat arttığı sonuçlarına varmışlardır [20].

1.3.Taban Zemini

Genel olarak, yol üstyapıları esnek ve rijit olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Esnek üstyapılar, en çok tercih edilen üstyapı tipidir ve çeşitli tabakalardan oluşmaktadır. Bunlar, asfalt tabakası, temel tabakası ve alt temel tabakası olarak üç ana grup altında toplanabilir. Yol üstyapısı, belirli bir taşıma gücüne sahip olan taban zemini üzerine inşa edilir ve taban zemini, aynı zamanda, altyapının sınırını oluşturur. Asfalt tabakası, en üstte bulunan

tabakadır ve belirli bir karışıma sahip sıcak asfalt yardımı ile yapılır. Bu tabaka, trafik yüklerine karşı gereken dayanımı sağlamalı, araçların aşındırma etkilerini karşılayabilmeli ve ihtiyaç duyulan sürtünme dirençlerini oluşturabilmelidir. Temel ve alt temel tabakaları, farklı tane dağılımlarına sahip granüller malzemelerle ya da kırma taşlarla oluşturulur. Çok açıktır ki, üstyapının tabakalı olarak inşa edilmesinin sebebi, daha ekonomik sonuçlara ulaşma amacını taşımaktadır ve birim tabaka maliyeti aşağıya indikçe azalmaktadır. Taban zemini, altyapının sınırını oluşturmaktadır ve yol güzergâhında kazılan ya da belirli bir depodan alınan uygun nitelikli zeminlerle inşa edilmektedir. Taban zemini, daha önceden yapılan sıkışma deney sonuçlarına göre hesaplanmış olan belirli bir birim hacim ağırlığı ve su muhtevasını sağlayacak şekilde mekanik enerji uygulanarak sıkıştırılır. Ayrıca, taban zemininin, taşama gücü, don dayanımı ve şişme özellikleri gibi çeşitli açılardan da uygun niteliklere sahip olması gerekmektedir [21].

Üstyapı tabanı, uzun ömürlü üstyapıların yapımı ve performansı açısından çok önemlidir. Taban, yapım süresince kullanılan iş makinelerinin çalışacağı düzgün bir yüzey oluşturan, kullanılacak malzemeleri taşıyan, bunun yanında üst tabakalarının yeterli oranda sıkışmasını sağlayan silindirlerin etkilerine karşı deformasyon direnci sağlayan kısımdır. Taban, performans periyodu boyunca trafik yüklerine karşı dayanım sağlama ile mevsimsel donma – çözülme ve nem oranındaki değişikliklerden kaynaklanan dayanımdaki değişikliklerin azaltılması açısından önemlidir. Tabanın uygun şekilde tasarım ve yapımıyla, killi zeminlerde ıslanma–kuruma dönemlerinde, dona karşı hassas zeminlerde donma – çözülme dönemlerinde meydana gelen hacim değişikliklerini önlemek mümkündür.

Üstyapı tabanı; sıkıştırılmış taban zemininden, kimyasal maddelerle stabilizasyon yapılmış taban zemini veya granüller malzemedir, kırma taş veya çakıl gibi doğal granüller malzemelerden oluşabilmektedir. Kullanılan malzeme çeşidi ne olursa olsun, kaplama ömrü boyunca olduğu gibi yapım sırasında da taban yeterli sertliğe sahip olmalıdır. Bölge şartlarına ve üstyapı tasarımına bağlı olan bu durum, taban zemini veya temel malzemelerinde kimyasal veya mekanik stabilizasyon yapılarak giderilebilmektedir. Her ne kadar bir yolun aşınma tabakası en göze çarpan kısmı olmasına rağmen, bir üst yapının başarısı daha çok üst yapının üzerine inşa edildiği taban zeminine bağlıdır [22,1].

1.3.1. Yol Taban Zeminlerinin Mukavemeti (Taşıma Kapasitesi)

Taban zemini malzemelerin mukavemeti (yük taşıma kapasitesi), genellikle yük altında deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Genel olarak deformasyona daha dayanıklı bir taban daha fazla yük taşır. Kaplamaların kalınlığına etki eden en önemli hususlardan biri zeminlerin mukavemet (dayanım ve taşıma gücü) özelliğidir. Kaplama vasıtasıyla üst yapıdan zemine intikal eden trafik yüklerinin zeminde herhangi bir deformasyon yaratmaması gerekir. Taban zeminlerin mukavemeti, yol üst yapısının performansını belirlediği için bir değerden az olmamalı ve aşırı değişim göstermemelidir. Bu nedenle, zeminlerin mukavemetinin bir şekilde belirlenmesi gerekir. Ulaşım yapılarının üzerlerine oturduğu zeminlerin mukavemet değeri: CBR, Yatak Katsayısı (K), esneklik değeri (R), esneklik modülü (M_R) gibi test metotları ile belirlenmektedir [22].

1.3.1.1. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Bu yöntem 1930'larda, A.B.D.'nin California eyaletinde O.J Porter tarafından geliştirilmiştir. Önce hava alanı pistlerinin üst yapı hesabında kullanılan CBR metodu, sonradan karayolları araştırma dairesi tarafından bazı değişiklikler yapılarak, zeminlerin karayollarının alt yapılarında kullanılabilir olup olmadığını belirlemek amacıyla yol üst yapıları içinde kullanılmaya başlamıştır.

Bu deney kesit alanı $19,35 \text{ cm}^2$ olan silindrsel bir pistonun belirli bir hızla (1,27 mm/dk) zemine itilerek elde edilen yük - penetrasyon bağıntısının (Kaliforniya Taşıma Oranı) bulunmasını kapsar. Herhangi bir penetrasyon değeri için, aynı yükün kalker kırma taştan hazırlanan numunede aynı batma miktarını sağlayacak kuvvete oranı olarak tanımlanan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) genellikle 0,25 mm'lik bir penetrasyon için verilir. Ancak 0,50 mm'lik penetrasyonda daha büyük bir değer çıkarsa büyük olan değer seçilir [23,24].

CBR deneyi için genellikle iki adet numune hazırlanır. Numunelerden birisi CBR değerinin belirlenmesi için hemen kullanılır. Diğeri ise daha sonra belirlenecek ikinci CBR değeri (yaş CBR) için saklanır. İkinci numune, zemin yol alt yapısı olarak kullanılacak ise üst yapıdan gelecek yüklerin (trafik yükü, temel taban basıncı vb.) şiddetine yaklaşık eşit bir düşey yük altında (bu yük üstyapıdan gelecek yük ne olursa olsun 4,5 kg dan daha az olmayacak biçimde) 96 saat (4 gün) süre ile suda bekletilir. Böylece zeminin boşlukları

tamamen suyla doygun hale gelmekte ve dolayısıyla en düşük taşıma gücündeki mukavemeti belirlenebilmektedir. Bu süre içinde numunedeki şişme okumaları alınır. Bekleme süresinin sonunda bu numune üzerinde CBR deneyi yapılarak yaş CBR değeri elde edilir [23,24].

Ayrıca yaş CBR testi ile zeminin şişme miktarı da saptanabilmektedir. Bunun için standart veya modifiye proktor testi ile zeminin maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği saptanmalıdır. Zemin numunesi 15,24 cm'lik (6 inç) CBR kalıbında şartnamede belirtilen sıkışmayı sağlayacak şekilde optimum su içeriğinde veya sınırları içinde standart tokmak ile proktor testinde olduğu gibi sıkıştırılır. Bu şekilde hazırlanan numuneye 4,95 cm çapı olan piston ile 1,25 mm/dakika hıza numuneye batmayı sağlayacak yük tatbik edilir ve 0,625, 1,825, 2,50, 5,00, 7,50, 10,00 ve 12,50 mm'deki batma miktarlarındaki yük okunur. Bu yük değerleri kg/cm² cinsinden basınç birimine dönüştürülür. CBR değeri aşağıda görüldüğü gibi hesaplanır [23].

$$CBR = \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_s} \right) * 100 \quad (1.1)$$

Burada;

Test Basıncı (σ_t): 2,54 mm ve 5,08 mm batmayı yaratan basınç miktarı; Standart Basınç (σ_s): 2,54 mm batma için 70,31 kg/cm² ve 5,08 mm batma için 105,46 kg/cm² CBR değeri için 2,54 mm batmayı sağlayan basınç değeri esas alınır. Eğer 5,08 mm batmadaki CBR değeri daha büyükse test tekrarlanmalı ve aynı sonuç elde edilirse bu CBR değeri esas alınmalıdır.

Gerçekte CBR değeri, zeminin taşıma gücünden daha çok yük karşısında deformasyona karşı gösterdiği direnç miktarını yani zeminin taşıma gücünü değil taşıma oranı yüzdesini belirlemektedir. Zira CBR değeri 0 ile 3 arasında olan zeminler, çok zayıf zeminler olduğundan mutlaka ıslah edilmelidir. CBR değeri 3 ile 7 arasında olan zeminler az zayıf- orta zeminler olup ilave tedbirlerin alınıp alınmaması zeminin diğer özelliklerine bağlıdır. CBR değeri 10'dan büyük zeminler ise sağlam zeminler olarak kabul edilir. Karayolları şartnamesinde yol dolgularının en üstedeki 30- 50 cm'lik kısmında minimum CBR değerinin 10 olma şartı bu nedenle konulmuştur [25].

Karayolları şartnamesinde, CBR < 10 olan taban zeminleri zayıf zemin olarak kabul edilmektedir ve iyileştirilmesi gerekmektedir. Zemin stabilize edildikten sonra CBR ve

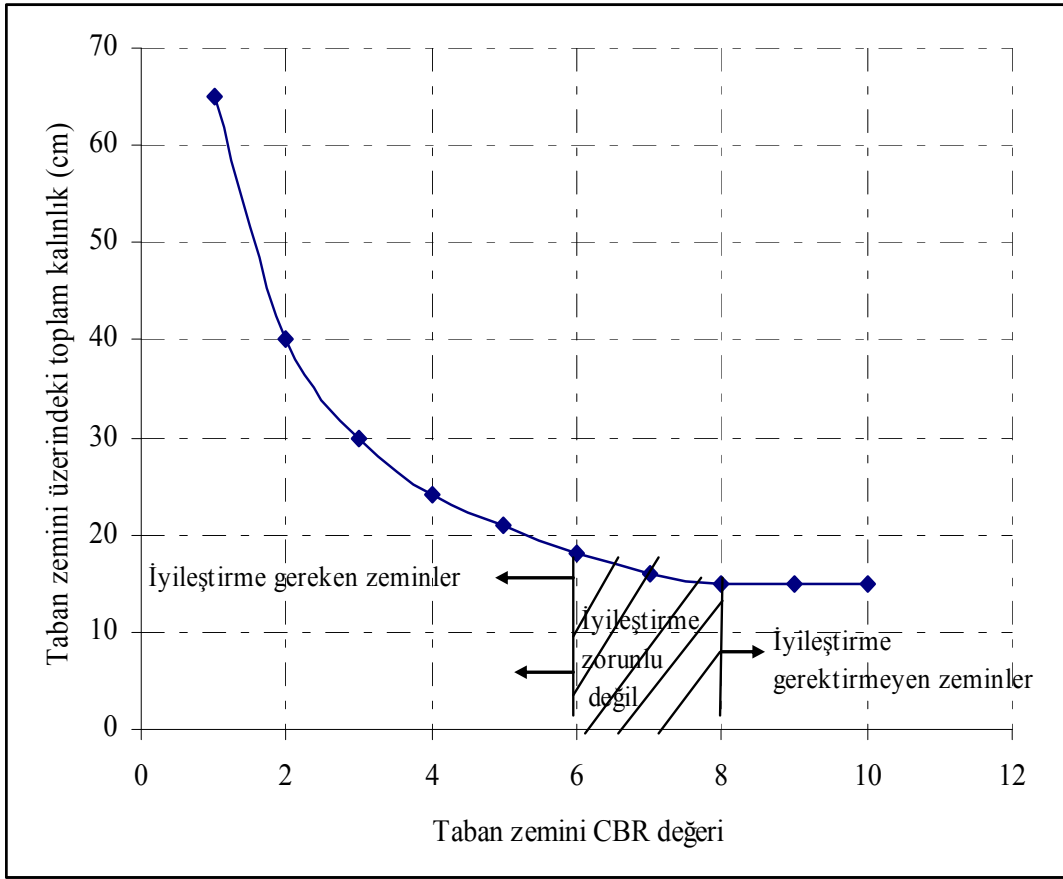
şişme yüzdesinin belirlenmesinde yol inşaatında kullanılacağı yere göre CBR ve CBR şişme değerlerinin aşağıda Tablo 1.1'de verilen sınır değerlerin altında olmamalıdır [25].

Tablo 1.1. CBR ve Şişme değerleri [25].

	CBR (%)	Şişme (%)
Alt temel	CBR >50	< 0,5
Üst yapı tabanı	CBR >20	< 1
Dolgular için CBR > 15	CBR > 15	<2
Zayıf zemin kriteri	CBR < 10	

Karayolu ve havaalanlarında temel veya alt temel olarak kullanılacak olan zeminin CBR değerinin belirlenmesinden sonra halen mevcut olan birçok yol kaplaması projelendirme yönteminden birine ait grafik kullanılarak CBR değeri ve üstyapıya gelecek olan yüklere bağlı olarak temel, alt temel ve hatta esnek kaplama kalınlığı belirlenebilmektedir. Bazı durumlarda ise CBR değerinden yararlanılarak zemine ait deformasyon modülü de belirlenebilmektedir.

Illinois'te taban zeminini güçlendirmek amacıyla en sık kullanılan yöntem zeminin kireçle modifiye edilmesidir. Zemini kazıma ve boşalan alanı granüller malzeme ile doldurma sıklıkla kullanılan diğer bir yöntemdir. Doğal zeminin CBR değerine göre gerekli granüller tabaka kalınlığı Şekil 1.5 kullanılarak belirlenebilmektedir [21].



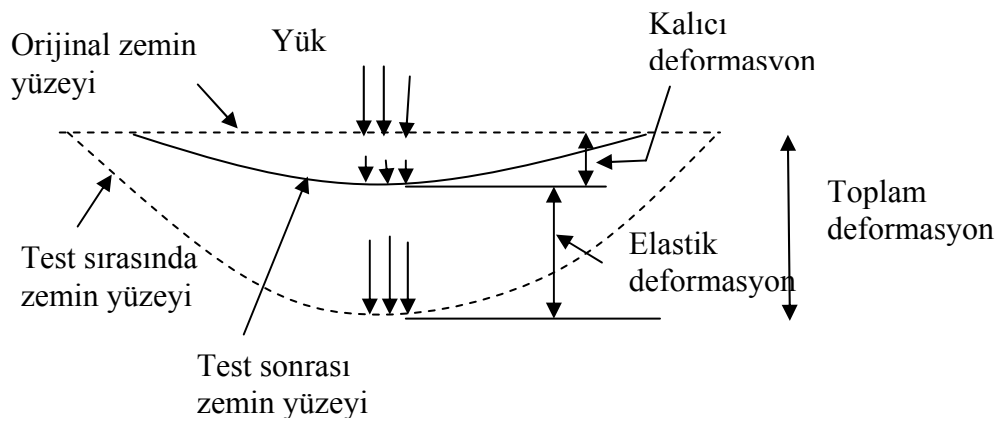
Şekil 1.5. CBR ve tabaka kalınlıkları arasındaki ilişki [22].

1.3.1.2. Plaka Yükleme Testi

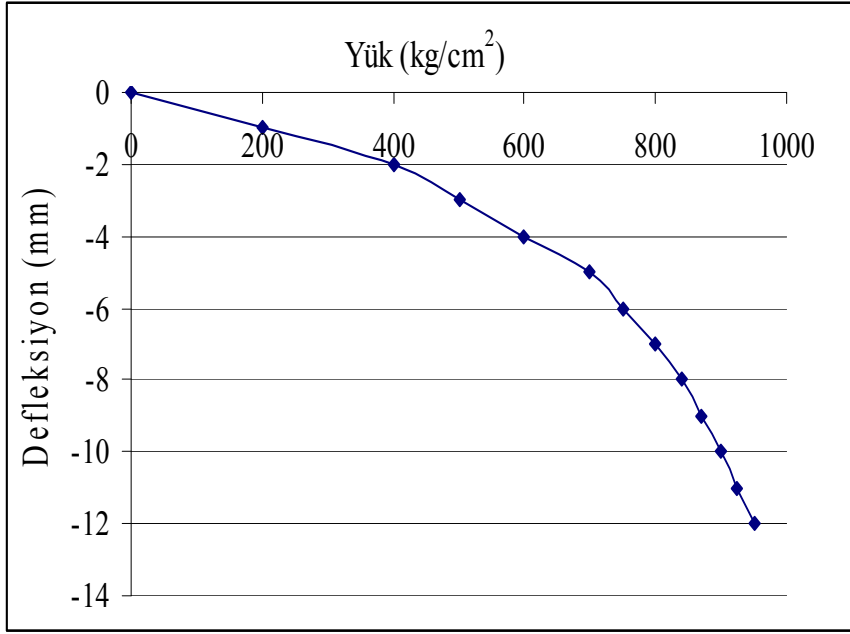
Bu deney, zeminin taşıma gücünü tespit eden bir başka yöntem olup, dairesel bir plaka vasıtasıyla zemine tatbik edilen basınçla çökme (oturmalar) miktarının ölçülmesi esasına dayanır. Zeminin taşıma gücünün ölçülmesinde kullanılan diğer deneylerde olduğu gibi, plaka yükleme deneyinde kg/cm^2 veya ton/m^2 gibi doğrudan bir mukavemet değeri ile tanımlanamaz. Taşıma gücünün belirlenmesinde kullanılan diğer deneylerden farkı arazide yapılan tek deney olmasıdır. Bu deney, zeminin olduğu gibi alt temel, temel ve hatta kaplamanın taşıma gücünün ölçülmesinde kullanılabilir. Bu deneyin sonuçları, zeminin yoğunluk ve rutubet miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, deney sırasında zemin sıkışmış ve optimum su içeriğinde olmalıdır [22].

Bu deney, karayolu kaplamaları için; 30,5 cm çaplı yükleme plakası, 5 mm defleksiyon, 10 tekerrür yükü şartlarında, havaalanı pist kaplamaları için; 76,2 cm çaplı yükleme

plakası, 13 mm defleksiyon, 10 tekerrür yükü şartlarında yapılmaktadır. Defleksiyon, zemine tatbik edilen yükten dolayı zeminin aşağıya doğru düşey hareketinin miktarıdır. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi defleksiyon, kalıcı ve elastik deformasyonların toplamıdır. Elastik deformasyon, zeminden yük kalktığı anda oluşan kalıcı deformasyon ile yükleme anında oluşan defleksiyon arasındaki farka eşittir. Kalıcı deformasyon ise yük kalktığı halde zeminde yaratılan düşey hareket miktarı yani çökmedir. Bu deney için yukarıda belirtilen çaptaki plaka, düzeltilmiş zemin üzerine yerleştirilir. Hidrolik reaksiyon yük cihazı plakanın ortasına yerleştirilir ve uygun bir kamyonun şasesi ile teması sağlanır. Ayakları defleksiyon sınırlarının çok dışında kalacak şekilde bir sehpa yükleme plakası üzerinde olacak şekilde yerleştirilir ve bu sehpa üzerine en az dört adet 0,001 inç hassasiyetinde ölçekli saat (dial- gauge) bağlanır. Bu ölçekli saatlerin biri yükleme plakasının kenarında diğerleri ise 0,5 D, 1 D ve 1,5 D yani plaka çapının 1,5 katı mesafedeki defleksiyonları ölçebilecek şekilde sehpa monte edilir. Yük 5mm defleksiyon yaratacak şekilde artırılır ve 0,03mm/dk hızla yük boşaltılır. Bu işlem 10 defa tekrarlanır ve yükleme/ boşaltma anlarında her dakikada bir ölçekli saatlerdeki defleksiyonlar okunup ortalaması alınır. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi, yük- defleksiyon eğrisi elde edilir. Bu test sonunda standart defleksiyon miktarına (5 veya 10mm) tekabül eden yük miktarı ne kadar fazla ise zeminin taşıma gücü de o kadar fazla demektir. Fakat zeminlerin plaka yükleme testine dayalı taşıma gücü değerleri yatak katsayısı (K) olarak anılan değerle belirlenir [26].



Şekil 1.6. Plaka yükleme deneyinde oluşan şekil değiştirmeler [1].



Şekil 1.7. Plaka yükleme testi, yük-defleksiyon eğrisi [21]

Killi zeminlerde oturmalar çok uzun sürede oluştuğundan, yük oturma grafiklerinde göçme durumu belirgin değildir. Bununla beraber aşırı konsolide olmuş yüksek plastiteli killerde taşıma gücü, temel cinsinden bağımsız olduğundan, yük oturma eğrisinin başlangıç ve bitiş noktaları doğrusal olup bu noktaların kesişme noktası kırılma noktasını verir. Bu kırılma noktasına karşılık gelen gerilme 2–3 gibi bir güvenlik sayısına bölünerek emin taşıma gücü belirlenir ya da yük-oturma eğrisinde belli bir oturma değerinde genellikle 10 mm'ye karşılık gelen gerilmenin yarısı taşıma gücü değeri olarak alınır [26].

1.3.1.2.1. Yatak Katsayısı (Taban Reaksiyon Modülü, K)

Yatak katsayısı (K) rijit üst yapı tasarımı için birincil girdi olarak kullanılır. K değeri arazi testleri ya da diğer testler ile korelasyon ile tespit edilir. K değerini tespit etmek için direk laboratuvar prosedürü yoktur. Plaka yükleme deneyinde, yükleme plağın oturacağı taban zeminin taşıma gücü K değerine göre değerlendirilir. "taban reaksiyon modülü", "K faktörü", "yatak katsayısı" gibi değişik şekillerde isimlendirilebilen bu K değeri bir yük altında birim alana gelen yükün, o noktada oluşan deformasyonuna (çökmeye) bölümü olarak ifade edilir [21]. Westergaard tarafından ortaya konan yatak katsayısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$K = \frac{\Delta q}{\Delta s} \quad (1.2)$$

Burada Δq gerilme- oturma eğersinde iki nokta arasındaki gerilme farkı, Δs gerilme- oturma eğersinde iki nokta arasındaki oturma farkıdır. Tablo 1.2’de değişik zemin cinsleri için K değerleri verilmiştir.

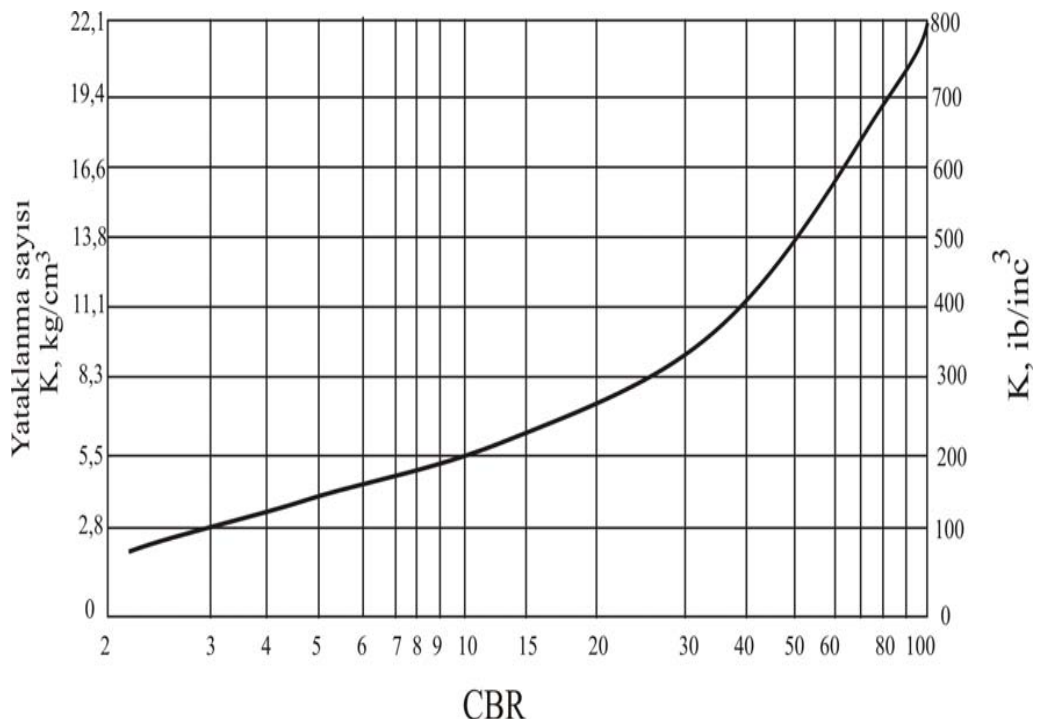
Tablo 1.2. Zemin cinslerine göre yaklaşık K değerleri (PCA) [1]

Zemin Cinsi	Sembol	K değeri (kg/cm ³)
Çakıllı zeminler	GW	13,5- 19,5 veya daha fazla
	GC	11,0- 19,5 veya daha fazla
	GP	8,0- 14,0
	GM	7,0- 14,0
Kumlu zeminler	SW	7,0- 16,0
	SC	7,0- 16,0
	SP	5,5- 9,0
	SM	5,0- 9,0
Az veya çok sıkışabilir ince daneli zeminler	ML	4,0- 8,5
	CL	3,5- 6,0
	OL	3,0- 5,0
Çok sıkışabilir ince daneli zeminler	MH	1,4- 4,8
	CH	1,4- 4,2
	OH	1,4- 3,5

Gerek CBR gerekse K değeri, esnek ve rijit kaplamalı yollarda zeminin taşıma gücünün belirlenmesinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Karayolları şartnamesinde, CBR değeri 10’den daha düşük ve K değeri 5,5 kg/cm³ den daha az olan zeminler, taşıma gücü açısından yeterli kabul edilmemektedir. Bu nedenle, böyle taban zeminleri uygun stabilizasyon tekniği ile iyileştirilmelidir. Zeminler taşıma gücü açısından yeterli olmadıklarından ıslah edilmeleri gerekir [25].

Plaka yükleme deneyinin yapılmadığı hallerde tabanın CBR değeri bulunur ve Şekil 1.8'deki eğriden yaklaşık yatak katsayısı (K) değeri bulunur.. AAHSTO 1993'te plaka yükleme deneyinden elde edilen K- değeri ve esneklik modülü arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır [22].

$$M_R = \frac{K}{19,4} \quad (1.3)$$



Şekil 1.8. CBR-K ilişkisi [21].

1.3.1.3. Esneklik Modülü ve Esneklik Modülü Testi

Bu deney, son yıllarda yol kaplamalarının kalınlık hesaplamalarında (kaplama tasarımı) kullanılmaya başlamıştır. Zeminin doğrudan mukavemeti yerine üç eksenli test ile tekerrürlü yük altında elastik malzemelerin klasik elastisite modülünün tespitinde olduğu gibi, esneklik modülü (M_R) tayin edilmektedir.

Esneklik modülü testi, AASHTO T 294- 94 ve SHRP- P 46'ya göre hem granüller hem de kohezyonlu zeminler için sabit yanal basınçta üç- eksenli test şartlarında tekerrürlü yük altındaki gerilme-deformasyon davranışının zamanla değişimini belirlemektedir.

Test cihazı, 25 ile 150 m saniye tekerrürlü yük süresi (Δt) sağlayabilmeli ve dakikada 15 ila 30 defa yük tatbik edebilecek kapasitede olmalıdır. P46 yöntemine göre yükleme süresi 100 m san ve yükleme aralıkları 1 san (veya 60 tekerrür/dak) iken T 294 yönteminde ise yükleme süresi 1 ile 100 m san arasında ve yükleme aralıkları da 1 ila 3 saniye (yani 60 ila 20 tekerrür/dak) arasında yapılmaktadır. Numunenin deformasyonu tüm uzunluğunda veya bazı durumlarda da numunenin bir kısmında hassas cihazlar (LVDT) ile ölçmektedir. Toplam, esnek (kalıcı olmayan) ve plastik (kalıcı) deformasyonlar test süresince ölçülüp kaydedilir. Şekil 1.9'da tekerrürlü yüke maruz kalan zeminin deformasyon- gerilme davranışı görülmektedir [28].

Üç- eksenli ve tekerrürlü yük şartlarında test edilen malzemenin esneklik modülü, formül 1.4 ile bulunur.

$$M_R = \frac{\sigma_D}{\epsilon_R} \quad (1.4)$$

Burada;

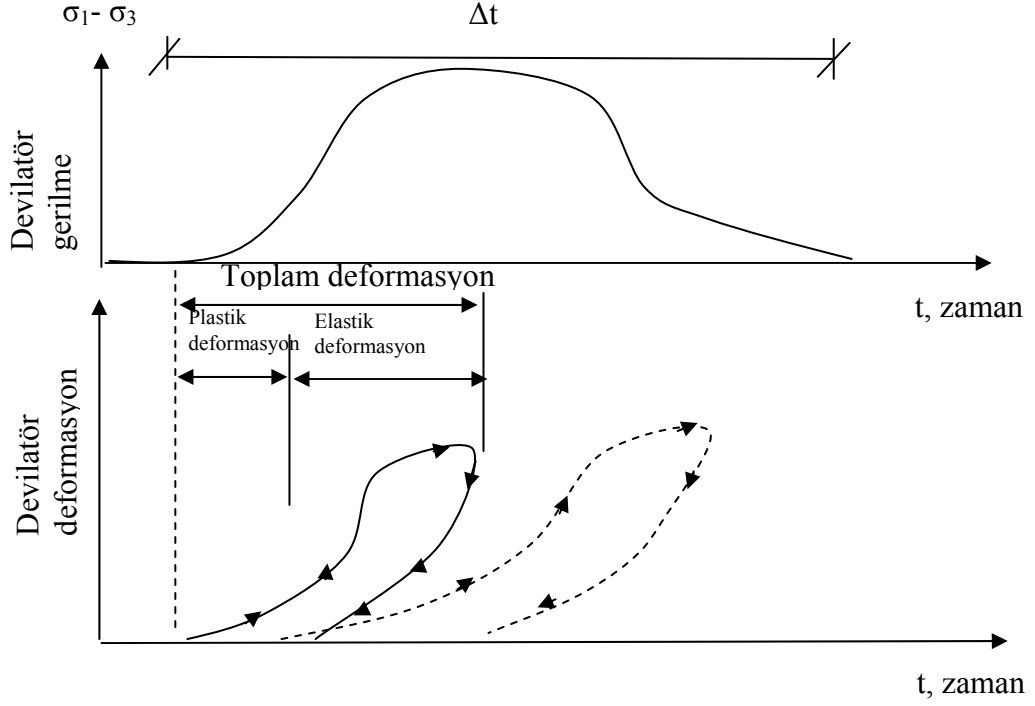
M_R : Esneklik modülü

σ_D : Devilatör gerilme = $\sigma_1 - \sigma_3$ = Toplam eksenel gerilme – Toplam yanal gerilme

ϵ_R : Eksenel deformasyon

Bu test de yük süresi, devilatör gerilmenin tatbik süresini (Δt) ve yük aralığı ise devilatör gerilmenin tatbik aralıklarını (dakikadaki yük tatbik sayısını) ifade ettiğinden dolayı gerilmenin büyüklüğünün yanı sıra gerilmenin her bir tekerrürdeki tatbik süresi ile gerilmenin tekerrür aralığı da testin sonucu açısından önem taşımaktadır.

Bu deneyin en büyük özelliği, zeminin tekerrürlü yük şartlarındaki taşıma gücünü tespit etmesidir. Gerçekten de trafik yükleri kaplama vasıtasıyla zemine tekerrürlü yük olarak intikal etmekte ve zeminde yarattığı deformasyonların büyük bir kısmı kalıcı olmayan yani elastik deformasyonlar olmaktadır. Bu nedenle gerek zeminin gerekse kaplama malzemelerinin elastik rijitliliği için esneklik modülünü kullanmak doğrultusundaki yaklaşımların esas alınması daha gerçekçi olacaktır [1].



Şekil 1.9. Tekerrürlü yük testi [1].

Bu testin sonuçları numunenin sıkıştırma enerjisi ve tipi, sıkıştırma esnasındaki su içeriği, numunenin su içeriği ve yoğunluğu, yanal basınç, eksenel basınç, yükleme süresi ve aralığı vb. şartlardan çok etkilendiği için standart test metotlarını uygulamak zorunludur. Zira granüller ve ince daneli zeminlerin esneklik özelliği, gerilmeye ve gerilmenin tatbik süresine bağlıdır. Çünkü esneklik modülü, rijit modülündeki gibi sabit bir değer olmayıp tekerrürlü gerilme şartlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [1].

Esneklik modülü granüller malzemelerde, zemin yapısı, su içeriği ve gerilme koşullarına bağlı olduğundan, her üst yapı tabakasında farklılık göstermektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü Üst Yapı Şubesi Müdürlüğü'nde Türkiye'nin bölgelerinde her cins malzemeyi temsil edecek şekilde alınan temel, alt temel ve taban zemini numunelerine esneklik modülü deneyi yapılmış olup, elde edilen deney sonuçları statiksel yöntemlerle analiz edilerek granüller malzemelerin esneklik modülü için aşağıda verilen genel formül elde edilmiştir [25].

$$M_R = 1750.(D_{BSK} + k).CBR^{0,64} \left(\frac{1}{1 + \log(N_0/200)} \right)^{0,35(LL.PI+1)^{0,06}} \left(\frac{\gamma_{maks}^2}{N_0/4} \right)^{0,09 \log(w_{opt})} \quad (1.5)$$

Burada;

M_R : Esneklik modülü, psi

D_{bsk} : Bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı, cm

CBR: Kaliforniya Taşıma Oranı, %

W_{opt} : Optimum rutubet, %

γ_{maxs} : Maksimum kuru birim hacim ağırlı

LL: Likit limit, %

PI: Plastisite indisi, %

No 200: 200 Nolu ekleten geçen malzeme yüzdesi

No 4: 4 Nolu ekleten geçen malzeme yüzdesi

k: Derinlik düzeltme faktörü, cm

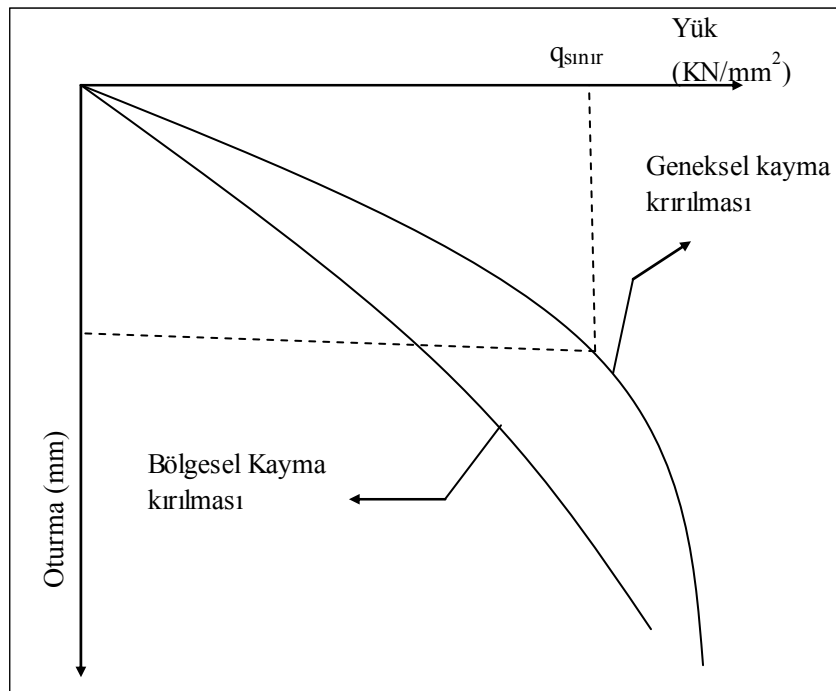
Tablo 1.3. Seçilmiş taban mukavemet / sertlik korelasyon eşitlikleri [22].

Eşitlik	Referans	limit
$M_R = (1500)(CBR)$	Heukelom & Klomp (1962)	Bu eşitlik 10 ya da daha az yaş CBR değerli ince taneli malzemelerle sınırlıdır.
$M_R = 1,000 + (555)(R)$	1993 AASHTO Guide	20' ye eşit ya da daha az R- değerli ince taneli topraklar
$R = [1500(CBR) - 1155]/555$	HDOT	
$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}$	AASHTO 2002 Design Guide	Tüm durumlar için
$M_R = K/19,4$	1993 AASHTO Guide	

1.3.2. Yol Taban Zemini Taşıma Kapasitesi ve Tabaka Kalınlıklarının Hesabı

Yüzeysel temelerde nihai taşıma gücü, zeminde göçme olmadan (mukavemet aşılmadan) zemine aktarılacak en fazla gerilme miktarı olarak tanımlanmaktadır. Emin taşıma gücü ise, nihai taşıma gücünün uygun bir güvenlik sayısına bölünmesi ile elde

edilmektedir. Temelerde taşıma gücünün belirlenmesine yönelik birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında laboratuvar ve arazi deney sonuçlarına bağlı olarak sonuç verenler bulunmaktadır. Laboratuvar deneyleri yardımıyla emin taşıma gücü değeri, zemin cinsine göre kesme kutusu, serbest basınç, CBR ve konsolidasyon deneyleri ile elde edilebilmektedir. Arazi deneylerinde ise yöntem, taşıma gücünün doğrudan elde edilebilmesi esasına dayanmaktadır. Taşıma gücü değerlerinin bulunabildiği arazi deneyleri arasında koni penetrasyon, standart penetrasyon, presiyometre ve plaka yükleme deneyleri yer almaktadır [27].



Şekil 1.10 Tipik plaka yükleme-oturma grafiği

Plaka yükleme deneyi sonucunda çizilen yük- oturma eğrisinden, önce plakanın emin taşıma gücünü belirlemek için iki yöntem vardır: Ya oturma-yük eğrisinde, kırılma noktasına karşılık gelen plaka sınır taşıma gücü, 2-3 gibi bir güvenlik sayısına bölünerek, plaka emin taşıma gücü bulunur. Sıkı zeminlerde genel kayma kırılması oluşup, oturma-yük eğrisinde kırılma noktası belirgindir (Şekil 1.10). Buna karşılık bölgesel kayma kırılmasının olduğu gevşek ya da yumuşak zeminlerde, oturma yük-eğrisinin kırılma noktası belirgin değildir. Böyle durumda; oturma yük eğrisi her ikisinde logaritmik

hazırladığı eksen takımında çizilir. Yük oturma eğrisinde 10 mm oturmaya karşılık gelen gerilmenin yarısı zemin taşıma gücü değeri olarak alınır [28].

US Forest Server ve Terzahi Taşıma teorinse göre güçlendirilmemiş taban zemini durumunda taşıma kapasitesi, CBR ve Standart penetrasyon direncine bağlı olarak aşağıdaki ampirik formül yardımıyla hesap edilir [29,30].

$$q_u = N_c * C_u \quad (1.6)$$

Burada;

q_u : Güçlendirilmemiş durumdaki taşıma kapasitesi

N_c : Taşıma kapasitesi faktörü

$N_c = 3,0$ (Terzaghi)

$N_c = 2,8$ (ağır trafik- düşük tekerlek için)

$N_c = 3,3$ (düşük trafik- tekerlek izi)

C_u : Drenajsız kayma mukavemeti

$$C_u = \frac{q_c}{10} \quad (1.6.a)$$

$$C_u = 30 * CBR \quad (1.6.b)$$

1 ve 2 Nolu formülde q_c ; Koni penetrasyon direnci deneyi ile bulunan koni direnci, CBR; arazide ölçülen CBR değerini belirtmektedir.

Ya da;

C_u değeri, CBR ve standart penetrasyon direncine bağlı olarak korelasyon chart'dan alınır.

Zeminde oluşabilecek bölgesel kayma göçmesi geosentetik (geotekstil, geogrid) donatı kullanarak engellene bildiğinde zemin taşıma kapasitesi artmaktadır ve aşağıdaki ampirik formülle hesaplanmaktadır.

Tablo 1.4. Kohezyonlu topraklar için taban toprak dayanım parametreleri korelasyonu [30]

California Taşıma Oranı, CBR (%)	Drenajsız kesme dayanımı, Cu (KPa)	Standart penetrasyon direnci, SPT	Toprak cinsi
<0,4	< 11.7	< 2	Çok yumuşak
0,4-0,8	11.7 – 24.1	2-4	Yumuşak
0,8-1,6	24.1 – 47.6	4-8	Orta
1,6-3,2	47.6 – 95.8	8-15	Sıkı
3,2-6,4	95.8 - 191	15-30	Çok sıkı
>6,4	> 191	>30	Sert

$$q_r = 6.2 * C_u \quad (1.7)$$

Burada;

q_r : Geotekstil ya da geogrid ile güçlendirilmiş durumda taban zemini taşıma kapasitesi

1.6 ve 1,7 nolu formüllerdeki, 3,14 ve 6,2 katsayıları taşıma kapasitesi faktörü (N_c) olup, değişik araştırmacılar tarafından verilen muhtelif formüllerde güçlendirilmemiş durumda 2,8–3,3, geosentetik (geogrid, geotekstil) güçlendirilmiş durumdaki nihai taşıma gücü sabit çarpanı 5–6,2 arasında değişmektedir.

Minimum tabaka kalınlığını kararlaştırmak için Boosnesq teorisi ile tabaka kalınlıkları belirlenir. Bir "z" derinliğindeki düşey gerilmeyi kararlaştırmak için Boosnesq eşitliği ile aşağıdaki gibi hesap edilir [29,30].

$$\sigma_z = P * \left[1 - \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{R}{z} \right)^2} \right) \right]^{2/3} \quad 1.8$$

Burada;

P = Tekerlek yükü

Tek aks, çift tekerlek

Z = Kaplama derinliği

$\sigma_z = q_u = z$ derinliđindeki dűşey gerilme

R = Yűklenmiř alanın yarıçapı

$$R = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad 1.9$$

Dođal halde (gűlendirilmemiř durumda) taban zemini gerekli tabaka kalınlıđı;

$$z = \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{1}{1 - \left(\frac{q_u}{p} \right)^{2/3}} - 1 \right)}} \quad 1.10$$

Hűresel dolgu sistemi ile gűlendirilmiř durumda taban zemini tařıma kapasitesi ve tabaka kalınlıđı hesaplanması;

Hűresel dolgu bűlűműn űzerindeki dűşey gerilme;

$$\sigma_{zt} = P * \left[1 - \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{R}{zt} \right)^2} \right) \right]^{2/3} \quad 1.11$$

Hűresel dolgu bűlűműn altındaki dűşey gerilme;

$$\sigma_{zb} = P * \left[1 - \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{R}{zb} \right)^2} \right) \right]^{2/3} \quad 1.12$$

Hücresel dolgu bölümünün altındaki ve üstündeki yatay gerilme hesabı;

$$\sigma_h = K_a * \sigma_v \quad 1.13$$

Burada; K_a aktif toprak basınç katsayısı olup aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$K_a = \tan^2(45 - \Phi/2) \quad 1.14$$

Φ = Hücresel dolgu malzemesinin sürtünme açısı

Hücresel döşek üstündeki yatay gerilme , σ_{ht} ;

$$\sigma_{ht} = K_a * \sigma_{vt}$$

Hücresel döşek altındaki yatay gerilme , σ_{hb} ;

$$\sigma_{hb} = K_a * \sigma_{vb} \quad 1.15$$

Hücresel dolgu duvarlarındaki ortalama gerilme, σ_{avge} ;

$$\sigma_{avge} = \frac{\sigma_{ht} + \sigma_{hb}}{2} \quad 1.16$$

Hücre duvarları ve dolgu arasındaki kesme gerilmesi, T;

$$T = \sigma_{avge} * \tan(\delta) \quad 1.17$$

Burada,

δ = Hücresel dolgu sisteminin hücre duvarları ile granüler dolgu arasındaki kesme direnci açısı

$\delta = r \Phi$ (test verilerinden elde edilebilir veya Tablo 1.5'den hesaplanır)

Hücresel bölüm içerisindeki gerilme azalması σ_R ;

$$\sigma_R = 2 * \left(\frac{H}{D} \right) * T \quad 1.18$$

D = hücresel dolgu sisteminin çapı

H = hücresel dolgu sisteminin yüksekliği

Hücresel dolgu tasarımı için elde edilebilen tasarım gerilmesi ya da hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmiş durumda taban zeminin yük taşıma kapasitesi;

$$q_G = q_u + \sigma_R \quad 1.19$$

Hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmiş taban zeminin gerekli tabaka kalınlığı;

$$z = \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_G}{p} \right)^{2/3}} - 1 \right)}} \quad 1.20$$

Tablo 1.5. Tavsiye edilen hücre duvarı/dolgu pik sürtünme açısı oranı [30].

Hücresel dolgu sistemi içinde kullanılan dolgu malzemesi	Hücre duvar tipi	$r = \delta/\emptyset$
Kaba kum/ çakıl	Smooth	0,71
	Textured	0,88
	Textured - Perforated	0,90
Kum	Smooth	0,78
	Textured	0,90
	Textured - Perforated	0,90
Kil	Smooth	
	Textured	
	Textured - Perforated	

1.4. Stabilizasyon Kavramı

Zeminlerin, dirençlerini arttırmak veya belirli koşullarda sahip oldukları direnci her türlü hava koşullarında korumak ve aynı zamanda değişken yük ve iklim koşullarının zararlı etkileri altında uzun zaman dayanacak hale getirilmelerini sağlamak amacıyla, katkı maddeleriyle karıştırılarak kararlı hale getirilmeleri işlemine stabilizasyon denir. Benzer şekilde Karayolları Teknik Sözlüğüne göre; zeminin mühendislikle ilgili özelliklerini ıslah etmek için, stabilizesini arttırmak veya muhafaza etmek amacıyla kimyasal ve mekanik işlemlere tabi tutulması olarak tanımlanmaktadır [31]. Yol altyapısını stabil bir duruma getirmek için birçok stabilizasyon metotları mevcuttur. Ülkemizde genellikle mekanik stabilizasyon metodu uygulanmaktadır. Kireç ve çimentonun çok miktarda bulunması nedeniyle zemin-kireç, zemin-çimento, zemin-bitüm stabilizasyonu da karayollarımızda kullanılmaktadır [32].

1.4.1. Stabilizasyon Yöntemleri

Zeminlerin stabilizasyonunda mekanik ve kimyasal (katkı maddeleri ile stabilizasyon) olmak üzere iki yöntem vardır. Zemine herhangi bir katkı maddesi (çimento, kireç, bitüm, reçine vb.) karıştırmadan ve zemin kitlesinde herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşturmadan sıkıştırmak (kompaksiyon), başka zeminlerle karıştırarak uygun bir dane dağılımı elde edilerek zemin özelliklerinin amaca uygun hale getirilmesi işlemi mekanik stabilizasyon olarak adlandırılmaktadır. Zemin içerisine bir katkı maddesi (çimento, kireç, bitüm, reçine vb.) karıştırılarak zemin kitlesi içerisinde kimyasal reaksiyon oluşturarak zeminin amaca uygun hale getirilmesi kimyasal stabilizasyon olarak adlandırılmaktadır.

Çeşitli stabilizasyon metotları mevcuttur. Zeminler sınıflarına ve diğer özelliklerine göre kireç, çimento ve bitümlü vb. bağlayıcılar ile stabilize edilirler. Stabilizasyon tipi seçilirken zeminin granülometrisi ve PI değeri göz önünde tutulur. Zeminin olumsuz özellikleri belirlendikten sonra uygun stabilizasyon metoduna karar verilir. Zemin stabilizasyonları ile zeminin olumsuz özellikleri iyileştirilmekte ve dolayısıyla kaplama kalınlıklarında önemli azalmalar meydana gelmektedir [1].

Tablo 1.6. Stabilizasyon metotları [1].

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

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

CBR değeri % 10 dan küçük olan malzemeler yol gövdesi inşasında kullanılmamalıdır. Yol gövdesi oluşturulurken CBR değeri yüksek seçme malzemeler seçilmelidir. Eğer CBR değeri yüksek seçme malzeme bulmak mümkün değilse, taban zeminleri mekanik veya kimyasal stabilizasyon yöntemlerinden biri ile iyileştirilmelidir [25].

Tablolardan da görüldüğü gibi taşıma gücü düşük taban zeminlerinin iyileştirilmesinde (stabilizasyonunda) birçok yöntem geliştirmiştir. Bu tez çalışmasının konusu su muhtevası yüksek killi zeminlerde kireç stabilizasyonu ile yol taban zeminlerinin iyileştirilmesi ve geocell ile yol taban zeminlerinin güçlendirilmesinin karşılaştırılması üzerine bir araştırma gerçekleştirilmesi nedeniyle bu alt bölümde daha çok katkı maddeleri ile stabilizasyon, özellikle kireç stabilizasyonu üzerinde durulmuştur.

Tablo 1.7. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları [1].

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

Genel olarak, kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, kabarma potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve çevre koşulları etkisi altında zeminin özelliklerinin bozulmasının daha sınırlı kalmasını yani dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca plastisitenin azalmasına yol açtığı için arazi çalışma koşullarının iyileşmesi sonucunu doğurmaktadır. Kireçle stabilizasyon daha

yaygın olarak killi zeminlerden yapılan dolgularda özellikle yol inşaatlarında kullanılmaktadır [32].

1.5. Zayıf Yol Taban Zeminlerinin Katkı Maddeleri ile Stabilizasyonu

Mekanik stabilizasyonun yeterli olmadığı ya da uygulanamadığı durumlarda kimyasal stabilizasyon (katkı maddeleri ile stabilizasyon) bir alternatif olarak kullanılabilir. Kimyasal stabilizasyonda zemine çeşitli katkı maddeleri karıştırılarak özelliklerinin amaca uygun hale getirilmesine çalışılır. Kimyasal stabilizasyon kireç, çimento, uçucu kül ve bunların kombinasyon biçimleriyle toprak stabilizasyonunda; toprağın permeabilitesini azaltmak, kayma direncini arttırmak, taşıma kapasitesini arttırmak, oturmayı azaltmak ve inşaatı kolaylaştırmak için geniş ölçüde kullanılır [31].

Zeminin olumsuz etkilerini gidererek kaplamada oluşabilecek bozulmaları önlemek veya zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirerek kaplama kalınlığını azaltmak amacıyla zemine çimento, kireç, uçucu kül, tabii puzolan, vb. maddeler katarak yapılan zemin ıslahına kimyasal stabilizasyon denir. Her iki amaçta da zeminde stabiliteyi yani deformasyonlara karşı direnci arttırmaktır [31].

Zemin iyileştirme çalışmalarında temel amaçlar zeminin plastisitesini azaltmak, geçirgenliğini düşürmek, şişme ve kabarmalarını azaltmak, oturmalarını azaltmak, sıkışabilirliğini azaltmak ve mukavemetini arttırmaktır. Böylece zemin daneleri arasındaki bağlar kuvvetlendirilerek taşıma gücü artmaktadır. Genel olarak, kireç katkısının zeminin likit limit değerine bağlı olarak plastisite indisinde düşüş oluşturarak zemin plastik halden katı geçtiği ve dolayısıyla mukavemetinin arttığı, çimento katkısının iri daneler arasındaki boşlukların dolmasını sağlayarak zeminin mukavemetinin artmasına katkı yaptığı, uçucu kül katkısının ise plastisite indeksini düşürücü etki yaparak, zeminin özelliklerine bağlı olarak yine mukavemet artışını kolaylaştırdığı bilinmektedir [31,33].

1.5.1. Zemin-Kireç Stabilizasyonu

Killi bir zemine kireç katılması sonucu çeşitli kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Killi zeminlere kireç ilavesi ile kireçteki tek değerli Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları ile kilin içindeki Na^{+} veya K^{+} ile yer değiştirir. Bu olaya katyon değişimi denir. Bu

reaksiyonlardan bazıları ilk saatlerde başlamaktadır. Özellikle puzolanik reaksiyonlar zaman içinde oluşmaktadır. Uygun su muhtevasında ve sıcaklıkta yıllarca devam edebilmektedir. Katyon değişimi reaksiyonu sonucunda, çökeltme-yığışma ile kil parçacıkları birbirlerine yönelerek, kil mineralleri ile kireç arasında oluşan adezyon (yapışma) sayesinde kilin mikro yapısı değişerek ve daha büyük parçacıklar oluşturarak killi zeminlerin yapısında bir değişiklik meydana gelir. Böylece, zemin kil özelliğini kaybederek silt gibi davranmaya başlar ve sertleşerek plastik kıvamdan katı kıvama geçer. Bu durum, kireç ilavesi ile kalsiyum iyonu almış olan kilin çevresi kireç ile sarıldığı için suyu emme ve şişme özelliğini kaybettiği şeklinde açıklanmaktadır. Bu sayede zemine katılan kireç, zeminin mukavemetini ve elastisite modülünü arttırarak dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır [33]. Genel olarak, kireç toprağın kuru birim hacim ağırlığında bir azalmaya, plastik özelliklerinde bir değişmeye ve toprağın taşıma kapasitesinde bir yükselmeye sebebiyet verir. Kireç stabilizasyonu, plastisite indeksini düşürmekle toprakta boşluklu bir bünye (daneli bir yapı) meydana getirerek ufalanabilme kabiliyeti az olan toprakların inşaat sırasında kolayca işlenebilmesine yol açmaktadır. Bu nedenlerle, kireçle stabilizasyonu daha yaygın olarak killi zeminlerden yapılan dolgularda özellikle yol inşaatlarında kullanılmaktadır [31,33].

Kireç; orta, ince ve çok ince daneli zeminlerle reaksiyona girerek plastisitenin düşmesine, işlenebilirliğin artmasına, şişmenin azalmasına ve mukavemetin artmasına, ortamın pH'nın düşmesine neden olmaktadır. Zemin sınıfı; CH, CL, MH, ML, ML-CL, SC, SM-SC, SM, GC, GM-GC, DM olan ve silt, kil içeren ince gradasyonlu zeminler kireçle stabilize edilerek ıslah edilmeleri mümkündür [22].

Kireç stabilizasyonu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde amaç, PI değerini ve şişme potansiyelini azaltmak, mukavemeti ve durabiliteyi arttırmaktır. Kireç stabilizasyonu için hidrata kireç (sönmüş kireç, Ca(OH)_2 yani kalsiyum hidroksit) kullanılmaktadır. Sönmemiş kireç (CaO) ise yakıcı ve tehlikeli olması nedeniyle çoğunlukla kullanılmamaktadır. Karayolları şartnamesine göre stabilizasyonda kullanılacak kirecin özellikleri Tablo 1.8'de verilmiştir. Yine karayolları şartnamesine göre kireç ile stabilize edilmiş taban zeminin; CBR değeri > 10 , serbest basınç mukavemeti (q_u) $> 5 \text{ kg/cm}^2$, plastisite indisi < 10 olmalıdır [25].

Kireç suya karıştırıldıktan sonra elde edilen solüsyonun pH değeri yaklaşık 12,4 civarındadır. Ayrıca, kireç reaksiyon sonucunda zeminin PL ve LL değerleri önemli ölçüde azalır. Dolayısıyla kireç miktarı, pH ve plastisite göstergeleri ile saptanabilir. Bunun için

değişik kireç içeriğine sahip zemin karışımları hazırlanıp her bir karışımın pH değeri 1 saat sonra ölçülür. Minimum kireç içeriği saptanmış olur. Ayrıca Tablo 1.9'da önerilen miktarlar bir rehber olarak kullanılabilir. Daha sonra başlangıç kireç içeriği civarında en az üç ideal olarak beş ayrı kireç içeriğinde numuneler hazırlanmalıdır. Hazırlanacak numuneler optimum su içeriğinde şartnamelerde belirtilen sıkıştırma kriterlerine uygun olarak serbest basınç mukavemeti deneyleri uygulanır. Kriteri sağlayan minimum kireç içeriği zeminin stabilizasyonunda kullanılır [25].

Tablo 1.8. Stabilizasyonda kullanılacak kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri [26] .

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

Tablo 1.9. Zemin cinsine göre yaklaşık kireç miktarı (Corps. of Eng.) [1].

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



Şekil 1.11. Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi [1].

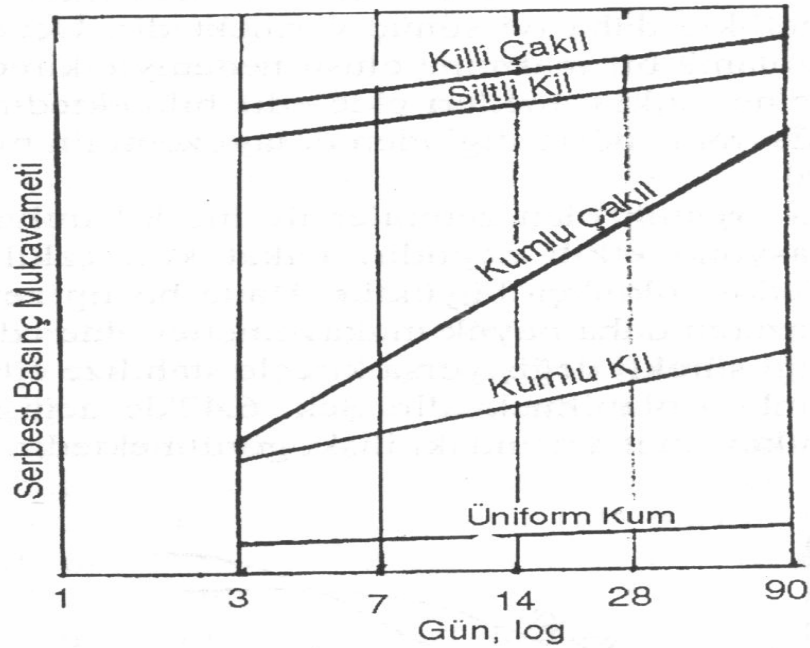
Genel olarak, fazla organik olan zeminler ile hiç kil ihtiva etmeyen zeminler için kireç stabilizasyonu etkili değildir. Fakat killi çakıllı zeminlerde kireç stabilizasyonunun etkisi oldukça büyüktür. Hatta bu tip zeminler için çimento stabilizasyonuna nazaran daha büyük mukavemetler elde edilebilmektedir. Ayrıca killi zeminlerde su içeriği sürekli değişiyorsa kireçle stabilize edilerek hacimsel değişimi stabil hale getirmek mümkündür. Şekil 1.11’de değişik tip zeminler için kireç miktarı ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki görülmektedir [1].

Kireç stabilizasyonu killi zeminlerde daha etkin olmakla beraber kumlu killerde etkisi oldukça azdır. Ayrıca kireç içeriği %8’den fazla ise mukavemet artışına etkisi son derece az iken % 8’e kadar kireç içeriğindeki artışlarda zemin mukavemetinin artışı daha fazla olmaktadır. Özellikle zemindeki kil miktarı arttıkça % 10’dan daha fazla kireç içeriklerinde mukavemet artışı yok denecek kadar azalmaktadır. Şekil 1.12’de görüldüğü gibi, aynı kireç içeriğine sahip farklı zeminlerde zamana bağlı mukavemet artışı farklıdır. Yani kireç stabilizasyonunun başarılı olması için zemin belli miktarda kil ihtiva etmesi gereklidir. Ancak zemin ne kadar çok organik madde ihtiva ediyorsa mukavemeti de o kadar az olacağı unutulmamalıdır. Zaten organik zeminlerin kimyasal stabilizasyon ile ıslah edilmeleri hemen mümkün değildir [1].

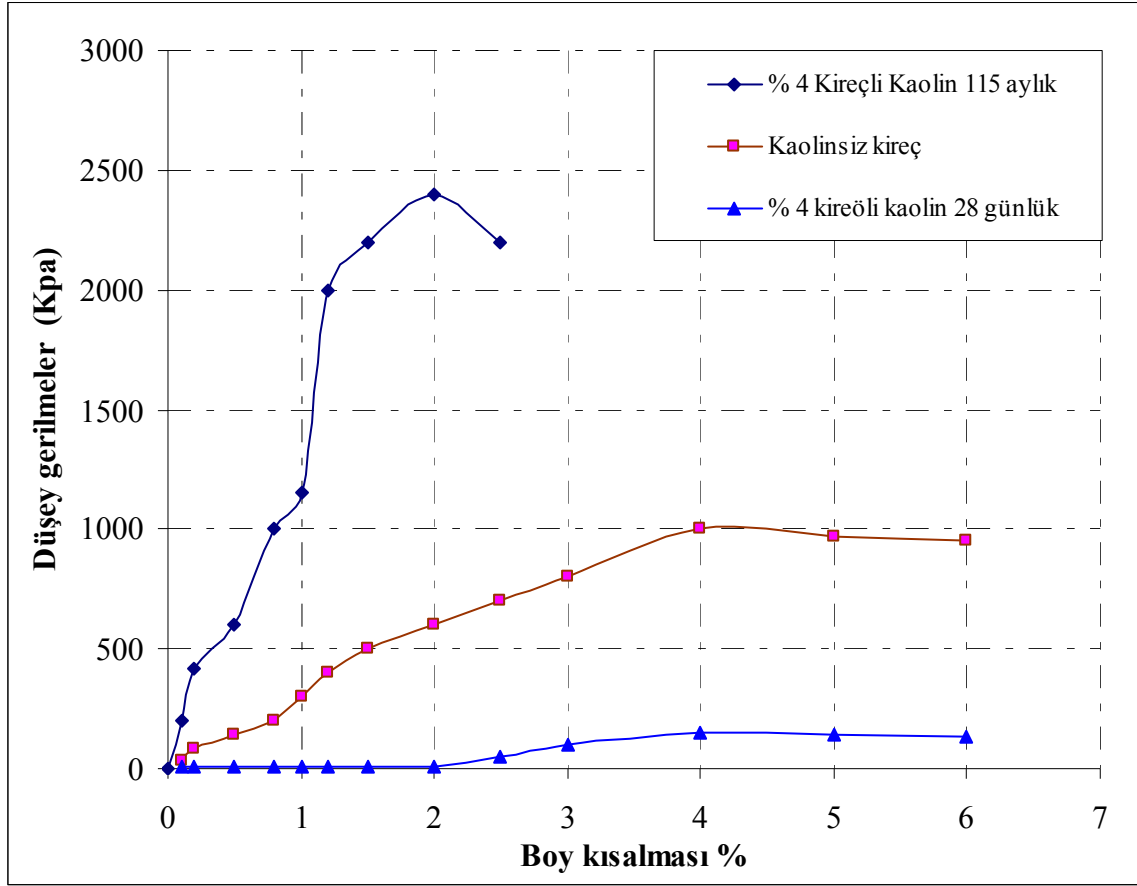
Kireç stabilizasyonu ile elde edilen faydalar ve ekonomik kazançlar, genel olarak çimento stabilizasyonuna nazaran elde edilen faydalar daha fazladır. Bu nedenle, ulaşım yapılarında kireç stabilizasyonu daha yaygın ve etkin olarak [1].

Kireç stabilizasyonu sonucu zeminde kısa dönemde; optimum su muhtevası artmakta, proktor yoğunlukları düşmekte, plastik limit artmakta, likit limit düşmekte, proktor eğrisi düzleşmekte, CBR değerlerinde artışlar olmaktadır. Uzun dönemde ise; CBR değerleri daha da artmakta, serbest basınç mukavemeti artmakta, çekme gerilmeleri artmakta, şişme ve büzölmeye karşı stabilite artmakta, don etkisine karşı direnç artmaktadır [3].

Kireç stabilizasyonu temel, alt temel ve daha alt tabakalar için kullanılabilir. Kireç stabilizasyonun yol inşaatları için birçok avantajı vardır. Zemin içerisinde, mukavemeti ve geoteknik özellikleri düşük olan kil kısımları kireç ile reaksiyona girerek killi zeminin yapısını mikro ölçülerde daha daneli bir hale getirmektedir. Ayrıca şişme potansiyelini azaltmakta ve mukavemeti de çok fazla artırarak üst tabaka kalınlıklarını azaltarak ekonomi sağlamaktadır. Kireç stabilizasyonu, zeminin mukavemetinde yüksek artış sağlamanın yanında davranışını da değiştirmektedir. Şekil 1.13'te kireçsiz, kireçli ve uzun dönem serbest basınç deneyi sonuçları gösterilmektedir. Elastisite modülü belirgin olarak artmıştır. Zemin, esnek halden sert hale geçmektedir [7].



Şekil 1.12. Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı [1].



Şekil 1.13. Serbest basınç deneyleri [7].

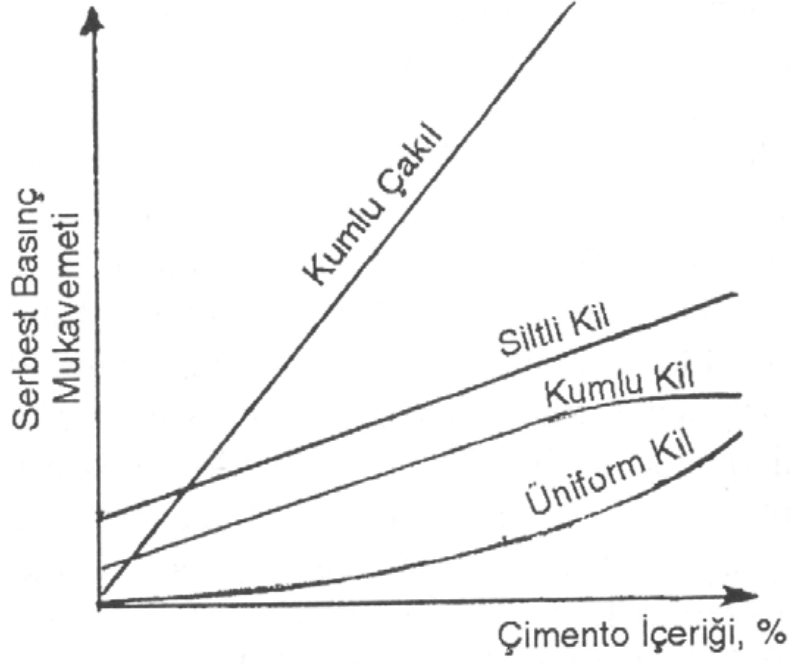
Kireç ile killi zemin üstünde yapılan iyileştirme ile sağlam tabaka elde edilmekte ve alt tabakada bulunan zayıf killi malzeme yolun üstüne tekrar çıkamamaktadır. Kilin su tutma özelliği ve şişme özelliğini kaybetmesi ve tekrar su ile temas ettiğinde kil davranışı göstermemesi kireç stabilizasyonuna büyük avantaj sağlamaktadır. Kireç stabilizasyonu uygulamasının kış aylarında da (yağmurlu ve malzemenin optimum su muhtevasının yüksek olduğu durumlarda) yapılabilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Zeminde su muhtevası yüksek olduğu zamanlarda sönmemiş kireç kullanarak zeminin su muhtevası daha hızlı bir şekilde düşürülebilmekte ve kış şartlarında kolayca çalışılabilmektedir. Zeminin su muhtevasının yüksek olmasıyla beraber taşıma kapasitesi de kilden kaynaklı düşük ise bu sayede yükseltilebilerek sağlam bir zemin de elde edilebilmektedir [34].

1.5.2. Zemin-Çimento Stabilizasyonu

Çimento ile stabilizasyonda, zemine kuru birim hacim ağırlığının % 5-15'i kadar çimento katılarak ve iyice karıştırılarak kompaksiyon uygulanır [35]. Saf kohezyonlu ve organik zeminler dışındaki zeminler, bu yöntem için uygundur. Çimento, daneler arasında bağlar oluşturur. Genellikle, portland çimentosu kullanılır. Uygun çimento miktarı, serbest basınç ve diğer dayanıklılık deneyleri ile belirlenir. Katılan su, çimentonun sertleşmesi için de yeterli olmalıdır. Zeminde ince kısım var ise, optimum su muhtevsından biraz fazla olan su muhtevası ile çalışılır. Çimento katılarak sıkıştırılan zemin, aynen beton gibi, bir süre ıslatılır. Çimento ile birlikte, çimento miktarını azaltmak vb. için, bazen uçucu kül gibi başka katkı maddeleri de zemine ilave edilebilir [32,35].

Zemin-çimento stabilizasyonu 1917 yılında İngiltere'de H.E. Broke-Bradley isminde bir mühendisin çalışması ile başlar ve ABD'de karayollarının 1920'deki uygulamalarına kadar gitmektedir. Bugün dünyanın pek çok yerinde ekonomik inşaat sistemi olarak kullanılmaktadır. Endüstrisinin gelişmesi nedeniyle de Türkiye koşullarında uygun bir yöntem haline gelmiştir. Artan trafik yükleri başta hava meydanları olmak üzere tüm ulaşım yollarında çimento ile stabilize edilmiş temel ve alt temel uygulamasını zorunlu hale getirmektedir [31,32].

Genelde PI değeri 30'dan az olan zeminler ile No.4 elekten (4,76 mm) geçen kısım, % 45 den fazla olan kaba gradasyonlu granüller zeminlerde bir stabilizör olarak kullanılır. Zemin cinsine göre serbest basınç mukavemeti-çimento içeriği arasındaki ilişki Şekil 1.14 'de görülmektedir. Buradan da görüleceği gibi çimento stabilizasyonu granüller zeminlerde en iyi sonucu vermektedir. Ayrıca bu tip zeminlerde çimento stabilizasyonu ile mukavemet artışı çimento miktarı kadar zemin sıkıştırma miktarına ve yeterli kür edilmesine bağlıdır [1].



Şekil 1.14 Çimento stabilizasyon mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi [1].

Çimento su ile reaksiyona girerek sertleşen bir malzemedir. Çimento stabilizasyonu çok değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Örneğin; stabilizasyonla taşıma gücünün artırılması mümkün olan zeminler, temel zemini olarak kullanılabilir. Böylece doğal hali zayıf olan zeminin yerinden taşınarak yerine daha sağlam zeminlerin taşınması ile yapılacak stabilizasyon önlenmiş ve ekonomi sağlanmış olur. Portland çimentosu içerisinde bir miktar kireç de bulunmaktadır. Yapılan stabilizasyonda kireçle stabilizasyonda bahsedilen iyileştirmeler de elde edilebilir. Ancak çimentonun kirece göre daha pahalı olması nedeni ile bu amaç için kullanılmaz [31].

Genel olarak çimento ile yapılan stabilizasyonlarda zeminlerin permabiliteleri azalmaktadır. Çimento ile stabilizasyonu yapılmış zeminlerde hacim değişimi meydana gelmekte ve çatlaklar oluşmaktadır. Çimento ile stabilizasyon için kumlu ve çakıllı malzemeler uygun olmaktadır. Özellikle 200 nolu elekten geçen kısım % 10-35, 4 nolu elekten geçen % 55 ve yukarısı, 10 nolu elekten geçen % 37 ve 2,5 cm den daha büyük danesi olmayan zeminler, çimento ile stabilizasyon için çok uygun olmaktadır.

1.5.3. Zemin-Uçucu Kül Stabilizasyonu

Türkiye’de elektrik enerjisi, kömüre dayalı termik santrallerden ve hidroelektrik santrallerinden elde edilmektedir. Son yıllarda bunlara üçüncü olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül (UK) adı verilmektedir [36].

UK, inşaat sektöründe yol yapım çalışmalarında da kullanılmaktadır. Kaplama olarak hem beton hem de asfalt kullanılan otoyolların yapımında UK kullanılmaktadır. Konu ile ilgili çalışmaların A.B.D.’de 1930’lu yıllarda başladığı görülmektedir. İlk defa UK, 1938 yılında A.B.D.’nin Chicago şehrinde bir yol inşaatında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır. UK’ün, yol yapımında temel malzemesi ve asfalt karışımı içinde de mineral filler olarak kullanıldığı görülmektedir. Deneysel bir çalışma ile UK’ün asfalt karışımında ince malzemenin bir kısmı yerine kullanılabileceği belirlenmiştir. Bağlayıcı başka bir malzeme kullanılmadan UK ve kum karışımından iyi ve ucuz stabilizasyonun elde edilebileceği belirtilmektedir. Afşin-Elbistan UK’ünün kullanıldığı deneysel olarak yapılan çalışmalarda, bu külün kireç ile birlikte yol stabilizasyonunda ve bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılabileceği belirtilmektedir [36].

Stabilizasyon işleminde fiziksel, mekanik işlemlerin yanı sıra kimyasal etkiler de göz önünde tutulmalıdır. Genel olarak kimyasal işlemler tek yönlüdür. Reaksiyon tamamlandıktan sonra oluşan ürün niteliklerini kolayca kaybetmez. Stabilize yönünden en sorunlu zeminler plastisite indeksi 10’dan yüksek olan killer ve siltlerdir. Stabilize edildiklerinde zaman su ile temas ettikleri saman çok yumuşak bir hal alırlar. Bu tür zeminler uçucu külle stabilize edildiklerinde uçucu kül içersindeki kalsiyum hidroksit ((Ca(OH)₂) hızlı bir şekilde katyon değişime ve topraklaşmaya neden olacak ve bu zeminler silt gibi davranacaktır. Reaksiyon birkaç saat içinde başlar, zeminin plastisite indeksi ve kullanılan uçucu külün içindeki kirecin miktarına bağlı olarak birkaç gün içersinde tamamlanır. Plastik durumdaki kil yarı katı ve kolay ufalanabilir kıvama sahip olur, plastisite indeksi azalır, rötre limiti artar. Kireç yüksek alkalın ortamı meydana getirmek için zemin suyunda çözülür. Böylece çok sayıda topraklaşmaya sebep olacak şekilde kalsiyum iyonları kilin içersinde reaksiyona girer bu tür zemin reaksiyonu

pulozanik reaksiyon nedeniyle gerçekleşir. Bu reaksiyonda kireç kimyasal olarak çimentolaşma sırasında silikat ve aliminat ile birleşir. Bu birleşme çok uzun zamanda olur. Bu yavaş mukavemet artışı zemin davranışında süneklik meydana getirir [36].

Uçucu küller, kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle birleştiklerinde bağlayıcı özellik kazanan puzolanik malzemelerdir. (ASTM C618'e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak uygun su içeriğinde ve normal ortam sıcaklığında kireç ile kimyasal reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran ince toz halindeki silisli ve/veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denilmektedir). Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan süre ile birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri nedeniyle uçucu kül katkılı zemin belirli bir süre sonunda dayanım kazanır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esas olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar [36,37].

ASTM C 618-01'e göre uçucu kül kimyasal içeriklerine göre C ve F sınıfı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Her iki gruba da girmeyen üçüncü bir tür sınıflandırılmayan uçucu kül çeşidi de bulunmaktadır. F tipi uçucu kül, bitümlü kömürün yanması ile elde edilir ve çok düşük miktarda kireç (CaO) içermektedir. Bu tür uçucu kül silis ve alümina içerdiğinden, çimentolaşma özelliği çok azdır. Ancak normal ısı derecesinde, nemin etkisi ve muhtemel kireç ile reaksiyona girdiğinde, çimentolaşma meydana gelmektedir. C tipi uçucu kül ise linyit veya kömürün yanması ile elde edilir ve belirli oranda kireç içermektedir. C tipi uçucu kül kireç içerdiği için reaksiyon hemen meydana gelmektedir buna karşın F tipi uçucu külden ise kireç çok daha az olduğu için reaksiyonu başlatabilmek için dışarıdan ortama kireç ilave edilmesi şarttır [36]. Kaba gradasyonlu zeminlerde (yani GW, GP, GM, GM, GC, SW, SP, SM, SC veya bunların karışımı) etkin bir stabilizör olarak kullanılır [22].

Uçucu kül katkısının, zeminin geoteknik özellikleri; kıvam limitleri, kompaksiyon, kayma mukavemeti, sıkışma, permabilite ve dinamik özellikleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğu belirtilmektedir [36].

1.5.4. Zemin-Uçucu Kül- Kireç Stabilizasyonu

Kil oranı düşük zeminlerde kireç tek başına istenilen iyileştirmeyi sağlayamamaktadır. Uçucu küller SiO_2 veya Al_2O_3 bileşimine sahip oldukları için zeminlerin stabilizasyonunda kireç ile birlikte kullanılarak çimentolaşma özelliğine sahip ideal bir malzemeyi

oluşturmaktadır. Uçucu kül kireç karışımının en önemli özelliği kendi kendine sertleşme mekanizmasıyla zemindeki çatlak ve boşluklar arasındaki çimentolaşmayı sağlamasıdır. Çimentolaşma özelliğine sahip bir malzemeden büyük bir miktarda ihtiyaç duyulan enjeksiyonlarda, uçucu kül kullanım için en ekonomik malzemedir. Uçucu kül-kireç enjeksiyonu, dolguların oturmasını azaltarak taşıma kapasitesini artırır ve geçirimsizliğini azaltır [38].

Kireç- baca külü stabilizasyonu zeminin basınç ve çekme mukavemetinin ve dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır. Karayolu mühendisliğinde daha yaygın kullanılma alanı bulmaktadır [32].

Puzolanik aktivitesi düşük olan killi zeminlerin veya granüller zeminlerin stabilizasyonunda, bu gibi zeminlere suni veya doğal puzolan ilave etikten sonra kireç stabilizasyonuna başvurulması daha iyi sonuç verir. Termik santrallerin bir atık maddesi olan ve ülkemizde bol miktarda elde edilen ve henüz geniş kullanma sahası olmayan uçucu küllerin, kireç stabilizasyonuna elverişli olmayan zeminlere ilavesi ile stabilizasyon işlemi yapılması faydalı olur. Bu gibi puzolanlar zemine ilave edildiği zaman kireçle çimentolaşma sağlanmış olacak ve sonuçta da mukavemette hızlı artışlar olacaktır [38].

1.5.5. Zemin-Bitüm Stabilizasyonu

Kireç ve çimento stabilizasyonu puzolanik reaksiyonlar sonucu zeminin mukavemetini arttırırken, asfalt stabilizasyonu zeminin suyun zararlı etkilerinden korunması ve daneleri birleştirici yönde bir rol oynamaktadır. Daneler yüzeyini kaplayan asfalt ince daneli zeminlerin sudan yumuşamasını önleyici bir etki gösterirken iri danelerden oluşan zeminlerin ise kohezyon kazanmasına yol açmaktadır. Ayrıca, danelerin birbirine yapışmasını sağlayıcı etkisi sonucu su ve rüzgar erozyonuna karşı direnci arttırmaktadır. Asfalt stabilizasyonunun da en yaygın olarak karayollarında kullanıldığı bilinmektedir [31].

Zeminlerin bitümlü malzemelerle stabilizasyonunda oluşan bağlayıcı filminin rolü zeminin özelliklerine bağlı olarak değişir. Kum veya granüller malzeme gibi kohezyonsuz zeminlerde bağlayıcı film iki amaca hizmet eder. Birincisi, zemini su geçirmez hale getirmektir. İkincisi, zemin danelerine birbirine bağlar ve dolayısıyla zeminin yük taşıma kapasitesini artırıcı rol oynamaktır. Bu nedenlerle, ince daneli kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda bitümlü malzemenin esas rolü stabilize edilen zemin tabakasının

geçirimsizliğini sağlamaktır. Genellikle, granüller veya plastik olmayan zeminlerin bitümlü malzemelerle stabilizasyonunda başarılı sonuçlar elde edilmektedir [33].

Kohezyonlu zeminler optimum su içeriğinde sıkıştırıldığında belirli bir mukavemet kazanır. Ancak bu mukavemet suya karşı duyarlıdır. Zira yüksek su içeriğine maruz kaldığında zemin şişme gösterebilir ve yumuşama ile stabilitesi azalır. Bu nedenle, bitümlü stabilize edilen zeminlerin daneleri asfalt filmi ile sarılır ve boşlukların bir kısmı asfalt ile doldurularak su geçirimsiz bir kitle sağlar. Ayrıca, asfaltın bağlayıcılık özelliğinden dolayı yüksek kohezyonlu bir zemin elde edilebilir. Ancak asfalt çimentosu kullanılırsa karışıma giren tüm malzemenin (zemin ve asfalt) ısıtılması ve karıştırılması gerektiğinden ve sıvı asfalt kullanılırsa sıkıştırmadan sonra kesilme problemlerinin olması nedeniyle kohezyonlu zeminler genellikle bu tip stabilizasyona uygun değildir. Bu nedenle, zeminin PI değeri 10'dan az olması ve zeminin No.200'den geçen kısmının % 12'den az olması şartı getirilmiştir [1].

Bitümlü stabilizasyonda; asfalt, katran gibi maddeler kullanılır. Kıırma taş, çakıl, kum gibi daneli zeminler, sıcak sıvı bitümlü madde katılıp karıştırılarak, serilerek kompaksiyon uygulanır. Bitümlü maddelerin, taneler arasında bağlayıcılık ile geçirimsizlik sağlama işlevleri vardır. Bitüm, asfalt vb. petrolden elde edilen siyah, yapışkan, sıcakken sıvı olan üründür. Kullanılacak malzemenin, kil ve organik maddelerden arınmış olması gerekir. Bitümlü maddeler, miktar olarak, % 5-10 oranında katılır. Bitümlü stabilizasyon, özellikle yollarda, yüzey kaplamasında kullanılır [35].

1.5.6. Zemin-Kireç-Çimento, Kireç-Asfalt ve Kireç-Çimento-Uçucu Kül Kombinasyonları ile Stabilizasyon

Zemine katılan kireç işlenebilirliği artırırken potansiyeli düşürür. Daha sonra katılan çimento ise zeminin mukavemetini hızla artırır aynı şekilde zemine katılan kireç, asfaltın zemin danelerinden soyulmasına ve karışımın stabilizesinin artmasına neden olur. Zeminlerin stabilizasyonunda stabilizör seçimi için, zemin cinsi, stabilizasyonun amacı (stabilite artışı, kaplama kalınlığının azalması, vb.), zeminin hangi özelliğinin iyileştirilmesi, maliyet ve elde edilme kolaylığı gibi hususlar daima göz önünde tutulmalıdır. Aşağıda stabilizör seçimi için rehber (Tablo 1.10) verilmektedir.

Tablo 1.10. Stabilizör seçimi için rehber [1].

Alan	Zemin Sınıfı	Önerilen stabilizör	Kısıt	No.200 den geçen	Açıklamalar
1A	SW SP	Asfalt Çimento K-Ç-UK	PI<25		
1B	SW SP SW-SC	Asfalt Çimento Kireç	PI<10 PI<30 PI>12		
1C	SM SC SM-SC	Asfalt Çimento Kireç K-Ç-UK	PI<10 ! PI>12 PI<25	Max %30	
2A	GW GP	Asfalt Çimento K-Ç-UK	PI<25		Sadece iyi gradasyonlu Zemin No.4den geçen ağ. min % 45
2B	GW GP GW-GC GP-GC	Asfalt Çimento Kireç K-Ç-UK	PI<10 PI<30 PI>12 PI<25	Max %30	Sadece iyi gradasyonlu Zemin No.4den geçen ağ. min % 45
2C	GM GC GM-GC	Asfalt Kireç K-Ç-UK	PI<10 ! PI>12 PI<25		Sadece iyi gradasyonlu Zemin No.4den geçen ağ. min %45
3	CH CL ML OL ML-CL	Çimento Kireç	LL<40 ve PI<20 PI>12		Organik ve kuvvetli asidik zeminler bu alana Giriyorsa stabilizasyon için uygun değildir

Not: K-Ç-UK: Kireç-Çimento-Uçucu Kül Kombinasyonu
"!": $PI \leq 20$ -No.200'den geçen %'si

Plastik olmayan ve düşük PI değerli zeminler için tek basına kireç kullanmak genellikle tatmin edici olmamaktadır. Bu durumda uçucu kül ilave edilmesiyle zeminin kireçle stabilizasyonu mümkün olabilmektedir. Kaba gradasyonlu ve çok az yada hiç ince malzeme içermeyen zeminler için kireç-kireç çimento uçucu kül kombinasyonu genellikle daha iyi sonuç vermektedir. Uçucu kül, silis ve alüminyum içeren puzolanik bir malzeme

oluşu nedeniyle kireç ve su ile karıştırıldığında yüksek basınç mukavemetleri elde edilebilmektedir. Aynı şekilde tabii puzolanlar, bu tip davranış gösterdiğinden dolayı zeminin mukavemet artışı için uygun stabilizörlerdir [1].

1.6. Hücresel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemleri ile Zemin Güçlendirilmesi

1.6.1. Hücresel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemi Kavramı

Hücresel dolgu sistemleri (geocell, geoweb, noeweb vb.), Şekil 1.15’de görüldüğü gibi toprağı kontrol altına alıp stabilize etmek için geliştirilmiş, polietilenden yapılmış bir petek yapı şeklinde düğümler ile birbirine bağlı üç boyutlu hücrelerden oluşan yüksek mukavemete sahip bir ağıdır. Hücresel yük taşıma sistemleri inşaat sahasında genişler ve toprak ile doldurulur. Hücre duvarlarını tamamen dolgu malzemesi örter ve tüm bir çevreyi toprağı hapis eder. Böylece, hücre duvarlarındaki düşey yükleme gerilmeleri ve bitişik hücrelerdeki toprak direncini kontrol altına alarak toprağın yük-deformasyon davranışı ve mukavemetini artırır. Hücresel yük taşıma sistemleri; geocell, miracell, geoweb, noeweb gibi değişik isimlerle adlandırılmaktadır [39,20,40].



Şekil 1.15 Hücresel dolgu sisteminin arazide uygulanişı [40].

Genel olarak, yumuşak zeminlerle karşılaşılnca yük desteğı için projelendirme ihtiyacı ortaya çıkar. Yüzeysel zemin tabakalarının stabil olmamaları veya estetik ve çevresel sorunların varlığından dolayı yük altında destek verecek tabakaların oluşturulması ihtiyacını doğurur. Geocell destek sistemlerde konulan granüler dolgu tabakalarının yük-

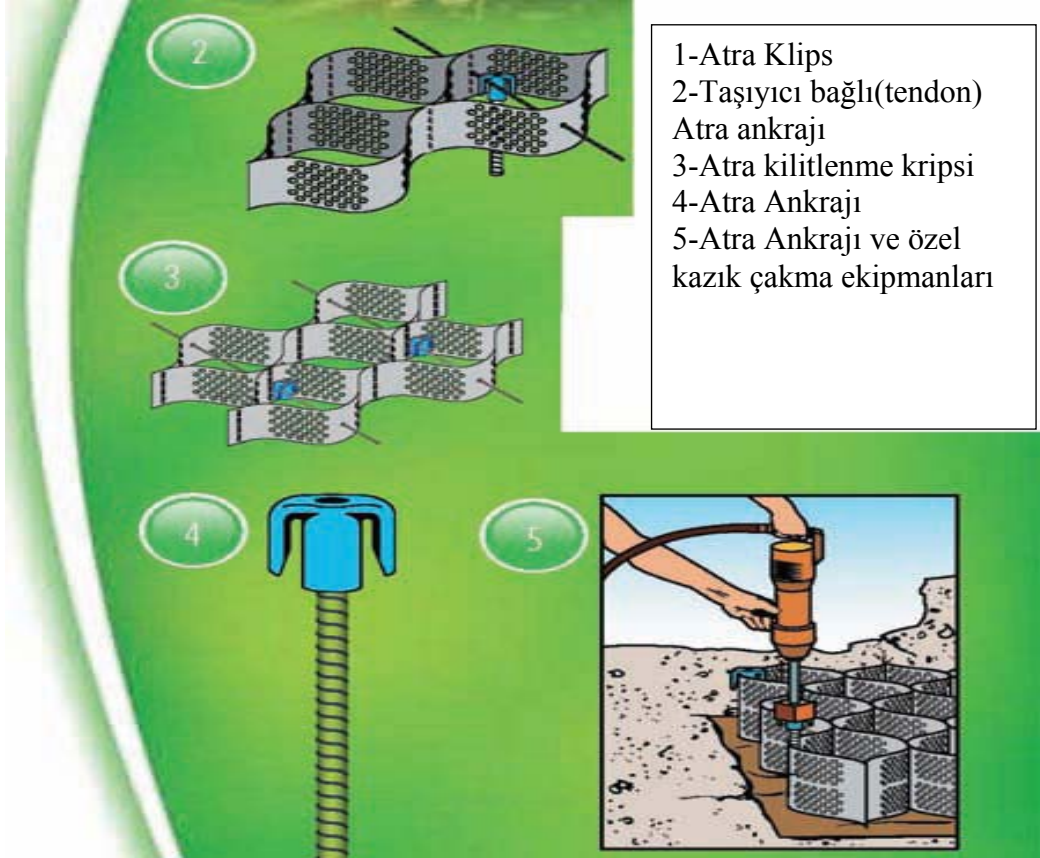
deformasyon performansı, tekil hücrelerin kuşatılmış dayanımı ve komşu hücrelerdeki dolgu malzemesinin pasif direnci sayesinde sağlanır ve düşey gerilme komşu hücrelere kesme gerilmeleri sayesinde aktarılır ve bu sayede interlock (birbirine geçme) oluşumu sağlanarak kenetlenme mekanizması gelişir. Bu nedenle üç boyutlu geocell hücrelerin rijitliği fazladır. Geocell, içine konulan granüller dolgu tabakalarının kayma mukavemetini belirgin olarak artırır, aynı zamanda daha düşük kalitede agreganın kullanılabilmesine de imkân sağlar. Hücresel sistem ve yapı yoğunlaştırılmış yükleri aynı zamanda komşu hücrelere dağıtarak doğal zemine aktarılacak yük azaltılır. Böylece gerekli olan dolgu kalınlığı da azaltılmış olur [39,40].

1.6.2. Hücresel Yük Taşıma Sisteminin Bileşenleri

Delikli Geoweb bölmeleri, dolgu malzemesi, ankrajlama elemanları, taşıma bağı (tendon) , diğer kritik ve sisteme değer katan elemanlarıdır. Geoweb sistem bileşenleri Şekil 1.16'da gösterilmektedir [39,40].

- Delikli Hücresel Dolgu (Geocell) Bölmeleri: Gözenekler ve tekstürlü yüzey, agrega dolgu ile hücre duvarı arasındaki sürtünme açısını artırarak daha iyi agrega kenetlenmesi ve daha yüksek oranda genel yük dağılmasına yol açar. Gözenekler, aşırı zemin ve yüzey sularının hücreler arasındaki drenajını kolaylaştırarak suya doymuş topraklar üzerindeki trafik hareketlerinin negatif etkilerini azaltır.
- Dolgu Malzemesi: Projenin/problemin içeriğine ve detaylarına göre çeşitli dolgu malzemeleri kullanılabilir:
 - Bitkilendirilmiş nebati toprak
 - Kum ve çakıldan başlayıp daha büyük taş veya kayalardan oluşan agregalar
 - Çeşitli mukavemetlerde ve satırlarda hazırlanmış beton
 - Uygulama sahasında mevcut olan dolgu
 - Farklı özel koşullara karşı bu listelenmiş malzemelerden yapılabilen kombinasyonlar
- Taşıma Bağı (Tendon): Taşıma bağları, değişik gerilimleri karşılayabilecek çeşitli tiplerde bulunmaktadır. Ve bunlara belirli uygulama durumlarına göre ihtiyaç duyulabilmektedir. Taşıma Bağlarının kullanım amaçları:

- Yerçekimi kuvvetlerine ve hidrodinamik güçlere karşı ekstra stabilite sağlar.
- Özellikle yüksek hızda akışların olduğu veya alt tabaka olarak jeomembran kullanıldığı veya sert toprak/kaya zeminlerin ankraj kazıklarına izin vermediği dik dolgu alanlarında faydalı olur.
- Atra Ankrajlar:
 - Atma klipsleri, geocell sistemi uygulamalarında zaman ve malzeme açısından tasarruf sağlar.
 - Atra ankrajları ½” donatı kazıkları ile kullanıldığında J-kancalı demir sistemine göre daha kolay çakılabildiği için aplikasyon verimini yükseltir.
 - Taşıma bağları ve atra ankraj kombinasyonları kayma ve/veya yukarı kaldırma kuvvetlerine karşı koymak için ilave ankrajlama sağlar.
 - Ankrajların çakılmasını önemli oranda hızlandırmak için malzeme yelpazesinde bulunan özel ekipmanlardan faydalanılabilir.
- Atra Yük Kısıtlama Klipsi: Atra klipsleri taşıma bağlarına belirli yük-transfer noktalarından bağlandığı takdirde birer yük-transfer mekanizması oluştururlar. Taşıma bağları ve ankrajların tipleri, aplikasyon aralıkları Jeosistemlerindeki mevcut analitik metotlar sayesinde belirlenir. Tabana katman ayırmak amacı ile serilen jeotekstiller ve/veya geçirimsiz jeomembran şilteler, jeogridler, erozyon kontrol şilteleri, çim takviye hasırları veya çeşitli satıh kaplamaları diğer bileşenler arasında sayılabilir.



Şekil 1.16. Hücresel yük taşıma sisteminin bileşenleri [40].

1.6.3. Hücresel Dolgu ve Yük Taşıma Sisteminin Faydaları

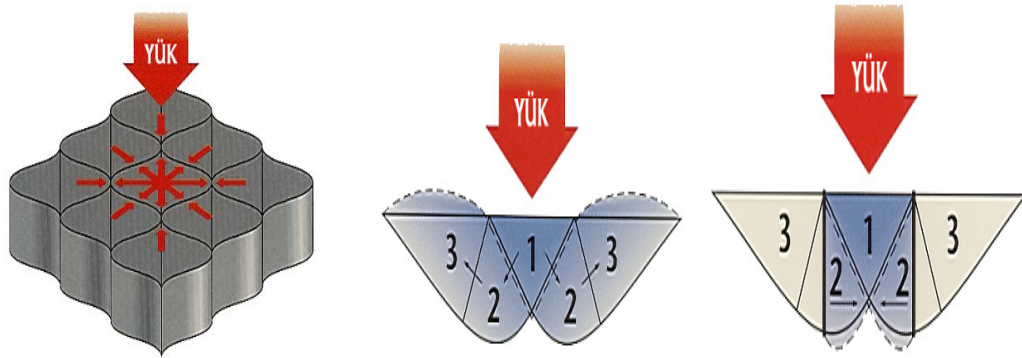
- Hücresel dolgu ve yük taşıma sistemi basit dolgu malzemelerini en zor yük taşıma ve erozyon kontrolü uygulamalarında kullanılmasını sağlar. Pahalı dolgu malzemesi yerine uygulama alanında bulunan doğal dolgu malzemesinin kullanımına olanak verir..
- Üç boyutlu hücreler dolgu malzemesini sıkıştırarak kuvvetlenmesini sağlar. Böylece yük taşıma gücünü artırır (Şekil 1.17). Çökmeleri azaltır, yanıl deplasmanları engeller. Yoğunlukta bulunan yükleri geniş bir alana dağıtarak esnek bir yapısal köprü oluşturur. Yüksek esnek güce sahip sert yapısal köprü sayesinde basit dolgu malzemesi ile yük taşıma kapasitesini artırarak oturmaları ve çökmeleri en aza indirir ve kuvvetlerin zemine işlenmesini önler.
- Hücresel geometrisi doğal drenaj yapısını sağlarken dolgu malzemesinin de hidrolik akışlardan zedelenmesini önler. Yüzeylerde yarıkların oluşmasını önler.

Akış hacmini artırır. Hidrostatik basınçların birikmesini önler. Yüksek güçteki kaynak birleşme noktaları sayesinde hücresel bir ağ oluşur. Sistem performansını artırarak basit dolgu malzemesini çok yönlü yapısal bir bileşik haline getirmektedir.

- Dayanıklı polietilen bölmeler katlanarak nakliyat kolaylığı sağlar. Esnekliğini koruyarak aplikasyon sırasında taşıma işini kolaylaştırır. Mekanik doldurma ve sıkıştırma olanağı sağlar.
- Değişik amaçlı yük taşıma aplikasyonlarında yapısal dolgu malzemesinin performansını yükseltir. Tek tabakalı yol zemin çalışması ve boru hatları yataklarından çok-tabakalı istinat duvarı ve koruyucu bariyerlere kadar geniş kapsamlı bir aplikasyon imkânı verir.
- Her şey den önemlisi, hücresel dolgu ve yük taşıma sistemi doğal dolgu malzemesinin pahalı dolgu maddelerinin yerini almasını sağlar ve yapısal destek unsurlarının kalınlığını ve ağırlığını %50 oranında düşürür.

Hücresel Dolgu Sisteminin Çalışma Prensibi;

Hücre duvarlarının kasnak kuvveti ve komşu hücrelerinin pasif direnci sayesinde sıkıştırma kuvvetleri elde edilir. Bu kuvvetler sayesinde Şekil1.17’de görüldüğü gibi 1 numaralı bölge, 2 ve 3 numaralı bölgelerin yerini alarak toprak zeminin ani bir deformasyona uğramasına engel olur. Böylece hücresel dolgu sistemi 2 numaralı bölgeyi sıkıştırma altına alarak zeminin yük altında deformasyona uğramasını engeller [39,40].



Şekil 1.17. Hücresel dolgu sisteminin çalışma prensibi [41].

Çok Tabakalı Yük Taşıma Sistemi Sayesinde;

- Yapısal destek unsurlarının kalınlığını ve ağırlığını %50 oranında düşürür.
- Statik ve dinamik yüklere karşı dayanıklıdır.
- Yapının öz içerikliğini bozmadan temel tabanında oluşabilecek deformasyonlara karşı toleranslıdır.
- Maksimum kuvvetin ve minimum çökmenin gerektiği yüksek veya düşük esneklikteki destek yapıları için idealdir.

Sıkıştırılmayla Gelen Güç Sayesinde;

- Sistemdeki sıkıştırılmış dolgu, eğilme mukavemeti yüksek sert bir tabaka oluşturarak; yüzeylerde oluşabilecek tekerlek izlerini büyük ölçüde minimize eder, yükleri yanal olarak dağıtır ve dikey sapmaları ve taban zemini basınç noktalarını azaltır, iri ve geçirgen dolgu malzemelerin kesme ve yanal hareketlerini kontrol eder, açık agrega dolgusu ile yağmur sularının yüzeysel akışlarını azaltır ve uygulama alanında su bekletme/tutma havzası oluşturur. Uygulamaların çoğunda, hücresel dolgu sistemi yük taşıma kapasitesi değerini iki katına çıkartır.
- Yük altına giren hücresel dolgu sistemi güçlü yanal sıkıştırma kuvvetleri ve toprak-hücre duvarı sürtünmesi meydana getirir. Bu mekanizma bir yandan dolgunun yumuşak zeminlere penetre etmesini engellerken aynı zamanda da yüksek esnek güce sahip sert bir yapısal köprü oluşturur. Köprüleşmenin oluşması basit dolgu malzemesinin uzun vadedeki yük deformasyon performansını geliştirir ve yapısal destek elemanlarının kalınlığının önemli ölçüde incelmesini sağlar [39,40].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışmanın Planlaması ve Sınırlandırılması

Bu tez kapsamında, Trabzon ili, Kalkınma Mahallesi mevkiinden getirilen killi zemin üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Getirilen malzemeye sırasıyla elek analizi, kıvam limiti deneyleri ve hidrometre analizleri yapılarak malzeme AASHTO ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre sınıflandırılmıştır. Sınıflandırması yapılan killi zemine daha sonra % 2,5, % 5, % 7,5, % 10, % 12,5, % 15 oranlarında kireç karıştırılarak likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmış ve artan kireç içeriğine bağlı olarak plastisite indeksindeki değişim incelenmiştir. Plastisite indisini %10'un altına düşüren kireç oranı tasarım için optimum kireç oranı olarak seçilmiştir. Ayrıca killi malzemeye modifiye proktor ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri de uygulanmıştır. Bu deneyler araziden gelen killi zeminin optimum su muhtevası % 20 daha artırılarak hiçbir şey katılmadan ve kuru ağırlığına, ağırlıkça % 5, % 10, % 15 oranında kireç karıştırılarak yapılmıştır. Diğer taraftan yüksek su muhtevasında hazırlanan karışımlar (optimum su muhtevasından % 20 daha fazla) üzerinde model plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde, killi zemine hiçbir şey karıştırılmadan, zemin geocelle güçlendirilerek ve zeminin kuru ağırlığına % 5, 10, 15, oranlarında kireç karıştırılarak, yüksek su muhtevasında yani zeminin doğal su muhtevası % 20 daha artırılarak stabilizasyon yapılmıştır. Deneylerde; elek analizi için TS 1900 ve AASHTO T-27 standartları esas alınarak zeminin granülometrisi, TS 1900 ve ASHTO T-89,90 esas alınarak zeminin likit limit ve plastik limit ve plastisite indisi değerleri bulunmuştur. Modifiye proktor ve CBR deneylerinde TS 1900 ve AASHTO T-193, plaka yükleme deneylerinde ASTM 1194-72 standartları esas alınmıştır. Deneylerden elde edilen bulgular teknik açıdan (yatak katsayısı, CBR, taşıma kapasitesi vb.) incelenmiş olup, ekonomik ve çevresel etki dikkate alınmamıştır.

2.2. Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Kireç

Bu çalışmada kullanılan kireç, piyasada ‘Paketlenmiş sönmüş kireç (inşaat tipi)’ adı altında 25 kg’lık ambalajlarda satılan, TS 4022’ye uygun olarak üretilmiş ‘barkisan’ marka kireçtir. Kimyasal formülü Ca(OH)_2 (Kalsiyum hidroksit) dir. Kirece ait kimyasal analiz bilgileri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kirecin kimyasal analizi (%)

Kimyasal analiz	%
Ca(OH)_2	80-86
Aktif CaO	60.6-65.15
Toplam CaO + MgO	85-95
MgO	1-3
Yoğunluk (gr/lt)	375-500

2.2.2. Hücresel Dolgu ve Yük Taşıma Sistemi (Geocell)

Model plaka yükleme deneyinde, yoğun polietilenden yapılmış, yoğunluğu $0,95 \text{ gr/cm}^3$ olan texture (dokuma) tip geocell kullanılmıştır. Geocellin tek hücre çapı 25 cm, yüksekliği 20 cm dir. Her biri 260 cm^2 kesit alanlı tek hücreler, üniform bir geocell döşek şeklinde kaynakla birbirine birleştirilmiştir. Geocellin hücre duvarlarında 10 mm çaplı drenaj delikleri bulunmaktadır.

2.2.3. Kum

Geocell döşek dolgu malzemesi olarak 2 mm maksimum dane çaplı, uniformluk katsayısı (Cu) 3,06, eğrilik katsayısı 1,05, özgül ağırlığı 2,63, boşluk oranı 0,40, içsel

sürtünme açısı 35 ° olan kuru kum kullanılmıştır. Kumun özellikleri ASTM D422–63 göre kararlaştırılmıştır.

2.2.4. Geotekstil

Hücre sel dolgu sistemi içindeki dolgu malzemesi (kum) ile dolgu sisteminin altında kullanılan zeminini (yüksek su muhtevalı killi zemin) birbirinden ayırmak ya da karışmasını engellemek amacıyla hücre sel dolgu sistemin altına bir geotekstil malzeme yerleştirilmiştir.

2.2.5. Zemin

2.2.5.1.Zeminin Sınıflandırılması

2.2.5.1.1.Islak Elek Analizi

Araziden getirilen zeminden, elek analiz için bir miktar alınıp 24 saat, 100 °C’de etüvde kurutulmuştur. Kurutulan zeminin tartıldıktan sonra tanelerinin iyice bir birinden ayrışması için 24 saat su içinde çözülmeye bırakıldı. Su içinde iyice çözülen zemin 4, 25, 40, 100, 200 nolu eleklerden yıkanarak elendi. Her eleğin üzerinde kalan zemin kısmı darası belli olan kaplara konarak etüvde konuldu, etüvde kuruyan zeminler tekrar tartılmıştır.

$\% P = (\text{elekten geçen zemin miktarı}) / (\text{Tüm zemin miktarı})$
bağıntısı yardımıyla her bir elek için yüzde (%P) olarak belirlenmiştir. Bu işlem üç ayrı numune için tekrarlanmıştır. Zemin numunelerinin elek analizi sonuçları Tablo 2.2, Tablo 2.3, Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Islak elek analizi (numune1)

Elek analizi				
Elek no	Elek çapı mm	Elek üstü (gr)	Elekten geçen (gr)	Geçen yüzdesi, %
3/8"	9,53	0	402	100
4	4,76	41,35	360,65	90
10	2	26,1	334,55	83

Tablo 2.2.'in devamı

40	0,42	19,61	314,94	78
100		19,33	295,61	74
200	0,074	10	285,61	71
Tava		285,61		

Tablo 2.3. Islak elek analizi (numune2)

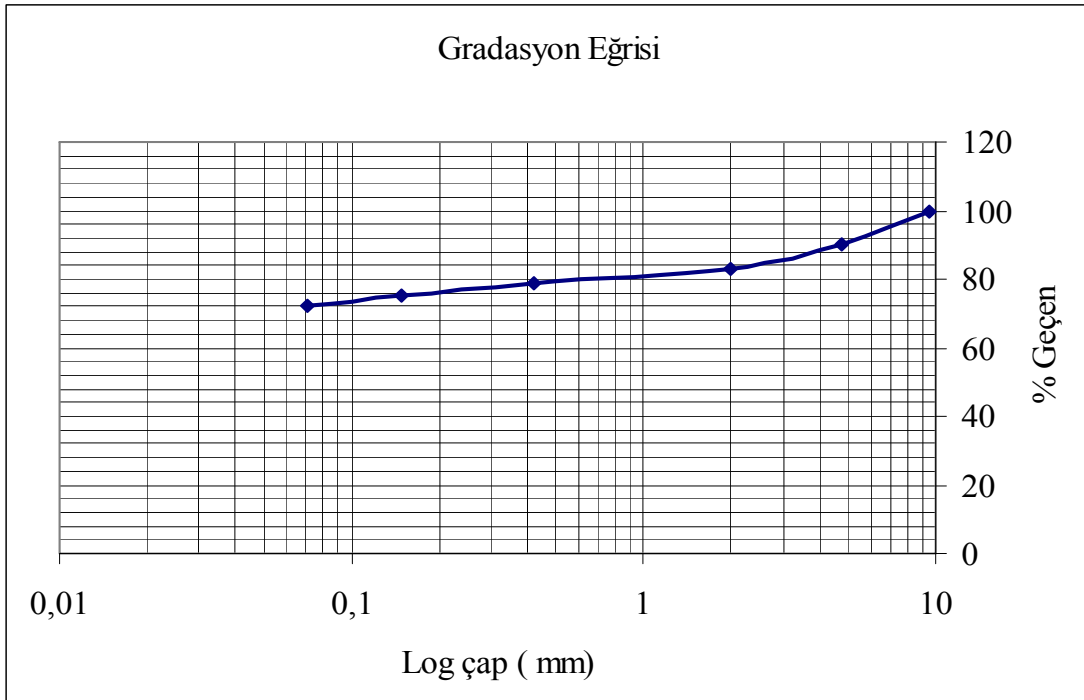
Elek analizi				
Elek no	Elek çapı mm	Elek üstü (gr)	Elekten geçen (gr)	Geçen yüzdesi, %
3/8"	9,53	0	420	100
4	4,76	42,7	377,3	90
10	2	30,1	347,2	83
40	0,42	18,73	328,47	78
100		15,4	313,07	75
200	0,074	11,5	301,57	72
Tava		301,57		

Tablo 2.4. Islak elek analizi (numune3)

Elek analizi				
Elek no	Elek çapı mm	Elek üstü (gr)	Elekten geçen (gr)	Geçen yüzdesi, %
3/8"	9,53	0	380	100
4	4,76	35,4	344,6	91
10	2	23,2	321,4	85
40	0,42	16,63	304,77	80
100	0,149	15,8	288,97	76
200	0,074	8	280,97	74
Tava		280,97		

Tablo 2.5. Karışım elek analiz sonuçları

Karışım elek analizi (% geçen)						
	3/8"	No 4	No10	No 40	No100	No200
Karışım	100	90	83	79	75	72



Şekil 2.1. Killi zeminin gradasyon eğrisi

2.2.5.1.2. Hidrometre Analizi

Elek analizi yapılan karıştırılmış numune üzerinde hidrometre analiz yapılmıştır. Analiz edilen veriler Tablo 2.6'da verilmiştir

Tablo 2.6. Hidrometre Analizi

Hidrometre analizi					
	Çakıl(%)	İri Kum(%)	İnce Kum(%)	Silt (%)	Kil(%)
Karışım	16,5	4,3	12,2	31,8	34,2

Hidrometre analizi sonucunda karışım % 16,5 çakıl, % 4,3 iri kum, % 12,2 ince kum, % 31,8 silt, % 34,2 kil içerdiği anlaşılmıştır.

2.2.5.1.3. Kıvam Limitlerinin Belirlenmesi

Likit limit değeri Şekil 2.2’de görülen pirinç yarım küre şeklindeki tasın 1 cm yükseklikten sert bir blok üzerine düşmesi esasına dayanan Casangrande aleti ile belirlenmiştir.



Şekil 2.2. Casangrande aleti ile likit limit değerinin belirlenmesi

Deney için 40 nolu 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 bir yamuk biçimli en kesitine sahip olup tabanı 2 mm dır. Alet çalıştırıldığında pirinç tas, bloka saniyede bir vuruş yapmaktadır. İkiye bölünmüş zemin yaklaşık 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 limiti değerleri belirlenmiştir.

Kurutulmuş, tanelenmiş, 40 no.lu elekten geçen zeminden bir miktar alınmıştır. Bir miktar su katılarak, karıştırılarak yoğrulmuştur. Böylece hazırlanan zeminden bir miktar alınarak, bir cam plaka üzerinde, el altında yuvarlanmıştır. Zeminin öyle bir su muhtevası

vardır ki, bu su muhtevasında, zemin çubuğunun çapı yaklaşık 3 mm olduğunda, çubukta kopmalar olur. Bu durumdaki su muhtevası, zeminin plastik limitini verir. Zemin bu durumu elde edilmiş, bu durumdaki su muhtevasını belirlemek için zemin tartılıp etüve konulmuştur. Böylece plastik limit değerleri belirlenmiştir.

Ayrıca malzemeye kuru ağırlığının % 2.5, %5, % 7.5 , % 10, % 12.5 ve % 15 oranlarında kireç katılarak likit limit ve plastik limit değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Doğal halde ve değişik kireç yüzdelerinde bulunan atterberg limit değerleri Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Doğal zemin için ve kireçli durum için likit limit ve plastik limit deneyleri

Atterbeg limitleri			
	Likit limit	Plastik limit	Plastisite indisi
Doğal	58	25	33
% 2,5 kireç	54	30	24
% 5 kireç	53	33	20
% 7,5 kireç	52	33	19
% 10 kireç	52	38	14
% 12,5 kireç	51	40	11
% 15 kireç	51	42	9

Yapılan deneyler sonucunda karışım AASHTO ve birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonunda zemin ASSHTO zemin sınıflandırmasına göre A-7 gurubu killi zemin, birleştiririlmiş zemin sınıflandırmasına göre CH (yüksek plasiteli kil) olarak bulunmuştur.

2.3. Yapılan Deney Yöntemleri

2.3.1. Modifiye Proktor Deneyi

Araziden getirilen sınıflandırması A-7 gurubu killi zemin olarak belirlenmiş üç ayrı numune için optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlemek için modifiye proktor deneyleri yapılmıştır. Numuneler değişik su muhtevalarında 15,24x12,7 cm boyutunda silindirik kap içerisinde ve üzerine geçici bir halka eklenerek, 5 tabaka halinde her bir tabakaya, 30,5 cm den serbestçe düşen 2,5 kg ağırlığındaki bir tokmakla, 25 vuruş yapılarak sıkıştırıldı. Daha sonra yaka çıkarılarak; fazla zemin kesilerek uzaklaştırıldı. Kabın üzeri düzeltildi ve kabın içindeki zemin yaş ağırlığı tartılarak kaydedildi ve kabın hacmine bölünerek yaş birim hacim ağırlığı hesaplandı. Yaş birim ağırlığı hesaplan zemin kap içerisinde çıkarılıp, bu zeminden bir miktar alınarak su muhtevası (w) belirlendi. Bağntı 3.1 yardımıyla kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) hesaplanmıştır.

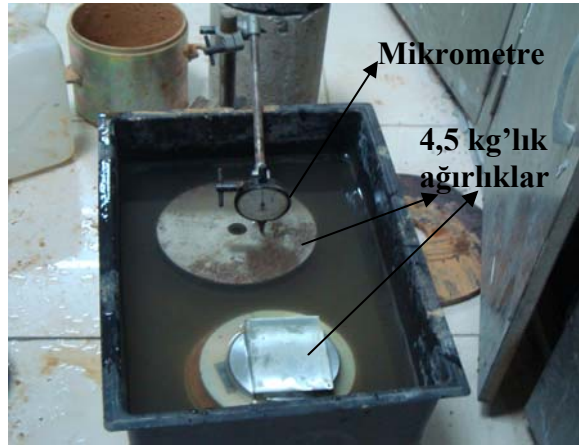
$$\gamma_k = \frac{\gamma_d}{1 + w} \quad 2.1$$

Deney sonuçları, γ_k -w eksen takımında işaretlenerek, modifiye proktor eğrisi çizildi. Deneyler doğal halde, % 5, % 10, % 15 kireç oranlarında yapılmıştır. Doğal durumda, % 5 Modifiye proktor eğrisi incelendiğinde; bu eğrinin tepe noktasından, doğal malzemenin optimum su muhtevası (w_{opt}) % 24,5 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) 1,76 kg/cm² olarak belirlemiştir. Aynı şekilde zemine kuru ağırlığının % 15 oranlarında kireç karıştırılarak modifiye proktor deneyleri yapılmıştır.

2.3.2 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Laboratuarda yapılan CBR deneylerinde zemin proktor deneyleri sonucunda bulunan su muhtevasında sıkıştırıldığı bilinmektedir. Fakat bu çalışmada; çalışmanın amacı doğrultusunda yüksek su muhtevalı bir zeminin yansıtacak şekilde modifiye proktor deneyi sonucunda optimum su muhtevası % 24,5 olarak belirlenen zemine % 25 daha su ilave

edilerek yani % 45 su muhtevasında modifiye proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Bu şekilde doğal durumda (% 45 su muhtevasında) ve doğal durumdaki zemine % 5, % 10, % 15 oranlarında kireç katılarak, her bir durum için 2 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlana numuneler, zemin boşlukları tamamen suyla doygun hale gelmesi ve en düşük taşıma gücündeki mukavemeti elde edilebilmesi için, 4,5 kg'lık yük altında 4 gün (96 saat) su içinde bekletildi (Şekil 2.3). Bu süre içinde numunelerdeki şişme oranları alınmıştır.



Şekil 2.3. Numunelerin yük altında su içinde bekletilmesi



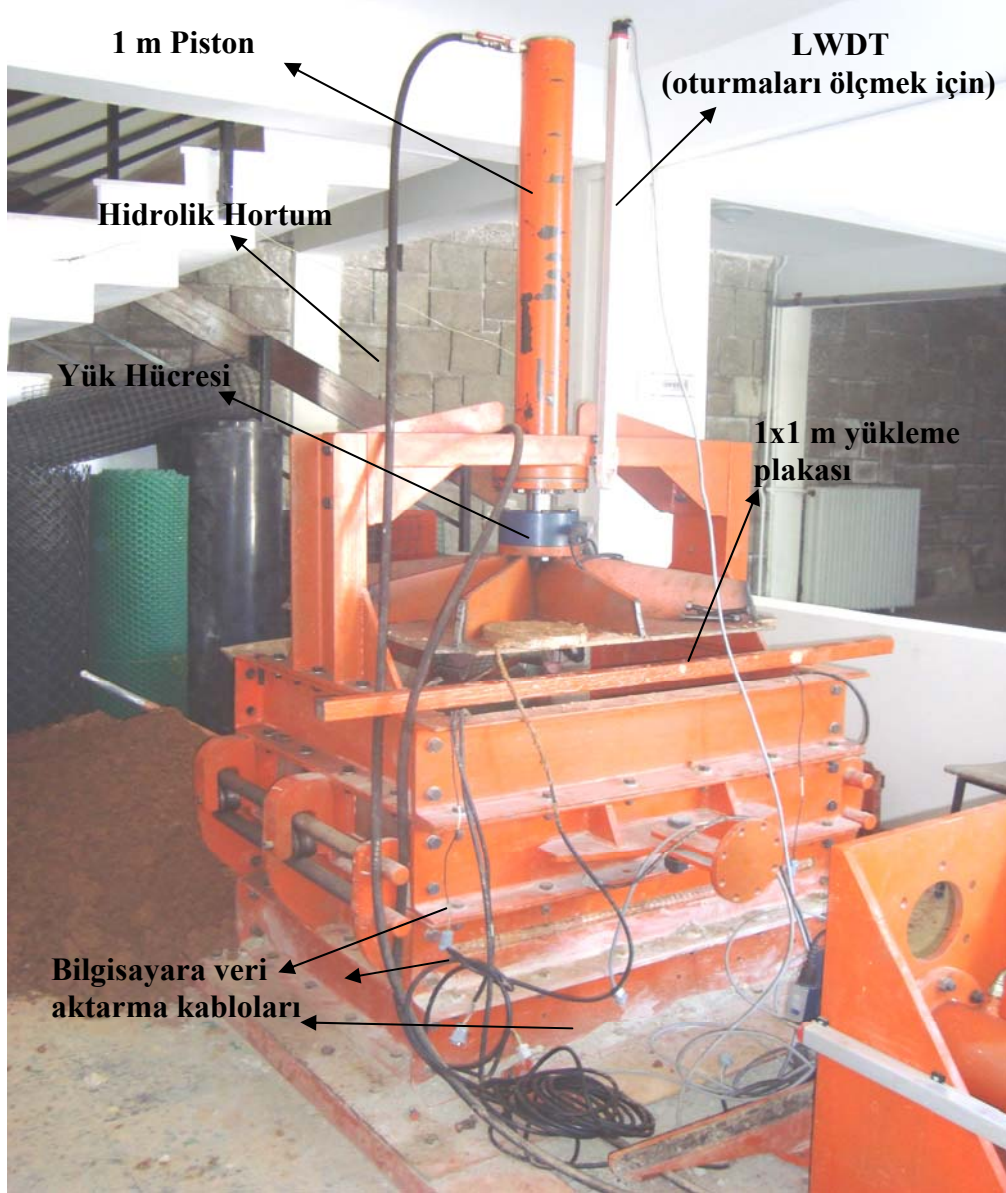
Şekil 2.4. CBR deney aleti

Numuneler sudan çıkarıldıktan sonra 4,95 cm çaplı bir piston ile 1.25 mm/dk hızla numuneye batmayı sağlayacak yük tatbik edildi (Şekil 2.4) ve 0,625 mm, 1,825, 2,50, 5,00, 7,50, 10.00 ve 12,50 mm'deki batma miktarlarındaki yük okundu. Yük- batma eğrisinde 2,5 mm ye karşılık gelen batmayı veren basınç miktarı test basıncı olarak kabul edilir. Bu basıncın standart kırma kaya temelde 2,5 mm batmaya karşılık gelen yüke bölünmesiyle yaş CBR değerleri hesaplanmıştır.

2.3.3. Model Plaka Yükleme Deneyleri

2.3.3.1 Deney Aleti

Model plaka yükleme deney aleti, gerilme dağılışı ve taban zeminin yük taşıma kapasitesi üzerinde geocellin ve kireç stabilizasyonunun etkisini değerlendirmek için 1 m genişliğinde, 1 m uzunluğunda ve 1 m yüksekliğinde Şekil 2.5'de görüldüğü gibi kutu şeklinde olup, içerisine zemin doldurulup sıkıştıktan sonra yükleme yapılma esasına dayanmaktadır. Yük, hidrolik bir piston ile uygulanmakta ve bir çelik plaka ile zemine transfer edilmektedir. Plaka yükleme deneyi normalde bir arazi deneydir. Bu şekilde arazi plaka yükleme deneyi laboratuvar ortamına uyarlanarak model plaka yükleme deneyleri yapılmaktadır [19].



Şekil 2.5 Model plaka yükleme deney aleti.

2.3.3.2. Deneyin Yapılışı

2.3.3.2.1. Killi Zeminin Yüksek Su Muhtevalı Duruma Getirilmesi

Bu deneysel çalışmada araziden getirilen sınıflandırılması A-7 ve optimum su muhtevaları % 24,5 olarak belirlen killi bir zemin, su muhtevaları yaklaşık % 20 daha artırılarak test aletinin dışında homojen bir şekilde karıştırılarak, su muhtevaları % 45'e çıkarılıp taşıma gücü düşük, yüksek su muhtevalı bir zemin bir zemini temsil edecek

şekilde hazırlanmıştır. Şekil 2.6'da hazırlanan % 45 su muhtevalı bir zemin gösterilmektedir. Zemine bu haliyle, değişik oranlarda kireç karıştırılarak stabilize edilmesi durumunda ve geocell ile güçlendirilmesi durumunda üzerine plaka yükleme deneyi yapılarak bu iki durum için yük-deformasyon ilişkisi ve oturma değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır



Şekil 2.6. Test kutusunun dışında hazırlanan yüksek su muhtevalı (% 45) zemin

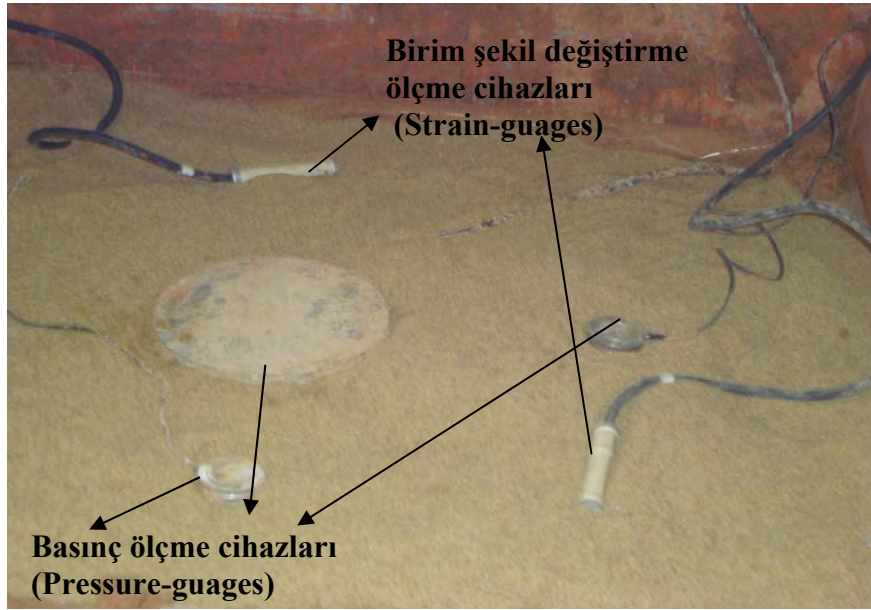
2.3.3.2.2. Yüksek Su Muhtevalı Killi Zeminin Test Kutusuna Yerleştirilmesi ve Hücresel Dolgu Sistemi (Geocell) ile Güçlendirilmesi

Yüksek su muhtevalı killi zeminin hücresel dolgu sistemi (geocell ya da geoweb) ile güçlendirilmesi durumunda; yük deformasyon davranışı ve alt temel tabakasındaki gerilme dağılımını üzerinde hücresel dolgu bir tabakanın etkisini incelemek için, 1 m yüksekliğinde, 1 metre genişliğinde ve 1 m iç çaplı bir test kutusu içinde statik yükleme testleri yapılmıştır.

Laboratuarda (deney kutusunun dışında) hazırlanan yüksek su muhtevalı (% 45) killi zemin, 60 cm yüksekliğe kadar tabaka tabaka test kutusuna yerleştirildi ve her bir tabakaya

ön yüklemeler yapılarak sıkıştırılmaya çalışıldı. Fakat zemin su muhtevası çok yüksek olduğundan pek sıkışma sağlanamamıştır. Dolgu malzemesi ve test kutusunun kenar duvarları arasındaki sürtünmeyi engellemek için zemin, test yerleştirilmeden önce test kutusunun duvarları membran ile kaplanmıştır. Geocell üst seviyesindeki ve geocell altındaki düşey gerilmeleri ölçmek için 1 tane 20 cm çaplı (pressure gauge) ölçme aleti ve iki tane 5 cm çaplı düşey gerilme ölçme aleti kullanılmıştır. Basınç hücreleri kum yatak içine yerleştirilir [19]. Kum yatak kalınlığı basınç hücresi kalınlığı dikkate alınarak 5 cm olarak seçilmiştir. Basınç hücreleri teste kullanılmadan önce kalibre edilmiştir. Alt temel malzemesi içersindeki birim şekil değiştirmeleri ölçmek için iki tane birim şekil değiştirme ölçme aygıtı (strain -guage) kullanılmıştır. Şekil 2.7'de gerime ölçme ve birim şekil değiştirme ölçme aletleri gösterilmektedir.

Deney kutusunun yanlarındaki deplasmanı gözle görebilmek için tasarım sırasında test kutusunun kenar duvarında Şekil 2.8'de görüldüğü gibi bir cam boşluk bırakıldı. Zemin alete yerleştirirken bu camda görülecek şekilde, zemin içersine bir parlak bir taş yerleştirilmiş ve camın kenarına yapıştırılan bir uzunluk ölçeği ile taşın yükleme yapılmadan önceki ve sonraki konumunun kaydedilmesi düşünülmüştü; fakat zemin, yüksek su muhtevalı olduğundan işaret yükleme sırasında zemin içisin de kaybolduğundan net bir kayıt alınamamıştır.



Şekil 2.7. Gerime ölçme (pressure-gauge) ve birim şekil değiştirme ölçme (strain-gauge) aletlerinin yerleştirilmesi



Şekil 2.8. Kenarlardaki deplasmanların ölçülmesi

Geocell alt seviyesindeki basınç hücreleri yerleştirildikten sonra ve geocell yerleştirilmeden önce, hücresel dolgu sistemi (geocell) taban malzemesi ile geocell içersindeki dolgu malzemesiyle yüksek su muhtevalı killi taban malzemesini ayırmak için bir geotekstil dolgu malzemesi üzerine yerleştirildi. Böylece geotekstil üzerine döşenen geocell iyice gerdirilip ayarlandıktan sonra kuru kum ile dolduruldu ve sıkıştırıldı. Şekil 2.9'de geocell altına yerleştirilen geotekstil ve Şekil 2.10'da taban zemini üzerine yerleştirilen geocell ve geocell içindeki kum dolgu gösterilmektedir. Geocell tabakasının yüzeyi 3 cm kum ile kaplandı. Basınç hücreleri üzerindeki tabaka kalınlığı tüm test boyunca eşit (3 cm) seçilmiştir.



Şekil 2.9. Geocell altına yerleştirilen geotekstil



Şekil 2.10. Taban zemini üzerine yerleştirilen geocell ve geocell hücrelerinin içinin kum ile doldurulması

2.3.3.2.3. Yüksek Su Muhtevalı Killi Zeminin Kireçle Stabilize Edilmesi ve Test Kutusuna Yerleştirilmesi

% 45 yüksek su muhtevalı zeminin kireç ile stabilize edilmesi durumunda; yüksek su muhtevalı zemine % 5, % 10, % 15 oranlarında kireç karıştırılarak, homojen bir şekilde dışarıda karıştırılmıştır. Şekil 2.11’de yüksek su muhtevalı duruma getirilmiş zemin, Şekil 2.12’de kireç stabilize edildikten sonraki zemin gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Zeminin % 45 su muhtevasına getirilmesi



Şekil 2.12. % 45 su muhtevalı killi zeminin kireç ile stabilize edilmesi

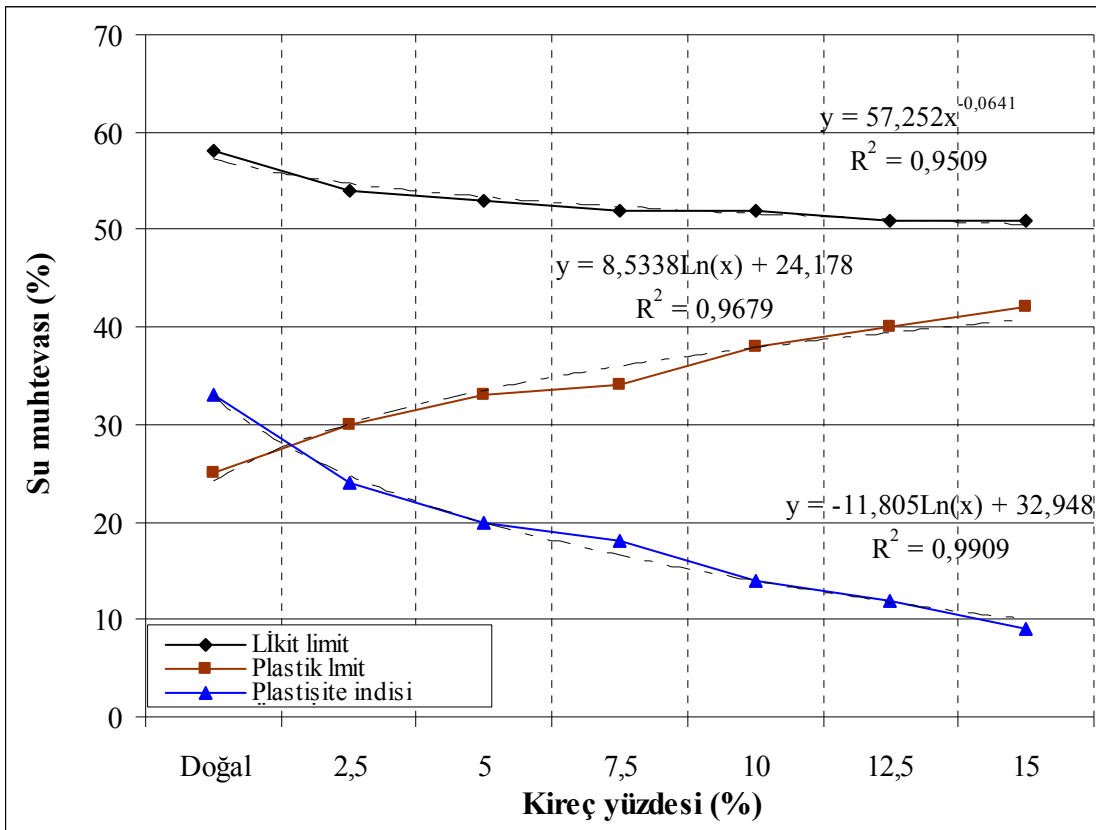
Kireç stabilize edilmiş balçık zemin tabaka tabaka test aletine yerleştirilmiş ve ön yüklemeler yapılarak sıkıştırılmıştır. Taban zemini seviyesindeki ve yüzeyden 30 cm aşağıdaki (geocell alt seviyesine eşit bir seviyedeki) oturmaları ve şekil değiştirmeler ölçmek için basınç ölçü aygıtları ve birim şekil değiştirme ölçü aygıtları yerleştirilmiştir. Böylece kireç ile stabilize edilmiş zemin tamamen test aletine yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır.

Model plaka yükleme deneyleri, doğal zemin (% 45 su muhtevalı), doğal zemin ve geocell; doğal zemin ve % 5, % 10, %15 oranlarında kireç; doğal zemin, % 5 kireç ve geocell; doğal zemin, % 10 kireç ve geocell gibi değişik durumlar için yapılmıştır. Bütün durumlar için 30 cm çaplı çelik yükleme plakası test kutusuna yerleştirilen malzemenin üzerine yerleştirildi. Yükleme, hidrolik piston ile uygulandı ve toprağa çelik plaka ile transfer edildi. Toprak yüzeyindeki şişme ve oturmaları ölçmek için Şekil 2.5 görülen hidrolik pistonun yanında yer alan, yer değiştireme ölçü aygıtı (LVDT) yardımıyla ölçülmüştür. Yük, tek dingilli aks yüküne (tek dingil aks yükü =10 ton, tekerlek yükü = 5 ton) ulaşana kadar testte devam edilmiştir. Yükleme 5 tona eriştiğinde test sonlandırılmıştır. Bütün veriler bilgisayar ortamına aktarılarak kayıt edilmiştir

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Kıvam (Atterbeg) Limiti Bulguları ve İrdelenmesi

Malzeme kil miktarının kuru ağırlıkça % 2.5, % 5, % 7.5, % 10, % 12.5 oranlarında kireç karıştırılarak kıvam limiti deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 3.1'de verilmiştir. Yapılan plastik limit ve likit limit deneyleri sonucunda, likit limit değerinin; doğal malzemeye % 2,5 kireç karıştırıldığında % 8 azaldığı, % 5 kireç karıştırıldığında % 9 azaldığı, % 7,5 ve % 10 kireç karıştırıldığında % 10 azaldığı, % 12,5 ve % 15 kireç karıştırıldığında % 12 azaldığı gözlenmiştir. Plastik limit değerinde ise doğal malzemeye % 2,5, % 5, % 7,5, % 10, % 12,5, % 15 kireç karıştırıldığında plastik limit değerinin, sırasıyla % 20, % 28, % 36, % 56, % 60, % 64 arttığı gözlenmiştir. Plastisite indisi değerinde en fazla düşme % 15 kireç katıldığında gözlenmiştir.



Şekil 3.1. Doğal halde ve değişik kireç yüzdelerinde Atterbeg limitleri

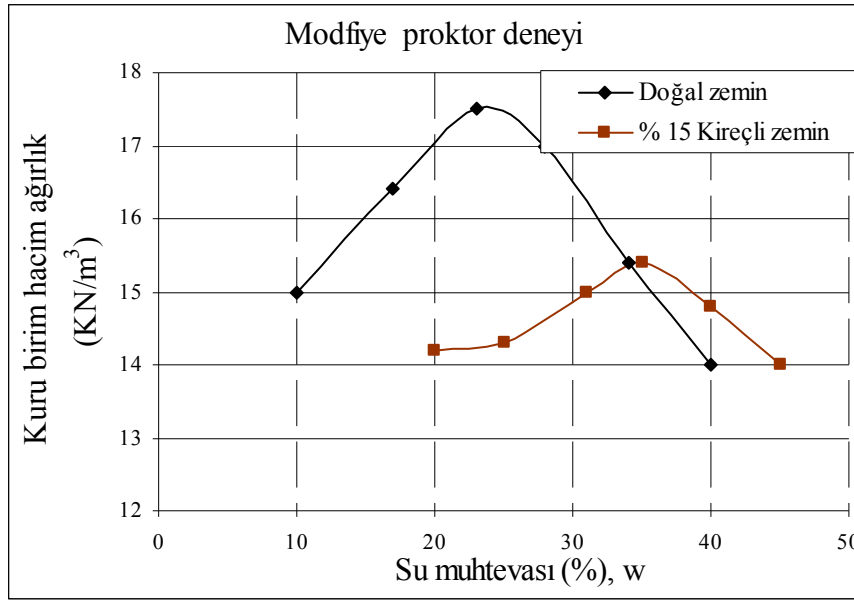
Şekil 3.1’de görüldüğü gibi killi bir malzemeye kireç karıştırıldıkça, daha önce yapılmış çalışmalara benzer şekilde likit limit düşmekte, plastik limit artmakta ve plastisite indisi düşmektedir. Zemine kireç karıştırıldıkça plastik limiti artarak ve plastisite indisi düşerek, zemin esnek halden sert hale geçtiği ve mukavemetinin arttığı bilinmektedir. Bu çalışmada, zemine % 12,5’ten sonra katılan kireç miktarının plastik limit değerinin artması ve plastisite indisinin düşmesi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Bu durumun yansımaları olarak % 15’ten sonra zemine katılan kirecin pek fazla mukavemet artışı sağlamayacağı düşünülmektedir.

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

Zemine doğal haliyle ve % 15 kireç katılarak yapılan modifiye proktor deneylerini sonuçları Tablo 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Modifiye proktor eğrileri incelendiğinde, killi zeminin doğal halde maksimum kuru birim hacim ağırlığı $17,5 \text{ KN/m}^2$ optimum su muhtevası %24,5, % 15 kireçli zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı $15,4 \text{ KN/m}^2$ optimum su muhtevası % 35 olduğu görülmüştür. Zemine % 15 kireç karıştırıldığında, maksimum kuru birim hacim ağırlık % 12 düşmüş, optimum su muhtevası % 11,5 artmıştır. Bunun nedeni, kireç zemindeki suyu emerek, zemindeki su içeriğini azaltığı için optimum su muhtevası artmaktadır.

Tablo 3.1. Modifiye proktor deneyi sonuçları

	Modifiye Proktor	
	$\gamma_k(\text{KN/m}^3)$	W (%)
Doğal zemin	17,5	23,5
% 15 kireçli zemin	15,4	35



Şekil 3.2. Doğal ve % 15 kireçli zemin için modifiye proktor eğrileri

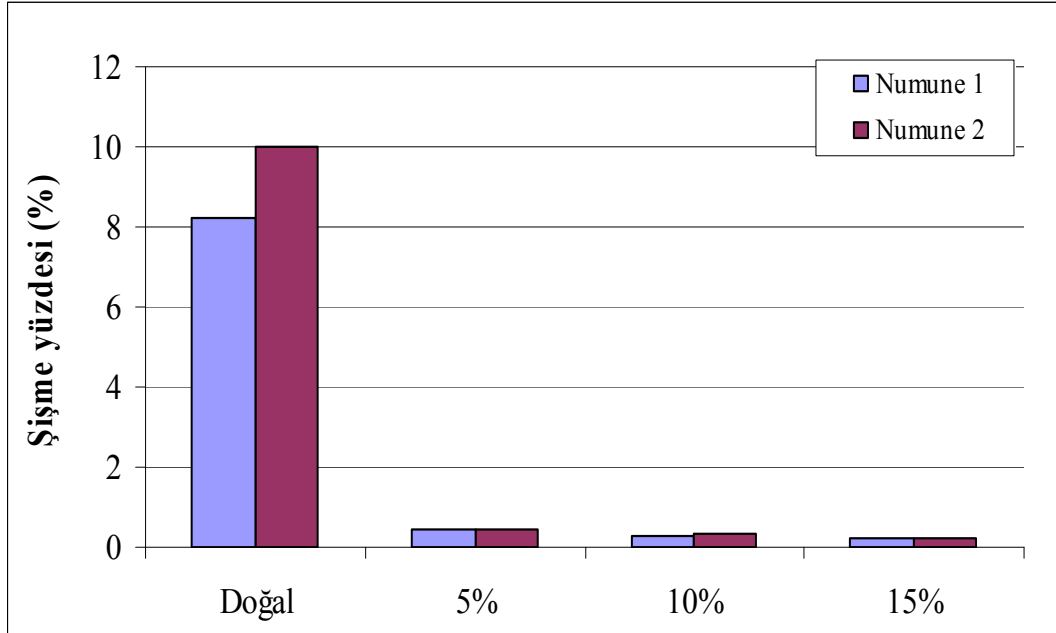
3.3. Şişme Yüzdesi Bulguları ve İrdelenmesi

Yaş CBR deneyi yapılmadan önce en kötü zemin koşullarının elde edilebilmesi için su içinde bekletilen numunelerin, kireçsiz ve kireçli durumlarda 4 gün sonunda oluşan şişme yüzdeleri aşağıda Tablo 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir. Şişme yüzdeleri doğal duruma göre, % 10'dan % 5 kireç oranında % 0,43'e, % 10 kireç oranında % 0,3'e, % 15 kireç oranında % 0,22 gibi oldukça küçük değerlere düşmüştür. Tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi killi zemine kireç karıştırıldıkça şişme potansiyeli düşmektedir. Bu durum, killi bir zemine kireç karıştırıldığında kil mineralleri ile kireç arasında oluşan adezyon (yapışma) sayesinde, kireç kil parçacıkların etrafını sararak su almasını engellediği için kil şişme özelliğini kaybeder ve tekrar su ile temas ettiğinde kil davranışı göstermeyerek şişme ve kabarmaları azalttığı şeklinde açıklanabilir.

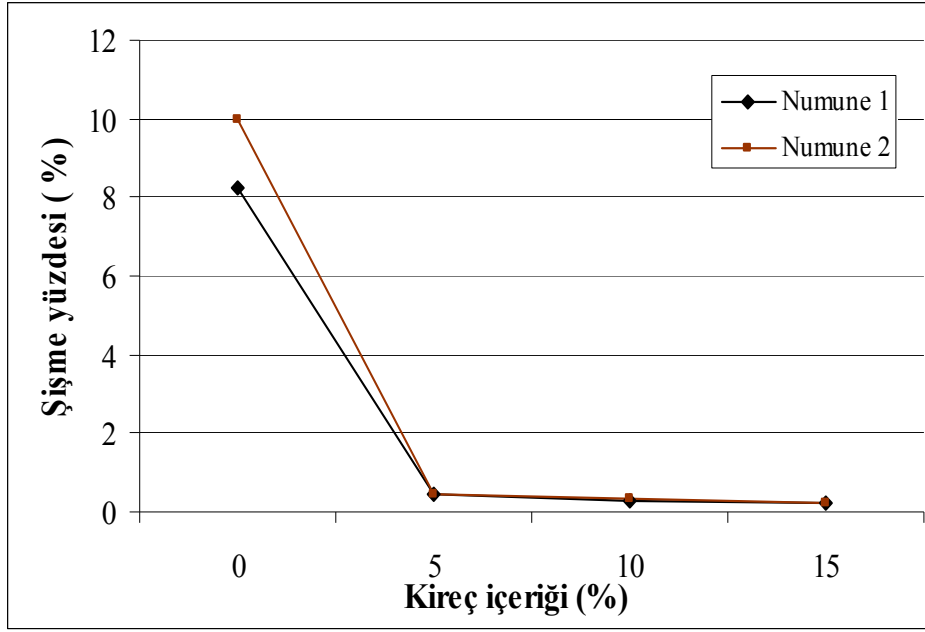
Bu deneyde elde edilen şişme yüzdesi değerlerine bakıldığında sonuçlar, Dinçer ve Berilgen' nin (1991) çalışmalarına paralellik göstermektedir. Dinçer ve Berilgen yaptıkları çalışmada, killi zemine kireç karıştırılmasıyla şişme potansiyelinin önemli ölçüde azaldığı sonucuna varmışlardı [1]. Karayolları Teknik Şartnamesi açısından bir değerlendirme yapılacak olursa, dolgular için şişme yüzdesi < %2 olmalıdır. Tablo 3.2 ve Şekil 3.4'deki deney sonuçlarından görüldüğü gibi killi zemin doğal halde bu şartı sağlamazken, kireçli durumda bu şartın fazlasıyla sağlandığı görülmektedir.

Tablo 3.2. Şişme değerlerinin tablo halinde gösterilmesi

	Şişme Yüzdesi (%)		
	Numune 1	Numune 2	Ortalama
Doğal	8,23	10	9,41
%5 kireç	0,43	0,44	0,435
%10 kireç	0,294	0,323	0,308
%15 kireç	0,205	0,235	0,22



Şekil 3.3. Değişik kireç oranlarında ve doğal durumdaki şişme yüzdelерinin karşılaştırılması



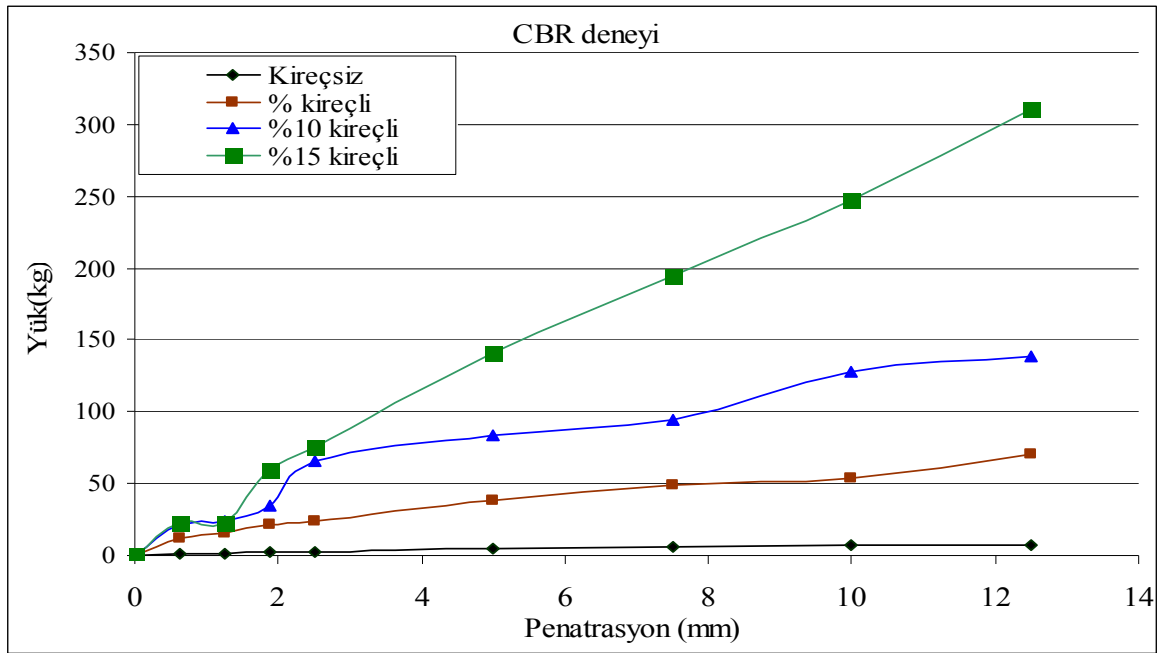
Şekil 3.4. Şişme yüzdesinin artan kireç miktarına bağlı olarak değişimi

3.4. CBR Deneyi Yük-Penetrasyon Bulguları ve İrdelenmesi

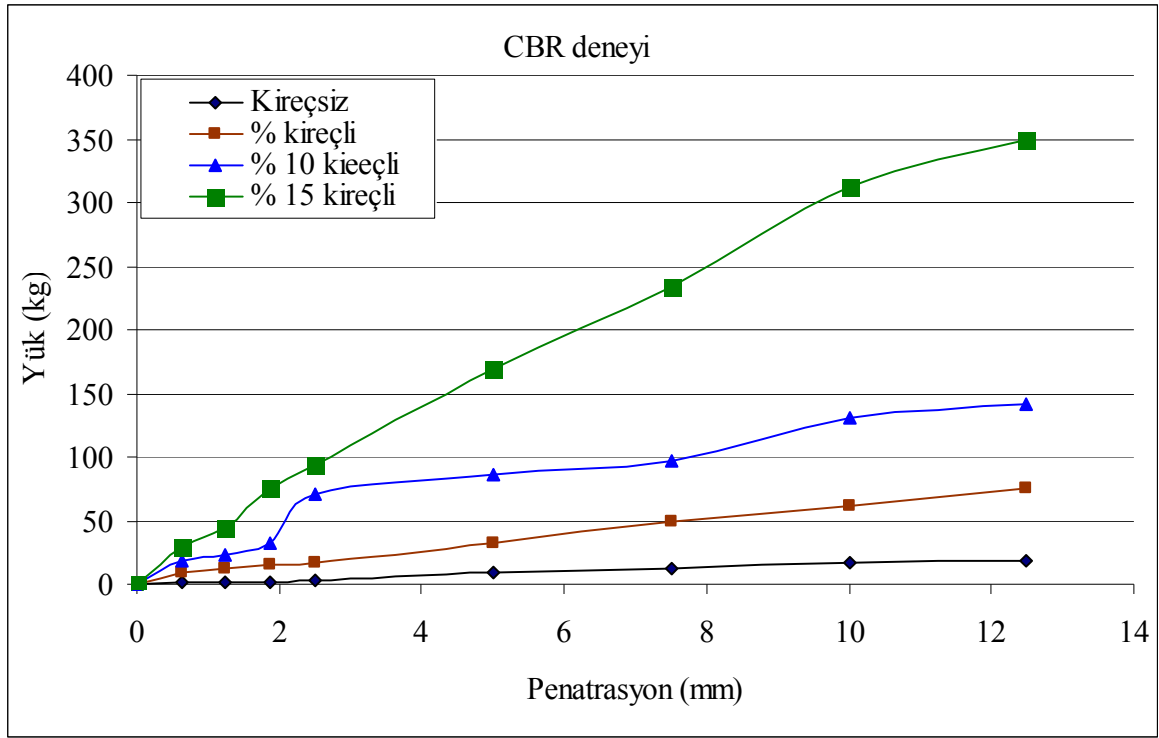
Laboratuarda yapılan CBR deneyi sonucunda, kireçli ve kirecsiz durumlarda elde edilen yük-penetrasyon değerleri Tablo 3.3, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir. Tablo ve Şekiller incelendiğinde numune 1 de, kirecsiz durumda 2,5 mm'lik penetrasyonda uygulanan yük 2,7 kg iken aynı batma miktarında % 5 kireç oranında 24,3 kg'a, %10 kireç oranında 50,5 kg'a, % 15 kireç oranında 75,5 kg olarak gözlenmiştir. Numune 2 de ise doğal halde 3 kg iken % 94,5 kg'a yükseldiği görülmektedir. Şekil 3.5'den görüldüğü gibi killi zemine kireç karıştırıldıkça, aynı batma miktarında doğal duruma kıyasla uygulanan yük artmaktadır. Bu durum, killi bir zemine kireç karıştırıldıkça zeminin katılaşıp plastik halden sert bir hale geçtiği ve bu durumun yansıması olarak mukavemetinin arttığı şeklinde düşünülmektedir.

Tablo 3.3. Doğal durumda ve değişik kireç yüzdelerinde bulunan yük- batma değerlerinin tablo halinde gösterilmesi

Batma (mm)	Yük (kgf)							
	Doğal		% 5 Kireç		%10 Kireç		% 15 Kireç	
	Numune 1	Numune 2	Numune 1	Numune 2	Numune 1	Numune 2	Numune 1	Numune 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,625	0,9	1,2	12	9	21	18	22,5	30
1,25	0,9	1,2	15	12	24	23	22,5	45
1,875	2,25	1,5	21	15	34,7	32	60	75
2,5	2,7	3	24,3	16,5	65,5	70,1	75,6	94,5
5	4,5	9	37,8	32,4	84	86	140,4	169
7,5	6	12	48,6	48,6	94,8	97,5	195	234
10	6,6	16,5	54	62,1	128,3	131	247	312
12,5	6,6	18	70,2	75,6	138,4	141	325	377



Şekil 3.5. Doğal durumda ve değişik kireç yüzdelerinde bulunan yük- batma değerlerinin grafik halinde gösterilmesi (numune 1)



Şekil 3.6. Doğal durumda ve değişik kireç yüzdelerinde bulunan yük- batma değerlerinin grafik halinde gösterilmesi (numune2)

3.5. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Bulguları ve İrdelenmesi

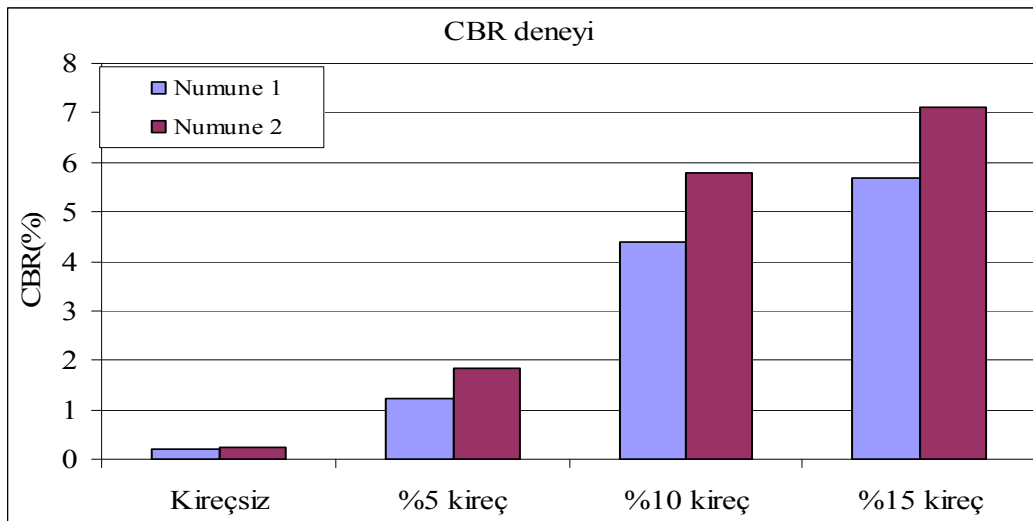
Yüksek su muhtevalı bir zemin üzerinde kireçsiz ve değişik kireç oranlarında yapılan CBR deney sonuçların karşılaştırılması aşağıda Tablo 3.4, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir. Tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi yüksek su muhtevalı bir zemine kireç karıştırıldığında CBR değerinde artışlar meydana gelmiştir. Kireçsiz durumda numune 1'in CBR değeri 0,2, numune 2'nin 0,23 gibi çok küçük değerler bulunmuştur. Zemine % 5 kireç karıştırıldığında numune 1'in CBR değeri 1,24, numune 2'nin 1,83'e yükselmiştir. Zemine % 10 kireç karıştırıldığında numune 1'in CBR değeri 4,4, numune 2'nin 5,5'e yükselmiştir. Zemine % 15 kireç karıştırıldığında numune 1'in CBR değeri 5,68, numune 2'nin 7,1'e yükselmiştir.

CBR değerinde en büyük artış % 15 kireç oranında görülmüştür. Görüldüğü gibi yüksek su muhtevalı bir zemine kireç karıştırıldığında, kireçsiz duruma göre CBR değerinde % 5 kireç oranında 6 kat, %10 kireç oranında 21 kat, %15 kireç oranında 35 kata varan artışlar meydana geldiği gözlenmiştir. Şekil 3.8'deki eğri incelendiğinde % 10 kireç oranına kadar

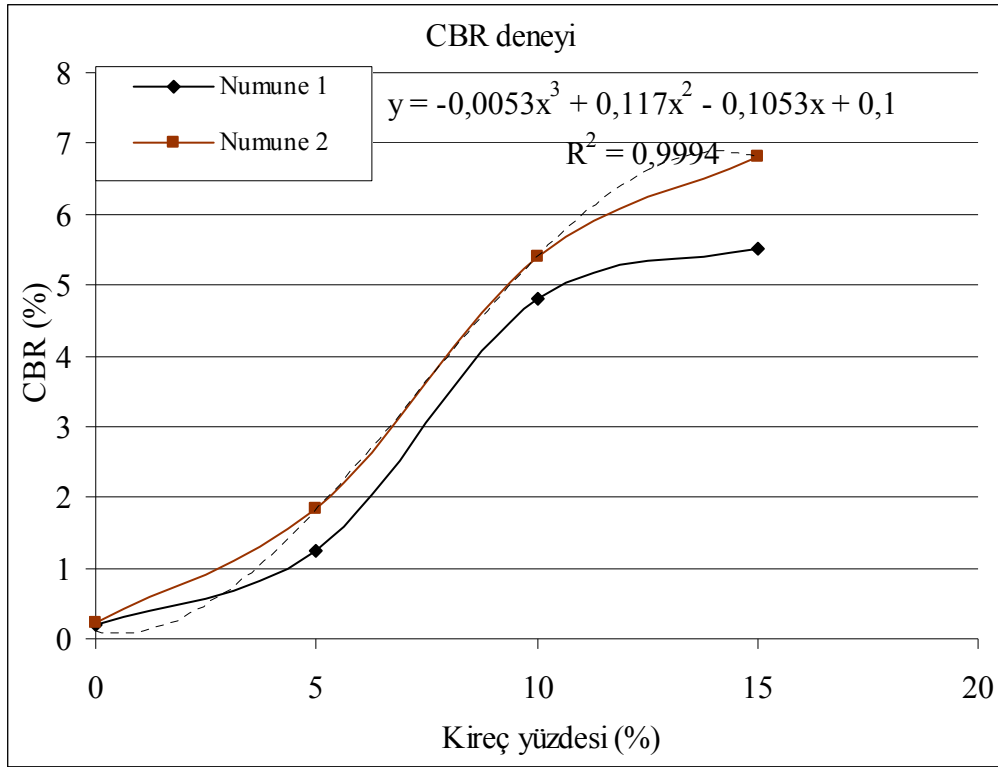
CBR değeri, artan bir şekilde artmış olup, % 10 kireç oranından sonra azalan bir şekilde artmaya devam ettiği görülmüştür. % 15 kireç oranından sonra zemine katılacak olan kireç mukavemet artışı sağlamayacağı, sağlarsa da çok az sağlayacağı düşünülebilir. Bu durum, zeminde su muhtevasının yüksek olduğu zamanlarda kireç kullanılarak zemin su muhtevası hızlı bir şekilde düşürülebilmekte ve zeminin su muhtevasının yüksek olmasından dolayı taşıma kapasitesi de kilden kaynaklı düşük ise bu sayede yükseltilebilir taşıma kapasitesi artırılabilir, ancak belli yüzdeden sonra zemine katılan kireç zemindeki filler malzeme miktarını artırarak sıkışabilirliği azaltığı için mukavemet artışı sağlamadığı şeklinde açıklanabilir. Bu durum şu şekilde de açıklanabilir; zemine katılan kireç, zemindeki kil taneleri ile reaksiyona girer ve zemine katılan belli bir kireç yüzdesine kadar zemindeki bütün kil parçacıkları, kireç ile reaksiyona girer ve o kireç yüzdesinden sonra katılan kireç artık daha reaksiyon gerçekleştirmez. Bundan dolayı, zeminde mukavemet artışı olmaz.

Tablo 3.4. Yaş CBR değerleri

	CBR (%)	
	Numune 1	Numune 2
Doğal	0,20	0,23
% 5 Kireç	1,24	1,83
%10 Kireç	4,8	5,3
%15 Kireç	5,5	6,9



Şekil 3.7. Kireçsiz ve kireçli durumlarda yapılan yaş CBR deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 3.8. Yaş CBR değerinin kireç miktarına bağlı olarak değişimi

Kavak ve Keskin (2008) yaptıkları çalışmada, su muhtevası optimum su muhtevasından % 12 daha fazla olan yüksek su muhtevalı bir zemini kireç ile stabilize etmişlerdi ve CBR değerinde 8 kata varan artışlar meydana geldiği sonucuna varmışlardı [2]. Bu çalışmada, elde edilen CBR değerleri Şekil 3.8'den de görüldüğü gibi Kavak ve Keskin'nin yaptıkları çalışmaya benzerlik göstermiştir. Bu çalışmada, yüksek su muhtevalı bir zemine kireç karıştırıldığında kirecsiz duruma göre özellikle % 15 kireç oranında 34 kata varan artışlar elde edilmiştir. Ancak değer olarak bakıldığında beklenen artış elde edilememiştir. Çünkü Karayolları Şartnamesine göre $CBR < 10$ olan zeminler zayıf zemin olarak kabul edilmektedir. Bu bilgi dahilinde değerlendirme yapılacak olursa, su muhtevası optimum su muhtevasından % 20 daha fazla olan yüksek su muhtevalı zemine % 15 kireç karıştırıldığında dahi CBR değerinin 6,9 bulunması, bu zemin hala zayıf zemin özelliği taşıdığını göstermektedir.

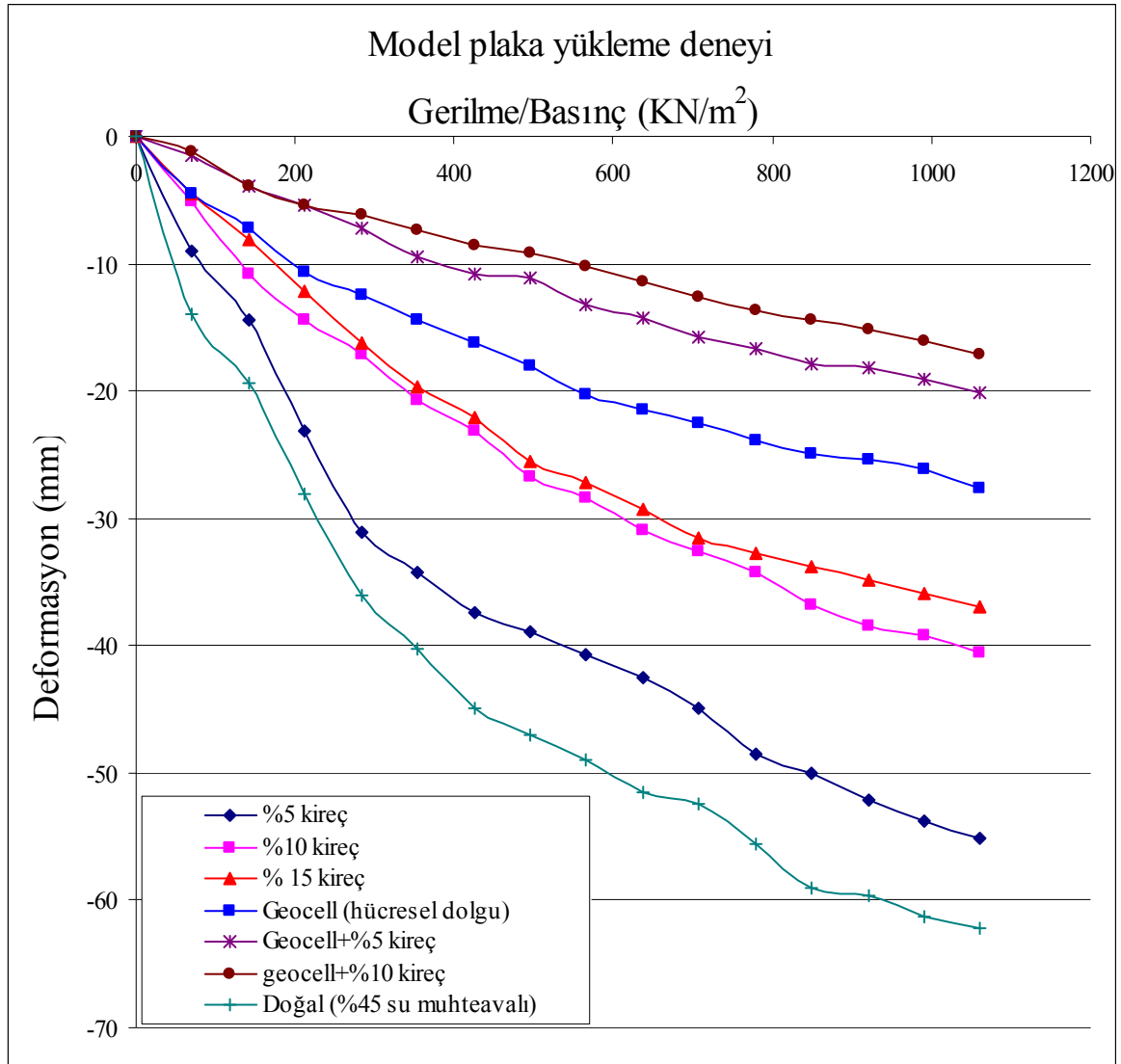
3.6. Yük- Deformasyon Bulguları ve İrdelenmesi

Laboratuarda yapılan model plaka yükleme deneyleri ile yüksek su muhtevalı ve killi bir zeminde kireç stabilizasyonun ve geocell güçlendirmenin etkileri ayrı ayrı incelenmiş olup; doğal halde, % 5, % 10, % 15 kireç oranlarında, geocell, goecell ve % 5 kireç, geocell ve % 10 kireç gibi değişik durumlardaki yük-deformasyon ilişkisinin karşılaştırılması Tablo 3.5'te ve Şekil 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.5. Yük deformasyon değerleri

Yük (KN)	Yüzeydeki Gerilme/ basınç (KN/ m ²)	Deformasyonlar (mm)						
		Doğal	% 5 Kireç	%10 Kireç	%15 kireç	Goecell	Geocell + %5 Kireç	Geocell + %10 Kireç
0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	70,771	-13,99	-8,99	-5,12	-4,5	-4,477	-1,557	-1,2
1000	141,543	-19,39	-14,39	-10,87	-8,07	-7,214	-3,914	-3,841
1500	212,314	-28,08	-23,08	-14,35	-12,16	-10,625	-5,427	-5,337
2000	283,086	-36,04	-31,04	-17,13	-16,24	-12,5	-7,2	-6,12
2500	353,857	-40,31	-34,31	-20,73	-19,69	-14,362	-9,452	-7,327
3000	424,628	-44,9	-37,4	-23,06	-22,14	-16,183	-10,812	-8,612
3500	495,4	-46,95	-38,85	-26,73	-25,53	-18,07	-11,083	-9,182
4000	566,171	-48,98	-40,75	-28,39	-27,14	-20,313	-13,233	-10,241
4500	636,943	-51,55	-42,55	-30,99	-29,35	-21,536	-14,323	-11,443
5000	707,714	-52,42	-44,92	-32,53	-31,5	-22,512	-15,761	-12,654
5500	778,485	-55,53	-48,53	-34,2	-32,76	-23,834	-16,656	-13,725
6000	849,257	-58,99	-49,99	-36,86	-33,85	-24,927	-17,893	-14,387
6500	920,028	-59,66	-52,16	-38,46	-34,91	-25,331	-18,146	-15,132
7000	990,8	-61,3	-53,8	-39,21	-35,92	-26,2	-19,13	-16,105
7500	1061,571	-62,19	-55,19	-40,57	-36,94	-27,68	-20,15	-17,07

Tablo 3.5'te ve Şekil 3.9'daki sonuçlar incelendiğinde; 10kg/cm² gerilmeye doğal durumda maksimum deformasyon 61,32 mm iken, % 5 kireç katıldıktan sonra 53,80 mm ye, %10 kireç katıldığında 39,21 mm'ye ve % 15 kireç katıldığında 28,92 mm ye düşmüştür. Taban zeminin geocell güçlendirilmesi durumunda maksimum deformasyon 61,32 mm'den (doğal durumda) 26,2 mm'ye, % 5 kireç ve geocell durumunda 19,13 mm'ye ve % 10 kireç ve geocell durumunda 16,105 mm'ye düşmüştür.



Şekil 3.9. Plaka yükleme deneylerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri

Zeminin kireç ile stabilizasyon edilmesiyle deformasyon % 5 kireç oranında % 10, % 10 kireç oranında % 35, % 15 kireç oranında % 40 düşme görülmüştür. Görüldüğü gibi % 10 kireç oranından sonra zemine katılan % 15 kireç oranında deformasyonda pek fazla

düşme sağlamamıştır. % 10'dan sonra zemine katılan kirecin deformasyonda pek fazla düşme sağlamamasının sebebi CBR değerinde olduğu gibi zemindeki kil miktarının azalması ve filler malzeme miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zemin geocelle güçlendirilmesi durumunda deformasyonda % 55 düşme ile deformasyondaki azalma üzerinde biraz daha fazla etkili olduğu göze çarpmaktadır. Geocell ve 10 kireç durumunda % 75 ile deformasyonda en fazla düşme sağlanmıştır.

3.7. Düşey Gerilmelerdeki Azalma Bulguları ve İrdelenmesi

Taban zemini üzerindeki düşey gerilmeler yükleme boyunca, yükleme plakasına farklı mesafedeki gerilme ölçme aletleri ile ölçüldü. Tablo 3.6'da doğal halde, Tablo 3.7'de değişik kireç oranlarında stabilize edilmiş taban zeminin durumunda, taban yüzeyinden 30 cm aşağıdaki yani geocell alt seviyesine eşit bir mesafede taban zemini üzerindeki düşey gerilmeler ve Tablo 3.8'de hücrel yük taşıma sistemi ile güçlendirilmiş taban durumunda geocell alt seviyesindeki düşey gerilmeler verilmiştir.

Tablo 3.6. Doğal halde yüzeyden 30 cm aşağıdaki düşey gerilmeler

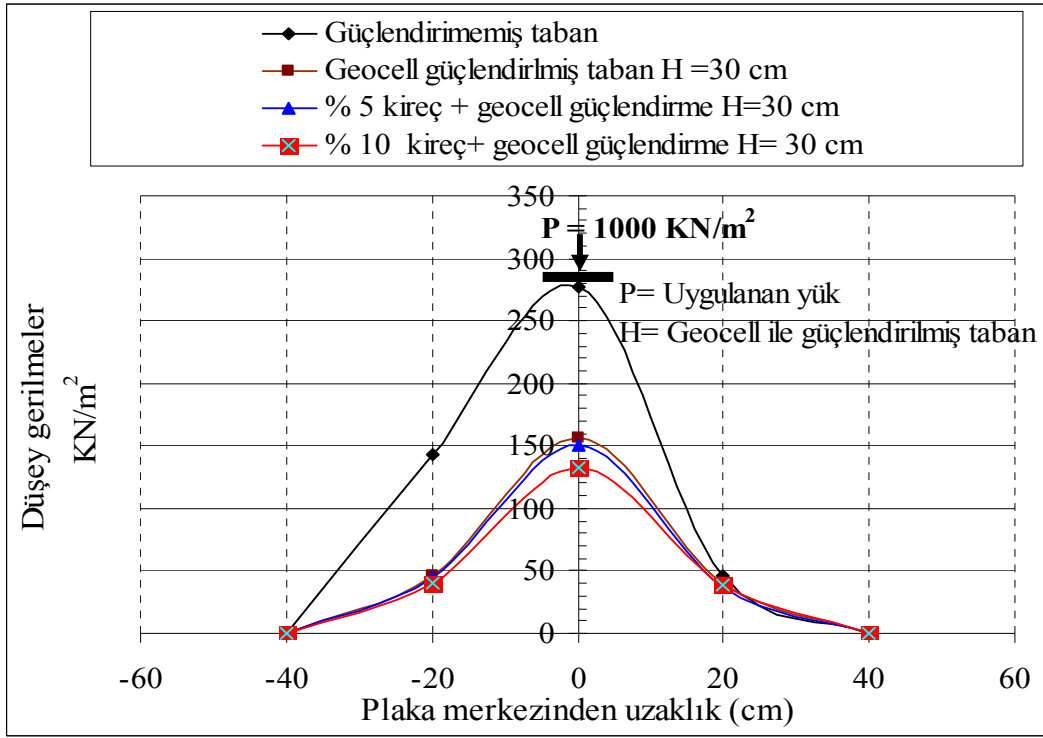
Yüzeydeki Basınç/gerilme (KN/m ²)	Düşey Gerilmeler		
	σ_{sol}	σ_{orta}	$\sigma_{sağ}$
70	26	70	9
140	37	15	12
210	47	130	15
280	59	152	18
350	68	175	20
420	82	194	22
490	88	204	31
560	91,3	211	31,4
630	94,5	125	31,8
700	97,8	228	32,2
770	114	39	35
840	124	248	37
910	132	259	38
1000	143	277	41

Tablo 3.7. Hücresel dolgu sistemi (geocell) alt seviyesindeki düşey gerilmeler

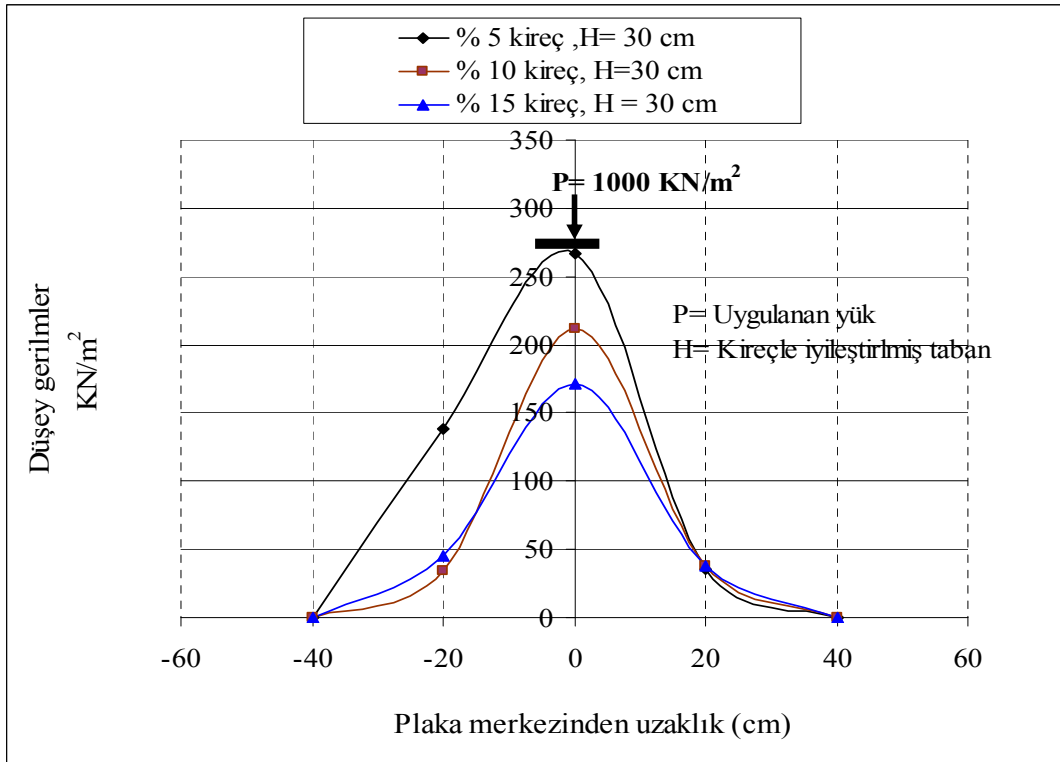
Basınç (KN/m ²)	Geocell alt seviyesindeki düşey gerilmeler								
	Geocell Güçlendirme			% 5 Kireç + Geocell Güçlendirme			% 10 Kireç + Geocell Güçlendirme		
	σ_{sol}	σ_{orta}	$\sigma_{sağ}$	σ_{sol}	σ_{orta}	$\sigma_{sağ}$	σ_{sol}	σ_{orta}	$\sigma_{sağ}$
70	4,4	15	4,5	2,4	13	2,5	1,4	12,35	0,5
140	7,5	27	7,5	5,5	25	5,5	2,5	20	20,5
210	9,5	33	8,5	7,5	31	6,5	4,5	26	22,5
280	11,5	41	11,5	9,5	38	9,5	6,5	28	7
350	13,5	56,2	13,5	11,5	53	11,5	6,5	43	9,5
420	19,5	65,2	15,5	17,5	62	13,5	12,5	52	11,5
490	26,5	74,2	17,5	24,5	71	15,5	19,5	61	14,5
560	29,5	84	21,5	27,5	80	19,5	22,5	70	18,5
630	33,5	94	24,5	31,5	90	22,5	26,5	70	21,5
700	35,5	114	26,5	33,5	110	24,5	28,5	95	24
770	371,5	125,7	28,5	369,5	122	26,5	364,5	106	27
840	41,5	136,8	33,5	39,5	133	31,5	34,5	116	31
910	44,5	146,5	35,5	42,5	142	33,5	37,5	125,5	33,5
1000	46,5	156	39,5	44,5	151	37,5	39,5	133	38

Tablo 3,8. Değişik kireç oranlarında yüzeyden 30 cm aşağıdaki düşey gerilmeler

Basınç (KN/m ²)	Düşey Gerilmeler								
	% 5 kireç			% 10 kireç			%15 kireç		
	σ_{sol}	σ_{orta}	$\sigma_{sağ}$	σ_{sol}	σ_{orta}	$\sigma_{sağ}$	σ_{sol}	σ_{orta}	$\sigma_{sağ}$
70	21	65	4	3,5	15	3	3	16	3
140	32	10	7	4	22	35	6	27	6
210	42	125	10	4,3	37	38	8	34	7
280	54	147	13	8	51	4	10	49	10
350	63	165	15	8,5	67	7	12	58	12
420	77	184	17	9	76	9	18	67	14
490	83	194	26	10	94	13	25	76	16
560	86,25	201	26,38	14	111	17	28	97	20
630	89,50	115	26,75	18	129	20	32	109	23
700	92,75	218	27,13	20	145	23	34	109	25
770	109	29	30	25	160	27	370	121	27
840	119	238	32	28	17,6	30	40	133	32
910	127	249	33	31	191	33	43	158	34
1000	138	267	36	34	212	38	45	171	38



Şekil 3.10. Güçlendirilmemiş taban ve geocell güçlendirilmiş taban üzerindeki düşey gerilmeler



Şekil 3.11. Değişik kireç yüzdelerinde stabilize edilmiş taban yüzeyinden 30 cm aşağıdaki düşey gerilmeler

Kireç stabilizasyonu ile geocell güçlendirme arasında bir kıyas yapılacak olursa, sadece geocell güçlendirilmiş tabandaki düşey gerilmeler (yüzeyden 30 cm aşağıda ve plaka merkezindeki gerilmeler), % 15 kireç ile stabilize edilmiş tabaninkinden % 10 daha azdır. Geocell güçlendirme, düşey gerilmeleri azaltmada kireç stabilizasyondan daha etkili olduğu görülmektedir. Geocell malzeme geometrik yapısı bakımından içindeki dolgu malzemesini yanal hareketlerini engelleyerek eğilme mukavemeti yüksek sert bir tabaka oluşturur. Bu sayede yükü geniş bir alana yayarak düşey gerilmeleri azatlığı, bu durumun etkili bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

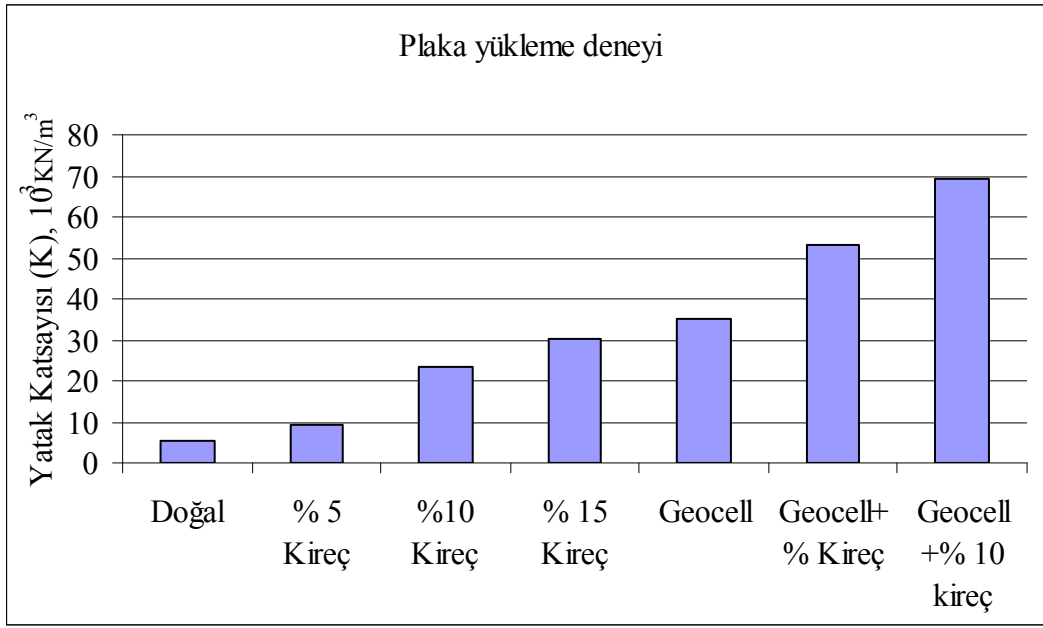
Yük-deformasyon eğrileri ve geocell altındaki düşey gerilme azalması grafikleri incelendiğinde sonuçlar, Dash (2003) ve Emersbelen (2008) yaptıkları çalışmalara benzerlik göstermektedir. Dash (2003) ve Emersbelen (2008) yaptıkları çalışmalarda, geocell güçlendirilmiş zemin düşey gerilmeleri % 50'e varan oranlarda azatlığı sonucuna varmışlardır.

3.8. Yatak Katsayısı Bulguları

Yapılan plaka yükleme deneyleri sonucunda yatak katsayısı değerleri yük-deformasyon eğrisinin eğimi yardımıyla hesaplanmıştır ve değişik kireç oranlarında ve geocell kullanılması durumunda yatak katsayısı değerleri Tablo 3.9'da ve Şekil 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.9. Yatak katsayısı değerleri

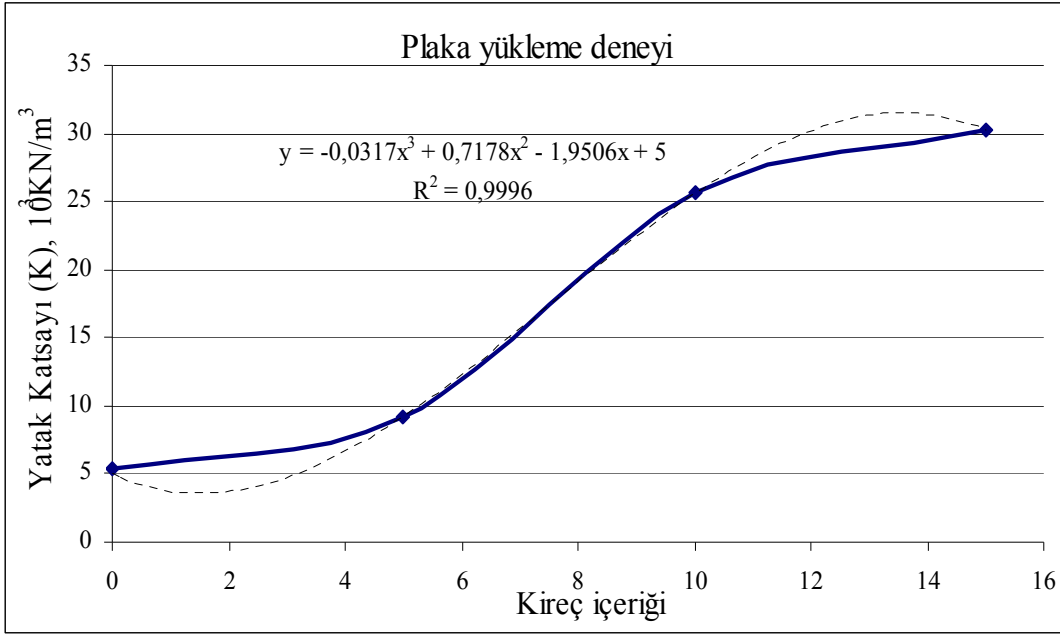
	Yatak katsayısı (K,KN/m ³)
Doğal zemin (% 45 su muhtevalı)	5439
Doğal zemin+ % 5 kireç	9231
Doğal zemin +% 10 kireç	23583
Doğal zemin +% 15 kireç	30285
Doğal zemin + Geocell güçlendirme	35350
Doğal zemin + % 5 kireç + Geocell güçlendirme	53000
Doğal zemin +% 10 kireç + Geocell güçlendirme	69230



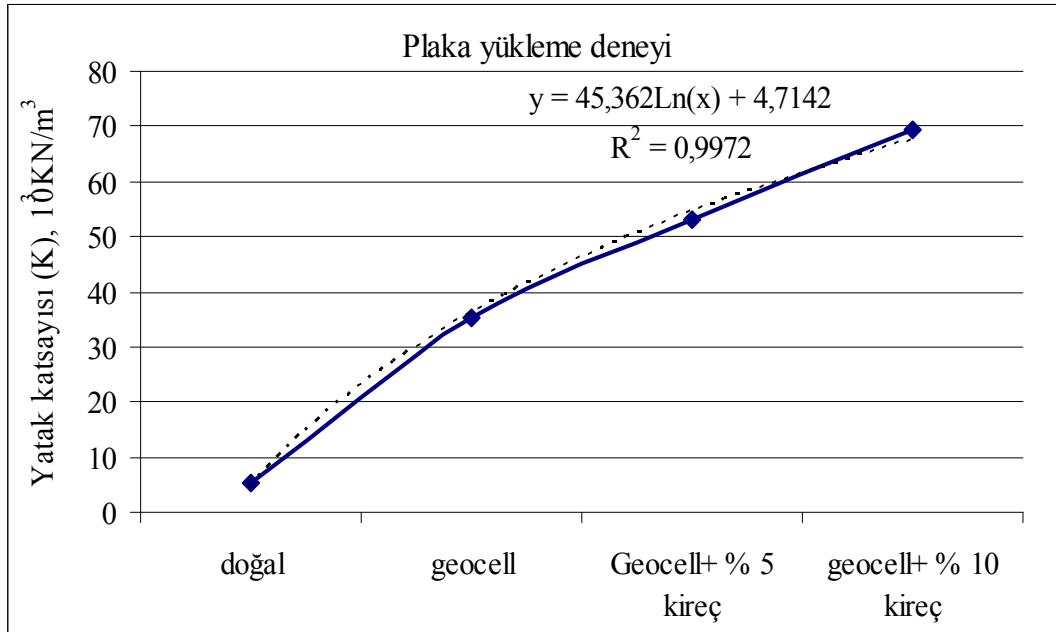
Şekil 3.12. Geocell ve değişik kireç oranlarında yatak katsayısı değerlerinin karşılaştırılması

Yatak katsayısı değerleri incelendiğinde, % 5, % 10, % 15 kireçli durumda, kireçsiz duruma oranla sırasıyla 2 kat, 4 kat, 5,5 kat artış meydana geldiği görülmektedir. Geocell güçlendirilmiş durumda güçlendirilmemiş duruma oranla 6,5 kat, % 10 kireç ile stabilize edilmiş duruma oranla 1,5 kat artış meydana gelmiştir. % 10 kireç ile stabilize edilmiş taban zemini üzerine yapılan geocell güçlendirme durumunda yatak katsayısı değeri, doğal duruma oranla yaklaşık 14 kat, % 15 kireç ile stabilize edilmiş taban zeminine oranla yaklaşık 2,5 kat artmıştır.

Yatak katsayısı değeri de CBR değerinde olduğu gibi yüksek su muhtevalı bir zemin kireç ile stabilize edilmesi durumunda, % 10 kireç oranına kadar sürekli bir şekilde arttığı, % 10 kireç oranından sonra azalan bir şekilde arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.13). Karayolları teknik şartnamesine göre yol taban zeminin yatak katsayısı (K) , iyileştirilmiş taban durumunda $5,5 \text{ kg/cm}^3$ den az olmamalıdır [25]. Bu standart göre ne hücresel dolgu sistemi ile güçlendirme durumunda, ne de % 15 kireç ile taban zeminin stabilize edilmesi durumunda bu değere ulaşılmıştır. Ancak, yüksek su muhtevalı killi tabanın önce % 10 kireç ile stabilize edilip daha sonra hücresel yük taşıma sistemi ile güçlendirilmesi durumunda (Şekil 3.14) K değeri $6,5 \text{ kg/cm}^2$ 'ye ulaşmış olup, karayolları şartı sağlanmıştır.



Şekil 3.13. Yatak katsayısının kireç miktarına bağlı olarak değişimi



Şekil 3.14. Geocell ve değişik kireç oranlarında yatak katsayısı değerlerinin değişimi

3.8.1. Yatak Katsayısına Karşılık Gelen Yaklaşık CBR Değeri ile Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyinden Elde Edilen CBR Bulgularının Karşılaştırılması

Plaka yükleme deneyinden elde edilen yatak katsayılarına karşılık gelen CBR değeri Şekil 1.6'daki eğri yardımıyla hesaplanmış olup Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10'daki CBR değerleri ile daha önce Tablo 3.4'te verilen Kaliforniya Taşıma Oranı deneyinden elde edilen gerçek CBR değerleri karşılaştırıldığında, aynı kireç içeriğinde birbirine eşit olması umuluyordu; fakat birbirine eşit olmadığı görülmüştür. Yatak katsayısı yardımıyla bulunan CBR değerleri, gerçek CBR değerlerinden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu nedenle kitaplardaki yatak katsayısı CBR ilişkisi eğrileri tutarlı sonuçlar vermediği anlaşılmaktadır.

Tablo 3.10. Yatak katsayısına karşılık gelen CBR değerleri

	K(KN/m ³)	CBR(%)
Doğal zemin (% 45 su muhtevalı)	5439	<1
Doğal zemin+ % 5 kireç	9231	<1
Doğal zemin +% 10 kireç	23583	1,8
Doğal zemin +% 15 kireç	30285	3,51
Doğal zemin + geocell güçlendirme	35350	4,81
Doğal zemin +% 5 kireç + geocell güç.	53000	9,48
Doğal zemin+% 10 kireç + geocell güç.	69230	17,5

3.9. Taşıma Kapasitesi ve Dolgu Kalınlığı Bulgularının İrdelenmesi

Plaka yükleme deneyinden elde edilen yük- deformasyon eğrisindeki 10 mm'lik oturmaya karşılık gelen gerilmenin yarısı taban zemininin taşıma kapasitesini verdiği bilinmektedir. Bu bilgiden yola çıkarak yük- deformasyon eğrilerinde 10 mm' ye karşılık gelen gerilmelerin yarısı hesaplanmış olup taşıma gücü değerleri belirlenmiştir. Tablo 3.11 ve Şekil 3.16'da taşıma gücü değerleri verilmiştir.

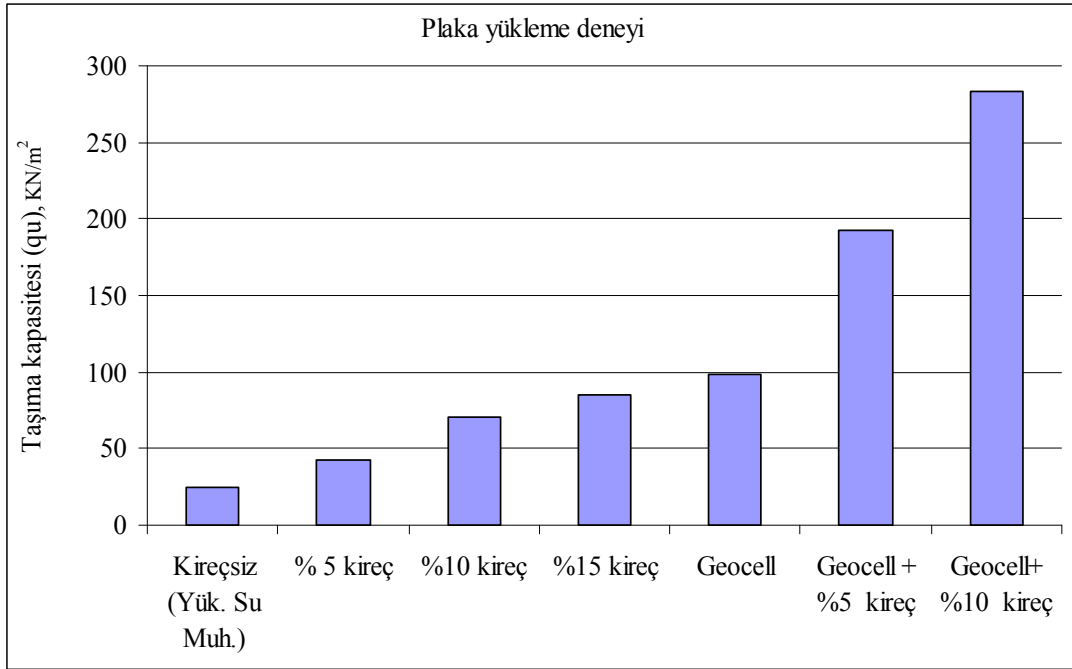
Yüksek su muhtevalı (% 45) zeminin doğal halde yani kireç ile stabilize edilmeden önce taşıma kapasitesi 20 KN/m² iken, kireç ile stabilize edildikten sonra % 5 kireç oranında 2 kat, % 10 kireç oranında yaklaşık 3 kat, % 15 kireç oranında yaklaşık 3,5 kat

artış meydana gelmiştir. Yüksek su muhtevalı killi taban zemininin kireçle stabilize edilmesi durumunda taşıma kapasitesi değeri, CBR ve yatak katsayısı değerinde olduğu gibi % 10 kireç oranına kadar keskin bir şekilde artış göstermiştir. Ancak % 10 kireç oranından sonra taşıma kapasitesi azalan bir şekilde artış göstermiştir (Şekil 3.17). Dolayısıyla, % 15'ten sonra zemine katılan kirecin taşıma kapasitesinde önemli bir artış sağlamayacağı düşünülmektedir. Zemine katılan kireç miktarının belli bir yüzdeden sonra zeminde önemli bir mukavemet artışı sağlamayacağı bilgisi doğrulanmış olmaktadır [22].

Tablo 3.11 Taşıma kapasitesi değerleri

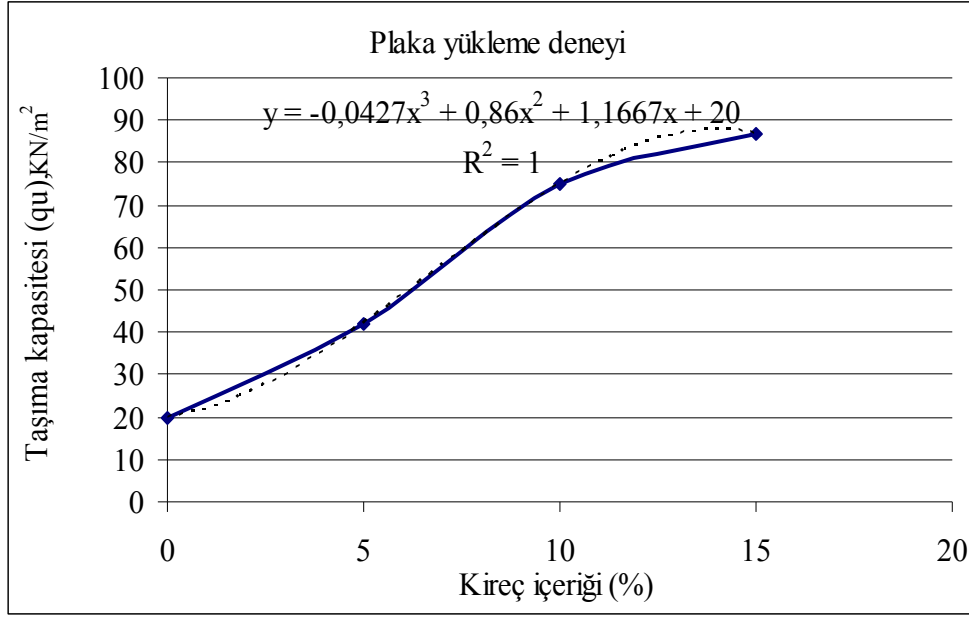
	Taban zemini taşıma kapasitesi (q_u) (KN/m ²)
Doğal zemin (%45 su muhtevalı)	20
Doğal zemin+ %5 kireç	41,89
Doğal zemin +%10 kireç	75,05
Doğal zemin +%15 kireç	87,28
Doğal zemin + Geocell güçlendirme	99,46
Doğal zemin +%5 kireç + Geocell güç.	192
Doğal zemin+%10 kireç + Geocell güç	283

Doğal duruma kıyasla, yüksek su muhtevalı killi zeminin yalnız geocell ile güçlendirilmesi durumunda taşıma kapasitesi 5 kat, geocell ve % 5 kireç oranında yaklaşık 10 kat, geocell ve %10 kireç oranında 14 kata varan artışlar meydana gelmiştir. Geocell ve kirecin birlikte kullanılması durumunda taşıma kapasitesi doğrusal bir şekilde artış göstermiştir (Şekil 3.18). Geocell güçlendirme ile kireç stabilizasyonu arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa, yalnız geocell güçlendirme taşıma kapasitesini % 15 kireç stabilizasyonundan % 13 daha fazla artırmıştır. Bunun nedeni, geocell güçlendirme yükü daha geniş bir alana yayarak düşey gerilmeleri ve oturmaları daha fazla azalttığı için taşıma kapasitesini kireç stabilizasyonundan daha fazla artırır. Geocell güçlendirilme, yüksek su muhtevalı killi taban zeminin taşıma kapasitesini kireç stabilizasyonuna göre çok daha fazla artırması bekleniyordu. Fakat % 15 kireç stabilizasyonunda elde edilen taşıma kapasitesine yakın çıkmıştır

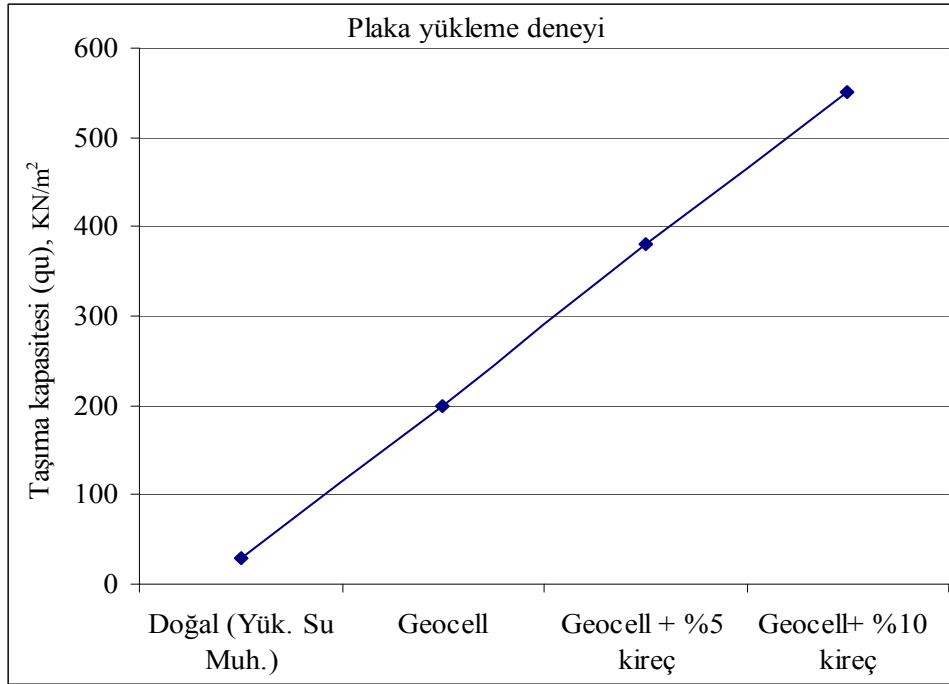


Şekil 3.16. Değişik kireç oranlarında ve geocell güçlendirme durumunda elde edilen taşıma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.18'deki eğri incelendiğinde sonuçlar; Moghadas (2009) ve Dash (2003) yaptıkları çalışmalara benzer şekilde geocell güçlendirme; yüksek su muhtevalı taban zeminin taşıma kapasitesini, doğal duruma göre önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Şekil 3.17'deki eğri incelendiğinde sonuçlar, Kavak (1996) ve Sivapullaiah (2002) yaptıkları çalışmalara benzerlik göstermiş olup, kireç stabilizasyonu taşıma kapasitesini biraz artırmıştır. Fakat Kavak ve Keskin'nin (2009) yaptıkları benzer şekilde yeterince arttırdığı söylenemez. Karayolları Teknik Şartnamesine göre değerlendirme yapılacak olursa, iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesi (q_u) 5 kg/cm^2 den büyük olmalıdır [25]. % 15 kireç stabilizasyonunda $q_u = 0,87 \text{ kg/cm}^2$, geocell güçlendirme durumunda $q_u = 1 \text{ kg/cm}^2$ olup, her iki durumda da istenilen taşıma kapasitesi elde edilememiştir. Görüldüğü gibi kireç stabilizasyonu veya geocell güçlendirme, tek başına kullanıldığında, yüksek su muhtevalı taban zeminin taşıma kapasitesini yeterince arttırdığı söylenemez. Geocell ve % 10 kireç oranında taşıma kapasitesinde en fazla artış elde edilmiş olup ($q_u = 2,83 \text{ kg/cm}^2$) istenilen kriter biraz daha fazla sağlanmıştır.



Şekil 3.17. Kireç içeriğine göre taşıma kapasitesinin değişimi



Şekil 3.18 Geocell ve kireç içeriğine göre taşıma kapasitesinin değişimi

Dolgu Kalınlığının Hesaplanması;

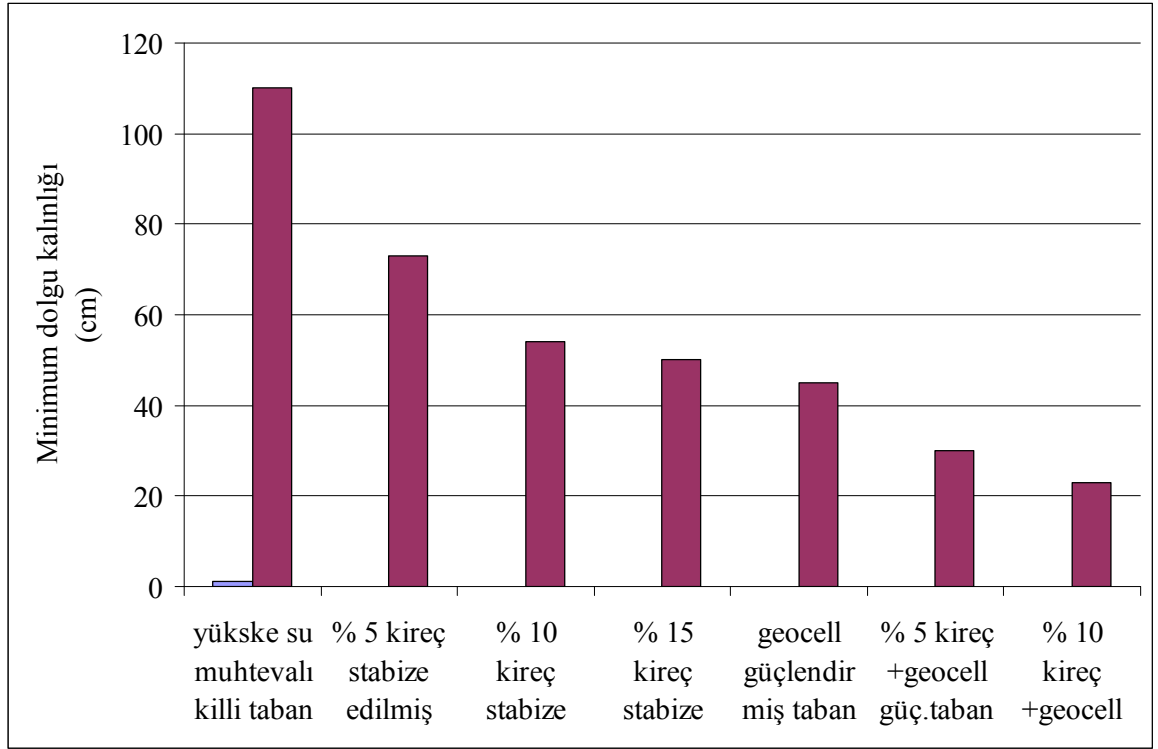
Plaka yükleme deney sonuçlarından elde edilen yol taban zemini taşıma kapasitelerine karşılık gelen minimum dolgu kalınlığını belirlemek için Boosnesq teorisi (Bağıntı 1.10 ve 1.20) ile dolgu kalınlığı hesaplanmıştır. Yüksek su muhtevalı killi taban, değişik

kireç yüzdelerinde (% 5, % 10,% 15) stabilize edilmiş taban ve geocell ile güçlendirilmiş taban durumlarında hesaplanan dolgu kalınlığı Tablo 3.13'te ve Şekil 3.19'da verilmiştir. Hesaplarda, tek dingil aks ağırlı 10 ton olup, tekerlek yükü: P= 5 ton ve tekerlek şişme basıncı ($p = 690 \text{ KN/m}^2$) Karayolları Şartnamesi kriterlerine uygun olarak seçilmiştir.

Tablo 3.12. Değişik iyileştirme durumları için hesaplanmış minimum dolgu kalınlığı

	q_u (KN/m^2)	Dolgu kalınlığı (cm)
Doğal zemin (% 45 su muhtevalı)	18	120
Doğal zemin+ % 5 kireç	41,89	73
Doğal zemin +% 10 kireç	75,05	54
Doğal zemin +% 15 kireç	85,28	50
Doğal zemin +Geocell güçlendirme	99,46	45
Doğal zemin + % 5 kireç + Geocell güç.	192	30
Doğal zemin+% 10 kireç + Geocell güç.	283	23

Tablo 3.13'teki değerlere göre, dolgu kalınlığı en fazla doğal zemin durumunda çıkmıştır. En düşük % 10 kireç ve geocell güçlendirme durumunda çıkmıştır. Doğal durumu kıyasla % 15 kireç stabilizasyonunda dolgu kalınlığı % 54, geocell güçlendirme durumunda % 60 azalmıştır. Fakat değer olarak incelendiğinde, yüksek su muhtevalı zeminin hem % 15 kireç ile iyileştirilmesi durumunda, hem de yalnız geocelle güçlendirilmesi durumunda yine de yüksek dolgu kalınlığı göze çarpmaktadır. % 10 kireç ve geocell güçlendirme durumunda dolgu kalınlığı 23 cm olup, zeminin doğal durumuna göre % 80'lere varan azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.19. Değişik kireç oranlarında ve geocell güçlendirme durumlarında elde edilen dolgu kalınlıklarının karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek su muhtevalı ve killi yol taban zeminin kireç ile stabilize edilmesi ya da hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmesi ve bu iki farklı iyileştirme yönteminin birlikte kullanılması durumlarında bir yol kesiti üzerindeki etkileri teknik açıdan incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneylerden elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- 1) Kil oranı yüksek bir yol taban zemininin kireç stabilizasyonu ile likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma, kuru birim hacim ağırlığında azalma ve su muhtevasında artış görülmüş olup; daha önce yapılan çalışmalara paralellik göstermiştir. Killi zemine katılan kireç, plastisite indisini azalttığı için zemin plastik halden katı hale geçerek mukavemetinin artacağı anlaşılmaktadır. Ancak belli bir yüzdeden sonra zemine katılan kirecin (bu çalışma için % 15) önemli ölçüde mukavemet artışı sağlamadığı anlaşılmıştır.
- 2) Su muhtevası, optimum su muhtevasından daha yüksek olan CH sınıfı killi bir yol taban zemininin % 15 kireç ile stabilizasyonu sonucunda, yaş CBR değerinde, doğal duruma göre 34 kata varan artışlar meydana gelmiştir. Fakat bu değer % 7 olup, yüksek bir artış elde edildiği söylenemez (Karayolları Şartnamesi; CBR < 15 olmamalı). Bu nedenle, Kireç stabilizasyonunun tek başına yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerde yeterince iyi sonuçlar vermediği anlaşılmaktadır. Yine de CBR değerindeki artışın yol kesit tasarımında dolgu kalınlığını azaltarak ekonomi sağlayacağı düşünülmektedir.
- 3) Yapılan plaka yükleme deneyleri sonucunda; doğal duruma (yüksek su muhtevalı, % 45) göre % 15 kireç stabilizasyonu, düşey gerilme ve oturma değerlerinde % 40 azalma; K değerinde 5,5 kat artış ve dolayısıyla taşıma kapasitesinde 3,5 kat artış sağlayarak dolgu kalınlığını % 54 azaltmıştır. Aynı şekilde, hücresel dolgu sistemi de doğal duruma göre düşey gerilmeleri ve oturmaları % 55 azaltmakta, K değerini 6,5 kat ve taşıma kapasitesini 5 kat artırarak dolgu kalınlığını % 80 azaltmaktadır.
- 4) Hücresel güçlendirme, kireç stabilizasyonuna göre oturmaları ve düşey gerilmeleri % 13 azalttığı gözlenmiş olup taban zemininin yatak katsayısı değerini ve taşıma kapasitesini % 15 artırdığı ve dolgu kalınlığını % 10 azalttığı hesaplanmıştır.

- 5) Hücresel güçlendirme veya kireç stabilizasyonu, tek başlarına yüksek su muhtevalı killi taban zeminlerde, taşıma kapasitesini çok fazla artırdığı, oturmaları ve dolgu kalınlığını ise çok fazla azalttığı söylenemez. Bu nedenle, her iki iyileştirme yönteminin de tek başlarına, yüksek su muhtevalı yol taban zeminlerinin iyileştirilmesinde yeterli olmadığı ve iyi bir üst yapı performansı sağlayamayacağı anlaşılmıştır.
- 6) Taban zeminin önce kireçle stabilize edilmesi ve sonra hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmesi durumunda yapılan model plaka yükleme deneyleri sonuçlarına göre yatak katsayısı ve taşıma kapasitesi değerlerinde önemli şekilde artışlar; oturma, düşey gerilme ve dolgu kalınlığı değerlerinde önemli şekilde azalmalar meydana gelmiştir. Özellikle, % 10 kireç stabilizasyonu ve geocell güçlendirme, minimum dolgu kalınlığını 23 cm'ye indirdiği için iyi bir üst yapı performansı sağlayacaktır. Kireç stabilizasyonu ve geocell güçlendirme, yüksek su muhtevalı (su muhtevası optimumdan % 20 fazla olan) killi yol taban zemininin iyileştirilmesinde olumlu sonuçlar vereceği anlaşılmıştır.

Sonuç olarak, bu deneysel çalışma kapsamında yüksek su muhtevalı A-7 grubu, CH (yüksek plastisiteli kil) sınıfı killi yol taban zeminlerinin tek başına kireç stabilizasyonu ile ya da hücresel yük taşıma sistemleri ile iyileştirilmesi CBR, yatak katsayısı (K), taşıma kapasitesi (q_u) değerlerini yeterince artırmadığı kanaatine varılmış olup, bu tip yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerinin kireçle stabilizasyon yapıldıktan sonra hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmesi tavsiye edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, Ankara, 2002.
2. Dinçer, E. ve Belirgen, M.M., İnce Daneli Bir Zeminin Kireç Stabilizasyonu, Anadolu Üniversitesi V. Ulusal Kil Sempozyumu, Temmuz 1991, Bildiriler Kitabı, 280-291.
3. Kavak, A., The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 1996.
4. Veith, G., Essay Competition Green, Ground End Great Soil Stabilization With Slag. Building Research & Information, 28 (2000) 70 -72
5. Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G. I. ve Higgins, D.D., Effects of partial Substitution of Lime Ground Granulated Blast Furnace slag (GGBS) On The Strenght Properties Of Lime- Stabilised Sulphate – bearing Clay Soils, Engineering Geology, 51 (1998)1–37.
6. Sıvapullaiah, P.V., Kanta, H.L. ve Kıran, K.M., Geotechnical Properties of Stabilised Indian Red Earth, Geotechnical and Geological Engineering, 21 (2003) 9 -413.
7. Tokgöz, M., Kavak, A., Güngör, A.G., Avşar, C. ve Yönter, G., Ankara Bala Ayrımı-Kulu Ayrımı Bölünmüş Yolu Kireç stabilizasyonu <http://www.kimtas.com/yolstabilizasyonu.html> 10 Mayıs 2009.
8. Kavak, A. ve Bilgen, G., Yüksek Fırın Cürufu ve Kirecin Katkı Olarak Kil Üzerindeki Etkileri ve Yol Yapımında Kullanımının Araştırılması, <http://www.kimtas.com/ozeluygulamalar.html>, 10 Mayıs 2009.
9. Yıldırım, B., Alataş, T. ve Dağdelen, Ş., Zemin Stabilizasyonunda Bitüm Kullanılması ile Üst Yapıda Sağlanacak Ekonominin Araştırılması <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/1542.pdf>, 30 Eylül 2009.
10. Keskin, E. ve Kavak, A., Yüksek Su Muhtevasında Killi Bir Zeminin Kireç, Stabilizasyonu ile İyileştirilmesi ve Yol Kesitine Etkileri <http://www.kimtas.com/ozeluygulamalar.html>, 10 Mayıs 2009.
11. Moghaddas Tafreshi, S.N. ve Dawson, A.R., Comparison of Bearing Capacity of a Strip, Footing on Sand with Geocell and with Planar Forms of Geotextile Reinforcement Geotextiles and Geomembranes, 28 (2009) 72–84.
12. Dash, S.K., Sireesh, S. ve Sitharam, T.G., Model Studies on Circular Footing Supported on Geocell Reinforced Sand Underlain by Soft Clay, Geotextiles and Geomembranes, 21 (2003) 197–219.

13. Sireesh S., Sitharam, T.G. ve Dash, S.K., Bearing Capacity of Circular Footing on, Geocell - Sand Mattress Overlying Clay Bed with Void, Department of Civil Engineering Indian Institute of Science, 27 (2009) 89–98.
14. Zhang, L., Zhao, M., Shi, C. ve Zhao, H., Bearing Capacity of Geocell Reinforcement in Embankment Engineering, Geotextiles and Geomembranes, 28 (2010) 475–482.
15. Latha, G. M. ve Somwanshi, A., Effect of Reinforcement Form on The Bearing (2009) Capacity of Square Footings on Sand, International Journal of Engineering Science, 27 409-422.
16. Dash, S.K., Krishnaswamy N.R. ve Rajagopa, K., Bearing Capacity of Strip Footings Supported on Geocell -Reinforced Sand, Geotextiles and Geomembranes, 19 (2001) 235- 256.
17. Zhou ,H. ve Wen, X., Model Studies on Geogrid - or Geocell - Reinforced Sand Cushion on Soft Soil, Geotextiles and Geomembranes, 26 (2008) 231–238.
18. Zhang, L., Zhao, M., Zou, X., ve Zhao, H., Deformation Analysis of Geocell Reinforcement Using Winkler Model, Computers and Geotechnics 36 (2009) 977–983.
19. Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R. ve Rajagopa, K., Strip Footing on Geocell Reinforced Sand Beds with Additional Planar Reinforcement, Geotextiles and Geomembranes, 19 (2001) 529–538.
20. Emersleben, A. ve Meyer, N., Bearing Capacity Improvement of Gravel Base Layers in Road Construction Using Geocells, ACMAG, 1-6 October, (2008), 3538-3545.
21. Perviz, A. ve Yılmaz, M., Uzun Ömürlü Esnek Üst Yapıların Tasarımı, 7. Ulaştırma Kongresi, Eylül 2007, Bildiriler Kitabı, 354-363.
22. Anonymous, Colorado Asphalt Pavement Association (CAPA), Guideline for The Design and Use of Asphalt Pavement Of Colorado Road Ways, Colorado, USA, 2000.
23. AASHTO T193, Standart Method of Test for The California Bearing Raito, AASHTO, Washington, U.S.A., 1999.
24. TS 1900, İnşat Mühendisliği Zemin Laboratuar Deneyleri, Ankara, 1987.
25. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi 2006, Yayın No: 267, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 2006.
26. ASTM 1194–72, Standart Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings, ASTM, Philadelphia, 1987.
27. Kumbasar, V. ve Kip, F., Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan kitapevi, Ankara, 1992.

28. Hopkings, T.C., Bercham, T.L, Sun, L. ve Ni, B. Resilient Modulus of Kentucky Soils, Resarch Report KTC-01-07/SPR-163-95-IF, Univeersity of Kentucky Transportation Center, College of Engineering, Lexington, Kentucky, 2004.
29. [www.prs-med.com/load support system](http://www.prs-med.com/load%20support%20system), Neoweb Confined Pavement Design, 11 Mart 2007.
30. www.geosyntheticssociety.org/Presto_Geosystems.htm, Geoweb Chanel Protection System Technical Overview,15 Şubat 2008.
31. Mitchell, J.K., Fundamentals of Soil Behavior, Wiley, New York, 1993.
32. Demiröz, A. ve Karaduman, M., Zemin İyileştirme Metotları, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Yüksek Okulu Teknik-Online Dergisi, 8, 3 (2009) 33-49.
33. Çakıroğlu, İ., Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
34. <http://www.kimtas.com/ozeluygulamalar.html>, Killi Zeminlerin Kireç ile İyileştirmesi, TSE Standart Dergisi, 1 Temmuz 2009.
35. Uzuner, B.A. Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon, 2000.
36. Aruntaş, H.Y. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21,1 (2006) 193-196.
37. Alkaya D.,The Investigation of Fly Ash Use in Soil Improvement, Electronic Journal of Construction Technologies, 5,1 (2009) 61-72.
38. Anonymous, ASTM C 618-Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM Philadelphia, 2001.
39. http://www.ktssav.com/teknik_bilgiler.html, Uygulama Alanları, 10 Ekim 2007.
40. <http://ktshucreseldolgu.com/tr/yuk-tasima-sistemi-hucresel-dolgu.html>, Hücresel Sıkıştırma ve Yük Taşıma Sistemleri, 3 Ekim 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Eren ŞENGÜL, 1983 yılında Trabzon'da doğdu. 2000 yılında Trabzon Erdođdu Lisesinden mezun oldu. 2001 yılında girdiği, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında inşaat mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl BOTAŐ'ta Dođu Karadeniz Doğal Gaz Boru Hattı projesinde çalışma hayatına atıldı. 2006 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2005–2008 yılları arasında BOTAŐ'ta çeşitli projelerde sözleşmeli kontrol mühendisi olarak görev yaptı. 2009 yılında Trabzon Őehir içi doğal gaz dağıtım projesinde Őantiye Őefi olarak çalıŐtı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.