

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEŞİTLİ KATKI MADDELERİNİN YOL TABAN ZEMİNİ ÜZERİNDEKİ  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**EKREM SERDAR YILDIRAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EKİM 2019**

Tezin Başlığı: Çeşitli Katkı Maddelerinin Yol Taban Zemini Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: Ekrem Serdar YILDIRAN

Sınav Tarihi: 17.10.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnaşat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Sınav Jürisi Üyeleri

**Tez Danışmanı:**                      **Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL**                      .....

İnönü Üniversitesi

**Doç. Dr. Yüksel ESEN**                      .....

Fırat Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYAZ**                      .....

İnönü Üniversitesi

**Prof. Dr. Kazım TÜRK**

Enstitü Müdürü

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum ‘Çeşitli Katkı Maddelerinin, Yol Taban Zemini Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi’ başlığı altında bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı olacak bir yardım alınmadan tarafımdan yazıldığını ve istifade ettiğim bütün çalışmaların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun olarak gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ekrem Serdar YILDIRAN

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## ÇEŞİTLİ KATKI MADDELERİNİN YOL TABAN ZEMİNİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ekrem Serdar YILDIRAN

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

xiv + 113 sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada, çeşitli özelliklere sahip filler katkı maddelerinin killi bir yol taban zemininin taşıma gücü üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu amaçla Malatya-Kiltepe bölgesinden temin edilen bir kil zemininin içerisine kilin ağırlıkça %2.5, 5, 7.5, 10, 15 ve 20 oranlarında uçucu kül, sönmüş kireç, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ilave edilerek zemin numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde farklı su muhtevalarında proctor deneyleri yapılmış ve numunelerin maksimum kuru birim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir. Hazırlanmış olan saf ve katkılı numuneler 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulduktan sonra serbest basınç ve CBR deneylerine maruz bırakılarak mukavemetleri ve taşıma güçleri belirlenmiştir. Ayrıca CBR değerlerinden faydalanılarak, katkıların yol üstü yapısı kalınlığına ve maliyetlerine olan etkileri tespit edilmiştir.

Deneyler sonucunda silis dumanı haricindeki tüm katkıların killi zeminin mukavemetini artırdığı belirlenmiştir. Killi zeminin dayanımını en fazla artıran oranlar; %5 sönmüş kireç, %10 uçucu kül ve %20 oranında yüksek fırın cürufu olmuştur. Ayrıca mukavemeti artan killi zeminin, yol üstü yapısı kalınlığı ve maliyetinde ciddi oranda ekonomiklik sağladığı görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Kil, Zemin Stabilizasyonu, proktor, serbest basınç dayanımı, CBR, AASHTO

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF VARIOUS ADDITIVES ON THE ROAD BASE GROUND

Ekrem Serdar YILDIRAN

Inönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

xiv + 113 pages

2019

Supervisor: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study, the effects of filler fillers with various properties on the bearing capacity of a clay road floor were investigated.

For this purpose, soil samples were prepared by adding 2.5, 5, 7.5, 10, 15 and 20% by weight fly ash, slaked lime, silica fume and blast furnace slag into a clay floor obtained from Malatya-Kiltepe region. Proctor tests were carried out on different water contents and maximum dry unit weights and optimum water contents of the samples were determined. The prepared and pure samples were subjected to cure times of 7 and 28 days and then subjected to free pressure and CBR tests to determine their strength and bearing strength. In addition, the effects of the additives on the road superstructure thickness and costs were determined by using CBR values.

As a result of the experiments, it was determined that all additives except silica fume increased the strength of clayey soil. The rates that increase the strength of clayey soil at most; 5% slaked lime, 10% fly ash and 20% blast furnace slag. In addition, it has been seen that the clayey soil with increased strength provides a significant economic efficiency in road pavement thickness and cost.

**KEYWORDS:** Clay, Soil Stabilization, proctor, free compressive strength, CBR, AASHTO

## TEŐEKKÜR

Yazmıő olduğum bu tezin konusunu belirleyip, bu konu çerçevesinde yapılacak çalışmalarda, deneylerde bana yön veren, sürekli olarak yardımını ve engin bilgilerini benden esirgemeyen ve yaptığım bu çalıőmayı başarıyla tamamlamamı sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL 'e;

Tez çalıőmam sırasında ve özellikle laboratuvarında yaptığım deneysel çalışmalarda bana yardımcı olan ve manevi desteğini hiç esirgemeyen değerli hocam Sayın Arő. Gör. Talha SARICI 'ya,

Manevi desteklerini hiç eksik etmeyen, değerli dostlarım Sayın Enes EKİNCİ' ye ve Sayın Semih İSSİ' ye,

Çalıőmalarım ve deneyler sırasında yardımını esirgemeyen ve büyük fedakarlık gösteren ve sürekli yanımda olan kardeőim Sayın Nisanur YILDIRAN 'a,

Çalıőmalarıma uzaktan yakından yardımı dokunan tüm İnönü Üniversitesi personeline, teknik ekibine ve öğrencilerine,

Ayrıca, bu zamana kadar olduğu gibi, yaptığım bu çalıőmam sırasında da benden maddi ve manevi yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen AİLEM'e, eőimin AİLE'sine, özellikle eőime ve biricik kızıma sonsuz

teőekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	IV
<b>TEŞEKKÜRLER</b> .....	V
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	VI
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	IX
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	X
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	XIII
1. <b>GİRİŞ</b> .....	1
2. <b>KURAMSAL TEMELLER</b> .....	5
2.1. Zeminler.....	5
2.1.1. Zeminlerin Tane Boyutu ve Tane Çapı Dağılımı .....	5
2.1.2. Zeminlerin Tane Şekli.....	8
2.1.3. Zeminlerin Sıklık Derecesi .....	8
2.1.4. Zeminlerin Kıvam, Kıvam Limitleri ve Plastisite Özellikleri.....	9
2.1.5. Zeminlerin Şişme Potansiyeli .....	10
2.1.6. Zeminlerin Taşıma Gücü .....	10
2.1.6.1. Sağlam Zemin .....	10
2.1.6.2. Orta Zemin .....	10
2.1.6.3. Zayıf (çürük) Zemin.....	11
2.2. Zemin Stabilizasyonu (Zemin İyileştirmesi) .....	11
2.2.1. Zemin Stabilizasyonunun Amacı .....	12
2.2.2. Zemin Stabilizasyonunun Nedenleri .....	13
2.3. Zemin Stabilizasyonunun Sınıflandırılması.....	13
2.3.1. Mekanik Stabilizasyon .....	14
2.3.2. Hidrolik Stabilizasyon.....	14
2.3.3. Donatılandırma ile Stabilizasyon .....	14
2.3.4. Enjeksiyon Yöntemleri ile Stabilizasyon .....	14
2.3.5. Katkı Maddesi Kullanarak Stabilizasyon.....	15
2.3.5.1. Çimento ile Stabilizasyon .....	16
2.3.5.2. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu .....	18
2.3.5.3. Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu.....	21
2.3.5.4. Uçucu Kül (U.K.) ile Stabilizasyon .....	22
2.4. Taban Zeminlerinin Yol Üstyapı Kalınlıklarına Etkileri .....	25
2.4.1. Yol Üstyapısı.....	25
2.4.2. Esnek Üstyapılar .....	26
2.4.3. Esnek Üstyapı Tipleri.....	27
2.4.3.1. Kaplamasız Esnek Üstyapılar .....	27
2.4.3.2. Sathi Kaplamalı Yollar.....	27
2.4.3.3. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Kaplamalı Yollar.....	28
2.4.4. Esnek Üstyapı Tasarımı .....	29
2.4.5. AASHTO Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemleri .....	29

2.4.5.1. Son Hizmet Yeteneği İndeksi, Pt (Servis Kabiliyeti).....	30
2.4.5.2. Eşdeğer Dingil Yüklü Tekrar Sayısı, ETYD.....	31
2.4.5.3. Trafiğin Değerlendirilmesi.....	31
2.4.5.4. Bölge Faktörü, R.....	32
2.4.5.5. Üstyapı Sayısı, SN.....	33
2.4.5.6. Zemin Taşıma Değeri, S.....	37
2.4.6. Rijit Üstyapılar.....	40
2.4.7. Rijit Üstyapı Tipleri.....	41
2.4.7.1. Kalın Plak Kaplamalar.....	41
2.4.7.2. Lifli Beton Plak Kaplamalar.....	41
2.4.7.3. Ön Gerilmeli Beton Kaplamalar.....	41
2.4.7.4. Silindirle Sıkışan Beton Kaplamalar (RCC).....	42
2.4.7.5. Sürekli Betonarme Yol Kaplamaları.....	43
2.4.8. Rijit Üstyapı Tasarımı.....	43
2.4.9. AASHTO Rijit Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	43
2.4.9.1. Efektif Zemin Yatak Katsayısı (k).....	47
2.4.9.2. Betonun Eğilmeye Çekme Emniyet Gerilmesinin ( $f_f$ ) Bulunması.....	47
2.4.9.3. Kopma Modülü veya Eğilme Direncinin Bulunması.....	48
2.5. Literatür Araştırması.....	50
3. <b>MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	54
3.1. Materyal.....	54
3.1.1. Killi Zemin ve Özellikleri.....	54
3.1.2. Sönmüş Kireç ve Özellikleri.....	55
3.1.3. Uçucu Kül ve Özellikleri.....	56
3.1.4. Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve Özellikleri.....	57
3.1.5. Silis Dumanı (SD) ve Özellikleri.....	57
3.1.6. Sodyum Hidroksit Solisyonu.....	58
3.2. Yöntem.....	58
3.2.1. Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi (TS 1900).....	58
3.2.2. Piknometre Deneyi (TS 1900).....	62
3.2.3. Kıvam Limit (Atterberg) Deneyleri (TS 1900).....	64
3.2.3.1. Likit Limit Deneyi.....	64
3.2.3.2. Plastik Limit Deneyi.....	65
3.2.4. Standart Proctor Deneyi.....	65
3.2.5. Tek Eksenli Serbest Basınç Deneyi (UCS).....	69
3.2.6. CBR Deneyi (California Bearing Ratio – Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı)....	74
4. <b>ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA</b> .....	77
4.1. Katkı Maddesi Olarak Kireç'in Deney Verileri.....	77
4.2. Katkı Maddesi Olarak Yüksek Fırın Cürufu'nun Deney Verileri.....	81
4.3. Katkı Maddesi Olarak Uçucu Kül'ün Deney Verileri.....	87
4.4. Katkı Maddesi Olarak Silis Dumanı'nın Deney Verileri.....	93
4.5. Stabilizasyon İşleminin Üstyapı Tabaka Kalınlıkları ve Maliyetleri Üzerindeki Etkileri.....	97
4.5.1. Saf Killi Zemin İçin Üstyapı Tabaka Kalınlıklarının Belirlenmesi.....	101



4.5.2.	% 5 Sönmüş Kireç Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Kalınlığına Etkisi .....	102
4.5.3.	% 5 Sönmüş Kireç Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Maliyetine Etkisi .....	103
4.5.4.	% 10 Uçucu Kül Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Kalınlığına Etkisi .....	103
4.5.5.	% 10 Uçucu Kül Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Maliyetine Etkisi .....	104
4.5.6.	% 20 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Kalınlığına Etkisi .....	104
4.5.7.	% 20 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Maliyetine Etkisi .....	105
5.	<b>SONUÇLAR</b> .....	107
6.	<b>KAYNAKÇA</b> .....	109
	<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	113

## SİMGELER VE KISALTMALAR

CBR	Taşıma kapasitesi oranı
c	Kohezyon
E	Elastisite modülü
e	Boşluk oranı
$I_p$	Plastisite indisi
q	Gerilme
s	Oturma
$W_{yaş}$	Yaş ağırlık
z	Derinlik
$\gamma_s$	Dane birim hacim ağırlığı
$\gamma_{kmax}$	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
$\omega_{opt}$	Optimum su muhtevası
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
SK	Sönmüş Kireç
SD	Silis Dumanı
UCS	Serbest Basınç Dayanımı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
ASMÜD	Asfalt Müteahhitleri Derneği
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Yol Üstyapısı Kesiti .....	1
Şekil 1.2.	Zemin Stabilizasyonu Öncesi ve Sonrası .....	2
Şekil 1.3.	Zeminin Kireçle Stabilizasyonu, Öncesi ve Sonrası .....	3
Şekil 2.1.	Zemin Tane Dağılımı .....	5
Şekil 2.2.	Elek Analizi ve Hidrometre Analizi, Deney Aletleri .....	6
Şekil 2.3.	Tane Çapı Dağılımı - Granülometri Eğrisi.....	7
Şekil 2.4.	Zeminlerin Tane Şekli .....	8
Şekil 2.5.	Kıvam Limitleri Sınırları.....	9
Şekil 2.6.	Zemin Stabilizasyonunda Serpme Makinası .....	12
Şekil 2.7.	Enjeksiyon Yönteminde Uygulanan Teknikler .....	15
Şekil 2.8.	Çimento ile Stabilizasyon.....	16
Şekil 2.9.	Yeniden Dolgunun Yapılması ve Çimento Katkısıyla Yapılan Stabilizasyon Kıyası .....	18
Şekil 2.10.	Farklı Tane Boyutuna Göre Kireçler.....	19
Şekil 2.11.	Kireç ile Zemin Stabilizasyonu .....	20
Şekil 2.12.	Bitüm Örneği .....	21
Şekil 2.13.	Uçucu Kül Oluşumu .....	23
Şekil 2.14.	Uçucu Kül Örneği .....	23
Şekil 2.15.	Esnek ve Rijit Üstyapının Teorik Görünümü.....	25
Şekil 2.16.	Tipik Bir Esnek Üstyapı Enkesiti.....	26
Şekil 2.17.	Sathi Kaplamalı Yol Örneği.....	28
Şekil 2.18.	Bitümlü Sıcak Karışım Kaplama Üstyapı Tipi .....	28
Şekil 2.19.	Esnek Kaplamanın ve Belirli Bir Dingil Yükünün Tekerrür Sayısına Bağlı Değişimi.....	34
Şekil 2.20.	Esnek Üstyapı Projelendirme Abağı, Pt = 2.0.....	35
Şekil 2.21.	Esnek Üstyapı Projelendirme Abağı, Pt = 2.5.....	36
Şekil 2.22.	Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu 1. Grafik.....	38
Şekil 2.23.	Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu 2. Grafik.....	39
Şekil 2.24.	Kaplama Maliyetlerinin Karşılaştırılması .....	42
Şekil 2.25.	Rijit Üstyapı Projelendirme Abağı, Pt = 2.0 .....	45
Şekil 2.26.	Rijit Üstyapı Projelendirme Abağı, Pt = 2.5 .....	46
Şekil 2.27.	Eğilme Direnci Hesabı .....	48

<b>Şekil 2.28.</b> CBR-k (taban reaksiyon modülü) Arasındaki Bağlantıyı Veren Eğri .....	49
<b>Şekil 3.1.</b> Killi Zemininin Granülometri Eğrisi.....	55
<b>Şekil 3.2.</b> Stabilizasyon İçin Kullanılan Sönmüş Kireç .....	56
<b>Şekil 3.3.</b> Elek Analizi Deneyinde Kullanılan Elekler .....	59
<b>Şekil 3.4.</b> Numune Kurutmada Kullanılan Etüv.....	59
<b>Şekil 3.5.</b> Hidrometre Deney Seti.....	60
<b>Şekil 3.6.</b> Hidrometre Aleti .....	61
<b>Şekil 3.7.</b> Piknometre Deneyi.....	63
<b>Şekil 3.8.</b> Piknometre Tartım İşlemi.....	63
<b>Şekil 3.9.</b> Likit Limit Deneyi.....	64
<b>Şekil 3.10.</b> Proctor Deney Aletleri .....	66
<b>Şekil 3.11.</b> Killi Zemin ve Kireç Karışımı .....	67
<b>Şekil 3.12.</b> Killi Zemin ve U.K. Karışımı.....	67
<b>Şekil 3.13.</b> Proctor Deneyi Sonrası Yaş Numunlerin Alınması İşlemi .....	68
<b>Şekil 3.14.</b> Proctor Deneyindeki Yaş Numunelerin Etüvde Kurutulması .....	68
<b>Şekil 3.15.</b> Etüvden Çıkan Numunelerin Hassas Terazide Tartılması .....	69
<b>Şekil 3.16.</b> Serbest Basınç Deneyinde Numune Alırken Kullanılan Alet.....	70
<b>Şekil 3.17.</b> Serbest Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	70
<b>Şekil 3.18.</b> Numune Çıkartmada Kullanılan Kriko .....	71
<b>Şekil 3.19.</b> Krikodan Çıkan Numune .....	72
<b>Şekil 3.20.</b> Kür Süresince Bekletilmek İçin Hazırlanan Numuneler.....	72
<b>Şekil 3.21.</b> Tek Eksenli Serbest Basınç Deney Seti .....	73
<b>Şekil 3.22.</b> Serbest Basınç Deneyinde Oluşan Deformasyon Örneği.....	73
<b>Şekil 3.23.</b> CBR Deney Seti .....	74
<b>Şekil 3.24.</b> CBR Deneyi İçin Hazırlanan Numune.....	75
<b>Şekil 3.25.</b> CBR Deney Setine Numunenin Yerleştirilmesi.....	75
<b>Şekil 3.26.</b> CBR Deneyi Sonrası Numunede Meydana Gelen Deformasyon.....	76
<b>Şekil 4.1.</b> 7 günlük kür süresinin ardından Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği .....	78
<b>Şekil 4.2.</b> 28 günlük kür süresinin ardından Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği .....	79
<b>Şekil 4.3.</b> 7 günlük kür süresinin ardından Kireç katkılı deney verilerine ait CBR grafiği .....	80

<b>Şekil 4.4.</b>	28 günlük kür süresinin ardından Kireç katkılı deney verilerine ait CBR grafiği .....	81
<b>Şekil 4.5.</b>	7 günlük kür süresinin ardından YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	82
<b>Şekil 4.6.</b>	28 günlük kür süresinin ardından YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	83
<b>Şekil 4.7.</b>	7 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	84
<b>Şekil 4.8.</b>	28 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	85
<b>Şekil 4.9.</b>	7 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli deney verileri ait CBR grafiği.....	86
<b>Şekil 4.10.</b>	28 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli deney verileri ait CBR grafiği.....	87
<b>Şekil 4.11.</b>	7 günlük kür süresinin ardından UK'nın su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	88
<b>Şekil 4.12.</b>	28 günlük kür süresinin ardından UK'nın su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	89
<b>Şekil 4.13.</b>	7 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	90
<b>Şekil 4.14.</b>	28 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği .....	91
<b>Şekil 4.15.</b>	7 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli deney verilerine ait CBR grafiği.....	92
<b>Şekil 4.16.</b>	28 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli deney verilerine ait CBR grafiği.....	93
<b>Şekil 4.17.</b>	7 günlük kür süresinin ardından SD katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği.....	94
<b>Şekil 4.18.</b>	28 günlük kür süresinin ardından SD katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği .....	95
<b>Şekil 4.19.</b>	7 günlük kür süresinin ardından SD katkılı deney verilerine ait CBR grafiği .....	96
<b>Şekil 4.20.</b>	28 günlük kür süresinin ardından SD katkılı deney verilerine ait CBR grafiği .....	97

## ÇİZELGELER DİZİNİ

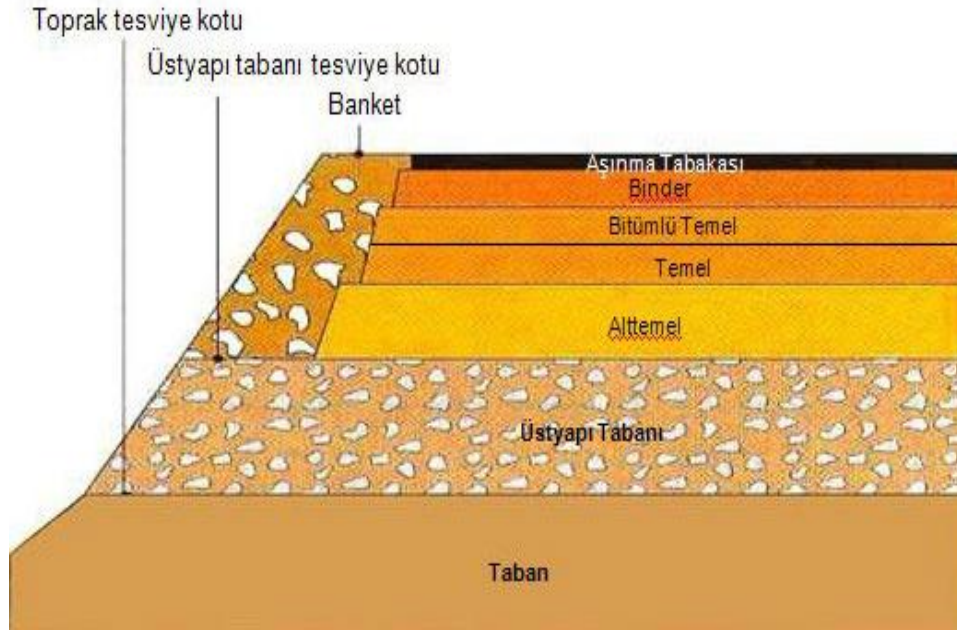
<b>Çizelge 2.1.</b>	Çeşitli Standartlardaki Elek Özellikleri.....	6
<b>Çizelge 2.2.</b>	Rölatif Sıklık - Sıklık Derecesi .....	9
<b>Çizelge 2.3.</b>	Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması.....	10
<b>Çizelge 2.4.</b>	Dolgu Malzemesi Özellikleri .....	11
<b>Çizelge 2.5.</b>	Servis Kabiliyeti (Pt)' nin tayini .....	30
<b>Çizelge 2.6.</b>	Şerit Dağıtma Faktörü (D <sub>ş</sub> ) .....	32
<b>Çizelge 2.7.</b>	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF) .....	32
<b>Çizelge 2.8.</b>	Bölge Faktörü Değerleri .....	33
<b>Çizelge 2.9.</b>	AASHTO' ya ait Tabaka Katsayıları .....	34
<b>Çizelge 2.10.</b>	ABD' nin çeşitli eyaletlerindeki yer alan yol kaplamalarının, mevcut performanslarının kıyaslanması (servis ömrü - yıl).....	40
<b>Çizelge 2.11.</b>	Taban Zemini Reaksiyon Modülü Değerleri.....	47
<b>Çizelge 3.1.</b>	Killi Zeminin Özellikleri .....	54
<b>Çizelge 3.2.</b>	Uçucu Kül'ün Özellikleri .....	56
<b>Çizelge 3.3.</b>	YFC'nin Kimyasal Bileşimleri .....	57
<b>Çizelge 3.4.</b>	Silis Dumanı' nın Kimyasal Bileşimi .....	58
<b>Çizelge 3.5.</b>	Elek Analizi Değerleri .....	60
<b>Çizelge 4.1.</b>	7 günlük kür sonrası Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç dayanım verileri .....	77
<b>Çizelge 4.2.</b>	28 günlük kür sonrası Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç dayanım verileri .....	78
<b>Çizelge 4.3.</b>	7 günlük kür sonrası YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç dayanım verileri.....	82
<b>Çizelge 4.4.</b>	28 günlük kür sonrası YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine Uygulanan serbest basınç dayanım verileri .....	83
<b>Çizelge 4.5.</b>	Kil + %20 YFC'nin solisyon ilaveli 7 günlük CBR değerleri .....	85
<b>Çizelge 4.6.</b>	Kil + %20 YFC'nin solisyon ilaveli 28 günlük CBR değerleri .....	86
<b>Çizelge 4.7.</b>	7 günlük kür sonrası UK'nın su ilaveli serbest basınç dayanım verileri.....	88
<b>Çizelge 4.8.</b>	28 günlük kür sonrası UK'nın su ilaveli serbest basınç dayanım verileri.....	89
<b>Çizelge 4.9.</b>	Kil + %10 UK'nın solisyon ilaveli 7 günlük CBR değerleri .....	91

<b>Çizelge 4.10.</b>	Kil + %10 UK'nın solisyon ilaveli 28 günlük CBR değerleri .....	92
<b>Çizelge 4.11.</b>	7 günlük kür sonrası SD'nin serbest basınç dayanımları .....	93
<b>Çizelge 4.12.</b>	28 günlük kür sonrası SD'nin serbest basınç dayanımları .....	94
<b>Çizelge 4.13.</b>	Kil + %5 SD'nin 7 günlük CBR değerleri .....	95
<b>Çizelge 4.14.</b>	Kil + %5 SD'nin 28 günlük CBR değerleri .....	96
<b>Çizelge 4.15.</b>	Deneyle Verilerle Elde Edilen En Yüksek CBR değerleri.....	97
<b>Çizelge 4.16.</b>	Esnek Kaplama Hesaplamalarında Kullanılan Ortak Değerler .....	98
<b>Çizelge 4.17.</b>	Rijit Kaplama Hesaplamalarında Kullanılan Ortak Değerler.....	99
<b>Çizelge 4.18.</b>	Tabaka Çeşitlerine Göre Birim Maliyetler .....	100
<b>Çizelge 4.19.</b>	Betonun Birim Maliyet Tablosu .....	101
<b>Çizelge 4.20.</b>	Yol Üstyapısında Kullanılacak Malzeme Cinsleri ve Tabaka Kalınlıkları.....	101
<b>Çizelge 4.21.</b>	Esnek ve Rijit Kaplamada Farklı Katkı Maddeleri ile Değişen Parametreler.....	106
<b>Çizelge 4.22.</b>	Farklı Katkı Maddelerinin Maliyet Üzerindeki Etkileri.....	106

## 1. GİRİŞ

Günümüzde çoğalan inşaatlar, gereksinim duyulan yollar ve diğer tüm yapılar beraberinde bu yapıların yapılacağı zeminlerin önemini vurgulamaktadır. Zeminleri, kayaların ayrışmasından oluşan katı tanelerle, bunlar arasında kalan su veya hava dolu boşluklar barındıran ve ayrıca içerisinde organik madde içerebilen doğal malzemeler şeklinde tanımlayabiliriz. Sonuçta yapılacak yapının sağlam, kaliteli, ekonomik ve kullanışlı olması her ne kadar önem arz ediyorsa da yapının oturacağı zeminde bir o kadar önem arz etmektedir. Çünkü yapacağımız yapı ne kadar mükemmel olursa olsun, oturduğu zemin o mükemmelliği yakalamadığı sürece bu yapı kullanıma uygunluk teşkil etmeyecektir. Düşününki çok maliyetli, kaliteli ve şık bir yapıyı, zayıf veya bozuk bir zemine inşa ettiğinizde bu yapının ne derece sağlıklı olacağı bilinmemektedir. Her an yıkılmaya, kaymaya, çökmeye, farklı oturmalara maruz kalacaktır. Haliyle yapılan yapının kalitesi, sağlamlığı, ekonomikliği ve kullanışlılığı hiçbir anlam ifade etmeyecektir.

Günümüzde ulaşım sistemleri içerisinde gerek yük ve gerek yolcu taşımacılığı bakımından Karayollarının çok büyük alanda kullanılması karayollarının önemini oldukça arttırmaktadır. Bu durum beraberinde yol alt ve üstyapısını önemli hale getirmektedir. Tipik yol üstyapısı kesitine verilen örnek, Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Yol Üstyapısı Kesiti (Anonim, 2019a)



Bir yol üstyapısını projelendirme safhasındaki asıl amaç, projenin ömrü boyunca yolun üzerinde taşıyabileceği trafiği, sağlam ve güvenilir bir şekilde sürdürmesi olmalıdır. Bunun için üstünde kalan bu yükü, büyük deformeler ve çatlaklar olmayadan taşıyacak üstyapı kalınlığını ve üstyapının yapım aşamasında kullanılan malzemelerin özelliklerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Yolların diğer yapılardan en büyük farkı uzunluğunun sonsuz olmasıdır. Bundan dolayı yol üstyapısının oturduğu zemin yer yer farklı davranış ve özellikler gösterebilmektedir (Ağar ve Umar, 1985).

Yolun oturduğu zeminin farklı davranışlar sergilemesinden ötürü, zeminin taşıyacağı yük iyi hesaplanmalıdır. Aksi takdirde doğal afetlerden dolayı yolun çöktüğüne şahit olduğumuz gibi hesaplanmayan ağırlıklardan dolayı yollarda ciddi deformasyonlar veya çökmeler meydana gelebilir.

Ülkemizde ve Dünya’da yol inşaatları süratle devam ederken, yapılan yolların altındaki tabakaların her zaman istenen özelliklere sahip olacağı beklenemez. Bundan ötürü yapılacak yolun altında kalan doğal zemin, istediğimiz özellikleri sağlayacak şekilde stabilize edilmeli veya iyileştirilmelidir. Düşük dayanım özellikleri sergileyen zeminin yapısının mekanik, fiziksel veya kimyasal iyileştirme yöntemleri ile dış kuvvetlere karşı direnç gösterir hale getirilmesine zemin stabilizasyonu (iyileştirme) denir. Şekil 1.2’de zemin stabilizasyonuna bir örnek verilmiştir.



**Şekil 1.2.** Zemin Stabilizasyonu Öncesi ve Sonrası (Coruk, 2017)

Bu iyileştirme işleminden sonra yapılacak yol, hem sağlam bir zemin üzerine oturmuş olacak hemde Şekil 1.1’de görülen kesitteki tabaka kalınlıklarını değiştirerek ekonomikliği ve sürekliliği sağlamış olacaktır.

Zemin stabilizasyonu, mekanik araçlarla zeminde bulunan boşluk seviyesinin düşürülmesi, zemin ortamındaki suyun, zeminden uzaklaştırılması ve zemine farklı ebat ve şekillerde donatılar konulması işlemlerinden oluştuğu gibi bozuk zeminlere katkı maddeleri eklenerek bu işlem yapılmaktadır.

Zeminleri ıslah ederken farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar içerisinde en basit ve en kolay uygulanabilirliği ile zemine katkı maddesi katarak, zeminde iyileştirmeyi gerçekleştirmektedir. Çimento, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, sönmüş kireç, uçucu kül vb. zemin stabilizasyonun da kullanılan katkı maddelerine örnek gösterilebilir. Kireçle stabilizasyon yapılmış bir zeminin, stabilizasyondan önce ve sonraki hali Şekil 1.3’te gösterilmiştir. İlk resimde görüldüğü gibi zemin ciddi oranda gevşek, kaygan ve akışkan vaziyette, ikinci resimde ise zemindeki gevşekliğin kayganlığın ve akışkanlığın ciddi oranda azaldığını yani zeminin mukavemet kazandığı görülmektedir (Anonim, 2019b).



**Şekil 1.3.** Zeminin Kireçle Stabilizasyonu, Öncesi ve Sonrası (Anonim, 2019d)

Fakat yapılacak bu iyileştirmeler, yapıyı olumsuz etkilememeli ve özellikle ekonomiklik kavramını zihinden kaldırmamalıdır. Çünkü, kalite aranan bir yapıdan istenen özelliklerden birisi de ekonomik olmasıdır. Ekonomiklik ilkesi ile bağdaşmayan yapılar mühendislik açısından da tam not almayacaktır.

Kullanılacak olan bu katkı maddelerinin kolay elde edilebilir olması ve ucuz olması, zemin stabilizasyonun da katkı maddesi kullanarak iyileştirme yapmayı avantajlı kılmıştır. Ayrıca katkı maddesi ile gerçekleştirilen zemin ıslah metodu, diğer metodlara göre biraz daha düşük çaba ve az enerji sarfiyatı gerektirmektedir.

Bu çalışmada ise zemine katılacak farklı katkı maddeleri ile zemin iyileştirme yapılmıştır. Kullanılan katkı maddelerinin zemin üzerinde bıraktığı etkiler irdelenmiş ve aynı zamanda bu katkı maddelerinin ekonomiklik kavramı ile bağdaşmasına özen gösterilmiştir. Bulunan sonuçların yol taban zemini kalınlığına etkisi irdelenmiştir.



## 2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde zeminlerden ve zemin sınıflandırmada etkili olan özelliklerinden bahsedilmiş ve zemin stabilizasyonu tanıtılmıştır. Ayrıca daha önceden katkı maddesi kullanılarak yapılan zemin iyileştirmelerinden ve bu iyileştirmelerin zemin üzerinde yaptığı değişiklikleri konu alan çalışmalardan bahsedilmiştir.

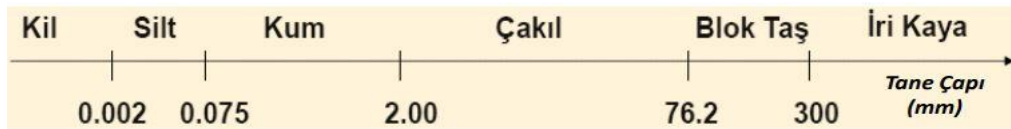
### 2.1. Zeminler

Kayaçların ayrışması ve yıpranması sonucu oluşan katı taneleri, zemin olarak isimlendirilmektedir. Zeminleri oluşturan taneler çok farklı boyutlarda olabilmektedir. Zemin Mekaniği 60 mm' den başlayıp 1 mikron boyuta kadar olan tane boyutuyla ilgilenmektedir. Zeminlerin sınıflandırılmasına yönelik, bazı endeks özellikleri bulunmaktadır. Bu özellikler aşağıdaki gibidir (Anonim, 2018a);

- Zeminlerin tane boyutu ve tane çapı dağılımı
- Zeminlerin tane şekli
- Zeminlerin sıklık derecesi
- Zeminlerin kıvam, kıvam limitleri ve plastisite özellikleri
- Zeminlerin şişme potansiyeli
- Zeminlerin taşıma gücü

#### 2.1.1. Zeminlerin Tane Boyutu ve Tane Çapı Dağılımı

Zeminler tane boyutuna göre ince taneli ve iri taneli zeminler olmak üzere iki başlıkta ayrılmaktadır. Şekil 2.1'de görüleceği gibi 0.075 mm (200 no'lu elek) üzerinde kalan taneler iri taneli (kum, çakıl vs.) olarak adlandırılırken, altında kalan taneler ise ince taneli (kil, silt vs.) olarak isimlendirilmektedir. Şekil 2.1'de zeminlerin tane dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Zemin Tane Dağılımı (Anonim, 2018a)

Doğal zeminler, farklı boyutlardaki tanelerin birleşiminden meydana geldiği için bunların içinde barındırdığı tane boyutlarının dağılımını ve tabii zeminin esasen hangi grup içerisinde yer aldığını öğrenmek için deneysel çalışmalar yapılması gerekir. Bu

nedenle iri taneli zeminlerde elek analizi yapılırken, ince taneli zeminlerde ise hidrometre analizi yapılmaktadır. Şekil 2.2’de elek analizinde kullanılan elekler ve hidrometre deney aletleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Elek Analizi ve Hidrometre Analizi, Deney Aletleri (Anonim, 2018a)

Elek analizinde kullanılan eleklerin, farklı standartları bulunmaktadır. Çizelge 2.1’de farklı standartlardaki elek özellikleri gösterilmiştir.

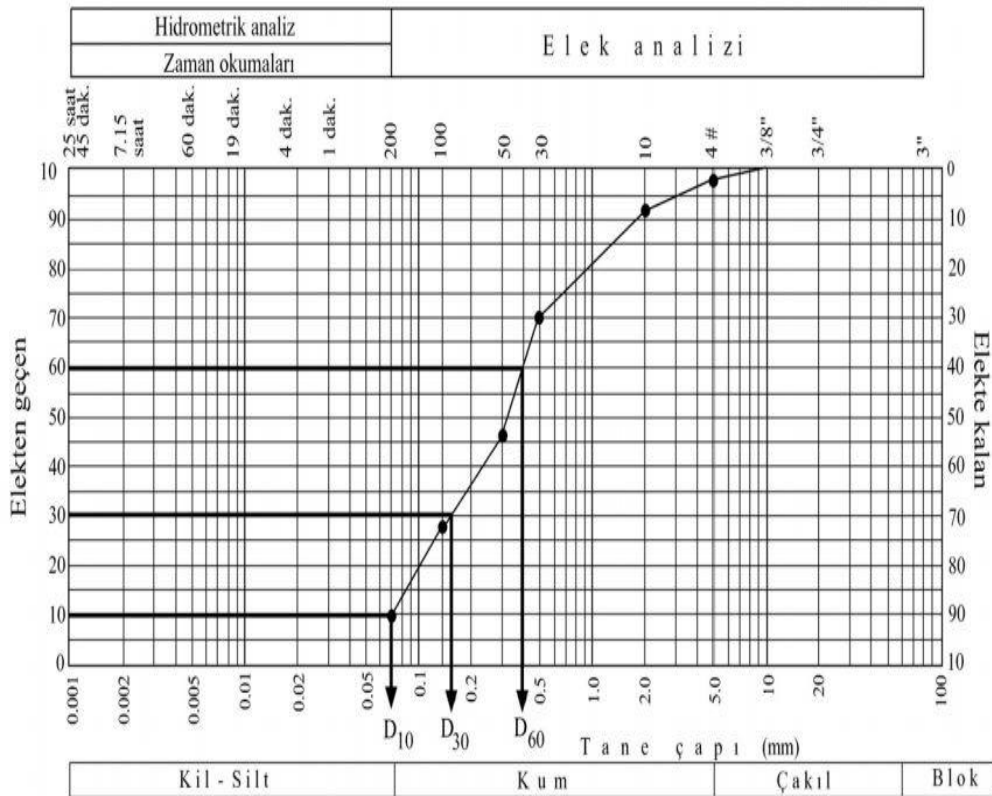
**Çizelge 2.1.** Çeşitli Standartlardaki Elek Özellikleri (Anonim, 2019c)

Amerikan elekleri (ASTM)		İngiliz elekleri (BS)	Türk elekleri (TS)	Fransız elekleri		Alman elekleri
Elek No	Elek Açıklığı	Elek Açıklığı	Elek Açıklığı	Elek No	Elek Açıklığı	Elek Açıklığı
3 inç	75 mm	75 mm	80 mm			
2 inç	50 mm	63 mm	63 mm			
1 1/2 inç	37.5 mm	50 mm	50 mm			
1 inç	25 mm	37.5 mm	40 mm			25 mm
3/4 inç	19 mm	28 mm	25 mm			20 mm
3/8 inç	9.5 mm	20 mm	20 mm			10 mm
No. 4	4.75 mm	14 mm	12.5 mm	38	5 mm	5 mm
No. 8	2.36 mm	10 mm	10.0 mm	35	2.5 mm	2.5 mm
No. 10	2.00 mm	6.3 mm	6.3 mm	34	2 mm	2 mm
No. 16	1.18 mm	5 mm	5 mm	32	1.25 mm	1.25 mm
No. 20	850µm	3.35 mm	2.5 mm	31	1.0 mm	800 µm

**Çizelge 2.1.** (devam)

No. 30	600 µm	2.0 mm	1.25 mm	29	630 µm	630 µm
No. 40	425 µm	1.18 mm	630 µm	27	400 µm	400 µm
No. 50	300 µm	600 µm	400 µm	26	315 µm	315 µm
No. 60	250 µm	425 µm	315 µm	25	250 µm	250 µm
No. 100	150 µm	300 µm	200 µm	22	125 µm	125 µm
No. 140	106 µm	212 µm	160 µm	21	100 µm	100 µm
No. 200	75 µm	150 µm	75 µm	20	80 µm	71 µm
		63 µm		19	63 µm	

Herhangi bir agrega yığınının içinde bulunan tanelerin miktarını belirleme işlemine granülometri denilmektedir. Agreganın granülometri birleşimi en iyi, granülometri eğrisi ile yapılmaktadır. Şekil 2.3'te granülometri eğrisi ile tane çapı dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde görüldüğü gibi zemin içerisinde iri tanelerin yoğunluğu, ince tanelere nazaran daha yüksektir. Bu zemin iri tanelerden meydana gelmiştir.

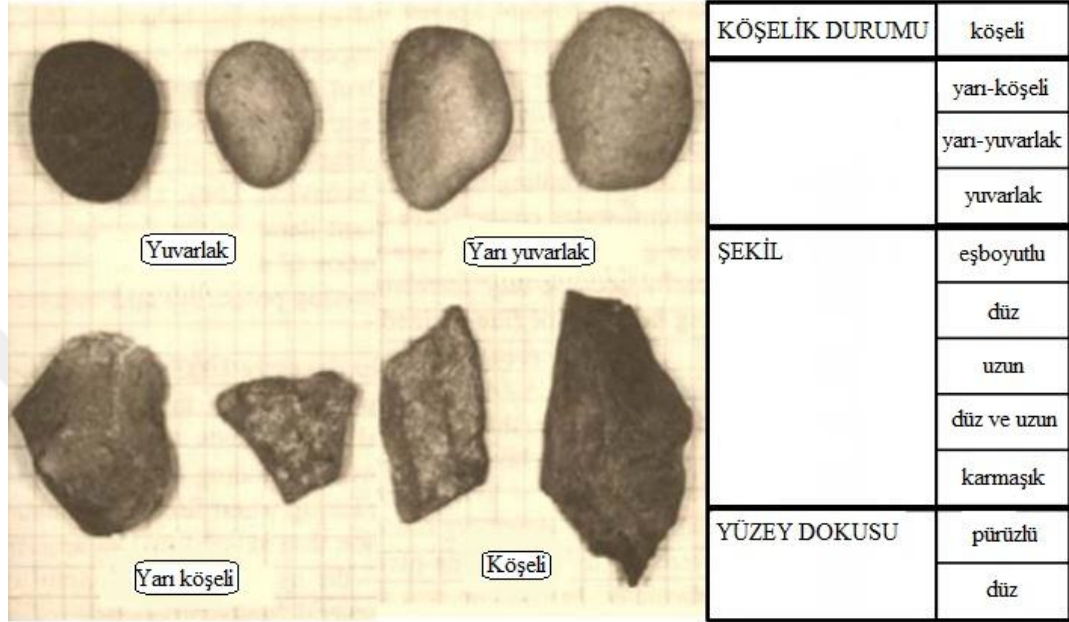


**Şekil 2.3.** Tane Çapı Dağılımı - Granülometri Eğrisi (Anonim, 2018a)



### 2.1.2. Zeminlerin Tane Şekli

Zeminlerin tane boyutları kadar, tane şekilleri de mühendislik davranışları için oldukça etkilidirler. Özellikle sürtünme karakteristiklerinde etkileri ön plana çıkmaktadır. Zeminlerin farklı tane şekilleri Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Zeminlerin Tane Şekli (Anonim, 2018a)

### 2.1.3. Zeminlerin Sıklık Derecesi

Zeminleri sınıflandırmaya yönelik en önemli özelliklerden birisi de sıklık derecesidir. Çünkü bir zeminin sıklık derecesi yüksek ise o zemin daha az sıkışıp, daha az oturma yapar. Kum çakıl gibi iri taneli (kohezyonsuz) zeminlerdeki sıklık durumunu rölatif sıklık terimi ile ifade edilir. Rölatif sıklık ( $D_r$ ), bağıntı (2.1) ile belirlenir.

$$D_r = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min}) \quad (2.1)$$

Burada;  $e_{\max}$  maksimum boşluk oranını,  $e_{\min}$  minimum boşluk oranını,  $e$  ise zemin hangi rölatif sıklıkta belirlenmek isteniyorsa o duruma ait boşluk oranını temsil etmektedir.  $D_r$  simgesi ise ondalık veya yüzdellik olarak ifade birimini teşkil eder. Rölatif sıklığın, sıklık derecesine göre isimlendirilmesi Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Rölatif Sıklık - Sıklık Derecesi (Anonim, 2011)

Rölatif Sıklık %	Sıklık Derecesi
0-15	Çok Gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta Sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok Sıkı

#### 2.1.4. Zeminlerin Kıvam, Kıvam Limitleri ve Plastisite Özellikleri

İnce taneli zeminlerin herhangi bir su içeriğindeki fiziksel durumunu belirleyen parametreye kıvam denilmektedir. 1911’de Atterberg tarafından tarif edilmiştir. Atterberg limiti veya kıvam limitleri olarak isimlendirilir (TS-1900).

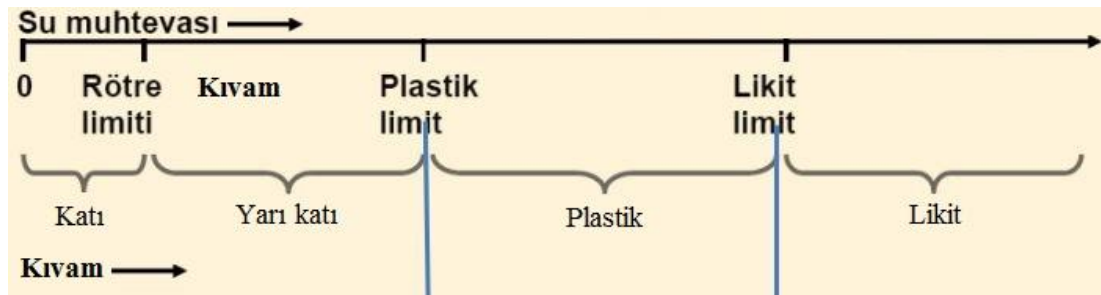
Zeminin kıvam limitleri iyi değerlendirilir ise zeminin çoğu özelliği hakkında fikir sahibi olunabilir. Kıvam limitlerini şu şekilde açıklanabilir;

Likit limit ( $w_L$  veya  $LL$ ), zeminin kendi ağırlığıyla aktığı minimum su içeriğidir.

Plastik limit ( $w_P$  veya  $PL$ ), plastik veya yarı katı durumu birbirinden ayıran sınır su içeriği olarak adlandırılır.

Rötre limiti, büzülme limiti ( $w_S$  veya  $SL$ ), aşırı su kaybının artık zemin hacminde bir azalma oluşturmadığı maksimum su içeriğidir. Bir başka deyişle, zeminin suya doygun olması için gerekli minimum su içeriğidir (Anonim, 2018a).

Şekil 2.5’te kıvam limitleri sınırları verilmiştir. Aşağıdaki şekilde, zeminin kıvam limitleri daha kolay anlaşılabilir.



**Şekil 2.5.** Kıvam Limitleri Sınırları (Anonim, 2018a)

Şekil 2.5’te görüldüğü gibi zemin likit kıvamdayken akıcı özellik gösterirken, plastik kıvamdayken el ile şekil verilebilir durumdadır. Aynı şekilde yarı katı



kıvamdayken yine el ile şekil verilir fakat çatlamlar meydana gelir, fakat katı kıvamda el ile şekil verilirken zemin parçalanır ve dağılır (Anonim, 2018a).

Plastisite ise, iri taneli zeminlerde görülmeyip ince taneli zeminlere ait bir özelliktir. Kısacası zeminin kırılmadan şekil değiştirilebilmesi anlamına gelir. Zeminin bünyesinde barındırdığı su miktarına bağlı olarak kaba bir tabirle, yumuşak, orta sert veya sert gibi isimler alır. Plastisite indeksi (PI) ise plastik durumun zeminde halen etkin olduğu su içeriği aralığını belirtir. PI, likit limit ile plastik limit arasındaki farktır ve zeminin suya karşı hassasiyetinin bir ölçüsü olarak değerlendirilir (Anonim, 2018a).

### 2.1.5. Zeminlerin Şişme Potansiyeli

O'Neill ve Poormoayed (1980), şişme potansiyeli sınıflandırması yaparken Çizelge 2.3'ten yararlanmış, görüldüğü üzere plastisite indeksi ve likit limit değerlerinden yararlanarak, şişme potansiyeli sınıflandırması yapmışlardır.

**Çizelge 2.3.** Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması (Anonim, 2018a)

Likit Limit	Plastisite İndeksi	Şişme Potansiyeli	Şişme Potansiyeli Sınıflaması
< 50	< 25	< 0.5	Düşük
50 - 60	25 - 35	0.5 - 1.5	Orta
> 60	> 35	> 1.5	Yüksek

### 2.1.6. Zeminlerin Taşıma Gücü

Zemindeki tanelerin yapısı bozulmadan zeminin, birim alanda oluşan yükü taşıyabilme kapasitesine, zeminin taşıma gücü adı verilir. Taşıma gücüne göre zeminleri sağlam zemin, orta zemin ve zayıf (çürük) zemin olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır;

#### 2.1.6.1. Sağlam Zemin

Sıkışmaya müsait olmayan zeminlerdir. Genellikle 2-3 m kalınlıkta tabakalar halindedirler. Basınç ve çekme gerilmelerine karşı oldukça mukavemetlidir.

#### 2.1.6.2. Orta Zemin

Sıkışmaya müsait olan zeminlerdir. Genellikle 3-4 m kalınlıkta tabakalar halindedirler. Gravyer, kumlu zemin, killi zemin bunlara örnek gösterilebilir. Basınç dayanımları  $0.4 - 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  civarlarındadır (Anonim, 2018a).

### 2.1.6.3. Zayıf (çürük) Zemin

Aşırı yük altında kayabilen, sıkışmaya çok müsait ince kum, killi toprak, bataklık arazi, ıslak kil bu zeminlere örnek verilebilir. Basınca karşı dayanımları oldukça düşüktür, takribi olarak  $0.2 - 0.8 \text{ kgf/cm}^2$  civarlarındadır (Anonim, 2018a).

Karayolları Teknik Şartnamesine (KTŞ) göre dolgular için Çizelge 2.4'te gösterilen şartları taşımayan bütün malzemeler zayıf zemin olarak adlandırılmaktadır.

**Çizelge 2.4.** Dolgu Malzemesi Özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney Adı	Likit Değer	Standart No
Likit Limit (LL)	$\leq 70$	TS1900- AASHTO T-89
Plastisite İndeksi (PI)	$\leq 40$	TS1900- AASHTO T-89
Mak. Kuru Birim Hacim Ağırlık (standart proctor)	$\geq 1.450 \text{ t/m}^3$	TS1900- AASHTO T-89

Zeminler her zaman homojen özellik göstermeyebilirler. Bazı kısımları çürük, bazı kısımlarında sağlam olabilir. Bunun için öncelikle zemin etüdü yapılarak, zeminin iyice tanınması gerekir. Daha sonra projeyi uygulamak ve hayata geçirmek en doğrusudur. Zemin eğer zayıfsa, proje alanında değiştirilemiyorsa bu durumda zemin stabilizasyonu devreye girmektedir. Zeminleri iyileştirerek, projeler istenilen konuma, istenilen sağlamlıkta ve mühendislik özellikleriyle inşaa edilebilirler (Çetin, 2011).

### 2.2. Zemin Stabilizasyonu (Zemin İyileştirmesi)

Zemin iyileştirmesi, taşıma gücü yetersiz olan zeminlerin çeşitli yöntemlerle taşıma gücünü arttırmak için yapılan işlemlerdir. Zeminde ki istenmeyen özellikler, bazı stabilizasyon yöntemleriyle giderilebilir. Stabilizasyon yöntemleri ile mevcut zeminin hacimsel stabilitesi, permeabilitesi (geçirgenlik), dayanıklılığı, sıkışabilirliği ve mukavemeti gibi özellikleri iyileştirilebilir (Tunç, 2001).

Altyapının taşıma değerinin istenilen orana çıkartılması için sadece kompaksiyon yapmak genel manada yetersiz kalır ve taşıma gücünün daha da artırılması gerekir. Stabilizasyon kelimesi ile anlatılmak istenen durum ise temel, temel zemini veya kaplamanın mukavemetinin artırılması veya korunması işlemi olarak tanımlanır (Kumbasar ve Kip, 1984).

Yol üstyapısının mukavemeti, üstüne oturduğu zeminin ve/veya dolguda kullanılan zeminin özelliklerinden ciddi oranda etkilenir. Çünkü üstyapının temelini, taban zeminleri oluşturur. Bunun için taban zeminleri, trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmelere karşı emniyetli bir duruş sergilemelidir (Tunç, 2001).

Şekil 2.6'da zemin stabilizasyonu sırasında kullanılan bir serpmeye makinesi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Zemin Stabilizasyonunda Serpme Makinası (Anonim, 2010a)

### 2.2.1. Zemin Stabilizasyonunun Amacı

İnşa edilecek yapının oturacağı zemin çoğu zaman yapıdan gelecek yüklere karşı direnç gösteremeyebilir. Bu gibi durumlarda inşa edilecek alanın değiştirilmesi öngörülebilir. Fakat bu sürekli mümkün olmayabilir veya yapının mecburi olarak o zemine konumlandırılması gerekebilir. İşte bu husus zemini iyileştirmenin en temel amaçlarından birisidir (Al, 2018).

Tabii zemin iyileştirmenin tek amacı, yapıdan gelen yükleri karşılayıp mukavemet göstermek olarak görülmemelidir. Zeminin iyileştirilmesinde hedeflenen temel amaçları aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Sağlam, 2006).

- Zeminin taşıma kabiliyetini yükseltmek,
- Üzerindeki yükten dolayı oluşacak oturmaları minimize edip, konsolidasyonu hızlandırmak,
- Zeminin şekil değiştirmesini ve sıvılaşma ihtimalini azaltmak,
- Şişme ve büzülme duyarlılığını azaltmak,

- Su geçirgenliğini minimize etmek,
- Sıkışabilirliği minimize etmek,
- Zeminin korozyona ve erozyona karşı gösterdiği mukavemeti artırmak,
- Zeminin kurutulması.

Zemin stabilizasyon yöntemleri ile genel olarak zeminin birçok özelliğini iyileştirmek mümkündür. Genel amaç olarak zemini stabilize edip, şartları ekonomiklik kavramından uzaklaştırmadan istenildiği değerlere taşımaktır.

### **2.2.2. Zemin Stabilizasyonunun Nedenleri**

Çeşitli hedeflere yönelik farklı mühendislik yapıları inşa edilmektedir. Bunlara okul, köprü, hastane, tünel, demiryolu vs. örnek gösterilebilir. Bu yapılar zemin üzerine konumlandırıldığı için veya zeminin bizzat içinden geçtiği için zeminle sürekli etkileşim halindedirler. Mühendislik olarak istenilen bu yapıların inşa süresince ve inşa tamamlandıktan sonra yapı ömrü süresince emniyetli, mukavemetli ve istenilen diğer özelliklerde fayda sağlaması herşeyden önce gelmekte ve istenmektedir. Bu nedenle inşa edilecek ortam mühendislik açısından büyük önem arz eder. Zeminler çoğu zaman yapının altında kalıp, taşıyıcı bölge görevini üstlenirken bazende yapılarda bizzat inşaat malzemesi olarak değerlendirilebilir. Burdan da anlaşılacağı gibi zeminin önemi ciddi boyutlardadır. Nüfusun sürekli olarak artması, ekonomik değerlerin yükselmesi ve insanların ihtiyaçlarının sürekli olarak artması ve çeşitlenmesi;

- Zeminin problemsiz olduğu bölgelerde daralmaya, tam tersi durumda ise problemlili zeminlerde ise yapı inşa etmeye,
- Yapılacak yapının ebatlarının büyümesi, beklenenden daha iyi zemin şartlarının gerekliliğini,
- Daha ileri düzey ve teknolojide mühendislik ihtiyaçlarını,

ortaya çıkarmıştır. Bu maddeler gereği, zeminlerin beklenen performansını bizlere sunabilmesi için farklı zemin stabilizasyon yöntemlerinin geliştirilmesine ve uygulanmaya başlanmasına ana neden olarak görülmektedir (Özen, 2018).

### **2.3. Zemin Stabilizasyonunun Sınıflandırılması**

Yol taban zemininin istenilen niteliklere sahip olmaması durumunda, başlıca dört ana stabilizasyon tekniği kullanılmaktadır. Bunlar;

- Mekanik stabilizasyon,
- Hidrolik stabilizasyon,
- Donatılandırma veya ekleme ile stabilizasyon,
- Fiziksel ve kimyasal stabilizasyon (Özen, 2018).

Bu teknikler sayesinde mevcut zemindeki kayma direncini artırmak, sıkışabilirliği, sıvılaşma ihtimalini ve zeminde oluşacak oturmaları minimize etmek hedeflenir (Toprak, 2005).

### **2.3.1. Mekanik Stabilizasyon**

Zemine mekanik kuvvetler uygulayarak, zeminin yoğunluğunun ve mukavemetinin artırılması hedeflenmektedir. Buna örnek verilecek olursa; zeminin standart veya titreşimli silindire sıkıştırılması denilebilir (Özen, 2018).

### **2.3.2. Hidrolik Stabilizasyon**

Burada asıl amaç mevcut zeminden, suyun uzaklaştırılması veya zemini ve yapıyı etkilemeyen bir yöne iletilmesidir. Dane ebatları iri olan zeminlerde kuyulardan pompalama ile yass minimize edilmesi, dane ebatları ufak zeminlerde ise düşey direnler sayesinde ön yükleme ile hidrolik stabilizasyon sağlanmaktadır. Geotekstiller hidrolik stabilizasyona verilecek iyi örneklerden birisidir (Al, 2018).

### **2.3.3. Donatılandırma İle Stabilizasyon**

Mevcut zemine farklı donatılar yerleştirip, zeminin kayma ve akma mukavemetini artırmayı hedefleyen stabilizasyon yöntemidir. Hasırlar, zemin çivileri bunlara örnek verilebilir (Al, 2018).

### **2.3.4. Enjeksiyon Yöntemleri İle Stabilizasyon**

Asıl amacı zeminin kayma mukavemetini maksimuma çıkartıp, geçirgenliği azaltmaktır. Bu yöntemde temel zeminine veya asıl taşıyıcı olan kayaya çeşitli oran ve bileşimdeki karışımlar enjekte edilir ve yöntem ismini burdan alır. Bu yöntemin başarılı sayılabilmesi için, enjeksiyon yapılan zeminin mukavemetinin, enjekte edilen maddelerin mukavemetinden daha yüksek olması gerekmektedir (Özen, 2018).

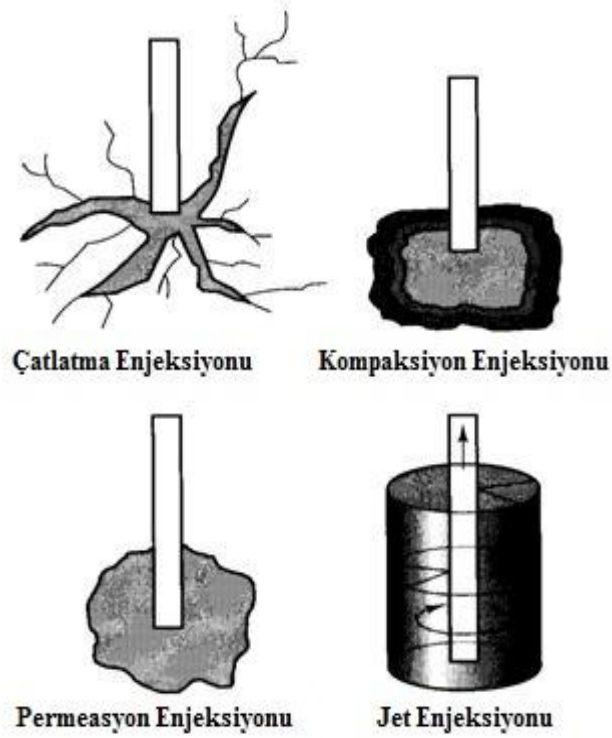
Enjeksiyonla stabilizasyonun en çok kullanıldığı alanı baraj temelleri olarak görmemiz kaçınılmaz bir gerçektir. Barajın güvenliğinin hat safhada tutulması için alüvyonlu zeminler ve gözenekli kayalarda bu programın uygulanması hemen hemen

zorunlu hale gelmiştir. Ülkemizde de bu yöntem birçok projede uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan enjeksiyon malzemelerine örnek verilecek olursa; çeşitli çimentolar, bentonit, lignin, formol gibi bileşimler denilebilir (Özen, 2018).

Enjeksiyon yöntemiyle stabilizasyonu kendi içinde 4 gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Çatlatma (İntrüzyon) enjeksiyon yöntemi,
- Kompaksiyon (Sıkıştırma) enjeksiyon yöntemi,
- Permeasyon (Sızıntı) enjeksiyon yöntemi,
- Jet enjeksiyon (jet-grout) yöntemidir (Welsh, 1986).

Şekil 2.7’de enjeksiyon yönteminde uygulanan yöntemler verilmiştir;



**Şekil 2.7.** Enjeksiyon Yönteminde Uygulanan Teknikler (Welsh, 1986)

### 2.3.5. Katkı Maddesi Kullanarak Stabilizasyon

Zemin içerisine çeşitli katkı maddeleri ekleyerek, zeminin taşıma gücünü ve mukavemetini artırmaya yarayan yöntemdir. Ülkemizde daha çok çimento, kireç, bitüm ve uçucu kül katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. En çok karşılaşılan katkı

maddeleri bunlar olduğundan bu bölümde, bu katkı maddeleri ile yapılan stabilizasyonlar detaylıca incelenecektir.

### 2.3.5.1. Çimento İle Zemin Stabilizasyonu

Çimento ile zemin stabilizasyonu, ABD’de Eyalet Karayollarının 1920’li yıllardaki uygulamalar ile hayata geçmiştir. Günümüzde de artış gösteren trafik nedeniyle ulaşım yollarının ve hava alanlarının temellerinde ve alt temellerinde stabilizasyon bir nevi zorunlu hale gelmiştir. Bundan ötürü bu stabilizasyon çeşiti kendisine oldukça fazla uygulama alanı oluşturmuştur. Killi zeminler için;

- 200 No’ lu elekten geçen tane miktarı % 40’ ın altında ise,
- Likit limit % 45 - 50’ den düşükse,
- Plastisite indeksi % 25’ den küçükse,

bu durumlarda zeminde çimento stabilizasyonu oldukça etkili olacaktır. Bu yöntem düşük plastisiteli killer ve kumlu zeminler için çok uygun bir stabilizasyon yöntemidir (Al, 2018).

Zemine katılacak çimento, likit limit değerini azaltırken, plastisite indisini artırır. Ayrıca killi zeminlerde işlenebilirliği de yükseltir. Bu değişimlerden dolayı haliyle zeminin dayanım gücü artmaktadır. Şekil 2.8’de çimento ile yapılan stabilizasyon işlemine örnek verilmiştir.



Şekil 2.8. Çimento ile Stabilizasyon (Anonim, 2019b)

Stabilizasyon işleminde zemin ile çimento karışımının en iyi şekilde sıkıştırılması gereklidir. Ayrıca bu sıkıştırma işlemi en kısa sürede ve hızlı biçimde yapılmalıdır. Çimento katkısı kullanılarak yapılacak zemin iyileştirmesi, öncelikle karayolu ve

demiryolu gibi yol projelerinde veya havaalanı pistleri gibi hareketli yüklerin yüksek rakamlara ulaşabildiği yollarda tercih edilmelidir. Zemin iyileştirmesi dışında çimentonun uygulandığı bazı alanlar aşağıdaki gibidir (Çetin, 2011);

- Şev eğiminin stabilizesini sağlamak,
- Derin iyileştirme sağlamak,
- Derin kazı iyileştirmesi sağlamak,
- Kazıklarda meydana gelen negatif yüzey sürtünmesini azaltmak,
- Dolgu altında meydana gelen konsolidasyon oturmalarına hız katmak.

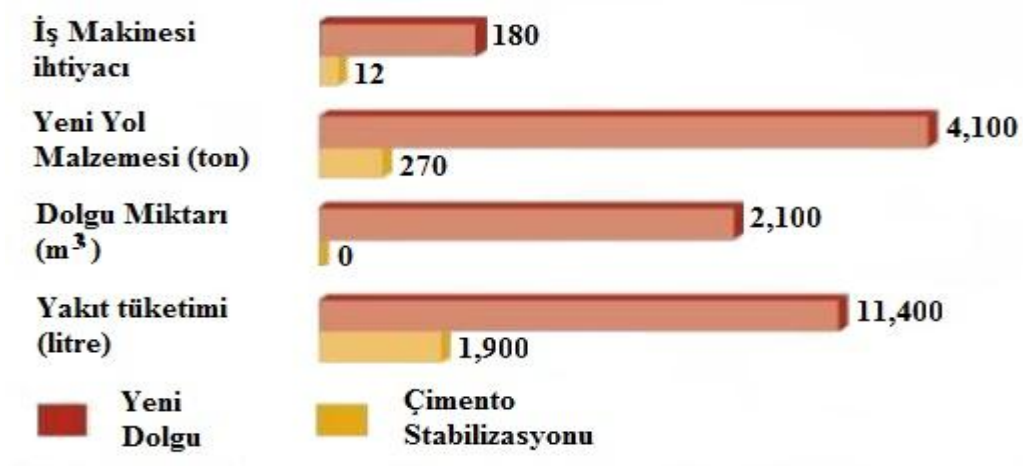
Çimento ile stabilizasyon zeminlerin dayanımını ciddi oranda artırmaktadır. Bu artış kür zamanı uygulayarak daha da arttırılabilmektedir. İçinde en fazla kalsiyum minerali barındıran killi zemin çeşiti, çimento ile iyileştirme yöntemi için en uygun zemin olduğu görülmüştür (Çetin, 2011).

Daha fazla sodyum ve hidroksit içeren killi zeminler, doğada yaygın oldukları gibi kireçle iyileştirmeye de daha müsaitlerdir. Bundan dolayıdır ki yapılacak iyileştirme için kullanılacak malzemenin hangisi olması gerektiğine iyi karar vermeli ve bu konuya ehemmiyetle yaklaşmalıyız. Belirlenen miktardaki çimento, zayıf zemin ile yerinde karıştırılır veya önceden santralde karılarak sahaya getirilip, sıkıştırılır. Tabiki sıkıştırma işlemi sırasında, daha önceden laboratuvar ortamında yapılan deneylerden elde edilen optimum su içeriği de zemin-çimento karışımına eklenmelidir. Çimento-su oranını belirleyip zemine basınçla enjekte ederek zemin iyileştirilmektedir. Bu yöntem zeminin hidrolik iletkenliğini azaltırken, dayanımını ve zeminin taşıma gücünü artırır (Das, 2007).

Çimento ile iyileştirme projelerin maliyetlerinde ciddi ekonomiklik sağlar. Temel altı zayıf zeminin dayanımını ve taşıma gücünü yükselttiği için dolgu kalınlığı doğal olarak düşecektir. Farklı bir zemin yerine, halihazırdaki zemin kullanıldığı için ekstra kazı masrafları, ekstra dolgu maliyetleri vs. ortadan kalkmış olur. Hatta bakım için gerekli masraflarda %25-50 arasında düşer. Bu Uluslar arası Portland Çimentosu Birliği (PCA)'nın yapmış olduğu bir araştırma ile daha iyi anlaşılabilir. PCA'ya göre; uzunluğu 1.6 km (yaklaşık 1 mil) olan, genişliği ise 7.30 m (yaklaşık 24 feet) ve 15 cm (yaklaşık 6 inç) kalınlığı bulunan bir temel altı tabakayı, yeniden kazılarak dolgu yapılması ile çimento katkılı stabilizasyonu karşılaştırmıştır (Harrison, 2000).

Şekil 2.9'da yapılan karşılaştırma sonuçları verilmiştir;



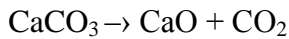


**Şekil 2.9.** Yeniden Dolgunun Yapılması ve Çimento Katkısıyla Yapılan Stabilizasyon Kıyası (Harrison, 2000)

Şekil 2.9'dan anlaşılacağı gibi yeniden dolgu yapmaktansa, zemini çimento ile iyileştirmek en mantıklı sonuç olacaktır. Aradaki maliyet farkı ciddi oranlardadır. Buradan, çimento ile stabilizasyonun sağlamış olduğu özellikle maliyet avantajı görülmüştür.

### 2.3.5.2. Kireç İle Zemin Stabilizasyonu

İnce taneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan katkı maddelerinden bir diğeri de kireçtir. Kireçte en çok tercih edilen, stabilizasyon katkılarından biridir. Kireç taşının farkı derecelerde ısıtılıp pişirilmesi sonucu kireç elde edilir. Kireç su ile karıştırıldığında, kirecin çeşitine göre suda veya hava ile katışılan bir maddedir. İnorganik esaslı bağlayıcı özellik gösteren kireç, beyaz renklidir. Kireç taşının ısıtılıp pişirilme işlemine verilen isim kalsinasyondur. Kalsinasyon reaksiyonu aşağıdaki şekilde meydana gelmektedir (Çetin, 2011);



Bu reaksiyon sonrasında oluşan CaO sönmemiş kalsiyum (kalker) kirecidir. Bu işlem yapılırken kireç taşı özel fırınlarda takribi olarak 900-100 °C gibi yüksek derecelerde ısıtılır. CaO beyaz renkli ve amorf (kendine has bir şekli olmayan) bir katıdır. Yine takbiri olarak 100 gram kalkerin ısıtılıp pişirilmesi sonucunda 56 gram CaO (kireç) elde edilir (Çetin, 2011).

Kireç taşı ısıtılıp pişirilirken eğer sıcaklık, 1000 °C gibi değerleri geçemez ise bu durumda elde edilen kirecin ismi çalı kirecidir. Eğer sıcaklık 1400 °C gibi değerlerde uzun süre kalır ve pişirilirse bu durumda da kömür kireci elde edilmektedir. Bundan

dolayı genelde halk arasında, kömür kireci çalı kirecine nazaran daha az tercih edilir. Kömür kireçleri yapıları gereği geç söner ve dağılmazlar. Bunun için ulaşım mesafesi uzun olan yerler için dahada elverişli hale gelirler. Kireçler, farklı tane boyutuna sahip olabilirler (Little, 1995). Şekil 2.10'da buna örnek verilmiştir;



**Şekil 2.10.** Farklı Tane Boyutuna Göre Kireçler (Little, 1995)

Kireç ile killi zemin bir araya geldiği zaman, aralarında birçok kimyasal reaksiyon oluştururlar. Bu reaksiyonların hepsi puzolanik reaksiyon olarak adlandırılabilir. Bu reaksiyonlar sonucunda kil minerallerinin yapısında bazı değişiklikler olur ve bu mineraller bir araya gelme eğilimine girerler ve haliyle daha büyük taneler oluşur. Bu reaksiyonlar sonucunda zeminde bazı değişiklikler oluşur (Das, 2007). Bunlar;

- Likit limit (LL) azalır,
- Plastik limir (PL) yükselir,
- Plastisite indisi (PI) azalır,
- Rötire limiti ( $W_R$ ) yükselir,
- İşlenebilirlik özelliği, mukavemet ve deformasyon gibi özellikler yükselir.

Kireç ile stabilizasyon aşağıda ifade edildiği gibi farklı şekillerde yapılmaktadır.

1. Belirlenen oranlardaki kireç, proje sahasında zeminle karıştırılarak ve su ilave edilerek, sıkıştırılır ve yerleştirilir.
2. Plent içerisine belirlenen oranlarda kireç, su ve zemin konulur, karıştırılır. Bu karışım sahaya sıkıştırılarak serilir.
3. Kireç ve su karışımı, sahadaki zemine basınçla enjekte edilir. Bu yöntem 4-5 m kadar zemine karışımı iletebilmektedir. Sonrasında ise istenilen yöntemler ile zemin ve enjekte edilen karışım kompaksiyona tabi tutulur (Das, 2007).

Kireç ile iyileştirme yönteminde oldukça basittir. Öncelikle laboratuvar ortamında gerekli testler yapılır ve uygun karışım oranları ve derinlikler belirlenir. Daha sonra çeşitli makine ve aletlerle hazırlanan oranlardaki kireç zemine yüzeysel olarak

dökülür ve silindirler yardımı ile istenilen ve hesaplanan derinliğe kadar karılır (Das, 2007).

Mukavemeti ve dayanımı artırmak için mümkün mertebe uygun şekilde sıkıştırma yapılmalı ve yeterince kür zamanı uygulanmalıdır. Genelde kireç ile iyileştirme yapılacak sahaya kireç, serildikten sonra ön ve yüzeysel bir karma işlemi yapılır ve önceki yapılan testlere göre küre bırakılır. Kür süresi ise yaklaşık 1 - 2 gün veya daha fazla olmalıdır. Kür süreci tamamlandıktan sonra sahadaki karışım tekrar karılır ve kompaksiyon uygulanır. Bu sayede maksimum mukavemet dayanım elde edilir. Maliyet açısından değerlendirildiğinde, kireç ile iyileştirilen yol dolguları kısa vadede ciddi düşük maliyetler ile sonuçlanmıştır (Çetin, 2011).

Şekil 2.11’de kireç ile zemin stabilizasyonu işleminin aşamaları verilmiştir.



a) Kireç bulamacının araziye nakliyesi



b) Bulamacın dağıtıcıya pompalanması



c) Bilgisayar kontrollü dağıtıcının kireci zemin yüzeyine dağıtması



d) Keçi ayaklı silindir ile kirecin zemin ile karıştırılması

**Şekil 2.11.** Kireç ile Zemin Stabilizasyonu (Wang ve Reston, 2007)

Burada maliyeti düşüren asıl neden ise, mevcut çürük zeminin kazılıp tekrar yerine sağlam dolgu tabakası sermek yerine, mevcut bozuk zemin, kireçle iyileştirilerek temel altı malzemesi şeklinde kullanılmasıdır. Kireç ile zemin iyileştirme yöntemi, aynı çimento ile zemin iyileştirme yönteminde olduğu gibi ekstra kazı maliyetlerinin ve dolgu maliyetlerinin önüne geçmiştir (Wang ve Reston, 2007).

Kirecin bir stabilizasyon katkı malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra, yol alt tabakalarının bakımı içinde mükemmel özellikte bir malzeme olduğu unutulmamalıdır. Artık devletler yeni yol yapmak yerine, mevcut olanı onarmayı tercih ettiklerinden, kirecinde, katkı maddesi olarak önemi gün geçtikçe artmaktadır (Çetin, 2011).

### 2.3.5.3. Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu

Bitümde alternatif bir stabilizasyon katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bitümle iyileştirme ilk olarak ABD’de 1925 ile 1932 yıllarında yapılmıştır. Bu stabilizasyonda yol altyapısı sıvı asfaltlar ile karıştırılıp sağlam bir temel elde edilmiştir (Cilason, 1964).

Şekil 2.12’de bitüm örneği gösterilmiştir;



Şekil 2.12. Bitüm Örneği (Anonim, 2010b)

Altyapının üstündeki zeminde bağlayıcılık sağlamak ve zemini sudan korumak amacıyla, ayrıca zeminin her türlü hava koşullarında mukavemetini artırmak amacıyla zemin-bitüm (asfalt) iyileştirmesi yapılmaktadır. Zeminin bitüm ile iyileştirilmesine etki eden en önemli faktör, likit haldeki bitümlerin zemin taneleri içerisinde homojen dağılım sergilemesidir. Diğer iyileştirmeler gibi bitüm ile yapılan iyileştirmelerde de dayanımı artırmak karma süresine bağlıdır. İyi bir karma süresiyle yapılan iyileştirmelerin dayanımında diğer iyileştirmelere göre daha yüksek olacaktır.

Zemin-bitüm stabilizasyonlarında kullanılacak olan su ve likit asfalt malzemelerinin yüzdelerinin toplamı, sıkıştırılacak zeminin boşluk hacmini geçmemelidir. Zeminin mevcut tane boyutu ufaldıkça ve plastisitesi yükseldikçe, zemin ve bitümlü malzemenin karıştırılması zorlaşmaktadır. Zeminde granüler

malzemenin bulunması ile iyileştirilecek zemin direnci ve mukavemeti yükselir, ayrıca kullanılacak bitümden tasarruf edilmektedir. Farklı zemin türlerine uygulanan bitüm sayesinde mukavemet artırılabilir, fakat karışımda ne kadar fazla granüler malzeme olursa, su geçirimsizliğinin sağlanması için bir o kadar fazla bitüm gereklidir. İnce taneli zeminlerin plastisite indeksinin en çok % 12 civarında olması, bitüm ile iyileştirme için istenen bir özelliktir. Plastisite indeksinin yüksek olduğu zeminlerde kürleşmesi orta veya hızlı olan bitümler tercih edilmelidir. Bitüm-kum iyileştirmeleri özellikle deniz yollarında veya kıyı bağlantı yollarında başarıyla uygulanmıştır. Bu noktada asfaltın etkisi zemindeki mevcut kumun ve kilin taneciklerinin arasındaki yapışmayı sağlamaktır. Bu sayede su geçirimsizliği maksimum seviyeye ulaşacaktır (Umar ve Ağar, 1985).

Yapılan araştırmalara göre; ince taneli zeminler üzerindeki iyileştirmelerde % 4-8 oranında, kumlu zeminler üzerindeki iyileştirmelerde % 4-10, çakıl ve kumlu-çakıllı zeminler üzerinde yapılan iyileştirmelerde ise % 2-6 oranında bitüm miktarının değiştiği gözlemlenmiştir (Wright ve Paquette, 1987).

#### **2.3.5.4. Uçucu Kül (UK) ile Zemin Stabilizasyonu**

Dünyada yükselen enerji ihtiyacını karşılamak için işletilen sanayi tesislerinde uçucu kül üretimi de zamanla artmıştır. Üretimi termik santraller ile gerçekleştirilen külün, hemen hemen %75-85'i uçucu kül şeklinde elde edilmektedir (Şenol v.d., 2003).

ASTM C 618-01' e göre UK, kimyasal içeriklerine göre C v F sınıfı olmak üzere ikiye ayrılır. Fakat sınıfı olmayan UK'da bulunmaktadır, bunları ise üçüncü bir tür şeklinde isimlendirilmektedir. F tipi küller içerisinde çok az miktarda kireç (CaO) içerir. Ancak C tipi uçucu küller belirli oranlarda kireç içermektedirler.

C tipi küller, F tipinden daha yoğun kireç içerdiğinden kimyasal tepkimeler hemen meydana gelmektedir. Buna karşılık F tipinde daha az kireç olduğu için tepkimelerin başlaması için dışardan kireç eklenmesi şarttır (Şenol v.d., 2003).

Şekil 2.13'te endüstriyel fabrikaların bacalarından çıkan kül gösterilmiştir.



**Şekil 2.13.** Uçucu Kül Oluşumu (Anonim, 2018c)

Uçucu küllerin mühendislik uygulamalarında oldukça fazla kullanılmasının sebeplerinden bazıları; kimyasal özelliklerinin mühendislik koşulları ile elverişli olması, kolay ve ekonomik şekilde temin edilmesi, çevreye verdiği zararları minimize etmek ve bunun yanında ekonomik çözümler aranılmasıdır. Uçucu kül, taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek ısılarda yakılması sonucunda oluşan külün, baca gazları yardımıyla taşınan mekanik ve elektrostatik filtreler yardımı ile tutulan silis ve alümina – silisli toz halinde bir yanma kalıntısıdır şeklinde açıklanmaktadır. Uçucu küllerin tek başlarına bağlayıcı özelliği yoktur. Fakat su ile etkileşime girdiğinde kireç ile reaksiyona girip, bağlayıcılık özelliği elde eden puzolanik malzemedir. Bundan dolayı UK'lar birçok değişik sektörde fazlaca kullanılan yapay puzolanlardır (Şenol v.d., 2003). Şekil 2.14'te uçucu külün şekli ve depolanması gösterilmiştir.



**Şekil 2.14.** Uçucu Kül Örneği (Anonim, 2018c)



Uçucu küllerin özellikleri genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Uçucu kül, oldukça ince takribi olarak silt boyutunda bir malzemedir.
- Kireç veya su ile karıldıklarında katılaşma özelliği gösteren malzemelerdir.
- Zeminin içerisine katılan uçucu kül miktarı yükseldikçe zeminin kayma dayanımında yükselmektedir.
  - %5 uçucu kül katılan bir zeminin, dayanımında kür süresine bağlı olarak %20 oranında artış olabilmektedir.
  - Uçucu külün, zemindeki yüzdesinin arttırılması bu değerden sonra dayanımı ciddi oranda değiştirmemektedir.
  - Uçucu kül ile birlikte kireç katılmış zeminlerde kireç miktarına bağlı olmakla birlikte dayanım yaklaşık %50 civarında artmıştır (Çetin, 2011).

Uçucu küller inşaat alanındaki kullanım yerlerini aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

- Çimento, ateş tuğlası, beton, tuğla üretiminde,
- Baraj gövdelerinde ve enjeksiyon işlemlerinde,
- Yol dolgu malzemelerinde,
- Yol inşaatlarındaki zeminin stabilizasyonu ile temel ve alt temel malzemesi olarak,
- İstinat duvarı inşaatlarında, duvarın arkasında dolgu malzemesi olarak vb. (Çetin, 2011).

UK İlk defa, stabilizasyon katkı maddesi olarak, ABD’de 1938’li yıllarda yol yapımında çimento ile karıştırılarak kullanılmıştır. Çalışmalar sonrasında UK’ün asfalt karışımı içerisinde ince malzemenin bir miktarının yerine geçebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak başka bir malzemeye gerek kalmadan UK ve kum karışımının kaliteli ve ekonomik olarak düşük maliyetlerle elde edilebilecek stabilizasyonun yapılacağı elde edilmiştir. Dünya’da ortaya çıkan UK miktarı takribi olarak yılda 500 milyon tonu aşmaktadır. Bu UK miktarının % 75’ten fazlası maalesef değerlendirilememektedir. Ülkemizde UK üretimi ise yılda takribi olarak 15-16 milyon ton arasında değişmektedir. Bu rakamın, 2050 yıllarında 50 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Ülkemizde de ciddi oranlarda üretilen bu katkı maddesinin, gerekli analizleri ve deneyleri yapılarak stabilizasyon işleminde kullanılması hem yol yapımındaki maliyetleri düşürecek, hemde sağlam zeminler elde etmemize olanak sağlayacaktır. Uçucu külün, zemin iyileştirmesinde kullanılmasında etkili olan en

önemli kriterlerden birisi ise uçucu külün kendi içinde sınıflandırılabilmesidir (Şenol v.d., 2003).

#### 2.4. Taban Zeminlerinin Yol Üstyapı Kalınlıklarına Etkileri

Yol üstyapı projesi hazırlarken unutulmaması gereken konu, üst tabakalardan gelecek yüklerin aşağıdaki zemine aktarılıyor olmasıdır. Yükün geleceği zemin ne kadar sağlam ise yük karşısında göstereceği dayanımda bir o kadar yüksek olacaktır. Haliyle üstyapı projesinde herhangi bir gevşeme, kayma, çökme vb. sorunlar ile karşılaşılacaktır.

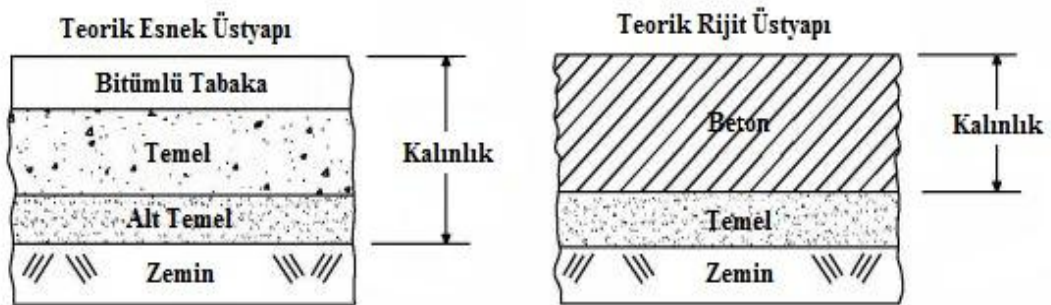
Bu bölümde, yol üstyapısından ve üstyapının projelendirme safhasında göz önünde bulunması gereken önemli faktörlerden bahsedilip, zeminlerin üstyapı kalınlıklarına nasıl etki ettikleri incelenecektir.

##### 2.4.1. Yol Üstyapısı

Yol üstyapısı, alt temel, temel ve kaplama tabakalarını içine alan yol yapısı olarak tanımlanmaktadır. Karayolu üstyapısı, esnek ve rijit olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Karayolları üstyapı tasarımında etkili olan faktörler, tasarımın ömrü süresince tahmin edilen veya beklenen trafik yükleri ve çevre koşulları için üstyapının tabaka kalınlıklarının ve malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir (Ağar ve Umar, 1991).

Karayolu üstyapısı iki şekilde tasarlanmaktadır. Bunlar esnek ve rijit üstyapılardır. Bağlayıcı malzeme olarak asfalt çimentosunun kullanıldığı esnek üst yapı genellikle asfalt betonu kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşmaktadır. Portland çimentosundan yapılan beton plaklar ile temel tabakasından oluşan üstyapıya ise rijit üst yapı ismi verilmektedir (Whiteoak ve Lav, 2004).

Şekil 2.15'te esnek ve rijit üstyapının teorik olarak kesit görünümü verilmiştir.



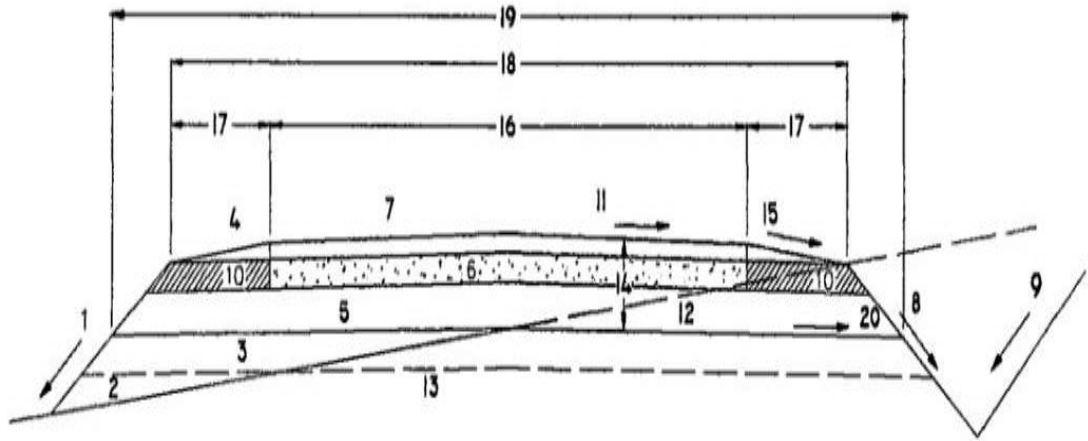
Şekil 2.15. Esnek ve Rijit Üstyapının Teorik Görünümü



## 2.4.2. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapıları, üzerinden geçmesi hedeflenen araç yoğunluğu için gerekli performansa ve araçların oluşturduğu gerilmelere karşı uzun süre boyunca yeterli mukavemete sahip olacak biçimde dizayn edilmiş, farklı özellikleri bulunan farklı tabakalardan oluşan çok tabakalı yapılar şeklinde tanımlanmaktadır (Giriş, 2007).

Şekil 2.16'da tipik bir esnek üstyapı enkesiti verilerek, esnek üstyapıyı oluşturan kısımlar gösterilmiştir.



- |                                                   |                                       |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1—Dolgu Şevi                                      | 11—Yolun Enine Eğimi                  |
| 2—Doğal Zemin                                     | 12—Taban Yüzeyi (Tesviye Yüzeyi)      |
| 3—Seçme Malzeme Tabakası (Gerekli Olduğu Durumda) | 13—Yol Gövdesi (Taban Zemini)         |
| 4—Banket Kaplama                                  | 14—Üst Yapı Proje Kalınlığı           |
| 5—Alt Temel                                       | 15—Banket Eğimi                       |
| 6— Temel Tabakası                                 | 16—Trafik Şeritleri Genişliği         |
| 7— Kaplama Tabakası                               | 17—Banket Genişliği                   |
| 8— Hendek Şevi                                    | 18—Yol Genişliği (Platform Genişliği) |
| 9— Yarma Şevi                                     | 19—Üst Yapı Taban Genişliği           |
| 10—Banket Temeli                                  | 20—Taban Yüzeyinin Enine Eğimi        |

Şekil 2.16. Tipik Bir Esnek Üstyapı Enkesiti (Whiteoak ve Lav, 2004)

Esnek üstyapıların performans ve dayanımı aşağıdaki kriterlere bağlıdır;

- Sürüş emniyeti için gerekli kayma mukavemetine sahip,
- Trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmelerden dolayı kalıcı deformasyonlara karşı mukavemet gösterebilen,
- Kaplamanın, temele üzerindeki suları sızdırmayacak kadar geçirimsiz,

- Trafik yüklerini, mevcut zeminin taşıma gücünü geçmeyecek biçimde yapacak kalınlığa ve mukavemete sahip,
- Sürüşün konforlu olması için pürüzsüz yüzeye sahip (Giriş, 2007).

### **2.4.3. Esnek Üstyapı Tipleri**

Esnek üstyapılar, yüzeysel veya sathi yani düşük standartlı olan kaplamalar ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalar, yani yüksek standartlı kaplamalar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Düşük standartlı kaplamalar genellikle trafik yoğunluğunun daha az olduğu yerlerde, yüksek kaliteli bitümlü sıcak karışımlar ise yüksek standardda sahip karayolu ve otoyollarda kullanılmaktadır (Giriş, 2007).

#### **2.4.3.1. Kaplamasız Esnek Üstyapılar**

Ülkemizde halen, önem derecesi ve trafik yükü düşük olan yollarda temel-alttemel tabakalarının yapılmasından ve kompaksiyona maruz bırakılmasından sonra bu tabakaların üzerine başka herhangi bir aşınma tabakası uygulanmadan insanların kullanımına sunulan yollar mevcuttur. Bu yollara kaplamasız yollar denilmektedir. Bu yollarda kaplama tabakası olmadığından, mevcut tabakalar sudan korunmaları pek mümkün olmamaktadır. Haliyle yeterince geçirimsiz olmayan bu tabakalardan doğal zemine sular sızabilmekte ve yeterince mukavemete sahip olmayan doğal zeminde üstyapıdan kendisine gelen yükü taşımakta zorlanmaktadır. Bundan dolayı yüzeyde bozulmalar oldukça hızlı olmakta ve bu yolların ömürleri kaplaması bulunan yollara nazaran çok daha kısa olmaktadır (Giriş, 2007).

#### **2.4.3.2. Sathi Kaplamalı Yollar**

Sathi kaplamalar, düşük standardda sahip yollarda uygulanan bir kaplama türüdür. Bu nedenle yapılacak proje süresi içinde, üzerinden geçeceği varsayılan toplam 8.2 ton standart dingil yükü 100.000'den fazla ve 2.000.000'dan az olmalıdır. Karayolları Genel Müdürlüğüne (KGM) göre yol yapımı ve projelendirme safhasında toplam standart dingil yükü 100.000 ile 500.000 arasındaysa tek kat, 500.000 ile 2.000.000 arasındaysa çift kat sathi kaplama yapılmalıdır. 2. ve hatta 3. katlarda kullanılacak agreganın boyutuda ufaldığından boşluklar giderek daha da azalmakta ve daha da düzgün bir yüzey oluşmaktadır (Tatlı, 2004).

Şekil 2.17'de sathi kaplamalı yol örneği gösterilmiştir.



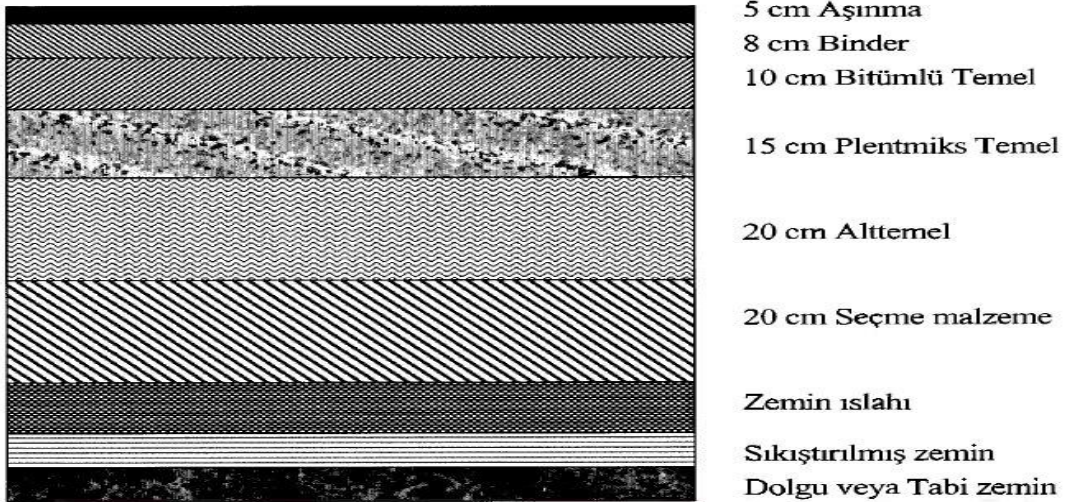
**Şekil 2.17.** Sathi Kaplamalı Yol Örneği (Anonim, 2018d)

Takribi olarak ülkemizdeki karayolu ağının sathi kaplamalı olan kısmı hemen hemen %63'lük bir dilimi kaplamaktadır. Ayrıca sathi kaplamalı yollarda, yüksek sürtünme katsayısı sayesinde fren mesafelerinde önemli derecede azalma görülmektedir. Bundan dolayı bu tip kaplamalar özellikle yüksek eğimli yollarda tercih sebebidir (Tatlı, 2004).

#### **2.4.3.3. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Kaplamalı Yollar**

Bir asfalt plentinde agrega ile asfalt bağlayıcı sıcak olarak karıştırılır ve yola nakledilir. Nakilden sonra sıcak olarak sıkıştırılırlar, buna bitümlü sıcak karışım denilir (Tatlı, 2004).

Şekil 2.18'de bitümlü sıcak karışım kaplamalı üst yapı kesiti verilmiştir.



**Şekil 2.18.** Bitümlü Sıcak Karışım Kaplama Üstyapı Tipi (Tatlı, 2004)

Bitümlü sıcak karışımlar ülkemizde çok yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu kaplamalar, genellikle standartı yüksek olan yollarda kullanılmaktadır

#### 2.4.4. Esnek Üstyapı Tasarımı

Üstyapı tasarımı üç ana grupta toplanmaktadır. Bunlar ampirik, analitik ve analitik-ampirik yöntemlerdir. Yapılan deneylerin sonuçlarını baz alan ve deneylerin koşullarının bağlayıcı olduğu yöntem, ampirik yöntemler olarak adlandırılmaktadır. Ampirik yöntemlerin uygulanması ciddi zaman almakta ve aynı zamanda pahalı olmaktadır. Ampirik yöntemler ile çözümlenemeyen bazı faktörlerin, ampirik formüller ve bağıntılarla, aynı zamanda performans gözlemleri ile modellendirilmesi yönteminde ampirik ve analitik yöntem olarak tanımlanmaktadır. Analitik yöntemlerse; üstyapı tabakasının kalınlıklarının ve üstyapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin, trafik yükleriyle, çevre koşullarında dikkate alınarak geliştirilmiş matematiksel modellerle, bunlardan tasarlanan abaklar ve bilgisayar programlarının yardımı ile hesaplanması esasına dayanan yöntemlerdir (Dündar, 1998).

#### 2.4.5. AASHTO Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

Bu yöntemde yapısal tasarım (tabakanın kalınlığı ve cinsi) ile yükleme şartlarının (tekerrür sayısı ve dingil yükleri) kaplamaya olan etkileri ve kaplama performansının yük tekerrürleri altındaki değişimi baz alınmaktadır. AASHTO yol testlerinde yapılan gözlem ve ölçümlere dayanarak kaplama kalınlığını veren formül elde edilmiştir (Öztürk, 2006).

Taşıtların güvenli ve konforlu bir şekilde seyahat edebilmelerinin dayanağı şüphesiz ki kaplamanın performansını göstermektedir. AASHTO yöntemi, kaplamanın performansını "Servis Yeteneği" şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yöntemdeki servis yeteneği indeksi (PSI), (2.2) nolu formülle hesaplanmaktadır (Öztürk, 2006)

$$PSI = 5,03 - 1,91 \times \log(1 + SV) - 1,38 \times RD^2 - 0,01 \times \sqrt{C + P} \quad (2.2)$$

Burada,

- PSI : Servis yeteneği indeksi,  
SV : Ortalama eğim değişimi (boyuna ondülasyon ölçümü),  
RD : Ortalama tekerlek izi derinliği, inç (cm)  
C : Çatlaklar (Her 100 ft<sup>2</sup> (9,29 m<sup>2</sup>) de yorulma ve diğer tip çatlak alanı)

P : Yamalar (Her 1000 ft<sup>2</sup> (92,9 m<sup>2</sup>) de yapılan yama alanı) şeklinde ifade edilmektedir.

Bu tasarım yönteminde (2.3) nolu bağıntı kullanılmaktadır;

$$\begin{aligned} \text{Log}W_{8,2t} = & 9,36 \log(\overline{SN} + 1) - 0,20 + \frac{\log [(4,2 - P_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(\overline{SN} + 1)^{5,19}]} - \log \frac{1}{R} \\ & + 0,372(S_i - 3) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Burada,

$W_{8,2t}$  : 8,2 ton tek dingil yükünün nihai servis yeteneğine erişmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı,

$\overline{SN}$  : Düzeltilmiş kaplama yapısal sayısı,

$S_i$  : Kaplamanın üzerine oturduğu zeminin izafi taşıma gücü,

$P_t$  : Nihai servis yeteneği indeksi,

$R$  : Bölgesel faktör.

Burada,  $S_i$  veya CBR (kaliforniya taşıma oranı) zeminin taşıma değerini gösterir. SN üstyapı sayısının hesabını yapmak için, S zemin değeri ile  $W_{8,2t}$  eşdeğer dingil yükü tekrar sayısına bağlı olarak nomograf çözümü gerekli abaklar yardımıyla yapılmaktadır. Buradan öncelikle düzeltilmiş kaplama sayısı bulunur daha sonra R bölge faktörüyle düzeltilerek gerçek SN değeri hesaplanır (Öztürk, 2006)

#### 2.4.5.1. Son Hizmet Yeteneği İndeksi, $P_t$ (Servis Kabiliyeti)

Trafik analiz periyotları sonunda, bir yolun herhangi bir takviye yapılmadan veya o yolun yeniden yapılması gerekmeksizin izin verilen en düşük hizmet yeteneği verisidir. Bu indeks genelde 2,0 ve 2,5 alınmaktadır (Ağar ve Umar, 1991).

Çizelge 2.5'te servis kabiliyetinin seçileceği tablo verilmiştir.

**Çizelge 2.5.** Servis Kabiliyeti ( $P_t$ )' nin tayini (Ağar ve Umar, 1991)

Yol Sınıfı	$P_t$
Otoyollar, Devlet Yolları	2.5
İl Yolları	2.0

#### 2.4.5.2. Eşdeğer Dingil Yükü Tekrar Sayısı, ETDY

Farklı ağırlıkta ve sayıda dingil yüklerinin, herhangi bir üstyapıda oluşturduğu toplam etkiye eşdeğer bir etki oluşturan 8.2 ton dingil yükünün tekerrür sayısı şeklinde ifade edilmektedir (Yoder ve Witczak, 1975).

#### 2.4.5.3. Trafiğin Değerlendirilmesi

Trafik yükleri, üstyapı projelendirmesi sırasında üstyapının kalınlığını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Yol üzerinden geçen farklı dingil yükleri, 8.2 ton eşdeğer standart dingil tekerrür sayısına çevrilerek, dingil yükleri bulunur. (AASHTO 1993 ve Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi, 2006)

İlk gün için günlük trafik ( $t_0$ ) ve trafik artış katsayısı ( $r$ ) ise, ( $t$ ) sene sonraki günlük trafik, (2.4) nolu bağıntı ile hesaplanabilir.

$$t_t = t_0 \times (1+r)^t \quad (2.4)$$

Ortalama günlük proje trafiği ( $t_p$ ) ise (2.5) nolu bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.

$$t_p = 0,4343 \times \frac{t_t - t_0}{\log (t_t / t_0)} \quad (2.5)$$

Yolun ömrü süresince geçecek toplam  $T_p$  ise (2.6) nolu bağıntıdan bulunabilir.

$$T_p = t_p \times 365 \times t \quad (2.6)$$

Yukarıdaki 3 faktör belirlendikten sonra, proje ömrü boyunca yoldan geçecek Toplam Standart Dingil Yükü Tekrar Sayısı ( $W_{t8.2}$ ), (2.7) nolu bağıntıyla hesaplanabilir.

$$W_{t8.2} = T_p \times TEF \times D_\delta \times D_y \quad (2.7)$$

Burada;

TEF : Taşır eşdeğerlik faktörünü,

$D_y$  : Yön dağıtma faktörünü,

$D_\delta$  : Hesap şeridi faktörünü ifade etmektedir.

Şerit dağıtma faktörü  $D_\delta$ , şerit sayısına göre değişkenlik göstermektedir. Çizelge 2.6' dan verilen değerlerden  $D_\delta$  seçilmektedir.

**Çizelge 2.6.** Şerit Dağıtma Faktörü (D<sub>ş</sub>) (AASHTO 1972)

Bir Yöndeki Şerit Sayısı	Şerit Dağıtma Faktörü (D <sub>ş</sub> )
1	1,0
2	0,80-1,0
3	0,60-0,80
4	0,50-0,75

Taşıt Eşdeğerlik Faktörü (TEF), AASHTO'ya göre, esnek üstyapı sistemlerinde; tek, tandem, tridem dingil yükleri, standart tek dingil yükü (8.2 ton) sayısına dönüştürülmüştür. TEF (2.8) nolu bağıntı ile hesaplanabilir.

$$TEF = \frac{\sum W_{dingil} \times DEF}{\sum Araç} \quad (2.8)$$

Burada;

DEF : Dingil eşdeğerlik faktörünü,

$\sum W_{dingil}$  : Tüm dingil ağırlıklarını,

$\sum Araç$  : Taşıt sayısı olarak ifade edilebilir.

Mevcut trafik grubu ve trafik kategorisine göre değişen TEF değerleri Çizelge 2.7'de verilmiştir.

**Çizelge 2.7.** Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF) (AASHTO 1972)

Trafik Grubu	Trafik Kategorisi (Ticari Araç/Gün)				
	0-250	250-500	500-1500	1500-3000	>3000
Kamyon	1.74	1.83	1.96	2.04	2.18
Treyler	2.78	2.88	3.06	3.15	3.35
Otobüs	0.90	0.90	0.95	0.95	0.98
Otomobil	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006

#### 2.4.5.4. Bölge Faktörü, R

Çevre ve iklim şartları için AASHTO projelendirme denklemine, yol deneylerinin yapıldığı bölgelerden daha farklı olan yerlerde yapılan üstyapı projelerinde de eşitliği sağlamak maksatıyla bölge faktörü parametresi de dahil edilmiştir. Bu parametreyi doğrudan tayin için herhangi bir formül veya bağıntı bulunmamaktadır. Farklı iklim

koşullarında uygulanan deneylerin sonuçlarından istifade edilerek AASHTO yönetmeliği tipik bölge faktörü değerleri vermiştir. Bu değerler Çizelge 2.8’de verilmiştir (Ağar ve Umar, 1991).

**Çizelge 2.8.** Bölge Faktörü Değerleri (Ağar ve Umar, 1991)

<b>Zemin Durumu</b>	<b>R</b>
Donmuş taban zemini (12,5 cm veya daha fazla derinlikte)	0,2-1,0
Kuru taban zemini (Yazın ve sonbaharda)	0,3-1,5
Doygun taban zemini ( İlkbaharda don çözülmesinde)	4,0-5,0

#### 2.4.5.5. Üstyapı Sayısı, SN

SN üstyapı sayısı, son hizmet yeteneği indeksi, proje trafiği ve zemin taşıma değeriyle bölge faktöründen türetilen ve çeşitli esnek üstyapı tabakalarının kalınlıklarının bulunması için kullanılan izafi bir değer şeklinde tanımlanmaktadır. SN (2.9) nolu bağıntı ile hesaplanmaktadır (AASHTO 1972).

$$SN= a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 + a_3 \times D_3 \dots a_i \times D_i \quad (2.9)$$

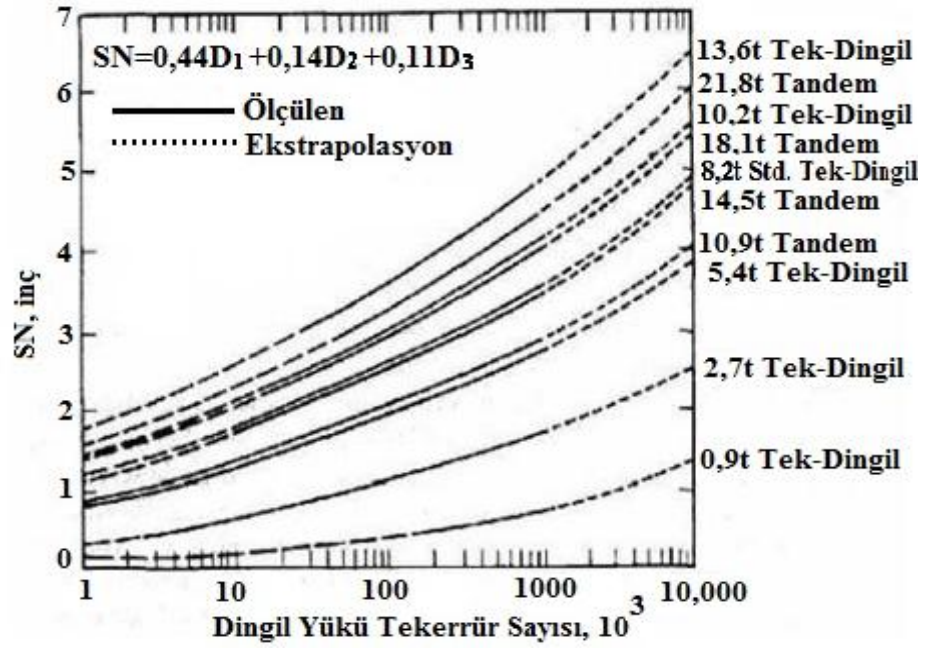
Bu denklemden;  $a_1, a_2, a_3$  üstyapı tabaka katsayılarını ifade etmektedir. Sırası ile ifade edecek olursa kaplama, temel ve alt temel şeklindedir.

$D_i$  değeri ise farklı tabakaların kalınlıklarını ifade etmektedir. Şekil 2.19’da esnek kaplamanın, belirli bir dingil yükü tekerrür sayısına bağlı değişimi verilmiştir. Dingil yükü tekerrür sayısı ile SN değeri tayin edilir.

SN değeri bulunduktan sonra Çizelge 2.9’daki tabaka katsayılarına göre gerekli tabaka kalınlıkları hesaplanmaktadır.

Ayrıca Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de AASHTO yöntemine göre esnek üstyapı tasarımında kullanılan abaklar verilmiştir. Bu abaklar sayesinde SN değeri tayin edilebilir.

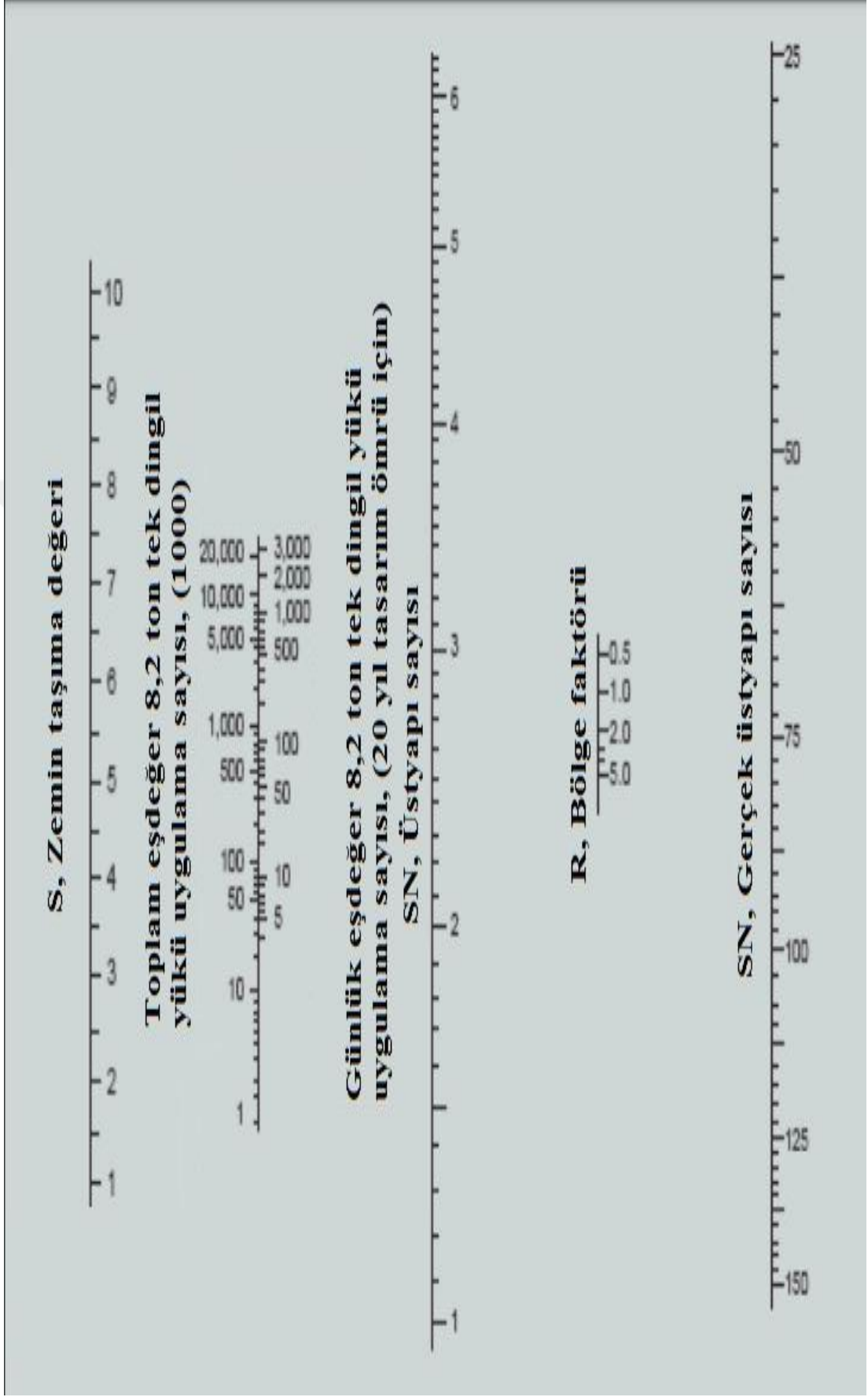




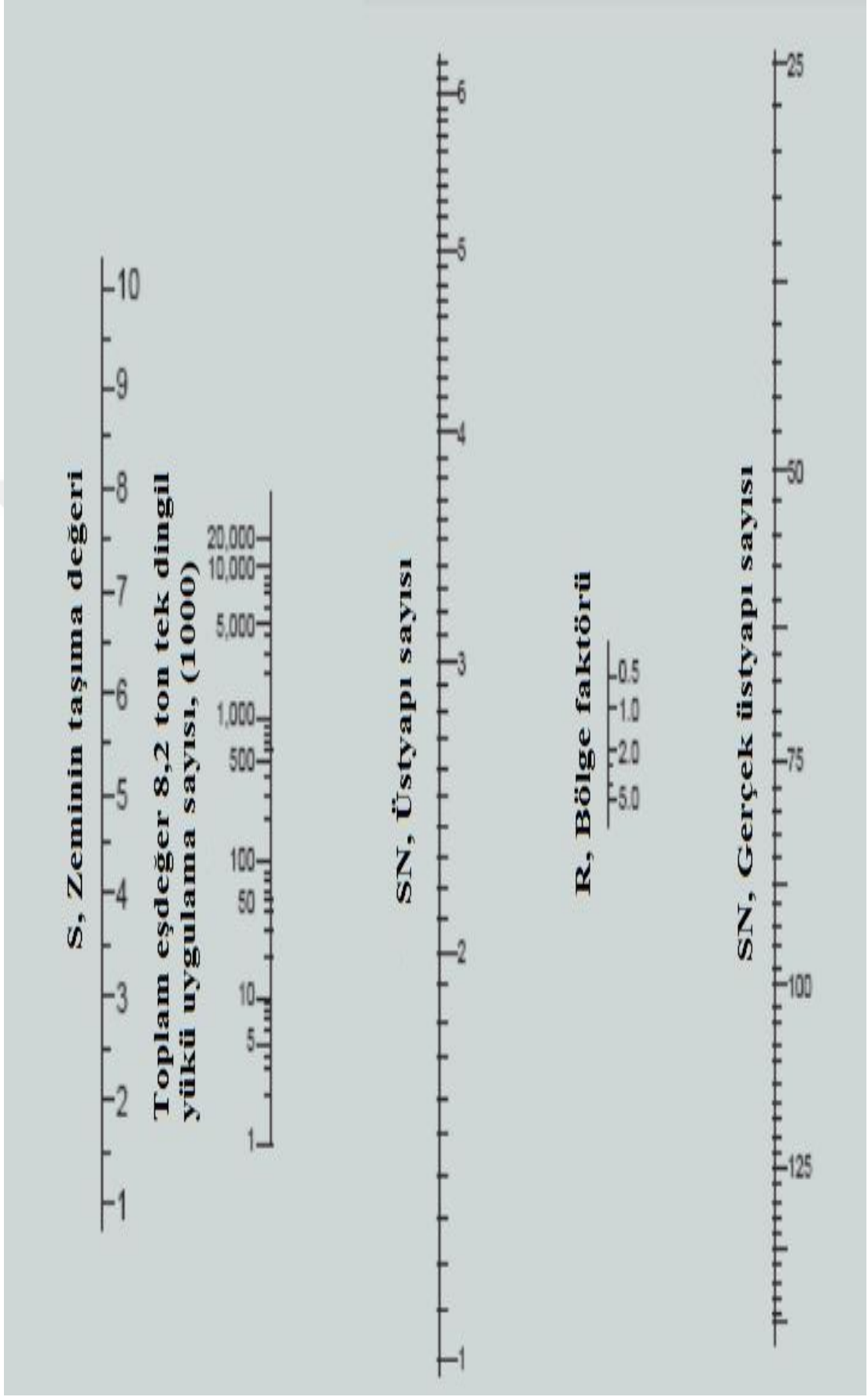
Şekil 2.19. Esnek Kaplamanın ve Belirli Bir Dingil Yüğü Tekerrür Sayısına Bağlı Değişimi (AASHTO 1972)

Çizelge 2.9. AASHTO'ya ait Tabaka Katsayıları (Tatlı, 2004)

Üstyapı Bileşeni	Tabaka Katsayısı (A <sub>t</sub> )
Kaplama Tabakası	
Roadmix	0.20
Plenmix	0.44
Kum asfalt	0.40
Temel Tabakası	
Kumlu çakıl	0.07
Kırmataş	0.14
Çimento Stabilize	
Basınç dayanımı	
650 psi veya fazla	0.23
400 psi, 650 psi arası	0.20
400 psi veya az	0.15
Bitüm Stabilize	
Kalın cins	0.34
Kum asfalt	0.30
Çimento Stabilize	0.15-0.30
Alt temel Tabakası	
Kumlu çakıl	0.11
Kum veya kumlu kil	0.05-0.10



Şekil 2.20. Esnek Üstyapı Projelendirme Abağı, Pt = 2.0 (AASHTO 1972)



Şekil 2.21. Esnek Üstyapı Projelendirme Abağı, Pt = 2.5 (AASHTO 1972)

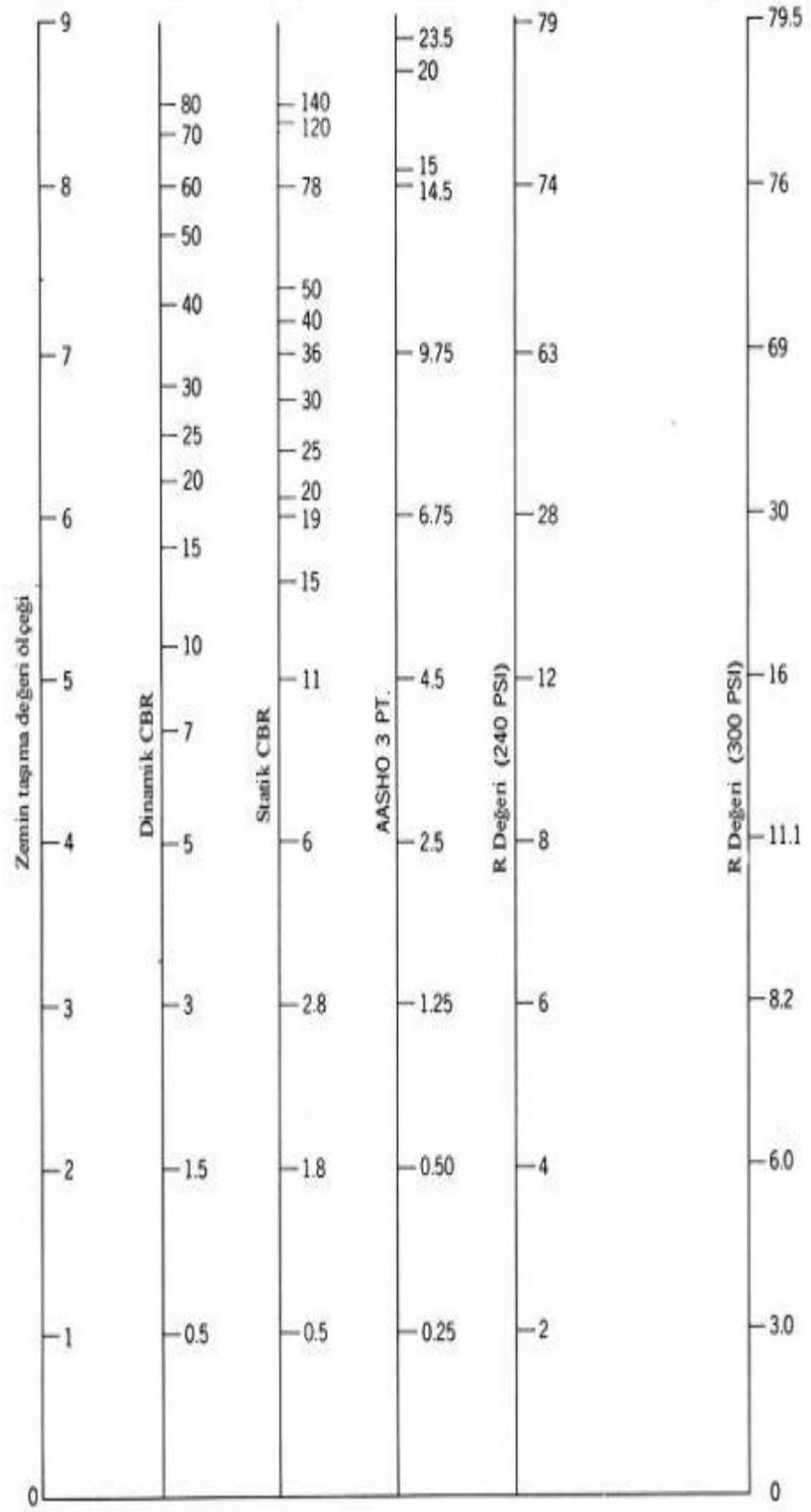
AASHTO 1986 yönteminde, AASHTO 1972 yöntemine göre değiştirilen ve ilave edilen yenilikler yer almaktadır. Bunlar;

- Bu yöntemde, rasyonel bir deney modeli oluşturmak ve kullanılacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesini daha da kolaylaştırmak için esneklik modülü ( $M_R$ ) ilave edilmiştir.  $M_R = 1500 \times CBR$  olarak alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir.
- Esnek üstyapılarda ki esneklik modülü ( $M_R$ ), rijit üstyapılarda yatak katsayısı ( $k$ ) ile tanımlanmaktadır.  $k$  değeri,  $M_R / 19,4$  olarak alınabilmektedir.
- Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve Bölge Faktörü (R) değerleri için tabaka katsayıları,  $M_R$ ' ye göre tekrar tanımlanmıştır.
- Nem ve ısı gibi çevresel faktörler, nesnel olarak bu yönetime dahil edilmiş olup, çevresel faktörlerin bu yöntem sayesinde tasarım uygulamasına daha rasyonel şekilde dahil edilmesi sağlanmıştır.
- Güvenirlik kavramı ilavesiyle, tasarımlara risk analizi kavramını dahil etmiştir. Güvenirlik kavramını, üstyapının maruz kalacağı yükün; üstyapının minimum hizmet süresini aşmayacak şekilde, karşı koyduğu sınırlar dahilinde olması olarak açıklanabilmektedir (Kök, 2008).

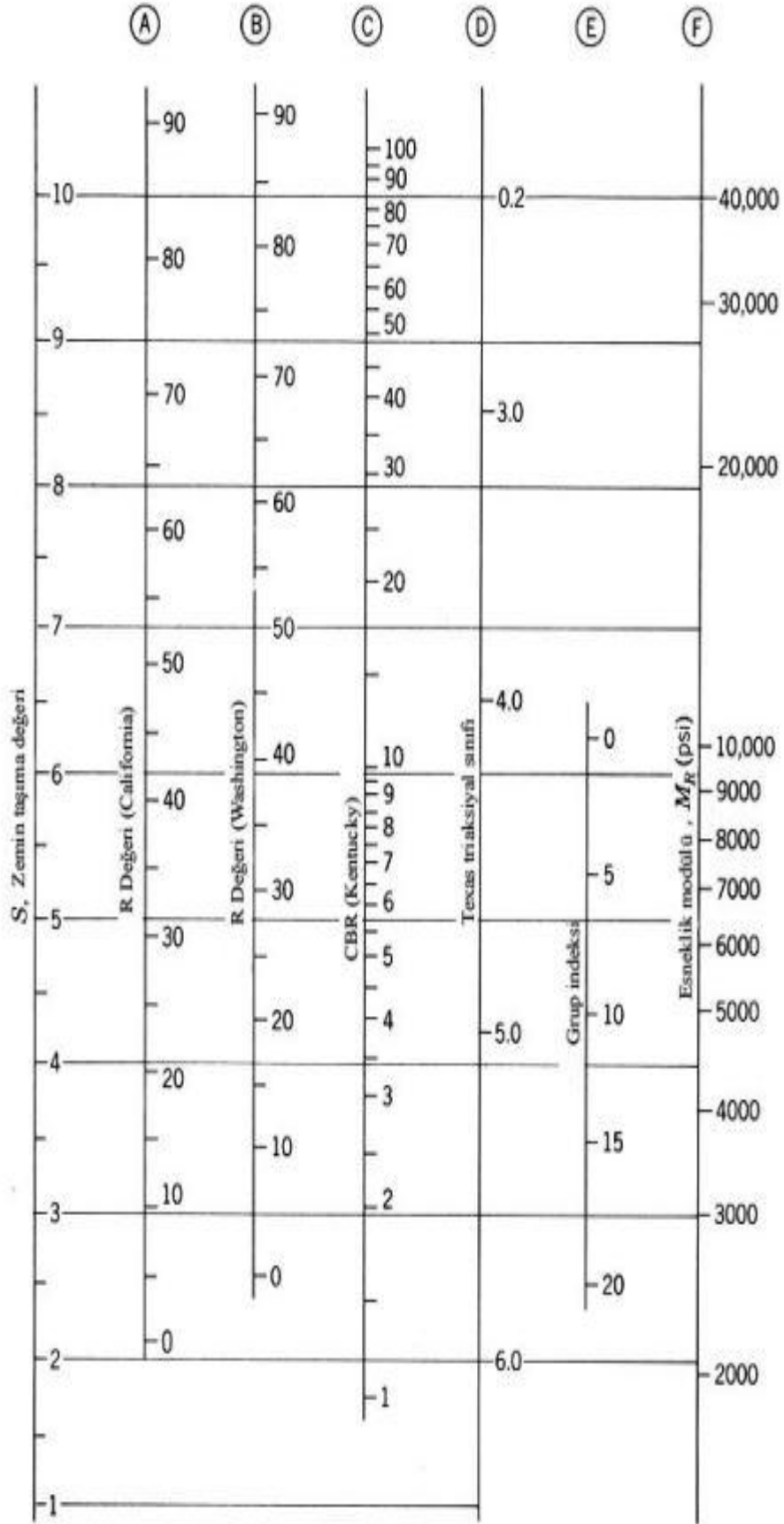
#### **2.4.5.6. Zemin Taşıma Değeri, S**

AASHTO esnek üstyapıları projelendirmesinde, zeminin taşıma gücünü gösteren farklı ölçekler geliştirilmiştir. Bu değer, deneyler yardımıyla doğrudan bulunamamaktadır. Her proje kuruluşu zemin deneyleri (üç eksenli serbest basınç deneyi, R ve CBR deneyleri) ve zemin taşıma gücünün korelasyonunu oluşturan bir yönetmelik kullanmaktadır. Aşağıdaki şekilde Utah State Highway Department tarafından oluşturulan korelasyon gösterilmiştir (Utah State Highway Department 1920).

Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'te R değeri ve CBR ilişkisini gösteren, zemin taşıma değeri korelasyonları verilmiştir (Kök, 2008).



Şekil 2.22. Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu 1. Grafik (Kök, 2008)



Şekil 2.23. Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu 2. Grafik (Kök, 2008)

#### 2.4.6. Rijit Üstyapılar

Çok yüksek trafik hacmine sahip ve ağıt taşıt trafiği yoğun olan karayollarında araçlar için gerekli emniyet ve konforu sağlamak amacıyla yapılan beton kaplamalar, yüksek standarta sahip rijit üstyapılardır. Aslında iki tabakadan meydana gelmektedir. Bunlar; belirli bir kalınlık ile dökülen granüler alttemel ile kısmen donatılı veya donatısız veya sürekli donatılı beton plaklardan meydana gelir (Giriş, 2011).

Beton kaplamaların diğer kaplamalara göre en büyük üstünlüğü, hizmet süresinin uzun olması ve ayrıca üstün bir dayanım sergilemesidir. Daha önceden uygulanmış asfalt yollar ile beton yolların, aynı iklim koşullarında performansları karşılaştırılmıştır. Çok şiddetli yaz sıcaklığına ve çok şiddetli kış soğuluğuna maruz bırakılan ve üzerinde ağır araç trafiği yoğun olan bu yolların ortaya koyduğu performans Çizelge 2.10'da verilmiştir (Edis, 2007).

**Çizelge 2.10.** ABD' nin çeşitli eyaletlerindeki yer alan yol kaplamalarının, mevcut performanslarının kıyaslanması (servis ömrü - yıl) (Edis, 2007)

<b>Kuruluş Eyalet</b>	<b>Beton</b>	<b>Asfalt</b>	<b>Oran</b>
Wisconsin	20-25	12-14	1.7-1.8
Minnesota	35	20	1.8
Kentucky	20	12	1.7
New York	20-25	10-13	2.0-1.9
Colorado	27	6-12	4.5-2.3
FHWA (1985)	13-30	6-20	2.2-1.5
FHWA (1971)	25	15	1.7

Çizelge 2.10'da görüldüğü gibi, beton yolların servis ömrü eyalet bazında 20-25 yıl arasında olurken, asfaltta bu 6-14 yıla düşmüştür. Servis ömrü oranı hesaplayarak, beton kaplamanın ömrünün asfaltta oranının 1.7-4.5 arasında değiştiğini ve ortalama olarak bu oranın 1.7-2.0 civarlarında olduğunu görülmektedir.

Yapılan başka araştırmalara göre beton yolların ömür beklentisi 34 yıla yaklaşırken, asfalt yolların ömrü ise hemen hemen beton yolların yarısı olan 17 yıla düşmektedir (Edis, 2007).

### **2.4.7. Rijit Üstyapı Tipleri**

Dünyada ve ülkemizde uygulanmış veya uygulamak için ciddi araştırmalar yapılmış birçok rijit üstyapı tipi bulunmaktadır. Bunlar arasında en çok kullanılan ve tercihen ülkemizin fiziksek, ekonomik ve ayrıca teknolojik koşullarına en uygun olduğu veya olacağı düşünülen rijit üstyapı tipleri hem avantajları hemde dezavantajları ile aşağıdaki gibi açıklanmıştır (Edis, 2007).

#### **2.4.7.1. Kalın Plak Kaplamalar**

Yapılacak olan kaplama ve temel tabakaları, halihazırda bulunan makine ve donanım ile tek bir geçiş ile döküldüğü için gereğinden fazla işlem sayısı ciddi oranda azalmaktadır. Kalın plak kaplamalarda, betonun rötresi azalmaktadır. Dingil yüklerinin derzlerde aktarımı ciddi oranda iyileşir ve ısının değişkenlik göstermesine karşı duyarlılığı azalır. Bu birleşimin içerisinde tane boyutu büyük olan agregalar kullanılırsa, ince agrega oranı ve hatta çimento oranı azaltılır. Bu sayede eğimi fazla olan yollarda ve dever uygulamalarında ciddi oranda kolaylık sağlanmış olur. Betonun üretimi, yerine ulaştırılması ve aynı şekilde yerine dökülüp, sonra serilip, sıkıştırılması tek bir işlem ile yapıldığı için yatırım maliyetleri ciddi oranda düşmektedir. (Edis, 2007).

#### **2.4.7.2. Lifli beton plak kaplamalar**

İçerisinde lif, çimento ve agrega barındıran betona lifli beton denilmektedir. Lifler genelde beton içerisinde süreksiz bir hareket sergiler, bunun yanı sıra betonda homojen dağılmış olarak yer alır. Yol betonları içerisinde en fazla kullanılan lifler arasında yer alan çelik lifler, betonun eğilme mukavemetini, betonun çarpmaya karşı dayanıklılığını, betonun tokluğunu, yorulma mukavemetini ve betonun çatlamaya karşı mukavemetini hissedilir oranda iyileştirmektedir. Teoride betonda kullanılacak olan lif oranı %4-5 arasında seyrederken, bu oranı inşaat alanlarında %2'lere varan düşüşle görmekteyiz. Bunun en büyük sebebi ise liflerin topaklaşma ihtimalinin olmasıdır (Ağar v.d., 1998).

#### **2.4.7.3. Ön Gerilmeli Beton Kaplamalar**

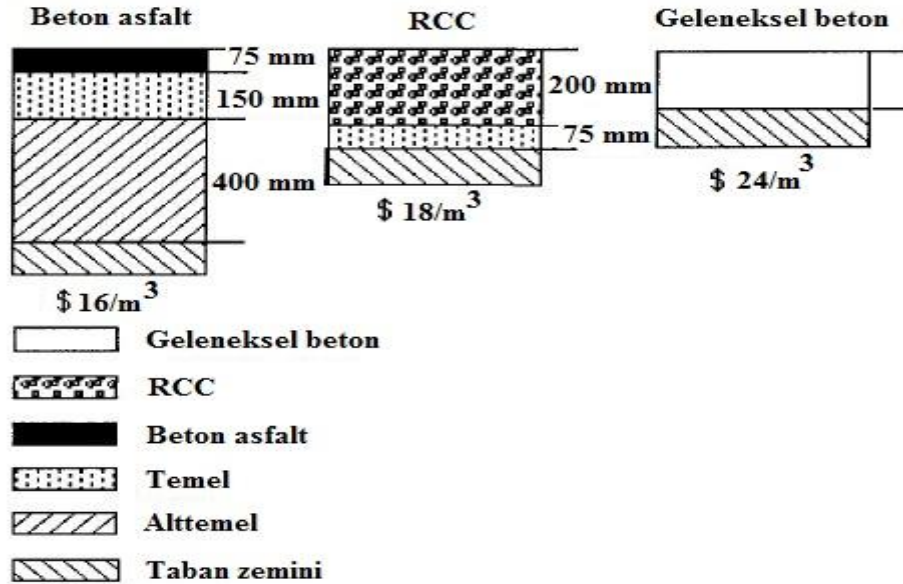
Yeterli oranda ön gerilme işlemi uygulanmak şartıyla, gerilmeler yönü ile homojen duruma gelen beton plakta, ısı değişikliklerinden dolayı ve mekanik zorlamalardan dolayı oluşabilecek çekme gerilmeleri oluşmamakta, bu sayede plağın kalınlığının, taşıma gücü fazla olan tabakalar üzerinde 12 ile 15 cm'ye kadar düşürülebilmesi



mümkün olabilmektedir. Ön gerilmeli plak, tasarım sürecinde taban zemininin taşıma durumu, plağın uzunluğu, ön veya ard germe işlemlerinde uygulanacak kuvvetin değeri, ön gerilmeli donatı ve ankraj aralıkları gibi özellikler mutlaka dikkate alınmalıdır (Ağar v.d.,1998).

#### 2.4.7.4. Silindirle Sıkıştırılan Beton Kaplamalar (RCC)

Bu kaplamalar, diğer beton kaplamalara göre daha yeni bir kaplama türünün örneğidir. Beton asfalt kaplamalarında kullanılan tekniklere benzer teknikler kullanılarak yapılan bu kaplamalar, genelde çift tamburlu titreşimli silindir ile sıkıştırılırlar. RCC ismini de kaplamanın yapım yönteminden almıştır. Bu teknik sayesinde büyük miktardaki betonlar, donatısız olarak kolaylıkla yerleştirilmektedir. Bundan dolayı RCC kaplamalar diğer beton kaplamalara nazaran daha ekonomik olmaktadır. Maliyet açısından %10-30 arasında daha düşük seyreden bu kaplamalar, genellikle havalanı pisti veya hızı düşük ağır taşıt trafiğinin çok olduğu yerlerde kullanılmakta olup, özellikle ekonominin önem arz ettiği yerlerde tercih sebebi olmaktadır. Aşağıdaki şekil yardımcı ile kaplama maliyetleri karşılaştırabilir. Şekil 2.24’de kaplamaların maliyetleri karşılaştırılmıştır (Ağar ve Taşdemir, 2002).



Şekil 2.24. Kaplama Maliyetlerinin Karşılaştırılması (Tatlı, 2004)

RCC ile geleneksel betonu ayırt edeceğimiz en önemli hususlardan biriside agrega gradasyonudur. RCC’ de maksimum tane boyutunu 25 mm veya daha az olduğunu

görmekteyiz. Bunun sebebidir ayrışmaların önüne geçmek, karma işleminin daha kolay ve hızlı olmasını sağlamak ve yüzeyin düzgünlüğünü sağlamaktır (Ağar ve Taşdemir, 2002).

#### 2.4.7.5. Sürekli Betonarme Yol Kaplamaları

Çimento betonunun zararlı özelliklerinden bazıları, büzülme, nem ve sıcaklık değışiklikleri ile çatlama eğilimi göstermesidir. Beton yollarda bırakılan derzler arasında bazen kot farkları da meydana gelebilmektedir. Bakımsız kalan ve geçirimsizliğini kaybeden derzlerde diğerk tehlikeli bir durum ise donatıların paslanması ve haliyle dirençlerini yitmesidir. Bu tehlike ve sakıncaları ortadan kaldırmak maksadıyla geliştirilen derzsiz yöntemle sürekli betonarme yol ismi verilmektedir. Haliyle bu teknik yol yapılarında kullanılacağı gibi, havaalanı pistleri gibi yerlerde de başarı ile kullanılmaya müsaittir. Ayrıca bu yollarda derz bulunmadığı için bakım ve onarım için ayrılan bütçe bir hayli azalmakta ve haliyle seyir halindeki araçlarında konforunu ciddi oranda artırmaktadır (Ağar v.d. 1998).

#### 2.4.8. Rijit Üstyapı Tasarımı

Rijit kaplamaların, esnek kaplamalara oranla en büyük avantajı trafik yüklerini, mevcut zemin üzerinde daha fazla alana yayarak, daha fazla mukavemet göstermeleridir. Bunu sağlamalarındaki en büyük unsur ise yüksek rijitliğe ve elastikiyet modüllerine sahip olmalarıdır. Rijit kaplamaların, trafikten veya çevreden gelen etkilere karşı direnç göstermesinden beton plaklar sorumludur. Bundan dolayı, rijit kaplamaların dizaynı bir nevi beton plakların kalınlığının bulunmasından ibarettir. Fakat zeminin taşıma gücü ve alttemel varlığı beton plağın kalınlığını etkilemektedir (Edis, 2007).

#### 2.4.9. AASHTO Rijit Üstyapı Tasarım Yöntemi

AASHTO tasarım yönteminde, beton plak kalınlığını belirlemek için, AASHTO yol deneyinden faydalanarak hazırlanan ve rijit üstyapıya etki eden faktörleri de içeren aşağıdaki (2.10) ve (2.11) nolu formüllerden yararlanılmaktadır (Kök, 2008).

Son Hizmet Yeteneği İndeksi,  $P_t = 2.0$  için deney yolu denklemi;

$$\log W_{t8.2} = \log W_{8.2} = 7,35 \log(d + 1) + \frac{G_t}{\beta} - 0,06 + 3,58 \log \left[ \frac{S_c(d^{0.75} - 1.132)}{690 \left( d^{0.75} - \frac{18.416}{Z^{0.25}} \right)} \right] \quad (2.10)$$

Son Hizmet Yeteneği İndeksi,  $P_t = 2.5$  için deney yolu denklemi;

$$\log W_{t8.2} = \log W_{8.2} = 7,35 \log(d + 1) + \frac{G_t}{\beta} - 0,06 + 3,42 \log \left[ \frac{S_c(d^{0.75} - 1.132)}{690 \left( d^{0.75} - \frac{18.416}{Z^{0.25}} \right)} \right] \quad (2.11)$$

Bu denklemlerdeki kısaltmalar aşağıdaki gibidir;

$t$  : Analiz süresi,

$W_t$  veya  $W_{8.2}$  : Analiz süresindeki eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı,

$d$  : Kaplama plağının kalınlığı, inç

$S_c$  : Betonun eğilme direnci (psi) 28 günlük,

$E_c$  : Betonun elastisite modülü (psi),

$K$  : Taban zemininin yatak katsayısı (psi/inç, pci),

$G_t$  :  $t$  analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksindeki kaybın,  $P_t = 1.5$  alınmasına karşılık gelen toplam potansiyel kayba oranının logaritmik fonksiyonudur.

$P_0$  : Üstyapının başlangıçtaki hizmet yeteneği indeksi (rijit deneme yolu için bu değer 4.5' tir.)

$P_t$  : Analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksidir.

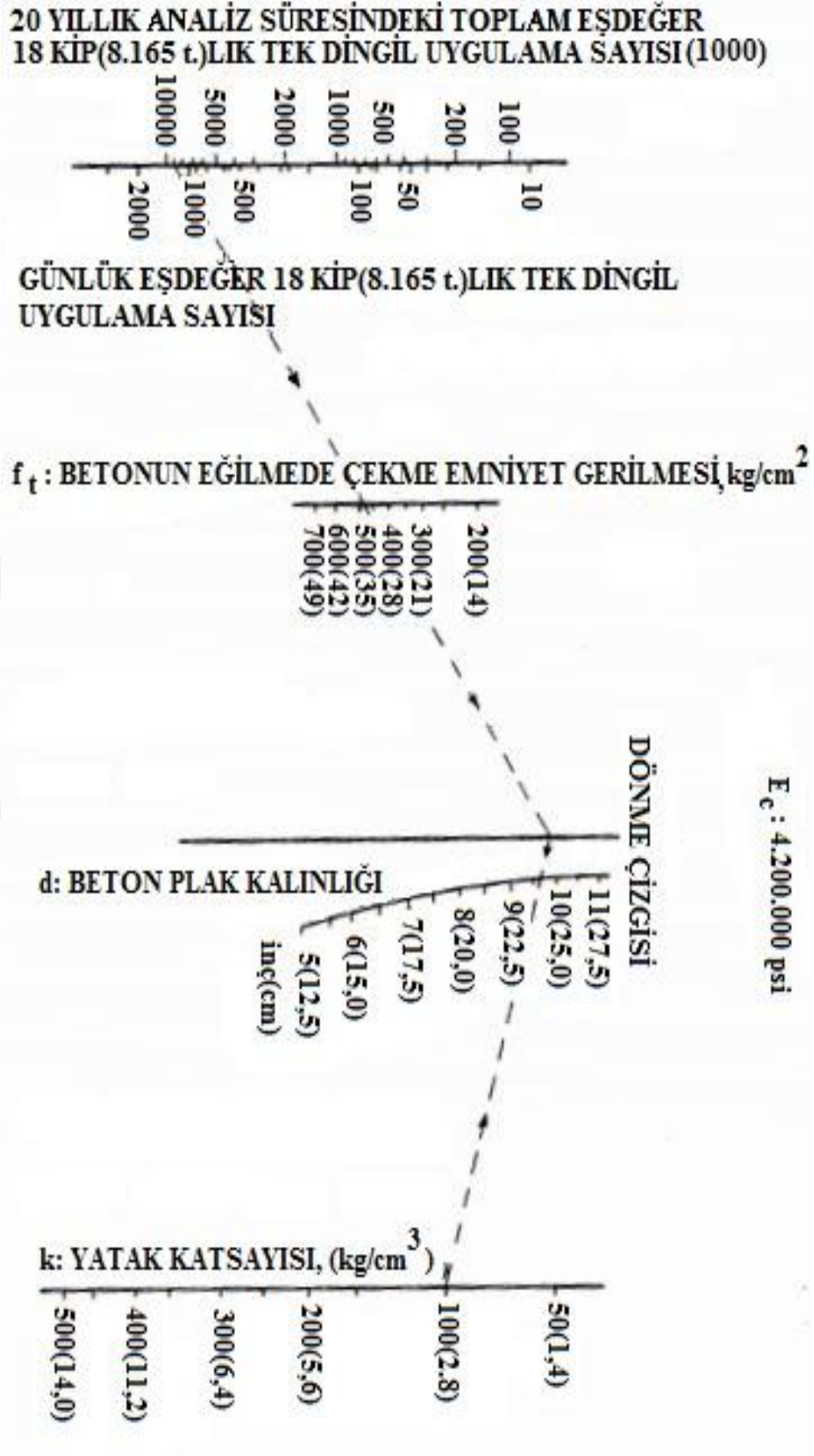
$\beta$  : Analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksidir. ( $P_t$ )'yi ( $W_{t8.2}$ )'ye bağlayan hizmet yeteneği eğrisini etkileyen proje ve yük değişkenlerinin fonksiyonudur.

$\rho$  : Proje ve yük değişkenlerinin bir fonksiyonu olup hizmet yeteneği indeksinin 1,5 olmasına karşılık geleceği umulan dingil yükü uygulama sayısıdır (Kök, 2008).

Tasarım yaparken ise aşağıdaki sıralama takip edilmelidir;

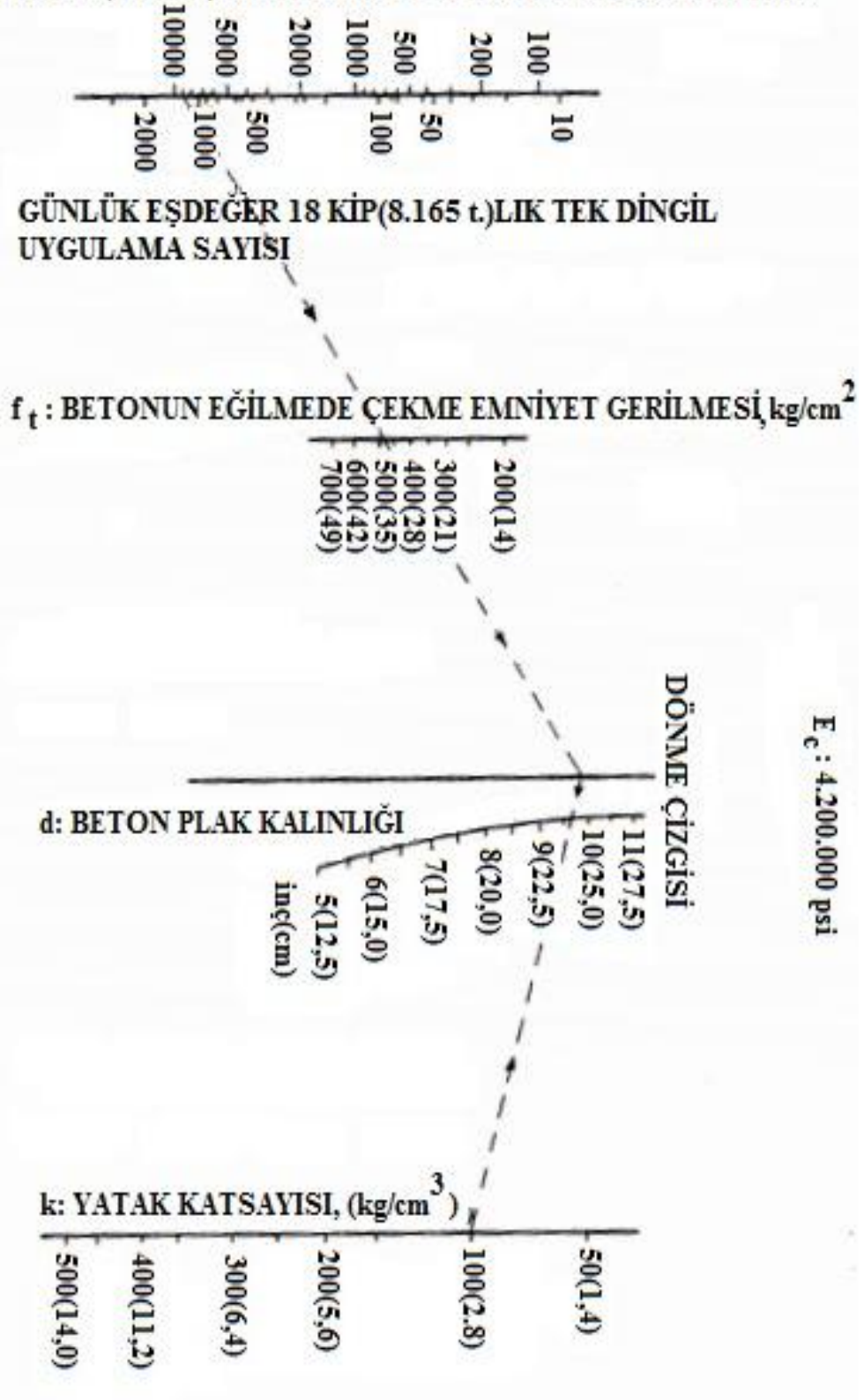
- $P_t$  seçilir,
- Trafik analiz süresi seçilir,
- Proje trafiği hesaplanır,
- Taban zemininin yatak katsayısı ( $k$ ) belirlenir,
- Beton eğilmedeki çekme emniyet gerilmesi ( $f_t$ ) seçilir.

Rijit üstyapı tasarımındaki trafik analizi, son hizmet yeteneği indeksinin seçimi ve proje trafiğinin hesaplanması esnek üstyapı tasarımınkiyle aynıdır. Tüm bu faktörler belirlendikten sonra ya yukarıda verilen deney yolu denklemlerinden yararlanarak yada aşağıda verilen Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da verilen abaklardan yararlanarak gerekli rijit tabaka kalınlığı hesaplanabilir (Kök, 2008).



Şekil 2.25. Rijit Üstyapı Projelendirme Abağı, Pt = 2.0 (Kök, 2008)

20 YILLIK ANALİZ SÜRESİNDEKİ TOPLAM EŞDEĞER  
18 KİP(8.165 t.)LIK TEK DİNGİL UYGULAMA SAYISI(1000)



Şekil 2.26. Rijit Üstyapı Projelendirme Abağı,  $P_t = 2.5$  (Kök, 2008)

#### 2.4.9.1. Efektif Zemin Yatak Katsayısı (k)

Bu faktör esnek üstyapılarda  $M_R$  (efektif esneklik modülü) ile tanımlanırken, rijit üstyapılarda k ile tanımlanmaktadır (Calessen v.d. 1977).

Beton plağın oturacağı zeminin taşıma değeri, Westergard'ın belirlediği yöntemle ölçülmektedir. Bu yöntemde ise tabanlar, k değerine göre değerlendirilirler. k değeri ise herhangi bir yük altındayken, birim alana gelen yükün tabanda gösterdiği reaksiyonunun, o noktada oluşacak çökmeye oranı şeklinde açıklanmaktadır. Burada;

$k = P / Y$  bağıntısı ile bulunmaktadır.

P : Tabana gelen yük, taban reaksiyonu, (psi veya kg/cm),

Y : Çökme deformasyonu, (inç veya cm),

k : Yatak katsayısı (pci, psi/inç veya kg/cm<sup>2</sup>/cm)'dir (Calessen v.d. 1977).

Tabanın göstereceği taşıma gücü, zeminin nemlilik derecesinden tutun, cinsine ve yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Buna örnek verilecek olunursa; killi zeminler için k değeri takribi olarak 50 civarında iken, boşluksuz kumlu çakıllı zeminlerde k değeri takribi olarak 500 veya daha yüksek olabilmektedir. k için tipik değerler Çizelge 2.11'de verilmiştir (Ağar v.d. 1998).

**Çizelge 2.11.** Taban Zemini Reaksiyon Modülü Değerleri (Ağar v.d. 1998)

Zemin Tipi	k (pci)
Plastik kil	50 - 100
Silt ve Siltli kil,	100 - 200
Kum, killi çakıl	200 - 300
Çakıl	300 +

#### 2.4.9.2. Betonun Eğilmede Çekme Emniyet Gerilmesinin ( $f_f$ ) Bulunması

Beton yol üstyapı tasarımı yapılırken, betonun basınca karşı gösterdiği dirençten çok eğilmede çekmeye karşı gösterdiği direnç veya kırılma, kopma modülü kullanılır. Bunun nedeni ise basittir, beton plağın herhangi bir noktasına kırılma oluncaya kadar herhangi bir kuvvet uygulandığında görülecektir ki kırılma öncelikle çekmeye çalışan kısımlarda oluşacaktır. Çünkü betonun çekme direnci oldukça zayıftır (Ağar v.d. 1998).

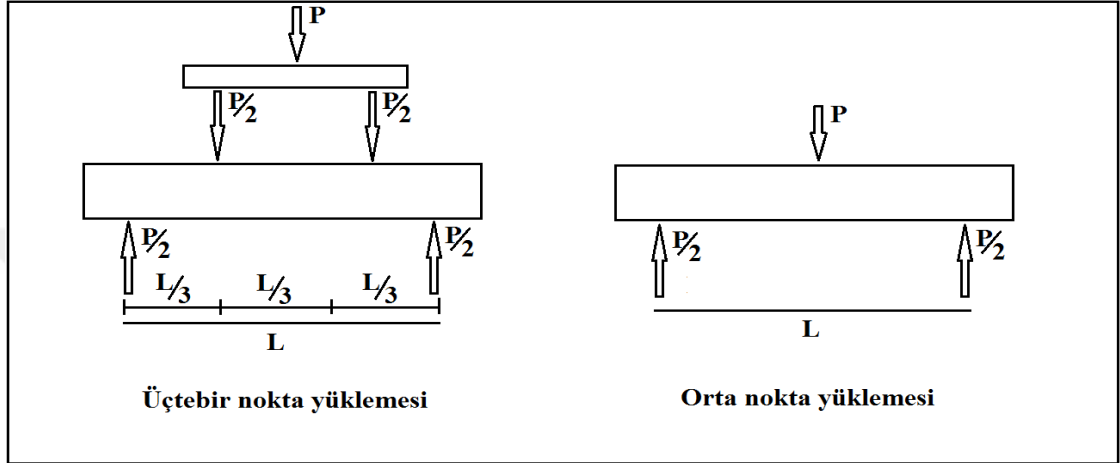
Çekme emniyet gerilme değeri aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$f_f = 0,75 S_c \quad (2.12)$$

$S_c$  : Kopma modülü veya Eğilme direnci

### 2.4.9.3. Kopma Modülü veya Eğilme Direncinin Bulunması

Şekil 2.27’de beton plaklarda eğilme direnci hesabı verilmiştir;



Şekil 2.27. Eğilme Direnci Hesabı (Ağar v.d. 1998)

Kopma modülü veya eğilme direnci, (2.13) ve (2.14) nolu formüllerden yararlanılarak bulunabilir.

$$S_c = P.L / b.h^2 \quad (2.13)$$

$$S_c = 3.P.L / 2.b.h^2 \quad (2.14)$$

Burada;

$S_c$  : kopma modülü veya eğilme direnci,

$b$  : kiriş genişliği,

$h$  : kiriş yüksekliği,

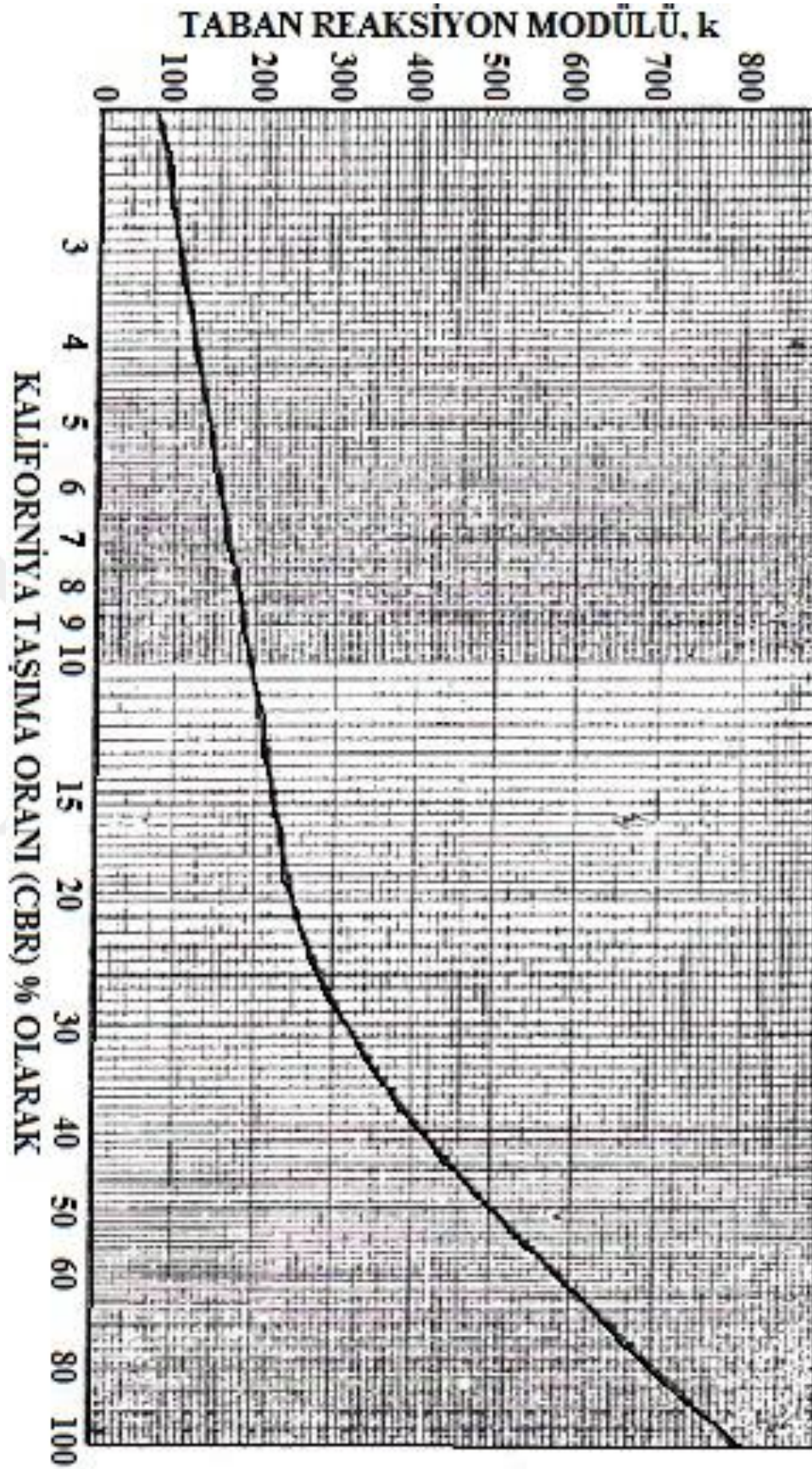
$P$  : uygulanan yük,

$L$  : uzunluk, olarak ifade edilmektedir (Kök, 2008).

AASHTO yol deneyi için ortalama beton eğilme emniyet gerilmesi 28 gün için 48 kg/cm<sup>2</sup>’dir (Kök, 2008).

Şekil 2.28’de CBR – k arasındaki bağıntıyı veren eğri verilmiştir.





Şekil 2.28. CBR-k (taban reaksiyon modülü) Arasındaki Bağıntıyı Veren Eğri (Kök, 2008)



## 2.5. Literatür Araştırması

Taşıma gücü düşük olan zeminlerin, mukavemetini artırmak için zemine farklı katkı maddeleri katılarak zeminin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Bu bölümde daha önceden yapılmış çalışmalardan, zemine farklı katkılar ilave edilerek, zeminde meydana gelen değişimlerden bahsedilmiştir.

Türküz (2006), yaptığı bir çalışmada fazla şişme özelliği gösteren Meşelik killere, kireç katarak, zemin iyileştirmesini araştırmış ve bazı veriler elde etmiştir. Üç değişik yerden elde ettiği, standart ve modifiye edilmiş enerji değerlerinde ve farklı sönmüş kireç katkı oranlarında (%0, %1, %3, %5) hazırlanan 88 farklı numune üzerinde standart ödometre aleti ile serbest şişme yüzdesi deneylerini yapmış ve sonuçta, sönmüş kireç katkı maddesinin, killi zeminlerin şişme potansiyelinin kontrol edilmesinde önemli derecede etkili olduğunu ve bu kontrolün sağlanması için kullanılabileceğini belirlemiştir. Ayrıca bu katkının %3 seviyesini aştıktan sonra etkin olduğunu belirlemiştir.

Okyay ve Dias (2010), zemin stabilizasyonu yapılan zeminlerin mekanik özelliklerini incelemek için laboratuarda farklı deneyler yapmışlardır. Kireç katılarak uygulanan zemin iyileştirmelerinde kür süresinin önemli bir etkisinin olduğunu ve stabilizasyonun mevcut zemin üzerindeki etkisinin daha da uzun süre devam ettiğini belirlemişlerdir. Fakat, buna nazaran çimento ile yapılan zemin stabilizasyonlarında kirece oranla, reaksiyon süresinin daha kısa olduğunu bulmuşlardır. Zeminlerin mekanik özellikleri üzerinde ciddi oranda etkiyi atık katkı oranları üzerinde yapılan zemin stabilizasyonunun olduğunu bulmuşlardır.

Soğancı ve Yıldız (2011), iki farklı killi zemine kireç katarak zemin stabilizasyonu yapmış ve zeminin dayanım değerlerindeki artışları incelemişlerdir. Zeminlerden birisi yüksek diğeri ise düşük plastisiteli kildir. Yaptıkları bu çalışmalar sonunda, yüksek plastisiteli olan killi zeminin, serbest basınç dayanım değerinin 28 günlük kürün sonunda 15 kat yükseldiğini, düşük plastisiteli killi zeminin, serbest basınç dayanım değerinin 28 günlük kürün sonunda ise 3 kat arttığını belirtmişlerdir. Yüksek plastisiteli killi zeminin, düşük plastisiteli killi zemine nazaran, serbest basınç dayanım değerlerinde 5 kat daha fazla artış yaptığını gözlemlemişlerdir.

Bağrıaçık (2017), yaptığı çalışmada, CBR değeri düşük olduğu için karayollarında temel veya alt temel zemini olarak, kullanılması mümkün olmayan zeminlerin, optimum su muhtevasında, bu zeminlere kireç katarak, zemin iyileştirmesi sonucunda bulunan, iyileşme olanaklarını belirleyebilmek amacı ile laboratuvar ortamında bazı deneyler yapmıştır. Temel veya alt temel zemininin iyileştirilmesinde su içeriğinin etkisini bulabilmek amacı ile hacimce %5, %10, %15 ve %20 su içeriğindeki, zemin numuneleri hazırlamış ve hazırlamış olduğu bu numunelere CBR deneyleri yapmıştır. Bunun yanı sıra, zemine farklı oranlarda kireç katarak, temel veya alt temel zemininin iyileştirilmesinde optimum oranları bulabilmek amacı ile hacimce %3, %4, %5 ve %6 oranlarında kireç karışımlarından oluşan numuneler hazırlayarak CBR deneylerini yapmıştır. Çalışma sonucunda, temel veya alt temel zeminleri için optimum su muhtevasının takribi olarak %10, optimum sönmüş kireç yüzdesinin ise hacimce takribi %5 olduğunu bulmuştur. Çalışmalarından, yüksek kolerasyon katsayılı ( $R^2=0.99$ ) denklem elde etmiştir. Bulunan bu denklem CBR rakamlarını bulabilmek amacıyla kullanılması önerilen bir denklemdir.

Öztürk vd. (2015), yaptıkları çalışmada, Ankara Gölbaşı'nda bulunan bir yerleşim alanındaki killi zeminlerin şişme potansiyeli ve bu zeminlere kireç katarak, killi zeminlerin şişme davranışı üzerindeki pozitif etkisini incelemişlerdir. İnceleme yaptıkları arazide yüzeysel şişme potansiyeli gösteren killerin yer aldığını ve bu killerin yüksek plastisiteli kil yani (CH) sınıfına girdiğini belirtmiş ve bu numunelerin şişme yüzdesini yaklaşık olarak %3.5 - %9 arasında değerler olduğunu bulmuştur. Ayrıca şişme basınçlarının ise yaklaşık olarak 65-220 kPa arasında değerler olduğunu belirtmiştir. Deneysel çalışma yaptıkları arazide, düşük plastisiteli kil (CL) bulgularına rastlamış ve düşük plastisiteli killi zemine de aynı deneyleri uygulayarak şişme yüzdesini yaklaşık olarak %0.5 - %1.6, şişme basınçlarını ise yaklaşık olarak 6-11 kPa olduğunu söylemişlerdir. Yaptığı deneyler sonucunda şişme potansiyeli, CL sınıfı killere nazaran daha yüksek olan CH sınıfı killere kireç katarak şişme basıncı ve yüzdesindeki değişiklikleri incelemek istemişlerdir. Bunun için CH sınıfı killere farklı miktarlarda (%1, %3, %5, %7, %9) kireç eklemişler ve sonuçları gözlemlemişlerdir. Deney sonunda kireç katkısının ağırlıkça %5 veya %5'ten daha fazla olduğu zamanlarda şişme yüzdesinin takribi olarak %91 azaldığını, şişme basıncının ise takribi olarak %73 civarında azaldığını belirtmişlerdir.

Çetin, A. Y. (2011), yaptığı çalışmada, İstanbul Eyüp Akpınar civarından aldığı yumuşak kile, zemini iyileştirmek maksatıyla C tipi uçucu kül katmıştır. Ayrıca 2 çeşit ve farklı yapıda fiberler katarak zeminin taşıma gücünü artırmayı hedeflemiştir. Zeminin sınıflandırmasını yapmış ve zemini yüksek plastisiteli kil olarak belirlemiştir. Numuneleri farklı su oranlarında hazırlayarak optimum su muhtevalarını ve max. kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemiştir. Numuneleri 7 gün boyunca beklettikten sonra serbest basınç deneyleri yaparak mukavemetlerini belirlemiştir. Numuneler ise katkısız zemin, kuru zemin miktarının %5, %10 ve %15 'i oranında uçucu kül+kil karışımı, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00'ı oranında polipropilen+kil karışımı ve %0.50, %75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranında kopolimer+kil karışımları olmak üzere düzenlenmiştir. Yaptığı bu deneyler sonucunda bu birleşimlerin, zeminin mukavemetini artırdığını gözlemlenmiştir.

Bilgen vd. (2012), yaptıkları çalışmada, düşük plastisiteli bir zemine Çelikhane cürufu (BOS) katarak zeminde meydana gelen değişikliği incelemiştir. Ayrıca bu karışıma kireç ilave ederek etkileşimleri gözlemlemiştir. ASTM D4609 standardına göre yaptığı deneylerde kilin serbest basınç değerini 279 kPa ve bu basınç değeri altında kilin % 15 birim şekil değiştirme yaptığı sonucuna varmıştır. Bu kile, kilin ağırlığının %3.33 oranında BOS eklemiş ve serbest basınç değerini 28 günlük kür sonucunda 960 kPa' a çıkarmayı başarmıştır. Daha sonra kile, kilin ağırlığının %5 oranında kireç katarak 28 günlük kür sonunda serbest basınç değerini 2700 kPa'ya yükseltmiştir. Sonra kile iki malzemeyi birlikte katarak sonucu değerlendirmiş, yani kile %5 oranında kireç ve %3.33 oranında BOS eklemiş ve bu karışımın serbest basınç değerini 4000 kPa'ya kadar yükseltmiş ve birim şekil değiştirmesini ise %2 lere kadar indirmeyi başarmıştır. Bu sonuçlardan BOS ve kirecin birlikte kullanılmasının mukavemet değerlerinde ciddi artışlar meydana getirdiğini ve zemin stabilizasyonu için ciddi faydalar sağladığını belirlemiştir.

Ayrıca Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yaptığı bir çalışmada, Ankara Bala-Kulu ayrımı civarında bölünmüş yolda kireç ile stabilizasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamanın kış aylarında da yapılabileceği ve stabilizasyon işlemi sonrasında zeminin taşıma gücünün yükseldiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonrası kuru CBR değerlerinde yaklaşık 8 kat, yaş CBR değerlerinde ise yaklaşık 34 kat artışlar izlenmiş ve kalıcı deformasyon değerlerinde hemen hemen 8 kat düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen bu değerler ise yol yapım standartlarını karşılayacak

boyuttur. Kireç ile zemin iyileştirmeleri, yurtdışında özel alet ve ekiplanlarla yapılırsa bu uygulamayı çok daha ilkel tarım alet ve ekipmanları ile de basit bir şekilde yapılabileceği belirtilmiştir. Bu uygulamada traktör vazgeçilmez bir unsur olacağından yakıt sarfıyatı da bir hayli azalmakta ve uygulamayı ekonomik kılmaktadır.

Mesut vd. (2018), yaptıkları çalışmada farklı tür ve yapıdaki malzemelerin zemin stabilizasyonunda ne gibi değişikliklere yol açacağını incelemiştir. Bunun için endüstriyel atık olan uçucu kül ve Bayburt taşı kullanmışlardır. Öncelikle ASTM D 2487 (2011) standartlarına göre kullanılacak zemin sınıfını CL olarak belirlemişler. Düşük plastisiteli killi zemine %25 oranında uçucu kül katılmış ve buna ilave olarak uçucu küle %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Bayburt taşı eklenmiştir. 7 ve 28 günlük kür sonrasında, karışımların tek eksenli serbest basınç değerlerini incelediklerinde, en yüksek dayanım değerinin %10 Bayburt taşı kullanıldığında oluştuğunu gözlemlemiştir.

Karpuzcu (2001), yaptığı çalışmada, zemin iyileştirmesi için örgülü ve örgüsüz geotekstil kullanmıştır. Killi zemin numunesine serbest basınç deneyi, kompaksiyon, konsolidasyon deneylerini uygulamıştır. Deneyde kullanacağı numuneleri katkılı ve katkısız olarak hazırlamıştır. Örgüsüz geotekstilin örgülüye göre daha iyi performans gösterdiğini saptamıştır. Hem örgülü hemde örgüsüz geotekstil takviyeli kil numunelerinin, deneyin başında ve sonunda ki oturmalarını gözlemlemiştir. Örgüsüz geotekstil kalın olmasından dolayı düşey yönde, örgülü ve takviyesize nazaran daha fazla deforme olmuş, bunun içinde sıkışma değerleri yüksek çıkmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışma sırasında kullanılan malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Ayrıca bu malzemelere yapılan deneysel çalışmalar ile deneysel çalışmalarda kullanılan alet ve ekipmanlar detaylıca anlatılmıştır.

#### 3.1. Materyal

Bu kısımda, öncelikle yapılan deneylerde, kullanılan katkı maddelerinin özellikleri tanıtılmıştır. Deney sırasında katkı maddesi olarak; killi zemin, uçucu kül, sönmüş kireç, silis dumanı, yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Ayrıca bazı deneylerde su ile birlikte, katkının performansını artırmak için solisyon kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Killi Zemin ve Özellikleri

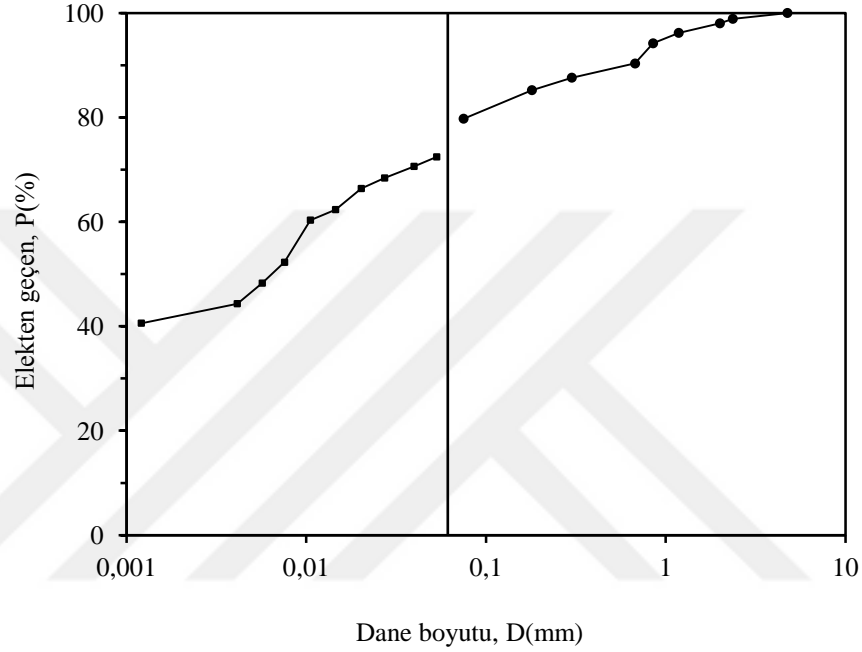
Bu çalışmada kullanılan kil zemini, Malatya-Kiltepe civarında bulunan ve üzerinde yapı olmayan bir araziden temin edilmiştir. Kil zemini temin edilirken, arazide kazmalar yardımı ile muayene çukuru açılmış ve homojen bir zemin alınmasına özen gösterilmiştir.

Deneyler süresince kullanılan killi zemine piknometre deneyi, standart proktor deneyi ve kıvam limitleri deneyleri TS 1900-1 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen mühendislik verileri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Bu deneylerin yapılışı yöntem kısmında anlatılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Killi Zeminin Özellikleri

Değişken Adı	Simge	Birim	Değeri
Dane birim hacim ağırlığı	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	26.80
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı	$\gamma_{kmax}$	kN/m <sup>3</sup>	14.50
Optimum su içeriği	$\omega_{opt}$	%	27
Likit limit	-	%	61
Plastik limit	-	%	29
Sınıflandırma	-	-	CH

Ayrıca kil zeminine elek analizi deneyi ve hidrometre deneyleri uygulanmış, bulunan granülometri eğrisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Bu deneylerin yapılışından da yöntem kısmında detaylıca bahsedilmiştir. Killi zemin numunesi öncelikle araziden temin edilmiş daha sonra etüvde kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma işlemi bittikten sonra kırma makinası yardımı ile kırılmış ve belirlenen su içeriğinde karılarak deneyde kullanmaya uygun vaziyete getirilmiştir.



**Şekil 3.1.** Kil Zemininin Granülometri Eğrisi

Şekil 3.1’de verilen granülometri eğrisi incelendiğinde, zeminin ince taneli (kohezyonlu) bir zemin olduğu görülmektedir.

### 3.1.2. Sönmüş Kireç ve Özellikleri

Zemin stabilizasyonu amacı ile kullanılmış olan sönmüş kireç katkı maddesi ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), toz şeklinde ve hazır paket torbalar vasıtası ile Malatya Sarsılmaz Kireç firmasından temin edilmiş daha sonra nemli ortamdan uzak tutmak için özel kaplarda muhafaza edilmiştir. Stabilizasyon maksatı ile kullanılan sönmüş kireçte yekünde CaO ile MgO seviyesi yaklaşık olarak %80 civarındadır. Kirecin,  $\gamma_s$  (tane birim hacim ağırlığı) ise  $23.35 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Kullanılan sönmüş kireç Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Stabilizasyon İçin Kullanılan Sönmüş Kireç

### 3.1.3. Uçucu Kül ve Özellikleri

Katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül Yumurtalık/Adana bölgesinde faaliyet gösteren İskenderun Enerji Üretim ve Tic. AŞ.' den temin edilmiştir. Kullanılan uçucu külün özellikleri, Çizelge 3.2’te görüldüğü gibidir.

**Çizelge 3.2.** Uçucu Külün Özellikleri

Ürün Bilgileri				
Parametre	Birim	Ortalama	Standart Sapma	Sınır Değer
Isıtma Kaybı	%	2,6	0,51	≤ 5
İncelik > 0,045 mm	%	15,1	4,52	≤ 40
Serbest Kireç	%	0,06	0,042	≤ 1,0
Sülfat	%	0,4	0,03	≤ 3,0
Klorid	%	0,012	0,0129	≤ 0,1
Brüt Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	2,33	0,04	-
Etkinlik İndeksi (75 % CEM I 42,5 R+25 % SFA)		-	-	-
28 d	%	84,4	4,29	≥75
90 d	%	96,9	6,49	≤85
Su İsteği	%	24,5	1,70	-

### 3.1.4. Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve Özellikleri

Yüksek Fırın Cürufu, Karabük ilinde faaliyet gösteren Karçimsa tesisinden, temin edilmiştir. Malzeme öğütülmüş halde ve yeterli incelikte teslim alınmıştır. Bundan ötürü herhangi bir işlem yapılmayıp, mevcut haliyle kullanılmıştır.

Malzemenin özgül yüzeyi  $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$  olup, özgül ağırlığı ise  $2.86 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Yüksek Fırın Cürufu'nun kimyasal bileşimi Çizelge 3.3'te verilmiştir;

**Çizelge 3.3.** YFC'nin Kimyasal Bileşimleri

Bileşim (%)	YFC
SiO <sub>2</sub>	32.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.25
CaO	32.45
MgO	9.31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
SO <sub>3</sub>	0.82
S <sup>2</sup>	0.33
Na <sub>2</sub> O	0.31
K <sub>2</sub> O	0.85
TiO <sub>2</sub>	1.16
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.51
Cl	0.015

### 3.1.5. Silis Dumanı (SD) ve Özellikleri

Katkı maddesi olarak kullanılan Silis Dumanı, Antalya Etibank Elektrometalurji Firmasından temin edilmiştir. Temin edilen Silis Dumanı'nın özgül ağırlığı  $2.36 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Silis Dumanı'nın kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir;



**Çizelge 3.4.** Silis Dumanı'nın Kimyasal Bileşimi

Bileşim (%)	Silis Dumanı (SD)
SiO <sub>2</sub>	94.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.18
SO <sub>3</sub>	0.21
CaO	1.40
MgO	-
Kızdırma Kaybı	0.2

### 3.1.6. Sodyum Hidroksit Solisyonu

Çalışmada, özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu katkılarının performansını arttırmak amacıyla, önceki çalışmalarda kullanılan oranlarda solisyon olarak Sodyum Hidroksit kullanılmıştır. Bu solisyon İnönü Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'ndan temin edilmiştir.

Kristal haldeki sodyum hidroksit ve suyun karışımından elde edilen solisyonun karışım oranı 320 gr/lt şeklindedir. Yani 1 litre suya 320 gr sodyum hidroksit eklenmiştir. Kristal haldeki sodyum hidroksit eriyene kadar, bileşim karıştırıcı vasıtası ile ten ve göz temasından kaçınılarak karıştırılmıştır. Hazırlanan bu bileşim laboratuvar ortamında, tehlike arz ettiğinden herkesin kolay ulaşılamayacağı şekilde 1 gün bekletilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Kullanım sırasında da yine ten ve göz temasından kaçınılarak dikkatlice kullanılmıştır.

### 3.2. Yöntem

Bu bölümde, çalışmada kullanılan deney aleti ve ekipmanlarının özellikleri, teknik verileri açıklanmıştır. Ayrıca yapılan tüm deneylerin yapılaş yöntemlerinden detaylıca bahsedilmiştir. Yapılan testler ve deneyler, İnönü Üniversitesi Geoteknik ve Ulaşım Laboratuvarlarındaki deney setleri, alet ve ekipmanları ile gerçekleştirilmiştir.

#### 3.2.1. Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi (TS 1900)

Kullanılan killi zemine elek analizi ve hidrometre deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylerin amacı alınan zeminin içindeki tane dağılımını görmektir. Öncelikle killi

zemin etüvde 105 °C’de 24 saat kurutulmaya bırakılmıştır. Şekil 3.3’te elek analizinde kullanılan elekler, Şekil 3.4’te kurutmada kullanılan etüv gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** Elek Analizi Deneyinde Kullanılan Elekler



**Şekil 3.4.** Numune Kurutmada Kullanılan Etüv

Kurutma işleminden sonra zemin aşağıdaki elekler vasıtası ile elenmeye başlanmıştır. Elek numaralarına göre geçen ve kalan yüzdeler Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Elek Analizi Değerleri

ASTM		Kalan	Toplam Geçen	Geçen
Elek No	Elek Çapı (mm)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Yüzde (%)
No. 1"	4.75	0.00	376.18	%100
No. 3/4"	2.36	4.22	371.96	%98.88
No. 1/2"	2.00	3.26	368.70	%98.01
No. 3/8"	1.18	6.86	361.84	%96.19
No. 4	0.85	7.53	354.31	%94.19
No. 10	0.68	14.56	339.75	%90.32
No. 40	0.30	10.20	329.55	%87.60
No. 100	0.18	9.00	320.55	%85.21
No. 200	0.075	20.55	300	%79.75
Tava	-	300		

İnce taneli zeminlerin tane çapı dağılımını öğrenmek için hidrometre deneyi yapılmıştır. Hidrometre deney seti Şekil 3.5'deki gibidir.



**Şekil 3.5.** Hidrometre Deney Seti



bulunan ölçekli kaba yerleştirilmiştir. Bu sırada hidrometreye takılan zemin parçaları temizlenmiştir. Bu kapta 5.-10.-15.-30.-60.-240.-1440. dakikalardaki okumalar not edilmiştir. Okumaların hepsi not edilerek bitirdikten sonra, hazırlanan karışım boş bir kaba dökülerek etüve atılmıştır. Bir günlük etüvün ardından zeminin kuru ağırlığı da bulunmuştur. Yapılan deneye göre tane çapları ve yüzde geçenleri aşağıdaki (3.1) ve (3.2) nolu formüller ile hesaplanmıştır;

$$\text{Dane çapı} \quad D = \sqrt{[30N / 980 (Gw-Gs) \times L/t]} \quad (3.1)$$

$$\text{Yüzde Geçen} \quad = aR/Ws \times 100 \quad (3.2)$$

R : Hidrometre okumaları,

t : Bekleme süresi,

N : Deney sıcaklığındaki suyun viskozitesini,

Gs : Zeminin özgül ağırlığını

Gw : Suyun özgül ağırlığını

L : Efektif derinliği

a : zeminin özgül ağırlığının 2.65 sabitine oranını ifade etmektedir.

Elek analizi ve hidrometre deneyinden elde edilen sonuçlar birleştirilerek, granülometri grafiği elde edilmiştir. Daha öncede ifade edildiği gibi bu grafik zeminin ince taneli olduğunu göstermektedir.

### 3.2.2. Piknometre Deneyi (TS 1900)

Killi zemin etüvde kurutulduktan sonra, yaklaşık olarak 150 gr kadar numune alınıp, piknometreye bu numune doldurulmuştur. Piknometrenin içindeki mevcut havayı çıkarmak için ağız kısmından vakum uygulanır. Havanın daha rahat çıkması için yavaş hareketlerle sallanır. Piknometrenin ince kısmındaki çizgiye kadar su eklenir.

Fakat bu çizgiyi bazen oluşan köpürmelerden tam tayin edilemeyebilir. Bunu engellemek için bir peçeteyi kıvrarak kabın ağzından içeri doğru yavaşça ittirilmektedir. Bu sayede oluşan köpürme peçeteye yapışacaktır. Çizgi net belirdikten sonra o kısma kadar su eklenmiştir. Şekil 3.7’de deney sırasında oluşan köpürmelerin peçete yardımıyla alınması gösterilmiştir.



**Şekil 3.7.** Piknometre Deneyi

İçerdeki havayı tamamen boşaltıncaya kadar vakum işlemine devam edilir. Bu işlem tamamlandıktan sonra piknometre, içindeki numune ile tartılır. Bulunan değer piknometre ağırlığı, suyun ağırlığı ve zeminin ağırlığından ibarettir. Piknometre ve içindeki numunenin birlikte tartılması Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8.** Piknometre Tartım İşlemi

Daha sonra piknometrenin içindeki sulu zemin, boş bir kaba boşaltılır. Burada izlenecek iki yol vardır;

Birinci izlenecek yol malzemenin suyunun kendi buharlaşmasını beklemek veya sulu malzemeyi etüve bırakarak hızlı bir şekilde suyun buharlaşmasını sağlamaktır. İkinci yöntem daha hızlı olduğu için 2. yöntem tercih edilmiştir. Kuruyan zemin tartılır ve malzemenin kuru ağırlığı belirlenmiş olur. Daha sonra aşağıdaki (3.3) nolu bağıntı yardımıyla zeminin özgül ağırlığı (birim hacim ağırlık) belirlenmiş olur.

$$\text{Özgöl Ağırlık} : (T \times ^\circ\text{C}/\text{C}) = W_n / (W_n + (W_a - W_b)) \quad (3.3)$$

Burada;

$W_n$  : Kurutulan numune ağırlığını, gr

$W_a$  : Su ve piknometrenin ağırlığı, ( $T \times ^\circ\text{C}$ ' deki)  $T_x$  o anki sıcaklığı, gr

$W_b$  : Sulu zemin ve piknometrenin ağırlığı, gr

$T_x$  :  $W_b$  ağırlığı ölçüldüğü sırada, piknometrenin içindeki sulu zemin sıcaklığı  $^\circ\text{C}$  temsil etmektedir.

### 3.2.3. Kıvam Limit (Atterberg) Deneyleri (TS 1900)

İnce taneli zeminlerin kıvamındaki suya bağlı değişimi görebilmek için bazı su muhtevası değerleri belirtilmiştir. Bu değerlere kıvam limitleri ismi verilmektedir. Kıvam limitlerini belirleyebilmek için bazı deneyler yapılmaktadır. Bu deneyler Atterberg ismi verilen İsveçli bilim adamı tarafından geliştirilmiştir. Bu deneyler likit limit ve plastik limit olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

#### 3.2.3.1. Likit Limit Deneyi

Mevcut zeminin plastik durumdan, artık akıcı bir duruma geçtiği andaki su muhtevası likit limit olarak isimlendirilmektedir. Likit limiti en çok yaygın olan Casagrande Yöntemi ile bulunmaktadır.

Kurutulan zeminden bir miktar numune alarak, karıştırma kabına konulur ve üzerine su ilave ederek karıştırılır. Karıştırılan numuneden bir miktar alınıp, deney aletinin tasına yerleştirilmiş ve üzeri spatula yardımı ile düzeltilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken konu tasın tamamının doldurulmamasıdır. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi yarma bıçağı ile tasın içindeki numune ortadan ikiye eşit olacak şekilde bölünmüştür.



Şekil 3.9. Likit Limit Deneyi

Numuneyi ikiye bölme işlemi yapıldıktan sonra tasın kenarında kalan artıklar temizlenip, aletin kolu çevirilmeye başlanır. Deney kabı 1 cm yüksekten ve saniyede 2 defa olmak üzere düşer. Düşmenin oluşturduğu etki ile açılan yarıklar yavaş yavaş kapanmaya başlar. Takribi olarak yarıklar 1 cm oluncaya kadar deney kabı düşürme işlemine devam edilir. Yarıklar istenilen mesafeye gelince numuneden su muhtevasını belirlemek için bir miktar alınır ve vuruş sayısı okunup not edilir. Bu işlem, su muhtevasının düzgün belirlenmesi için 5 defa gerçekleştirilmiştir. Daha sonra su muhtevası ve logaritmik ölçekli vuruş sayısının olduğu grafik çizilir ve 25 vuruşa karşılık gelen değer alınır. Bu değer likit limit değeridir.

### **3.2.3.2. Plastik Limit Deneyi**

İnce taneli zeminlerde kırılmadan şekil verilebilme özelliğine plastiklik ismi verilmektedir. Islak zemin, su ile yoğurulup bu sırada zeminin yüzeyinde çatlaklar oluşturulur ise bu çatlakların olduğu sıradaki su muhtevasını ise plastik limit olarak tanımlanır.

Bu deneyin yapılışı oldukça basit ve hızlıdır. Deney yapılacak numune aynı likit limitteki gibi bir miktar su katılarak yoğurulmuştur. Numune hazırlandıktan sonra herhangi bir cam kesit alınır ve üzerine su katıp yoğurulan zeminden bir miktar konulur. Bu numuneden, el yardımı ile takribi olarak 3 mm kalınlıkta olacak şekilde camın üzerinde elimizle yuvarlayarak çubuklar meydana getirilmiştir.

Bu çubukta çatlamlar meydana geldiği anda su muhtevasını belirlemek için numune herhangi bir kaba alınır, etüve atılır ve kurummasını beklenilir. Bu sayede su muhtevası belirlenmiş olur. Deneyin daha sağlıklı olması için en az 3 tane su muhtevası değeri ölçülür ve ortalamaları alınır.

### **3.2.4. Standart Proctor Deneyi**

Zeminlere ait taşıma oranını yükseltmek, geçirimsizliğini ve farklı yüklere maruz kaldıklarında oluşması muhtemel oturmaları minimuma indirmek maksatıyla zeminlerin sayıca farklı tabakalar şeklinde serilmesi ve sonrasında herhangi bir şekilde sıkıştırma metodu ile su ile tane hacminin sabit tutularak, mevcut havanın dışarı atılıp, zeminin içerisinde bulunan taneciklerin birbirlerine yaklaşmasına veya sıkıştırılmasına kompaksiyon ismi verilir (TS 1900-1). Zeminlerin laboratuvarında kompaksiyonunu gerçekleştirmek amacıyla proktor aleti geliştirilmiştir.



Proctor deneyinde kullanılan aletler Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



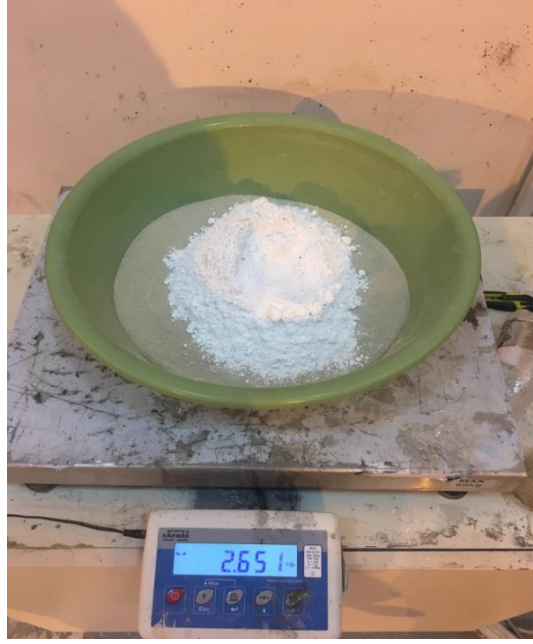
**Şekil 3.10.** Proctor Deney Aletleri

Sıkıştırılmaya maruz kalmış bir zeminde, kompaksiyonun derecesi, o zemine ait olan kuru yoğunluk ( $\rho_k$ ) ile belirlenir.  $\rho_k$  ne kadar yüksek ise, zeminde bir hayli güzel sıkışmış anlamına gelir.  $\rho_k$  seviyesinin maksimum olduğu zamandaki su içeriğine optimum su muhtevası ( $w_{opt}$ ) ismi verilir.

Kompaksiyon diğer bir ismi ile standart proktor deneyi için her bir bileşim için ayrı ayrı numuneler hazırlanarak, önceden belirlenen oranlarda su eklenmiştir. Daha sonra ise TS 1900-1 standartlarına uygun olarak ilavesiz saf kil ve hazırlanan diğer tüm karışımlara kompaksiyon deneyleri uygulanmıştır.

Deneye başlamadan önce numuneler etüvde kurutulmuştur. Kurutma işleminden sonra katkı maddeleri ve diğer malzemelerin tümü, hassas bir terazi yardımıyla ağırlıkça yüzdelerinde tartılmıştır. İlk önce ilavesiz saf killi zemin hazırlanmış daha sonra ise killi zemin, üzerine ağırlıkça %2.5, %5, %7.5, %10, %15 ve %20 oranlarında kireç katkısı ve daha sonra ilavesiz saf killi zemine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında katkı maddeleri ilave edilerek diğer karışımlar hazırlanmıştır.

Saf killi zemin ve kireç karışımı Şekil 3.11’de, saf killi zemin ve uçucu kül karışımları ise Şekil 3.12’de verilmiştir.



**Şekil 3.11.** Killi Zemin ve Kireç Karışımı



**Şekil 3.12.** Killi Zemin ve U.K. Karışımı

Belirlenen oranlarda su eklenerek yoğurulan numuneler Proctor kabına 3 parça halinde serilmiştir. Her tabaka serildikten sonra kendi tokmağı ile yaklaşık 30 cm yükseklikten ve numunenin farklı taraflarından 25 kez vurulup sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi biten tabakanın üzerine sivri bir cisim yardımıyla çizikler atılmış, böylece üstteki tabaka ile daha iyi birleşmesi sağlanmıştır.

En son tabaka serildikten sonra üst kısım tesviye edilerek düzeltilmiş ve kap ile birlikte tartılmıştır. Daha sonra ise kabın alt civataları sökülmüş, numunenin hem altından hem üstünden homojen bir dağılım olması için 5 adet numune alınmıştır. Alınan her numunenin ağırlığının 100 gr olmasına özen gösterilmiş ve hassas terazi vasıtasıyla tartılıp öyle alınmıştır. Şekil 3.13’de proctor deneyi sonrası alınan yaş numuneler gösterilmiştir.



**Şekil 3.13.** Proctor Deneyi Sonrası Yaş Numunlerin Alınması İşlemi

Alınan bu numunelere, karıştırmamak için etiketler yapıştırılmış daha sonra ise etüvde kurutulmak üzere fırına atılmıştır. Etüve atılan numuneler Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.14.** Proctor Deneyindeki Yaş Numunelerin Etüvde Kurutulması

Etüvde 105 derecede ve 24 saat bekleyen numuneler, ertesi gün fırından alınarak hassas terazide tartılmış ve maksimum kuru yoğunlukları belirlenmiştir. Etüvden çıkartılıp tartılan numuneler Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3.15. Etüvden Çıkan Numunelerin Hassas Terazide Tartılması

### 3.2.5. Tek Eksenli Serbest Basınç Deneyi (UCS)

Standart proktor deneyleri ile bulunan maksimum kuru yoğunluk ve optimum su değerleri vasıtasıyla tek eksenli serbest basınç deneyleri ve CBR (California Bearing Ratio, Kaliforniya taşıma gücü oranı) deneyleri için numuneler hazırlanmıştır.

TS 1900-2 standartlarına göre UCS deneyi, kohezyonlu sayabilecek zeminlerde kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir deney çeşitidir. Deneyin sonunda bulunan Mohr dairesi, yardımıyla zemine ait kayma mukavemeti (görünür kohezyon) hesaplanabilir. Bu deneyin yapılması için 38 mm eninde 76 mm boyunda özel paslanmaz deney aleti kullanılmıştır (TS 1900-2).

Kullanılan deney aleti Şekil 3.16’da verilmiştir.





**Şekil 3.16.** Serbest Basınç Deneyinde Numune Alırken Kullanılan Alet

Şekil 3.17’de görüldüğü gibi ilavesiz saf kil ve diğer tüm bileşimler için numuneler 3’er adet olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu numuneler 7 ve 28 günlük kür süresini tamamlamak üzere istiflenmiştir. Kür süresi tamamlandıktan sonra katkısız saf killi zemine ve diğer oranlarda hazırlanan tüm karışımlara tek eksenli serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Bu deney vasıtası ile zeminin drenajsız kayma dayanımları ile kohezyon verileri belirlenmiş. 3’er adet numunenin deney verilerinin ortalaması hesaplanmış ve sonuçlar belirlenmiştir.



**Şekil 3.17.** Serbest Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması

Numunelerin daha iyi sıkışması için deney kabına numuneler 4 parça halinde serilmiştir. Bunun sebebi deney kabının çok küçük olması ve yeterince sıkıştırma yapmayınca numunelerin patlayıp dağılmasıdır. Numuneleri tabakalar halinde sermeye başlamadan önce silindirik deney kabı ve alt oturma sehпасı yağlanmıştır. Bunun yapılmasının sebebi numune çıkartılırken zedelenmesini veya hasar almasını önlemektir. Sonuçta numunenin kırım esnasında kendi şeklinden farklı şekillere bürünmesi, deneyin doğruluğunu sarsacaktır. Belki de beklenenden daha fazla deformasyonlar gözlenecektir. Bundan dolayı deney kabı, alt sehпасı ve tokmak yağlanmış, vuruşlar bu şekilde yapılmıştır.

Her serme işleminden sonra kendi tokmağı yardımıyla takribi 10 vuruş yapılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Vuruş sayısı deneme-yanılma yöntemi ile bulunmuş, en iyi sonuç 10 vuruşta bulunduğu için tüm deneylerde 10 vuruş yapılmıştır. Diğer tabaka serilmeden önce, Proctor deneyinde olduğu gibi sıkıştırılan tabakaya sivri bir cisim yardımıyla çizikler atılmış ve diğer tabaka ile daha iyi birleşmesi sağlanmıştır.

Hazırlanan numuneler kriko yardımıyla şekil değişikliğine ve deformasyona uğramadan çıkartılmıştır. Kullanılan kriko Şekil 3.18’de, kriko yardımıyla çıkartılan numuneler ise Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.18.** Numune Çıkartmada Kullanılan Kriko



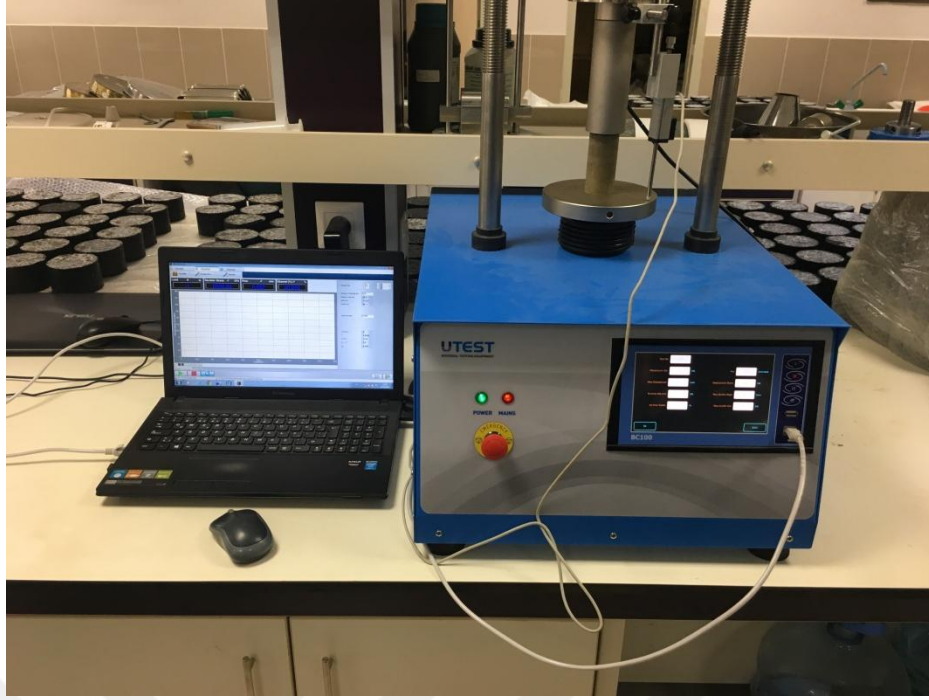
**Şekil 3.19.** Krikodan Çıkan Numune

Krikodan çıkartılan numuneler 7 ve 28 günlük kür sürelerini tamamlamak ve bu süre zarfında dış hava koşullarından etkilenmemesi için hava almayacak şekilde ambalajlanıp, istiflenmiştir. Numunelerin üzerine tarih ve isim yazılıp deneyde olası karışıklıkların önüne geçilmiştir. Şekil 3.20’de istiflenen numuneler görülmektedir.



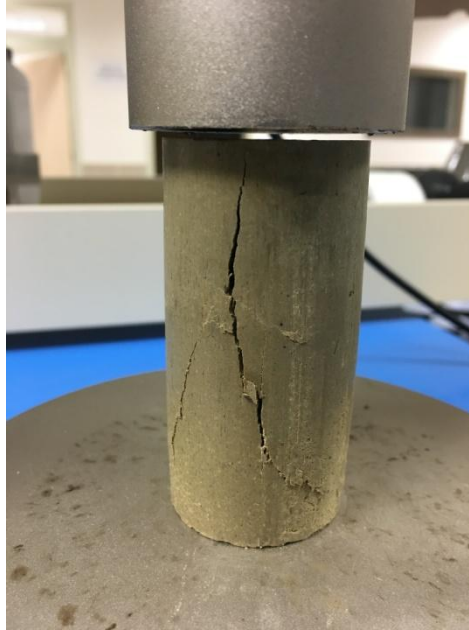
**Şekil 3.20.** Kür Süresince Bekletilmek İçin Hazırlanan Numuneler

7 ile 28 gün sonrasında, kür süresini tamamlayan numuneler UCS deneyi yapılmak üzere ambalajından çıkartılıp deney setine yerleştirilmiştir. Kullanılan deney seti Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.21.** Tek Eksenli Serbest Basınç Deney Seti

Deney sonrasında deformasyon ve şekil değiştirmeler gözlenmiş, bulunan dayanım değerleri CBR deneyinde kullanılmak üzere not alınmıştır. Şekil 3.22’te serbest basınç deneyi sonrası numunede oluşan deformasyon gösterilmiştir.



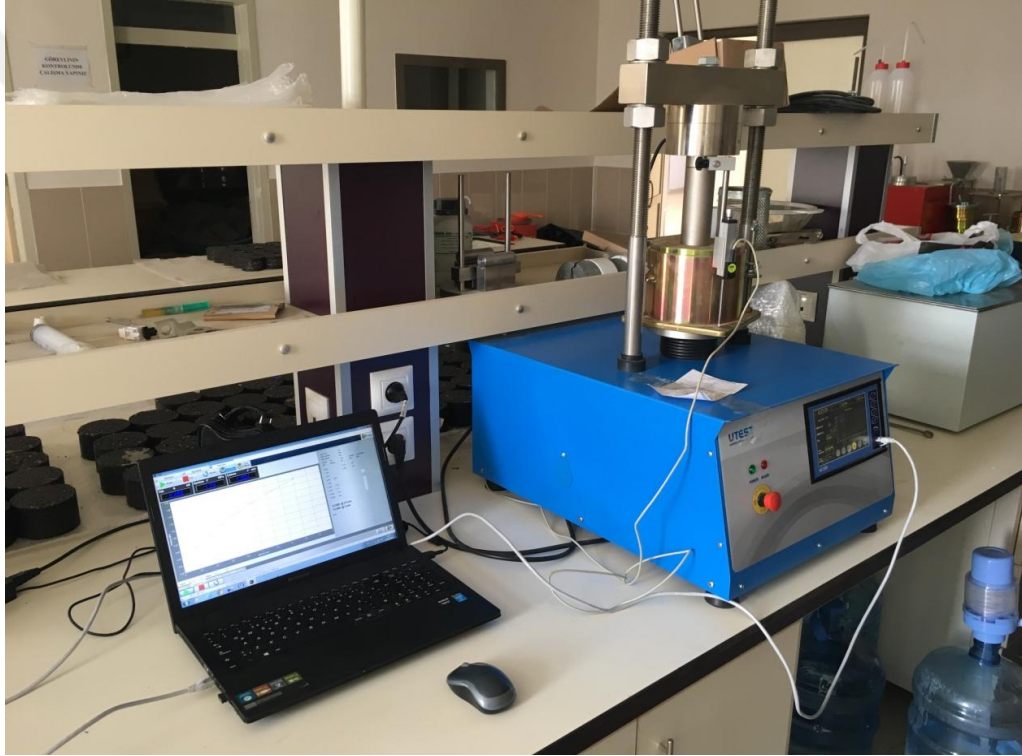
**Şekil 3.22.** Serbest Basınç Deneyinde Oluşan Deformasyon Örneği



### 3.2.6. CBR Deneyi (California Bearing Ratio – Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı)

TS 1900-2 standartlarına göre CBR (California Bearing Ratio, Kaliforniya taşıma gücü oranı) deneyinde, alanı  $1935 \text{ mm}^2$  olan pistonun belli bir hızda ( $1.27 \text{ mm/dk}$ ) zemine baskı uygulaması ile bulunan yük - penetrasyon bağlantısı vasıtasıyla taşıma gücünün belirlenmesine yardımcı olan deneydir. Zeminin, mevcut taşıma gücü değeri denilmektedir.

İlavesiz saf kil ve optimum bileşimler için 7 ve 28 gün boyunca kür süresini tamamlamak için bekletilen numuneler ayarlanmış ve CBR deneyi uygulanarak taşıma oranı verileri bulunmuştur. CBR sırasında kullanılan deney seti Şekil 3.23'de gösterilmiştir.



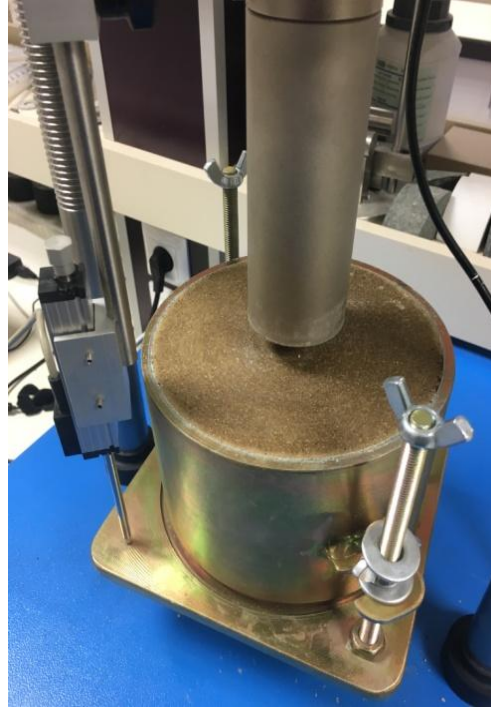
Şekil 3.23. CBR Deney Seti

CBR deneyi içinde numuneler belirlenen su oranlarında aynı proctor deneyinde olduğu gibi yoğurularak hazırlanmıştır. Deney kabına 3 tabaka halinde serilmiş ve her tabakaya  $2.5 \text{ kg}$ 'lık tokmak ile proctor deneyinden elde edilen yoğunluğun sağlanması için 50 vuruş yapılmıştır. Her tabakadan sonra yine sivri bir cisimle tabakaya derin çizikler atılmış ve diğer tabaka bu işlemde sonra serilmiştir. Tüm tabakalar serildikten sonra üstte kalan yüzey tesviye edilir ve numune hazır hale gelmiştir. CBR deneyi için hazırlanan numune Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



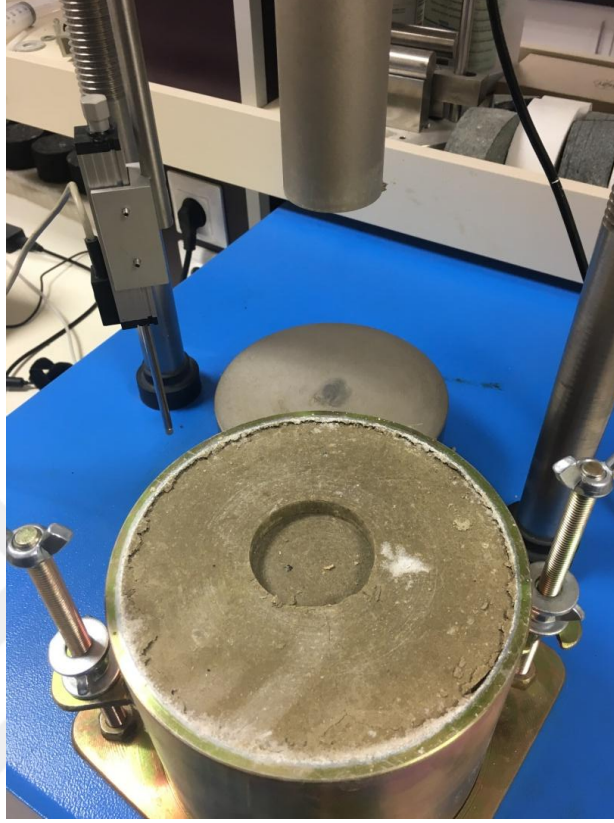
**Şekil 3.24.** CBR Deneyi İçin Hazırlanan Numune

Şekil 3.25'te gösterildiği gibi hazırlanan numune deney setine yerleştirilmiş ve deney başlatılmıştır.



**Şekil 3.25.** CBR Deney Setine Numunenin Yerleştirilmesi

CBR okumaları yapıldıktan sonra deney kendiliğinden sona erer ve program sona erdirilerek numune deney setinden çıkartılır. Deney sonrasında numunede meydana gelen deformasyon Şekil 3.26’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.26.** CBR Deneyi Sonrası Numunede Meydana Gelen Deformasyon

Deney sonucunda 2.5 mm ve 5 mm için taşıma gücü oranları belirlenir. Bu değerlerden büyük olan değer, bize CBR değerini belirtir. CBR taşıma oranını aşağıdaki (3.4) nolu bağıntı ile hesaplanır (TS 1900-2).

$$\text{Taşıma Oranı} = \text{Deneyde Uygulanan Yük} / \text{Numune için Standart Yük} \quad (3.4)$$

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, grafik ve tablolar vasıtası ile yorumlanarak ifade edilmiştir.

##### 4.1. Katkı Maddesi Olarak Kireç'in Deney Verileri

İlavesiz saf kil ve kireç ile farklı oranlarda (%2.5, %5, %7.5, %10, %15 ve %20), ayarlanan karışımlar 7 gün boyunca kür sürecini tamamladıktan sonra proctor, serbest basınç deneyleri ve ardından CBR deneyleri yapılmıştır.

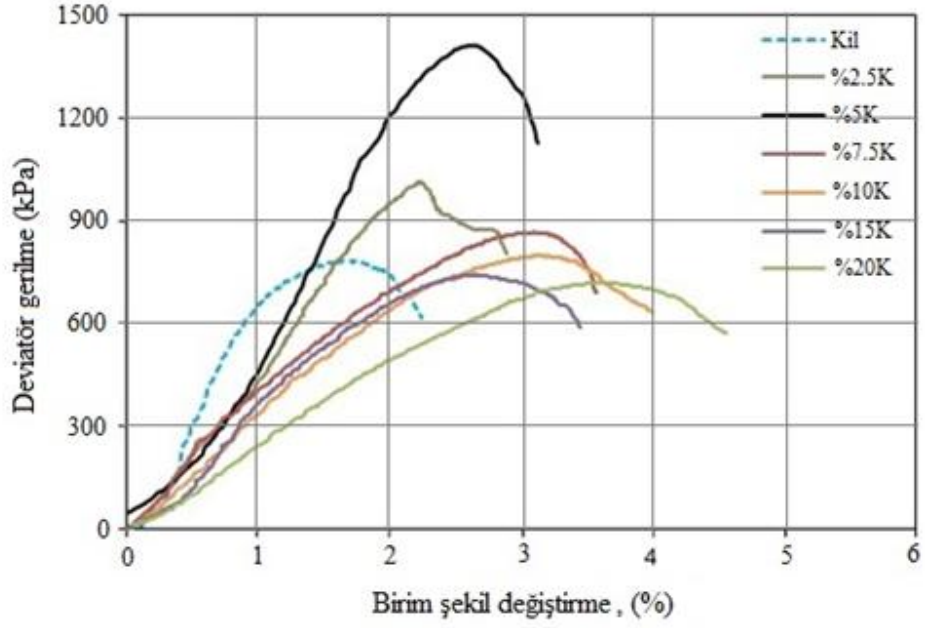
Standart proktor deneyinde, ilavesiz saf killi zemin ve her bir bileşim için (%2.5, %5, %10, %15 ve %20) numuneler ayarlanmış ve belirli seviyelerde su eklenmiştir. Sonrasında TS 1900-1 standartlarına göre ilavesiz saf killi zemin ve diğer tüm birleşimler için standart proktor deneyleri uygulanmıştır. Standart proktor deneyinden bulunan maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri yardımıyla Tek Eksenli Serbest Basınç Deneyi (UCS) ve CBR deneylerine ait numuneler standartlara uygun olarak ayarlanmıştır.

Çalışmada, saf kil ve kireç ilave edilerek hazırlanmış olan karışım numuneleri sırasıyla Kil, %2.5K, %5K, %7.5K, %10K, %15K ve %20K olarak isimlendirilmiştir. Her bir bileşim için 3 tane numune ayarlanıp deney yapılmış ve bulunan 3 verinin ortalaması alınarak, değeri grafik şeklinde verilmiştir.

Killi zemine ilave edilen kireç katkısının 7 günlük serbest basınç dayanımları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayrıca 7 günlük kür sürecini tamamlayan ilavesiz saf killi zemin ve tüm diğer bileşimler için uygulanmış UCS deneylerine ait gerilme ve şekil değiştirme grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 7 günlük kür sonrası Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç dayanım verileri

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı					
	% 2,5	% 5	% 7.5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	990 N	1339 N	915 N	785 N	665 N	658 N
2. Numune	1150 N	1394 N	799 N	813 N	766 N	713 N
3. Numune	896 N	1503 N	902 N	847 N	795 N	810 N
Ortalama	1012 N	1412 N	872 N	815 N	742 N	727 N



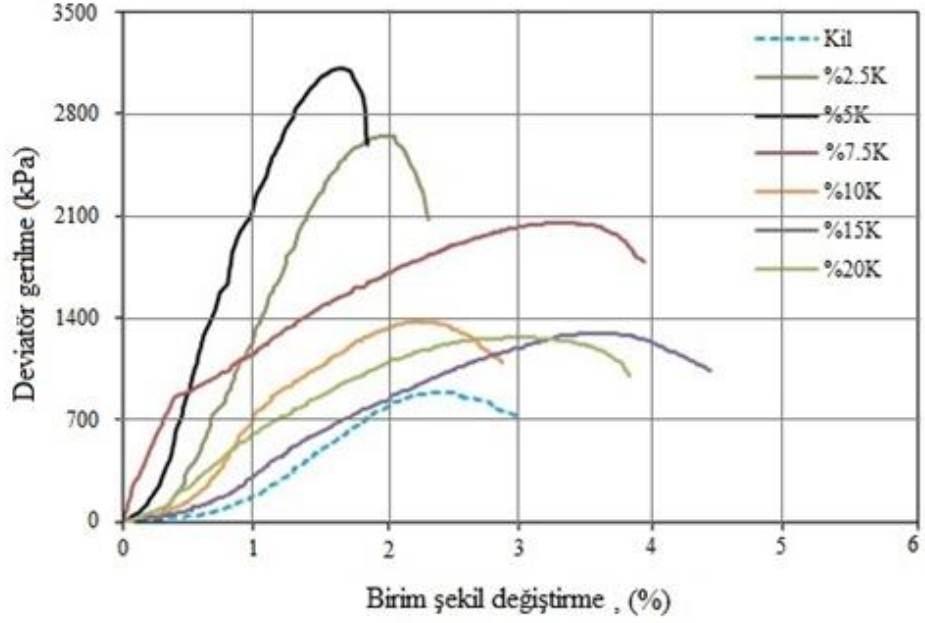
**Şekil 4.1.** 7 günlük kür süresinin ardından Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'te görüldüğü üzere %5 kireç eklenerek hazırlanan killi zemin, en yüksek serbest basınç dayanımına ( $q_u$ ) sahiptir. 7 günlük kürün ardından %5 kireç ilavesi, kilin serbest basınç dayanımını 1.81 kat artırırken, %15 ve %20 civarındaki bileşimlerin serbest basınç dayanım değerleri, ilavesiz saf kildende az çıkmıştır.

Killi zemine ilave edilen kireç katkısının 28 günlük serbest basınç dayanımları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ayrıca 28 günlük kür sürecini tamamlayan ilavesiz saf killi zemin ve tüm diğer bileşimler için uygulanmış UCS deneylerine ait gerilme ve şekil değiştirme grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** 28 günlük kür sonrası Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç dayanım verileri

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı					
	% 2,5	% 5	% 7.5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	2365 N	3210 N	2106 N	999 N	1301 N	1235 N
2. Numune	2712 N	2995 N	2180 N	1432 N	1122 N	1005 N
3. Numune	2885 N	3140 N	1900 N	1754 N	1429 N	1552 N
Ortalama	2654 N	3115 N	2062 N	1395 N	1284 N	1264 N



**Şekil 4.2.** 28 günlük kür süresinin ardından Kireç katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği

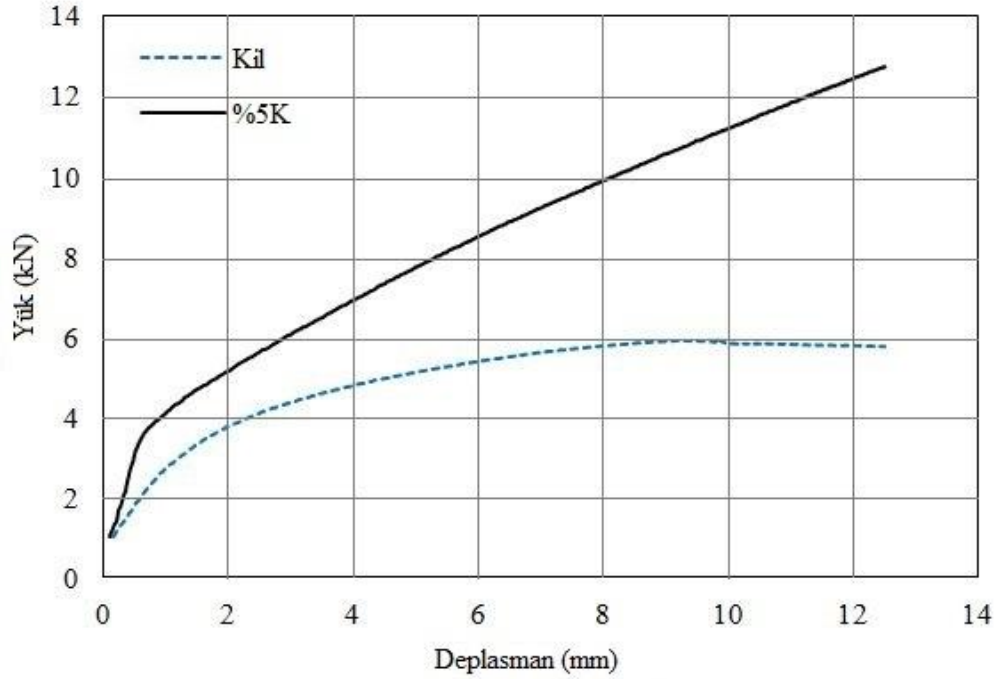
Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2'de %5 kireç eklenerek hazırlanan killi zeminin, en fazla serbest basınç dayanımını ( $q_u$ ) gösterdiği görülmektedir. 28 gün sonunda kür sürecini tamamlayan %5 kireç ilavesi, killi zeminin serbest basınç dayanımını 3.02 kat yükseltmiştir.

28 gün sonucunda tüm bileşimlerin ilavesiz saf killi zeminden daha fazla serbest basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, ilavesiz saf killi zeminin de 28 günlük kür sürecini tamamladıktan sonra mukavemetinin bir miktar artış gösterdiği görülmüştür.

Serbest basınç deneyleri sonuçlarına bakılarak optimum katkı miktarı %5 olarak alındıktan sonra ilavesiz saf killi zemin ve %5 sönmüş kireç ilaveli killi zemine CBR deneyi uygulanmıştır. Hem ilavesiz saf killi zemin hem de %5 kireç ilaveli killi zemin için 2'şer adet CBR deneyi yapmak için numune hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 7 ve 28 günlük kür sürecini tamamlamak için muhafaza edilmiştir. Kür sürecini tamamladıktan sonra hazırlanan numunelere CBR deneyi uygulanmıştır.

Şekil 4.3'te 7 günlük kür sürecini tamamlayan ilavesiz saf killi zemin ve %5 kireç ilaveli killi zemin için yapılan CBR deney verilerine ait yük-deplasman grafikleri verilmiştir.



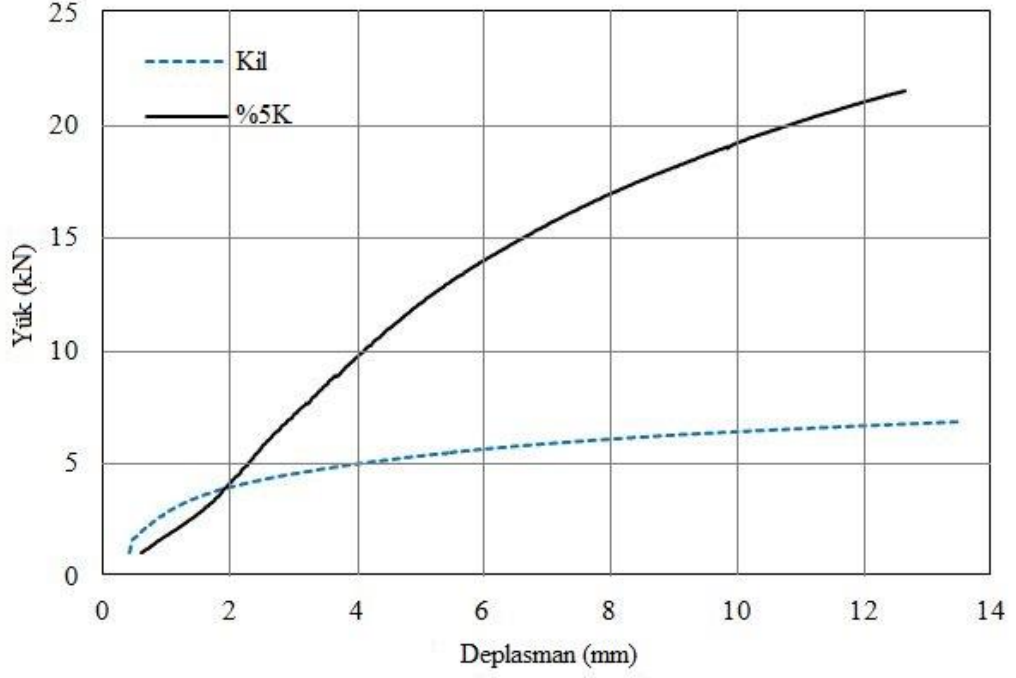


**Şekil 4.3.** 7 günlük kür süresinin ardından Kireç katkıli deney verilerine ait CBR grafiği

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi %5 kireç ilavesi ile hazırlanmış kilin taşıma gücü oranı daha fazladır. 7 günlük kür süreci tamamlandığında ilavesiz killi zeminin 2.5 ve 5 mm'lik deplasmanlara tekabül eden düzeltilmiş CBR verileri sırası ile %31.2 ve %25.6'dır.

7 günlük kür süreci tamamlandığında %5 kireç ilaveli killi zeminin 2.5 ve 5 mm'lik deplasmanlara tekabül eden düzeltilmiş CBR verileri sırası ile %42.7 ve %38.7'dir. Görüldüğü üzere 7 günlük kürün sonunda %5 kireç ilavesi, katkısız kili zeminin CBR değerini yaklaşık 1.37 kat yükseltmiştir.

Şekil 4.4'te 28 gün boyunca kür süreci tamamlandığında ilavesiz saf killi zemin ve %5 sönmüş kireç ilaveli killi zemin için uygulanmış CBR deney verilerine ait yük-deplasman grafikleri verilmiştir.



**Şekil 4.4.** 28 günlük kür süresinin ardından Kireç katkıli deney verilerine ait CBR grafiği

Şekil 4.4'te görüleceği gibi %5 sönmüş kireç ilavesi ile hazırlanmış saf ilavesiz killi zeminin, taşıma gücü seviyesi daha fazladır. 28 gün boyunca kür sürecini tamamlayan saf ilavesiz killi zeminin 2.5 ve 5 mm'lik deplasmanlarına tekabül eden düzeltilmiş CBR verileri sırası ile %32.0 ve %26.4'dir.

28 gün boyunca kür süreci tamamlandığında %5 sönmüş kireç ilaveli killi zeminin 2.5 ve 5 mm'lik deplasmanlara tekabül eden düzeltilmiş CBR değerleri sırası ile %57.1 ve %66.7'dir. 7 günlük kür tamamlandığında %5 sönmüş kireç ilavesi, katkısız saf killi zeminin CBR değerini takribi olarak 2.08 kat yükseltmiştir.

#### 4.2. Katkı Maddesi Olarak Yüksek Fırın Cürufu'nun Deney Verileri

Yukarıda kireç ile ilgili yapılan deneylerin hepsi bu katkı maddesi ve diğer katkı maddeleri içinde yapılmıştır. Sadece deneylerden elde edilen veriler ve grafikler aktarılmıştır.

YFC'ye normal su ilave edilerek hazırlanan numelerde istenilen performans elde edilemediği için sodyum hidroksit solüsyonu katılarak deneyler tekrardan yapılmıştır. Öncelikle normal su ilave edilerek yapılan deneylerin sonuçları, sonrasında ise solüsyon katılarak yapılan deneylerin sonuçları ayrı ayrı verilmiştir.

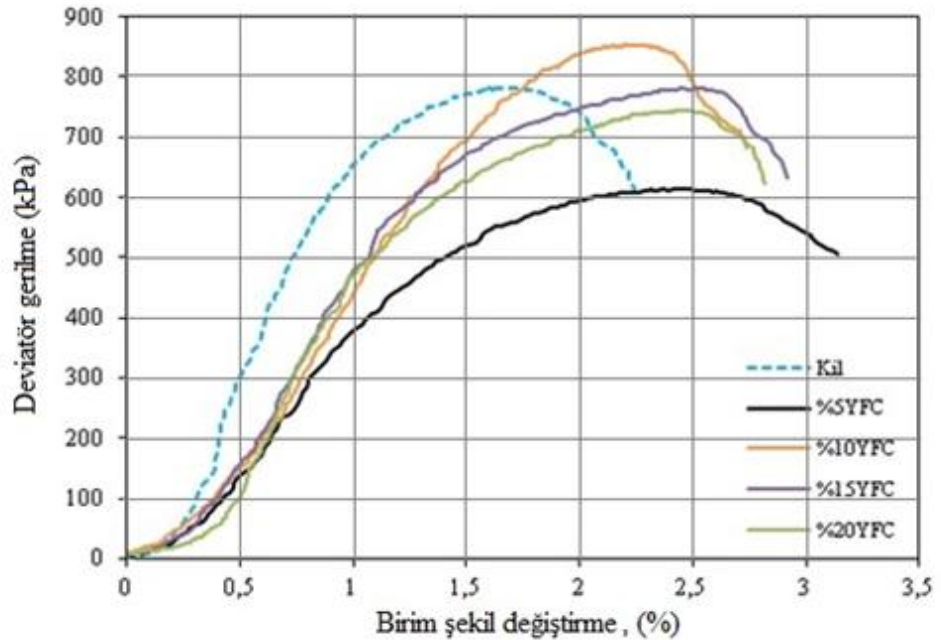


Çalışmada, saf kil ve yüksek fırın cürufu ilave edilerek hazırlanmış olan karışım numuneleri sırasıyla Kil, %5YFC, %10YFC, %15YFC ve %20YFC olarak isimlendirilmiştir. Her bir bileşim için 3 tane numune ayarlanıp deney yapılmış ve bulunan 3 verinin ortalaması alınarak, değeri grafik şeklinde verilmiştir.

Normal su ilaveli yapılan YFC katkısının 7 günlük serbest basınç dayanımları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ayrıca 7 günlük kür sürecini tamamlayan bileşimler için uygulanmış UCS deneylerine ait gerilme ve şekil değiştirme grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** 7 günlük kür sonrası YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç dayanım verileri

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı			
	% 5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	689 N	912 N	887 N	743 N
2. Numune	557 N	867 N	758 N	759 N
3. Numune	584 N	792 N	701 N	694 N
Ortalama	610 N	857 N	782 N	732 N



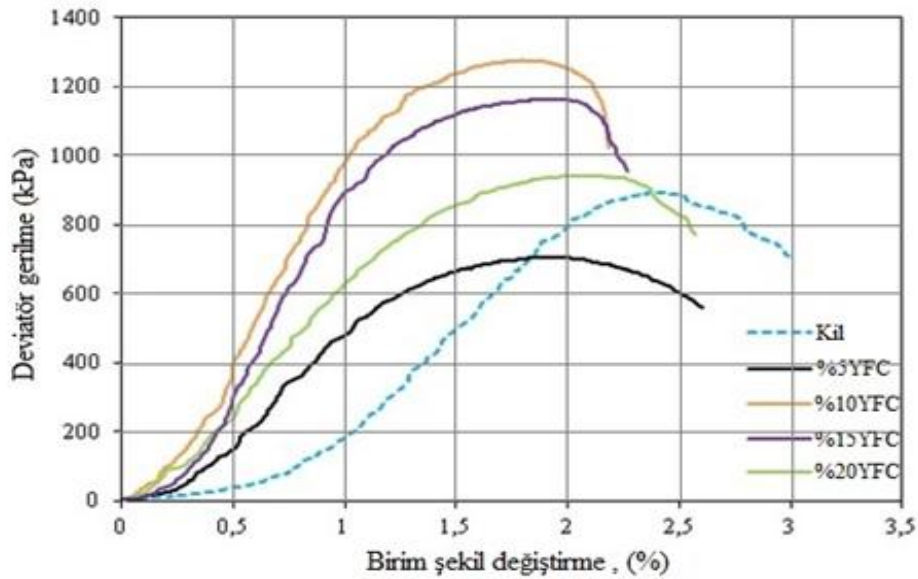
**Şekil 4.5.** 7 günlük kür süresinin ardından YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği

7 günlük kür süresinin sonunda Çizelge 4.3 ve Şekil 4.5 incelendiğinde saf kile katılan %10 oranında YFC'nin en yüksek basınç dayanımı sergilediği görülmüştür. Öte yandan % 5 YFC katkılı zeminin basınç dayanımı saf killi zeminden çok çok aşağıda çıkmıştır. % 15 YFC katkısı saf killi zeminin dayanımına çok yaklaşmış olsada killi zemini iyileştirememiştir. Aynı şekilde % 20 YFC katkılı zeminin basınç dayanımı da, saf killi zeminin basınç dayanımından daha düşük elde edilmiştir.

YFC katkısı, saf killi zeminde farklı etkiler ortaya çıkarmıştır. Kür süresinin etkisi olabileceği düşünülerek, 28 günlük kürün sonundaki veriler değerlendirilmiştir. 28 günlük kürün sonunda elde edilen veriler Çizelge 4.4'te verilmiştir. 28 günlük kür sürecini tamamlayan bileşimler için uygulanmış UCS deneylerine ait gerilme ve şekil değiştirme grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** 28 günlük kür sonrası YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç dayanım verileri

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı			
	% 5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	652 N	1474 N	1347 N	978 N
2. Numune	772 N	1262 N	1284 N	802,99 N
3. Numune	685 N	1131 N	855 N	1025 N
Ortalama	703 N	1289 N	1162 N	935,33 N



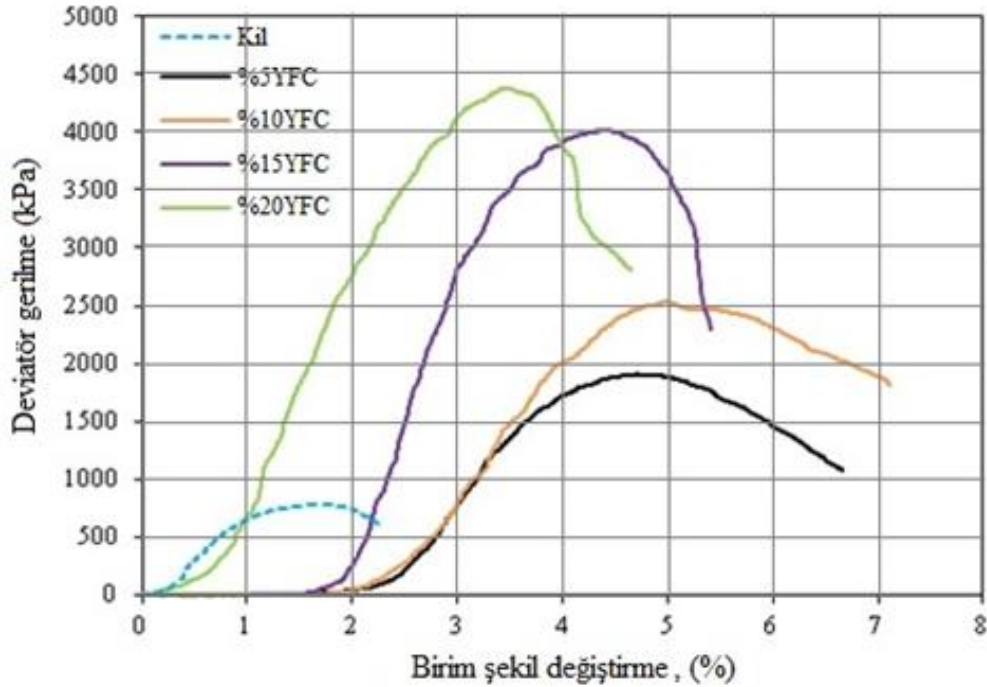
**Şekil 4.6.** 28 günlük kür süresinin ardından YFC'nin su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği

28 günlük kür süresinin sonunda Çizelge 4.4 ve Şekil 4.6 incelendiğinde saf kile katılan % 5 YFC katkısı hariç tümü saf killi zeminden daha fazla basınç dayanımı sergilemiştir. Saf killi zeminin basınç dayanımında kür süresine bağlı olarak bir miktar artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

28 günlük kür süresi sonucunda görüyor ki en yüksek basınç dayanımını ise % 10 YFC katkılı zemin sergilemiştir. Kür süresinin etkili olduğu düşünülmektedir.

Fakat deney sonuçlarındaki tutarsızlık nedeniyle YFC katkısına Sodyum Hidroksit Solisyonu katılarak deneylerin tekrardan yapılmasına karar verilmiştir.

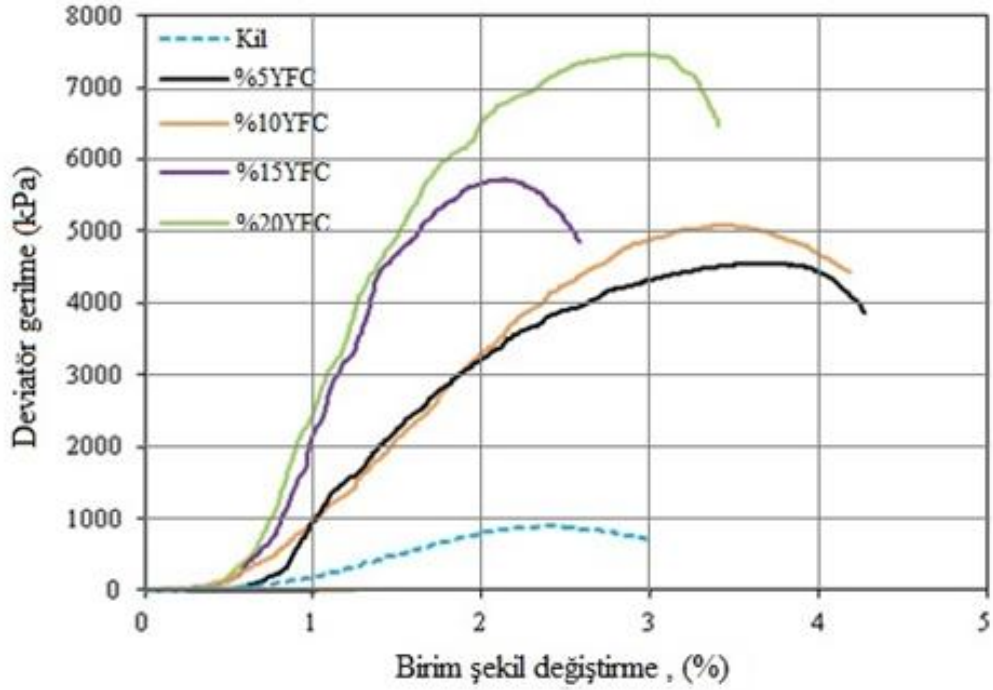
YFC'nin Sodyum Hidroksit Solisyonu ilave edilerek tekrardan yapılan deney verilerinden elde edilen grafikler Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.



**Şekil 4.7.** 7 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği

Şekil 4.7 incelendiğinde saf killi zemine katılan YFC'nin tüm numuneleri saf killi zeminden daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. Solisyon sayesinde artan basınç dayanımları ciddi oranlardadır. Basınç dayanımları takribi olarak 2 kat daha artış göstermiştir. En yüksek basınç dayanımını ise % 20 YFC vermiştir.

Kür süresindeki artışın, basınç dayanımlarını daha da yükselteceği öngörüsüyle, numuneler 28 günlük kür süresine bırakılmıştır. 28 günlük kür süresinin ardından numunelerin gösterdiği serbest basınç dayanımları Şekil 4.8’te verilmiştir.



**Şekil 4.8.** 28 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği

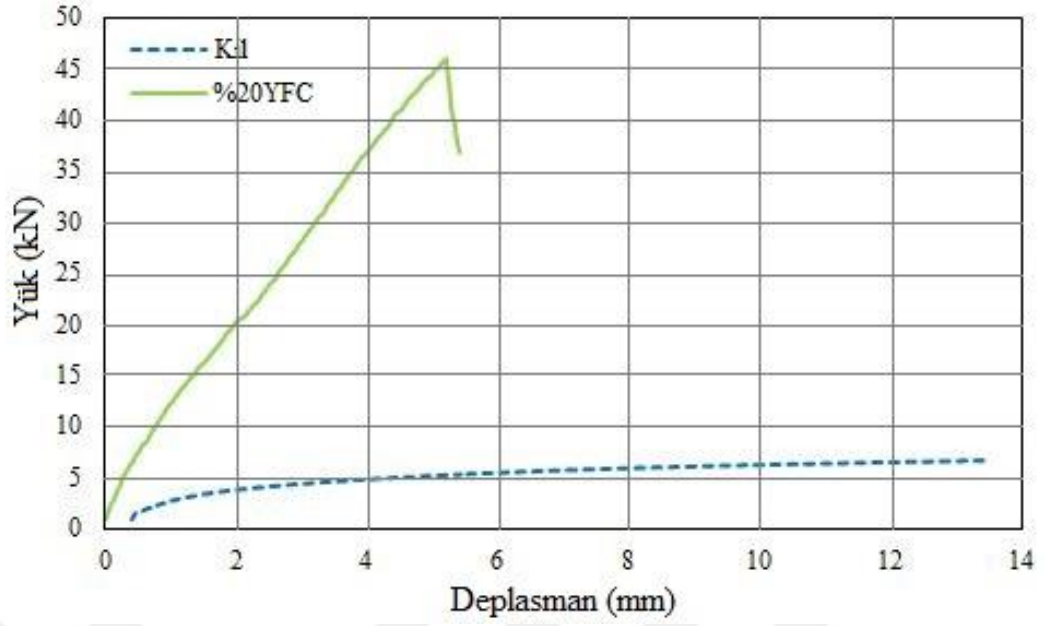
Şekil 4.8 incelendiğinde; 28 günlük kür süreci numuneler üzerinde yine olumlu bir etki bırakmış ve serbest basınç dayanımları; saf killi zeminde çok az bir miktar artış gösterse de, diğer katkılı numunelerde bariz artışlar sergilemiştir. Görüldüğü gibi en yüksek basınç dayanımını % 20 YFC katkılı zemin vermiştir.

Serbest basınç dayanım sonuçlarına göre en yüksek dayanım değerini %20 ilave de alındığı için %20 lik aktivatörlü yüksek fırın cürufu katkısı için CBR deneyleri yapılmıştır. CBR deney sonuçları çizelge 4.5’da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Kil + %20 YFC'nin solisyon ilaveli 7 günlük CBR değerleri

KİL + %20 YFC	CBR 2.5 mm	CBR 5 mm
Dayanım, (%)	179.7	222.2

Şekil 4.9’da 7 günlük kür süresinin ardından yapılan CBR deney verileri ile çizilen grafik verilmiştir.



**Şekil 4.9.** 7 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli deney verileri ait CBR grafiği

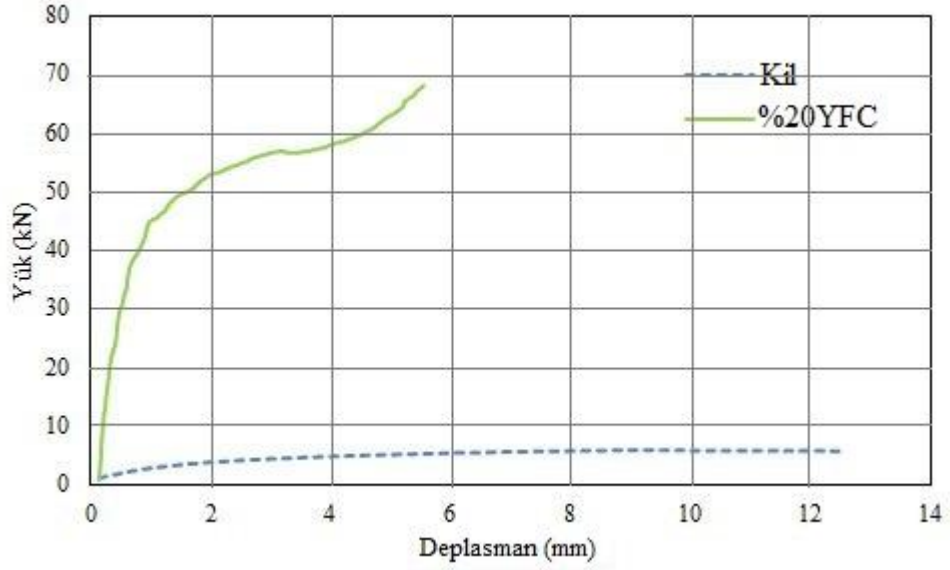
Şekil 4.9'da verilen 7 günlük kür süresinin ardından yapılan CBR deney verileri ile çizilen grafik incelendiğinde; % 20 YFC katkılı zeminin yük – deplasman grafiği paralel bir şekilde artış göstermiştir. 7 günlük % 20 YFC katkılı zeminin 2.5 ve 5 mm' lik düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla % 179.7 ve % 222.9' dir. Bunlardan yüksek olan % 222.9 değeri seçilmiştir. 7 günlük saf killi zeminin 2.5 ve 5 mm' lik CBR değerleri ise sırasıyla % 31.2 ve % 25.6 idi.

7 günlük % 20 YFC katkılı zemin, 7 günlük saf killi zeminin CBR değerini takribi olarak 7.14 kat artırmıştır. 28 günlük solisyon ilaveli YFC'nin CBR değerleri ise Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.6.** Kıl + %20 YFC'nin solisyon ilaveli 28 günlük CBR değerleri

<b>KİL + %20 YFC</b>	<b>CBR 2.5 mm</b>	<b>CBR 5 mm</b>
Dayanım, (%)	416.04	315.63

Şekil 4.10'da 28 günlük kür süresinin ardından yapılan CBR deney verileri ile çizilen grafik verilmiştir.



**Şekil 4.10.** 28 günlük kür süresinin ardından YFC'nin solisyon ilaveli deney verileri ait CBR grafiği

Şekil 4.10'da verilen 28 günlük kür süresinin ardından yapılan CBR deney verileri ile çizilen grafik incelendiğinde; % 20 YFC katkıli zeminin yük – deplasman grafiği doğrusal olmasa da artış göstermiştir.

28 günlük % 20 YFC katkıli zeminin 2.5 ve 5 mm' lik düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla % 416.04 ve % 315.63' tür. Bunlardan yüksek olan % 416.04 değeri seçilmiştir. 28 günlük saf killi zeminin 2.5 ve 5 mm' lik CBR değerleri ise sırasıyla % 32 ve % 26.4 idi.

28 günlük % 20 YFC katkıli zemin, 28 günlük saf killi zeminin CBR değerini takribi olarak 13 kat artırmıştır.

#### 4.3. Katkı Maddesi Olarak Uçucu Kül' ün Deney Verileri

Yüksek Fırın Cürufu gibi Uçucu Külde normal su ile yapılan deneylerde beklenen performansı göstermediği için sodyum hidroksit solisyonu ilavesi ile yapılan tüm deneyler tekrardan yapılmıştır. Aşağıda uçucu külün su ilaveli serbest basınç dayanım değerleri, daha sonra ise solisyon ilaveli serbest basınç dayanım verileri ve en son olarakta CBR değerleri verilmiştir.

Çalışmada, saf kil ve uçucu kül ilave edilerek hazırlanmış olan karışım numuneleri sırasıyla Kil, %5UK, %10UK, %15UK ve %20UK olarak isimlendirilmiştir.

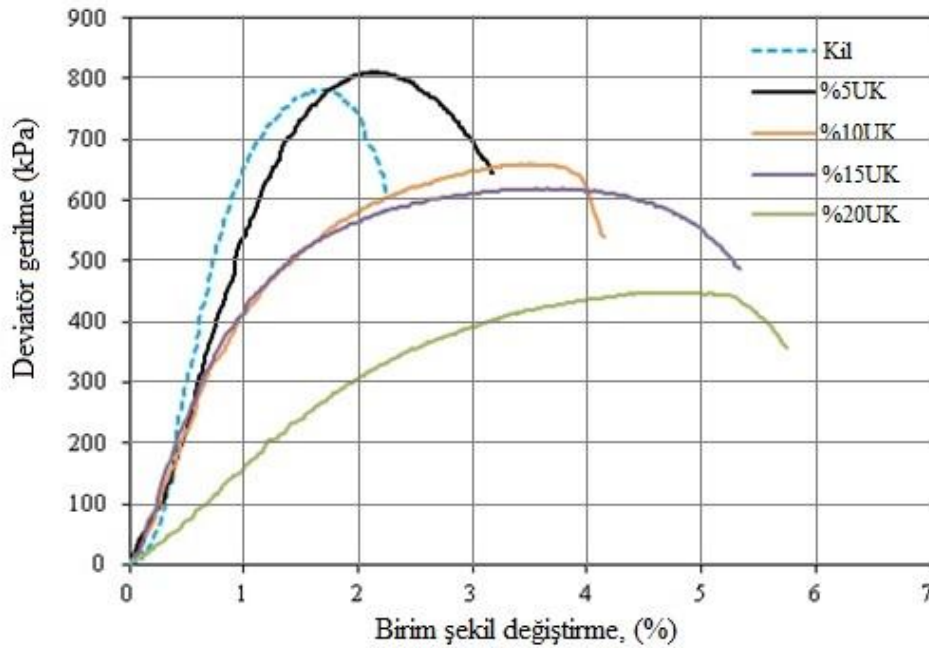
Her bir bileşim için 3 tane numune ayarlanıp deney yapılmış ve bulunan 3 verinin ortalaması alınarak, değeri grafik şeklinde verilmiştir.

7 günlük kür sonrasında uçucu küle su ilave edilerek yapılan serbest basınç dayanım verileri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** 7 günlük kür sonrası UK'nın su ilaveli serbest basınç dayanım verileri

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı			
	% 5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	819,99 N	632 N	635 N	450 N
2. Numune	803 N	702,5 N	598,42 N	432 N
3. Numune	798,01 N	639,5 N	615 N	459,66 N
Ortalama	807 N	658 N	616,14 N	447,22 N

Şekil 4.11’de 7 günlük kür süresinin ardından, uçucu külün su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.11.** 7 günlük kür süresinin ardından UK'nın su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.11’de verilen 7 günlük serbest basınç deney verileri ve serbest basınç grafiği incelendiğinde, en yüksek dayanımı %5 UK’nın verdiği görülmektedir. % 5 UK katkılı zemin bile saf killi zeminin serbest basınç dayanımını



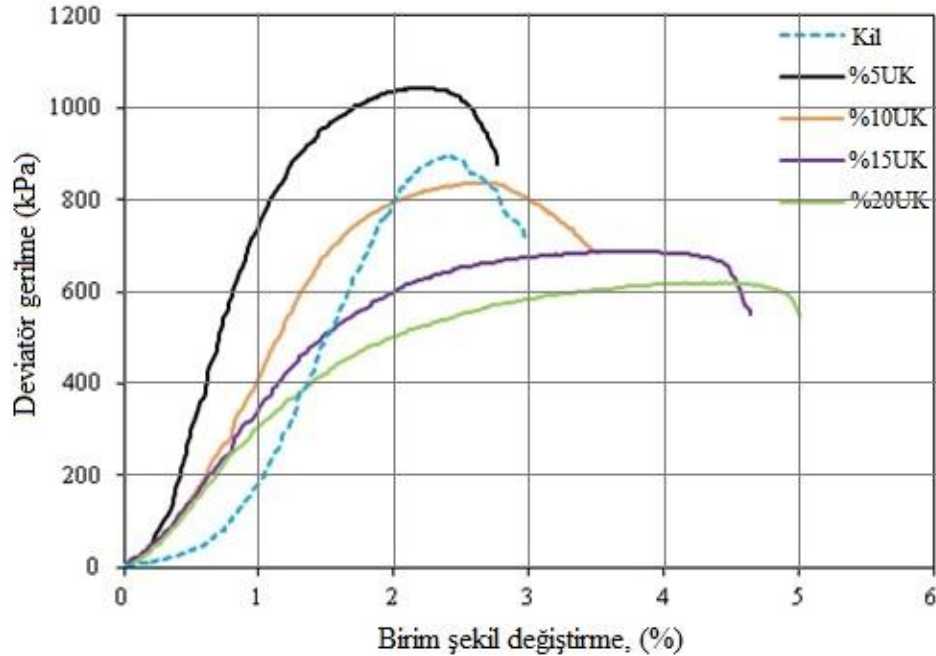
çok az fark ile geçmiştir. Fakat diğer oranlarda katılan tüm katkı maddeleri ile oluşturulan zemin, saf killi zeminin dayanımından daha düşük basınç dayanımını sergilemiştir.

Kür süresinin de etkisini görebilmek amacı ile tüm numuneler 28 günlük kür sürecine bırakılmıştır. 28 günlük kür sonrası veriler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** 28 günlük kür sonrası UK'nın su ilaveli serbest basınç dayanım verileri

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı			
	% 5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	998 N	852 N	653,5 N	602 N
2. Numune	1015 N	812 N	612,4 N	663 N
3. Numune	1110 N	834,01 N	683,20 N	589,03 N
Ortalama	1041 N	832,67 N	683,20 N	618,01 N

Şekil 4.12’de 28 günlük kür süresinin ardından, uçucu külün su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği verilmiştir.



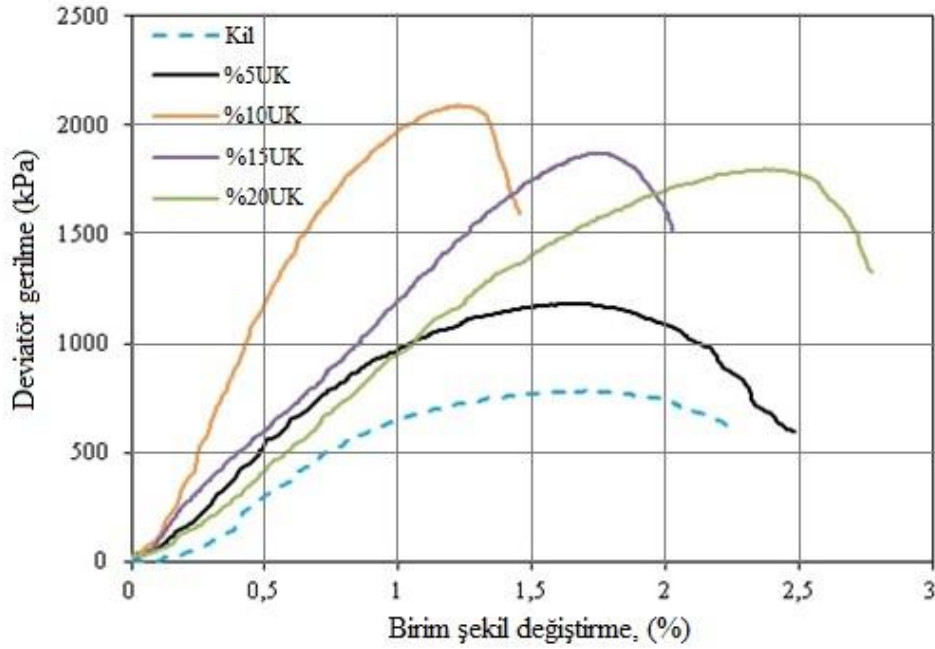
**Şekil 4.12.** 28 günlük kür süresinin ardından UK'nın su ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği



28 günlük kür süresinin ardından izelge 4.8 ve Şekil 4.12 incelendiğinde, saf killi zeminin serbest basınc dayanamını sadece % 5 UK katkıli zemin artırmıştır. %10 UK katkıli zeminin basınc dayanamını, saf killi zeminin basınc dayanamına bir miktar yaklaşmış fakat geçememiştir.

Diğer tüm oranlarda katılan katkı maddeleri, saf killi zeminin sergilediği serbest basınc dayanamından daha d Őuk dayanam sergilemiştir. Solisyon ilavesi ile serbest basınc dayanamlarında daha stabil veriler elde edileceği d Ő n lm Ő ve UK katkı maddesinin tüm numunelerine solisyon katılarak deneyler tekrarlanmıŐtır.

Uçucu k le uygulanan solisyonlu deney verilerinden elde edilen grafik Şekil 4.13'de verilmiştir.

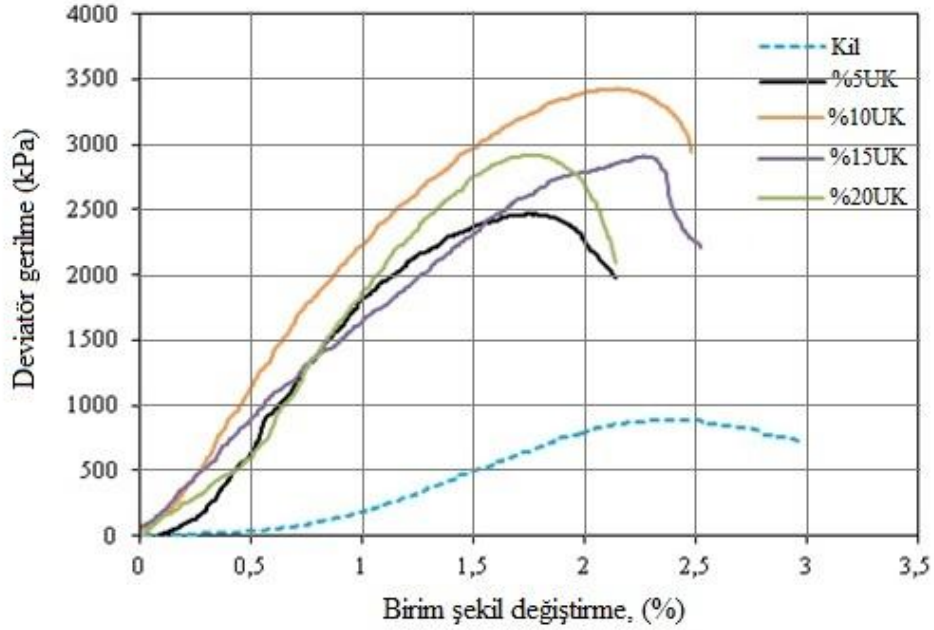


**Şekil 4.13.** 7 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınc grafiği

Şekil 4.13 incelendiğinde saf killi zemine katılan UK'nın tüm numuneleri saf killi zeminden daha yüksek basınc dayanamını sergilemiştir. Solisyon sayesinde artan basınc dayanamları ciddi oranlara ulaŐmıŐtır. Basınc dayanamları takribi olarak 2.5 - 3 kat daha artış göstermiştir.

En yüksek basınc dayanamını ise % 10 UK katkıli zemin vermiştir. K r s resindeki artışın, basınc dayanamlarını daha da yükselteceği öngörüsüyle, numuneler 28 günlük

kür süresine bırakılmış, 28 günlük kür süresinin ardından numunelerin gösterdiği serbest basınç dayanımları Şekil 4.14'te verilmiştir.



**Şekil 4.14.** 28 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli tüm numunelerine uygulanan serbest basınç grafiği

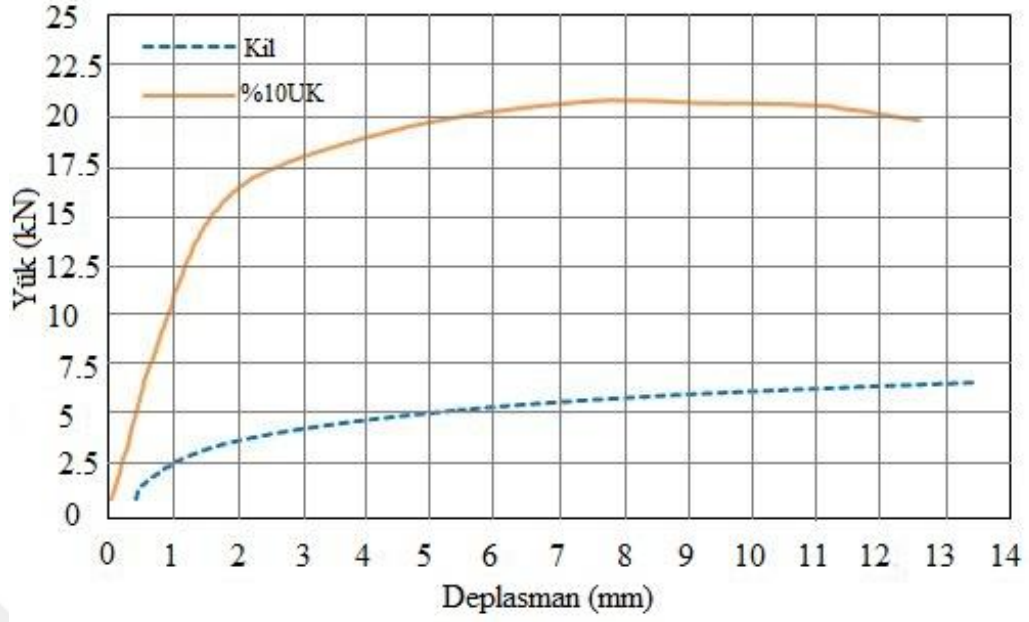
Serbest basınç dayanım sonuçlarına göre en yüksek dayanım değerini %10 ilave de aldığımız için %10 luk solisyonlu uçucu kül katkısına, CBR deneyleri yapılmıştır. CBR deney sonuçları Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.9.** KİL + %10 UK'nın solisyon ilaveli 7 günlük CBR değerleri

KİL + %10 UK	CBR 2.5 mm	CBR 5 mm
Dayanım, (%)	131,23	98,46

Şekil 4.15'te 7 günlük kür süresinin ardından uçucu külün solisyon ilaveli deney verilerinden elde edilen CBR grafiği verilmiştir.

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.15'te verilen 7 günlük kür süresinin ardından % 10 UK katkılı zemine yapılan CBR deney verileri ve grafiği incelendiğinde; 7 günlük % 10 UK katkılı zeminin 2.5 ve 5 mm'lik düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla %131.23 ve %98.46'dır. Bunlardan yüksek olan %131.23 CBR değeri seçilmiştir. 7 günlük saf killi zeminin 2.5 ve 5 mm'lik CBR değerleri ise sırasıyla %31.2 ve %25.6 idi.



**Şekil 4.15.** 7 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli deney verilerine ait CBR grafiği

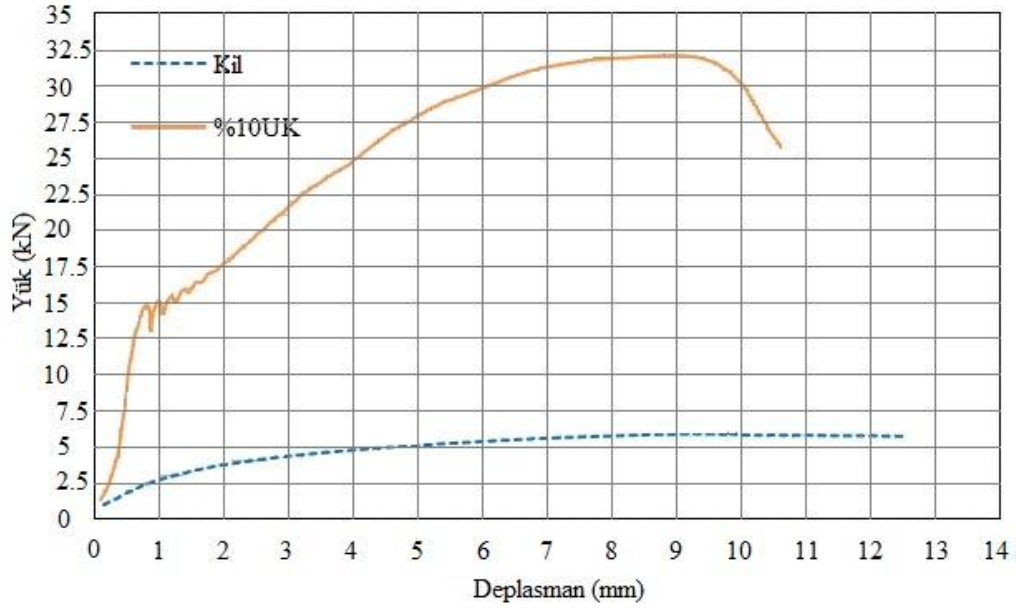
7 günlük % 10 UK katkıli zemin, 7 günlük saf killi zeminin CBR değerini takribi olarak 4.21 kat artırmıştır. Kil + %10 UK' nın solisyon ilaveli 28 günlük CBR değerleri Çizelge 4.10'te verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** Kil + %10 UK'nın solisyon ilaveli 28 günlük CBR değerleri

<b>KİL + %10 UK</b>	<b>CBR 2.5 mm</b>	<b>CBR 5 mm</b>
Dayanım, (%)	149,59	139,95

Şekil 4.16'da 28 günlük kür süresinin ardından uçucu külün solisyon ilaveli deney verilerinden elde edilen CBR grafiği verilmiştir.

Çizelge 4.10 ve Şekil 4.16'da verilen 28 günlük kür süresinin ardından %10 UK katkıli zemine yapılan CBR deney verileri ve grafiği incelendiğinde; 28 günlük %10 UK katkıli zeminin 2.5 ve 5 mm' lik düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla %149.59 ve %139.95'tir. Bunlardan yüksek olan %149.59 CBR değeri seçilmiştir.



**Şekil 4.16.** 28 günlük kür süresinin ardından UK'nın solisyon ilaveli deney verilerine ait CBR grafiği

28 günlük saf killi zeminin 2.5 ve 5 mm'lik CBR değerleri ise sırasıyla %32 ve %26.4 idi. 28 günlük %10 UK katkılı zemin, 28 günlük saf killi zeminin CBR değerini takribi olarak 4.67 kat artırmıştır.

#### 4.4. Katkı Maddesi Olarak Silis Dumanı'nın Deney Verileri

Katkı maddesi olarak kullanılan Silis Dumanı'nın, 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

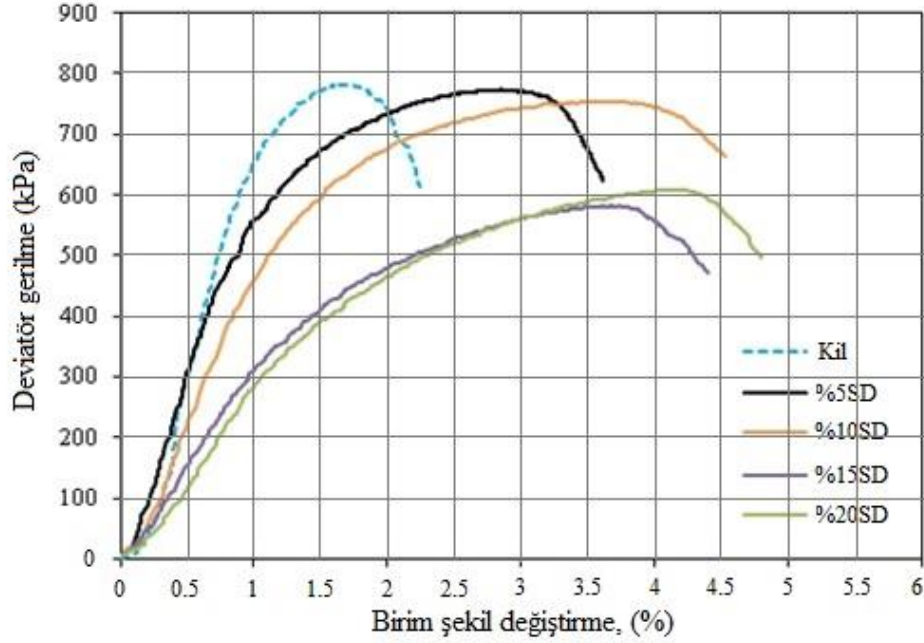
Çalışmada, saf kil ve silis dumanı ilave edilerek hazırlanmış olan karışım numuneleri sırasıyla Kil, %5SD, %10SD, %15SD ve %20SD olarak isimlendirilmiştir.

Her bir bileşim için 3 tane numune ayarlanıp deney yapılmış ve bulunan 3 verinin ortalaması alınarak, değeri grafik şeklinde verilmiştir.

**Çizelge 4.11.** 7 günlük kür sonrası SD'nin serbest basınç dayanımları

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı			
	% 5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	725 N	807,9 N	555 N	573 N
2. Numune	809 N	734 N	612 N	613 N
3. Numune	782,9 N	718 N	574,44 N	636,08 N
Ortalama	772,30 N	753,30 N	580,48 N	607,36 N

Çizelge 4.11 incelendiğinde saf killi zeminin basınç dayanımına en çok yaklaşan %5 silis dumanı katkısıdır. Kile en çok yaklaşan değer %5 silis dumanı olsada, ilavesiz killi zeminin serbest basınç dayanımını geçememiştir. Şekil 4.17’de 7 günlük kür süresinin ardından silis dumanı katkılı tüm numunelerin serbest basınç grafiği verilmiştir.



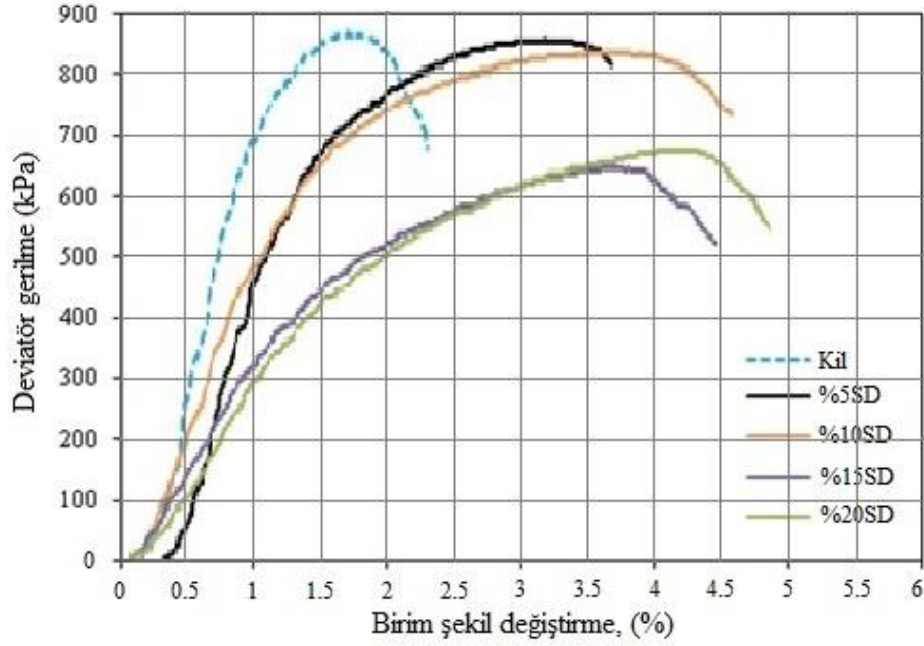
**Şekil 4.17.** 7 günlük kür süresinin ardından SD katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği

Şekil 4.17 incelendiğinde Silis dumanı'nın 7 günlük kür süresi sonrasındaki deney verilerini incelediğimizde karakersiz bir dayanım sergilemiş ve saf killi zeminin basınç dayanımına sadece %5 katkılı silis dumanı yaklaşmıştır. 28 günlük kür süresinin basınç dayanımlarında olumlu etki göstereceği düşünülerek, tüm numuneler 28 günlük kür sürecine bırakılmış ve 28 gün sonunda sergilediği serbest basınç dayanımları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

**Çizelge 4.12.** 28 günlük kür sonrası SD'nin serbest basınç dayanımları

Numunelerin Basınç Dayanımı	Katkı Oranı			
	% 5	% 10	% 15	% 20
1. Numune	802 N	855,5 N	705 N	727,5 N
2. Numune	899 N	835 N	652 N	623 N
3. Numune	858 N	822,6 N	584.6 N	685 N
Ortalama	853 N	837,7 N	647,2 N	678,5 N

Şekil 4.18’de 28 günlük kür süresinin ardından silis dumanı katkılı tüm numunelerin serbest basınç grafiği verilmiştir.



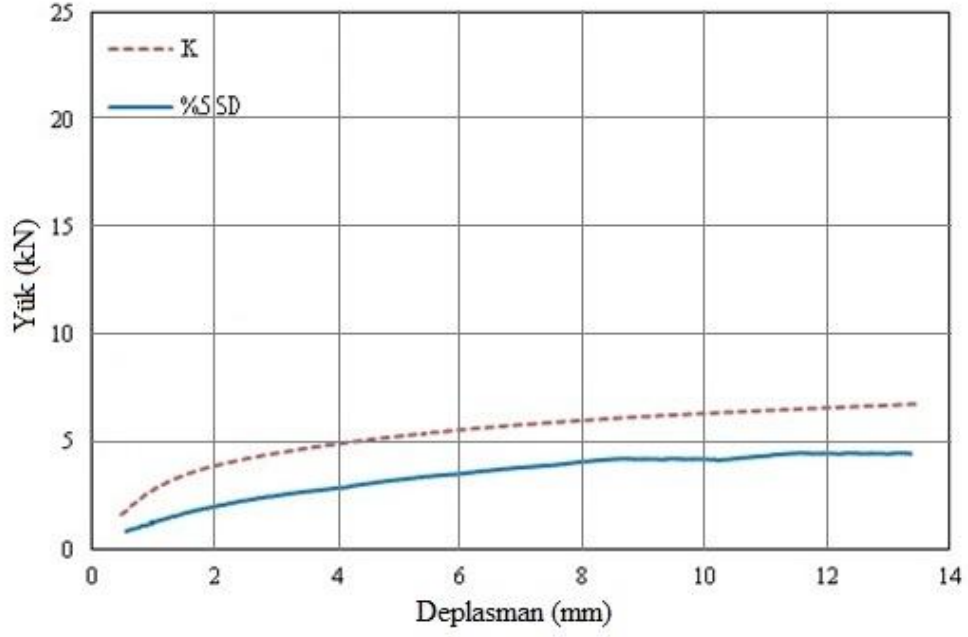
**Şekil 4.18.** 28 günlük kür süresinin ardından SD katkılı tüm numunelere uygulanan serbest basınç grafiği

Silis dumanı, 28 günlük kür süresinin ardından yine aynı tavrı sergilemiş ve killi zeminin dayanımını ciddi oranda arttırmamıştır. Killi zeminin basınç dayanımını çok az bir seviyede yükseltmiştir. En fazla dayanım sergileyen %5 silis dumanı ilaveli zemine CBR deneyleri yapılmıştır. 7 günlük kür sonrası yapılan CBR deneylerinden elde edilen veriler Çizelge 4.13’te verilmiştir.

**Çizelge 4.13.** KİL + %5 SD'nin 7 günlük CBR değerleri

<b>KİL + %5 SD</b>	<b>CBR 2.5 mm</b>	<b>CBR 5 mm</b>
Dayanım, (%)	28,4	24,3

Şekil 4.19’da 7 günlük kür süresinin ardından silis dumanı katkılı deney verilerinden elde edilen CBR grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.19.** 7 günlük kür süresinin ardından SD katkılı deney verilerine ait CBR grafiği

7 günlük kür süresinin ardından, % 5 silis dumanı katkılı zeminin CBR değeri, saf killi zeminden daha düşüktür. 28 günlük kür süresinin CBR dayanımlarında olumlu etki bırakılacağı düşünülerek, numuneler 28 günlük kür sürecine bırakılmıştır. 28 günlük kür süresinin ardından elde edilen CBR verileri Çizelge 4.14'te gösterilmiştir.

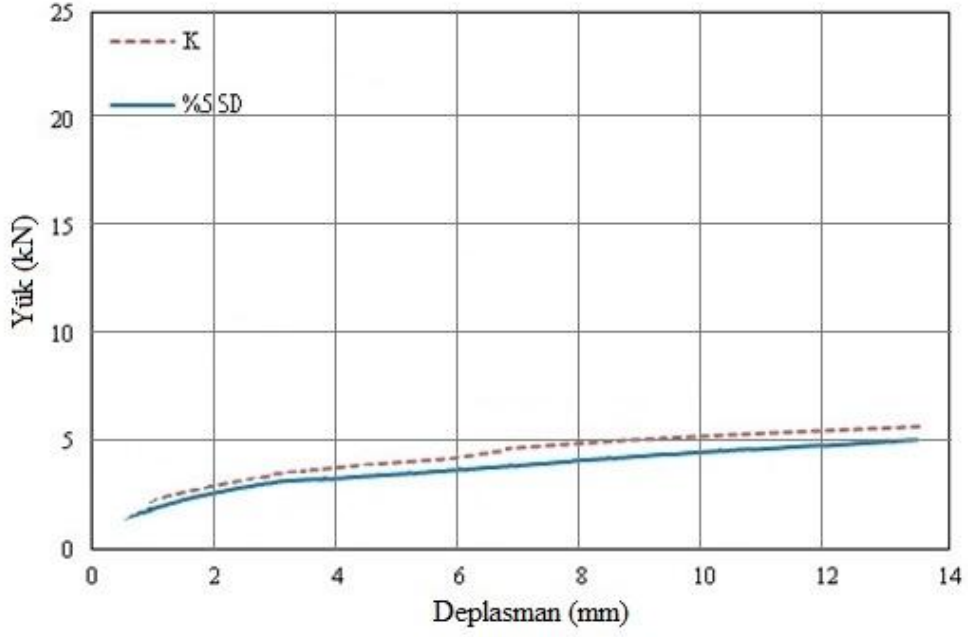
**Çizelge 4.14.** Kil + %5 SD'nin 28 günlük CBR değerleri

<b>KİL + %5 SD</b>	<b>CBR 2.5 mm</b>	<b>CBR 5 mm</b>
Dayanım, (%)	30,1	27,6

Şekil 4.20'de 28 günlük kür süresinin ardından silis dumanı katkılı deney verilerinden elde edilen CBR grafiği verilmiştir.

28 günlük kür süresinin ardından elde edilen CBR değerleri incelendiğinde, kullanılan silis dumanı, saf killi zeminin CBR oranını yine düşürmüştür. Bundan dolayı kullandığımız killi zemine, katkı maddesi olarak silis dumanı iyileştirici özellik göstermemiştir.





**Şekil 4.20.** 28 günlük kür süresinin ardından SD katkılı deney verilerine ait CBR grafiği

#### 4.5. Stabilizasyon İşleminin Üstyapı Tabaka Kalınlıkları ve Maliyetleri Üzerindeki Etkileri

Bu bölümde stabilizasyona tabi tutulan zeminin, üstyapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisi incelenmiştir. Stabilizasyonlu zeminin, tabaka kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisi hem esnek üstyapı için hemde rijit üstyapı için değerlendirilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda bütün katkıları için, en yüksek CBR değerleri, 28 günlük kür süresi sonrası elde edilmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından elde edilen en yüksek CBR değerleri Çizelge 4.15’de verilmiştir.

**Çizelge 4.15.** Deneyler Verileriyle Elde Edilen En Yüksek CBR değerleri

Zemin Cinsi	CBR Değerleri
Saf Killi Zemin	% 32
Saf Killi Zemin + % 5 Sönmüş Kireç	% 66.7
Saf Killi Zemin + % 10 Uçucu Kül	% 149.59
Saf Killi Zemin + % 20 Yüksek Fırın Cürufu	% 416.04
Saf Killi Zemin + % 5 Silis Dumanı	% 30.1



Silis Dumanı, saf killi zeminin CBR değerini düşürdüğü için; tabaka kalınlığı ve maliyet çalışmaları bu katkı maddesi için yapılmamıştır.

Çalışmada, esnek kaplamalarla ilgili yapılan hesaplamalarda, SN (üstyapı sayısı) aşağıda verilen (4.1) nolu formülle hesaplanmıştır (AASHTO 1986)

$$\text{Log}W_{8,2t} = Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \frac{\log[\Delta PSI / (4,2-1,5)]}{0,40 + [1094 / (SN+1)^{5,19}]} + 2,32 \text{Log}(M_R) - 8,07 \quad (4.1)$$

Burada;

$W_{8,2t}$  : 8,2 ton tek dingil yükünün üstyapının son servis yeteneğine düşmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı,

$M_R$  : Taban zemini esneklik modülü (psi),

$S_0$  : Standart sapma,

$Z_R$  : Güvenilirliğin yüzdesine bağlı olarak tespit edilen standart normal sapma değeri,

SN : Üstyapı sayısı,

$\Delta PSI$  : Servis kabiliyeti indeksi,

Esnek kaplamalarla ilgili yapılan hesaplamalarda kullanılan ortak değerler Çizelge 4.16'da verilmiştir.

**Çizelge 4.16.** Esnek Kaplama Hesaplamalarında Kullanılan Ortak Sayısal Değerler

Sayısal Değer İsimleri	Seçilen Değer
Eşdeğer standart dingil yükü tekerrür sayısı, $T_{80}$	15.000.000
Standart sapma, $S_0$	0.60
Servis kabiliyeti indeksi, $\Delta PSI$	2.20
Bölge faktörü, $R_E$	0.999
Standart normal sapma değeri, $Z_R$	-3.090

Ayrıca esnek üstyapılarda ki Esneklik Modülü ( $M_R$ ) ise aşağıda verilen (4.2) nolu bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$M_R = 1500 \times \text{CBR} \quad (4.2)$$

Çalışmada, rijit kaplamalarla ilgili yapılan hesaplamalarda, D (üstyapı kalınlığı) aşağıda verilen (4.3) nolu formülle hesaplanmıştır (AASHTO 1986)

$$\begin{aligned} \log_{10} W_{8,2} = & Z_R \times S_0 + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}[\Delta PSI / (4.5 - 1.5)]}{1 + [1.624 \times 10^7 / (D+1)^{8.46}]} \\ & + (4.22 - 0.32 \times P_t) \times \frac{\log_{10} S'_c \times C_d \times [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 \times J \times [D^{0.75} - [18.42 / (E_c / k)^{0.25}]]} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Burada;

$W_{8,2}$  : 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı

$Z_R$  : Standart normal sapma

$S_0$  : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası

$D$  : Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı (inç)

$\Delta PSI$  :  $P_0 - P_t$  (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)

$P_0$  : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi

$P_t$  : Nihai servis kabiliyeti indeksi

$S'_c$  : Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (psi)

$J$  : Yük transfer katsayısı

$C_d$  : Drenaj katsayısı

$E_c$  : Betonun elastisite modülü (psi)

$k$  : Yatak katsayısı (pci)'ni göstermektedir.

Rijit kaplamaların, hesaplamalarında kullanılan ortak değerler Çizelge 4.17'de verilmiştir.

**Çizelge 4.17.** Rijit Kaplama Hesaplamalarında Kullanılan Ortak Sayısal Değerler

Sayısal Değer İsimleri	Seçilen Değer
8.2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı, $W_{8,2}$	45.000.000
Yük transfer katsayısı, $J$	3.2
Drenaj katsayısı, $C_d$	1
Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası, $S_0$	0.35
Standart normal sapma, $Z_R$	-1.645
Betonun elastisite modülü, $E_c$	5.000.000
Servis yeteneği kaybı, $\Delta PSI$	2

Ayrıca rijit üstyapılarda ki yatak katsayısı (k) ise aşağıda verilen (4.4) nolu bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$k = M_R/19,4 \quad (4.4)$$

Esnek ve rijit kaplamalarda maliyet analizi yaparken, 2018 yılı KGM birim fiyatları baz alınmıştır. Bunun için KGM'nin tabaka cinslerine göre birim maliyetleri Çizelge 4.18'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.18.** Tabaka Çeşitlerine Göre Birim Maliyetler (Anonim, 2018b)

Poz No	Tanım	Birimi	Birim Fiyat (TL)	m <sup>2</sup> /cm Maliyeti (TL)
KGM/6405/S	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m <sup>2</sup> asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m <sup>2</sup>	9.27	1.85
KGM/6308	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m <sup>2</sup> asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m <sup>2</sup>	13.11	1.64
KGM/6212-A	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m <sup>2</sup> asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m <sup>2</sup>	18.21	1.52
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)Kaplama yoğ. = 2.4 gr/cm <sup>3</sup>	ton	37.63	0.90
KGM/6010	Elenmiş çakıllı malzeme ile alttemel yapılması (kum-çakıl alttemel)	m <sup>3</sup>	11.32	0.11

Rijit üstyapı tasarımında maliyet analizi yapılması için Çizelge 4.19'da betonun birim maliyeti verilmiştir.

**Çizelge 4.19.** Betonun Birim Maliyet Tablosu (Anonim, 2018b)

Poz No	Tanım	Birimi	Birim Fiyat (TL)	m <sup>2</sup> /cm Maliyeti (TL)
Y.16.050/05	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan, C 25/30 basınç dayanım sınıfında beton dökülmesi (beton nakli dahil)	m <sup>3</sup>	165.03	1.65

Tabaka çeşitlerine göre birim maliyet analizinde, kullanılan tabaka kalınlıkları Çizelge 4.20'de verilmiştir.

**Çizelge 4.20.** Yol Üstyapısında Kullanılacak Malzeme Cinsleri ve Tabaka Kalınlıkları

Tabaka Adı	Kullanılacak Malzeme Cinsi	Seçilen Tabaka Kalınlığı
Aşınma	Asfalt Betonu	5 cm
Binder	Asfalt Betonu	8 cm
Bitümlü Temel	Asfalt Betonu	12 cm
Granüler Temel	Plent-Miks Kırmataş	20 cm
Alttemel	Kum-Çakıl	20 cm

#### 4.5.1. Saf Killi Zemin İçin Üstyapı Tabaka Kalınlıklarının Belirlenmesi

Saf killi zeminin CBR değeri Çizelge 4.15'den, 32 olarak seçilmiştir. Buna göre saf killi zemin için  $M_R$ , (4.2) bağıntısından 48.000 olarak bulunmuştur.

Esnek kaplamalarda, SN (üstyapı sayısı) (4.1) nolu formül yardımıyla bulunmuştur. Bağıntıda Çizelge 4.16'da verilen değerler ve bulunan  $M_R$  değeri yerine konulduğunda SN değeri 7,29 bulunmuştur.

Esnek üstyapılarda ki Esneklik Modülü ( $M_R$ ), rijit üstyapılarda yatak katsayısı ( $k$ ) ile tanımlanmaktadır. Saf killi zemin için  $k$  değeri, (4.4) nolu formül yardımı ile 2475 bulunmuştur.

Rijit üstyapı kalınlığı ( $D$ ) ise (4.3) nolu bağıntı ile bulunmuştur. Bağıntıda Çizelge 4.17’de verilen değerler ve bulunan  $k$  değeri yerine konulduğunda, saf killi zemin için  $D$  değeri, yaklaşık olarak 30,475 olarak bulunmuştur.

#### **4.5.2. % 5 Sönmüş Kireç Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Kalınlığına Etkisi**

Zeminlerin öncelikle esnek üstyapı tasarımı yapılmış ve maliyete etkisi incelenmiştir. Bunun için öncelikle %5 sönmüş kireç katkıli zeminin  $M_R$  değeri hesaplanmıştır.

%5 sönmüş kireç katkıli zeminin CBR değeri ise Çizelge 4.15’den 66.7 olarak seçilmiştir. Buna göre %5 sönmüş kireç katkıli zemin için  $M_R$ , (4.2) bağıntısından 100.050 olarak bulunmuştur.

Tasarlanması istenen yolun sayısal verileri ve %5 sönmüş kireç katkıli zeminin  $M_R$  değeri formülde yerine konulduğunda, %5 sönmüş kireç katkıli zemin için SN değeri (4.1) nolu bağıntı yardımıyla 5,90 bulunmuştur.

Saf killi zemin için  $SN = 7,29$  iken %5 sönmüş kireç katkıli zemin için  $SN = 5,90$  bulunmuştur.  $M_R$  değerinin 100.050 (%5 sönmüş kireç katkıli zemin) yerine, 48.000 (saf killi zemin) alınması ile esnek üstyapı tabaka sayısında yaklaşık olarak % 23.56’lık fazla değer elde edilecektir.

%5 sönmüş kireç katkıli zemin, saf killi zemine oranla esnek üstyapının tabaka kalınlıklarını % 23.56 azaltmıştır.

%5 sönmüş kireç ilaveli zemin için  $k$  değeri, (4.4) nolu formül yardımı ile 5157 bulunmuştur.

Rijit üstyapı kalınlığı ( $D$ ) ise (4.3) nolu bağıntı ile bulunmuştur. Bağıntıda Çizelge 4.17’de verilen değerler ve bulunan  $k$  değeri yerine konulduğunda, %5 sönmüş kireç ilaveli zemin için  $D$  değeri, yaklaşık olarak 27,04 olarak bulunmuştur.

$D$  değerinin 27,04 (% 5 sönmüş kireç katkıli zemin) yerine, 30,475 (saf killi zemin) alınması rijit üstyapıda yaklaşık olarak % 13.12’lik fazla değer elde edilmiş olmaktadır.

Sonuç olarak %5 sönmüş kireç katkıli zemin, saf killi zemine oranla rijit üstyapının tabaka kalınlıklarını % 13.12 azaltmıştır.

#### **4.5.3. % 5 Sönmüş Kireç Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Maliyetine Etkisi**

Zeminlerin öncelikle esnek, daha sonra ise rijit kaplamalardaki maliyetleri incelenmiştir. Çizelge 4.20’de seçilen kalınlıklara göre analiz yapılmıştır.

Maliyet analizi yapmak için, öncelikle toplam maliyet bulunmuştur; aşınma, binder, bitümlü temel, granüler temel ve alttemel tabakasının 1 m<sup>2</sup>/cm maliyetleri toplanmıştır. Toplam maliyet Çizelge 4.18 yardımıyla (m<sup>2</sup>/cm) 6.02 TL bulunmuştur.

Esnek üstyapı tasarımında, saf killi zeminin tercih edilmesinde % 23.56’lık fazla bir değer oluşmakta ve bu durumda 1 m<sup>2</sup> üstyapı maliyetini 1.418 TL artırmaktadır. Platform genişliği 20 m olan çift şeritli bölünmüş yolda, 100 km uzunluğunda bir esnek üstyapıda  $20 \times 100000 \times 1.418 = 2.836.000$  TL maliyet artışı yaşanmaktadır.

Rijit üstyapı tasarımında maliyet analizi yapılması için Çizelge 4.19 kullanılmıştır. Aynı kriterlerde rijit üstyapı tasarımında, saf killi zeminin tercih edilmesinde % 13.12’lik fazla bir değer oluşmakta ve bu durumda 1 m<sup>2</sup> üstyapı maliyetini 0.216 TL artırmaktadır. Platform genişliği 20 m olan çift şeritli bölünmüş yolda, 100 km uzunluğunda bir rijit üstyapıda  $20 \times 100000 \times 0.216 = 432.000$  TL maliyet artışı yaşanmaktadır.

#### **4.5.4. % 10 Uçucu Kül Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Kalınlığına Etkisi**

%10 uçucu kül katkıli zeminin CBR değeri Çizelge 4.15’den 149.59 olarak seçilmiştir. Buna göre %10 uçucu kül katkıli zemin için  $M_R$ , (4.2) bağıntısından 224.385 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.16’da yer alan sayısal veriler ve  $M_R$  değeri (4.1) nolu bağıntıda yerine konulduğunda, %10 uçucu kül katkıli zeminin SN değeri 4,34 bulunmuştur.

Saf killi zemin için  $SN = 7,29$  iken %10 uçucu kül katkıli zemin için  $SN = 4,34$  bulunmuştur.  $M_R$  değerinin 224.385 (%10 uçucu kül katkıli zemin) yerine, 48.000 (saf killi zemin) alınması ile esnek üstyapı tabaka sayısında yaklaşık olarak %67.97’lik fazla değer elde edilecektir.

%10 uçucu kül katkıli zemin, saf killi zemine oranla esnek üstyapının tabaka kalınlıklarını % 67.97 azaltmıştır.

%10 uçucu kül ilaveli zemin için  $k$  değeri, (4.4) nolu formül yardımı ile 11.566,24 bulunmuştur.

Rijit üstyapı kalınlığı (D) ise (4.3) nolu bağıntı ile bulunmuştur. Bağıntıda Çizelge 4.17’de verilen değerler ve bulunan k değeri yerine konulduğunda, %10 uçucu kül ilaveli zemin için D değeri, yaklaşık olarak 22,40 olarak bulunmuştur.

Saf killi zemin için D değeri, takribi olarak 30,475 cm bulunmuştur. Aynı şekilde %10 uçucu kül katkılı zeminin D değeri ise 22,40 cm bulunmuştur.

D değerinin 22,40 (%10 uçucu kül katkılı zemin) yerine, 30,475 cm (saf killi zemin) alınması rijit üstyapıda yaklaşık olarak %36.05’ lik fazla değer elde edilmiş olmaktadır.

%10 uçucu kül katkılı zemin, saf killi zemine oranla rijit üstyapının tabaka kalınlıklarını %36.05 azaltmıştır.

#### **4.5.5. % 10 Uçucu Kül Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Maliyetine Etkisi**

Zeminlerin öncelikle esnek, daha sonra ise rijit kaplamalardaki maliyetleri incelenmiştir. Çizelge 4.20’de seçilen kalınlıklara göre analiz yapılmıştır.

Maliyet analizi yapmak için, öncelikle toplam maliyet bulunmuştur; aşınma, binder, bitümlü temel, granüler temel ve alttemel tabakasının 1 m<sup>2</sup>/cm maliyetleri toplanmıştır. Toplam maliyet Çizelge 4.18 yardımıyla (m<sup>2</sup>/cm) 6.02 TL bulunmuştur.

Esnek üstyapı tasarımında, saf killi zeminin tercih edilmesinde % 67.97’lik fazla bir değer oluşmakta ve bu durumda 1 m<sup>2</sup> üstyapı maliyetini 4.092 TL artırmaktadır. Platform genişliği 20 m olan çift şeritli bölünmüş yolda, 100 km uzunluğunda bir esnek üstyapıda  $20 \times 100000 \times 4.092 = 8.184.000$  TL maliyet artışı yaşanmaktadır.

Rijit üstyapı tasarımında maliyet analizi yapılması için Çizelge 4.19 kullanılmıştır. Aynı kriterlerde rijit üstyapı tasarımında, saf killi zeminin tercih edilmesinde % 36.05’ lik fazla bir değer oluşmakta ve bu durumda 1 m<sup>2</sup> üstyapı maliyetini 0.594 TL artırmaktadır. Platform genişliği 20 m olan çift şeritli bölünmüş yolda, 100 km uzunluğunda bir rijit üstyapıda  $20 \times 100000 \times 0.594 = 1.188.000$  TL maliyet artışı yaşanmaktadır.

#### **4.5.6. % 20 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Tabaka Kalınlığına Etkisi**

Zeminlerin öncelikle esnek üstyapı tasarımı yapılmış ve maliyete etkisi incelenmiştir. Bunun için öncelikle %20 yüksek fırın cürufu katkılı zeminin M<sub>R</sub> değeri hesaplanmıştır.

%20 yüksek fırın cürufu katkılı zeminin CBR değeri ise Çizelge 4.15'dan 416,04 olarak seçilmiştir. Buna göre %20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin için  $M_R$ , (4.2) bağıntısından 624.060 olarak bulunmuştur.

Tasarlanması istenen yolun sayısal verileri ve %20 yüksek fırın cürufu katkılı zeminin  $M_R$  değeri formülde yerine konulduğunda, %20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin için SN değeri (4.1) nolu bağıntı yardımıyla 3,26 bulunmuştur.

Saf killi zemin için  $SN = 7,29$  iken %20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin için  $SN = 3,26$  bulunmuştur.  $M_R$  değerinin 624.060 (%20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin) yerine, 48.000 (saf killi zemin) alınması ile esnek üstyapı tabaka sayısında yaklaşık olarak % 123.62'lik fazla değer elde edilecektir.

%20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin, saf killi zemine oranla esnek üstyapının tabaka kalınlıklarını % 123.62 azaltmıştır.

%20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin için k değeri, (4.4) nolu formül yardımı ile 32.168,04 bulunmuştur.

Rijit üstyapı kalınlığı (D) ise (4.3) nolu bağıntı ile bulunmuştur. Bağıntıda Çizelge 4.17'de verilen değerler ve bulunan k değeri yerine konulduğunda, %20 yüksek fırın cürufu ilaveli zemin için D değeri, yaklaşık olarak 18,49 olarak bulunmuştur.

D değerinin 18.49 cm (% 20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin) yerine, 30,475 (saf killi zemin) alınması rijit üstyapıda yaklaşık olarak % 64.82'lik fazla değer elde edilmiş olmaktadır.

Sonuç olarak %20 yüksek fırın cürufu katkılı zemin, saf killi zemine oranla rijit üstyapının tabaka kalınlıklarını % 64.82 azaltmıştır.

#### **4.5.7. % 20 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Killi Zeminin Esnek ve Rijit Üstyapı Maliyetine Etkisi**

Zeminlerin öncelikle esnek, daha sonra ise rijit kaplamalardaki maliyetleri incelenmiştir. Çizelge 4.20'de seçilen kalınlıklara göre analiz yapılmıştır.

Maliyet analizi yapmak için, öncelikle toplam maliyet bulunmuştur; aşınma, binder, bitümlü temel, granüler temel ve alttemel tabakasının 1 m<sup>2</sup>/cm maliyetleri toplanmıştır. Toplam maliyet Çizelge 4.18 yardımıyla (m<sup>2</sup>/cm) 6.02 TL bulunmuştur.

Esnek üstyapı tasarımında, saf killi zeminin tercih edilmesinde % 123.62'lik fazla bir değer oluşmakta ve bu durumda 1 m<sup>2</sup> üstyapı maliyetini 7,442 TL artırmaktadır. Platform genişliği 20 m olan çift şeritli bölünmüş yolda, 100 km uzunluğunda bir esnek üstyapıda  $20 \times 100000 \times 7,442 = 14.884.000$  TL maliyet artışı yaşanmaktadır.



Rijit üstyapı tasarımında maliyet analizi yapılması için Çizelge 4.19 kullanılmıştır. Aynı kriterlerde rijit üstyapı tasarımında, saf killi zeminin tercih edilmesinde % 64.82' lik fazla bir değer oluşmakta ve bu durumda 1 m<sup>2</sup> üstyapı maliyetini 1.069 TL arttırmaktadır. Platform genişliği 20 m olan çift şeritli bölünmüş yolda, 100 km uzunluğunda bir rijit üstyapıda  $20 \times 100000 \times 0.594 = 2.138.000$  TL maliyet artışı yaşanmaktadır.

Esnek ve rijit kaplamada, farklı katkı maddeleriyle değişen parametreler bir bütün olarak Çizelge 4.21'de verilmiştir.

**Çizelge 4.21.** Esnek ve Rijit Kaplamada Farklı Katkı Maddeleri ile Değişen Parametreler

Zemin Durumu	Esnek Kaplama		Rijit Kaplama	
	M <sub>R</sub>	SN	k	D
Saf Kil	48.000	7,29	2475	30,475
% 5 SK	100.050	5,90	5157	27,44
% 10 UK	224.385	4,34	11.566,24	22,40
% 20 YFC	624.060	3,26	32.168,04	18,49

Çizelge 4.21 incelendiğinde, M<sub>R</sub> değeri arttıkça, SN değeri azalmıştır. Aynı şekilde k değeri arttıkça, D değeri azalmıştır.

Katkısız saf killi zemine ilave edilen katkı maddeleri etkisiyle, platform genişliği 20 m olan çift şeritli bölünmüş yolda ve 100 km uzunluğundaki esnek ve rijit kaplamaların, maliyetinde meydana gelen değişimler bir bütün olarak Çizelge 4.22'de verilmiştir. Çizelge 4.22 incelendiğinde, katkısız saf killi zemine ilave edilen katkı maddeleri, hem esnek hemde rijit kaplamanın maliyetini ciddi oranda düşürmüştür.

**Çizelge 4.22.** Farklı Katkı Maddelerinin Maliyet Üzerindeki Etkileri

Zemin Durumu	Esnek Kaplama Maliyetinde Meydana Gelen Azalma	Rijit Kaplama Maliyetinde Meydana Gelen Azalma
% 5 SK	2.836.000 TL	432.000 TL
% 10 UK	8.184.000 TL	1.188.000 TL
% 20 YFC	14.884.000 TL	2.138.000 TL

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çeşitli katkı maddelerinin, killi bir yol taban zemininin taşıma gücüne ve yol üstyapısına etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. 7 ve 28 günlük kür sürecinin tamamlanmasının ardından yapılan serbest basınç deneylerinden, %5 kireç ilavesi ile oluşturulan ilavesiz saf killi zeminin en yüksek serbest basınç dayanımına ( $q_u$ ) sahip olduğu görülmektedir. 7 günlük kürün sonucunda %5 sönmüş kireç ilavesi, ilavesiz saf killi zeminin serbest basınç dayanımını 1.81 kat yükseltmiştir. 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından %5 kireç ilavesi, saf kilin serbest basınç dayanımını 3.02 kat yükseltmiştir. Ayrıca, ilavesiz saf killi zeminin de 28 günlük kür sürecinin sonrasında mukavemetinin biraz yükseldiği gözlemlenmiştir. 7 günlük kür süresinin ardından %5 kireç ilaveli zemin, ilavesiz saf killi zeminin CBR oranını 1.37 kat yükseltmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından %5 kireç ilaveli zemin, ilavesiz saf killi zeminin CBR oranını 2.08 kat yükseltmiştir.

2. 7 günlük kür süresinin ardından YFC'nun su ilaveli deney numunelerinden %10 katkılı zemin, saf killi zeminin serbest basınç dayanımını en fazla artıran oran olmuştur. Deney numuneleri 28 günlük kür sonrasında da aynı şekilde devam etmiş ve %10 oranındaki numuneler, saf killi zeminin serbest basınç dayanımını en fazla arttıran oran olmuştur. Beklenen performans sağlanmadığı için su ilaveli zeminlere CBR deneyleri yapılmamıştır.

3. Saf killi zeminin en yüksek serbest basınç dayanımını YFC katkılı zeminler arasında %20 oranındaki solisyonlu YFC vermiştir. %20 solisyonlu YFC katkılı saf killi zeminin 7 günlük CBR değeri %222.9 seçilmiştir. Bu katkı saf killi zeminin CBR değerini 7 günlük kür sonrasında yaklaşık 7.14 gibi bir oranda yükseltmiştir. 28 günlük % 20 YFC katkısının CBR değeri 416.04 seçilmiştir. 28 günlük saf killi zeminin CBR değerini, takribi olarak 13 kat artırmıştır.

4. Uçucu Kül katkısı kullanılarak yapılan deneylerde, saf killi zemine uçucu kül ve su ilave edilerek yapılan deneyler beklenen performansı vermemiştir ve CBR deneyleri uygulanmamıştır. Fakat saf killi zeminin serbest basınç dayanımını artıran en iyi oran %5 olmuştur. 7 ve 28 günlük kür sonunda bu oran değişmemiştir.

5. Saf killi zeminin en yüksek serbest basınç dayanımını %10 soliyonlu UK vermiştir. 7 günlük solisyonlu UK' ün CBR değeri %131.23 seçilmiştir. Buda saf killi zeminin 7 günlük kür sonrası, CBR değerinde yaklaşık 4.21 'lik bir artış sağlandığını göstermektedir. 28 günlük %10 solisyonlu UK için CBR değeri %149,59 seçilmiştir. 28 günlük kür sonrası saf kilin CBR değeri yaklaşık 4.67 kat artış göstermiştir.

6. Silis dumanı, kullanılan saf killi zeminde iyileştirici bir özellik göstermemiştir. UCS deneylerinde farklı katkı oranlarında, farklı kür zamanlarında çok az bir artış gösterse de genel anlamda bakıldığında silis dumanı karakterli bir davranış sergileyememiştir. Yapılan CBR değerlerinde görülüyor ki; saf killi zeminin dayanımını düşürmüştür. Bundan dolayı kullanılan killi zemin için iyileştirici özellik sağlayan bir katkı maddesi olarak kabul görmemiştir.

7. Yapılan deneyler sonucunda platform genişliği 20m olan ve 100 km uzunluğundaki çift şeritli bölünmüş yolda sırasıyla %5 sönmüş kireç, %10 uçucu kül, %20 yüksek fırın cürufu katkısının kullanılması durumunda, esnek üstyapı kalınlıkları sırasıyla %23.56, %67.97, %123.62, rijit üstyapı kalınlıkları sırasıyla %13.12, %36.05, %64.82 azalmıştır. Maliyet bakımından ise bu katkıların sırasıyla kullanılması durumunda esnek üstyapıda sırasıyla 2.836.000 TL, 8.184.000 TL, 14.884.000 TL, rijit üstyapıda ise sırasıyla 432.000 TL, 1.188.000 TL, 2.138.000 TL azalma görülmüştür.

Bu katkı maddelerinin kullanılması durumunda yol taban zemininin mukavemeti ciddi oranda artmıştır. Aynı zamanda yol üstyapı sayısı azalmış ve yol maliyeti düşmüştür. Bu sebeple bu katkı maddelerinin kullanılmasının ülkemiz ekonomisine faydalı olacağı düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKÇA

- Al N. (2018). *Zemin iyileştirme teknikleri bir uygulama örneği*. Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- AASHTO. (1972). *Guide for Design of Pavement Structures.*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. (1986). *Guide for Design of Pavement Structures.*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Ağar, E. ve Umar, F. (1985). *Yol üstyapısı*. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, Türkiye, 236 s.
- Ağar, E. ve Umar, F. (1991). *Yol Üstyapısı*. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, Türkiye, 339 s.
- Ağar, E., Süttaş, I., Öztaş, G. (1998). *Beton Yollar*. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İzmir, Türkiye.
- Anonymous. (2010a). <https://moviter.pt/en/l/industrial-brands/streumaster-sw-10-tc/> (on-line access on 26 Feb, 2019).
- Anonymous. (2010b). <https://www.sanalsantiye.com/bitumlu-baglayicilara-uygulanan-deneyle/> (on-line access on 27 Jan, 2019).
- Anonymous.(2011).<https://www.coursehero.com/file/17405392/rolatif-sikilik/>(on-line access on 21 Sep, 2019).
- Anonymous. (2018a). <http://www.kursadozcan.com> (on-line access on 28 Sep, 2018).
- Anonymous. (2018b). <http://www.birimfiyat.com.tr> (on line access on 13 Jan, 2019).
- Anonymous. (2018c). <http://www.insaathaberleri.net> (on-line access on 17 Feb, 2018).
- Anonymous.(2018d). <http://www.sathikaplama.com> (on-line access on 20 Feb, 2018).
- Anonymous. (2019a). <http://www.asmud.org.tr> (on-line access on 13 Feb, 2019).
- Anonymous. (2019b). <http://www.cemend.org.tr> (on line access on 15 Sep, 2019).
- Anonymous. (2019c). <http://www.imo.org.tr> (on line access on 10 Jan, 2019).
- Anonymous. (2019d). <http://www.kirec.org/tr> (on-line access on 12 Feb, 2019).
- Bağrıaçık, B. (2017). Ulaşım yapıları temel/alt temel zeminlerinin kireçle stabilizasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. **32** (1), 39-48.
- Bilgen, G., Kavak, A., Çapar, Ö. F. (2012). Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile etkileşiminin araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, **2** (2), 30-38.

- Cilason, N. (1964). *Toprak Stabilizasyonu*. Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, Türkiye, 111 s.
- Coruk, Ö. (2017). Demiryollarında zemin iyileştirilmesinde novocrete® uygulamaları. *Demiryolu Mühendisliği Derneği Dergisi*, **1** (6), 73-78.
- Çalışıcı, M., Koç, E., Cansız, Ö. F. (2017). Katyonik asfalt emülsiyon stabilizasyonlu zeminin esnek üstyapı tabaka kalınlığına etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **32** (2), 231-237.
- Çetin A. Y. (2011). *Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu*. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Das, B. (2007). *Principles of Foundation Engineering*, Thomson Learning, Wisconsin, USA, 750 p.
- Demiröz A. (2009). *Zemin iyileştirme metodları*. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Dündar G. (1998). *Esnek üstyapı tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Edis E. (2007). *Asfalt ve beton kaplamalı yolların maliyet yönünden karşılaştırılması*. Yüksek lisans tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya.
- Giriş Ü. (2007). *Esnek üstyapılar ile rijit üstyapıların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması*. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Harrison, D. M. (2000). *The Grouting Handbook*. Gulf Professional Publishing, Houston, Texas, USA, 182 p.
- Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi, (2006). T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Karayolları Teknik Şartnamesi, (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Karpuzcu M. (2001). *Zeminlerin stabilizasyonunda geotekstil*. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Kök E. (2008). *Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kumbasar, V. ve Kip, F., (1984). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği*. Çağlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 350 s.
- Little, D. N. (1995). *Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*. The National Lime Association, Kendall/Hunt Publishing, Dubuque, Iowa, USA, 244 p.
- Manual Of Instructions, Part 8: Materials, (1966). Utah State Department Of Highways.
- Mesut, T.A.Ş., Fidan, D., Yılmaz, F. (2018). Uçucu kül ve Bayburt taşı ile zemin stabilizasyonu. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. **1** (1), 8-14.

- Okyay, U. S., Dias, D., (2010). Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform. *Engineering Geology*, **114** (1-2), 34-44.
- Öntürk K. (2011). *Zemin iyileştirmesinde polisaj, kireç ve uçucu küllerin kullanımı*. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Öztürk, Y. Z., Ünsal, N., Akbaş, S. O., (2015). Gölbaşı (Ankara) yerleşim alanını killerin şişme ve kireç ile iyileştirilme potansiyellerinin belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **30** (2), 309-318.
- Özen G. (2018). *Yapılarda uygulanan zemin iyileştirme ve geoteknik çalışmaların değerlendirilmesi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul.
- Öztürk T. (2006). *AASHTO 1986 Esnek yol üstyapıları projelendirme yönteminin bulanık mantık tekniği ile modellenmesi*. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Soğancı, A. S., Yıldız, M. (2011). Tekrarlı donma ve çözülmenin kireç ile stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi, *Selçuk-Teknik Dergisi*, **10** (3), 259-270.
- Sağlamer A. (2006). *Zemin iyileştirme yöntemleri*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Şenol, A., Edil, T. B., Acosta, H. A., Benson., C. H. (2003). Soft subgrades stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*. **46**, 365-376.
- Taşdemir, Y., Açar, E. (2002). Silindir ile sıkıştırılabilen beton yollar. *Hazır Beton Dergisi*. **9**, 51.
- Tatlı B. (2004). *Esnek ve rijit üstyapıların performans maliyetlerinin karşılaştırılması*. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Tunç, A. (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 840 s.
- Toprak B. (2005). *Zemin iyileştirme yöntemleri ve yer altı su seviyesinin düşürülmesinde well-point metodunun Kırıkkale ilinde uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi*. Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Türköz, M. (2006). Şişen killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik killere uygulanması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*. **19** (2), 75-88.
- TS 1900-1 (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini*. TSE, Ankara.
- TS 1900-2 (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini*. TSE, Ankara.
- Yoder, E., J., Witczak, M., W. (1975). *Principles of Pavement Design*, John Wiley&Sons, New York.

- Wang, L., Masad, E. (2007). Analysis of asphalt pavement materials and systems: emerging methods: *Proceedings of the Symposium on the Mechanics of Flexible Pavements*. Boulder, Colorado, USA.
- Welsh, J.P., (1986). Construction considerations for ground modification projects. *International Conference on Proceedings conference on Deep Foundations*, Beijing, China.
- Van Til, C. J. (1972). *Evaluation of AASHO interim guides for design of pavement structures*. Highway Research Board, Washington, USA, 111 p.
- Whiteoak, D. (2004). *Shell Bitüm Elkitabı*. İsfalt Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 334 s.
- Wright, P., Paquette, R. (1987). *Highway Engineering Fifty Edititon*. Wiley, Hoboken, USA, 736 p.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Ekrem Serdar YILDIRAN

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Malatya - (18.09.1992)

**E Posta:** [serdaryildiran44@gmail.com](mailto:serdaryildiran44@gmail.com)

**Adres:** Battalgazi / MALATYA

**Lisans:** İnönü Üniversitesi - 2014

### **Mesleki Deneyim:**

2014-2015 : Yeni Malatya Emniyet Müdürlüğü / Saha Mühendisi

2015 - : Togi Metal İnş. San. Tic. Ltd. Şti. / İdari Amir-Proje Sorumlusu

### **Yayın Listesi:**

Geçkil T., Tanyıldızı M.M., Yıldiran E.S. (2019). Kireç ile Güçlendirilmiş Killi Bir Zeminin, Rijit ve Esnek Üstyapıların Kalınlıklarına ve Maliyetlerine Etkisi (368-376), III. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi, 27-29 Haziran, Nevşehir.

Geçkil T., Tanyıldızı M.M., Yıldiran E.S. (2019). Uçucu Kül İle Dayanımı Artırılmış Killi Bir Zeminin Yol Üstyapısına Etkileri (407-413), I. Uluslararası Bilim ve İnovasyon Kongresi, 26-29 Ağustos, Denizli.