

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

**ZEMİN STABİLİZASYONUNUN KARAYOLU
ÜSTYAPI KALINLIĞINA VE MALİYETİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge Nur ÇETKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

OCAK-2022

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

**ZEMİN STABİLİZASYONUNUN KARAYOLU
ÜSTYAPI KALINLIĞINA VE MALİYETİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özge Nur ÇETKİN
36193621029**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Talha SARICI**

OCAK-2022

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ZEMİN STABİLİZASYONUNUN KARAYOLU
ÜSTYAPI KALINLIĞINA VE MALİYETİNE ETKİSİ

Tezi Hazırlayan: Özge Nur ÇETKİN
Yüksek Lisans Tezi

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

Eş Danışman : **Dr. Öğr. Üyesi Talha SARICI**
İnönü Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Baha Vural KÖK**
Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR
İnönü Üniversitesi

O N A Y

Bu tez, İnönü Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve 20.../..... sayılı Kararıyla da uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Kazım TÜRK
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren, her daim yanımda olan, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum kıymetli ve saygıdeğer danışman hocam sayın Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e ve eş danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Talha SARICI'ya teşekkür eder, minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, çalışmalarımda yardım ve desteklerini esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Ceren Beyza İNCE'ye ve İnş. Yük. Müh. Bahadır KARABAŞ'a teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi yüksek lisans eğitimimde de her an yanımda olan, beni destekleyen ve evlatları olmaktan gurur duyduğum başta kıymetli annem Kamile ÇETKİN ve kıymetli babam Rasim ÇETKİN olmak üzere tüm aileme teşekkür eder, sevgilerimi ve şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FYL-2021-2800 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Zemin Stabilizasyonunun Karayolu Üstyapı Kalınlığına ve Maliyetine Etkisi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Özge Nur ÇETKİN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	ii
ONUR SÖZÜ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Önemi ve Amacı.....	2
2. ZEMİNLER VE ZEMİN STABİLİZASYONU	4
2.1 Zeminlerin Oluşumu.....	4
2.2 Zeminlerin Mühendislik Özellikleri	5
2.2.1 Zeminlerin tane boyutu ve dağılımı	5
2.2.2 Zeminlerin tane şekli	5
2.2.3 Zemin kıvam limitleri.....	5
2.3 Zeminlere Uygulanan Deneyler	6
2.4 Zemin Grupları	6
2.5 Zemin Sınıflandırma Sistemleri	6
2.6 Zemin Stabilizasyonu	9
2.6.1 Kompaksiyon yöntemi.....	13
2.6.2 Drenaj	15
2.6.3 Mekanik stabilizasyon	15
2.6.4 Katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonu.....	16
2.6.4.1 Kireç ile zemin stabilizasyonu.....	16
2.6.4.2 Çimento ile zemin stabilizasyonu.....	17
2.6.4.3 Bitüm ile zemin stabilizasyonu.....	18
2.6.4.4 Endüstriyel atıklar ile zemin stabilizasyonu.....	18
2.6.4.5 Geopolimer ile zemin stabilizasyonu	19
3. KARAYOLU YAPISI	21
3.1 Esnek Üstyapı	21
3.1.1 Taban zemini	23
3.1.2 Alttemel tabakası	24
3.1.3 Temel tabakası	24
3.1.4 Bitümlü temel tabakası	25
3.1.5 Binder tabakası	25
3.1.6 Aşınma tabakası.....	25
3.1.7 Karayolu esnek üstyapı tasarımı.....	25
3.2 Rijit Üstyapı.....	26
3.2.1 Taban zemini	27
3.2.2 Kaplama altı tabakası.....	27
3.2.3 Beton kaplama	27
3.2.4 Karayolu rijit üstyapı tasarımı	27
3.3 Kompozit kaplamalar	27
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	28
5. MATERYAL VE METOT	40
5.1 Materyal.....	40
5.1.1 Zemin ve özellikleri.....	40

5.1.2 Silis dumanı (SD) ve özellikleri	41
5.1.3 Kazan altı külü (KAK) ve özellikleri	42
5.1.4 Alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ).....	43
5.2 Metot.....	44
5.2.1 Elek analizi ve hidrometre deneyi	45
5.2.2 Piknometre deneyi	46
5.2.3 Kıvam limit (Atterberg) deneyleri.....	47
5.2.3.1 Likit limit deneyi	47
5.2.3.2 Plastik limit deneyi	47
5.2.4 Su içeriği tayini.....	48
5.2.5 Zemin sınıflandırma sistemi	48
5.2.6 Standart proktor deneyi	49
5.2.7 Serbest basınç deneyi	50
5.2.8 Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi.....	52
5.3 Yol Üstyapı Tasarımı	53
5.3.1 Esnek üstyapı tasarımı	54
5.3.1.1 Üstyapı proje süresi (performans periyodu)	55
5.3.1.2 Trafığın değerlendirilmesi	56
5.3.1.3 Güvenirlilik.....	57
5.3.1.4 Servis kabiliyeti	57
5.3.1.5 Esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının kontrolü	58
5.3.2 Rijit üstyapı tasarımı.....	59
5.3.2.1 Servis yeteneği.....	61
5.3.2.2 Performans periyodu	61
5.3.2.3 Güvenirlilik.....	61
5.3.2.4 Trafığın değerlendirilmesi	62
6. ARAŞTIRMA BULGULARI	64
6.1 Laboratuvar Deneyleri.....	64
6.1.1 Elek analizi ve hidrometre deneyi	64
6.1.2 Kıvam deneyleri	65
6.1.3 Zemin sınıflandırması.....	66
6.1.4 Standart proktor deneylerine ait bulgular	66
6.1.4.1 SD katkılı numunelere ait bulgular.....	66
6.1.4.2 AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelere ait bulgular.....	67
6.1.4.3 KAK katkılı numunelere ait bulgular	69
6.1.4.4 AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelere ait bulgular	70
6.1.5 Serbest basınç deney bulguları	71
6.1.5.1 SD katkılı numunelerin serbest basınç deneyine ait bulgular.....	71
6.1.5.2 AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin serbest basınç deneylerine ait bulgular.....	74
6.1.5.3 KAK katkılı numunelerin serbest basınç deneylerine ait bulgular.....	77
6.1.5.4 AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin serbest basınç deneylerine ait bulgular.....	80
6.1.5.5 Serbest basınç deneylerinin kendi içinde kıyaslanması.....	83
6.1.6 CBR deney bulguları	84
6.1.6.1 SD katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular.....	85
6.1.6.2 AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular.....	87
6.1.6.3 KAK katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular	90
6.1.6.4 AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular ..	92
6.1.6.5 CBR Deneylerinin Kendi İçinde Kıyaslanması.....	95

6.2 Yol Üstyapı Tasarımı ve Maliyet Analizi	98
6.2.1 Esnek yol üstyapı tasarımı ve maliyet analizi	98
6.2.1.1 Saf zemin için tabaka kalınlıkları hesabı ve maliyet analizi	99
6.2.1.2 %25 SD katkılı zemin için tabaka kalınlıkları hesabı ve maliyet analizi ..	102
6.2.1.3 AAÇ eklenmiş %25 SD katkılı zemin için tabaka kalınlıklarının hesabı ve maliyet analizi.....	103
6.2.1.4 %15 KAK katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının hesabı ve maliyet analizi.....	104
6.2.1.5 %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının hesabı ve maliyet analizi.....	105
6.2.1.6 Saf ve katkılı zeminlerin tabaka kalınlıkları ve maliyetlerinin kıyaslanması	107
6.2.2 Rijit yol üstyapı tasarımı ve maliyet analizi	108
6.2.2.1 Saf zemin için rijit üstyapı tabaka kalınlığı ve maliyet analizi.....	109
6.2.2.2 %25 SD katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı ve maliyet analizi	110
6.2.2.3 %25 SD+AAÇ katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığının hesaplanması ve maliyet analizi	110
6.2.2.4 %15 KAK katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığının belirlenmesi ve maliyet analizi	111
6.2.2.5 %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığının hesaplanması ve maliyet analizi	112
6.2.2.6 Saf ve katkılı zeminlerin rijit yol üstyapı hesaplarının ve maliyetinin kıyaslanması	113
7. SONUÇLAR.....	115
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ	124

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Zeminlere uygulanan bazı deneyler ve amaçları.....	6
Çizelge 2.2: Farklı Zemin Çeşitleri için Stabilizasyon Yöntemleri	11
Çizelge 2.3: Stabilizasyon yöntemlerinin kullanım amaçları	12
Çizelge 5.1: Zemin Özellikleri.....	41
Çizelge 5.2: Silis Dumanı (SD) özellikleri.....	42
Çizelge 5.3: KAK elementel özellikleri.....	43
Çizelge 5.4: Sodyum hidroksit (NaOH) özellikleri	44
Çizelge 5.5: Taşıt eşdeğerlik faktörü	56
Çizelge 5.6: Şerit dağıtma faktörü	57
Çizelge 5.7: Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri	57
Çizelge 5.8: Son servis kabiliyetinin seçimi	57
Çizelge 5.9: Esnek üstyapı için tabaka katsayıları	58
Çizelge 5.10: AASHTO 1993 minimum asfalt kaplama ve temel kalınlıkları.....	59
Çizelge 5.11: Son servis yeteneği değerleri	61
Çizelge 5.12: AASHTO tasarım rehberinde önerilen analiz periyotları.	61
Çizelge 5.13: AASHTO 1993'e göre önerilen güvenilirlik seviyesi.	62
Çizelge 5.14: Taşıt eşdeğerlik faktörü.....	62
Çizelge 5.15 Şerit dağıtma faktörü.....	63
Çizelge 6.1: Elek analizi verileri.....	65
Çizelge 6.2: SD ilaveli numunelerin standart proktor deney sonuçları.	67
Çizelge 6.3: SD ve AAÇ ilaveli numunelerin standart proktor deney sonuçları.	68
Çizelge 6.4: KAK katkılı numunelerin standart proktor deney sonuçları.....	69
Çizelge 6.5: KAK ve AAÇ katkılı numunelerin standart proktor deney sonuçları.	70
Çizelge 6.6: SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (1 günlük).....	72
Çizelge 6.7: SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (7 günlük).....	72
Çizelge 6.8: SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (28 günlük).....	73
Çizelge 6.9: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (1 günlük).....	75
Çizelge 6.10: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (7 günlük).....	75
Çizelge 6.11: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (28 günlük).....	76
Çizelge 6.12: KAK katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (1 günlük).	78
Çizelge 6.13: KAK katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (7 günlük).	78
Çizelge 6.14: KAK katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (28 günlük).	79
Çizelge 6.15: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (1 Günlük).	80
Çizelge 6.16: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (7 günlük).	81
Çizelge 6.17: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (28 günlük).	82
Çizelge 6.18: Serbest basınç değerlerinin BCR değerleri.	83
Çizelge 6.19: SD katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).	85
Çizelge 6.20: SD katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).	86
Çizelge 6.21: SD katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).	87
Çizelge 6.22: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).	88
Çizelge 6.23: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).	89
Çizelge 6.24: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).	89
Çizelge 6.25: KAK katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).	90
Çizelge 6.26: KAK katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).	91
Çizelge 6.27: KAK katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).	91
Çizelge 6.28: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).....	93
Çizelge 6.29: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).....	93
Çizelge 6.30: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).....	94

Çizelge 6.31: CBR değerleri için hesaplanan BCR değerleri.	97
Çizelge 6.32: CBR deneylerinden elde edilen en yüksek CBR değerleri.	98
Çizelge 6.33: Esnek yol tasarımında kullanılan parametreler.	99
Çizelge 6.34: Saf zemin için seçilen esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.	100
Çizelge 6.35: Saf zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri.	101
Çizelge 6.36: %25 SD katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.	102
Çizelge 6.37: %25 SD katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri.	102
Çizelge 6.38: %25 SD+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.	103
Çizelge 6.39: %25 SD+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyeti.	103
Çizelge 6.40: %15 KAK katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.	104
Çizelge 6.41: %15 KAK katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyeti.	105
Çizelge 6.42: %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.	106
Çizelge 6.43: %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyeti.	106
Çizelge 6.44: Saf ve katkılı zeminler için esnek yol tabaka kalınlıkları ve birim maliyetleri.	107
Çizelge 6.45: Rijit üstyapı hesabında kullanılan parametreler [100].	108
Çizelge 6.46: Saf zemin için rijit yol üstyapı plak kalınlığı birim maliyeti.	109
Çizelge 6.47: %25 SD katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti... ..	110
Çizelge 6.48: %25 SD+AAÇ katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti.	111
Çizelge 6.49: %15 KAK katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti.	112
Çizelge 6.50: %15 KAK+AAÇ katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti.	113
Çizelge 6.51: Saf ve katkılı zeminler için plak kalınlığı ve birim maliyetleri.	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Zeminlerin oluşum döngüsü	4
Şekil 2.2: AASHTO zemin sınıflandırma şeması	7
Şekil 2.3: Plastisite kartı.....	8
Şekil 2.4: USCS akış şeması	9
Şekil 2.5: Zemin stabilizasyon yöntemleri.....	11
Şekil 2.6: Kompaksiyon öncesi ve sonrası.....	13
Şekil 2.7: Yüzeysel kompaksiyonda kullanılan sıkıştırma makineleri	14
Şekil 2.8: Dinamik kompaksiyonun saha uygulaması	15
Şekil 2.9: Kireç ile zemin stabilizasyonu	17
Şekil 2.10: Çimento ile zemin stabilizasyonu	18
Şekil 2.11: Geopolimerizasyon aşamaları.....	19
Şekil 3.1: Esnek üstyapı enkesiti.....	22
Şekil 3.2: BSK saha uygulaması	22
Şekil 3.3: Yüzeysel kaplama saha uygulaması	23
Şekil 3.4: Beton yol enkesiti	26
Şekil 3.5: Kaplamalara göre yük dağılımı.....	26
Şekil 5.1: Zemin örneği.....	40
Şekil 5.2: Zemin temin edilen bölge	41
Şekil 5.3: Silis dumanı.	42
Şekil 5.4: Kazan altı külü.	43
Şekil 5.5: AAÇ'nin hazırlanma aşaması.	44
Şekil 5.6: Etüv, elek seti ve sarsma tablası.	45
Şekil 5.7: Hidrometre deneyi.	46
Şekil 5.8: Piknometre deneyi.	46
Şekil 5.9: Casagrande deney seti.....	47
Şekil 5.10: Sıkıştırılmış zemin γ_k -w ilişkisi.....	49
Şekil 5.11: Standart proktor deney aşamaları.	50
Şekil 5.12: Serbest basınç deney kalıbı ve deney aşamaları.	51
Şekil 5.13: Serbest basınç deney seti.	51
Şekil 5.14: Serbest basınç deney numunelerinin deney sonrası görüntüsü.....	52
Şekil 5.15: CBR deney aşamaları.	52
Şekil 5.16: CBR deney seti.	53
Şekil 5.17: Tipik yol enkesiti ve elemanları.....	54
Şekil 5.18: Esnek ve rijit üstyapı	54
Şekil 5.19: Esnek üstyapı kesit görünümü	55
Şekil 5.20: Esnek üstyapı sayıları	59
Şekil 5.21: Rijit üstyapı enkesiti	60
Şekil 6.1: Zemin granülometri eğrisi.	65
Şekil 6.2: Likit limit-darbe sayısı grafiği.	66
Şekil 6.3: SD katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.....	67
Şekil 6.4: SD ve AAÇ katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.....	68
Şekil 6.5: KAK katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.	69
Şekil 6.6: KAK ve AAÇ katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.....	70
Şekil 6.7: SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (1 günlük).	71
Şekil 6.8: SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (7 günlük).	72
Şekil 6.9: SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (28 günlük).	73
Şekil 6.10: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (1 günlük).	74
Şekil 6.11: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (7 günlük).	75

Şekil 6.12: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q-ε grafiği (28 günlük).	76
Şekil 6.13: KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (1 günlük).	77
Şekil 6.14: KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (7 günlük).	78
Şekil 6.15: KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (28 günlük).	79
Şekil 6.16: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (1 günlük).	80
Şekil 6.17: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (7 günlük).	81
Şekil 6.18: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (28 günlük).	82
Şekil 6.19: Serbest basınç BCR değerlerinin kür süresi ile değişimi.	84
Şekil 6.20: SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).	85
Şekil 6.21: SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).	86
Şekil 6.22: SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).	86
Şekil 6.23: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).	88
Şekil 6.24: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).	88
Şekil 6.25: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).	89
Şekil 6.26: KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).	90
Şekil 6.27: KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).	91
Şekil 6.28: KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).	91
Şekil 6.29: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).	92
Şekil 6.30: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).	93
Şekil 6.31: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).	94
Şekil 6.32: Saf ve SD katkılı numunelerde CBR değerinin kür süresi ile değişimi.	95
Şekil 6.33: AAÇ kullanılan saf ve SD numunelerde CBR değerinin kür süresi ile değişimi.	95
Şekil 6.34: Saf ve KAK katkılı numunelerde CBR değerlerinin kür süresi ile değişimi.	96
Şekil 6.35: AAÇ kullanılan saf ve KAK katkılı numunelerde CBR değerinin kür süresi ile değişimi.	96
Şekil 6.36: CBR için hesaplanan BCR değerlerinin kür süresi ile değişimi.	97
Şekil 6.37: Saf ve katkılı zeminler için esnek yol toplam maliyeti.	107
Şekil 6.38: Saf ve katkılı zeminler için rijit yol toplam maliyeti.	114

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

°C	: Santigrad Derece
cm	: Santimetre
cm²	: Santimetrekaire
E	: Elastisite Modülü
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
km²	: Kilometrekare
kPa	: Kilopaskal
lt	: Litre
m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metrekareküp
mm	: Milimetre
mm²	: Milimetrekare
MPa	: Megapaskal
Pa	: Paskal
AASHTO	: ABD Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Örgütleri Konfederasyonu
ASTM	: Amerika Test ve Malzeme Kurumu
AAÇ	: Alkali Aktivatör Çözeltisi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
UCS	: Tek Eksenli Serbest Basınç Testi
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
UK	: Uçucu Kül
KAK	: Kazan Altı Külü

KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
RAP	: Geri Kazanılmış Asfalt Kaplamalar
SD	: Silis Dumanı
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZEMİN STABİLİZASYONUNUN KARAYOLU ÜSTYAPI KALINLIĞINA VE MALİYETİNE ETKİSİ

Özge Nur ÇETKİN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

124+XIVsayfa

2022

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada, silis dumanı (SD) ve kazan altı külü (KAK) ile stabilize edilmiş bir zeminin karayolu üstyapı kalınlığına ve maliyetine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında SD; %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında KAK ilave edilerek su ve alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ) ile ayrı ayrı karışım numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler ilk olarak standart proktor deneyine, sonrasında 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerini takiben serbest basınç (UCS) ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneylerine tabi tutulmuştur. Serbest basınç ve CBR deney sonuçlarına göre en efektif katkı oranları %25 SD+AAÇ ve %15 KAK+AAÇ olarak belirlenmiştir. Bu oranların CBR değerleri esas alınarak AASHTO (1993) metodu ile karayolu esnek ve rijit üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmış ve maliyet analizi yapılmıştır. Saf zemine kıyasla %25 SD+AAÇ katkılı zemin için esnek ve rijit üstyapı kalınlıkları sırasıyla %38,88 ve %25 oranında azalırken yol yapım maliyetleri ise sırasıyla %21,58 ve %25 oranlarında azalmıştır. Benzer şekilde %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için esnek ve rijit üstyapı tabaka kalınlıkları sırasıyla %40,74 ve %22,5 oranında azalırken, yol yapım maliyetleri ise sırasıyla %19,74 ve %22,5 oranlarında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin, silis dumanı, kazan altı külü, zemin stabilizasyonu, yol üstyapısı, AASHTO yöntemi

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF SOIL STABILIZATION ON HIGHWAY PAVEMENT THICKNESS AND COST

Özge Nur ÇETKİN

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

124+XIV pages

2022

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study, the effects of a soil stabilized with silica fume (SF) and bottom ash (BA) on highway pavement thickness and cost were investigated. For this purpose, SF on the ground at the rates of 2.5%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% by weight; Mixture samples were prepared separately with water and alkaline activator solution (AAS) by adding 5%, 10%, 15%, 20% and 25% BA. The samples were first subjected to the standard proctor test, followed by 1, 7 and 28 day curing times, followed by unconfined pressure (UCS) and California Transport Ratio (CBR) tests. According to the unconfined pressure and CBR test results, the most effective additive ratios were determined as 25% SF+AAS and 15% BA+AAS. Based on the CBR values of these ratios, highway flexible and rigid pavement layer thicknesses were calculated using the AASHTO (1993) method and cost analysis was made. Compared to the pure soil, the flexible and rigid pavement thicknesses for the 25% SF+AAS added soil decreased by 38.88% and 25%, respectively, while the road construction costs decreased by 21.58% and 25%, respectively. Similarly, flexible and rigid pavement layer thicknesses for 15% BA+AAS added soil decreased by 40.74% and 22.5%, respectively, while road construction costs decreased by 19.74% and 22.5%, respectively.

Keywords: Soil, silica fume, bottom ash, soil stabilization, road pavement, AASHTO Method

1.GİRİŞ

Son yıllarda hızla artan nüfus, beraberinde diğer inşaat alanlarında olduğu gibi ulaşım alanında da taleplerin artmasına neden olmuştur. Bu artış ve talepler doğrultusunda daha güvenli, konforlu ve ekonomik yapıların oluşturulması hedeflenmektedir. Bu sebeplerden ötürü inşa edilecek olan yol, köprü, baraj, bina gibi yapıların sağlamlığı, kalitesi, kullanım fonksiyonları önem kazanmıştır. Bu özelliklere sahip yapıların oluşturulması, üzerine oturdukları zeminin özelliklerine bağlıdır. Yapı temeli veya malzemesi olarak kullanılan zeminler farklı özelliklere sahip olduğundan her zaman arzu edilen koşulları sağlamayabilirler. Özellikle yumuşak zeminler üzerine yapılması planlanan yol inşaatlarında, taşıma gücünün yetersiz kalması sonucu çeşitli mühendislik problemleri meydana gelmektedir. Meydana gelen bu problemleri ortadan kaldırmak için uygulanan temel çözüm, yumuşak, taşıma gücü yetersiz zemini yeterli derinliğe kadar kazıp kaldırarak yerine farklı granülometriye sahip karışımların serilip sıkıştırılmasıdır. Ancak bu durum işveren ve yüklenici açısından zaman ve maliyet sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Özellikle yol yapıları gibi yüzey alanı ve kazı hacminin büyük olduğu yapılarda bu gibi değişim işlemleri yüksek maliyet gerektirdiğinden yol mühendisleri tarafından alternatif çözüm yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Zeminden kaynaklı problemleri ortadan kaldırmak ve inşa edilen yapıyı daha güvenli ve ekonomik olarak tamamlamak için son yıllarda çeşitli katkılar ile zeminler stabilize edilerek güçlendirilmeye başlanmıştır. Bu işlemleri gerçekleştirmek amacıyla öncelikle karşılaşılan zeminlerin özellikleri tespit edildikten sonra uygun stabilizasyon yöntemi belirlenerek zeminlerin performansı artırılmaya çalışılmaktadır. Literatür incelendiğinde zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla pek çok stabilizasyon yönteminin uygulandığı görülmektedir. En çok tercih edilen ve uygulamada kullanılan stabilizasyon yöntemi zemine uçucu kül, kireç, çimento, bitüm gibi katkı maddesi ilave edilerek zemini stabilize etmektir. Özellikle son yıllarda teknolojinin ve sanayinin gelişmesiyle birlikte artan endüstriyel atıkların zemin stabilizasyonunda değerlendirilmeye çalışılması önem kazanmıştır.

Dünyada bulunan ürünlerin sınırlı oluşu, çeşitli üretimler sonucu açığa çıkan ürünlerin depolanması ve doğada atık ürün halinde bulunması insan ve çevre sağlığı açısından tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenlerle, diğer sektörlerde olduğu gibi inşaat sektöründe de atık malzemeleri geri dönüşüm ürünü haline getirip kullanmak amaçlanmaktadır. Bu şekilde atık ürünler değerlendirildiği gibi düşük maliyetli planlamalar da ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, endüstriyel atık ürünü olan silis dumanı (SD) ve kazan altı külünün (KAK) taşıma gücü zayıf olan yol taban zeminlerinin stabilizasyonunda kullanılmasının yol üstyapı kalınlık ve maliyetine olan etkileri araştırılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla çalışma yedi bölümden oluşturulmuştur.

Birinci bölümde; yapı temeli veya malzemesi olarak kullanılan zeminlerin arzu edilen mühendislik özelliklerini sağlamadığında stabilizasyon işlemine tabi tutulup mühendislik özelliklerinin iyileştirilebileceğinden bahsedilmektedir.

İkinci bölümde; zeminlerin oluşumu, indeks özellikleri, zemin sınıflandırması, zemin stabilizasyonundan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde; karayolu altyapısı ve üstyapısından bahsedilerek bunları meydana getiren tabakalar izah edilmiştir. Karayolu üstyapı tasarımı yapılırken kullanılan metotlar açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde; konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar literatür araştırması yapılarak incelenmiştir.

Beşinci bölümde; tez çalışmasında kullanılan materyaller ve izlenilen metot açıklanmıştır.

Altıncı bölümde; tez çalışması kapsamında yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Yedinci bölümde ise yapılan çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.1 Çalışmanın Önemi ve Amacı

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, zeminlerin birçok farklı yöntemle stabilize edildiği görülmektedir. Ancak bu çalışmada, taşıma gücü zayıf olan bir yol taban zemini endüstriyel atıklar kullanılarak stabilize edilmiş ve güçlendirilmiş bu zeminin karayolu üstyapısı ve maliyetine olan etkileri incelenerek, literatüre yeni bir bakış açısı kazandırılmaya çalışılmıştır.

Çalışmada, taban zemini, silis dumanı, kazan altı külü ve kullanılan bu katkıların etkinliğini artırmak maksadıyla alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ) kullanılarak geopolimer bir yapı elde edilmiş ve bu yapı ile zeminin güçlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Zeminin stabilize edilmesinin ardından saf ve stabilize zemin verileri esas alınarak karayolu üstyapısı tabaka kalınlıkları ve maliyetleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde saf ve stabilize zeminler kıyaslanarak, meydana gelen değişimler değerlendirilmiştir.

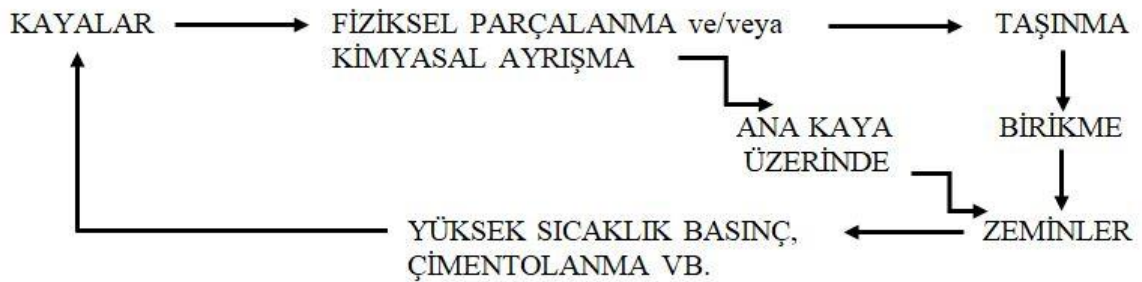
Çalışma sonucunda, karayolu üstyapı tabaka kalınlıklarında ve maliyet değerlerinde azalmalar meydana geldiğinden, güvenli ve ekonomik bir karayolu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte zemin stabilizasyonunda endüstriyel atık ürünlerin kullanımı ile atık ürünler bir nebze de olsa bertaraf edilerek, insan ve çevreye verdiği zararların bertaraf edilebileceği ve aynı zamanda ülke ekonomisine bir katkı sağlayabileceği görülmüştür.

2. ZEMİNLER VE ZEMİN STABİLİZASYONU

2.1 Zeminlerin Oluşumu

Yeryüzündeki kayaçların çeşitli fiziksel ve kimyasal koşullar altında ayrışması sonucu meydana gelen tanecikli yapı zemin olarak adlandırılmaktadır. Zeminlerin oluşum koşullarını ve özelliklerini bilmeden, onların farklı koşullarda nasıl davranış sergileyeceğini tahmin etmek mümkün değildir. Zeminlerin özelliklerini belirlemek amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak kullanılan yöntemlerin birbirini tamamlayıcı nitelikte olması gereklidir. Zeminlerin özelliklerinin belirlenmesi zemin sınıflandırması ile başlamaktadır. Ancak zeminlerin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla zeminin sınıflandırması da tek başına yeterli değildir. Bu sebeple, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin de bilinmesi gereklidir. Zeminin su muhtevası, yoğunluğu, birim hacim ağırlığı, boşluk oranı gibi fiziksel özelliklere ek olarak, kompaksiyon, konsolidasyon özelliklerinin de bilinmesi gerekir. Zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile zeminin olası yüklemeler altında nasıl davranış sergileyeceği öngörülebilir [1].

Zeminler oluşumlarına göre üç sınıfta incelenebilir. Kayaçlardan ayrılan parçacıkların oluşturduğu zeminler kalıntı zemin olarak adlandırılırken; rüzgar, su gibi çeşitli dış kuvvetlerin etkisi ile farklı bölgelere taşınıp, taşındıkları bölgede biriken zeminler taşınmış zemin olarak adlandırılmaktadır. İş makineleri yardımı ile insanlar tarafından kayaçların parçalanması sonucu oluşturulan zeminler ise yapay zemin olarak adlandırılmaktadır [2]. Şekil 2.1’de zeminlerin doğal oluşum döngüsü görülmektedir.



Şekil 2.1: Zeminlerin oluşum döngüsü [2].

2.2 Zeminlerin Mühendislik Özellikleri

Zeminler en eski ve en karmaşık mühendislik malzemelerinden biridir. Zemini gerek temel gerek yapı malzemesi olarak kullanabilmek için zeminin mühendislik özelliklerine vakıf olmak gereklidir. Ancak zeminlerin oluşum koşulları, karmaşık yapıları göz önüne alındığında zeminleri sınıflandırmak ve mühendislik özelliklerini tayin etmek oldukça güçtür. Bu sebeple ilk olarak zeminin bazı fiziksel özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Zeminlerin fiziksel özellikleri aşağıda sıralanan başlıklar halinde incelenebilir [2].

2.2.1 Zeminlerin tane boyutu ve dağılımı

Zeminleri tane boyutuna göre iri ve ince taneli olarak gruplandırmak mümkündür. 200 No'lu (0,075 mm) elek üzerinde kalan kum, çakıl gibi zeminler iri taneli zemin olarak adlandırılırken, 200 No'lu elek altında kalan kil, silt gibi tanecikler ince taneli zemin olarak adlandırılır. Zeminlerin tane boyutu ve dağılımını belirlemek için zeminlere elek analizi ve hidrometre deneyleri uygulanmaktadır. İri taneli zeminlerde elek analizi deneyi yapılırken, ince taneli zeminler hidrometre deneyine tabi tutularak zemin tane boyutu ve dağılımı belirlenerek, zemin granülometri eğrisi oluşturulmaktadır [2].

2.2.2 Zeminlerin tane şekli

Zeminler, kayaçların ayrışması sonucu meydana gelen taneciklerden oluştuğu için zemini meydana getiren her tanenin şekli ve boyutu birbirinden farklıdır. Zemin tanelerinin şekli, zeminlerin davranışını da etkilemektedir [2].

2.2.3 Zemin kıvam limitleri

Zeminler su muhtevasına bağlı olarak farklı özellikler sergilemektedirler. Zeminlerin su muhtevasına bağlı sergilediği davranışları belirlemek amacıyla zeminlere kıvam limit deneyleri uygulanmaktadır [1].

Zemin kıvam limitleri aşağıda sıralanan şekilde açıklanmaktadır.

Likit limit: Zeminlerin kendi ağırlığı altında akabildiği en düşük su muhtevasıdır.

Plastik limit: Zeminin, avuç içinde cam bir levha üzerinde çapı yaklaşık 3 mm olduğu anda kopmaların oluştuğu andaki su muhtevasıdır.

Rötre limit: Zeminin suya tam doygun olduğu en düşük su muhtevasıdır [1].

2.3 Zeminlere Uygulanan Deneyler

Zeminlere uygulanan deneyler laboratuvar ortamında ve arazide gerçekleştirilen deneyler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Çizelge 2.1’de laboratuvarda zeminlere uygulanan bazı deneyler ve deneylerin uygulanma amaçları verilmiştir.

Çizelge 2.1 Zeminlere uygulanan bazı deneyler ve amaçları [3].

Zemin Deneyleri	Uygulama Amacı
Elek analizi deneyi	İri taneli zeminleri sınıflandırmak
Kıvam limit deneyleri	Zeminin su içeriğine bağlı kıvam değişimini belirlemek
Permeabilite deneyi	Geçirimsizlik problemi olan zeminlerde su miktarı ve seviyesini tespit etmek
Kompaksiyon deneyleri	Sıkıştırılmış zeminin kuru birim hacim ağırlığı ve su içeriğini tespit etmek
Kayma mukavemeti deneyleri	Zeminin gerilme deformasyon verilerini belirlemek
Konsolidasyon deneyleri	İnce taneli zeminlerin konsolidasyon davranışını belirlemek

2.4 Zemin Grupları

Zeminler temel olarak aşağıdaki gibi üç ana grupta incelenmektedir.

İri taneli zeminler: Kum, çakıl gibi 200 No’lu (0,075 mm) elek üstünde kalan zeminler iri taneli zeminlerdir. İri taneli zeminlerde, zemin tanelerinin birbirini çekme özelliği (kohezyon) bulunmazken, içsel sürtünme açıları vardır.

İnce taneli zeminler: Kil, silt gibi 200 No’lu elek altında kalan zeminler ince taneli zeminlerdir. İnce taneli zeminlerde, zemin taneciklerinin birbirini çekme özelliği bulunmaktadır.

Organik zeminler: Humuslu zeminler gibi içinde yüksek oranda organik madde barındıran zeminlerdir. Organik zeminlerin yüksek oranda su içermesi, taşıma gücünün düşük olması ve oturma miktarlarının fazla oluşu nedeniyle bu tarz zeminler yapı temeli için kullanıma uygun değildir [1].

2.5 Zemin Sınıflandırma Sistemleri

İnşaat mühendisliği yapılarında projenin tasarlanması, tasarlanan projenin güvenli ve ekonomik olarak tamamlanması için zeminin mühendislik özelliklerine vakıf olabilmek

oldukça önemlidir. Zemin özelliklerinin belirlenmesi için ise öncelikle zemin sınıfı tayin edilmektedir.

Zemin sınıflandırılmasında kullanılan sistemler aşağıda sıralandığı gibidir.

- Tane çapına göre zemin sınıflandırma: Zemin tane çaplarına göre gerçekleştirilen bir sınıflandırma sistemidir. Zemin tanelerinin dağılım eğrisi oluşturularak zemin içinde ağırlıkça yüzdeye sahip olan grup belirlenerek sınıflandırma yapılmaktadır.
- Üçgen sınıflandırma sistemi: Üçgen sınıflandırmada, zeminin, kum, kil, silt yüzdeleri belirlenerek tane dağılım eğrisi oluşturulup yüzdeleri belirlenerek sınıflandırma gerçekleştirilir. Üçgen sınıflandırma sistemi daha çok tarımsal amaçlar için kullanılmaktadır.
- AASHTO zemin sınıflandırma sistemi: Zemin granülometri eğrisi ve kıvam limit değerleri esas alınarak yapılan bir sınıflandırma sistemidir. AASHTO zemin sınıflandırma sistemi daha çok yol yapılarında tercih edilmektedir. Şekil 2.2’de AASHTO zemin sınıflandırma şeması verilmiştir [1].

Genel Sınıflandırma		Daneli Zeminler (No.200 Elekten Geçen ≤%35)							Silt-Kil Zeminler (No.200 Elekten Geçen >%35)			
		A1		A-3	A2				A-4	A-5	A-6	A-7*
Zemin Grupları		A-1-a	A-1-b			A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7			
Dane Çapı Dağılım Özellikleri	No.10 Elekten Geçen %	≤%50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	No.40 Elekten Geçen %	≤%30	≤%50	>50	-	-	-	-	-	-	-	-
	No.200 Elekten Geçen %	≤%15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	>35	>35	>35	>35
Plastisite Özellikleri	Likit Limit (%)	-	-	-	≤40	>40	≤40	>40	≤40	>40	≤40	>40
	Plastisite İndisi (%)	≤6	≤6	N.P	≤10	≤10	>10	>10	≤10	≤10	>10	>10
Grubu Oluşturan Başlıca Zeminler		Taş parçaları çakıl ve kum		İnce kum	Siltli veya Killi çakıllar ve kumlar				Siltli Zeminler		Killi Zeminler	
Yol Altyapısı Olarak Değerlendirilmesi		Çok iyi-İyi							Orta-Kötü			

* A-7-5 için $I_p \leq (w_L - 30)$ ve A-7-6 için $I_p > (w_L - 30)$

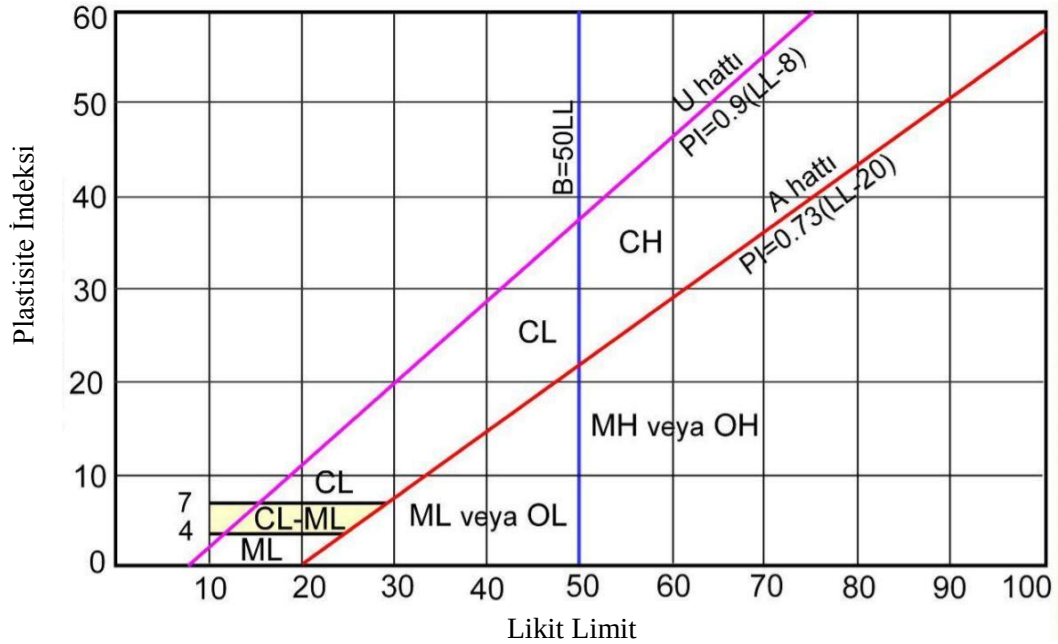
Şekil 2.2: AASHTO zemin sınıflandırma şeması [3].

AASHTO’ya göre No.200’den geçen zemin yüzdesi %35’ten büyükse zemin ince taneli, küçük ise zemin iri taneli olarak kabul edilir. Zeminler A-1’den A-7’ye kadar yedi ana gruba ayrılmıştır. Ayrıca alt gruplar da mevcuttur. Şekil 2.2’de ki şema incelendiğinde soldan sağa doğru ilerlerken uygun olan ilk sınıf, zemin sınıfı olarak kabul edilir.

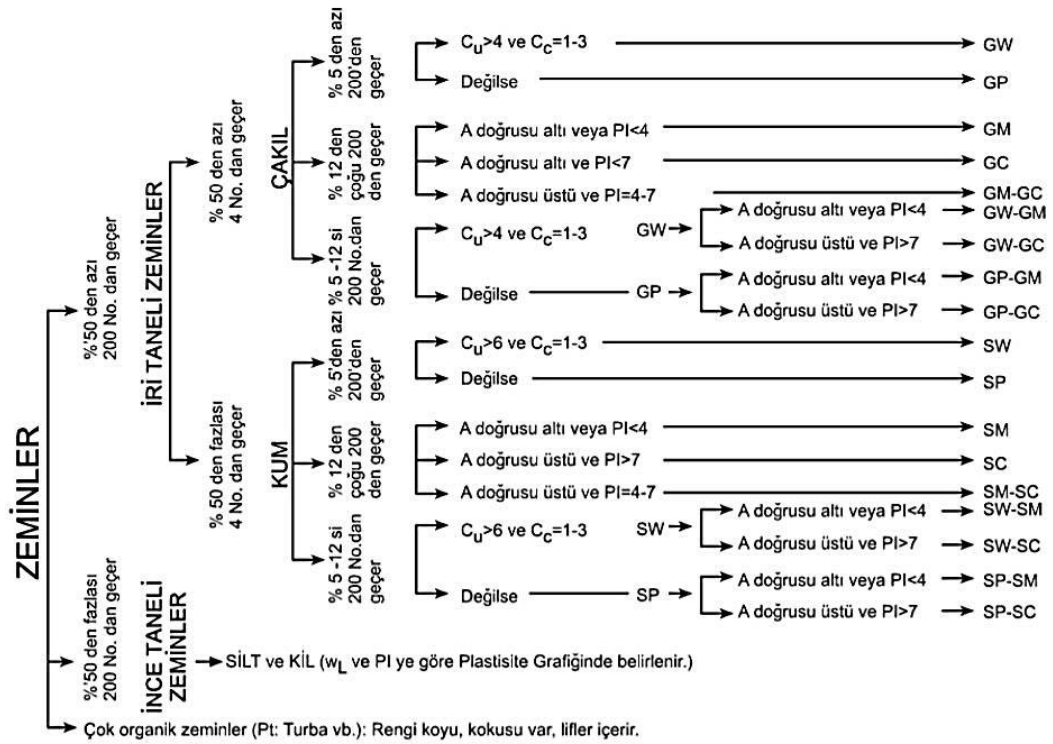
- Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS): En yaygın olarak kullanılan zemin sınıflandırma sistemidir. USCS'ye göre sınıflandırmada iri ve ince taneli zeminler olmak üzere iki ana grup vardır. Tane boyutuna göre ayırım ise 200 No'lu elekten geçen malzeme yüzdesi esas alınarak yapılmaktadır. 200 No'lu elekten geçen malzeme yüzdesi %50'den az ise iri taneli zemin; %50'den fazla ise ince taneli zemin olarak iki ana grup bulunmaktadır. İri taneli zeminler tane boyutuna, ince taneli zeminler ise plastisite özelliklerine ve organik madde içeriklerine göre göre alt gruplara ayrılmaktadır. Şekil 2.3'te plastisite kartı, Şekil 2.4'te ise USCS ana akış şeması verilmiştir. Bu sınıflandırma sisteminde aşağıda verilen bazı semboller (simge, harf) kullanılmaktadır.

G:çakıl, S:kum, M:silt, C:kil, Pt:turba, bataklık (çok organik), O:organik, L:düşük plastisiteli, H:yüksek plastisiteli, W:iyi derecelenmiş, P:kötü derecelenmiş zemin.

Zeminin granülometri eğrisi çizildikten sonra, No:200 ve No:4 eleklerle ait geçen yüzdeleri, eğrilik katsayısı (C_u), üniformluk katsayısı (C_c), likit limit (W_L), plastisite indisi (I_p) bilgileri kullanılarak zemin sınıflandırılır.



Şekil 2.3: Plastisite kartı [1].



Şekil 2.4: USCS akış şeması [1].

2.6 Zemin Stabilizasyonu

İnşaat mühendisliği yapıları genellikle bir zemin üzerine inşa edilmektedir. Bu nedenle, zemin yapıdan ve sel, deprem, heyelan gibi doğal olaylardan gelen yüklere karşı koyabilmelidir. Zemin gelen yükleri karşılayamadığı taktirde çeşitli mühendislik problemlerine yol açtığı gibi canlılar açısından da sorun teşkil edebilmektedir. Bu durumlarla karşılaşmamak için üzerine herhangi bir yapı inşa edilecek zayıf zemin güçlü hale getirilmelidir. Bu durumda çok maliyet gerektiren zeminin değiştirilmesi bir seçenek iken başka bir seçenek de zeminin stabilize edilerek güçlendirilmesidir. Zemin stabilizasyonundaki temel amaç, zeminin içindeki mevcut boşlukların mümkün olduğu kadar azaltılması, zeminin içinde fazlalık teşkil eden suyun zeminden uzaklaştırılarak zeminin iyileştirilmesi veya güçlendirilmesidir.

Zemin stabilizasyonu fiziksel, mekanik, hidrolik, kimyasal ve benzeri yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Stabilizasyonun temel amacı, zemin üzerine gelen yükleri taşıyabilmek, meydana gelebilecek oturmaları en aza indirmek ve sudan kaynaklı oluşabilecek problemleri ortadan kaldırmaktır. Zemin stabilizasyon yöntemleri tercih edilirken göz önüne alınan başlıca faktörler aşağıda sıralanmıştır [4].

- Zemin kohezyon durumu,

- Zemin su içeriği,
- Zemin konsolidasyon potansiyeli,
- Zemin içinde mevcut olan organik madde miktarı.

Zemin iyileştirmede başlıca hedefler řu şekilde sıralanabilir [5]:

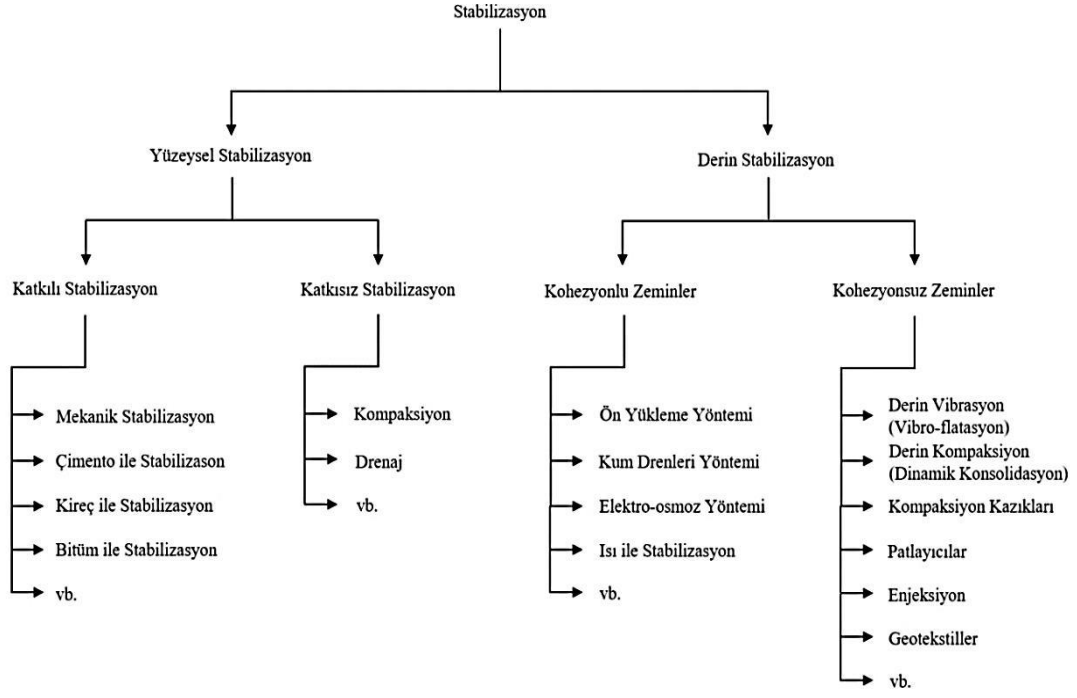
- Taşıma kapasitesi düşük olan zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak,
- Meydana gelebilecek oturmaları en aza indirmek,
- Zemin geçirimsizlik katsayısını düşürmek,
- Konsolidasyon hızını artırmak,
- Meydana gelebilecek sıvılaşma riskini engellemek,
- Dolgu ve şevlerin dayanımını artırmak.

Zemin stabilizasyonu ile aşağıda sıralanan kazanımlar sağlanmaktadır [6]:

- Zemin taşıma kapasitesi artar,
- Temel zemininde meydana gelebilecek olan oturmalar engellenir veya en aza indirgenir,
- Su geçirimsizliği düşürölür,
- Yeraltı suyu drenajı sağlanır,
- Boşluk suyu basıncı en aza indirgenir.

Bir inşaat mühendisi, herhangi bir yapının üzerine inşa edilen zeminin mühendislik özelliklerini belirleyerek, iyileştirilmeye ihtiyaç duyulup duyulmadığını belirlemelidir. şayet zemin, iyileştirilmeye ihtiyaç duyuyorsa zemin özelliklerine göre hangi stabilizasyon yönteminin kullanılacağı belirlenmelidir [7]. şekil 2.5'te zemin stabilizasyon yöntemleri verilmiştir.

Birden fazla zemin stabilizasyon yöntemi mevcut olduğundan, zemin türü ve stabilizasyonun hangi amaçla kullanılacağı göz önüne alınarak en efektif stabilizasyon yöntemi tercih edilmelidir. Literatür incelendiğinde bu konuda pek çok yol gösterici çalışmanın yapıldığı görölmektedir. Çizelge 2.2'de farklı zemin türleri için önerilen stabilizasyon yöntemleri verilmiştir. Benzer şekilde Çizelge 2.3'te stabilizasyon yöntemlerinin hangi amaçla kullanılacağını gösteren bir çalışma verilmiştir.



Şekil 2.5: Zemin stabilizasyon yöntemleri [7].

Çizelge 2.2: Farklı Zemin Çeşitleri için Stabilizasyon Yöntemleri [5].

Zemin Türü		Önerilen Zemin Stabilizasyon Metodları
Organik Zemin	Sığ	Kazı ve geri dolgu, geotekstil
	Derin	Kum kolonlar, sürşarj, geotekstil
	Tabakalı	Dinamik kompaksiyon, patlama tekniği, sürşarj, kompaksiyon enjeksiyonu, kum ve taş kolonlar
Dolgu	Sığ	Kazı ve geri dolgu
	Derin	Kum kolonlar, dinamik kompaksiyon
Yumuşak Kil	Sığ	Kazı ve geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, kompaksiyon enjeksiyonu, dinamik kompaksiyon, kum, taş ve kireç kolonlar
Killer		Kimyasal (kireç) stabilizasyonu, mekanik stabilizasyon, termal (dondurma) işlem, geosentetik, elektro-osmoz, drenaj
Gevşek silt	Sığ	Kazı ve geri dolgu, bazı katkıları
	Derin	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, taş kolonlar, vakum kuyuları, elektro-osmoz
Gevşek kum	Sığ	Kimyasal (çimento, bitüm vb.) stabilizasyon, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, vibroflatasyon, enjeksiyon, drenaj kuyuları, taş kolonlar, termal (dondurma)
Şişen zemin		Kimyasal (çimento, kireç vb.) stabilizasyon, drenaj
Sıvılaşabilen zemin		Taş kolonlar, dinamik kompaksiyon, drenaj, enjeksiyon
Çatlaklı kaya		Enjeksiyon, püskürtme beton, ankraj, yüzey altı yatay drenaj

Çizelge 2.3: Stabilizasyon yöntemlerinin kullanım amaçları [5].

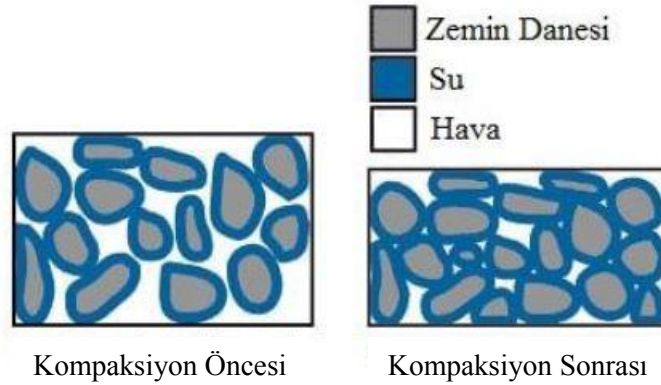
Stabilizasyonun Hangi Amaçla Yapıldığı	Önerilen Zemin Stabilizasyon Yöntemleri
Farklı oturmanın, büyük miktarlarda deformasyonun ve kırılmanın oluşabileceği bir yapıda bu problemleri ortadan kaldırmak	- Jet grout - Kompaksiyon enjeksiyonu - Mini kazıklar
Şişme potansiyel, yüksek zeminlerin şişme davranışını azaltmak	- Kimyasal (çimento, kireç vb.) stabilizasyon - Mekanik stabilizasyon - Drenaj
Zeminin geçirimlilik katsayısını ve borulanmayı azaltmak	- Kompaksiyon enjeksiyonu - Penetrasyon enjeksiyonu - Palplanş perde
Sert zeminlerdeki ve kayalardaki çatlaklardan ve bileşim yerlerinden su sızıntısını engellemek	- Kompaksiyon enjeksiyonu - Geosentetik
Sıvılaşma riskini ve deplasmanları azaltmak	- Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon - Vibrokompaksiyon - Derin dinamik kompaksiyon - Jet grout
Ani (ilk) oturmaları azaltmak	- Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) - Kompaksiyon enjeksiyonu - Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) - Vibrokompaksiyon - Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon - Derin dinamik kompaksiyon - Kompaksiyon enjeksiyonu - Jet grout - Kompaksiyon enjeksiyonu - Çakıl drenler
Şev stabilitesini artırmak	- Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) - Payanda dolgusu - Jet grout - Zemin çivi ve vidaları - Jet grout - Kompaksiyon enjeksiyonu - Sürşarj - Elektro-osmoz
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak	- Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) - Sürşarj dolgulu veya dolgusuz yüzey drenler - Kompaksiyon yöntemleri - Mekanik stabilizasyon - Bioteknik stabilizasyon - Enjeksiyon
Erozyon riskini azaltmak	- Derin dinamik kompaksiyon - vibrokompaksiyon

Günümüzde teknolojinin de gelişmesiyle birlikte zemin stabilizasyon yöntemleri, zemin yüzeyinden derinliklere kadar etkili olabilmektedir. Üstyapıdan gelen yüklerin çok fazla olmadığı yapılarda veya karayolu, demiryolu gibi yol inşaatlarında yüzeysel zemin stabilizasyonu tercih edilmektedir [5].

Zeminlerde meydana gelen çeşitli mühendislik problemleri, derin stabilizasyon yöntemlerinin oldukça maliyetli oluşu ve zaman açısından sorun teşkil etmesi gibi sebepler beraberinde pek çok yüzeysel zemin stabilizasyon yöntemlerinin ortaya çıkışını sağladığı gibi birçok yeniliği de beraberinde getirmiştir. Bahsi geçen yüzeysel stabilizasyon yöntemlerinin bir kısmı zemine katkı maddesi ilave edilerek gerçekleştirilirken, bir kısmı da herhangi bir madde ilave etmeksizin gerçekleştirilebilmektedir. Aşağıda bazı yüzeysel zemin stabilizasyon yöntemleri açıklanmıştır.

2.6.1 Kompaksiyon yöntemi

Kompaksiyon, zeminin tabakalar halinde serilip, bir enerji yardımıyla sıkıştırılma işlemidir. Kompaksiyon uygulanan zeminde, zemin taneleri arasındaki boşluklar azalmaktadır. Kompaksiyon yönteminde zemin içindeki hava kabarcıkları zeminden uzaklaştırılarak hızlı bir sıkışma meydana getirilmektedir [5]. Şekil 2.6'da kompaksiyon öncesi ve sonrası bir kesit verilmiştir.



Şekil 2.6: Kompaksiyon öncesi ve sonrası [8].

Zemin içindeki taneler, kompaksiyon esnasında uygulanan enerji ile hareket edip birbirine yaklaşarak mevcut boşluğu azaltmaktadır. Bir zeminin kompaksiyon derecesi, zemine ait kuru birim hacim ağırlık ve su içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Kompaksiyon işlemini etkileyen faktörlerden başlıcaları ise; zemin cinsi, zemin içindeki su miktarı ve kompaksiyon esnasında uygulanan enerji olarak sıralanabilir [5].

Zemine kompaksiyon işleminin uygulanmasının ardından aşağıda sıralanan kazanımlar sağlanmaktadır [9].

- Zemin taşıma gücü artar,
- Zemin geçirimsizlik katsayısı en aza indirgenir,
- Zeminde çeşitli yükler altında meydana gelebilecek oturmalar en aza indirgenir.

Kompaksiyon yöntemi ile yukarıda sıralanan kazanımlara ek olarak şişme, büzülme davranışları kontrol altına alınırken, dona karşı hassasiyet de en aza indirgenir. Kompaksiyon işlemi yüzeysel ve derin kompaksiyon olarak sınıflandırılmaktadır [5].

Daha çok yol inşaatlarının temel/alttemel ve kaplama tabakalarının uygulamalarında yüzeysel kompaksiyon tercih edilmektedir. Yüzeysel kompaksiyon işleminde çok çeşitli silindirler mevcut olmakla birlikte yaygın olarak kullanılan silindirler; lastik tekerlekli, keçi ayaklı, düz ayaklı ve titreşimli silindirler sıralanabilir. Şekil 2.7’de yüzeysel kompaksiyon işlemi için kullanılan sıkıştırma makineleri görülmektedir [5].



Şekil 2.7: Yüzeysel kompaksiyonda kullanılan sıkıştırma makineleri [10].

Zeminde gerçekleştirilen kompaksiyon işleminin zeminin daha derin kısımlarında sıkıştırma yapılmak istendiği durumlarda ise dinamik kompaksiyon yöntemi tercih edilir. Dinamik kompaksiyon işleminin uygulanması, özel olarak tasarlanmış vinçlerin belirli bir yükseklikten, belirlenen ağırlıkları, serbest düşüş hareketi ile zemine bırakması sonucu gerçekleştirilmektedir [5]. Şekil 2.8’de dinamik kompaksiyonun sahada uygulanma örneği verilmiştir.



Şekil 2.8: Dinamik kompaksiyonun saha uygulaması [11].

2.6.2 Drenaj

Yeraltı ve yer üstü suların zemine girişinin engellenmesi işlemi drenaj olarak adlandırılır [12]. Zeminde yeraltı suyunun varlığı pek çok probleme yol açmaktadır ve bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır [13].

- Şev kayması,
- Heyelan,
- Yol ve havaalanı yapılarında dayanımın düşmesi,
- Baraj ve rezervuarlarda oluşan borulanma,
- Zemin sıvılaşması.

Yukarıda belirtilen problemleri engellemek, yapının uzun ömürlü olmasını sağlamak amacıyla drenaj işleminin uygulanması büyük önem arz etmektedir.

2.6.3 Mekanik stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon genel tanımıyla; hedeflenen mühendislik özelliklerine ulaşmak maksadıyla iki veya daha fazla zemin türünün karıştırılarak yeni bir zemin yapısı oluşturulması olarak ifade edilebilir [14].

Zeminde mekanik stabilizasyonun başlıca kullanım sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [15].

- Zemin gradasyonunu arzu edilen değerlere ulaştırmak,
- Donma-çözünme etkilerini en aza indirmek,
- Çeşitli yükler altında meydana gelebilecek oturmaları en aza indirmek,
- Zemin dayanımını artırmak,
- Zeminin likit limit ve plastisite indisi değerlerini düşürmek.

2.6.4 Katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonu

Taşıma gücü zayıf problemlı zeminlerde meydana gelebilecek mühendislik problemlerini engellemek veya en aza indirmek maksadıyla geleneksel olarak farklı çözüm yöntemleri mevcuttur. Ancak, mevcut geleneksel yöntemler işveren ve yüklenici için zaman ve maliyet açısından sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle zemini iyileştirmek veya güçlendirmek adına alternatif zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir.

Günümüzde zemin iyileştirme amacıyla pek çok stabilizasyon yöntemi olmasına rağmen uygulamada en çok tercih edilen stabilizasyon yöntemlerinden biri de zemine çeşitli katkı maddeleri ilave ederek güçlendirmektir. Zemine ilave edilen yaygın katkı maddeleri; kireç, çimento, bitüm, uçucu kül şeklinde sıralanabilir. Katkı maddeleri ile stabilizasyon daha çok yüzeysel stabilizasyon veya yol inşaatlarında tercih edilmektedir.

Bu katkı maddeleri, zemin içinde çeşitli kimyasal tepkimeler oluşturduğu için zeminin özellikleri değişmektedir. Bu sebeple bunlar gibi katkı maddeleri ilavesi ile gerçekleştirilen zemin stabilizasyonu kimyasal stabilizasyon olarak da bilinmektedir [14].

Zeminin katkı maddeleri ile stabilizasyonu sonucu oluşan kazanımlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır [5].

- Zemin taşıma gücü artar,
- Zeminde meydana gelebilecek şişme, büzülme en aza indirgenir,
- Zeminde meydana gelebilecek oturmalar önlenir veya en aza indirgenir.

Katkı maddeleri, tek başına kullanılabileceği gibi farklı kombinasyonlarda karıştırılarak da kullanılabilir. Özellikle tek başına bağlayıcılık özelliği göstermeyen maddeler kireç, çimento, alkali aktivatör çözeltileri ile kombine edilerek bağlayıcılık özelliği kazandırılabilir [5].

2.6.4.1 Kireç ile zemin stabilizasyonu

Katkı maddesi olarak da en çok tercih edilenler arasında kireç katkısı gösterilebilir. Kireç, kireç taşının farklı derecelerde pişirilmesi sonucu açığa çıkan beyaz renkli, bağlayıcılık özelliği bulunan bir maddedir. Kireç taşının pişirilmesi sonucunda ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) açığa çıkan ürün sönmemiş kireçtir [15].

Kireçler CaO formunda bağlayıcılık özelliği göstermezler. Kirecin bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için su ile etkileşime girip ısı açığa çıkarması gerekir ve bu olay hidrasyon olarak bilinmektedir [15].

Zemin stabilizasyonunda kireç kullanımının birden fazla yöntemi mevcuttur. Bunlar aşağıda sıralanan şekilde açıklanabilir [15].

- Belirli bir miktar kireç sahada su ile karıştırılarak serilip sıkıştırılır.
- Belirlenen oranda kireç-su karışımı plentte karıştırılarak sahada serimi yapıp, sıkıştırılır.
- Kireç-su karışımı basınç yardımı ile zemine enjekte edilip, sıkıştırılır.

Şekil 2.9’da kireç ile zemin stabilizasyonunun aşamaları verilmiştir.



a-Kireç-su karışımının sahaya taşınması



b-Karışımın dağıtıcıya aktarılması



c-Dağıtıcının kireci zemin yüzeyine sermesi



d-Kirecin zemine karıştırılması

Şekil 2.9 Kireç ile zemin stabilizasyonu [16].

2.6.4.2 Çimento ile zemin stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonunda en yaygın olarak kullanılan katkılardan biri de çimentodur. Çimento ile stabilizasyon gerçekleştirilirken portland çimentosu kullanılmaktadır. Portland çimentosu heterojen bir yapıya sahiptir ve su ile etkileşime girince hızla hidrasyon gerçekleşerek ısı açığa çıkmaktadır [15]. Gerçekleşen hidrasyon sayesinde zemin iyileştirilmektedir. Şekil 2.10’da çimento ile zemin stabilizasyonu görülmektedir.



Şekil 2.10: Çimento ile zemin stabilizasyonu [17].

2.6.4.3 Bitüm ile zemin stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonunda kullanılan katkılardan biri de bitümdür. Bitüm ile gerçekleştirilen zemin stabilizasyonunda en önemli olay bitümün zemin içinde homojen bir dağılım sergilemesidir. Bitüm zemin içinde homojen dağılım sergilediği için çimento ve kireç katkıları ile gerçekleştirilen stabilizasyon yöntemine kıyasla zeminde daha güçlü bir iyileşme meydana gelmektedir [5].

2.6.4.4 Endüstriyel atıklar ile zemin stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonunda kireç, çimento ve bitüm gibi katkılar sıklıkla kullanılmasına rağmen bu katkıların getirdiği yüksek maliyetler mühendisleri alternatif katkılar kullanmaya yönlendirmiştir. Bu amaçla özellikle son yıllarda endüstriyel atıkların zemin stabilizasyonunda kullanılmasına önem verilmeye başlanmıştır. Teknolojinin ve sanayinin de gelişmesiyle birlikte endüstriyel atık ürünlerde artış yaşanmıştır. Endüstriyel atık ürünlerin açığa çıkışı her geçen gün arttığı için bu ürünlerin depolanması büyük sorun teşkil etmektedir. Depolanamayan bu ürünler çevreye yayılarak canlılar açısından ciddi sağlık problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu amaçla son zamanlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu, karbon, pirinç kabuğu külü, mermer atığı tozu, cam tozu, silis dumanı gibi endüstriyel atık ürünlerin farklı alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu alanlardan biri de endüstriyel atık ürünler ile gerçekleştirilen zemin stabilizasyonudur. Bu ürünlerin kullanımının çimento, kireç gibi katkılar ile kıyaslanınca maliyet açısından oldukça avantajlı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu ürünlerin kullanımı ile açığa çıkan atıklar bir nebze olsa da bertaraf edilmektedir [5].

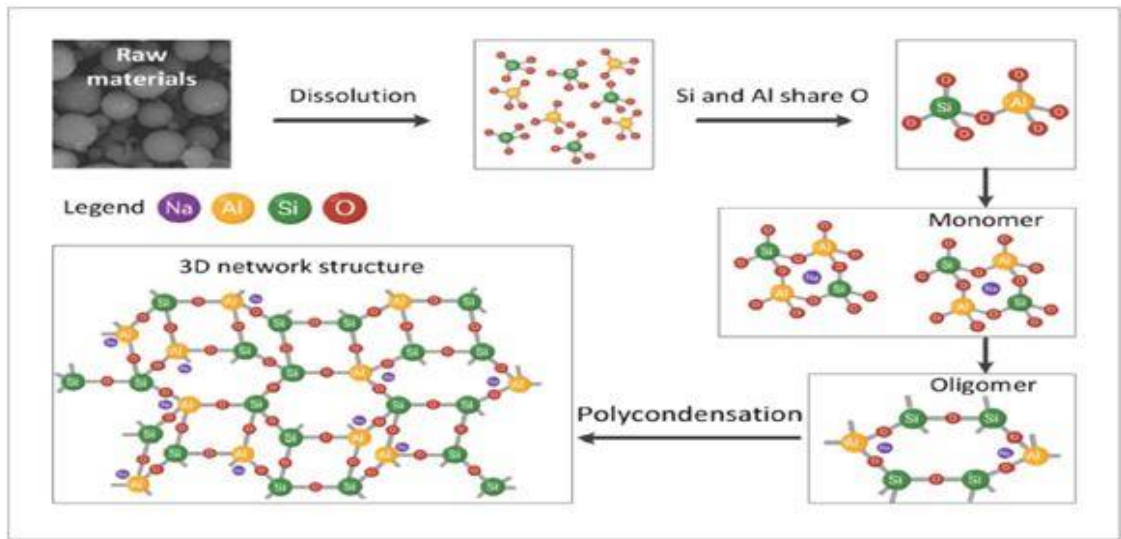
Sonuç olarak endüstriyel atık ürünlerin zemin stabilizasyonunda kullanımı ile ekonomik bir proje gerçekleştirilirken, sürdürülebilir bir gelecek için de önemli bir adım atılmış olacaktır.

2.6.4.5 Geopolimer ile zemin stabilizasyonu

“Geopolimer” terimi Davidovits tarafından 1978 yılında tanıtılarak kullanılmaya başlanmıştır. Geopolimerler, üç boyutlu amorf yapıya sahip alümina ve silika malzemelerden oluşmaktadır. Alkali ortamda alümina ve silika mineralleri Si-O-Al bağlarını oluşturmak amacıyla alkali aktivatör çözeltisi ile reaksiyona girerek geopolimerizasyon işlemi gerçekleşmektedir [18].

Geopolimerizasyon olayının gerçekleşmesi için iki malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan biri alümina ve silika içeren kaynak malzeme, ikincisi ise geopolimerizasyon reaksiyonunu gerçekleştiren alkalidir. Kaynak malzemeler kil gibi doğal malzemeler olabilirken, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atık ürünler de alternatif olarak kullanılabilir [19].

Şekil 2.11’de geopolimerizasyon aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.11: Geopolimerizasyon aşamaları [20].

Geopolimerizasyon aktivasyonu Şekil 2.11’de de görüldüğü üzere, alkali ve silika içerikli malzemeler ve bunları aktive eden alkali çözeltiler ile gerçekleşmektedir. Geopolimerizasyon işlemi sonucu açığa çıkan ürünün özellikleri, kür koşulları, kullanılan kaynak malzemeler, alkali aktivatör çeşidi gibi koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Yukarıda da açıklandığı gibi yapısında alümina ve silika içeren maddeler alkali ortamda geopolimerizasyon reaksiyonunu gerçekleştirmektedir. Beton

retiminde oldukça yaygın olarak kullanılan geopolimer son zamanlarda zemin stabilizasyonunda da kullanılmaya başlanmıştır. Geopolimer ile gerçekleştirilen zemin stabilizasyonunda atık ürünler değerlendirilirken aynı zamanda geopolimerizasyon reaksiyonu ile de zeminde daha güçlü bir iyileştirme gerçekleştirilmektedir [21].

3. KARAYOLU YAPISI

Ülkelerin gelişiminde önemli bir paya sahip olan ulaştırma sistemleri; deniz, hava, demir, kara yolu ve boru hatları olarak beş grupta incelenmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de ulaştırma ağında karayolu ulaşımı büyük bir paya sahiptir [22].

Karayolu, şartnamede belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiş bir güzergah boyunca, doğal zeminin istenilen seviyeye getirilerek, üzerinde motorlu taşıtların arzu edilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerini gerçekleştirebilmeleri amacıyla tasarlanıp inşa edilen yapılar olarak ifade edilebilir. Karayolu yapısı altyapı ve üstyapı olarak iki ayrı bölümde incelenmektedir [22].

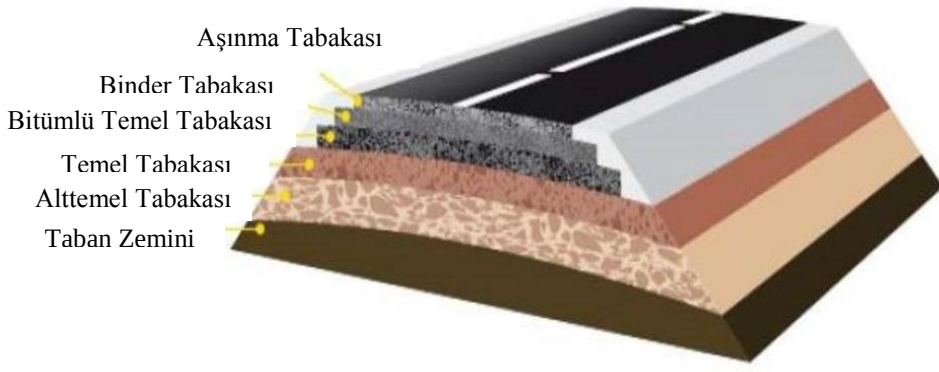
Yol boykesitinde tespit edilen kırmızı çizgiye uygun olarak, tesviye ve sanat yapısı işlerinin tamamlanmasının ardından oluşan kısım altyapı olarak adlandırılır. Yol yapılarında asıl taşıyıcı kısım altyapılardır. Ancak altyapılar, üzerine gelecek tekerlek yüklerinden kaynaklı deformasyonları tek başına karşılayamayacağından üstyapının inşası kaçınılmazdır. Altyapı, üstyapıdan gelen trafik yüklerini daha geniş bir alana yaymakta ve yolu dış etkilere karşı az da olsa korumaktadır. Altyapının bu işlevleri yerine getirebilmesi için, altyapıyı oluşturan zeminin özellikleri oldukça önemlidir [22,23].

Yol yapısının, gelen trafik yüklerini karşılayabilmek ve gelen bu yüklerden kaynaklı oluşan gerilmeleri taban zeminin taşıma gücünü aşmayacak biçimde taban yüzeyine dağıtmak amacıyla altyapı üzerine inşa edilen alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan kısım üstyapı olarak adlandırılır [24].

Yol üstyapıları esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç grupta incelenmektedir.

3.1 Esnek Üstyapı

Esnek üstyapı, alttemel ve temel tabakaları üzerine inşa edilen kaplama tabakasında bağlayıcı malzeme olarak asfalt çimentosunun kullanıldığı yapılardır [25]. Şekil 3.1’de esnek üstyapı enkesiti verilmiştir.



Şekil 3.1: Esnek üstyapı enkesiti [26].

Esnek üstyapılar tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de en çok tercih edilen kaplama türüdür. Esnek üstyapı, trafik yüküne göre sathi ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama olarak iki farklı şekilde inşa edilebilmektedir. Trafik yükünün az olduğu yollarda düşük maliyetli sathi kaplamalar tercih edilirken, trafiğin yoğun olduğu yüksek standartlı yollarda ise bitümlü sıcak karışım kaplamalar tercih edilmektedir [25].

BSK kaplamalar, proje süresi boyunca standart dingil yükü sayısı 3×10^6 'dan fazla olan yüksek standartlı yollarda tercih edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar farklı gradasyona sahip agregalar ve fillerin belirlenen bir oranda uygun bitümlü bağlayıcının plentte belirli bir sıcaklıkta homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilir ve ardından inşaat alanına taşınarak uygun sıcaklıkta serilip sıkıştırılmasıyla esnek üstyapı kaplaması tamamlanmış olunur [27]. Şekil 3.2'de BSK yol uygulaması görülmektedir.



Şekil 3.2: BSK saha uygulaması [28].

Sathi kaplamalar ise bitümlü sıcak karışımlara kıyasla daha düşük trafik yoğunluğu bulunan yollarda tercih edilmektedir. Sathi kaplamalar, temel tabakası üzerine ince bir film şeklinde sıvı asfalt püskürtüldükten sonra uygun gradasyona sahip mıcırın serilip sıkıştırılmasıyla elde edilir [29].

Sathi kaplamaların bitümlü sıcak kaplamalara kıyasla dezavantajları aşağıda sıralanmıştır [29].

- BSK'lara göre teker gürültüsü fazla olduğu için sürüş konforu düşüktür,
- Bakım-onarım masrafı fazladır,
- Sathi kaplamanın sık sık yenilenmesi gerekir,
- Sürtünme direnci fazla olduğu için taşıt işletme giderleri fazladır,
- Taşıma kapasitesi düşük olduğundan ağır taşıt trafiği için uygun değildir.

Şekil 3.3'de yüzeysel kaplama saha uygulaması görülmektedir.



Şekil 3.3: Yüzeysel kaplama saha uygulaması [30].

Esnek üstyapı kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşmakta ve üst kısımdan zemine doğru inildikçe kullanılan malzemelerin kalitesi düşmektedir. Bu tabakaların kalınlıklarını belirleyen ölçütler; hizmet ömrü, trafik yoğunluğu, malzeme özellikleri ve taban zeminin taşıma gücü olarak sıralanabilir [23].

3.1.1 Taban zemini

Taban zemini, yol üstyapısının üzerine oturduğu ve üstyapıdan gelen yükleri taşıyan yol kısmıdır [23]. Esnek üstyapının davranışı taban zeminin taşıma gücü ile doğrudan ilişkili olduğu için, taban zeminin şartnamaya uygun olarak projelendirilmesi oldukça önemlidir. Taban zemininde yeraltı su seviyesi, tesviye yüzeyinin minimum 150 cm altında olması

gerekli ve bunun gerçekleştirilebilmesi için uygun drenaj sistemleri tercih edilmelidir. Aynı zamanda yol üstyapısının mevsimsel süreçlerde donma-çözülme olaylarından zarar görmemesi için zeminde aşağıda sıralanan etmenler dikkate alınmalıdır [22].

- Donma indeksi,
- Üstyapı kalınlığı,
- Taban zemininin dona karşı hassasiyeti,
- Yeraltı su seviyesi derinliği.

3.1.2 Alttemel tabakası

Alttemel tabakası, temel tabakasından gelen yükleri taşıyarak taban zeminine aktaran ve taban zemini üzerine inşa edilen, taneli malzeme veya malzemelerden oluşan tabakadır [23]. Bu tabaka, üst tabakalardan gelen trafik yüklerini taban zeminine iletirken, temel tabakasının inşası için uygun yüzey alanı oluşturmakta ve üst tabakaları da korumaktadır [31].

3.1.3 Temel tabakası

Temel tabakası, kaplama tabakasından gelen yükleri taşımak amacıyla alttemel veya taban zemini üzerine inşa edilen kısımdır [23].

Bu tabakanın temel görevleri; üstyapının yük taşıma kapasitesini artırmak, kayma gerilmelerine karşı koyabilmek, don olaylarına karşı koruma sağlayabilmek şeklinde sıralanabilir [22].

Karayollarında kullanılan üç farklı temel tipi mevcuttur ve bunlar aşağıda sıralanmıştır [29].

- Granüler Temel: Belirli gradasyona sahip kırmataş agregaların optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serilmesi ve sonrasında maksimum kuru yoğunluğa kadar sıkıştırılması ile elde edilmektedir.
- Plent-Miks Temel (PMT): Belirlenen gradasyona sahip kırmataş agregaların plentte optimum su içeriğinde karıştırılıp, yola serilmesi ve ardından sıkıştırılmasıyla elde edilmektedir.
- Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel: Granüler temel ve PMT’de olduğu gibi belirlenmiş gradasyona sahip agregaların plentte belirlenen oranda çimento ilave

edilerek optimum su içeriğinde karıştırılarak yola serilip, sıkıştırılmasıyla elde edilmektedir.

3.1.4 Bitümlü temel tabakası

Bitümlü temel tabakası, şartname limitlerine uygun olacak şekilde farklı gradasyona sahip agrega ve fillerin sıcak bitümle karıştırılması ile elde edilir. Bitümlü temel tabakası, temel ve alttemel tabakalarına gelen yükleri büyük ölçüde karşılamaktadır [32].

3.1.5 Binder tabakası

Binder tabakası, aşınma tabakası ile temel tabakası arasına inşa edilen bir BSK tabaka olup üstyapı tabakasının yapısal elemanıdır. Binder tabakası, gelen trafik yüklerini temel tabakasının taşıma gücünü aşmayacak şekilde iletirken, tekrarlı yüklerden kaynaklı meydana gelebilecek deformasyonları da en aza indirmektedir [26].

3.1.6 Aşınma tabakası

Aşınma tabakası, üstyapının en üst kısmını oluşturmaktadır. Aşınma tabakası, gelen yüklere doğrudan maruz kaldığı için, diğer tabakalara kıyasla daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır. Aşınma tabakası, sürüş konforu için düzgün yüzey sağlamak, teker izi oluşumu engellemek gibi nedenlerden dolayı diğer tabakalara kıyasla daha kaliteli malzeme kullanılarak inşa edilmektedir [26].

3.1.7 Karayolu esnek üstyapı tasarımı

Karayolu üstyapı tasarımı yapılırken, tasarım ömrü boyunca üzerinden geçecek olan trafik yüklerini karşılayabilecek, meydana gelebilecek deformasyonlara karşı koyabilecek güvenli ve ekonomik bir tasarım amaçlanmaktadır [33].

Karayolu üstyapısı ampirik, ampirik-analitik ve analitik olmak üzere üç şekilde tasarlanabilmektedir. Ampirik tasarım yöntemi edinilen bilgiler ve özel olarak yapılan denemeler esas alınarak yapılırken, analitik tasarım yöntemi teorik bilgi ve kullanılan malzeme özellikleri esas alınarak yapıldığı için her koşulda uygulanabilir [34].

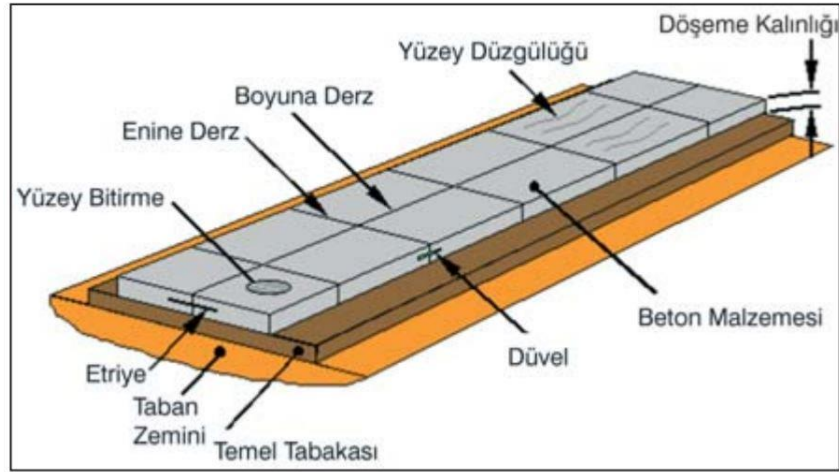
AASHTO 1972 ampirik tasarıma örnek verilebilirken, AASHTO'nun 1972'den sonra geliştirdiği AASHTO 1986, AASHTO 1993 ve son olarak AASHTO 2002 ampirik-analitik yöntemlere örnek olarak verilebilir. Analitik yöntem için ise Shell Üstyapı Tasarım Yöntemi örnektir [35].

3.2 Rijit Üstyapı

Bağlayıcı olarak çimento kullanılarak inşa edilen kaplamalarla tasarlanan üstyapıya “Rijit Üstyapı” veya “Beton Yol” adı verilmektedir. Yol kaplaması olarak kullanılan beton, üzerine gelen trafik yüklerini temel tabakası aracılığıyla tabana iletmektedir. Beton kaplama olarak inşa edilen bir yolun kalitesi, dökülen betonun özellikleri, beton kaplama altındaki temel ve alttemel tabakaları ile taban zemininin özelliklerine bağlıdır [26].

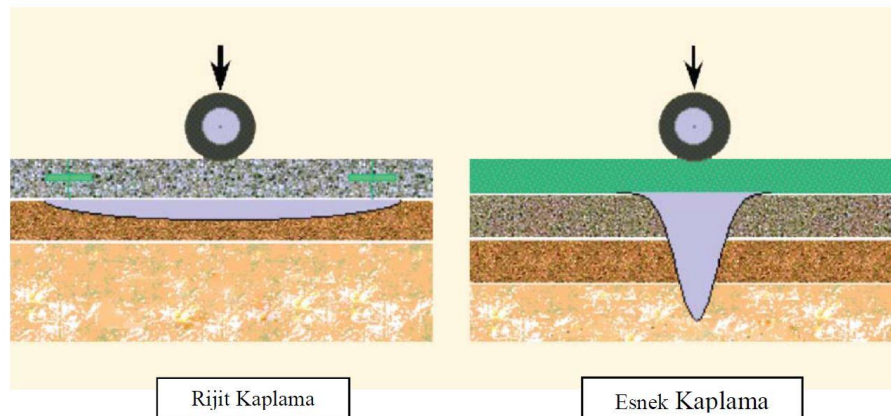
Beton yollar, çoğunlukla enine ve boyuna derzlerle birbirinden ayrılmış 20-25 m² alana sahip plaklardan oluşmaktadır [22].

Beton plağın elastisite modülü, taban zeminin elastisite modülünden büyük olduğu için beton plak, adeta elastik bir zemin üzerine oturtulan kiriş gibi davranış sergileyerek, esnek üstyapıya kıyasla trafik yükünden meydana gelen gerilmeleri daha geniş bir alana yayar [26]. Şekil 3.4’de rijit üstyapı enkesiti verilmiştir.



Şekil 3.4: Beton yol enkesiti [36].

Kaplamalara göre yük dağılımı Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5: Kaplamalara göre yük dağılımı [37].

3.2.1 Taban zemini

Taban zemini, sıkıştırılmış doğal zeminden meydana gelir. Üstyapıdan gelen yükler son olarak taban zeminine aktarılmaktadır. Taban zemini gelecek olan yükleri karşılayabilmelidir [37]. Taban zemini; yol kalitesi, trafik hacmi, iklim özelliklerine bağlı olarak arzu edilen şartları sağlamadığı takdirde, uygun yöntemlerle stabilize edilerek iyileştirilmelidir.

3.2.2 Kaplama altı tabakası

Rijit üstyapıda taban zemini ile kaplama tabakaları arasına inşa edilen kısım, kaplama altı tabakasıdır ve bu tabaka temel veya alttemel tabakası olarak isimlendirilir. Beton kaplama tabakası altında kalan tabaka, beton plağa üniform bir destek sağlamaktadır. Proje koşulları gereğince uygun olduğu takdirde kaplama altı tabakanın kalınlığı artırılıp, beton kaplamanın kalınlığı düşürülebilir [25].

3.2.3 Beton kaplama

Beton kaplamalar, gelen yüklere doğrudan maruz kalan, trafik yüklerini karşılayıp, yüklerden kaynaklı oluşan gerilmeleri temel/alttemel ve taban zeminine ileten tabakadır. Beton kaplama tabakasının kalınlığı, trafik yoğunluğuna, mevcut zemin durumuna ve iklim koşullarına göre değişkenlik gösterebilir [37].

3.2.4 Karayolu rijit üstyapı tasarımı

Rijit üstyapılarda, gelen trafik yükünü beton plak karşıladığı için, rijit üstyapı tasarımındaki beton plak dayanıklılığı büyük önem arz etmektedir [36].

Rijit üstyapı tasarımı yapılırken, proje süresi boyunca gelen yükleri karşılayabilecek, meydana gelebilecek deformasyonları en aza indirgeyecek güvenli ve ekonomik bir tasarım amaçlanmaktadır. Rijit üstyapı tasarımı tıpkı esnek üstyapı tasarımındaki gibi ampirik, ampirik-analitik ve analitik olmak üzere üç şekilde yapılabilmektedir [21].

3.3 Kompozit kaplamalar

Kompozit üstyapı veya yarı rijit üstyapı, deforme olmuş bir esnek üstyapının beton takviyesi ile onarılması (kaplanması) veya deforme olmuş rijit bir üstyapının bitümlü sıcak karışımla onarılması ile oluşan yapılardır. Maliyetli oluşundan dolayı fazla tercih edilmemektedir [37].

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İnşaat mühendisliğinde hemen hemen bütün yapıların zemin üzerine oturtuldukları dikkate alındığında, zemin özelliklerinin üzerindeki yapıların performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olacağı muhakkaktır. Bu sebeple zemin özelliklerinin bilinmesi yapının sürdürülebilir performansı bakımından önemlidir. Özellikle yapı temeli olarak kullanılan zeminlerin düşük taşıma gücüne sahip olması çeşitli mühendislik problemlerine sebep olmaktadır. Zeminden kaynaklı bu problemleri ortadan kaldırmak ve yapıyı daha güvenli hale getirmek için yıllardır çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Özellikle zayıf yol taban zeminleri için çoğunlukla kireç, çimento ve bitüm gibi malzemeler kullanılarak zeminler güçlendirilmeye çalışılmıştır. Ancak, özellikle son yıllarda artan endüstriyel atıkların varlığı ve bunların çevre üzerindeki olumsuz etkileri, bu atıkların zemin iyileştirilmesinde veya stabilizasyonunda kullanılabilirliğini önemli hale getirmiştir. Bu amaçla, taşıma gücü düşük zeminlerin mukavemeti üzerinde çeşitli endüstriyel atıkların kullanıldığı birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Uysal ve diğ. (2020), yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC) ve cam tozu ile iyileştirilmiş ince taneli zeminlerin mühendislik özelliklerini tespit etmişlerdir. Zemine ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında atık malzemeleri ilave ederek zemin stabilizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler neticesinde plastisite indisinin azaltması ve drenajsız kayma mukavemetini arttırmasında en efektif sonuç %20 YFC ile sağlanmıştır [38].

Okucu ve Bilge (2019), killi bir zeminin YFC ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Bu amaçla bentonit kiline %0, %5, %10, %15 oranlarında YFC+kireç ilave ederek stabilize zemin numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan deney numuneleri hidrometre, özgül ağırlık, likit limit, kompaksiyon ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda yüksek plastisiteli killi bir zeminde %100 kil+%5 YFC+%10 kireç katkısı ile en iyi sonuca varılmıştır [39].

Bilge (2011), yapmış olduğu çalışmada killi zemini YFC, UK ve zeolit kullanarak stabilize etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada bentonit kiline %10 kireç, %5, %10, %15 oranlarında YFC, UK ve zeolit ilave ederek homojen zemin numuneleri hazırlamıştır. Hazırlanan

deney numuneleri özgül ağırlık, kıvam, hidrometre, kompaksiyon ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler neticesinde yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfı zeminlerde UK, YFC ve zeolit ile stabilizasyon yapılabileceği belirlenmiş ve 28 günlük kür sonunda kil+%15 YFC+%15 zeolit ile en yüksek mukavemet değeri elde edilmiştir [40].

Geçkil ve diğ. (2020), yapmış oldukları çalışmada F sınıfı UK ile iyileştirilen yol taban zemininin karayolu üstyapısına olan etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla, kil zemine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında UK ilave edilerek stabilize zemin numuneleri hazırlanmış ve hazırlanmış deney numuneleri serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutularak optimum UK yüzdesi %10 olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen UK oranı esas alınarak AASHTO 1986 yöntemi ile UK ilaveli zeminin esnek ve rijit kaplamalar için tabaka kalınlıkları ve maliyet analizi yapılmıştır. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda %10 UK ile iyileştirilmiş zemin üzerine inşa edilecek 1 km uzunluğundaki yol için esnek ve rijit üstyapı maliyetleri saf zemine kıyasla sırasıyla %37,45 ve %28,92 gibi ciddi oranlarda azalma meydana geldiği tespit edilmiştir [41].

Çakılıoğlu (2007), yapmış olduğu çalışmada bentonit kiline %10 kireç, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında UK ve zeolit ilave ederek stabilize zemin numuneleri hazırlamıştır. Hazırlanan deney numuneleri özgül ağırlık, kıvam, hidrometre, elek ve kompaksiyon deneylerine tabi tutulmuştur. Kompaksiyon deneyinden elde edilen veriler ışığında numuneler hazırlanıp 7 ve 28 günlük kürde bırakılmıştır. Kür sonunda en iyi dayanım kil+%10 kireç+%5 zeolit+%15 UK ile sağlanmıştır [42].

Öntürk (2011), yapmış olduğu çalışmada CH sınıfına ait killi zemine UK, polisaj ve bağlayıcı malzeme olarak da kireç ilave ederek zemin iyileşmesini incelemiştir. Kireç ve UK %15 oranında sabit tutularak %10, %15, %20 oranlarında polisaj ilave edilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri özgül ağırlık, zemin sınıflandırma ve kompaksiyon deneylerine tabi tutulmuştur. Kompaksiyon deneylerinden elde edilen veriler esas alınarak optimum oranda belirlenen zemin numunesi CBR deneyine tabi tutularak, zemin taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Hazırlanan CBR deney numuneleri 1, 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde muhafaza edilerek deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre en yüksek CBR değerinin 28 gün kür sonunda %20 polisaj katkısı ile elde edildiği gözlemlenmiştir [43].

Kök ve diğ. (2012), taşıma gücü zayıf olan zemini çimento ile stabilize ederek stabilizasyon sonucu taşıma gücü ve üstyapı maliyetine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla, zemine %4-16 aralığında çimento ilave ederek zeminin CBR değerini belirlemişlerdir. %7 çimento ilavesi ile optimum oran tespit edilmiş ve stabilizasyon sonucu üstyapı maliyetinde %50'lik bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir [44].

Türköz ve diğ. (2021), yapmış oldukları çalışmada %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında silis dumanı (SD) kullanarak CH sınıfına ait bir zemini stabilize etmişlerdir. Hazırlanan numuneler kıvam deneyleri, proktor sıkıştırma testi, penetrasyon ve rezonans kolon testlerine tabi tutulmuştur. Proktor sonuçları incelendiğinde artan SD içeriğine bağlı olarak optimum su içeriğinin arttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, SD ilavesi ile plastisite indisi (PI) ve likit limit (LL) değerlerinin azaldığı görülmüştür. CH sınıfına ait zemin stabilizasyon sonucu düşük plastisiteli silt (ML) olarak değişiklik göstermiştir. Meydana gelen bu değişimler sonucunda SD ile zemin güçlendirilmiş bir yapıya dönüşmektedir [45].

Türköz ve diğ. (2018), yapmış oldukları çalışmada yüksek plastisiteli killi bir zemini kireç ve SD kullanarak stabilize etmişlerdir. Kireç oranı %3 olarak sabit tutulmuş ve %0, %1, %3, %5, %10, %15, %20 olarak artan yüzdelerde SD ilave ederek katkılı zemin numuneleri hazırlamışlardır. Belirlenen her yüzde için standart proktor deneyi yapılmış ve her katkı yüzdesi için belirlenen sıkıştırma özelliğine göre hazırlanan zemin numuneleri farklı kür periyotlarında konsolide olmayan-drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler neticesinde ilk 7 günlük kür süresinin dayanım üzerinde daha etkili olduğu ve optimum sonucun %3 kireç+%10 SD ile elde edildiği belirlenmiştir [46].

Zairjawi (2009), çalışmasında killi zemine çimento ve silis dumanı (SD) ekleyerek zeminin mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimi incelemiştir. Zemini stabilize etmek için %2, %4, %6, %8 oranlarında çimento ve %2, %4, %6 oranlarında SD ilave ederek stabilize zemin numuneleri hazırlamıştır. Deney numuneleri 1, 7 ve 28 gün kür süresince uygun koşullarda muhafaza edilerek deneye tabi tutulan numuneler incelendiğinde, çimento ve SD ilavesi ile maksimum kuru birim hacim yoğunluğunun azaldığı, optimum nem içeriğinin arttığı ve serbest basınç dayanımında da artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Optimum sonuca 28 gün kür sonunda %8 çimento+%6 SD ile ulaşılmıştır [47].

Bharadwaj ve Trivedi (2016), çalışmalarında Hindistan'da siyah pamuklu zeminin inşaat mühendisleri için oluşturduğu sorunlara çözüm bulmak amacıyla silis dumanı (SD) ile

zemini ıslah etmeye çalışmışlardır. Zemin kuru ağırlığına %0, %5, %10, %15 oranlarında SD ilave edilerek zemin numuneleri hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde SD'nin alternatif bir stabilizasyon ürünü olarak kullanılabileceği belirlenmiştir [48].

Al-Soudany (2018), çalışmasında düşük plastisiteli kil (CL) sınıfı zeminin özelliklerini iyileştirmek amacıyla zemini SD ile stabilize etmiştir. Zemine %0, %3, %5, %7 oranlarında SD ilave edilen numuneler hazırlanarak özgül ağırlık, sıkıştırma özellikleri, CBR ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. SD oranındaki artış ile zemin plastisite indeksinin ve likit limitin azaldığı, optimum su içeriğinin arttığı, maksimum kuru birim hacim yoğunluğunun ise azaldığı görülmüştür. Serbest basınç dayanımı ve CBR oranlarında da kayda değer bir artışın meydana geldiği görülmüş ve optimum SD oranı %5 olarak belirlenmiştir [49].

Oshubi (2000), çalışmasında A7-6 veya CL sınıfına ait killi bir zemini taban altı külü ve çimento kullanarak stabilize etmiştir. Zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında taban altı külü ve %2, %4, %6 ve %8 oranlarında çimento ilave ederek stabilize zemin numuneleri hazırlamıştır. Numuneler serbest basınç dayanımı ve CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda %5 taban altı külü ile optimum sonuca varılmıştır [50].

Güllü (2014), çalışmasında elektrik santrallerinde atık ürün olarak açığa çıkan taban külü ile ince taneli zemini stabilize etmeyi hedeflemiştir. Bu amaçla zemine ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında taban külü ilave edilerek stabilize zemin numuneleri hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde taban külünün az miktarda kullanıldığında çok etki etmediğini ancak yüksek dozajlarda (%30 ve sonrası) kullanıldığı takdirde stabilizasyon işlemi için olumlu sonuç verdiği görülmüştür [51].

Güllü (2015), diğer bir çalışmasında CL sınıfına ait bir zemini geleneksel olmayan zemin stabilizatörleri ile mühendislik özelliklerini geliştirmeyi ayrıca maliyet açısından geleneksel stabilizatörlere uygulanabilir ve alternatif bir çözüm amacıyla süper akışkanlaştırıcıyı taban külü ve kireç ile kombine etmiştir. Bu amaçla serbest basınç dayanım testleri uygulamış ve sonuçları donma öncesi ve sonrası çözünme koşulları için ayrıntılı olarak incelemiştir. Sonuç olarak süper akışkanlaştırıcı, kireç, kireç+süper akışkanlaştırıcı, kireç+taban külü içeren bileşimleri donma-çözünme için etkin bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir [52].

Kim ve Do (2012), yapmış oldukları çalışmada taban külünün parçacık boyutunun, taban külü katkılı geomalzemenin sürtünme direncini ve puzolanik reaksiyonunu nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sürtünme direnci ve puzolanik reaksiyon için üç farklı parçacık boyutuna sahip taban külü kullanılmışlardır. Zemin ağırlığına %0-%100 arasında değişen oranlarda taban külü (BA) ilave edilmiş ve 7-120 gün arasında değişen çeşitli kür sürelerinde numuneler serbest basınç (UCS) testleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda taban külü oranının ve kür süresinin artışı ile serbest basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Daha küçük parçacıklı taban külünün, büyük parçacıklılara göre puzolanik reaksiyonda artan kürlenme süresi ile daha fazla mukavemet kazandığı görülmüştür [53].

Jorat ve diğ. (2011), çalışmalarında kaoline taban külü ilave ederek mühendislik özelliklerini incelemişlerdir. Taban külünün taneli dokusundan kaynaklı olarak karışımın sürtünme açısının arttığı ve kohezyonunun azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, %25 taban külü ilavesiyle en yüksek kesme kuvveti değeri elde edilmiştir. En yüksek penetrasyon direnci ve CBR değerini veren karışımın ekonomik olarak belirlenmiştir [54].

Kim ve Prezzi (2008), çalışmalarında UK ve taban külü (BA) zemin karışımlarının sıkıştırma özelliği ve aşındırıcılığı üzerine incelemeler yapmışlardır. Ağırlıkça %50, %75 ve %100 oranlarında UK içeriğine sahip numuneler üzerinde standart sıkıştırma, maksimum, minimum yoğunluk, elektriksel direnç ve pH testleri yapılmıştır. Sıkıştırma testleri sonucunda artan UK içeriği ile maksimum kuru yoğunluğun azaldığı ve optimum su içeriğinin arttığı görülmüştür. Çalışmalar neticesinde UK karışımlarının dolgu veya dolgu yapımında geleneksel malzemelerin yerine alternatif olarak kullanılabileceği belirlenmiştir [55].

Geçkil ve diğ. (2020), YFC ile stabilize edilerek güçlendirilmiş bir yol taban zeminin esnek yol üstyapısının tabaka kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada kil zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranlarında YFC ilave ederek stabilize zemin numuneleri hazırlamışlardır. Deney numuneleri serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutulduktan sonra elde edilen en yüksek dayanımı veren YFC oranı %20 olarak belirlenmiştir. AASHTO 1993 yöntemi esas alınarak saf killi zemin ve %20 YFC ile stabilize edilmiş zeminin tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Neticede %20 YFC ile stabilize edilmiş zeminin saf killi zemine kıyasla tabaka kalınlığında %26,67 oranında azalma meydana geldiği belirlenmiştir [56].

Bilici ve diğ. (2020), çalışmalarında killi zemine UK ve YFC ilave ederek zemini ıslah etmişlerdir. Çalışmada, zemine %3 kireç oranı sabit tutularak %3, %6, %9, %12, %15 oranlarında UK ve %3, %6, %9, %12 oranlarında YFC ilave edilerek karışım numuneleri hazırlanmış ve numuneler 1, 7, 28 günlük kür sürelerinin ardından serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda en iyi dayanım %3 kireç+%12 UK ve %3kireç+%9 YFC ilavesi ile elde edilmiştir [57].

Bilgen ve diğ. (2012), killi zemini Çelikhane cürufu ve kireç katkısı ile ıslah ederek geoteknik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla zemine kireç miktarı % 4 ile % 15 olarak seçilmiş ve Çelikhane curufu-kireç karışımlarının hazırlanmasında 1:1,5 oranı kullanılarak farklı karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım numuneleri kıvam limit, kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde %6 CBR değerine sahip saf zemin %5 kireç+%3,33 Çelikhane cürufu katkısı ile ıslah edilmesinin ardından zeminin CBR değerinin %135 değerine ulaştığı belirlenmiştir [58].

Fırat ve Cömert (2011), yapmış oldukları çalışma ile UK, kireç ve çimento ile stabilize edilmiş zeminde kür süresinin CBR değeri üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Numuneler 1, 7, 28 ve 56 günlük kür süresini tamamlayan numuneler CBR, serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. CBR deneyi sonucunda 28 gün kürlenmiş UK katkılı zeminin taşıma gücünde %4-%160 artış yaşanmış ve zeminlerde taşıma gücü kontrolünün 28 gün kür sonunda yapılmasının uygun görüldüğü ifade edilmiştir [59].

Yadu ve Tripathi (2013), YFC ile stabilize edilmiş bir zeminin geoteknik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Çalışmada, zemine ağırlıkça %3, %6, %9, %12 oranlarında YFC ilave edilerek karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numuneleri plastisite indeksi, özgül ağırlık, şişme basıncı, serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutularak performansları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda optimum oran %9 YFC katkısı ile sağlanmış ve bu oranda YFC ile stabilize edilmiş zemin numunesinin serbest basınç dayanımında saf zemine kıyasla %28'lik bir artış yaşanmıştır [60].

Çetin (2011), çalışmasında CH sınıfı zemini iyileştirmek maksadıyla UK, kopolimer ve ağ yapılı polipropilen katkılarını kullanmıştır. Saf zemin ve zemin ağırlığının %5, %10, %15 oranlarında UK, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında polipropilen ve %1, %1,25, %1,50 oranlarında kopolimer katkılı karışım numuneleri hazırlamıştır. Karışım numunelerinin optimum su oranları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit

edildikten sonra, serbest basınç numuneleri hazırlanarak 7 günlük kür sonucunda deneye tabi tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, %10 UK, %0,75 polipropilen ve %1 kopolimer katkılarının kullanılması ile zemin mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir [15].

Ghabae (2015), kireç ile iyileştirilmiş bir zeminde kür süresinin zeminin mukavemeti üzerindeki değişimlerini incelemiştir. Saf zemine ağırlıkça %3, %6, %9 oranlarında kireç ilave ederek karışım numuneleri hazırlamıştır. Numuneler 7, 14, 28 günlük kür sürelerinin ardından serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda 7 günlük kür sonunda en iyi mukavemet artışının %9 kireç katkısı ile gerçekleştiği, 14 günlük kür süresince kireç yüzdesinin artmasıyla mukavemetinde arttığı, 28 günlük kür sonunda en yüksek mukavemet değerinin 810 kN/m^3 'e yükseldiği ve saf zemine kıyasla 4 kat artış yaşandığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, kirecin zemin iyileştirmede alternatif bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir [61].

Vural (2019), çalışmasında inşaat yıkıntı atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla 1999 Sakarya depreminde yıkılan binalara ait yıkıntı atıkları laboratuvar ortamına taşınarak kullanılmıştır. Yıkıntı atıkları, kireç ve kaolin katkıları ile karıştırılarak 1, 7, 28 günlük kür süresi sonunda CBR değerleri incelenmiştir. İncelemeler sonunda en iyi CBR değeri %23 yıkıntı atığı kullanılarak 33,52; %5 kireç kullanılarak 34,70 ve %72 kaolin kullanılarak 34,95 olarak hesaplanmıştır [62].

Neerja ve Rao (2010), yaptıkları çalışmada çeşitli katkıları kullanarak killi bir zemini stabilize etmiş ve zeminin özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla zemine pirinç kabuğu, UK, YFC ve bunlara ek olarak kireç ilave etmişlerdir. Çalışmada numunelerin optimum nem içeriği, maksimum kuru yoğunluğu, serbest basınç dayanımı ve CBR değerleri tespit edilmiştir. Kireç katkısı oranı %5 sabit tutularak, pirinç kabuğu oranı %15, YFC oranı %15 ve UK oranı %20 ile en yüksek dayanım değerlerine ulaşılmıştır [63].

Develioğlu ve Pulat (2018), çalışmalarında iki farklı tane boyutuna sahip YFC'nin geoteknik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla ince ve iri tane boyutlu YFC'nin ASTM standartlarına uygun olarak mühendislik özellikleri belirlenmiş ve numuneler CBR deneyine tabi tutulmuştur. İnce dağılımlı numunelerin, iri dağılımlı numunelere göre CBR değerleri daha yüksek çıkmıştır. Çalışma neticesinde YFC'nin Karayolları Teknik Şartnamesi'nde belirtilen dolgu malzemesi özelliğini taşıdığı belirtilmiştir [64].

Cömert (2005), killi bir zemini UK ile stabilize ederek stabilizasyon sonucu zeminde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Çalışmada kireç oranı sabit tutularak UK oranı ağırlıkça %5, %10, %15 olarak belirlenmiştir. Bu oranlarda stabilize numuneler hazırlanarak, 1, 7, 28 gün kür süresince muhafaza edilmiş ve ardından numuneler özgül ağırlık, limit deneyleri, serbest basınç, üç eksenli basınç ve CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deneylerin ardından %5 kireç ilaveli karışım numunesinin mukavemeti %90 artış gösterirken, %5 kireç+%5 UK ilaveli karışım numunesinin mukavemetinde %95 artış meydana gelmiştir. Çalışma neticesinde, kireç ve UK'nın killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği tespit edilmiştir [65].

Geçkil ve diğ. (2021), taşıma gücü zayıf killi bir yol taban zeminini YFC ile ıslah ederek rijit üstyapı tabaka kalınlığı ve maliyetine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada zemine ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında YFC ilave edilerek karışım numuneleri hazırlanmış ve numuneler standart proktor, serbest basınç ve CBR testlerine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarına göre en iyi dayanım %20 YFC ilavesi ile elde edilmiştir. AASHTO 1993 yöntemi esas alınarak saf ve %20 YFC ilaveli rijit üstyapı tasarım hesabı yapılmış ve %20 YFC ilaveli zeminin saf zemine kıyasla proje trafiği 100×10^6 , 125×10^6 ve 150×10^6 olan rijit üstyapılarda sırasıyla 1,782 TL, 1,736 TL ve 1,672 TL maliyet azalışı meydana gelerek daha ekonomik bir proje gerçekleştirilmiştir [66].

Bağrıaçık (2017), temel/alttemel malzemesi olarak kullanılamayacak durumda olan zemini kireç ile stabilize edip meydana gelen değişimi incelemiştir. Stabilizasyon için hacimce %3, %4, %5, %6 oranlarında kireç kullanarak katkılı numuneler hazırlanmış ve CBR testine tabi tutulmuştur. Çalışma neticesinde optimum su oranı %10 ve optimum kireç oranı hacimce %5 olarak tespit edilmiştir [67].

Şengül (2010), çalışmasında killi yol taban zeminini kireç stabilizasyonu ve hücresel dolgu tekniği ile iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada zemine %5, %10, %15 oranlarında kireç ilave edilerek stabilize karışım numuneleri hazırlanmış ve CBR testine tabi tutulmuştur. Saf zeminin CBR değeri %0,2 iken, %15 kireç ile stabilize edilmiş numunenin CBR değeri %7 olarak hesaplanmıştır. %5, %10, %15 kireç ilaveli stabilize numuneler hücresel dolgu ile ıslah edilerek plaka yükleme deneyi uygulanmıştır. Kullanılan her iki yöntemin de tek başına uygulandığında arzulanan taşıma kapasitesi değerine ulaşmadığı görülmüş ve bu sebeple killi yol taban zemininin öncelikle kireç ile stabilize edilip ardından hücresel dolgu ile ıslahı durumunda yatak katsayısı ve taşıma kapasitesinin arzu edilen değerlere ulaştığı tespit edilmiştir [68].

Somna ve diğ. (2011), yapmış oldukları çalışmada oda sıcaklığında kürlenmiş sodyum hidroksit (NaOH) ile aktivite edilmiş öğütülmüş uçucu kül geopolimerini incelemişlerdir. Çalışmada, alkali aktivator olarak 4.5-16.5 Molar (M) NaOH konsantrasyonlarını kullanmışlardır. Deney sonuçlarında öğütülmüş uçucu kül ile, orijinal uçucu kül karşılaştırıldığında öğütülmüş uçucu külden daha yüksek mukavemetli geopolimerlerin elde edildiği tespit edilmiştir. NaOH konsantrasyonunun 4,5 M'dan 14 M'a artışı öğütülmüş geopolimerin gücünün arttığını göstermiştir. NaOH konsantrasyonunun bu noktadan sonraki artışı geopolimer karışımın mukavemetinde azalmaya yol açtığı yapılan deneylerle tespit edilmiştir [69].

Yaghoubi ve diğ. (2018), yapmış oldukları çalışmada uçucu kül ve cürufu derin zemin karıştırma uygulamalarında geopolimer olarak kullanmışlardır. Çalışmada zemin olarak yumuşak deniz kili kullanmışlardır. Çalışmada sodyum ve potasyum bazlı sıvı alkali aktivatör kombinasyonu ile farklı uçucu kül ve cüruf kombinasyonlarını denemişlerdir. Oluşturulan kombinasyonda yapılan değişikliklerle serbest basınç deneyi, taramalı elektron mikroskobu görüntüleme ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ile değerlendirilme yapılmıştır. Deneyler 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresinden ardından yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi dayanımın %70 Na ve %30 NaOH kombinasyonu ile elde edildiği tespit edilmiştir. Cüruf içeriğinin artması da mukavemeti önemli ölçüde etkilemiştir. Yapılan çalışmada geleneksel bağlayıcılara alternatif olarak uçucu kül ve cürufun sürdürülebilir bir bağlayıcı olarak kullanılabileceği görülmüştür [70].

Sukprasert ve diğ. (2021), çalışmalarında siltli killi zemini uçucu kül (UK) bazlı geopolimer ve yüksek fırın cürufu kullanarak stabilize etmişlerdir. Çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kombinasyonları ile sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonunun etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda SC (siltli kil)/YFC (yüksek fırın cürufu) karışımı ile stabilize edilen uçucu kül bazlı geopolimerlerin serbest basınç dayanımı (UCS) değerlerinin NaOH çözeltisi ile arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma neticesinde, optimum UK:YFC oranının 20:10 olduğu tespit edilmiştir [71].

Latifi ve diğ. (2018), yapmış oldukları çalışmada düşük karbonlu sodyum silikat bazlı bir sıvı katkı maddesi ile beyaz kaolinin (düşük plastisiteli kil) ve yeşil bentonitin mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada basınç dayanımı, doğrudan kesme ve tek boyutlu sıkıştırma deneylerini yapmışlardır. Deneyler sonunda kullanılan her iki katkı için de optimum oran %6 olarak tespit edilmiştir. 7 günlük süreçte sertleşmede kayda değer bir

gelişme olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda sodyum silikat bazlı katkı maddesi, çimento, kireç gibi geleneksel katkı maddelerine bir alternatif olarak sunulmuştur [72].

Chowdary ve diğ. (2020), yapmış oldukları çalışmada YFC ve yumuşak kili yüksek su içeriğinde işlemek için 8M NaOH ile karıştırıp geopolimer bağlayıcı elde etmişlerdir. Ek olarak %0,25 ile 1,0 oranlarında 12 mm uzunluğunda polipropilen elyaf kullanmışlardır. Hazırlanmış olan deney numuneleri serbest basınç ve dayanıklılık deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda ağırlıkça %1 polipropilen elyafla güçlendirilmiş bağlayıcı oranı %30 ve aktivatör/bağlayıcı oranı 0,75 olan geopolimer ile stabilize edilmiş zeminde kayda değer bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışma ile geleneksel bağlayıcılara alternatif olarak sürdürülebilir bir bağlayıcı sunulmuştur [73].

Singhi ve diğ. (2017), yol üstyapısı için killi bir taban zemini üzerinde iyileştirme yapmışlardır. Çalışmada alkali aktivasyonu ile cüruf ve uçucu kül kombinasyonları ile iyileştirme yapılmış ve zemin gerilmesi incelenmiştir. 12 M sodyum hidroksit çözeltisi ve %50 cüruf kombinasyonu ile 25 N/mm'ye kadar gerilme artışı olduğu tespit edilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde davranışın cüruf içeriğine bağlı olarak değiştiği görülmüştür [74].

Adhikari ve diğ. (2021), uçucu kül ve geopolimer kombinasyonlu karışımlar hazırlayarak bu karışımların mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Uçucu kül, uçucu kül bazlı zemin-geopolimer karışımları hazırlamak için sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonları kullanmışlardır. Farklı oranlarda karışımlar hazırlanıp, serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde, geopolimer karışımlarının önemli ölçüde performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Yapılan karışımların mühendislik özellikleri incelendiğinde yol tabakaları açısından son derece kullanışlı olduğu tespit edilmiştir [75].

Sharma ve diğ. (2020), yapmış oldukları çalışmada molarite, sıcaklık, kütleme süresi, alkali aktivatör oranı ve su/bağlayıcı oranı gibi farklı geopolimer parametrelerin zemin üzerindeki özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, %5-20 oranlarında geopolimer karışımı, 8-12 molarite, 25-45 °C sıcaklık, 7-28 gün kütleme, 1,5-2,5 alkali aktivatör oranı ve 0,35-0,85 su/bağlayıcı parametreleri arasında zeminde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar endüstriyel atık bazlı geopolimer ile stabilizasyon yapıldığında esnek kaplamaların alt temel ve temel tabakalarında iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir. [76].

Mohammadinia ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada inşaat ve yıkım malzemelerinin geopolimer ile iyileştirildiğinde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Puzolanik bağlayıcı olarak uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmış ve farklı oranlarda kullanılan alkali aktivatör konsantrasyonlarının bağlayıcı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılan bağlayıcı oranları ise %4 uçucu kül, %2 uçucu kül+ %2 öğütülmüş yüksek fırın cürufu, %4 öğütülmüş yüksek fırın cürufu şeklindedir. Yapılan bu işlemler temel/alt temel uygulamalarında kullanılmak üzere değerlendirilmiştir. Bu çalışmada oluşturulan farklı karışımların elastik modülü, basınç dayanımı ve esneklik modülü test edilmiştir. Geopolimer ile yapılan iyileştirme sonucunda inşaat ve yıkım malzemelerinin elastik modül ve basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Cüruf bazlı geopolimer iyileştirmesi ile uçucu kül bazlı geopolimer iyileştirilmesi kıyaslandığında, cüruf bazlı geopolimer iyileştirmede daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir [77].

Totiç ve diğ. (2019), Bartın Üniversitesi Kutlubey-Yazıcılar yerleşkesinde bulunan ve taşıma gücü zayıf olan killi bir zemin üzerinde stabilizasyon yapmak için uygun uçucu kül oranını tespit etmeye çalışmışlardır. İlk olarak zemine %5-25 arasında değişen oranlarda uçucu kül ilave edilmiş ve kıvam limitlerinde meydana gelen değişim gözlemlenmiştir. Ardından optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını tespit etmek üzere standart proktor deneyi yapılmıştır. Proktor sonuçlarına göre deney numuneleri hazırlanmış ve 1, 8, 16, ve 32 günlük kürlenme süresinin ardından serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre en iyi sonuç %10 uçucu kül katkısı ve 32 gün kür süresinden elde edilen numunelerden elde edilmiştir [78].

Diallo ve diğ. (2020), killi bir zemin üzerine %2 kireç ve %5-35 arasında değişen oranlarda inşaat yıkım atığı kullanarak zemini stabilize etmişlerdir. Saf zemine elek analizi, hidrometre ve Atterberg deneyleri uygulanarak zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil olarak tespit edilmiştir. Ardından optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı tespit etmek amacıyla proktor deneyi yapılmıştır. Proktor sonuçlarına göre 38 mm çapında ve 76 mm uzunluğunda silindirik deney numuneleri hazırlanmış ve hazırlanan deney numuneleri 3, 7 ve 28 günlük kür süresinin ardından serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda en iyi performansın %2 kireç ve %20 oranında inşaat yıkım atığı ile meydana geldiği tespit edilmiştir [79].

Çoruh ve diğ. (2013), çalışmalarında bor cevheri olan borojips atığının yol alttemel tabakalarında bağlayıcılığını incelemiştir. Çalışmada serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile AASHTO esnek üstyapı hesabı yapılmıştır. Çalışma

neticesinde borojips atığı ile stabilize edilmiş alttemel tabakasında kullanılan agrega miktarında %43 ve yol yapım maliyetinde %12 azalma meydana geldiği görülmüştür [80].

Teeraulatnasuk ve Voottipruex (2019), yapmış oldukları çalışmada alkali aktivatör, çimento ve uçucu kül ile geopolimer oluşturarak zemin stabilizasyonunda kullanmışlardır. Alt temel malzemesi olarak kullanılan zemin, çimento ve geopolimer ile stabilize edilerek CBR deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde çimento ile stabilize edilmiş zeminin CBR gelişimi, uçucu kül geopolimeri ile stabilize edilmiş zemine göre daha fazla zaman aldığı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, %3-%5 çimento ve %4-%8 uçucu kül geopolimeri ile alt temel malzemesinin stabilizasyonu için uygun görülmüştür [81].

Geçkil ve diğ. (2021), siyah karbonun zemin ıslahında kullanılması sonucu esnek yol üstyapı tabaka kalınlığı ve maliyetine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla, zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20 oranlarında siyah karbon ilave ederek katkılı zemin numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan saf ve katkılı numuneler sırasıyla standart proktor, serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutularak, en efektif katkı oranı %10 olarak belirlenmiştir. Ardından AASHTO 1993 metodu kullanılarak esnek yol üstyapı tasarımı yapılmış ve %10 siyah karbon katkılı zemin için 7 günlük kür süresi sonunda esnek yol maliyetinin saf zemine kıyasla %14,37 oranında azaldığı tespit edilmiştir [82].

Önceki çalışmalar incelendiğinde çeşitli, ticari, atık veya endüstriyel ürünler kullanarak zeminlerin stabilize edilmesine rağmen, taşıma gücü artırılan zeminlerin yol üstyapı kalınlık ve maliyetlerine etkisinin çok sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise hem çeşitli katkıların zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi araştırılmış hem de zeminde meydana gelen iyileştirmenin yol üstyapısına olan katkıları değerlendirilerek çalışmanın özgünlüğü ortaya konmuştur.

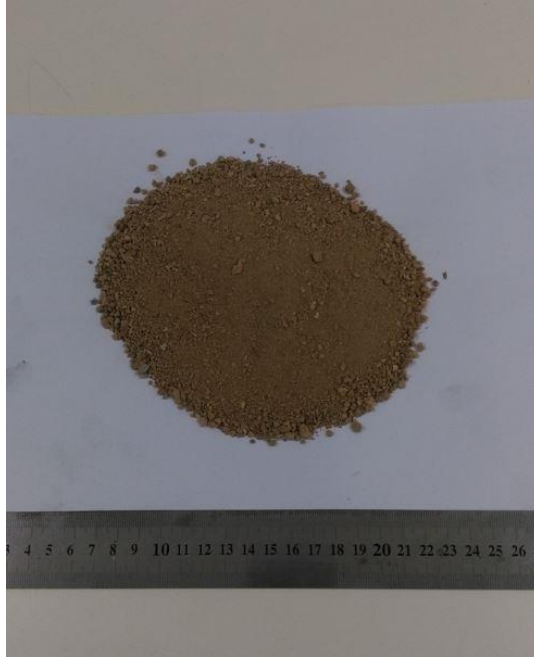
5. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması kapsamında silis dumanı (SD) ve kazan altı külünün (KAK) zemin stabilizasyonunda kullanımının karayolu üstyapı kalınlığına ve maliyetine olan etkileri araştırılmıştır. Bu bölümde, çalışmada kullanılan SD, KAK ve alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ) olarak kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi malzemelerinin özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca çalışmada uygulanan elek analizi, hidrometre, piknometre, kıvam limitleri, standart proktor, serbest basınç ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri izah edilerek, yol üstyapı tasarımında kullanılan AASHTO 1993 metodu izah edilmiştir.

5.1 Materyal

5.1.1 Zemin ve özellikleri

Çalışmada kullanılan zemin numunesi (Şekil 5.1) İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yerleşkesinden (Şekil 5.2) temin edilmiştir. Zemin elek analizi, hidrometre, piknometre ve kıvam limit deneylerine tabi tutularak mühendislik özellikleri belirlenmiş ve Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1: Zemin örneği.



Şekil 5.2: Zemin temin edilen bölge [83].

Çizelge 5.1: Zemin Özellikleri.

Özellik	Birim	Değeri
Dane birim hacim ağırlığı, γ_s	gr/cm ³	2,566
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, γ_{kmaks}	gr/cm ³	1,869
Optimum su içeriği, w_{opt}	%	14,50
Likit limit, W_L	%	24,44
Plastik limit, W_P	%	19,50
Plastisite İndisi, PI	%	11,31
Sınıflandırma (Birleştirilmiş Zemin Sınıfı)	-	CL
AASTHO Sınıflandırması	-	A-6

5.1.2 Silis dumanı (SD) ve özellikleri

Silis dumanı (SD), metal silisyum ve silisyum alaşımlarının üretilmesi esnasında baca gazlarından toz halinde açığa çıkan endüstriyel bir atık üründür [84]. Silis dumanı elde edilen fabrikalardan biri Antalya Etibank Elektrometalurji Firması'dır. Firmanın SD üretim kapasitesi yılda 360-400 ton civarında değişmektedir. Sadece bir fabrikada açığa çıkan yüksek miktar Türkiye ve Dünya genelinde düşünülünce ciddi miktarlarda silis dumanının açığa çıktığı ve bunun büyük çevre sorunlarına yol açtığı söylenebilir [85]. Açığa çıkan yüksek miktardaki silis dumanını bertaraf etmek, insan sağlığı ve çevreyi korumak maksadıyla birçok alanda olduğu gibi inşaat sektöründe de SD kullanılmaktadır. Bu çalışmada, zemini stabilize etmek için SD kullanılmakla birlikte çevreci bir proje de gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Çalışmada kullanılan silis dumanı, Antalya ili Eti Elektrometalurji firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan SD'nin özellikleri Çizelge 5.2'de, numune örneği ise Şekil 5.3'te verilmiştir. Temin edilen SD, yeterli incelikte olduğundan mevcut haliyle çalışmada kullanılmıştır.

Çizelge 5.2: Silis Dumanı (SD) özellikleri.

Özellik	Bileşim (%)
Al_2O_3	1,2
CaO	0,4
Fe_2O_3	0,6
K_2O	1,4
MgO	8,8
MnO	0,1
Na_2O	1,0
SO_3	0,6
SiO_2	83,4



Şekil 5.3: Silis dumanı.

5.1.3 Kazan altı külü (KAK) ve özellikleri

Kazan altı külü (KAK), termik santrallerde kömürün yakılması sonucu açığa çıkan endüstriyel bir atık üründür. KAK, yapısal açıdan iyi bir izolasyon malzemesidir ve bu nedenle inşaat sektöründe, çatı kaplama malzemesi, tuğla, briket, sıcak asfalt ve yollarda kaymayı önleme amacı gibi pek çok alanda tercih edilmektedir [86].

Çalışmada kullanılan kazan altı külü Malatya ili Mimsan firmasından temin edilmiş ve elementel özellikleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Temin edilen KAK (Şekil 5.4) yeterli inceliğe sahip olduğundan dolayı mevcut haliyle kullanılmıştır.

Çizelge 5.3: KAK elementel özellikleri.

Özellik	Bileşim (%)
C	31,480
H	0,181
N	0,760
S	0,689



Şekil 5.4: Kazan altı külü.

5.1.4 Alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ)

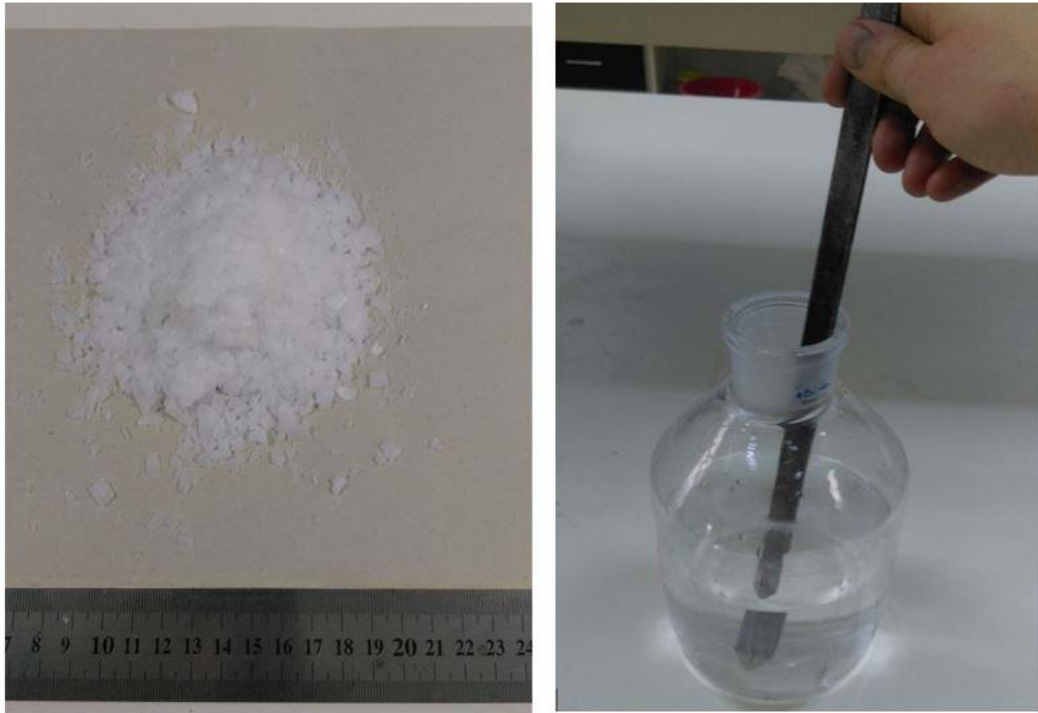
Çalışmada, zemin stabilizasyonunda kullanılan katkıların etkilerini artırmak ve daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşmasını sağlamak amacıyla sodyum hidroksit (NaOH), alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ) olarak kullanılmıştır.

Alkali aktivatör olarak kullanılan çözelti kristal halde bulunan NaOH ve saf suyun karışımı ile elde edilmiştir. Çözeltinin molaritesi, literatürdeki çalışmalar [5,96] dikkate alınarak 8 molar (M) olarak (320 gr/lt) seçilmiştir. Hazırlanan çözelti laboratuvar ortamında uygun koşullarda 24 saat muhafaza edilerek kullanıma uygun hale getirilmiştir.

Çalışmada AAÇ olarak kullanılan NaOH'un özellikleri Çizelge 5.4'te, çözeltinin hazırlanma aşaması ise Şekil 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.4: Sodyum hidroksitin (NaOH) özellikleri [87].

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40,00
Renk	Beyaz
pH	13-14
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2,13



Şekil 5.5: AAC'nin hazırlanma aşaması.

5.2 Metot

Çalışmada yapılan deneysel çalışmalar İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan deney ekipmanları ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında elek analizi, hidrometre, piknometre, kıvam limitleri, standart proktor, serbest basınç, CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde deneyler esnasında kullanılan ekipmanlar ve deneylerin yapılış yöntemleri detaylıca izah edilmiştir.

5.2.1 Elek analizi ve hidrometre deneyi

ASTM D422-63'e [88] göre zemin tanelerinin büyüklüğünü ve kuru birim hacim ağırlıklarını tespit etmek amacıyla elek analizi ve hidrometre deneyi yapılır. Yapılan bu deneyler ile zemin sınıfı tayin edilir [1].

Elek analizi için yaklaşık 500 gr zemin numunesi alınarak 24 saat boyunca 110 °C etüvde kurutulur. Kurutma işleminin ardından elek analizi sırasında kullanılacak olan eleklerin tartımı yapılır ve elekler en büyük açıklıklı elekten en küçük açıklıklı eleğe doğru sıralanarak sarsma tablasına yerleştirilir. Ardından etüvde kurutulan zemin numunesi en üstte bulunan eleğe aktarılır ve cihaz yaklaşık 10 dk boyunca çalıştırılarak eleme işlemi gerçekleştirilir. Eleme işleminin tamamlanmasının ardından herbir elek üzerinde kalan zemin numunesi tartılır ve herbir elek için geçen yüzdesi (%P) bağıntı 5.1 yardımı ile hesaplanır [89]. Şekil 5.6'da etüv ve elek analizi için kullanılan deney seti ile sarsma tablası görülmektedir.

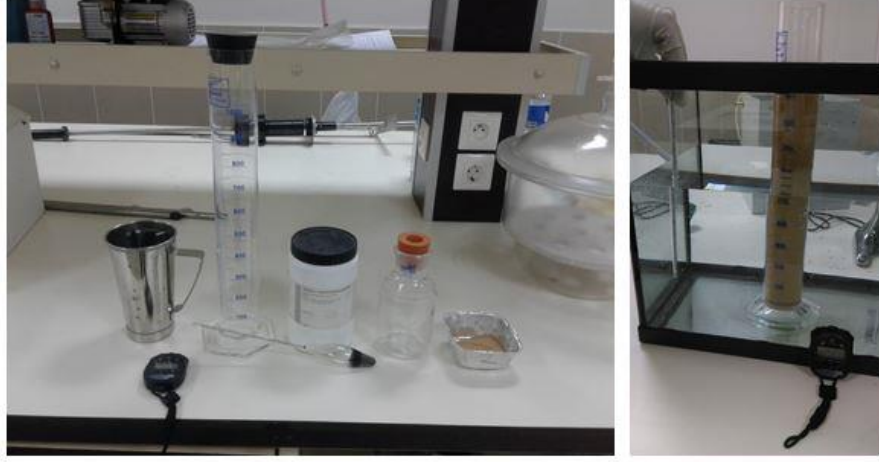
$$\%P = \frac{\text{Elekten geçen yüzde miktarı}}{\text{Elemeye tabi tutulan zemin}} \times 100 \quad (5.1)$$



Şekil 5.6: Etüv, elek seti ve sarsma tablası.

Elek analizi sonuçlarına göre No:200 (0,075 mm) elekten geçen malzeme miktarı %10'dan fazla olduğunda, No:200 elek altında kalan malzemenin boyutunu tespit etmek amacıyla hidrometre deneyi yapılır. Hidrometre deneyi için sodyummetafosfat (Na_2PO_3) solüsyonu hazırlanır. Hazırlanan solüsyon ve 50 gr zemin numunesi karıştırılarak 24 saat boyunca bekletilir. Ardından 1000 ml'lik silindirik cam kap içinde saf su ile süspansiyon hazırlanarak 1 dk boyunca 60 kez çalkalanır. Hazırlanan süspansiyon deney boyunca sabit

sıcaklık (oda sıcaklığı) sağlayan bir su banyosuna yerleştirilir. Deney başlangıcından itibaren hidrometre aleti yardımıyla 1, 2, 5, 10, 15, 30, 120, 240 ve 1440 dk ölçümleri yapılarak zemin tane çapı ve yüzdesi hesaplanır [89]. Şekil 5.7’de hidrometre deney düzeneği ve yapım aşamaları verilmiştir.



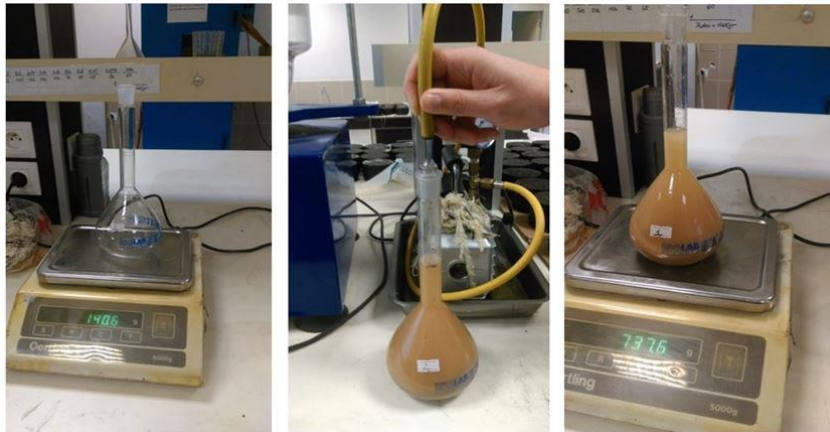
Şekil 5.7: Hidrometre deneyi.

5.2.2 Piknometre deneyi

Zeminin özgül ağırlığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen piknometre deneyi ASTM D854’e [90] uygun olarak yapılmaktadır. Deney 150 gr zemin numunesi kullanılarak yapılır. Başlangıçta balon cam joje tartılır (M_1), ardından zemin numunesi balon joje içerisine konularak tartılır (M_2). Sonrasında balon joje saf su ile doldurularak vakumlanır ve tartılır (M_3). Boş balon joje de saf su ile doldurulup vakumlanır ve tartılır (M_4) [89]. Piknometre deney aşamaları Şekil 5.8’de görülmektedir.

Özgül ağırlık (GS) hesabı (5.2) bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

$$GS = (M_2 - M_1) / [(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)] \quad (5.2)$$



Şekil 5.8: Piknometre deneyi.

5.2.3 Kıvam limit (Atterberg) deneyleri

Zemin davranışının su muhtevasına bağlı değişimini tespit etmek amacıyla ASTM D4318'e [91] uygun olarak kıvam deneyleri yapılmaktadır. Bu deneyler likit limit, plastik limit ve rötre limit deneyleri olmak üzere üçe ayrılır. Bu çalışmada likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır.

5.2.3.1 Likit limit deneyi

Likit limit (LL), zeminin kendi ağırlığında akabildiği su içeriğidir. Likit limitin belirlenmesi amacıyla birden fazla yöntem mevcuttur ve Casagrande Yöntemi bunlardan biridir. 40 No'lu (0,425 mm) elekten geçen zemin numunesinden yaklaşık 50 gr kadar alınır ve içine bir miktar su konularak iyice karıştırılır. Karıştırılan zemin Casagrande aletinin tasına yerleştirilir ve üzeri spatula yardımı ile düzeltilir. Ardından oyuk açma bıçağı yardımı ile tasın içindeki numune ortadan ikiye ayrılır. Sonrasında deney aletinin kolu çevrilerek oyuğun kapanması sağlanır. Boşluk yaklaşık olarak 1 cm oluncaya kadar kol çevirme işlemine devam edilir ve vuruş sayısı kaydedilir. Aynı işlemler farklı su muhtevaları için tekrarlanır. Deney tamamlandıktan sonra su muhtevasını ve logaritmik ölçekli vuruş sayısının bulunduğu grafik çizilir ve 25 vuruşa denk gelen değer, likit limit değeri olarak kabul edilir [89]. Casagrande deney seti Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9: Casagrande deney seti.

5.2.3.2 Plastik limit deneyi

Plastik limit, zeminin kırılmadan şekil verilebilen en düşük su muhtevası değeridir. Plastik limit deneyi yapılırken 40 No'lu (0,425 mm) elekten elenmiş zemin numunesi alınır ve bir miktar su katılarak karıştırılır. Karıştırılan zemin numunesinden bir miktar alınarak cam bir

levha üzerinde el ile yaklaşık 3 mm oluncaya kadar yuvarlanır. Yuvarlanan çubukta çatlamların olduğu andaki su içeriği tayin edilir ve bu değer plastik limit değeri olarak kabul edilir [89].

5.2.4 Su içeriği tayini

Su içeriği tayini deneyi, zemin numunelerinin su içeriklerini tespit etmek maksadıyla ASTM D4959-16 [92] standartına uygun olarak yapılmaktadır. Su içeriği, bir zemin numunesinin aynı zemin numunesinin kuru ağırlığına oranı olarak tanımlanır ve yüzde olarak ifade edilir. Deney esnasında su muhtevasını belirlemek amacıyla yaklaşık 30 gr zemin numunesi daha önceden tartılan kabın (M_1) içine yerleştirilir ve tekrar tartılır (M_2). Numune etüvde 110°C 'de 24 saat boyunca kurutulduktan sonra tekrar tartılır (M_3) ve (5.3) bağıntısı yardımıyla zeminin su muhtevası ($W, \%$) hesaplanır [89].

$$W(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \quad (5.3)$$

Burada;

$W (\%)$; su muhtevası,

M_1 (gr); boş kabın kütlesi,

M_2 (gr); kap ile birlikte yaş numunenin kütlesi,

M_3 (gr); kap ile birlikte kuru numunenin kütlesidir.

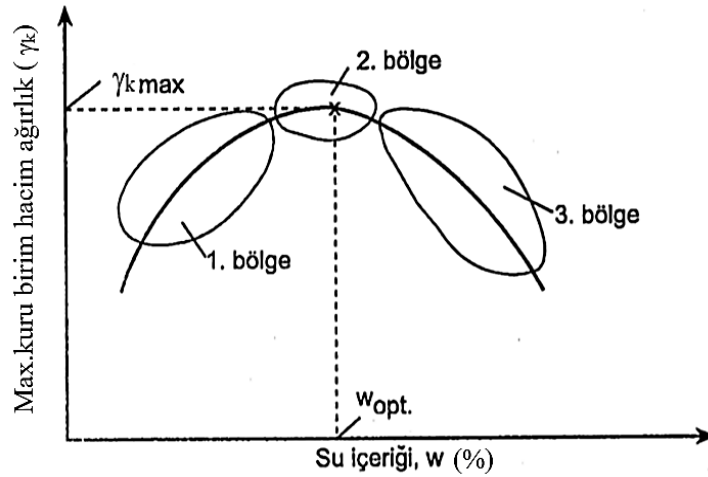
5.2.5 Zemin sınıflandırma sistemi

Mühendislik yapılarının projelendirilmesi amacıyla zemin özellikleri bilinmeli ve yorumlanabilmelidir. Bu amaçla zemin sınıflandırması için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanları ise USCS (Unified Soil Classification System-Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi) ve AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials-ABD Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Örgütleri Konfederasyonu)'dur. Birleşik zemin sınıflandırma sisteminde, zemin sınıfını tayin etmek amacıyla granülometri eğrisi, likit limit ve plastisite indisi (PI) değerleri bilinmelidir. Bu değerler kullanılarak zemin sınıfı tayin edilir [2]. Şekil 2.4'de verilen birleşik zemin sınıflandırma sistemi akış şeması esas alınarak USCS yöntemine göre zemin sınıfı tayin edilir.

AASHTO zemin sınıflandırma sistemi ise daha çok yol mühendisliği uygulamalarında tercih edilmektedir. AASHTO zemin sınıflandırma sistemine göre, zeminler yedi ana grup halinde incelenmektedir [25]. Zemin sınıfı tayin edilirken, zemin tane çap dağılımı ve kıvam limitleri belirlenerek Şekil 2.2’de verilen şema taranarak AASHTO yöntemine göre zemin sınıfı tayin edilir.

5.2.6 Standart proktor deneyi

Standart proktor deneyi, zemin içindeki havanın su ve çeşitli mekanik araçlar vasıtasıyla dışarı atılıp zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) ile optimum su muhtevasının (w_{opt}) belirlenmesi esasına dayanır. Deney esnasında sıkıştırılmış zeminin (γ_k) ve (w_{opt}) ilişkisi Şekil 5.10’da verilmiştir. Şekilde verilen ilişki incelendiğinde; 1. bölgede su içeriğinin artışıyla kuru birim hacim ağırlığının arttığı, 2. bölgede kuru birim hacim ağırlığının maksimum değerine ulaşıldığı ve 3. bölgede artan su miktarı ile birlikte kuru birim hacim ağırlığının azaldığı gözlemlenmektedir [3].



Şekil 5.10: Sıkıştırılmış zemin γ_k -w ilişkisi [3].

Standart proktor deneyi ASTM D698-12’ye [93] uygun olarak yapılmaktadır. Deney esnasında kullanılan kalıp ebatları çap (d)=105 mm, yükseklik (h)=115,5 mm ölçülür ve hassas terazide tartılarak kalıp ağırlığı kaydedilir. Deneyde kullanılacak zemin numunesi etüvde 110°C’de 24 saat boyunca kurutularak kullanıma hazır hale getirilir. Ardından zemine daha önceden belirlenmiş olan oranlarda su ilave edilerek homojen bir karışım hazırlanır ve proktor kalıbına 3 tabaka halinde serilerek her tabakaya 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile 25 serbest vuruş yapılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Aynı işlemler farklı su içerikleri için tekrarlanır ve her sıkıştırma işleminin ardından numunelerin su içeriklerini tespit etmek amacıyla numune alınarak etüvde kurutulur ve su içeriği belirlenir.

Ardından numunelerin doygunluk eğrisi çizilerek maksimum kuru birim hacim ağırlığı ile optimum su içerikleri tayin edilir [3]. Standart proktor deneyinin yapım aşamaları Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11: Standart proktor deney aşamaları.

5.2.7 Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyi, kohezyonlu zeminlerde zeminlerin kayma mukavemetini tespit etmek amacıyla ASTM D2166’ya [94] uygun olarak yapılmaktadır [3].

Serbest basınç deneyi numuneleri 38 mm çapında 76 mm yüksekliğinde paslanmaz çelikten özel olarak üretilen deney kalıbı kullanılarak hazırlanır. Standart proktor deney sonuçlarından elde edilen veriler esas alınarak saf ve farklı katkı oranlarında deney numuneleri hazırlanır. Belirlenen kombinasyonlarda hazırlanan homojen zemin karışımları deney kalıbına 4 tabaka halinde ve her tabakaya 10 vuruş olacak şekilde deney kalıbında sıkıştırılarak kalıptan çıkarılır. Hazırlanan deney numuneleri farklı kür sürelerini tamamlamaları için dış ortamdan etkilenmeyecek şekilde paketlenip uygun koşullarda kür süreleri boyunca muhafaza edilir. Serbest basınç deney kalıbı ve numunelerin hazırlanış aşamaları Şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.12: Serbest basınç deney kalıbı ve deney aşamaları.

Kür sürelerini tamamlayan serbest basınç deney numuneleri deney setine yerleştirilerek deneye tabi tutulur. Deney sonunda meydana gelen şekil değiştirme ve deformasyon esas alınarak serbest basınç dayanım değerleri tespit edilir [95]. Şekil 5.13’de serbest basınç deney seti ve deney sonunda numunede meydana gelen deformasyon, Şekil 5.14’de serbest basınç numunelerinin deney sonrası görünüşleri verilmiştir.



Şekil 5.13: Serbest basınç deney seti.



Şekil 5.14: Serbest basınç deney numunelerinin deney sonrası görüntüsü.

5.2.8 Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

Kaliforniya Taşıma Oranı (California Bearing Ratio-CBR) deneyi, 1935 mm² alana sahip bir pistonun 1,27 mm/dk hızla zemine doğru ilerlemesi ile meydana gelen yük-penetrasyon bağıntısı yardımıyla taşıma gücünün hesaplanması esasına dayanır. CBR deneyi, ASTM D1883-21 [96] standartına uygun olarak yapılır [93]. Deney numuneleri hazırlanırken 150 mm çapında, 127,3 mm yüksekliğinde paslanmaz çelikten üretilen kalıplar kullanılır. Deney esnasında kullanılacak zemin etüvde 110°C’de 24 saat boyunca kurutularak kullanıma hazır hale getirilir ve ardından belirlenen kombinasyonlarda homojen stabilize karışım numuneleri hazırlanarak CBR kalıbına 3 tabaka halinde ve her tabakaya 56 vuruş olacak şekilde sıkıştırılır. Numunenin üst yüzeyi tesviye edilerek farklı kür sürelerini tamamlamak üzere uygun koşullarda muhafaza edilir. Şekil 5.15’de CBR numuneleri hazırlanış aşamaları görülmektedir.



Şekil 5.15: CBR deney aşamaları.

Kür sürelerini tamamlayan CBR numuneleri, CBR deney setine yerleştirilerek deneye tabi tutulur. Deney sonunda 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon için CBR değerleri belirlenir. Şekil 5.16'da CBR deney seti görülmektedir.



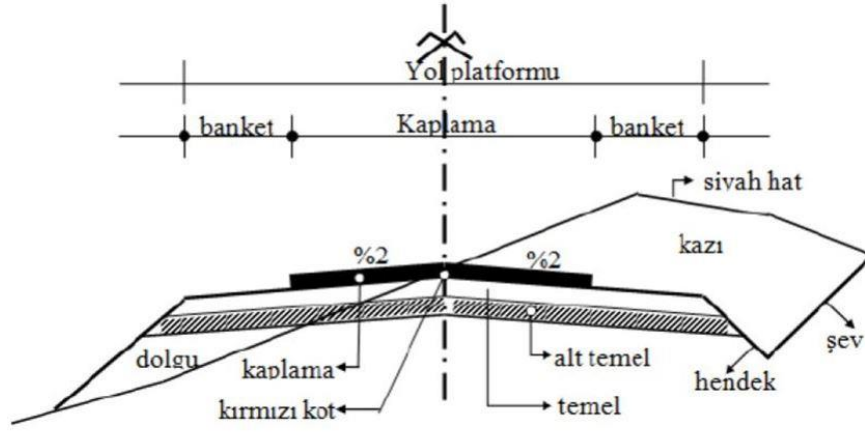
Şekil 5.16: CBR deney seti.

Deney sonunda elde edilen CBR değeri, pistonun zemine 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon yapması için uygulanan yük değerinin, pistonun standart kırmataş numunesine aynı derinlikte batması için uygulanan yük değerine bölünmesi ile bulunan sonucun yüzde olarak ifadesidir. Hesaplamalar, (5.4)'de verilen bağıntı yardımı ile yapılmaktadır. Değerlendirmede 2,5 mm ve 5 mm için hesaplanan penetrasyon değerlerinden büyük olan değer alınır [3].

$$CBR = \frac{\text{Malzemenin 2,5 mm ve 5 mm penetrasyonu için gerekli yük}}{\text{Standart kırmataş malzemenin 2,5 mm ve 5 mm penetrasyonu için gerekli yük}} \quad (5.4)$$

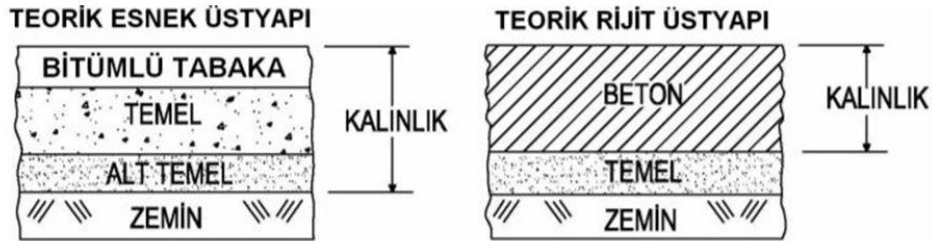
5.3 Yol Üstyapı Tasarımı

Yol gövdesi, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Altyapı, yarma ve dolgulardan meydana gelirken üstyapı ise kaplama, temel ve alttemel tabakalarından meydana gelen ve trafik yükünü altyapıya aktaran tabakalı yapıdır. Bu tabakaların kalınlıkları yoldan geçen trafiğe (miktarı ve cinsine), iklime ve taban zeminin taşıma gücüne bağlıdır [98]. Şekil 5.17'de tipik bir yol enkesiti ve elemanları verilmiştir.



Şekil 5.17: Tipik yol enkesiti ve elemanları [98].

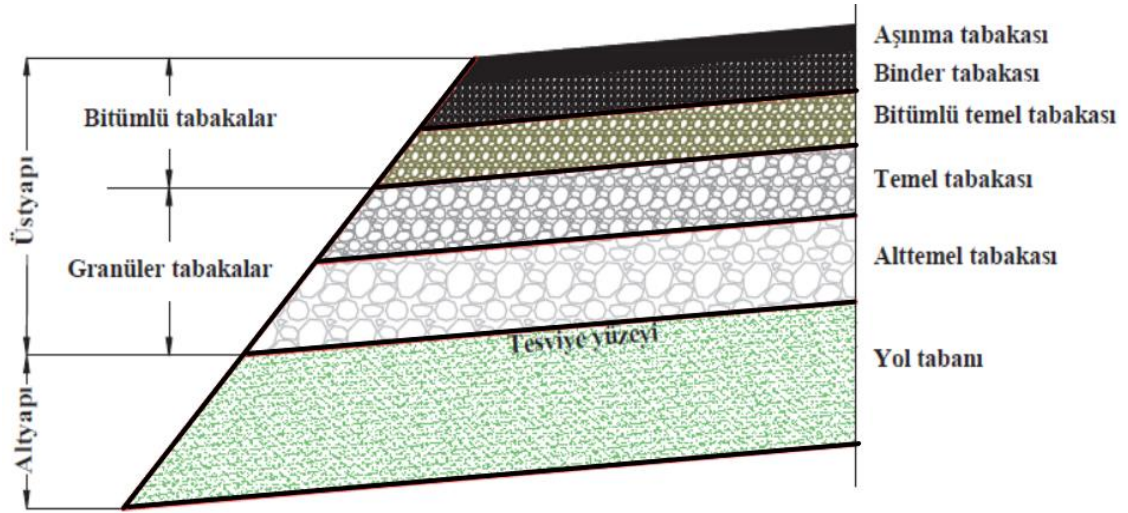
Yol üstyapısı esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak bitüm kullanılan esnek üstyapı kaplama, temel ve alttemel tabakalarından meydana gelmektedir. Rijit üstyapılar, çimentodan yapılan beton plak ve temel tabakalarından oluşmaktadır. Kompozit kaplamalar ise bozulmuş esnek kaplamalar üzerine beton kaplama veya bozulmuş beton kaplama üzerine bitümlü sıcak karışım takviyesi ile elde edilirler [98]. Şekil 5.18’de üstyapı tipleri görülmektedir.



Şekil 5.18: Esnek ve rijit üstyapı [95].

5.3.1 Esnek üstyapı tasarımı

Esnek üstyapı tasarımı yapılırken proje ömrü, tabaka kalınlığı, servis kabiliyeti, güvenilirlik, iklim ve çevre koşulları dikkate alınır. Trafik yüküne doğrudan maruz kalan kaplama tabakası sathi kaplama veya asfalt betonu kaplama olarak yapılabilir [98]. Şekil 5.19’da esnek üstyapı kesit görünümü sunulmuş ve esnek üstyapıyı oluşturan tabakalar gösterilmiştir.



Şekil 5.19: Esnek üstyapı kesit görünümü [98].

Esnek üstyapı projelendirilmesi yapılırken AASHTO 1993 [99] esas alınarak (5.5) bağıntısı ile tabaka kalınlıkları hesaplanmaktadır [98].

$$\log(T_{8.2}) = Z_R \times S_0 + \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log(M_R) - 8.07 \quad (5.5)$$

Bu bağıntıda:

- $T_{8.2}$: 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü sayısı,
- ΔPSI : Servis kabiliyetindeki azalma miktarı,
- Z_R : Standart normal sapma,
- S_0 : Toplam standart sapma,
- SN : Üstyapı sayısı (inç),
- M_R : Esneklik modülü (psi).

AASHTO (1993) Tasarım Rehberine göre tabaka kalınlıkları hesaplanırken aşağıda sıralanan esaslar göz önüne alınmaktadır [98].

5.3.1.1 Üstyapı proje süresi (performans periyodu)

Proje süresi, yolun başlangıç servis kabiliyetinden (P_0) son servis kabiliyetine (P_t) kadar geçen süre olarak tanımlanır. Proje süresi yolun kullanım biçimi ve ekonomik olanaklar göz önüne alınarak belirlenir. Proje ve analiz süresi eşit alınarak bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalı yollar için 20 yıl, sathi kaplamalı yollar için 10 yıl alınması tavsiye edilir [98].

5.3.1.2 Trafiğin değerlendirilmesi

Üstyapı projelendirilmesi yapılırken kalınlığı etkileyen en önemli faktörlerden biri trafik yükleridir. Projelendirme maksadıyla, karayolu üzerinden geçen çeşitli dingil yükleri 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil tekerrür sayısına dönüştürülerek trafik yükleri hesaplanır [98].

İlk gün için günlük trafik (t_0) ve trafik artış katsayısı (r) ise,

(t) sene sonraki günlük trafik;

$$t_t = t_0 \times (1 + r)^t \quad (5.6)$$

Ortalama günlük proje trafiği (t_p);

$$t_p = 0.4343 \times (t_t - t_0) \div \log(t_t \div t_0) \quad (5.7)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Yoldan proje süresi boyunca geçecek toplam trafik (T_p) ise,

$$T_p = t_p \times 365 \times t \quad (5.8)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır.

Bundan sonra, taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF), trafik yönü sayısı (i) ve hesap şeridi faktörü (n) belirlenerek proje süresi boyunca yoldan geçecek;

Toplam Standart Dingil Yüğü Tekrar Sayısı ($T_{8,2}$);

$$T_{8,2} = T_p \times \text{TEF} \times n/i \quad (5.9)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır [98].

Taşıt eşdeğerlik faktörü Çizelge 5.5’de, hesap şeridi faktörü Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.5: Taşıt eşdeğerlik faktörü [98].

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörü
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

Çizelge 5.6: Şerit dağıtma faktörü [98].

Bir Yöndeki Şerit Sayısı	Şerit Dağıtma Faktörü (n)
2	1,00
4	0,90
6 veya daha fazla	0,80

5.3.1.3 Güvenirlilik

Güvenirlilik; tasarımı yapılan üstyapıya ait proje kriterlerinin, belirlenen proje süresi boyunca, hakim trafik ve çevre koşulları altında, yoldan beklenen şartların karşılanması ve proje süresi boyunca trafik ve servis kabiliyetindeki değişikliklerin belirli sınırlarda tutulabilmesi için güvenirliliğin belirlenmesi gerekir. Güvenirliliğin standart normal sapması (Z_R) ve güvenirlilik seviyesi yol sınıfına bağlı olarak Çizelge 5.7'den seçilmektedir. Toplam standart sapma (S_0) değeri esnek üstyapılar için 0,40-0,50 aralığında değişkenlik gösterip, ortalama $S_0=0,45$ olarak alınmaktadır [98].

Çizelge 5.7: Tavsiye edilen güvenirlilik değerleri [98].

Yolu Sınıfı	Güvenirlilik Değeri, R%	Standart Normal Sapma, Z_R
Otoyollar	95	-1,645
Devlet Yolu	85	-1,037
İl Yolu	70	-0,524

5.3.1.4 Servis kabiliyeti

Yolun yüksek hız ve hacimdeki trafiğe hizmet etme kabiliyeti olan servis kabiliyeti 0-5 aralığında değişkenlik gösteren değerler ile tanımlanır. Yolun ilk servis kabiliyeti (P_0) değeri 4,2-4,5 aralığında değişkenlik göstermekte olup, esnek üstyapı projelerinde genellikle 4,2 değeri alınır. Son servis kabiliyeti (P_t) en düşük hizmet kabiliyetine bağlı olarak belirlenir [98]. Son servis kabiliyeti (P_t) trafiğe ve yolun standartlarına bağlı olarak Çizelge 5.8'den seçilir.

Çizelge 5.8: Son servis kabiliyetinin seçimi [98].

Yol Sınıfı	P_t
Otoyollar, Devlet Yolları	2,5
İl Yolları	2,0

5.3.1.5 Esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının kontrolü

Esnek üstyapı kalınlıkları hesabında; (5.10) eşitliğinde a_1 , a_2 , a_3 kaplama, temel ve alttemel tabakalarının izafi mukavemet katsayılarını, D_1 , D_2 , D_3 kaplama, temel, alttemel tabaka kalınlıkları, M_2 , M_3 ise temel ve alttemel tabakası drenaj katsayılarını göstermektedir [98]. Esnek üstyapı için tabaka katsayıları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.9: Esnek üstyapı için tabaka katsayıları [98].

Tabaka Cinsi	Marshall Stabilitesi, (kg)	CBR (%)	İzafi Mukavemet Katsayısı, (a)
Kaplama			
Tabakası			
Aşınma	≥ 900	-	0,42
Binder	≥ 750	-	0,40
Bitümlü Temel	≥ 600	-	0,36
Temel Tabakası			
Granüler Temel	-	≥ 100	0,14
Plent-Miks	-	≥ 120	0,15
Temel			
Alttemel			
Tabakası			
Kum-Çakıl	-	≥ 30	0,11
Alttemel			
Kırmataş	-	≥ 50	0,13
Alttemel			

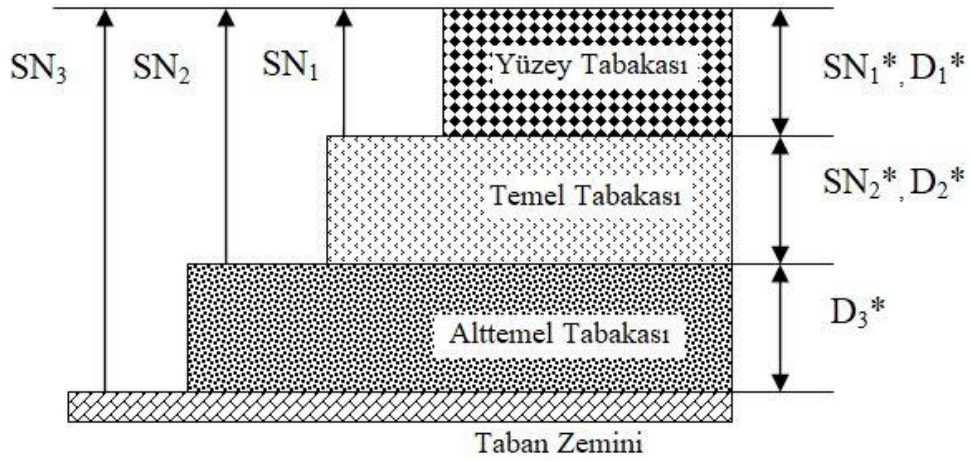
$$SN=a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times M_2 + a_3 \times D_3 \times M_3 \dots \dots \dots a_i \times D_i \quad (5.10)$$

Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi (2008)’ne göre minimum tabaka kalınlıkları Bitümlü Temel 8 cm, Plent-Miks Temel 15 cm, Granüler Temel 15 cm, Kum-Çakıl Alttemel 20 cm, Kırmataş Alttemel 15 cm’den daha az olmaması gerektiği belirtilmiştir.

Esnek üstyapı tabaka kalınlıkları Çizelge 5.10 ve Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi (2008) minumum değerlerine göre belirlendikten sonra Şekil 5.20’de verilen SN^* değerleri hesaplanarak tabaka kalınlıklarının kontrolü yapılır.

Çizelge 5.10: AASHTO 1993 minumum asfalt kaplama ve temel kalınlıkları [98].

Trafik Eşdeğer Standart Dingil Yüğü	Minimum Tabaka Kalınlığı inç (mm)	Asfalt Kaplama	Temel
50.000'den az	1 (25 mm)	4 (102 mm)	
50.001 -150.000	2 (51 mm)	4 (102 mm)	
150.001-500.000	2,5 (64 mm)	4 (102 mm)	
500.001 – 2.000.000	3 (76 mm)	6 (152 mm)	
2.000.001 – 7.000.000	3.5 (89 mm)	6 (152 mm)	
7.000.000'dan çok	4 (102 mm)	6 (152 mm)	



Şekil 5.20: Esnek üstyapı sayıları [98].

SN_1 : Temel tabakası üzerine gereken SN,

SN_2 : Alttemel tabakası üzerine gereken SN,

SN_3 : Taban üzerine gereken SN,

* : Üstyapıda kullanılan gerçek değer olup gerekli değere eşit veya büyük olmalıdır.

$$D_1^* \geq SN_1 / a_1$$

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \geq SN_1$$

$$D_2^* \geq (SN_2 - SN_1^*) / a_2 m_2$$

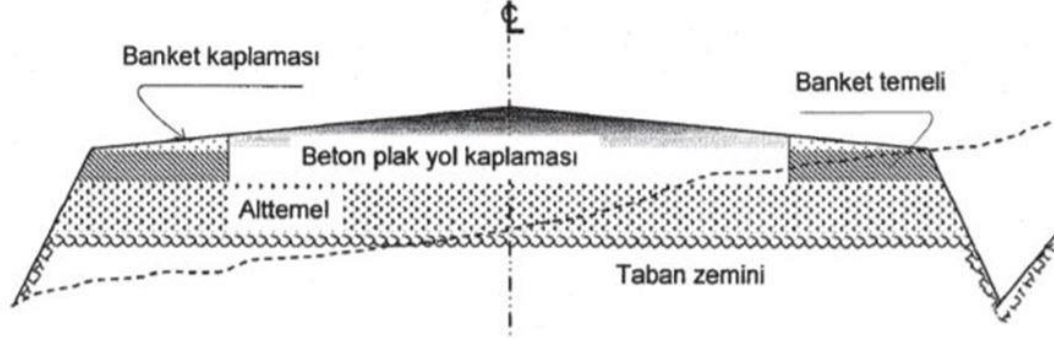
$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$D_3^* \geq (SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)) / a_3 m_3 \text{ şartları sağlanmalıdır [98].}$$

5.3.2 Rijit üstyapı tasarımı

Bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılarak inşa edilen kaplama türü 'rijit yol' olarak tanımlanmaktadır. Rijit yollar üstyapı taban zemini üzerine inşa edilen beton plaktan

oluşur. Beton plak, betonun sağlamış olduğu rijit davranış vasıtasıyla tıpkı bir kiriş gibi davranarak, gelen trafik yüklerini tabanın deforme olmayacağı bir değere indirgeyerek tabana iletir [100]. Şekil 5.21’de tipik bir rijit üstyapı enkesiti görülmektedir.



Şekil 5.21: Rijit üstyapı enkesiti [25].

AASHTO Tasarım Rehberi (1993) esas alınarak kaplama kalınlıkları (5.11)’da verilen bağıntı yardımı ile hesaplanmaktadır [100].

$$\log(T_{8,2} = Z_R \times S_0 + 7.35 \times \log(d + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(d+1)^{8.46}}} + (4.22 + 0.32 \times p_t) \times \log\left[\frac{S_c \times C_d \times (d^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \times \left[\frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}}\right]}\right] \quad (5.11)$$

Burada;

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

Z_R : Standart normal sapma,

S_0 : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası,

d : Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı (inç),

ΔPSI : $P_0 - P_t$ (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)'nı göstermektedir.

AASHTO 1993 Rehberi'ne göre, servis yeteneği, performans periyodu, güvenirlilik ve trafik gibi etmenler esas alınarak tabaka kalınlığı hesabı yapılmaktadır [100].

5.3.2.1 Servis yeteneği

Yolun yüksek hız ve hacimdeki trafiğe hizmet etme yeteneği olan servis yeteneği 0-5 arasında değişkenlik gösteren değerler ile tanımlanır. Başlangıç servis yeteneği (P_0), son servis yeteneği (P_t) olarak gösterilir. Son servis yeteneği değeri ise Çizelge 5.11'de görülmektedir [100].

Çizelge 5.11: Son servis yeteneği değerleri [100].

Yol Sınıfı	P_t
Otoyol, Devlet Yolu	2,5
İl Yolu	2,0

5.3.2.2 Performans periyodu

Performans periyodu, yolun hizmete açıldığı tarihten ilk takviye tabakası yapılacak olan tarihe kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Performans periyodu ile analiz periyodu değerleri birbirine eşit kabul edilip otoyol, devlet yolları ve il yolları için 30 yıl olarak seçilmesi tavsiye edilmektedir. Çizelge 5.12'de AASHTO 1993 Rehberi'ne göre önerilen periyotlar görülmektedir [100].

Çizelge 5.12: AASHTO tasarım rehberinde önerilen analiz periyotları.

Karayolu Durumu	Analiz Periyodu
Yüksek Trafikli Şehiriçi Yollar	30-50
Yüksek Trafikli Şehirlerarası Yollar	20-50
Düşük Trafikli Şehiriçi Yollar	15-25
Düşük Trafikli Şehirlerarası Yollar	10-20

5.3.2.3 Güvenirlilik

Projelendirilmesi yapılan üstyapıya ait proje kriterlerinin, proje süresi boyunca, hakim trafik ve çevre koşulları altında servis yeteneğini kaybetmeden hizmet sunabilmesi amacıyla meydana gelen değişikliklerin belirli sınırlarda tutulabilmesi için güvenirliliğin belirlenmesi gerekir. Çizelge 5.13'de AASHTO 1993 Rehberi'ne göre önerilen güvenirlilik seviyesi oranları (R) görülmektedir [100].

Çizelge 5.13: AASHTO 1993’e göre önerilen güvenilirlik seviyesi.

Yol Tipi	(R), %
Otoyol ve Devlet Yolu	80-99,9
İl Yolları	75-95
Toplayıcı Yollar	75-95
Mahalli ve Tali Yollar	50-80

5.3.2.4 Trafiğin değerlendirilmesi

Trafik yükü, rijit üstyapı tasarımında plak kalınlığını etkileyen en önemli unsurlardan biridir.

İlk gün için günlük trafik (t_0) ve trafik artış katsayısı (g) ise, (t) sene sonraki günlük trafik:

$$t_t = t_0 \times (1 + g)^t \quad (5.12)$$

Ortalama günlük proje trafiği (t_p);

$$t_p = 0.443 \times (t_t - t_0) / \log(t_t/t_0) \quad (5.13)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Hesap şeridine düşen günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g) ise;

$$W_{g,2} = t_p \times TEF \times n/i \quad (5.14)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Burada, TEF; taşıt eşdeğerlik faktörü, i ; trafik yönü sayısı ve η ; şerit dağıtma faktörüdür. TEF, analiz süresi boyunca günlük ortalama trafik hacim değerleri her taşıt grubunun belirlenen katsayısı ile çarpılır ve eşdeğer dingil sayısına dönüştürmede kullanılan değerdir. Yoldan proje süresi boyunca geçecek Toplam Standart Dingil Yüğü Tekrar Sayısı ($T_{8,2}$);

$$T_{8,2} = \Sigma W_p \times 365 \times t \quad (5.15)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Taşıt eşdeğerlik faktörü Çizelge 5.14’den, şerit dağıtma faktörü (η) Çizelge 5.15’den alınarak hesaplanır [100].

Çizelge 5.14: Taşıt eşdeğerlik faktörü.

Trafik Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörü (TEF)
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

Çizelge 5.15 Şerit dağıtma faktörü.

İki Yöndeki Şerit Sayısı	Şerit Dağıtma Faktörü(η)
2	1,00
4	0,90
6	0,80
8 veya daha fazla	0,70

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, taşıma gücü zayıf olan yol taban zemininin silis dumanı (SD) ve kazan altı külü (KAK) ile stabilizasyonu sonucu bunun karayolu üstyapısı tabaka kalınlıkları ve maliyetlerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak temin edilen zemin elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri ve piknometre deneylerine tabi tutularak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında SD ilave edilerek, zemin+SD stabilize karışım numuneleri hazırlanmıştır. Ardından, AAC'nin stabilize zemin numuneleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla zemin+SD+AAC numuneleri hazırlanmıştır. Benzer şekilde zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında KAK ilave edilerek zemin+KAK numuneleri ve ardından zemin+KAK+AAC numuneleri hazırlanmıştır. Daha sonra saf (katkısız) ve katkılı bütün karışım numuneleri standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Standart proktor deneyinden elde edilen veriler incelenerek karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ile optimum su içerikleri tespit edilmiş ve bu değerler esas alınarak serbest basınç deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan serbest basınç numuneleri 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından deneye tabi tutularak, optimum karışım oranları belirlenmiştir. Belirlenen optimum karışım oranlarına göre CBR deney numuneleri hazırlanarak 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından deneye tabi tutulmuştur. CBR deney sonucundan elde edilen verilere göre, AASHTO 1993 Tasarım Yöntemi esas alınarak karayolu esnek ve rijit üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmış ve maliyet analizleri yapılmıştır.

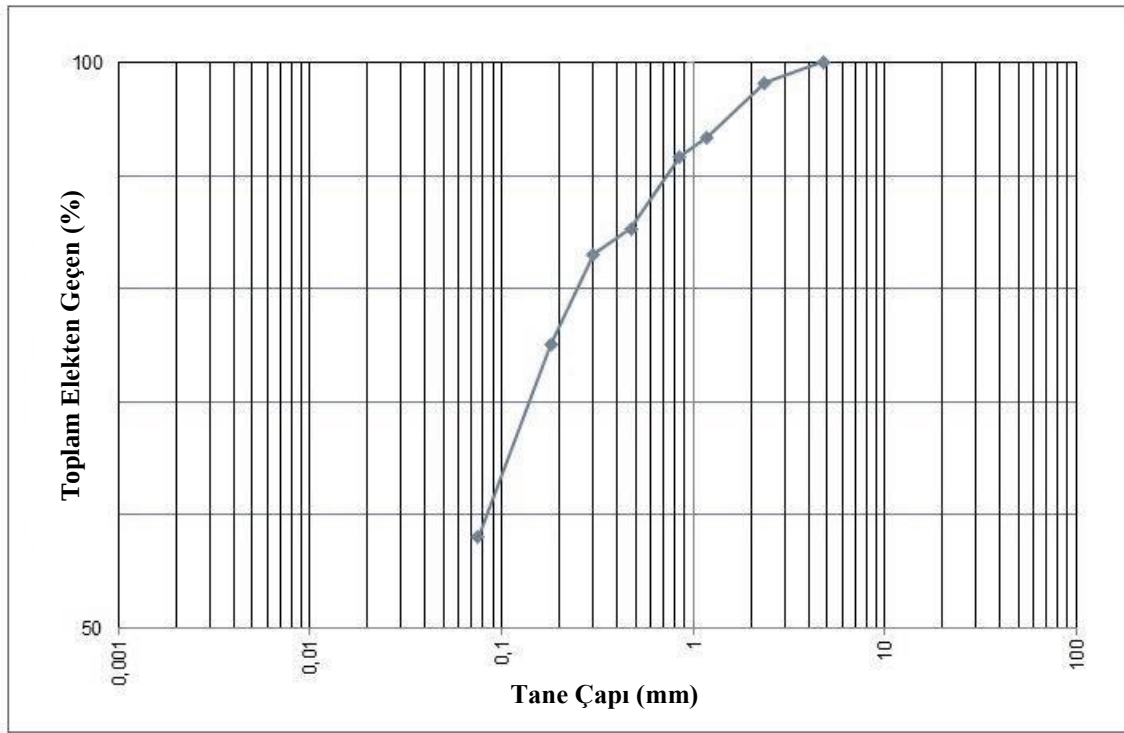
6.1 Laboratuvar Deneyleri

6.1.1 Elek analizi ve hidrometre deneyi

Kullanılan zemin numunesi etüvde 110°C'de 24 saat boyunca kurutularak elek analizine tabi tutulmuş ve zemin tane dağılımı belirlenmiştir. Elek analizi deneyinde, No:200 (0,075 mm) elekten geçen malzeme miktarı %10'dan fazla olduğu için zemin numunesi hidrometre deneyine tabi tutularak, elde edilen deney sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiş ve bu değerler esas alınarak Şekil 6.1'de verilen granülometri eğrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 6.1. Elek analizi verileri.

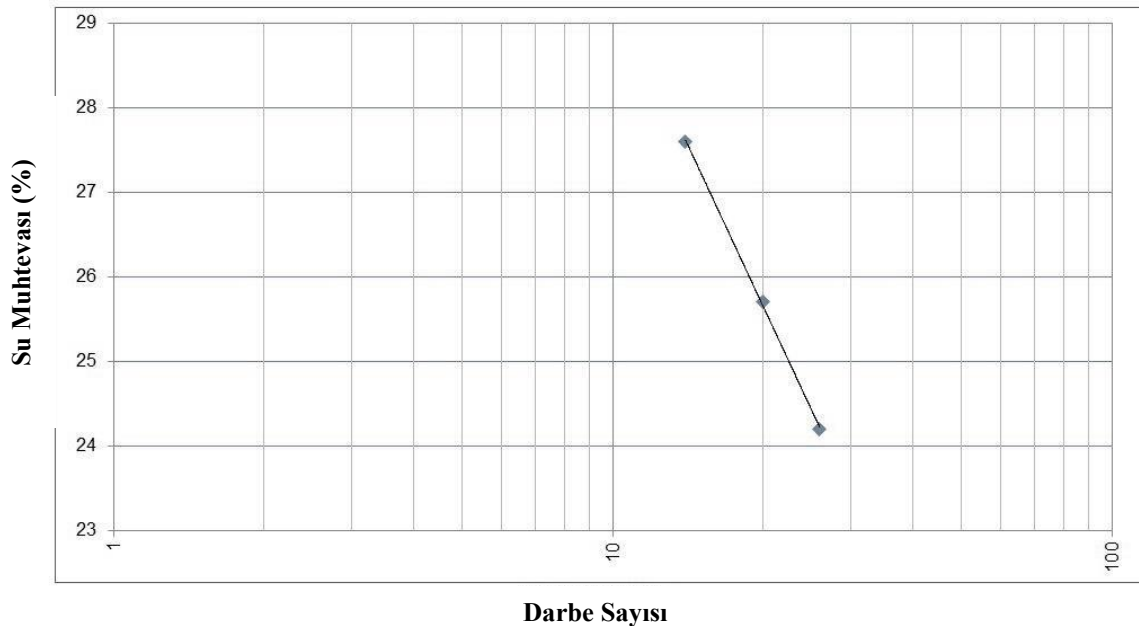
ASTM		Elekte Kalan,	Toplam Geçen,	Toplam Geçen,
Elek No	Elek Çapı, (mm)	(g)	(g)	(%)
4	4,75	0,00	600,53	100,00
8	2,36	11,21	589,32	98,13
16	1,18	29,66	559,32	93,19
20	0,85	10,8	548,86	91,40
40	0,425	39,52	509,34	84,82
50	0,3	15,09	494,25	82,30
80	0,18	49,05	445,20	74,13
200	0,075	105,84	339,36	56,51
Tava		339,36		



Şekil 6.1: Zemin granülometri eğrisi.

6.1.2 Kıvam deneyleri

Zemin numunesinin su muhtevasına bağlı olarak kıvam limit değerlerini tespit etmek amacıyla likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda likit limit (LL) değeri 24,44, plastik limit (PL) değeri 19,5 ve plastisite indisi (PI) 4,94 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.2’de likit limit-darbe sayısı grafiği verilmiştir.



Şekil 6.2: Likit limit-darbe sayısı grafiği.

6.1.3 Zemin sınıflandırması

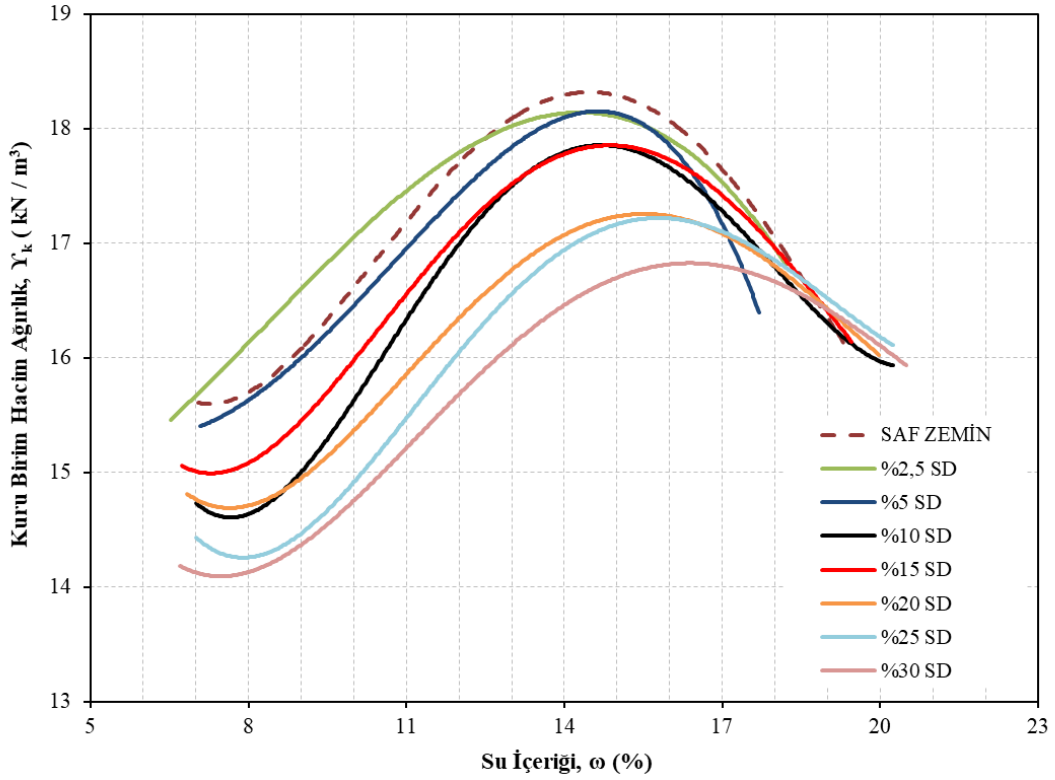
Zemin numunesine uygulanan elek analizi, hidrometre ve kıvam limit deneylerinin ardından zemin numunesinin granülometri eğrisinin oluşturulması, likit limit ve plastisite indisinin hesaplanması sonucunda Şekil 2.4’de verilen USCS akış şeması kullanılarak birleşik zemin sınıflandırmasına göre zemin cinsinin düşük plastisiteli kil (CL) olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.2’de verilen AASHTO zemin sınıflandırmasına göre ise kullanılan zeminin cinsi orta plastisiteli killi zemin (A-6) olarak tespit edilmiştir.

6.1.4 Standart proktor deneylerine ait bulgular

Standart proktor deneyleri ile saf zemin ve saf zemine ağırlıkça belirlenen oranlarda ilave edilen SD, KAK ve AAÇ’nin varlığının optimum sıvı içeriği (w_{opt} ve $w_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığına (γ_{kmaks}) etkisi incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

6.1.4.1 SD katkılı numunelere ait bulgular

Saf ve saf zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında SD ilave edilerek optimum su oranı için karışım numuneleri hazırlanmış ve standart proktor deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda saf ve katkılı karışım numunelerine ait su içeriği (w)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri (kompaksiyon eğrileri) Şekil 6.3’de verilmiştir. Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından belirlenen optimum su içerikleri (w_{opt}) ve maksimu kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmaks}) Çizelge 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.3: SD katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.

Çizelge 6.2: SD ilaveli numunelerin standart proktor deney sonuçları.

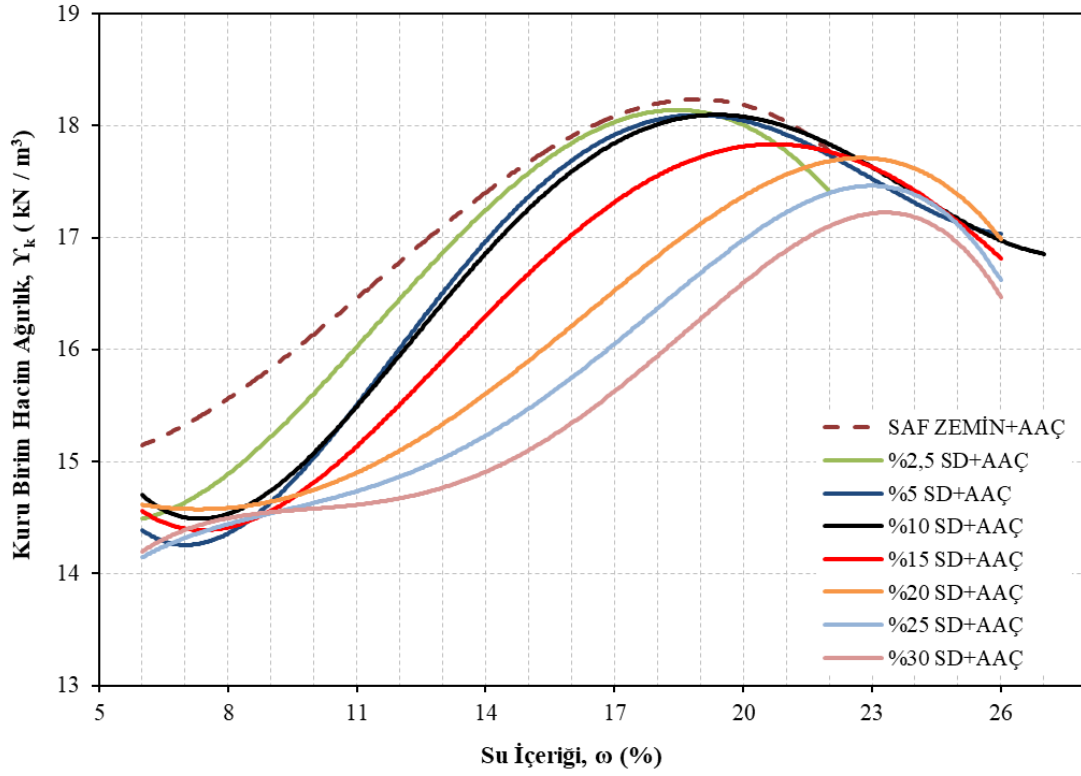
Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_k (kg/cm ³)	Optimum Su İçeriği, w (%)
Saf Zemin	18,33	14,50
Saf Zemin +%2,5 SD	18,15	14,30
Saf Zemin +%5 SD	18,15	14,60
Saf Zemin +%10 SD	17,85	14,70
Saf Zemin +%15 SD	17,85	14,90
Saf Zemin +%20 SD	17,27	15,50
Saf Zemin +%25 SD	17,22	15,80
Saf Zemin +%30 SD	16,82	16,40

Su ile gerçekleştirilen SD katkılı standart proktor deney sonuçları incelendiğinde, SD oranı arttıkça w_{opt} değerinin azaldığı, γ_{kmaks} değerinin ise arttığı gözlemlenmektedir. Meydana gelen bu değişkenliğin literatürle [5,45,49,56] uyumlu olarak SD'nin su emme kapasitesi ve ince taneli bir malzeme oluşundan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

6.1.4.2 AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelere ait bulgular

Saf zemin ve saf zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında SD ilave edilmiş ve karışım numuneleri hazırlanarak AAÇ ile standart proktor deneyi

gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda saf ve karışım numunelerine ait sıvı içeriği (w)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Karışım numunelerinin AAÇ içerikleri ($w_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklar (γ_{kmaks}) Çizelge 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.4: SD ve AAÇ katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.

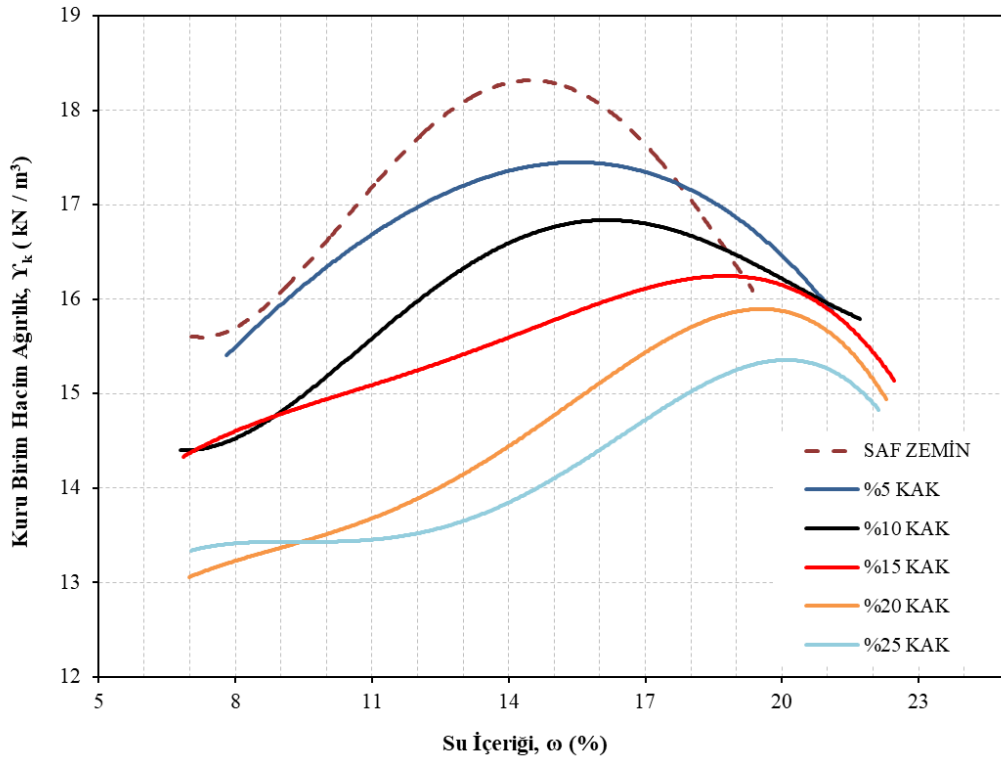
Çizelge 6.3: SD ve AAÇ ilaveli numunelerin standart proktor deney sonuçları.

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_k (kg/cm ³)	Optimum Su İçeriği, w (%)
Saf Zemin+AAÇ	18,25	18,80
Saf Zemin +%2.5 SD+AAÇ	18,15	18,40
Saf Zemin +%5 SD+AAÇ	18,10	18,90
Saf Zemin +%10 SD+AAÇ	18,10	19,40
Saf Zemin +%15 SD+AAÇ	17,85	20,70
Saf Zemin +%25 SD+AAÇ	17,46	23,00
Saf Zemin +%30 SD+AAÇ	17,22	23,30

AAÇ ile gerçekleştirilen SD katkılı deney sonuçları incelendiğinde, su ve AAÇ ile yapılan standart proktor deney sonuçlarının yakın çıktığı görülmektedir. Su ile yapılan standart proktor deneyine kıyasla AAÇ ile yapılan standart proktor deneyinde daha az su kullanılmasına rağmen benzer sonuçların elde edilmesi, AAÇ’nin zemin taneleri arasındaki sürtünmeyi azaltmasından kaynaklandığı [5] şeklinde değerlendirilmektedir.

6.1.4.3 KAK katkılı numunelere ait bulgular

Saf zemin ve ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında KAK ilave edilerek hazırlanan karışım numuneleri üzerinde su ile standart proktor deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda saf ve karışım numunelerine ait su içeriği (w)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri Şekil 6.5’de gösterilmektedir. Numunelerin belirlenen optimum su içerikleri (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmaks}) Çizelge 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.5: KAK katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.

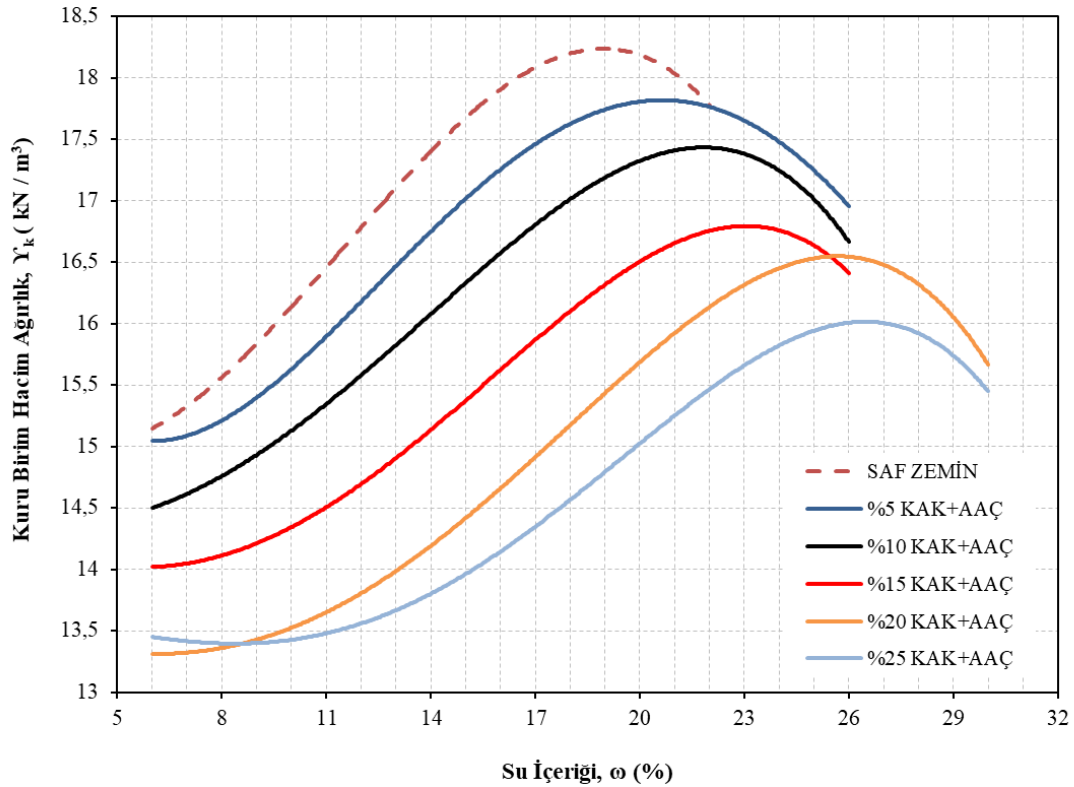
Çizelge 6.4: KAK katkılı numunelerin standart proktor deney sonuçları.

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_k (kg/cm ³)	Optimum Su İçeriği, w (%)
Saf Zemin	18,33	14,50
Saf Zemin +%5 KAK	17,46	15,50
Saf Zemin +%10 KAK	16,84	16,10
Saf Zemin +%15 KAK	16,24	18,79
Saf Zemin +%20 KAK	15,89	19,60
Saf Zemin +%25 KAK	15,35	20,10

Su ile hazırlanan KAK katkılı numunelerin sonuçları incelendiğinde, KAK oranı arttıkça w_{opt} değerinin azaldığı, γ_{kmaks} değerinin ise arttığı gözlemlenmektedir. Meydana gelen bu değişimin KAK’ın su emme kapasitesi ve ince taneli bir madde oluşundan kaynaklandığı [5,41,45,49] değerlendirilmektedir.

6.1.4.4 AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelere ait bulgular

Saf zemin ve ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında KAK ilave edilip hazırlanan karışım numuneleri üzerinde AAÇ kullanılarak standart proktor deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda saf ve katkılı karışım numunelerine ait su içeriği (w)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Numunelerin belirlenen optimum AAÇ içeriği ($w_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklar (γ_{kmaks}) Çizelge 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.6: KAK ve AAÇ katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.

Çizelge 6.5: KAK ve AAÇ katkılı numunelerin standart proktor deney sonuçları.

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_k (kg/cm ³)	Optimum Su İçeriği, w (%)
Saf Zemin+AAÇ	18,25	18,80
Saf Zemin +%5 KAK+AAÇ	17,91	20,60
Saf Zemin +%10 KAK+AAÇ	17,46	21,80
Saf Zemin +%15 KAK+AAÇ	16,80	23,10
Saf Zemin +%20 KAK+AAÇ	16,58	25,70
Saf Zemin +%25 KAK+AAÇ	16,04	26,50

AAÇ ile gerçekleştirilen KAK katkılı deney sonuçları incelendiğinde, su ile gerçekleştirilen deney sonuçlarına benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Farklı sınıflar

kullanılmasına rağmen benzer sonuçlara ulaşılması AAC'nin zemin taneleri arasındaki sürtünmeyi azaltmasından kaynaklandığı [5] düşünülmektedir.

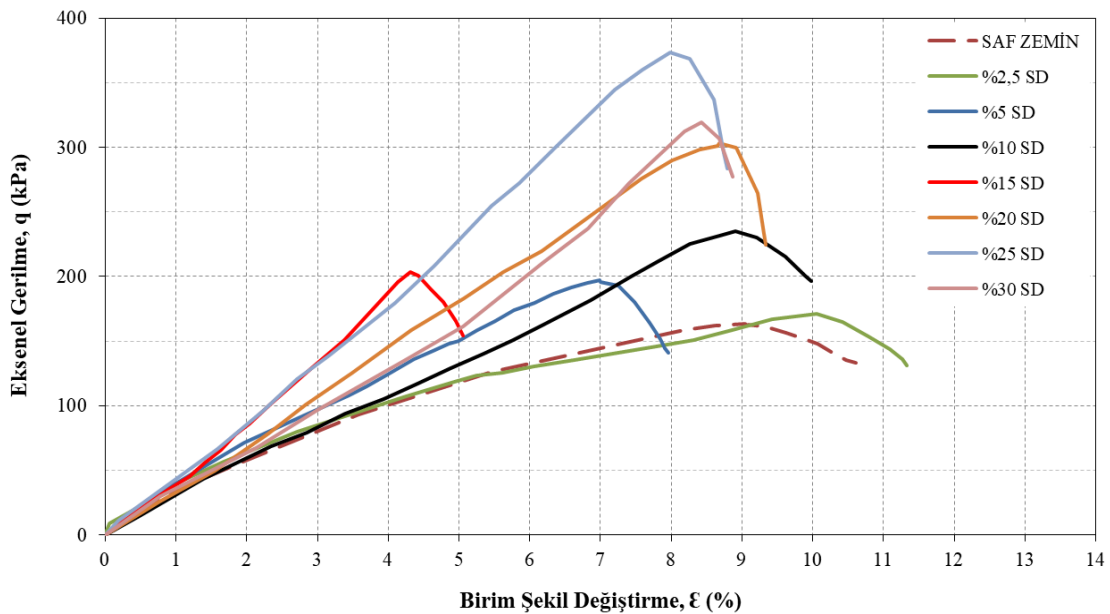
6.1.5 Serbest basınç deney bulguları

Standart proktor deneylerinden elde edilen w_{opt} ve Y_{kmaks} değerleri esas alınarak, belirlenen oranlarda katkı maddeleri ve AAC ilave edilerek serbest basınç deney numuneleri hazırlanmış ve hazırlanan deney numuneleri 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonunda, kullanılan katkı ve AAC'nin varlığı ile serbest basınç mukavemet değerlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

6.1.5.1 SD katkılı numunelerin serbest basınç deneyine ait bulgular

Standart proktor deneylerinden elde edilen w_{opt} ve Y_{kmaks} değerleri esas alınarak saf ve SD katkılı (%2,5, %5, %10, %15, %20, %25, %30) deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından 100 kN'a kadar yük uygulayabilen pres ile eksenel yüke maruz bırakılarak serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

Saf ve SD katkılı zemin numunelerinin 1 günlük kür sonunda serbest basınç deneyinden elde edilen eksenel gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) grafikleri Şekil 6.7'de verilmiştir. Çizelge 6.6'da ise deney sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri (q- ϵ) verilmiştir.

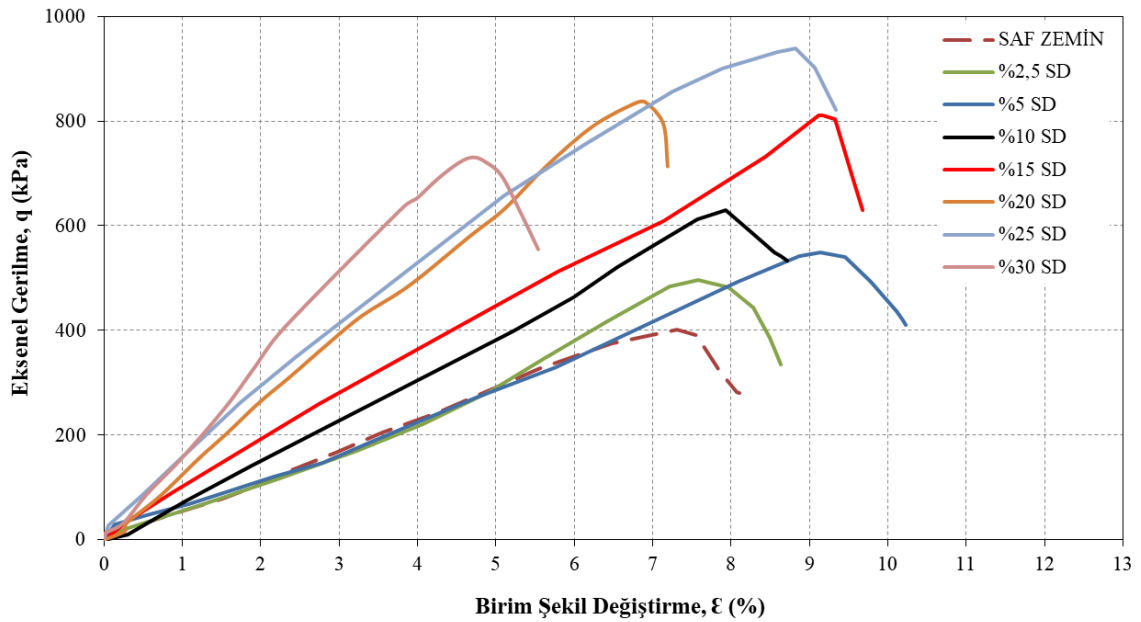


Şekil 6.7: SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.6: SD katkılı numunelerin q-ε değerleri (1 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ε (%)
Saf Zemin	163,628	9,047
Saf Zemin+%2,5 SD	170,831	10,053
Saf Zemin+%5 SD	197,078	6,984
Saf Zemin+%10 SD	234,728	8,909
Saf Zemin+%15 SD	203,193	4,313
Saf Zemin+ %20 SD	303,310	8,677
Saf Zemin+%25 SD	373,212	7,989
Saf Zemin+%30 SD	319,430	8,429

SD katkılı numunelerin 7 günlük kür sonunda elde edilen q-ε grafikleri Şekil 6.8’de verilmiştir. Çizelge 6.7’de ise deney sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri (q-ε) verilmiştir.

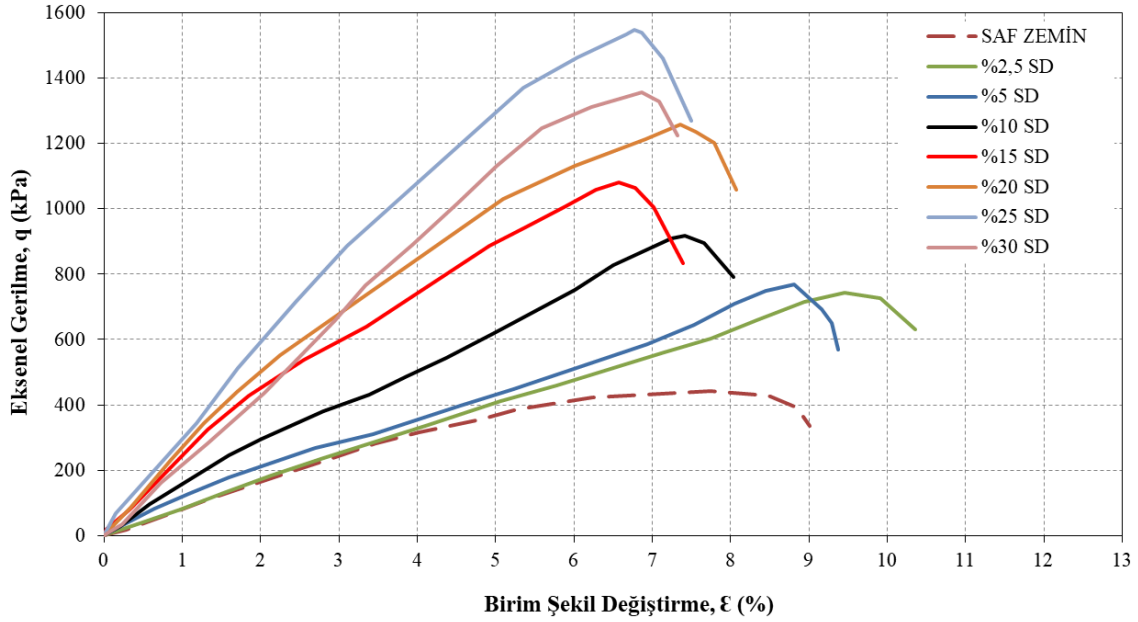


Şekil 6.8: SD katkılı numunelerin q-ε grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.7: SD katkılı numunelerin q-ε değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ε (%)
Saf Zemin	323,747	7,308
Saf Zemin+%2.5 SD	495,717	7,579
Saf Zemin+%5 SD	549,383	9,134
Saf Zemin+%10 SD	629,187	7,926
Saf Zemin+%15 SD	811,360	9,174
Saf Zemin+ %20 SD	835,097	6,915
Saf Zemin+%25 SD	939,447	8,815
Saf Zemin+%30 SD	730,708	4,714

SD katkılı numunelerin 28 günlük kür sonunda elde edilen q- ϵ grafikleri Şekil 6.9’da verilmiştir. Çizelge 6.8’de ise deney sonunda elde edilen serbest basınç deney sonuçları (q- ϵ) verilmiştir.



Şekil 6.9: SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.8: SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (28 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değişirme, ϵ (%)
Saf Zemin	442,884	8,843
Saf Zemin+%2.5 SD	741,780	9,452
Saf Zemin+%5 SD	768,049	8,811
Saf Zemin+%10 SD	916,226	7,413
Saf Zemin+%15 SD	1020,913	6,576
Saf Zemin+ %20 SD	1216,273	7,360
Saf Zemin+%25 SD	1546,275	6,766
Saf Zemin+%30 SD	1344,291	6,859

1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamalayıp, serbest basınç deneyine tabi tutulan SD katkılı numunelerin q- ϵ grafikleri ve değerleri incelendiğinde;

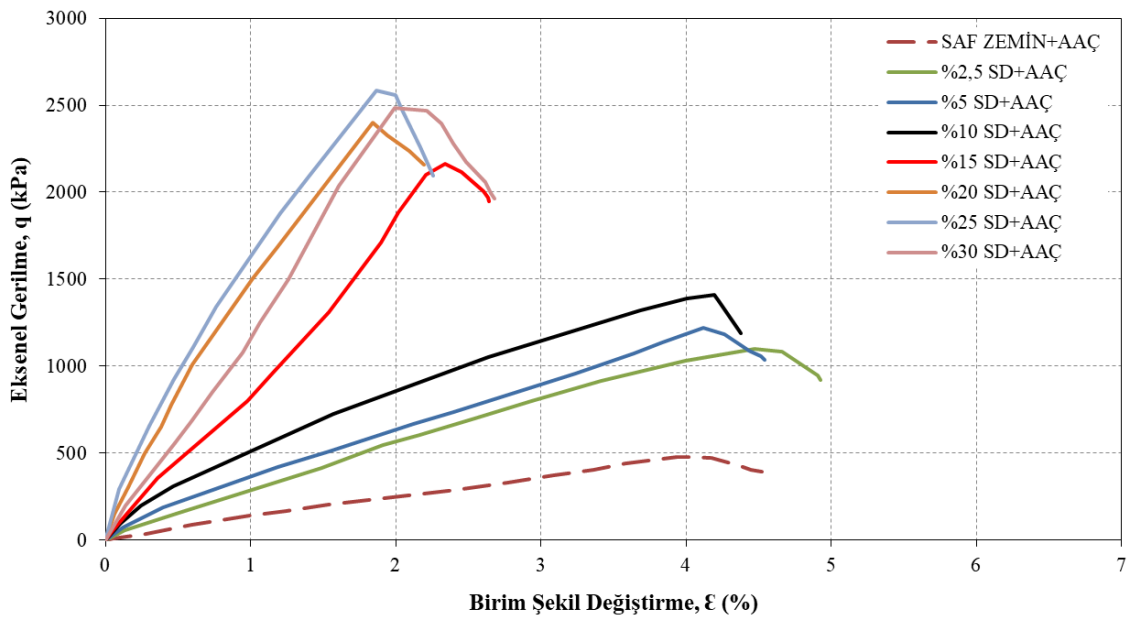
- Silis dumanı (SD) katkılı numunelerde 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda mukavemet değerlerinde artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu artış SD’nin puzolanik bir madde oluşu ve puzolanların zamanla dayanım kazandığı şeklinde değerlendirilebilir. Çünkü puzolanik maddeler su ile etkileşime girdiğinde bir süre sonra sertleşip dayanım kazanmaktadır. Sürenin artışıyla birlikte dayanımda da artış yaşanmaktadır. Yaşanan bu artışın literatür [5,41,47,95] ile uyum sağladığı görülmektedir.

- 1, 7, 28 gün kür süreleri sonunda SD katkılı numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin saf zemine kıyasla sırasıyla 2,28; 2,90 ve 3,49 kat arttığı tespit edilmiştir.
- SD katkılı numunelerde en yüksek mukavemet değerinin 28 günlük kür sonunda elde edildiği ve bu değer 1546,275 kPa olduğu belirlenmiştir.

6.1.5.2 AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin serbest basınç deneylerine ait bulgular

AAÇ kullanılarak hazırlanmış olan saf ve SD katkılı (%2,5, %5, %10, %15, %20, %25, %30) serbest basınç deney numuneleri hazırlanmış ve 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından deneye tabi tutulmuştur. Deneyi sonunda numunelerin q- ϵ grafikleri oluşturularak q ve ϵ değerleri tespit edilmiştir.

Saf zemin+AAÇ ve saf zemin+SD+AAÇ katkılı numunelerin 1 günlük kür sonunda elde edilen eksenel gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) grafikleri Şekil 6.10'da verilmiştir. Tüm deney numunelerinin tespit edilen q ve ϵ değerleri ise Çizelge 6.9'da verilmiştir.

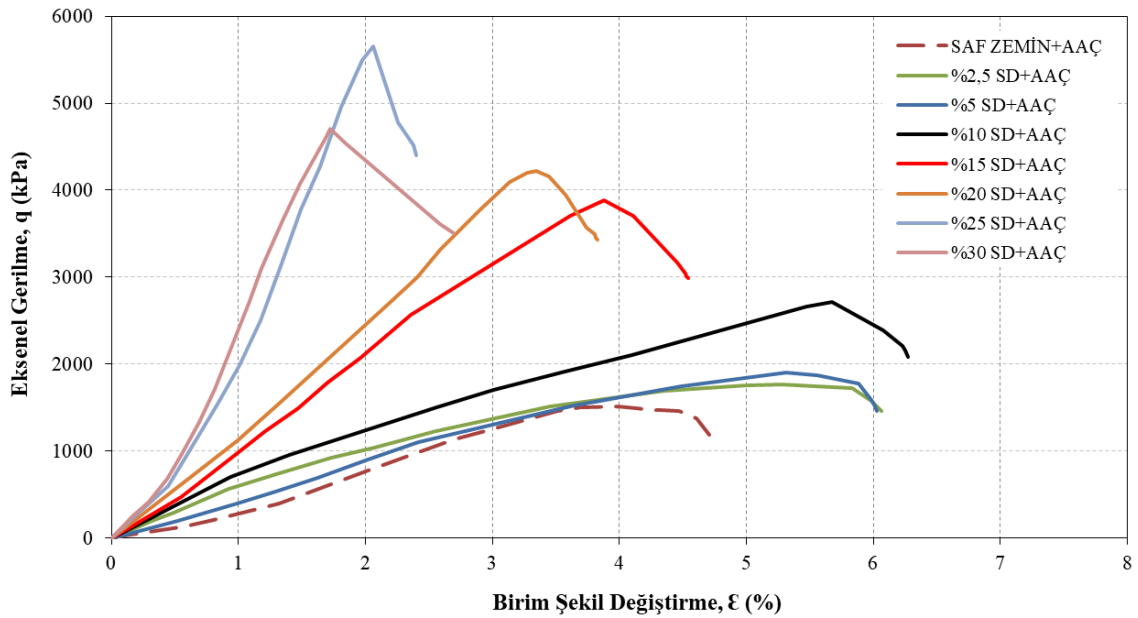


Şekil 6.10: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.9: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (1 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ϵ (%)
Saf Zemin+AAÇ	478,047	4,044
Saf Zemin+%2.5 SD+AAÇ	1098,155	4,472
Saf Zemin+%5 SD+AAÇ	1221,212	4,116
Saf Zemin+%10 SD+AAÇ	1410,296	4,195
Saf Zemin+%15 SD+AAÇ	2161,033	2,338
Saf Zemin+ %20 SD+AAÇ	2402,039	1,838
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	2586,726	1,864
Saf Zemin+%30 SD+AAÇ	2483,455	1,992

Tüm numunelerin 7 günlük kür sonunda elde edilen q- ϵ grafikleri Şekil 6.11’de verilmiştir. Tüm deney numunelerinin tespit edilen q ve ϵ değerleri ise Çizelge 6.10’da verilmiştir.

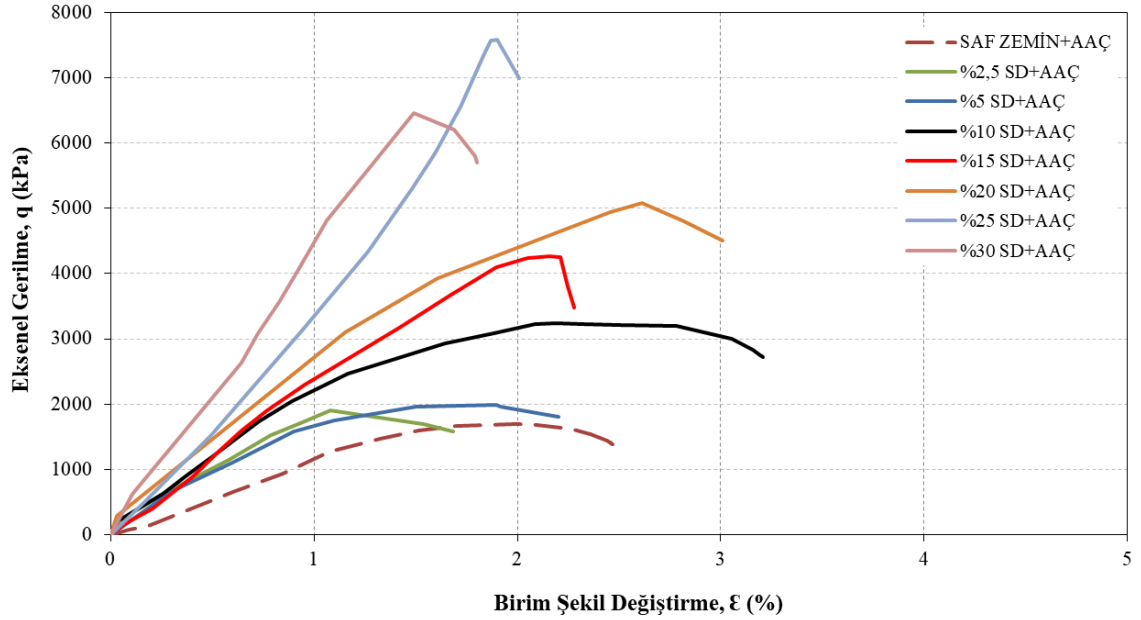


Şekil 6.11: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.10: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ϵ (%)
Saf Zemin+AAÇ	1419,921	3,738
Saf Zemin+%2,5 SD+AAÇ	1770,043	5,280
Saf Zemin+%5 SD+AAÇ	1900,526	5,310
Saf Zemin+%10 SD+AAÇ	2715,647	5,675
Saf Zemin+%15 SD+AAÇ	3883,358	3,876
Saf Zemin+ %20 SD+AAÇ	4222,564	3,346
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	5648,555	2,056
Saf Zemin+%30 SD+AAÇ	4704,640	1,723

Saf zemin+AAÇ ve saf zemin+SD+AAÇ katkılı numunelerin 28 günlük kür sonunda elde edilen aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) grafikleri Şekil 6.12’de verilmiştir. Tüm deney numunelerinin tespit edilen q ve ϵ değerleri ise Çizelge 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.12: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.11: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (28 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ϵ (%)
Saf Zemin+AAÇ	1592,896	1,974
Saf Zemin+%2.5 SD+AAÇ	1908,466	1,080
Saf Zemin+%5 SD+AAÇ	1989,277	1,896
Saf Zemin+%10 SD+AAÇ	3235,019	2,196
Saf Zemin+%15 SD+AAÇ	4271,039	2,155
Saf Zemin+ %20 SD+AAÇ	5079,178	2,614
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	7880,727	1,942
Saf Zemin+%30 SD+AAÇ	6561,273	1,489

1, 7, 28 günlük kür süreleri sonrasında serbest basınç deneyine tabi tutulan AAÇ eklenmiş SD katkılı numunelerin sonuçları incelendiğinde;

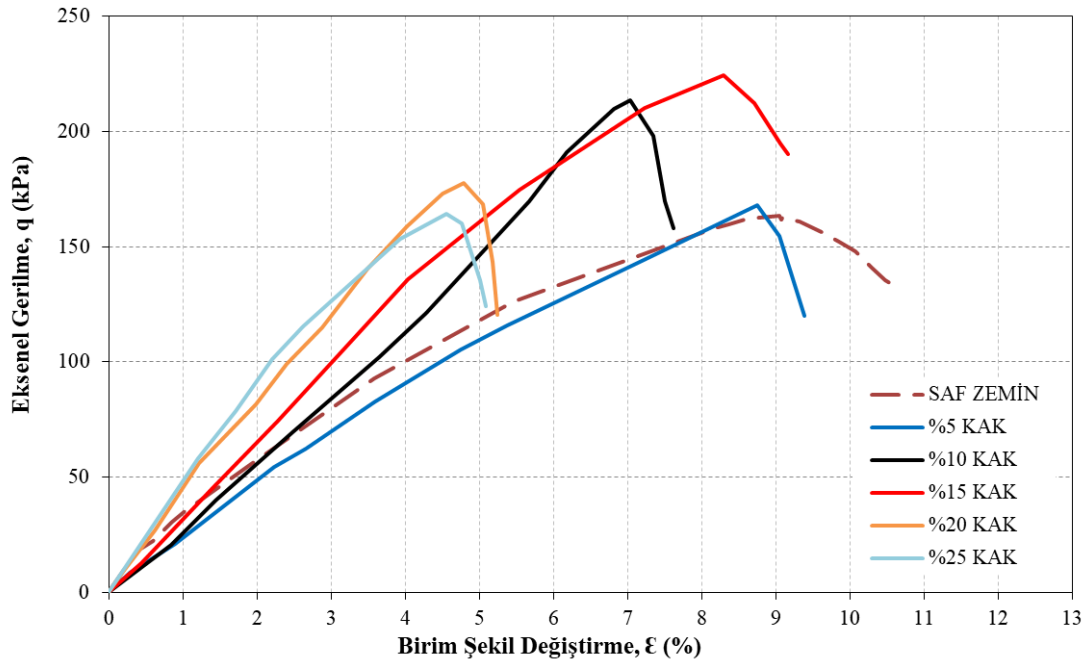
- 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun SD'nin puzolanik yapısından kaynaklandığı ve puzolanik maddelerin zamanla dayanım kazandığı [46,47] şeklinde yorumlanabilir.
- 1, 7, 28 günlük kür sonunda saf zemin+SD+AAÇ katkılı numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin saf zemine kıyasla sırasıyla 18,811; 17,450 ve 17,793 kat arttığı tespit edilmiştir.

- Saf zemin+SD+AAÇ katkılı numunelerde, en yüksek mukavemet değerinin 28 günlük kür sonunda elde edildiği ve bu değer 7880,727 kPa olduğu tespit edilmiştir.
- AAÇ ile aktive edilmiş SD katkılı numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri AAÇ kullanılmayan SD katkılı numunelerle kıyaslandığında daha yüksek elde edildiği görülmüştür. Bu durum silis dumanının yapısında bulunan alümina ve silika minerallerinin alkali ortamda aktivite olup geopolimer reaksiyonunu gerçekleştirdiğinin göstergesi olarak literatürde [5,101] kabul edilmektedir.

6.1.5.3 KAK katkılı numunelerin serbest basınç deneylerine ait bulgular

Saf zemin ve saf zemine %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında KAK ilaveli zeminler için edilerek standart proktor deneylerinden elde edilen w_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri esas alınarak serbest basınç deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

Saf ve KAK katkılı zemin numunelerinin 1 günlük kür sonunda elde edilen eksenel gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) grafiği Şekil 6.13’de verilmiştir. Tüm numunelerin tespit edilen q- ϵ değerleri ise Çizelge 6.12’de verilmiştir.

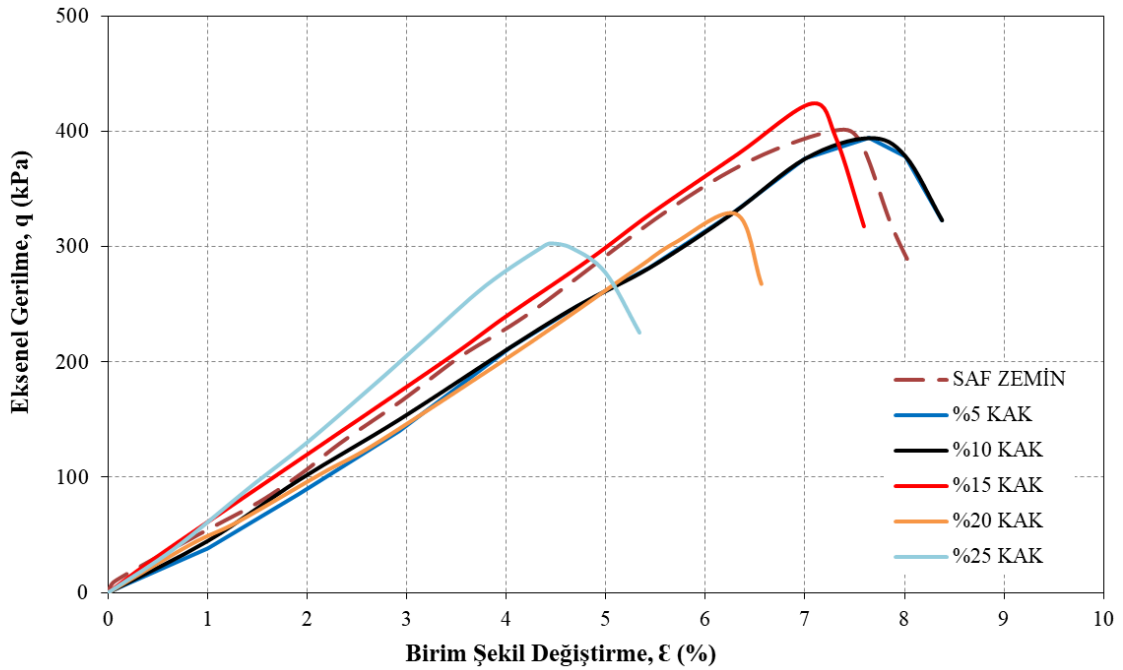


Şekil 6.13: KAK katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.12: KAK katkılı numunelerin q-ε değerleri (1 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ε (%)
Saf Zemin	163,628	9,047
Saf Zemin+%5 KAK	168,089	8,746
Saf Zemin+%10 KAK	213,399	7,028
Saf Zemin+%15 KAK	224,491	8,297
Saf Zemin+%20 KAK	177,656	4,785
Saf Zemin+ %25 KAK	164,424	4,553

Tüm katkılı numunelerin 7 günlük kür sonunda elde edilen q- ε grafikleri Şekil 6.14’de verilmiştir. Tüm numunelerin tespit edilen q-ε değerleri ise Çizelge 6.13’de verilmiştir.

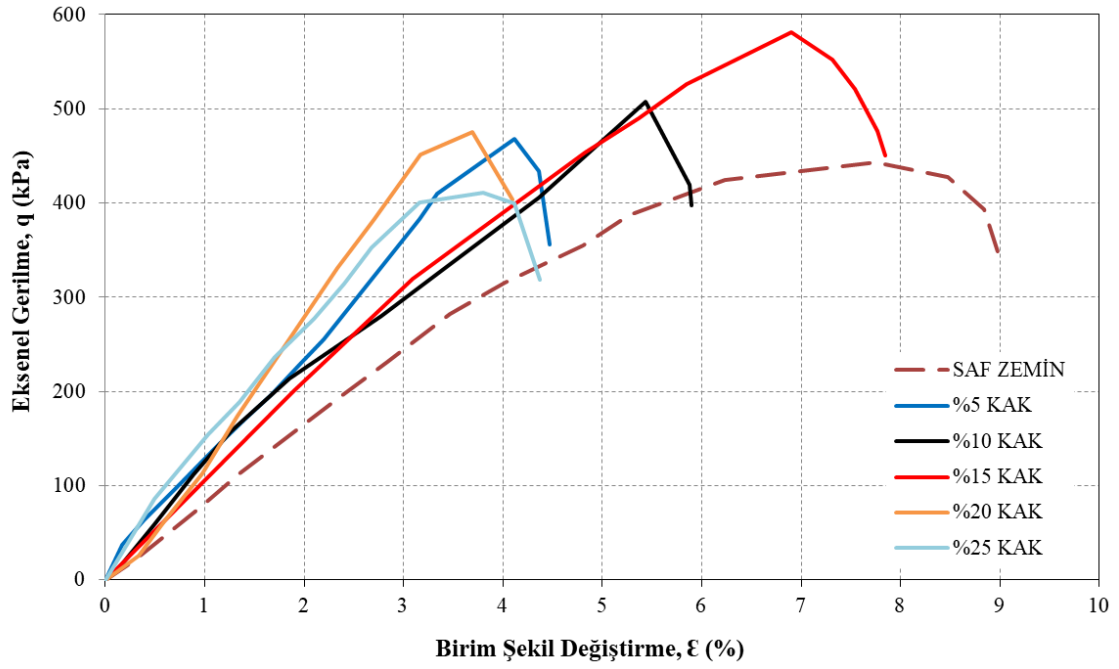


Şekil 6.14: KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.13: KAK katkılı numunelerin q-ε değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ε (%)
Saf Zemin	323,747	7,308
Saf Zemin+%5 KAK	394,024	7,639
Saf Zemin+%10 KAK	409,056	7,032
Saf Zemin+%15 KAK	424,955	7,068
Saf Zemin+%20 KAK	328,162	6,310
Saf Zemin+ %25 KAK	302,756	4,451

Tüm katkılı numunelerin 28 günlük kür sonunda elde edilen q- ε grafikleri Şekil 6.15’de verilmiştir. Tüm deney numunelerinin tespit edilen q-ε değerleri ise Çizelge 6.14’de verilmiştir.



Şekil 6.15: KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.14: KAK katkılı numunelerin q-ε değerleri (28 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ε (%)
Saf Zemin	442,884	8,843
Saf Zemin+%5 KAK	468,324	4,117
Saf Zemin+%10 KAK	507,382	5,639
Saf Zemin+%15 KAK	581,324	6,901
Saf Zemin+%20 KAK	475,438	3,390
Saf Zemin+ %25 KAK	410,581	3,805

1, 7, 28 günlük kür süreleri sonucunda, serbest basınç deneyine tabi tutulan KAK katkılı numunelerin q-ε grafikleri ve değerleri incelendiğinde;

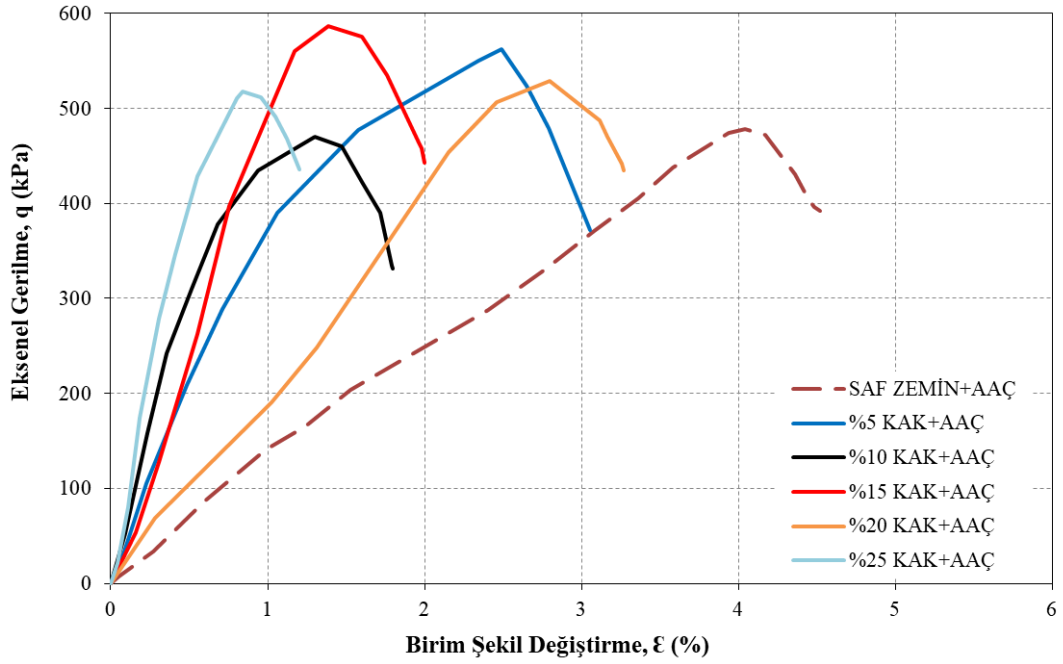
- Kazan altı külü katkılı numunelerde 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda mukavemet değerlerinde artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu artış KAK'ın puzolanik bir madde oluşu ve puzolanların zamanla dayanım kazandığı şeklinde değerlendirilebilir. Çünkü puzolanik maddeler su ile etkileşime girdiğinde bir süre sonra sertleşip dayanım kazanmaktadır. Sürenin artışıyla birlikte dayanımda da artış yaşanmaktadır. Yaşanan bu artışın literatür [41,52,53] ile uyum sağladığı görülmektedir.
- 1, 7, 28 gün kür süreleri sonunda KAK katkılı numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin saf zemine kıyasla sırasıyla 1,37; 1,31 ve 1,01 kat arttığı tespit edilmiştir.

- KAK katkılı numunelerde en yüksek mukavemet değerinin 28 gün kür sonunda elde edildiği ve bu değer 581,324 kPa olduğu belirlenmiştir.

6.1.5.4 AAC eklenmiş KAK katkılı numunelerin serbest basınç deneylerine ait bulgular

AAC kullanılarak hazırlanmış olan saf ve KAK katkılı (%5, %10, %15, %20, %25) serbest basınç numuneleri hazırlanmış ve 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından deneye tabi tutulmuştur. Deneyi sonunda numunelerin q- ϵ grafikleri oluşturularak q ve ϵ değerleri tespit edilmiştir.

Saf zemin+AAC ve saf zemin+KAK+AAC katkılı numunelerin 1 günlük kür sonunda elde edilen q- ϵ grafikleri Şekil 6.16’da verilmiştir. Tüm deney numunelerinin tespit edilen q ve ϵ değerleri ise Çizelge 6.15’de verilmiştir.

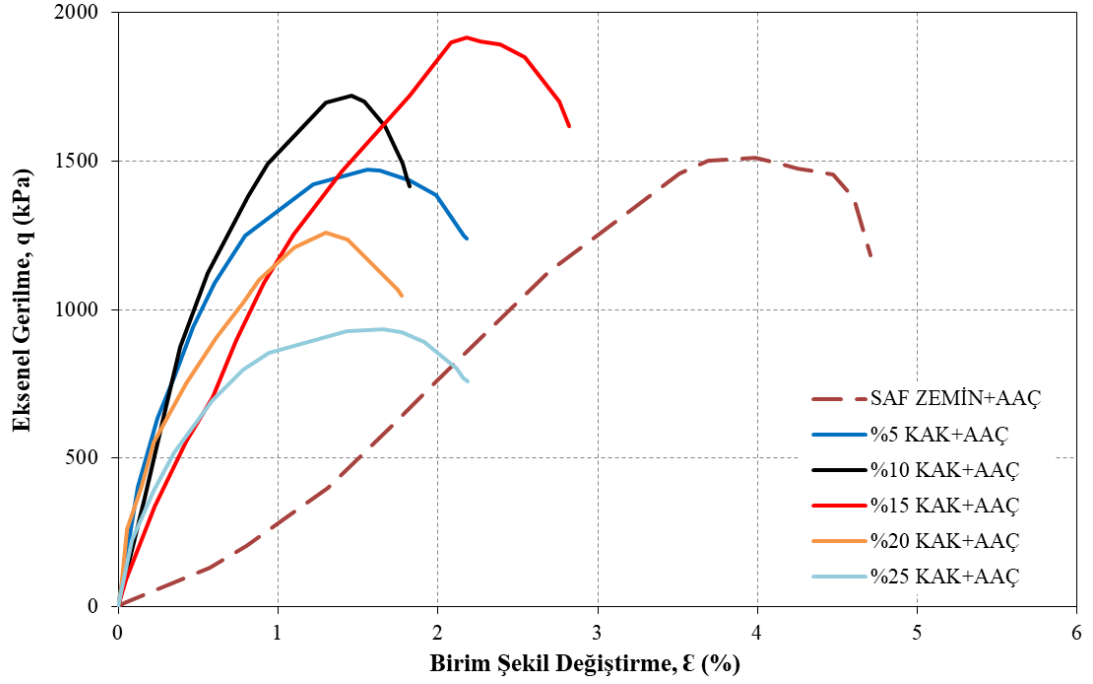


Şekil 6.16: AAC eklenmiş KAK katkılı numunelerin q- ϵ grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.15: AAC eklenmiş KAK katkılı numunelerin q- ϵ değerleri (1 Günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ϵ (%)
Saf Zemin	478,047	4,044
Saf Zemin+%5 KAK	526,577	2,488
Saf Zemin+%10 KAK	469,590	1,298
Saf Zemin+%15 KAK	586,364	1,383
Saf Zemin+%20 KAK	528,333	2,796
Saf Zemin+ %25 KAK	517,203	0,839

Tüm numunelerin 7 günlük kür sonunda elde edilen q - ϵ grafikleri Şekil 6.17’de verilmiştir. Tüm deney numunelerinin tespit edilen q ve ϵ değerleri ise Çizelge 6.16’da verilmiştir.

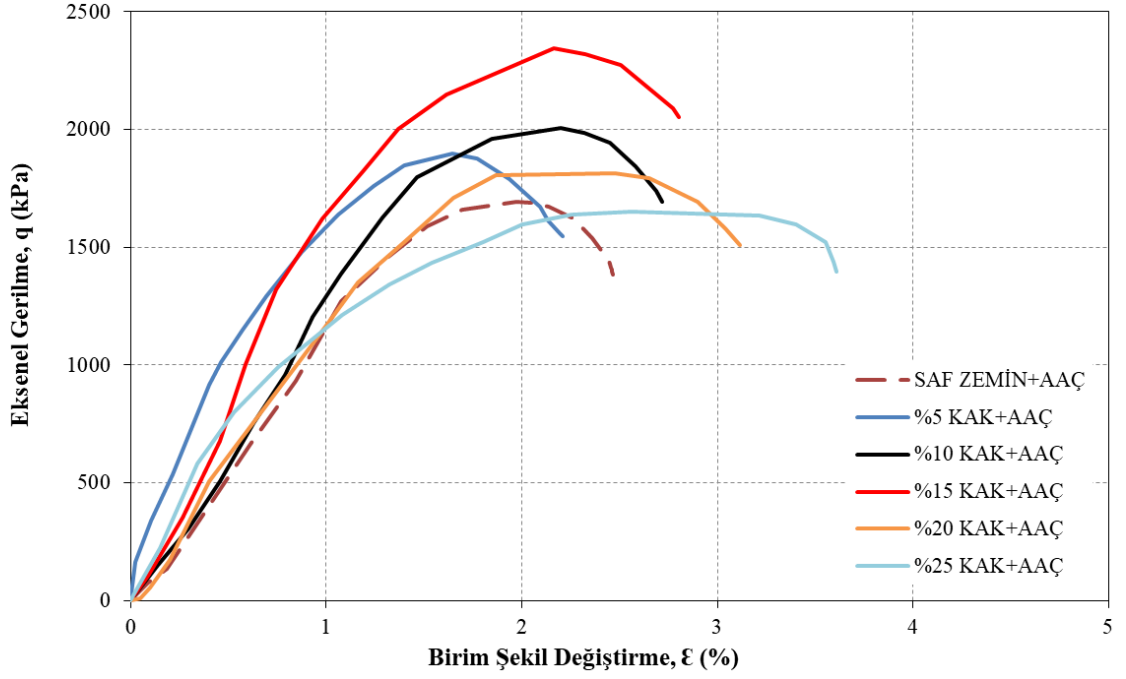


Şekil 6.17: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q - ϵ grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.16: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q - ϵ değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme, ϵ (%)
Saf Zemin	1412,921	3,983
Saf Zemin+%5 KAK	1471,279	1,559
Saf Zemin+%10 KAK	1719,156	1,460
Saf Zemin+%15 KAK	1916,702	2,178
Saf Zemin+%20 KAK	1258,533	1,297
Saf Zemin+ %25 KAK	932,497	1,655

Tüm numunelerin 28 günlük kür sonunda elde q - ϵ grafikleri Şekil 6.18’de verilmiştir. Tüm deney numunelerinin tespit edilen q ve ϵ değerleri ise Çizelge 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.18: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q-ε grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.17: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin q-ε değerleri (28 günlük).

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti (UCS), q (kPa)	Birim Şekil Değiştirme ε, (%)
Saf Zemin	1592.896	1.974
Saf Zemin+%5 KAK	1899.021	1.634
Saf Zemin+%10 KAK	2005.472	2.197
Saf Zemin+%15 KAK	2344.576	1.615
Saf Zemin+%20 KAK	1815.026	2.474
Saf Zemin+ %25 KAK	1652.069	2.561

1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlayıp serbest basınç deneyine tabi tutulan AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin sonuçları incelendiğinde;

- 1, 7, 28 günlük kür süreleri boyunca serbest basınç mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun KAK'ın puzolanik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir ve puzolanik maddelerin zamanla dayanım kazandığı [5,52,53] şeklinde yorumlanabilir.
- 1, 7, 28 günlük kür sonunda saf zemin+KAK+AAÇ katkılı numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin saf zemine kıyasla sırasıyla 3,584; 5,921 ve 5,293 kat arttığı tespit edilmiştir.
- Saf zemin+KAK+AAÇ katkılı numunelerde, en yüksek mukavemet değerinin 28 günlük kür sonunda elde edildiği ve bu değer 2344,576 kPa olduğu tespit edilmiştir.

- AAC ile aktivite edilmiş KAK katkılı numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri AAC kullanılmayan KAK katkılı numunelerle kıyaslandığında daha yüksek elde edildiği görülmüştür. Bu durum kazan altı külünün yapısında bulunan alümina ve silika minerallerinin alkali ortamda akitivite olup geopolimer reaksiyonunu gerçekleştirdiğinin göstergesi olarak literatürde [5,101] Kabul edilmektedir.

6.1.5.5 Serbest basınç deneylerinin kendi içinde kıyaslanması

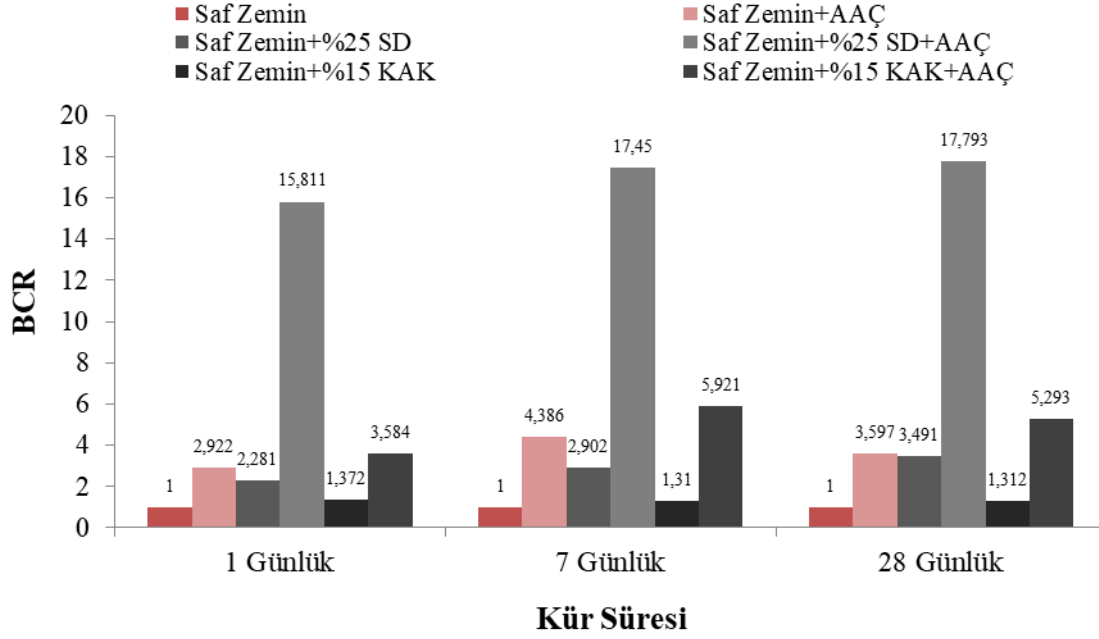
Saf zemin numunesine SD, SD+AAÇ, KAK, KAK+AAÇ katılmasıyla meydana gelen değişimleri tespit etmek maksadıyla, serbest basınç mukavemet değerleri taşıma kapasitesi oranı (BCR) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

BCR değeri, katkılı zemin numunesinin serbest basınç dayanımının saf zemin numunesinin serbest basınç dayanımına oranlanmasıyla hesaplanır. Hesaplanan BCR değeri 1'den büyük olduğu durumlarda iyileşmenin gerçekleştiğini, 1'den küçük olduğu durumlarda ise gerçekleşmediği ifade edilebilmektedir [102].

Numunelerin 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyinden elde edilen optimum oranlardaki maksimum değerlerin BCR'si hesaplanarak Çizelge 6.18'de ve kür süresi ile meydana gelen değişim Şekil 6.19'da verilmiştir.

Çizelge 6.18: Serbest basınç değerlerinin BCR değerleri.

Test Numunesi	BCR (1 Gün)	BCR (7 Gün)	BCR (28 Gün)
Saf Zemin	1	1	1
Saf Zemin+AAÇ	2,922	4,386	3,597
Saf Zemin+%25 SD	2,281	2,902	3,491
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	15,811	17,450	17,793
Saf Zemin+%15 KAK	1,372	1,310	1,312
Saf Zemin+%15 KAK+AAÇ	3,584	5,921	5,293



Şekil 6.19: Serbest basınç BCR değerlerinin kür süresi ile değişimi.

BCR değerleri incelendiğinde kullanılan katkıların olumlu sonuç verdiği görülmektedir. Özellikle en büyük iyileştirmenin AAÇ kullanılarak hazırlanmış olan %25 SD katkılı stabilize zeminlerden elde edilmiştir. Bu durum zeminin serbest basınç mukavemeti üzerinde SD'nin çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle AAÇ katkılı zeminlerin mukavemetindeki artış, AAÇ'nin SD ile birleşmesi sonucu güçlü bir geopolimerleşmenin varlığını göstermektedir. Benzer durum AAÇ kullanılarak KAK katkılı zeminler için de söz konusudur. Bu sonucun karışımda bulunan alümina ve silika mineralleri ile AAÇ'nin aktivite olup güçlü bir geopolimer yapı oluşturmamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

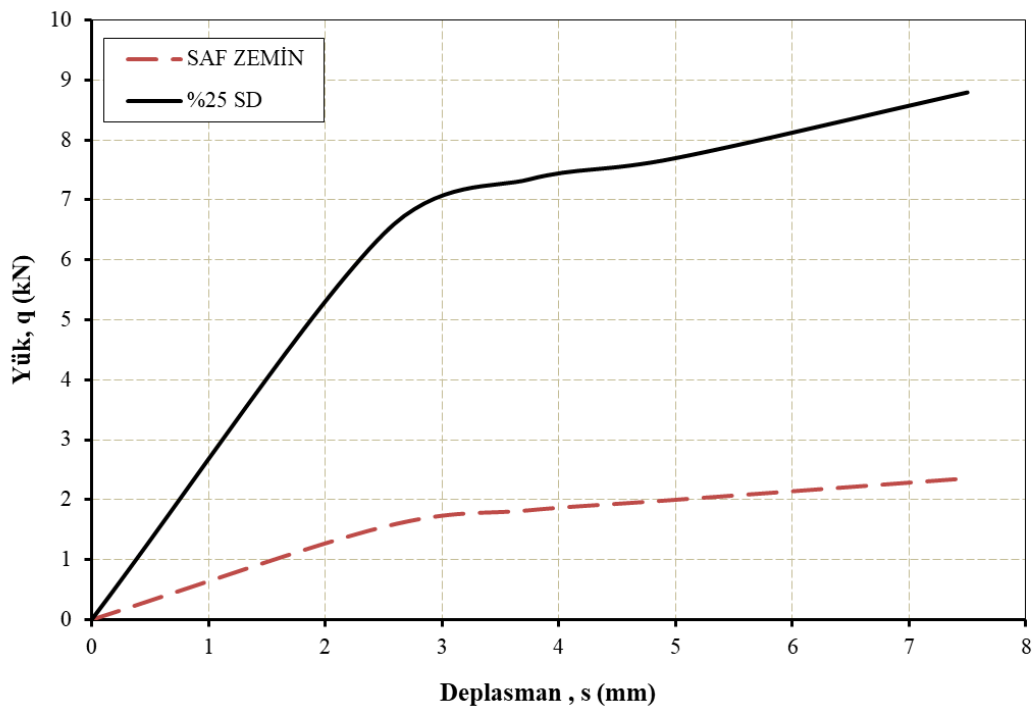
6.1.6 CBR deney bulguları

Serbest basınç deneylerinden elde edilen maksimum mukavemet değerleri esas alınarak numuneler için optimum karışım oranları belirlenmiştir. Belirlenen optimum katkı oranları ve proktor deneyinden elde edilen w_{opt} ile Y_{kmaks} değerleri esas alınarak CBR deney numuneleri hazırlanmış ve kür sürelerini (1, 7, 28 günlük) tamamlamalarının ardından deneye tabi tutulmuşlardır. CBR deney sonucunda numunelerin yük-deformasyon davranışları ve oturma oranları için CBR değerleri hesaplanıp değerlendirilmiştir.

6.1.6.1 SD katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular

SD katkılı numunelerin serbest basınç deney sonuçlarına göre, %25 SD katkısı ile optimum sonuca varıldığı belirlenmiş ve %25 SD katkılı zemin numuneleri ile CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. CBR deneyi sonucunda, 1 günlük SD katkılı numuneler için elde edilen yük (q)-deplasman (s) grafiği Şekil 6.20’de CBR değerleri ise Çizelge 6.19’da verilmiştir.

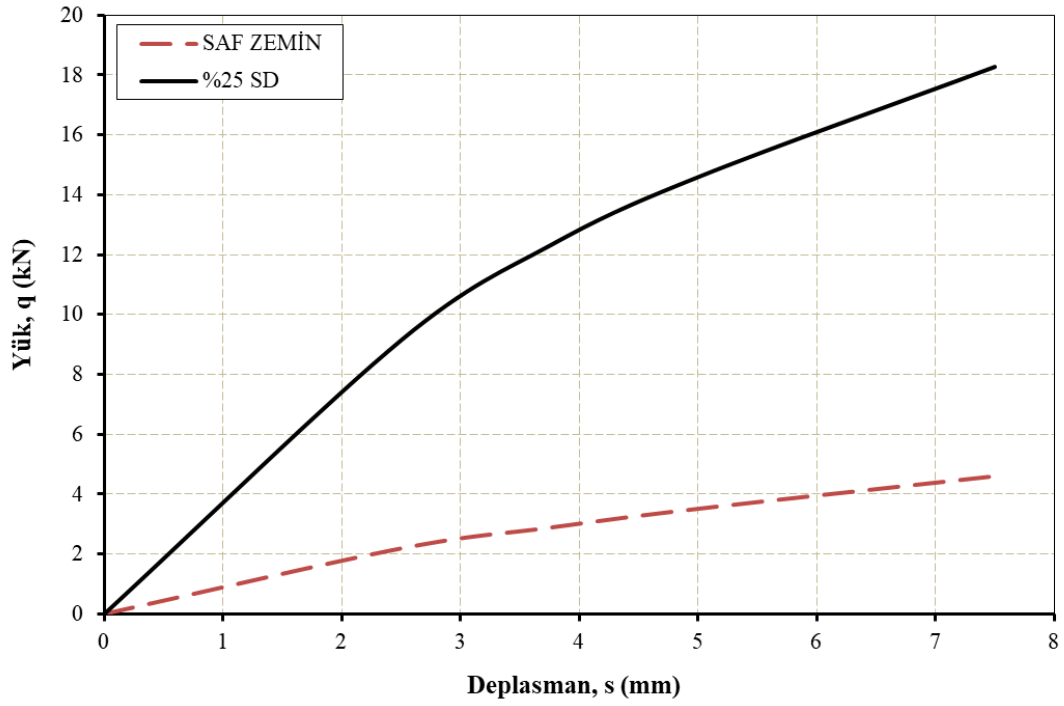
Benzer şekilde, numunelerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki q-s grafikleri ve CBR değerleri de sırasıyla Şekil 6.21 ve Çizelge 6.20 ile Şekil 6.22 ve Çizelge 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.20: SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.19: SD katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).

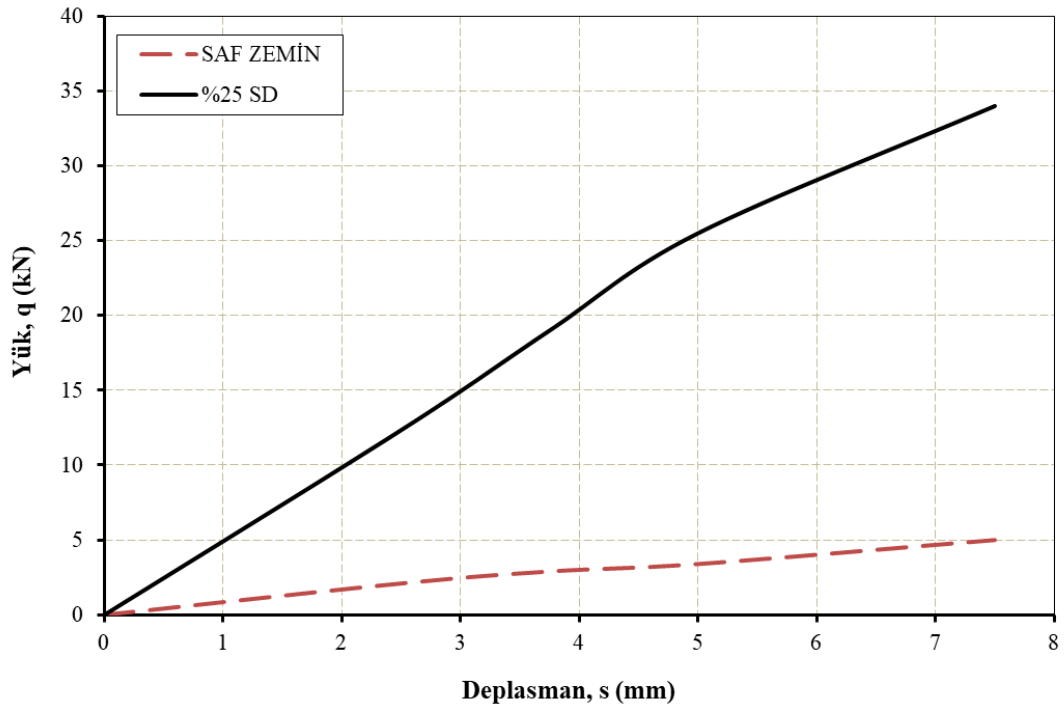
Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	10,02	9,86
Saf Zemin+%25 SD	48,61	37,57



Şekil 6.21: SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.20: SD katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	13,51	14,59
Saf Zemin+%25 SD	69,03	73,11



Şekil 6.22: SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.21: SD katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	15,36	16,95
Saf Zemin+%25 SD	93,18	127,48

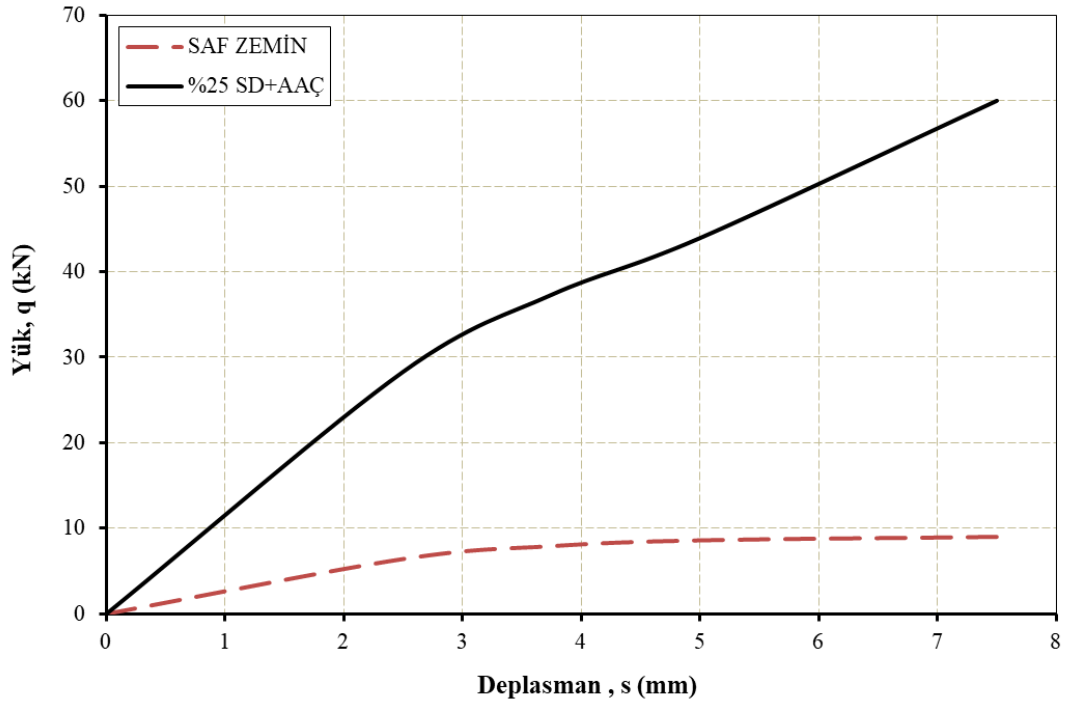
1, 7, 28 günlük kür sürelerinin ardından CBR deneyine tabi tutulan zemin numunelerinin sonuçları incelendiğinde;

- Saf zemine kıyasla SD katkısının zemin CBR değerini arttırdığı görülmektedir.
- 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlayan SD katkılı numunelerin en yüksek CBR (%) değerleri sırasıyla 48,61; 73,11 ve 127,48 olarak hesaplanmıştır.
- 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda, saf zemine kıyasla en yüksek CBR değerlerinde sırasıyla 4,851; 5,011 ve 7,521 kat artış yaşanmıştır.
- Kür sürelerinin artışıyla numunelerin CBR değerlerinde artış yaşanmıştır. Meydana gelen bu artışın SD'nin puzolanik bir malzeme oluşu ve puzolanların su ile etkileşime girdiğinde sertleşip zamanla dayanım kazandığı [5,41,47] şeklinde yorumlanabilir.

6.1.6.2 AAC eklenmiş SD katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular

AAC eklenmiş SD katkılı numunelerin serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, %25 SD+AAC katkısı ile optimum sonuca varıldığı belirlenmiş ve bu oranda hazırlanan zemin numuneleri üzerinde CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. CBR deneyi sonucunda 1 günlük SD+AAC katkılı numuneler için elde edilen yük (q)-deplasman (s) grafiği Şekil 6.23'de CBR değerleri ise Çizelge 6.22'de verilmiştir.

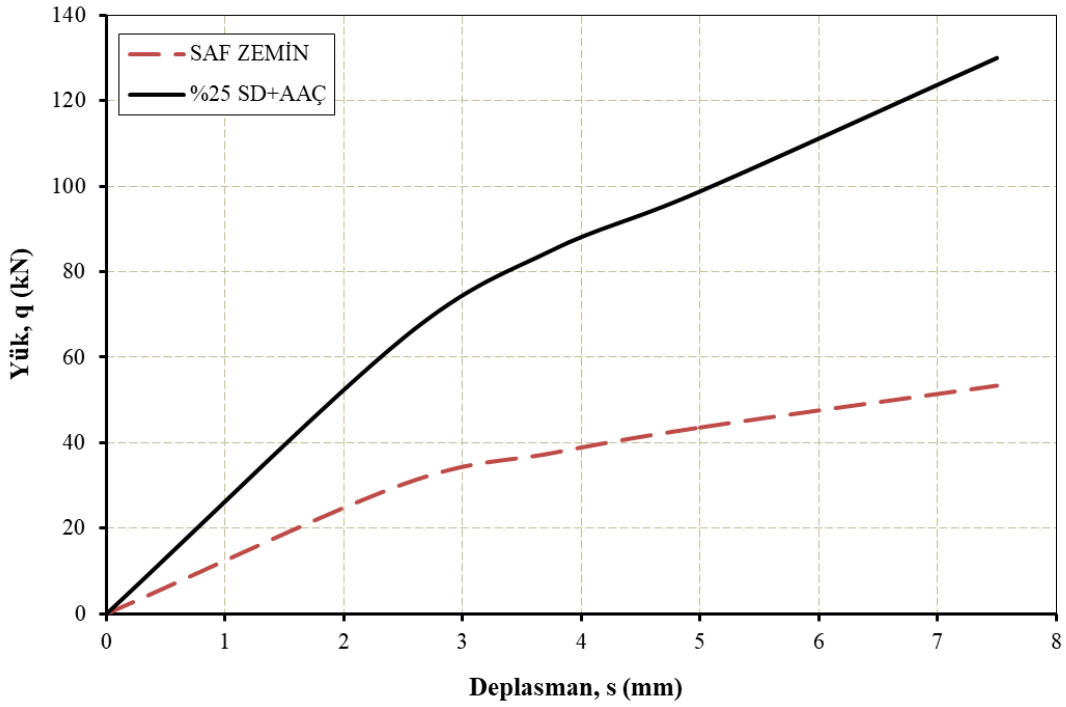
Benzer şekilde, numunelerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki q-s grafikleri ve CBR değerleri de sırasıyla Şekil 6.24 ve Çizelge 6.23 ile Şekil 6.25 ve Çizelge 6.24'de verilmiştir.



Şekil 6.23: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.22: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).

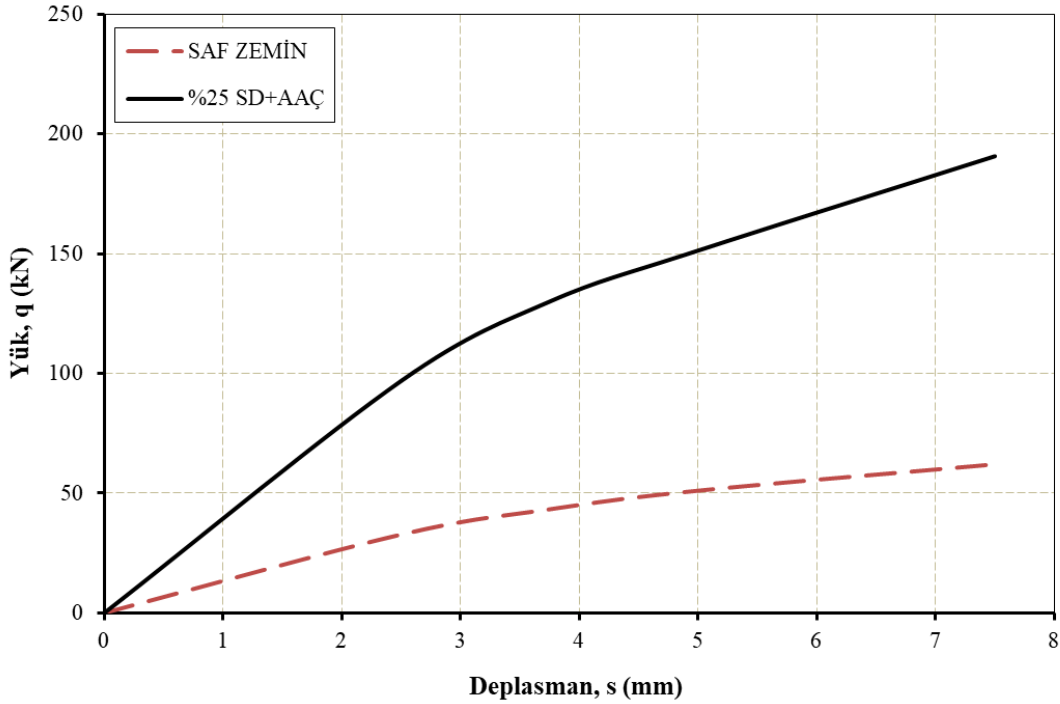
Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin+AAÇ	48,47	43,06
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	213,94	220,19



Şekil 6.24: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.23: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin+AAÇ	229,06	218,35
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	487,33	495,50



Şekil 6.25: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.24: AAÇ eklenmiş SD katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin+AAÇ	247,21	255,64
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	731,86	758,01

1, 7, 28 günlük kütür sürelerini ardından CBR deneyine tabi tutulan SD+AAÇ katkı ile zemin numunelerinin sonuçları incelendiğinde;

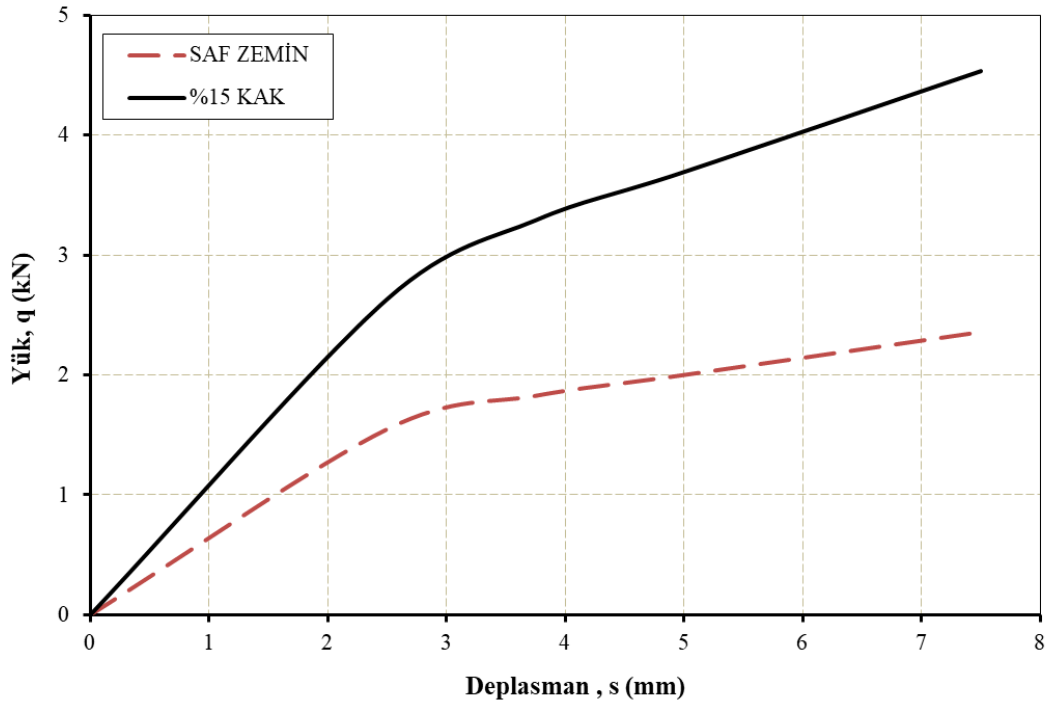
- Saf zemine kıyasla SD+AAÇ katkısının zemin CBR değerini arttırdığı görülmektedir.
- 1, 7, 28 günlük kütür sürelerini tamamlayan SD+AAÇ katkı ile numunelerin en yüksek CBR (%) değerleri sırasıyla 220,19; 495,50 ve 758,01 olarak hesaplanmıştır.
- 1, 7, 28 günlük kütür süreleri sonunda, saf zemine kıyasla en yüksek CBR değerlerinde sırasıyla 21,975; 33,962 ve 44,720 kat artış yaşanmıştır.
- SD+AAÇ katkı ile numunelerle SD katkı ile numunelerin CBR değerleri kıyaslandığında ise SD+AAÇ katkı ile numunelerin CBR değerlerinden daha yüksek

çıkıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun SD'nin puzolanik özelliğinden kaynaklandığını ve puzolanların yapısında bulunan alümina ve silikaların alkali ortamda geopolimer reaksiyonunu gerçekleştirerek Si-O-Al bağlarını oluşturarak malzemenin puzolanik özelliğini attırdığı [5,101] şeklinde yorumlanabilir.

6.1.6.3 KAK katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular

KAK katkılı numunelerin serbest basınç sonuçlarına göre en yüksek mukavemet değeri, %15 KAK katkılı numunelerden elde edildiğinden, bu oranda hazırlanan numuneler üzerinde CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. CBR deneyi sonucunda 1 günlük KAK katkılı numuneler için elde edilen yük (q)-deplasman (s) grafiği Şekil 6.26'da CBR değerleri ise Çizelge 6.25'de verilmiştir.

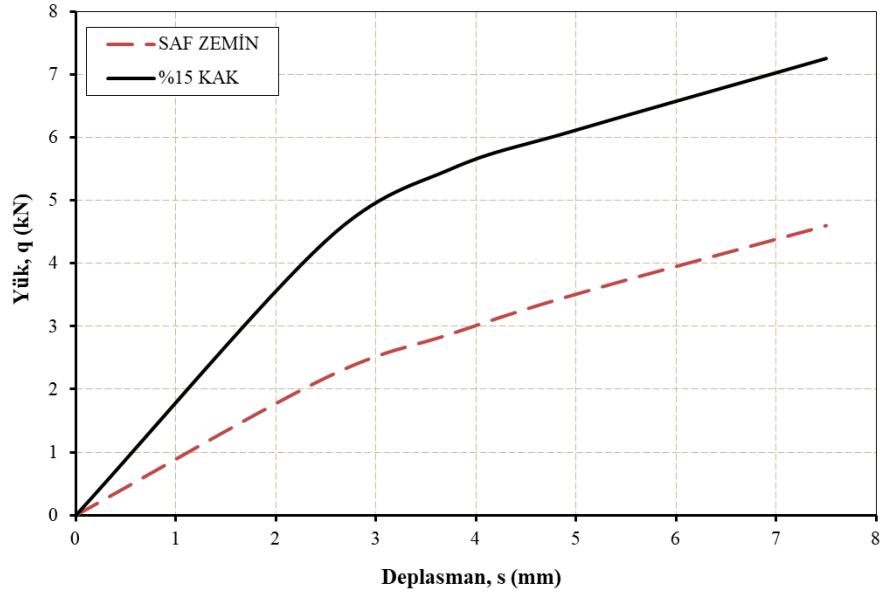
Benzer şekilde, numunelerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki q-s grafikleri ve CBR değerleri de sırasıyla Şekil 6.27 ve Çizelge 6.26 ile Şekil 6.28 ve Çizelge 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.26: KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.25: KAK katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).

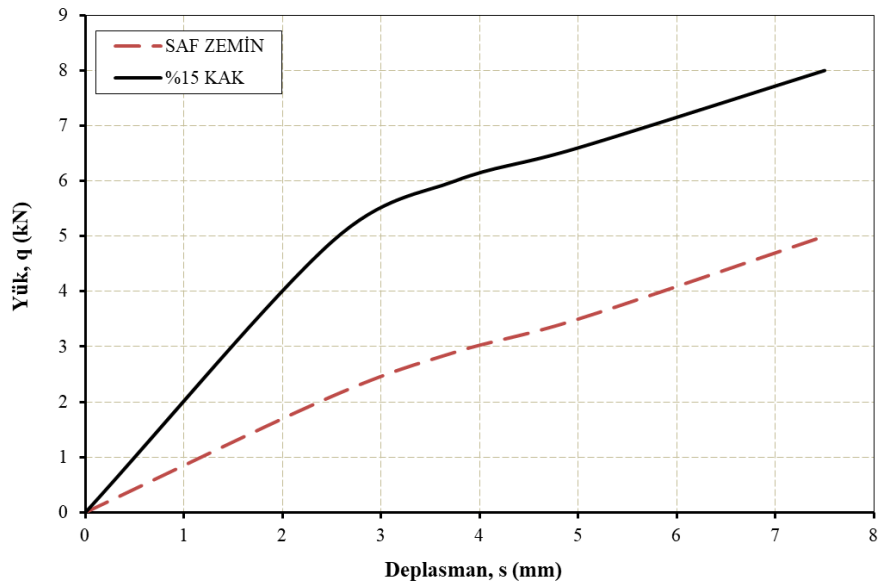
Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	10,02	9,86
Saf Zemin+%15 KAK	19,89	18,50



Şekil 6.27: KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.26: KAK katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	13,51	14,59
Saf Zemin+%15 KAK	32,95	30,65



Şekil 6.28: KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.27: KAK katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	15,36	16,95
Saf Zemin+%15 KAK	37,28	33,19

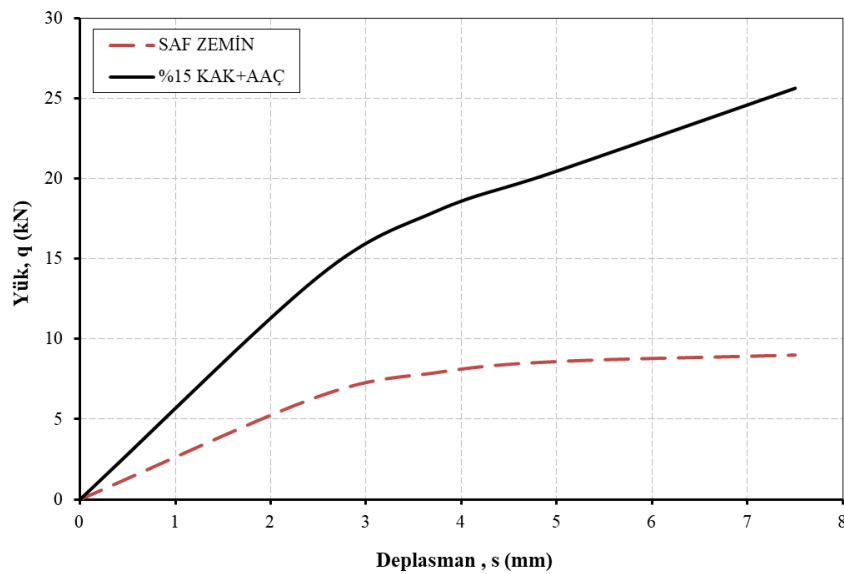
1, 7, 28 günlük kür sürelerinin ardından CBR deneyine tabi tutulan zemin numunelerinin sonuçları incelendiğinde;

- Saf zemine kıyasla KAK katkısının zeminin CBR değerini arttırdığı görülmektedir.
- 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlayan KAK katkılı numunelerin en yüksek CBR (%) değerleri sırasıyla 19,89; 32,95 ve 37,28 olarak hesaplanmıştır.
- 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda, saf zemine kıyasla en yüksek CBR değerlerinde sırasıyla 1,985; 2,258 ve 2,199 kat artış yaşanmıştır.
- Kür sürelerinin artışıyla numunelerin CBR değerlerinde artış yaşanmıştır. Meydana gelen bu artışın KAK'ın pozolanik bir malzeme oluşu ve pozolanların su ile etkileşime geçtiğinde sertleşip zamanla dayanım kazandığı [5,41] şeklinde yorumlanabilir.

6.1.6.4 AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin CBR deneylerine ait bulgular

AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunelerin serbest basınç sonuçlarına göre en yüksek mukavemet değeri, %15 KAK+AAÇ katkılı numunelerden elde edildiğinden, bu oranda hazırlanan numuneler üzerinde CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. CBR deneyi sonucunda 1 günlük KAK+AAÇ katkılı numuneler için elde edilen yük (q)-deplasman (s) grafiği Şekil 6.29'da CBR değerleri ise Çizelge 6.28'de verilmiştir.

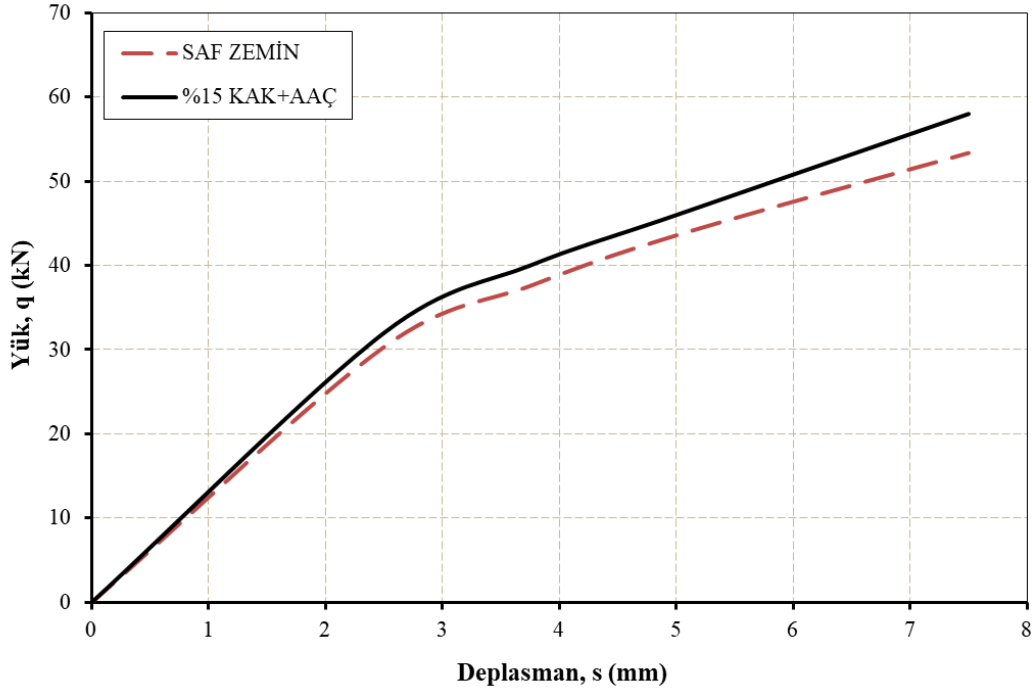
Benzer şekilde, numunelerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki q-s grafikleri ve CBR değerleri de sırasıyla Şekil 6.30 ve Çizelge 6.29 ile Şekil 6.31 ve Çizelge 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6.29: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (1 günlük).

Çizelge 6.28: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin CBR değerleri (1 günlük).

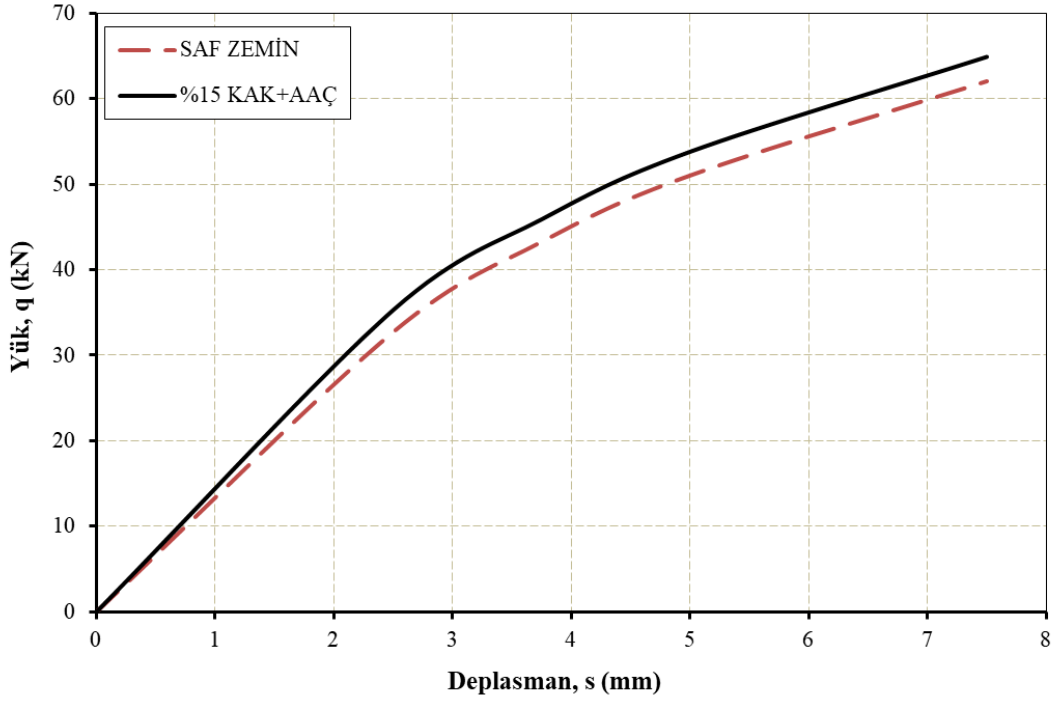
Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin+AAÇ	48,47	43,06
Saf Zemin+%15KAK+AAÇ	104,83	102,52



Şekil 6.30: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (7 günlük).

Çizelge 6.29: AAÇ eklenmiş KAK katkılı numunenin CBR değerleri (7 günlük).

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin+AAÇ	229,06	218,35
Saf Zemin+%15KAK+AAÇ	235,65	226,95



Şekil 6.31: AAK eklenmiş KAK katkılı numunenin yük-deplasman grafiği (28 günlük).

Çizelge 6.30: AAK eklenmiş KAK katkılı numunenin CBR değerleri (28 günlük).

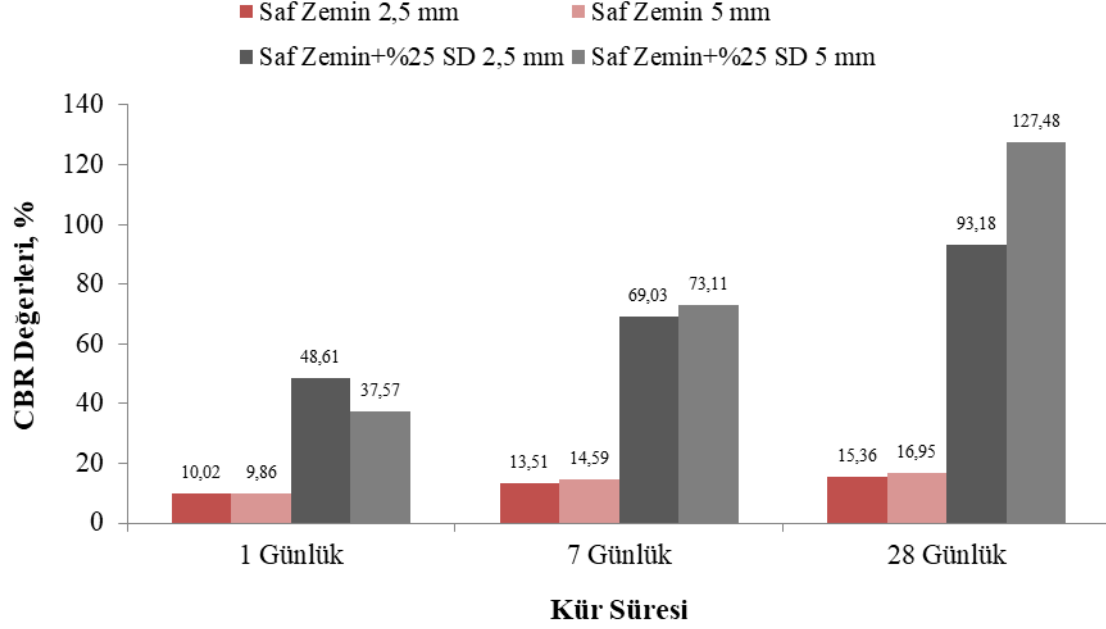
Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin+AAÇ	247,21	255,64
Saf Zemin+%15KAK+AAÇ	266,62	269,54

1, 7, 28 günlük kür sürelerinin ardından CBR deneyine tabi tutulan KAK+AAÇ katkılı numunelerin sonuçları incelendiğinde;

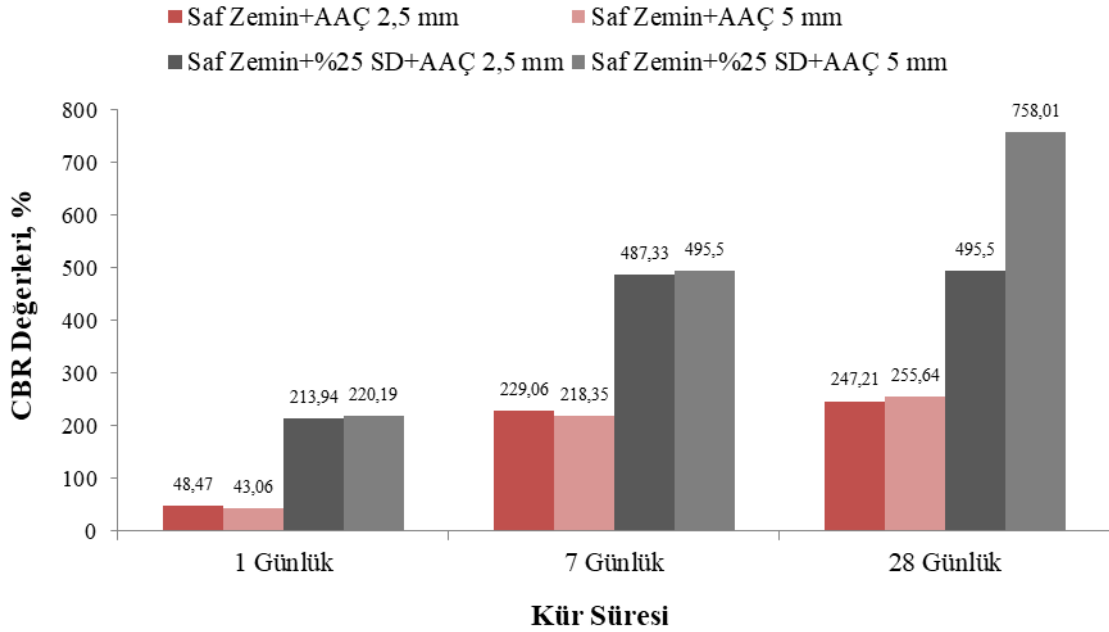
- Saf zemine kıyasla KAK+AAÇ katkısının zemin CBR değerini arttırdığı görülmektedir.
- 1, 7, 28 günlük kür sürelerini tamamlayan KAK katkılı numunelerin en yüksek CBR (%) değerleri sırasıyla 104,83; 235,65 ve 269,54 olarak hesaplanmıştır.
- 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda, saf zemine kıyasla en yüksek CBR değerlerinde sırasıyla 10,462; 16,151 ve 15,902 kat artış yaşanmıştır.
- KAK+AAÇ katkılı numunelerle KAK katkılı numunelerin CBR değerleri kıyaslandığında ise KAK+AAÇ katkılı numunelerin CBR değerlerinden daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durumun KAK'ın puzolanik özelliğinden kaynaklandığını ve puzolanların yapısında bulunan alümina ve silikaların alkali ortamda geopolimer reaksiyonu gerçekleştirerek Si-O-Al bağlarını oluşturup malzemenin puzolanik özelliğini arttırdığı [5,101] şeklinde yorumlanabilir.

6.1.6.5 CBR Deneylerinin Kendi İçinde Kıyaslanması

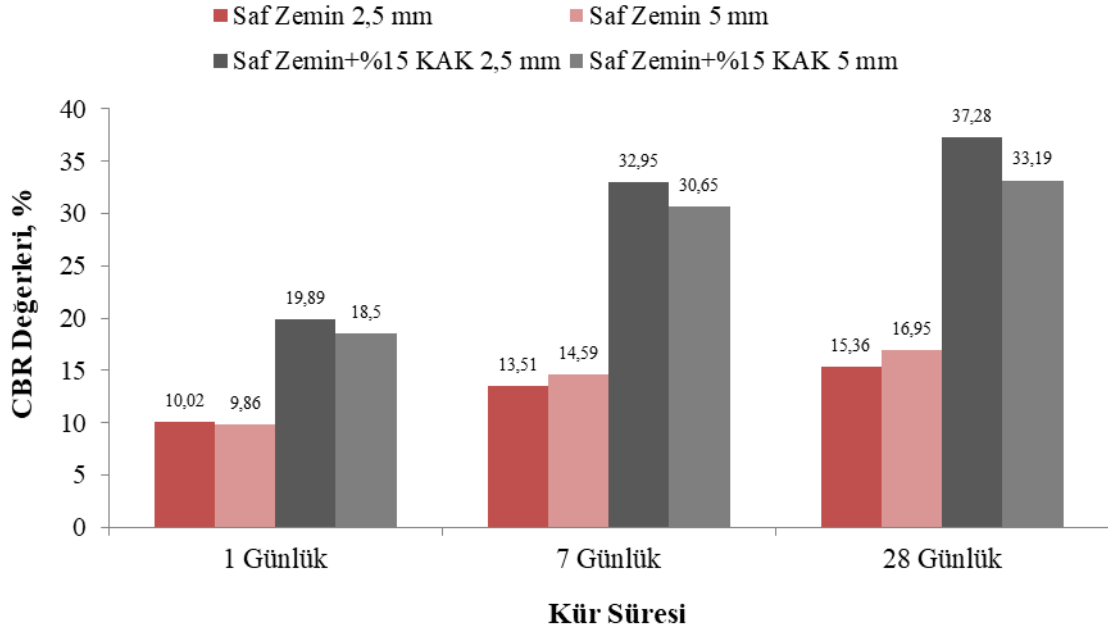
Saf ve bütün stabilize zemin numunelerinin CBR değerlerinin kullanılan katkı ve kür süreleri ile değişimi Şekil 6.32, Şekil 6.33, Şekil 6.34 ve Şekil 6.35’de verilmiştir.



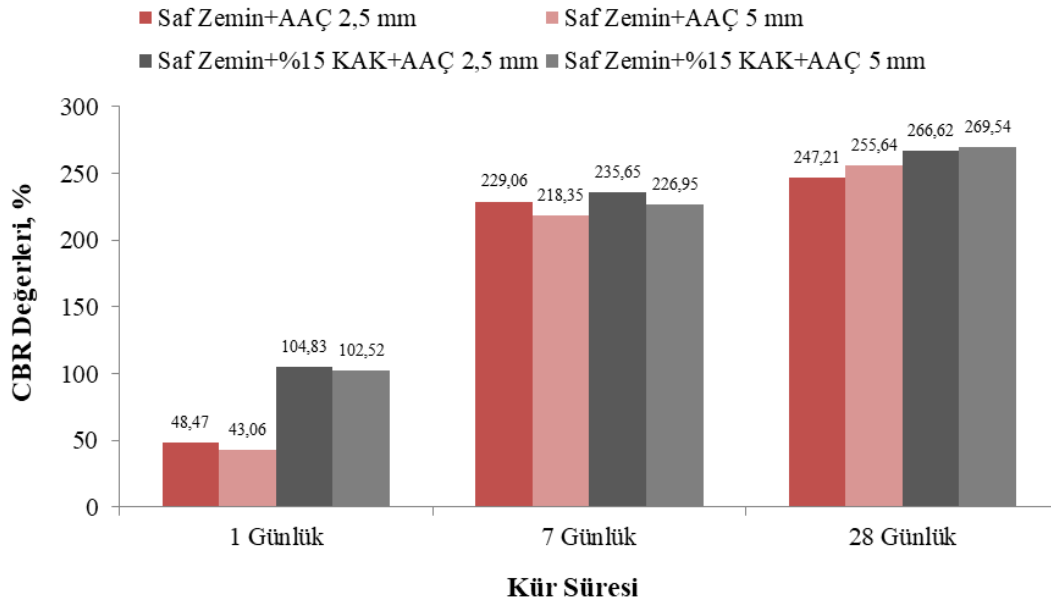
Şekil 6.32: Saf ve SD katkılı numunelerde CBR değerinin kür süresi ile değişimi.



Şekil 6.33: AAÇ kullanılan saf ve SD numunelerde CBR değerinin kür süresi ile değişimi.



Şekil 6.34: Saf ve KAK katkılı numunelerde CBR değerlerinin kür süresi ile değişimi.



Şekil 6.35: AAÇ kullanılan saf ve KAK katkılı numunelerde CBR değerinin kür süresi ile değişimi.

Bütün numunelerin CBR değerlerinin kür süresi ve kullanılan katkı ile değişimi incelendiğinde, kür süresi arttıkça numunelerin taşıma gücünün arttığı görülmektedir. Meydana gelen bu değişimin SD ve KAK'ın puzolanik madde olmaları ve puzolanik maddelerin zamanla dayanım kazandıkları [5,41,47,53] tespiti ile açıklanabilir.

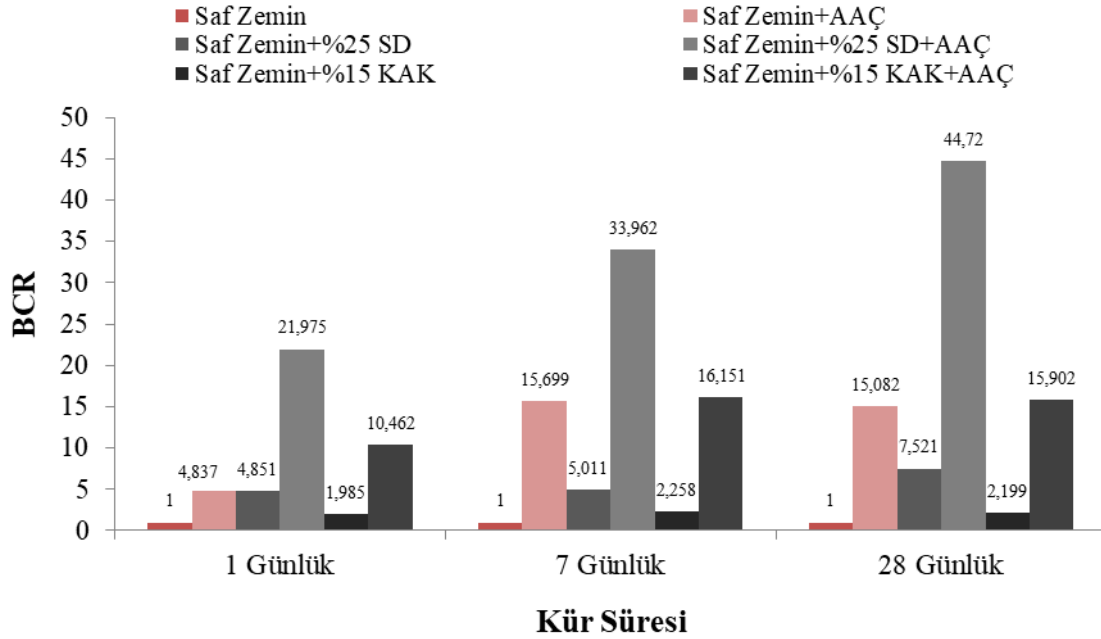
Çalışmada ayrıca, saf zeminin taşıma gücü üzerinde SD, SD+AAÇ, KAK ve KAK+AAÇ katkıları ile meydana gelen değişimi tespit etmek amacıyla elde edilen CBR değerleri kullanılarak BCR yöntemi ile sonuçlar analiz edilmiştir.

Katkılı numunenin CBR değerinin saf zemin numunesinin CBR değerine bölümü ile elde edilen BCR değerinin 1'den büyük olması zemin taşıma gücünde iyileşme olduğunu, 1'den küçük olması durumunda ise olmadığını ifade etmektedir [102].

Numunelerin 1, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda CBR deneyinden elde edilen maksimum değerlerin BCR'si hesaplanarak Çizelge 6.31'de ve kür süresi ile meydana gelen değişim Şekil 6.36'da verilmiştir.

Çizelge 6.31: CBR değerleri için hesaplanan BCR değerleri.

Test Numunesi	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Saf zemin	1	1	1
Saf zemin+AAÇ	4,837	15,699	15,082
Saf zemin+%25 SD	4,851	5,011	7,521
Saf zemin+%25 SD+AAÇ	21,975	33,962	44,720
Saf zemin+%15 KAK	1,985	2,258	2,199
Saf zemin+%15 KAK+AAÇ	10,462	16,151	15,902



Şekil 6.36: CBR için hesaplanan BCR değerlerinin kür süresi ile değişimi.

CBR değerleri için hesaplanan BCR değerleri incelendiğinde kullanılan katkıların olumlu sonuç verdiği görülmektedir. Özellikle en büyük iyileştirmenin AAÇ kullanılarak hazırlanmış olan %25 SD katkılı stabilize zeminlerden elde edilmiştir. Bu durum zeminin taşıma gücü üzerinde SD'nin çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle AAÇ katkılı zeminlerin mukavemetindeki artış, AAÇ'nin SD ile birleşmesi

sonucu güçlü bir geopolimerizasyon reaksiyonunun gerçekleştiğini göstermektedir. Benzer durum AAC kullanılarak KAK katkılı zeminler için de söz konusudur. Bu sonucun karışımında bulunan alümina ve silika mineralleri ile AAC'nin aktivite olup güçlü bir geopolimer yapı oluşturmamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

6.2 Yol Üstyapı Tasarımı ve Maliyet Analizi

Bu çalışmada, yol taban zemini olarak düşünülen bir zemin SD, KAK ve AAC katkıları ile stabilize edilerek bunun yol üstyapısına etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda, AASHTO Tasarım Rehberi (1993) esas alınarak saf ve katkılı zeminler için esnek ve rijit üstyapı tasarımı yapılarak katkıların ardından üstyapı tabaka kalınlıkları ve maliyetlerine olan etkileri değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre bütün katkılar için en yüksek CBR değerleri 28 günlük kür süresi sonunda elde edilmiştir. Bu değerler Çizelge 6.32'de verilmiştir. Çalışmada, yol üstyapı tasarım hesabı Çizelge 6.32'de ki değerler esas alınarak yapılmıştır.

Çizelge 6.32: CBR deneylerinden elde edilen en yüksek CBR değerleri.

Test Numunesi	CBR Değeri
Saf Zemin	%16,95
Saf Zemin+SD	%127,48
Saf Zemin+SD+AAC	%758,01
Saf Zemin+KAK	%37,28
Saf Zemin+KAK+AAC	%269,54

6.2.1 Esnek yol üstyapı tasarımı ve maliyet analizi

AASHTO Tasarım Rehberi (1993) esas alınarak saf ve katkılı zeminler için esnek üstyapı tasarımı yapılmış ve tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar esnasında yolun;

- 2×2=4 şeritli yol olduğu,
- Proje analiz süresinin 20 yıl olduğu,
- İlk sene için günlük trafiğin 256 adet treyler, 1500 adet kamyon, 450 adet otobüs, 3000 adet minibüs, 1500 adet otomobil olduğu varsayılarak 8,2 tonluk eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı 45,000,000 olarak kabul edilmiştir.

Tasarım esnasında saf ve katkılı zeminler için esnek yol üstyapı tabaka kalınlıkları Çizelge 6.33'deki ortak değerler esas alınıp, (5.5)'deki bağıntı yardımı ile hesaplanmıştır.

Çizelge 6.33: Esnek yol tasarımında kullanılan parametreler.

Parametreler	Seçilen Değerler
Eşdeğer standart dingil yükü tekerrür sayısı, $T_{8,2}$	45,000,000
Toplam standart sapma, S_0	0,45
Yolun ilk servis kabiliyeti, P_0	4,2
Yolun son servis kabiliyeti, P_t	2,5
Servis kabiliyeti indeksi, ΔPSI	1,7
Güvenilirliğin standart normal sapması, Z_R	-1,645

Esnek üstyapılar için Esneklik Modülü (M_R), (6.1)'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır [98].

$$MR = 1500 \times CBR(\%) \quad (6.1)$$

Zemin iyileştirme işlemleri sonucunda karayolu üstyapı maliyetlerinde meydana gelen değişim Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) verileri esas alınarak hesaplanmıştır. Esnek üstyapı maliyet analizi yapılırken KGM tarafından 2021 yılı için yayınlamış olan birim fiyat listesi [103] kullanılmıştır. KGM'nin yayınlamış olduğu birim fiyat listesinde, aşınma, binder, bitümlü temel tabakaları için birim alan (m^2) maliyetlerine yer verilirken, alttemel ve temel tabakaları için ise birim ağırlık (ton), birim hacim (m^3) maliyetlerine yer verilmiştir.

6.2.1.1 Saf zeminin için tabaka kalınlıkları hesabı ve maliyet analizi

Saf ve katkılı zemin numuneleri için daha önce belirlenerek Çizelge 6.32'de verilmiş olan CBR değerlerinden saf zemin için %16,95 değeri alınarak bağıntı 6.1 yardımı ile M_R değeri, bağıntı 5.10 ile SN değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$MR = 1500 \times CBR (\%)$ bağıntısından,

$MR = 1500 \times 16,95 = 25425$ psi olarak hesaplanmıştır.

$$\log(45.000.000) = (-1,645) \times 0,45 + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,20 + [\log(1,7 / (4,2 - 1,5))] / [(0,40 + 1094 / (SN + 1)^{5,19}) + 2,32 \times \log(25425) - 8,07]$$

SN= 4,6 olarak hesaplanmıştır.

AASHTO Tasarım Rehberi (1993) ve Karayolları Üstyapı Projelendirme Rehberi (2008) esas alınarak saf zemin için minimum tabaka kalınlıkları belirlenmiş ve Çizelge 6.34'de verilmiştir.

Çizelge 6.34: Saf zemin için seçilen esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.

Tabaka Adı	Kalınlık, (Di) (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı, (ai)	SN*=ai×Di	Açıklamalar
Aşınma	5	0,42	2,1	
Binder	6	0,40	2,4	
Bitümlü Temel	8	0,36	2,88	
Plent-Miks Temel	15	0,15	2,25	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Kırmataş Temel	20	0,13	2,6	

Seçilen tabaka kalınlıklarının kontrol edilmesi maksadıyla Plent-Miks kırmataş temel için CBR=%120 ve kırmataş alttemel için CBR=%50 alınarak M_R değerlerinin hesaplanmasının ardından, SN* değerleri (5.10) bağıntısı kullanılarak hesaplanıp, kontrol işlemi aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$M_R = 1500 \times 120 = 180.000$ psi Plent-Miks kırmataş temel için,

$M_R = 1500 \times 50 = 75.000$ psi kırmataş alttemel için hesaplamalar yapılmıştır.

MR değerinin hesaplanmasının ardından, (5.10) bağıntısı yardımıyla SN* değerleri

$$\log(45.000.000) = (-1,645) \times 0,45 + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,20 + [\log(1,7 / (4,2 - 1,5))] / [(0,40 + 1094 / (SN+1)^{5,19}) + 2,32 \times \log(180.000) - 8,07]$$

Plent-Miks kırmataş temel için SN1= 2,1,

$$\log(45.000.000) = (-1,645) \times 0,45 + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,20 + [\log(1,7 / (4,2 - 1,5))] / [(0,40 + 1094 / (SN+1)^{5,19}) + 2,32 \times \log(75.000) - 8,07]$$

Kırmataş alttemel için SN2= 3,2 olarak hesaplanmıştır.

Tabakaların izafi mukavemet katsayıları Çizelge 5.9'dan alınarak 5.10 bağıntısı yardımı ile SN* değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

(* Üstyapıda kullanılan gerçek değer olup gerekli değere eşit veya büyük olmalıdır.)

$$SN1^* = a_1 D_1^* + a_2 D_2^* + a_3 D_3^* \geq SN1$$

$$\text{Aşınma } 5 \text{ cm} \quad 5 \times 0,42 = 2,1$$

$$\text{Binder } 6 \text{ cm} \quad 6 \times 0,40 = 2,4$$

$$\text{Bitümlü Temel } 8 \text{ cm} \quad 13 \times 0,36 = 2,88$$

SN1* = 7,38 > 5,33 olduğundan seçilen değer uygun görülmüştür.

$$D4^* = (SN2 - SN1^*) / a_4$$

Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'nde (2008) Plent-Miks temel için minimum değer olan 15 cm seçilmiştir.

$$SN2^*=15 \times 0,15=2,25$$

$SN1^* + SN2^* = 9,63 > 8,13$ olduğundan seçilen değer uygun görülmüştür.

$$D5^* \geq (SN3 - (SN1^* + SN2^*)) / a_5$$

$$D5^* \geq (11,68 - 9,63) / 0,13 = 15,8 \text{ cm olarak hesaplanmıştır.}$$

Kırmataş Alttemel seçilen $D5=20$ cm olarak seçilmiş ve

$(SN1^* + SN2^*) + (20 \times 0,13) = 12,23$ kontrolü sağlanarak $12,23 > 11,68$ olduğundan seçilen değer uygun görülmüştür.

Saf zemin için tabaka kalınlıkları belirlendikten sonra KGM 2021 birim fiyat listesi esas alınarak esnek yol üstyapı maliyet analizi yapılmıştır. Esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri Çizelge 6.35'de verilmiştir.

Çizelge 6.35: Saf zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	m ² Maliyeti, (TL)
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	17,33	3,47	17,33
KGM/6306	6 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	15,82	2,64	15,82
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	19,89	2,49	19,89
KGM/6100/3	Plent-Miks temel yapılması	ton	61,78	1,48	22,20
KGM/6000	(kaplama yoğ:2,4g/ cm ³) Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	56,13	0,56	11,20

Saf zemin için tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda :

- Toplam tabaka kalınlığı 54 cm olarak belirlenmiştir.

- Esnek yol üstyapı kalınlığının m^2 cinsinden birim maliyeti 86,51 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda esnek yol üstyapı maliyeti 1.730.136,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.1.2 %25 SD katkılı zemin için tabaka kalınlıkları hesabı ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %25 SD katkılı zemin için yine Çizelge 6.32'deki CBR değeri (%217,48) alınarak, M_R değeri 191220 ve SN değeri 2,4 olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalardan sonra %25 SD katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıkları Çizelge 6.36'da verilmiştir.

Çizelge 6.36: %25 SD katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.

Tabaka Adı	Kalınlık, (Di) (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı, (a_i)	$SN^*=a_i \times Di$	Açıklamalar
Aşınma	4	0,42	1,68	
Binder	5	0,40	2,00	
Bitümlü Temel	8	0,36	2,88	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-Miks Temel	15	0,15	2,25	
Kırmataş Temel	0	0,13	0,00	

%25 SD katkılı zemin için tabaka kalınlıkları belirlendikten sonra KGM 2021 birim fiyat listesi esas alınarak üstyapı maliyet analizi yapılmış ve esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri Çizelge 6.37'de verilmiştir.

Çizelge 6.37: %25 SD katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m^2/cm Maliyeti, (TL)	m^2 Maliyeti, (TL)
KGM/6404/S-M	4 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m^2	14,01	3,50	14,01
KGM/6305	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapımı	m^2	13,29	2,66	13,29
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m^2	19,89	2,49	19,89
KGM/6100/3	Plent-Miks temel yapılması (kaplama yoğ: 2,4 g/cm^3)	ton	61,78	1,48	22,20
KGM/6000	ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m^3	56,13	0,56	0,00

%25 SD katkılı zemin için tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda :

- Toplam tabaka kalınlığı 32 cm olarak belirlenmiştir.
- Esnek yol üstyapı kalınlığının m² cinsinden birim maliyeti 69,43 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda esnek yol üstyapı maliyeti 1.388.616,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.1.3 AAC eklenmiş %25 SD katkılı zemin için tabaka kalınlıklarının hesabı ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %25 SD+AAÇ katkılı zemin için yine Çizelge 6.32'deki CBR değeri (%758,01) alınarak, M_R değeri 1137015 ve SN değeri 1,00 olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalardan sonra %25 SD+AAÇ katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıkları Çizelge 6.38'de verilmiştir.

Çizelge 6.38: %25 SD+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.

Tabaka Adı	Kalınlık, (Di) (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı, (a _i)	SN*=a _i ×Di	Açıklamalar
Aşınma	5	0,42	2,1	
Binder	8	0,40	3,2	
Bitümlü Temel	0	0,36	0	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-Miks Temel	20	0,15	3	
Kırmataş Temel	0	0,13	0	

%25 SD+AAÇ katkılı zemin için tabaka kalınlıkları belirlendikten sonra KGM 2021 birim fiyat listesi esas alınarak üstyapı maliyet analizi yapılmış ve esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri Çizelge 6.39'da verilmiştir.

Çizelge 6.39: %25 SD+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	m ² Maliyeti, (TL)
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	17,33	3,47	17,33
KGM/6308	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	20,86	2,61	20,86
KGM/6100/3	Plent-Miks temel yapılması (kaplama yoğ: 2,4 g/cm ³)	ton	61,78	1,48	29,60

%25 SD+AAÇ katkılı zemin için tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda :

- Toplam tabaka kalınlığı 33 cm olarak belirlenmiştir.
- Esnek yol üstyapı kalınlığının m² cinsinden birim maliyeti 67,84 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda esnek yol üstyapı maliyeti 1.356.888,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.1.4 %15 KAK katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının hesabı ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %15 KAK katkılı zemin için yine Çizelge 6.32'deki CBR değeri (%37,28) alınarak, M_R değeri 55920 ve SN değeri 3,4 olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalardan sonra %25 SD katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıkları Çizelge 6.40'da verilmiştir.

Çizelge 6.40: %15 KAK katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.

Tabaka Adı	Kalınlık, (Di) (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı, (a _i)	SN*=a _i ×Di	Açıklamalar
Aşınma	5	0,42	2,10	
Binder	6	0,40	2,40	
Bitümlü Temel	8	0,36	2,88	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-Miks Temel	15	0,15	2,25	
Kırmataş Temel	0	0,13	0,00	

%15 KAK katkılı zemin için tabaka kalınlıkları belirlendikten sonra KGM 2021 birim fiyat listesi esas alınarak üstyapı maliyet analizi yapılmış ve esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri Çizelge 6.41'de verilmiştir.

Çizelge 6.41: %15 KAK katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat (TL)	m ² /cm Maliyeti (TL)	m ² Maliyeti (TL)
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	17,33	3,47	17,33
KGM/6306	6 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	15,82	2,64	15,82
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	19,89	2,49	19,89
KGM/6100/3	Plent-Miks temel yapılması (kaplama yoğ: 2,4g/cm ³)	ton	61,78	1,48	22,20

%15 KAK katkılı zemin için tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda :

- Toplam tabaka kalınlığı 34 cm olarak belirlenmiştir.
- Esnek yol üstyapı kalınlığının m² cinsinden birim maliyeti 75,28 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda esnek yol üstyapı maliyeti 1.505.616,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.1.5 %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının hesabı ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için yine Çizelge 6.32'deki CBR değeri (%269,54) alınarak, M_R değeri 404310 ve SN değeri 1,6 olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalardan sonra %25 SD katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıkları Çizelge 6.42'de verilmiştir.

Çizelge 6.42: %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları.

Tabaka Adı	Kalınlık, (Di) (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı, (a _i)	SN*=a _i ×Di	Açıklamalar
Aşınma	4	0,42	1,68	
Binder	5	0,40	2,00	
Bitümlü Temel	8	0,36	2,88	
Plent-Miks Temel	15	0,15	2,25	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Kırmataş Temel	0	0,13	0,00	

%15 KAK+AAÇ katkılı zemin için tabaka kalınlıkları belirlendikten sonra KGM 2021 birim fiyat listesi esas alınarak üstyapı maliyet analizi yapılmış ve esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyetleri Çizelge 6.43’de verilmiştir.

Çizelge 6.43 %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	m ² Maliyeti, (TL)
KGM/6404/S-M	4 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	14,01	3,50	14,01
KGM/6305	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	13,29	2,66	13,29
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	19,89	2,49	19,89
KGM/6100/3	Plent-Miks temel yapılması (kaplama yoğ:2,4g/cm ³)	ton	61,78	1,48	22,20

%15 KAK+AAÇ katkılı zemin için tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda :

- Toplam tabaka kalınlığı 32 cm olarak belirlenmiştir.
- Esnek yol üstyapı kalınlığının m² cinsinden birim maliyeti 69,43 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda esnek yol üstyapı maliyeti 1.388.616,00 TL olarak hesaplanmıştır.

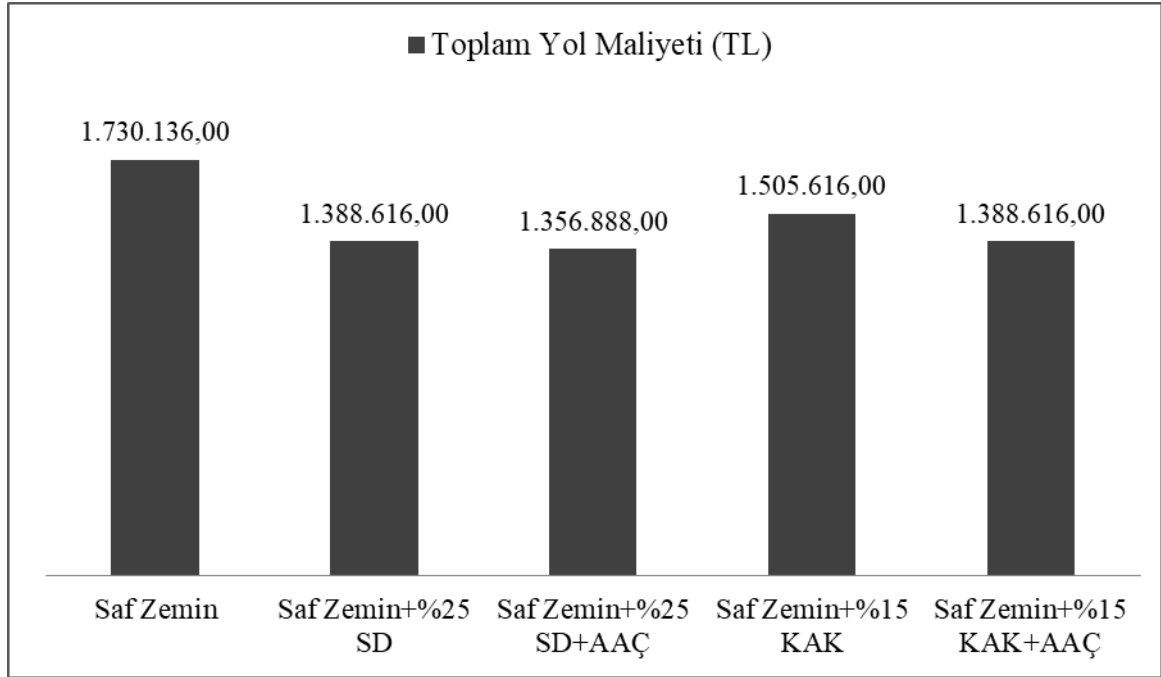
6.2.1.6 Saf ve katkılı zeminlerin tabaka kalınlıkları ve maliyetlerinin kıyaslanması

Saf ve katkılı zeminler için belirlenen esnek yol üstyapı tabaka kalınlıkları ve yapılan birim maliyet analizi sonuçları Çizelge 6.44’de verilmiştir.

Çizelge 6.44: Saf ve katkılı zeminler için esnek yol tabaka kalınlıkları ve birim maliyetleri.

Zemin Türü	Toplam Tabaka Kalınlığı, (cm)	Birim Maliyet, (TL)
Saf Zemin	54	86,51
Saf Zemin+%25 SD	32	69,43
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	33	67,84
Saf Zemin+%15 KAK	34	75,28
Saf Zemin+%15 KAK+AAÇ	32	69,43

Saf ve katkılı zeminler üzerinde 1000 m uzunluğunda 20 m genişliğinde bölünmüş bir esnek yol yapılması durumunda toplam yol maliyeti Şekil 6.37’de verilmiştir.



Şekil 6.37: Saf ve katkılı zeminler için esnek yol toplam maliyeti.

1000 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde bölünmüş bir yolda yol taban zemininin; %25 SD ile iyileştirilmiş olması halinde 341.520,00 TL, %25 SD+AAÇ ile iyileştirilmiş olması halinde 373.248,00 TL, %15 KAK ile iyileştirilmiş olması halinde 224.520,00 TL, %15 KAK+AAÇ ile iyileştirilmiş olması halinde 341.520,00 TL tasarruf sağlanacaktır.

6.2.2 Rijit yol üstyapı tasarımı ve maliyet analizi

Çalışmada, AASHTO Tasarım Rehberi (1993) ve Karayolları Beton Yol Üstyapı Projelendirme Rehberi (2019) esas alınarak saf ve katkılı zeminlerin yol taban zemini olduğu varsayılarak, derzli donatısız üstyapı tasarımı yapılmış ve beton yol plak kalınlığı hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar esnasında;

- Yolun, $2 \times 2 = 4$ şeritli devlet yolu olduğu,
- Proje analiz süresinin 30 yıl olduğu,
- İlk sene için günlük trafikte 200 adet treyler, 500 adet kamyon, 702 adet otobüs, 550 adet minibüs, 7000 adet otomobil olduğu kabul edilerek 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekrür sayısı 60,000,000 olarak kabul edilmiştir.

Rijit yol üstyapı tasarım hesabında kullanılan ortak değerler Çizelge 6.45’de verilmiştir.

Çizelge 6.45: Rijit üstyapı hesabında kullanılan parametreler [100].

Parametreler	Seçilen Değerler
Eşdeğer standart dingil yükü tekrür sayısı, $T_{8,2}$	60,000,000
Yük transfer katsayısı, J	2,7
Drenaj Katsayısı, C_d	1
Portland çimentolu betonun kopma modülü(psi)	660
Yolun ilk servis kabiliyeti, P_0	4,5
Yolun son servis kabiliyeti, P_t	2,5
Servis kabiliyeti indeksi, ΔPSI	2
Betonun elastite modülü, $E_c(C35/45)$	4,786,244
Güvenilirliğin standart normal sapması, Z_R	-1,645

Saf ve katkılı zeminler için rijit yol üstyapı beton plak kalınlıkları Çizelge 6.45’de verilen değerler kullanılarak 5.11 bağıntısı yardımı ile hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda zemin yatak katsayısı (k);

$$k = MR/19,4 \quad (6.2)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

Çalışmada, bütün zeminler için plak beton sınıfı C35/45 olarak seçilmiştir. Ayrıca, beton plak altında olması gereken granüler temel/alttemel tabakası bütün zeminler için aynı düşünüldüğünden maliyet hesaplamalarında değerlendirilmemiştir.

6.2.2.1 Saf zemin için rijit üstyapı tabaka kalınlığı ve maliyet analizi

Saf ve katkılı zemin numuneleri için daha önce belirlenerek Çizelge 6.32’de verilmiş olan CBR değerlerinden saf zemin için %16,95 değeri alınarak bağıntı 5.11 yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$MR=1500 \times CBR (\%)$ bağıntısı kullanılarak,

$MR=1500 \times 16,95=25425$ psi olarak hesaplanmış ve yatak katsayısı (k) değeri,

$k=MR/19,4=25425/19,4=1311$ olarak bulunmuştur.

$$\log(60.000.000) = (-1,645) \times 0,35 + 7,35 \times \log(d + 1) - 0,06 + \log[2 / (4,5-1,5)] / [(1 + (1,624 \times 10^7 / (d+1)^{8,46}) + (4,22 - 0,32 \times 2,5) \times \log [(660 \times 1 \times (d^{0,75} - 1,132)) / (215,63 \times 2,7 \times [d^{0,75} \times 18,42 / (4.786.244 / 1311^{0,25})])]$$

$d=15,5$ inç (39,37 cm) hesaplanmış ve $d=40$ cm, C35/45 beton plak tercih edilmiştir.

Saf zemin için plak kalınlığı belirlendikten sonra Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın yayınlamış olduğu birim fiyat listesi [104] esas alınarak maliyet analizi yapılmıştır. Rijit üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyet analizi Çizelge 6.46’da verilmiştir.

Çizelge 6.46: Saf zemin için rijit yol üstyapı plak kalınlığı birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	Hesaplanan Plak Kalınlığı, (cm)	m ² Maliyeti, (TL)
151.501.007	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dahil)	m ³	310,69	3,11	40	124,28

Rijit üstyapı plak kalınlığının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda:

- Saf zemin için rijit üstyapı plak kalınlığı 40 cm olarak belirlenmiştir.
- Saf zemin rijit yol üstyapı plak kalınlığı m² cinsinden birim maliyeti 124,28 TL olarak hesaplanmıştır.

- Saf zemin üzerinde 1000 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda rijit yol üstyapı maliyeti 2.485.520,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.2.2 %25 SD katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %25 SD katkılı zemin için yine Çizelge 6.32’de ki CBR değeri (%217,48) alınarak plak kalınlığı 31,75 cm olarak hesaplanmıştır.

%25 SD katkılı zemin için plak kalınlığı belirlendikten sonra d=32 cm beton plak tercih edilmiştir. %25 SD katkılı zemin için maliyet analizi Çizelge 6.47’de verilmiştir.

Çizelge 6.47: %25 SD katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	Hesaplanan Plak Kalınlığı, (cm)	m ² Maliyeti, (TL)
151.501.007	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dahil)	m ³	310,69	3,11	32	99,42

%25 SD katkılı zemin için rijit üstyapı plak kalınlığının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda:

- Plak kalınlığı 32 cm olarak belirlenmiştir.
- Rijit yol üstyapı plak kalınlığı m² cinsinden birim maliyeti 99,42 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda rijit yol üstyapı maliyeti 1.988.416,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.2.3 %25 SD+AAÇ katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığının hesaplanması ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %25 SD+AAÇ katkılı zemin için yine Çizelge 6.32’de ki CBR değeri (%758,01) alınarak plak kalınlığı 29,21 cm olarak hesaplanmıştır.

%25 SD+AAÇ katkılı zemin için plak kalınlığı belirlendikten sonra d=30 cm beton plak tercih edilmiştir. %25 SD+AAÇ katkılı zemin için maliyet analizi Çizelge 6.48’de verilmiştir.

Çizelge 6.48: %25 SD+AAÇ katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	Hesaplanan Plak Kalınlığı, (cm)	m ² Maliyeti, (TL)
151.501.007	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dahil)	m ³	310,69	3,11	30	93,21

%25 SD+AAÇ katkılı zemin için rijit üstyapı plak kalınlığının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda:

- Plak kalınlığı 30 cm olarak belirlenmiştir.
- Rijit yol üstyapı plak kalınlığı m² cinsinden birim maliyeti 93,21 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda rijit yol üstyapı maliyeti 1.864.140,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.2.4 %15 KAK katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığının belirlenmesi ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %15 KAK katkılı zemin için yine Çizelge 6.32’de ki CBR değeri (%37,28) alınarak plak kalınlığı 37,34 cm olarak hesaplanmıştır.

%15 KAK katkılı zemin için plak kalınlığı belirlendikten sonra d=38 cm beton plak tercih edilmiştir. %15 KAK katkılı zemin için maliyet analizi Çizelge 6.49’da verilmiştir.

Çizelge 6.49: %15 KAK katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	Hesaplanan Plak Kalınlığı, (cm)	m ² Maliyeti, (TL)
151.501.007	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dahil)	m ³	310,69	3,11	38	118,06

%15 KAK katkılı zemin için rijit üstyapı plak kalınlığının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda:

- %15 KAK katkılı zemin için rijit üstyapı plak kalınlığı 38 cm olarak belirlenmiştir.
- %15 KAK katkılı zemin için rijit yol üstyapı plak kalınlığı m² cinsinden birim maliyeti 118,06 TL olarak hesaplanmıştır.
- %15 KAK katkılı zemin üzerinde 1000 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda rijit yol üstyapı maliyeti 2.361.244,00 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2.2.5 %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için rijit yol üstyapı tabaka kalınlığının hesaplanması ve maliyet analizi

Saf zeminde olduğu gibi %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için yine Çizelge 6.32’de ki CBR değeri (%269,54) alınarak plak kalınlığı 30,48 cm olarak hesaplanmıştır.

%15 KAK+AAÇ katkılı zemin için plak kalınlığı belirlendikten sonra d=31 cm beton plak tercih edilmiştir. %15 KAK+AAÇ katkılı zemin için maliyet analizi Çizelge 6.50’de verilmiştir.

Çizelge 6.50: %15 KAK+AAÇ katkılı zeminin rijit yol üstyapı tabaka kalınlığı birim maliyeti.

Poz No	Tanım	Birim	Birim Fiyat, (TL)	m ² /cm Maliyeti, (TL)	Hesaplanan Plak Kalınlığı, (cm)	m ² Maliyeti, (TL)
151.501.007	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dahil)	m ³	310,69	3,11	31	96,31

%15 KAK+AAÇ katkılı zemin için rijit üstyapı plak kalınlığının belirlenmesi ve yapılan maliyet analizi sonucunda:

- Plak kalınlığı 31 cm olarak belirlenmiştir.
- Rijit yol üstyapı plak kalınlığı m² cinsinden birim maliyeti 96,31 TL olarak hesaplanmıştır.
- 1000 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde bölünmüş bir yol yapılması durumunda rijit yol üstyapı maliyeti 1.926.278,00 TL olarak hesaplanmıştır.

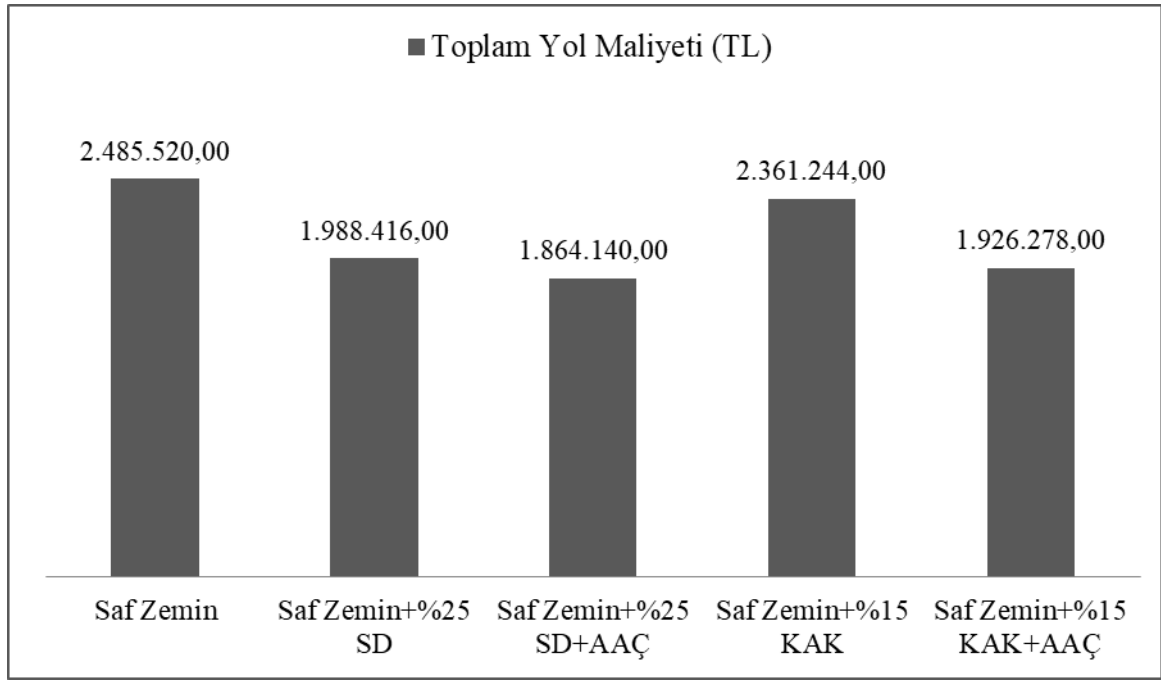
6.2.2.6 Saf ve katkılı zeminlerin rijit yol üstyapı hesaplarının ve maliyetinin kıyaslanması

Saf ve katkılı zeminler için belirlenen rijit yol plak kalınlıkları ve yapılan birim maliyet analizi sonuçları Çizelge 6.51’de, verilmiştir.

Çizelge 6.51: Saf ve katkılı zeminler için plak kalınlığı ve birim maliyetleri.

Zemin Türü	Toplam Tabaka Kalınlığı, (cm)	Birim Maliyet, (TL)
Saf Zemin	40	124,28
Saf Zemin+%25 SD	32	99,42
Saf Zemin+%25 SD+AAÇ	30	93,21
Saf Zemin+%15 KAK	38	118,06
Saf Zemin+%15 KAK+AAÇ	31	96,31

Saf ve katkılı zeminler üzerinde 1000 m uzunluğunda 20 m genişliğinde bölünmüş bir rijit yol yapılması durumunda toplam yol maliyeti Şekil 6.38’de verilmiştir.



Şekil 6.38: Saf ve katkılı zeminler için rijit yol toplam maliyeti.

1000 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde bölünmüş bir yolda yol taban zemininin; %25 SD ile iyileştirilmiş olması halinde 497.104,00 TL, %25 SD+AAÇ ile iyileştirilmiş olması halinde 621.380,00 TL, %15 KAK ile iyileştirilmiş olması halinde 124.276,00 TL, %15 KAK+AAÇ ile iyileştirilmiş olması halinde 559.242,00 TL tasarruf sağlanacaktır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, taşıma gücü zayıf bir yol taban zemininin mühendislik özellikleri üzerinde SD, KAK ve AAÇ katkılarının etkileri araştırılarak, elde edilen veriler doğrultusunda yol üstyapı tabaka kalınlıkları ve maliyetleri analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Standart proktor deney sonuçları incelendiğinde, zemine ilave edilen katkı oranı artıkça su içeriği değerinin arttığı, kuru birim hacim ağırlığı değerinin azaldığı görülmüştür. Meydana gelen bu değişimin, kullanılan SD ve KAK katkılarının ince taneli malzeme olmalarından dolayı zeminin su emme kapasitesini artırmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
2. Serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde; SD, SD+AAÇ, KAK, KAK+AAÇ katkıları ile zemin mukavemet değerlerinin arttığı görülmüş ancak en yüksek mukavemet değerlerine 28 günlük kür sonunda %25 SD, %25 SD+AAÇ, %15 KAK, %15 KAK+AAÇ ilaveleri ile ulaşılmıştır. Saf zemine kıyasla 28 günlük kür sonunda zemin mukavemet değerinin %25 SD katkısı ile 3,49 kat, %25 SD+AAÇ katkısı ile 17,79 kat, %15 KAK katkısı ile 1,31 kat ve %15 KAK+AAÇ katkısı ile 5,29 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçların SD ve KAK katkılarının zeminin kohezyon yeteneği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve özellikle AAÇ kullanımının katkılardaki alümina ve silika minerallerini aktive ederek geopolimer bir yapılaştırma oluşturmamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
3. CBR deney sonuçları incelendiğinde; tüm katkılı zeminlerde 28 günlük kür sonunda en yüksek CBR değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Saf zemine kıyasla 28 gün kür sonunda CBR değerinin %25 SD katkısı ile 7,52 kat, %25 SD+AAÇ katkısı ile 44,72 kat, %15 KAK katkısı ile 2,20 kat ve %15 KAK+AAÇ katkısı ile 15,90 kat arttığı tespit edilmiştir. Özellikle AAÇ kullanılan karışımlardan elde edilen yüksek sonuçların, karışımlarda oluşan geopolimerleşme sebebiyle zeminin taşıma gücünü arttırdığı şeklinde değerlendirilmektedir.

4. Esnek yol üstyapı tasarım sonuçlarına göre; %25 SD, %25 SD+AAÇ, %15 KAK, %15 KAK+AAÇ katkılı zeminlerin saf zemine kıyasla tabaka kalınlıklarının sırasıyla %40,74: %38,88; %37,04 ve %40,74 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
5. Esnek yol üstyapı birim maliyet analizlerine göre; %25 SD, %25 SD+AAÇ, %15 KAK, %15 KAK+AAÇ katkılı zeminlerin saf zemine kıyasla yol üstyapı birim maliyetinin sırasıyla %19,74, %21,58, %12,98 ve %19,74 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
6. Uzunluğu 1000 m, genişliği 20 m olan bölünmüş bir yol taban zemininin %25 SD, %25 SD+AAÇ, %15 KAK ve %15 KAK+AAÇ katkıları ile stabilize edildiğinde saf zemine kıyasla esnek üstyapı maliyetlerinde sırasıyla 341.520,00, 373.248,00, 224.520,00 ve 341.520,00 TL tasarruf sağlanacağı görülmüştür.
7. Rijit yol üstyapı tasarım sonuçlarına göre; %25 SD, %25 SD+AAÇ, %15 KAK ve %15 KAK+AAÇ katkılı zeminlerin saf zemine kıyasla tabaka kalınlıkları sırasıyla %20, %25, %5 ve %22,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
8. Rijit yol üstyapı maliyet analizine göre; %25 SD, %25 SD+AAÇ, %15 KAK, %15 KAK+AAÇ katkılı zeminlerin saf zemine kıyasla yol üstyapı maliyetinin sırasıyla %20, %25, %5 ve %22,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
9. Uzunluğu 1000 m, genişliği 20 m olan bölünmüş bir yol taban zemininin %25 SD, %25 SD+AAÇ, %15 KAK ve %15 KAK+AAÇ katkıları ile stabilize edildiğinde saf zemine kıyasla rijit üstyapı maliyetlerinde sırasıyla 497.104,00, 621.380,00, 124.276,00 ve 559.242,00 TL tasarruf sağlanacağı görülmüştür.

Sonuç olarak; zayıf bir yol taban zemininin SD, SD+AAÇ, KAK, KAK+AAÇ katkıları ile stabilize edilerek iyileştirilmesi halinde zeminde dayanımın arttığı, esnek ve rijit üstyapı tabaka kalınlıkları ve maliyetlerinde önemli ölçüde azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Aynı zamanda, endüstriyel atık ürün olan SD ve KAK'ın kullanımı ile bir katma değer sağlanarak ülke ekonomisine ve çevreye katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Uzuner, B.A.** (2007). *Temel Zemin Mekaniği*, Derya Kitabevi Trabzon.
- [2] **Özaydın K.** (2008) *Zemin Mekaniği*, Birsen Yayınevi İstanbul.
- [3] **Yılmaz, I. ve diğ.** (2017), *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler*, Seçkin Kitabevi Ankara.
- [4] **Yıldırım, S.** (2002). *Zeminlerin İncelenmesi ve Temel Tasarımı*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [5] **Sarıcı T.** (2019). *Puzolan Ile Güçlendirilmiş İnşaat Ve Yıkıntı Atıklarının Granüler Dolgu Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi*, İnönü Üniversitesi, FBE, Doktora Tezi.
- [6] **Çalık, Ü.** (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç Ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [7] **Uzuner, B.A.** (2016). *Temel Mühendisliğine Giriş*, Derya Kitabevi, 6. Basım, Trabzon.
- [8] **DeJong-Hughes, J., Moncrief, J. F., Voorhees, W. B., Swan, J. B.** (2001). Soil compaction: causes, effects and control. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service.
- [9] **Uzuner, B. A.** (2016). *Temel zemin mekaniği*. Derya Kitabevi, 10. Basım, Trabzon, 740s.
- [10] **Url-1** <https://www.hamm.eu/media/produkte/overview/hamm-ag-rollerrange_1280x560.jpg>.
- [11] **Url-2** <http://geosistem.net/dinamik_kompaksiyon.html>
- [12] **Kara, H.B.** (2012), *Temel zemin iyileştirme yöntemleri- drenaj ders notu*, Kayseri, Erciyes Üniversitesi, 47-77 s.
- [13] **Cedergren, H. R.** (1989). *Seepage, Drainage, and Flow Nets (3.Baskı)*. Florida: John Wiley and Sons Inc., 232-255.
- [14] **Tunç, A.** (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 912 s.
- [15] **Çetin, A. Y.** (2011). *Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu* (Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [16] **Wang, L. And Reston, E. Y.** (2007), “Analysis Of Asphalt Pavement Materials And Systems Emerging Methods: *Proceedings Of The Symposium On The Mechanics Of Flexible Pavements*, June 25-30, 2006, Boulder, Colorado,” American Society Of Civil Engineers, Reston, Va, USA
- [17] **Url-3** <<http://www.cement.org/>>
- [18] **Ng, C., Alengaram, U. J., Wong, L. S., Mo, K. H., Jumaat, M. Z., ve Ramesh, S.** (2018). A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 550-576. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.075>

- [19] **Ganesh, C. A., ve Muthukannan, M.** (2018). A review of recent developments in geopolymer concrete. *International Journal of Engineering ve Technology*, 7(4.5), 696. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.5.25061>
- [20] **Zhang, Y., Xiao, R., Jiang, X., Li, W., Zhu, X., ve Huang, B.** (2020). Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122970.
- [21] **Shehata, N., Ali, E. T. S., ve Abdelkareem, M. A.** (2020). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of The Total Environment*, 143166.
- [22] **Sönmez, İ., Günay, E., Topçu, A., Kara, M., & Ali, S.** *Eski Asfalt Kaplamaların Geri Dönüştürülmesi Ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yeniden Kullanımı..*
- [23] **Umar, F., & Ağar, E.** (1991). *Yol Üstyapısı*, 339 s, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [24] **Umar, F. Ve Yayla, N.**, (1994). *Yol İnşaatı*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [25] **Tunç, A.**, (2007), *Yol Malzemeleri Ve Uygulamaları*. Nobel Yayınları 2. Baskı, Ankara.
- [26] **Yar B.**, (2019), *Elektrik Ark Ocağı Firini Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapısı Aşınma Tabakası İçin Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü YL Tezi
- [27] **Geçkil, T.**, (2008), *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [28] **Url-4**<<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQcZg1SoDpbKdX4R0fv5tj16VScxYsqJX1FQ&usqp=CAU>>
- [29] **Kök, B.V.**, *Yol Esnek Üstyapısı Ders Notları*, 2018
- [30] **Url-5**<<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT8w23CJDxhBKm d h5Kww7sIhgZkhYFRjzHb2Q&usqp=CAU>>
- [31] **Kaya, A. Ö.**, (2014), *Esnek Üstyapı Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi) İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] **Tunç, A.** (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*. Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- [33] **Whiteoak, D., ed. Lav, A. H. , Lav, A.**, 2004, *Shell Bitüm Elkitabı*, İsfalt, İstanbul
- [34] **Kök, E.** (2008). *Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [35] **Url-6** <<https://istanbul.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/215.pdf>>
- [36] **Mutlugeldi Cem** (2015), *Elektrik Ark Firini Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Bitümlü Temel Tabakasında Agregası Olarak Değerlendirilmesi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü YL Tezi
- [37] **Yoder, E., J., Witczak, M., W.**, 1975, *Principles of Pavement Design*, John Wiley&Sons, New York

- [38] Uysal, F., Yılmaz, V., & Topçu, H. M. (2020). Farklı Atık Malzemeler Ile Stabilize Edilmiş İnce Daneli Zeminin Mühendislik Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 19-26.
- [39] Okucu, A., & Gündüz, T. B. Kil Zeminin Yüksek Fırın Cürufu Ile Stabilizasyonunun Araştırılması.
- [40] Bilge, T. (2011). *Yüksek fırın cürufu katkısının kil zeminlerin stabilizasyonuna etkisinin araştırılması* (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [41] Geçkil, T., Tanyildizi, M. M., & Yildiran, E. S. (2020). Yol Altındaki Killi Bir Zeminin Uçucu Kül İle İyileştirilmesinin Karayolu Üstyapısına Ve Maliyetine Etkileri. *Savunma Bilimleri Dergisi*, (38), 1-21.
- [42] Çakılcıoğlu, İ. (2007). *Yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonu* (Yüksek lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
- [43] Öntürk, K. (2011). *Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç Ve Uçucu Külün Kullanımı*.
- [44] Kök, B. V., Yılmaz, M., & Geçkil, A. (2012). Çimento Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Maliyetine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 165-172.
- [45] Türköz, M., Umu, S. U., & Öztürk, O. (2021). *Effect of Silica Fume as a Waste Material for Sustainable Environment on the Stabilization and Dynamic Behavior of Dispersive Soil*. *Sustainability*, 13(8), 4321.
- [46].Türköz, M., Savaş, H. ve Taşçı, G. (2018). Hem şişme hem de dağılma özelliği gösteren killi bir zeminin jeoteknik özellikleri üzerine silis dumanı ve kirecin etkisi. *Arabian Journal of Geosciences* , 11 (23), 1-14.
- [47] Al-Zairjawi, MK (2009). Çimento ve silis dumanının çimento ile eklenmesinin killi zeminin sıkıştırma özellikleri ve kesme dayanımı üzerine etkisi. *Al-Qadisiyah Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 2 (2), 253-261.
- [48] Bharadwaj, S., & Trivedi, M. K. (2016). Impact of micro silica fume on engineering properties of expansive soil. *Int J Sci Technol Eng*, 2, 435-40.
- [49] Al-Soudany, K. (2018). Remediation of clayey soil using silica fume. *In MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 01017). *EDP Sciences*.
- [50] Osinubi, KJ (2000). *Tropikal siyah kilin çimento ve toz haline getirilmiş kömür tabanlı kül katkısı ile stabilizasyonu*. Gelen *Advances* doymamış Geoteknikte (s. 289-302).
- [51] Güllü, H. (2014). Factorial experimental approach for effective dosage rate of stabilizer: Application for fine-grained soil treated with bottom ash. *Soils and Foundations*, 54(3), 462-477.
- [52] Güllü, H. (2015). Unconfined compressive strength and freeze–thaw resistance of fine-grained soil stabilised with bottom ash, lime and superplasticiser. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 608-634.
- [53] Kim, Y. T., & Do, T. H. (2012). Effect of bottom ash particle size on strength development in composite geomaterial. *Engineering Geology*, 139, 85-91.

- [54] **Jorat, M. E., Marto, A., Namazi, E., & Amin, M. M.** (2011). Engineering characteristics of kaolin mixed with various percentages of bottom ash. *Electron. J. Geotech. Eng*, 16(2), 841-850.
- [55] **Kim, B. ve Prezzi, M.** (2008). Indiana F sınıfı uçucu ve dip kül karışımlarının sıkıştırma özellikleri ve aşındırıcılığı. *İnşaat ve İnşaat Malzemeleri*, 22 (4), 694-702.
- [56] **Geçkil T., Tanyıldızı M. M., Yıldırım E. S.,** (2020), Yüksek Fırın Cürufu İle Stabilize Edilmiş Killi Bir Zeminin Yol Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlıklarına Ve Maliyetine Etkileri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 509-520.
- [57] **Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M., & Savaş, H.** Kil Zeminin Dayanımı Üzerinde Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılarının Etkisi Ve Karşılaştırmalı Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 910-919.
- [58] **Bilgen, G., Kavak, A., & Çapar, Ö. F.** (2012). Düşük Plastisiteli Bir Kilde Katkı Olarak Çelikhane Curufunun Kullanılması ve Kireç ile Etkileşimi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(2), 30-38.
- [59] **Fırat, S., & Cömert, A.** (2011). Uçucu Kül, Kireç ve Çimento ile İyileştirilmiş Kaolinde Kür Süresinin CBR Üzerine Etkileri. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt*, (26), 719-730.
- [60] **Yadu, L., & Tripathi, R. K.** (2013). Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil. *Procedia Engineering*, 51, 125-131.
- [61] **Ghabaee, S.** (2015). *Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi* (Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [62] **Vural, İ.** (2019). İnşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 1-6.
- [63] **Neeraja, D., & Rao Narsimha, A. V.** (2010). Use of certain admixtures in the construction of pavement on expansive clayey subgrade. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(11), 6108-6114.
- [64] **Develioğlu, İ., & Pulat, H. F.** (2018). Yüksek fırın cürufunun geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitesi performansının incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 433-438.
- [65] **Cömert, A. T.** (2005). *Uçucu küllerin zemin stabilizasyonuna etkileri* (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- [66] **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M., & İnce, C. B.** (2021). Yüksek Fırın Cürufu İle Stabilize Edilmiş Killi Bir Zeminin Rijit Kaplama Kalınlığı Ve Maliyetine Etkileri. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (27), 158-170.
- [67] **Bağrıaçık, B.** (2017). Ulaşım Yapıları Temel/Alt Temel Zeminlerinin Kireçle Stabilizasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 39-48.
- [68] **Şengül, E.** (2010). *Yüksek su muhtevalı killi yol taban zemininin kireç stabilizasyonu ve hücresel dolgu sistemiyle iyileştirilmesi* (Doctoral dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).

- [69] **Somna K., Jaturapitakkul C. , Kajitvichyanukul P. , Chindaprasit P. ,** (2011) Fuel Volume 90, Issue 6, Pages 2118-2124
- [70] **Yaghoubi M. , Arurajah A. , Disfani M.M. , Horpibulsuk S. , Bo M. W. , Darmawan S.** (2018) ‘Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil.’ *Soil and Foundations* Volume 58, Issue 3 Pages 716-728
- [71] **Sukprasert S. , Hoy M. , Horpibulsuk S. , Aruljarah A. , Rashid A. , Nazir R. ,** Fly ash based geopolymer stabilization of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications, *Journal Road Materials and Pavement Design*
- [72] **Latifi N. , Vahedifard F. , Ghazanfari E. , Horpibulsuk S. , Marto A. , Williams J.** , (2018) *International Journal of Geomechanics* Vol.18, Issue 3 (March 2018)
- [73] **Chowdary B. , Ramanamurthy V. , Pillai R.J. ,**(2020), Fiber reinforced geopolymer treated soft clay-an innovative and sustainable alternative for soil stabilization, 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development, *Materialstoday proceedings* Volume 32, part 4, pages 777-781
- [74] **Singhi B. ,Laskar A.I. , Ahmed M.A. ,** ‘Mechanical Behavior and Sulfate Resistance of Alkali Activated Stabilized Clayey Soil’ , *Geotechnical and Geological Engineering*, 35,1907-1920(2017)
- [75] **Adhikari B., Khattak M.J.,Adhikari S.,** ‘Mechanical and durability characteristics of flyash-based soil-geopolymer mixtures for pavement base and subbase layers’ *International Journal of Pavement Engineering*
- [76] **Sharma K., Kumar A. ,**(2020) ‘Utilization of industrial waste—based geopolymers as a soil stabilizer—a review’
- [77] **Mohammadinia A., Arulrajah A., Sanjayan J., Disfani M.M., Bo M.W., Darmawan S.,** ‘Stabilization of Demolition Materials for Pavement Base/Subbase Applications Using Fly Ash and Slag Geopolymers: Laboratory Investigation’, *Journal of Materials in Civil Engineering*/ Volume 28 Issue 7-July2016
- [78] **Totuç E., Göktepe F., Yaşar M.** ‘Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi’ , *DÜMF Mühendislik Dergisi* 10:2 (2019) : 769-778
- [79] **Diallo M. L., Ünsever Y.S.** (2020), ‘İnşaat yıkıntı atığı ve kireçle kil zeminin stabilizasyonu üzerine deneysel bir çalışma’ , *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*
- [80] **Çoruh E., Hınışoğlu S. , Kocakerim M. , Arason S. , Oltulu M. ,**‘Borojipsin Alt Temel Tabakasında Stabilizasyon Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması’ , *EÜFBED- Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt-Sayı: 6-2, 221-231, 2013
- [81] **Teerawattanasuk C., Voottipruex P.,** ‘Comparison Between Cement and Fly Ash Geopolmer for Stabilized Marginal Lateritic Soil as Road Material’ , *International Journal of Pavement Engineering*, Volume 20, 2019 Issue 11
- [82] **GEÇKİL, T., SARICI, T., & KARABAŞ, B.** (2021). Siyah Karbon ile Stabilize Edilen Taban Zeminin Yol Esnek Üst Yapı Maliyetine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 222-235.

- [83] **Url-7** <https://www.google.com/maps?q=in%C3%B6n%C3%BC+%C3%BCniversitesi+m%C3%BChendislik+fak%C3%BCltesi&um=1&ie=UTF8&sa=X&ved=2ahUKEwja2fOd_pX2AhXISfEDHV1aCMcQ_AUoAnoECAIQBA>
- [84] **Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H.,** (2001). "Beton Teknolojisi", Yapı Denetimi El Kitabı 2. İzmir.
- [85] **Beycioğlu, A., Başıyigit, C., & Subaşı, S.** *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı İle Geri Kazanılması Ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması*
- [86] **Akçuru, O.** (2020). *Jet-grout enjeksiyon uygulamalarında kazan altı taban küllü katkılı çimento bazlı harçların reolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Master's thesis, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [87] **Ekinci E.** (2017). *Volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması* (Master's thesis, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [88] **ASTM D422-63,** (2016), *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [89] **Orhan.M vd** (2013), *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri*, Gazi Kitabevi Ankara.
- [90] **ASTM D854,** (2016), *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [91]. **ASTM D4318,** (2018) *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [92]. **ASTM D4959-16,** (2016), *Standard Test Method for Determination of Water Content of Soil By Direct Heating*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [93] **ASTM D698-12,** (2012) *Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standart Effort*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [94] **ASTM D2166,** (2016), *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [95] **Yıldıran E.S.**(2019),*Çeşitli Katkı Maddelerinin Yol Taban Zemin Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*, İnönü Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi
- [96] **ASTM D1883-21,** (2021), *Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [97] **Yayla.N.** (2018), *Karayolu Mühendisliği*, Birsen Yayınevi İstanbul.
- [98] **Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi** (2008). *T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü*, Ankara
- [99] **AASHTO** (1993). *Interim Guide For Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

- [100] **Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi** (2019). T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- [101] **Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W.** (2016). Influence of class F fly ash and curing temperature on strength development of fly ash-recycled concrete aggregate blends. *Construction and Building Materials*, 127, 743-750.
- [102] **Binquet, J. ve Lee, K. L.** (1975). Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs. *Journal of the geotechnical Engineering Division*, 101(12), 1257-1276.
- [103] **Yol, Köprü, Tünel, Bitümlü Kaplamalar Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi** (2021), T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [104] **İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları** (2021), T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Özge Nur ÇETKİN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2019, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans:** 2022, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR:

- **Geçkil T., Sarıcı T., Çetkin Ö.N.,** (2021, August), Effects of Curing Time on The Unconfined Compressive Strength of Blast Furnace Slag Stabilized Soil, Euro Asia 9th. International Congress on Applied Sciences, (pp.249-260)