



**UÇUCU KÜL BAĞLAYICILI ALKALİ
AKTİVASYONLU YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL
DERİN KARIŞTIRMA NUMUNELERİNİN TEK VE
ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONUNUN DAYANIM
VE DURABİLİTE AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Esra YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Fatih YILMAZ

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**UÇUCU KÜL BAĞLAYICILI ALKALİ AKTİVASYONLU YÜKSEK
PLASTİSİTELİ KİL DERİN KARIŞTIRMA NUMUNELERİNİN TEK VE ÇOK
AMAÇLI OPTİMİZASYONUNUN DAYANIM VE DURABİLİTE AÇISINDAN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra YILMAZ

Danışman: Doç. Dr. Fatih YILMAZ

BAYBURT- 2025

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Fatih YILMAZ danışmanlığında, Esra YILMAZ tarafından hazırlanan “Uçucu Kül Bağlayıcılı Alkali Aktivasyonlu Yüksek Plastisiteli Kil Derin Karıştırma Numunelerinin Tek ve Çok Amaçlı Optimizasyonunun Dayanım ve Durabilite Açısından İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 31.07.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

Üye : Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU

Üye : Doç. Dr. Fatih YILMAZ

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM

Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Fatih YILMAZ danışmanlığında hazırlamış olduğum “Uçucu Kül Bağlayıcılı Alkali Aktivasyonlu Yüksek Plastisiteli Kil Derin Karıştırma Numunelerinin Tek ve Çok Amaçlı Optimizasyonunun Dayanım ve Durabilite Açısından İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

31.07.2025

Esra YILMAZ



ÖN SÖZ

Lisans ve lisansüstü eğitim hayatım boyunca bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle her zaman yanımda olan, akademik yolculuğumun en kıymetli rehberlerinden saygıdeğer tez danışmanım Doç. Dr. Fatih YILMAZ'a en içten şükranlarımı sunarım.

Çalışmamın analiz ve yorumlama sürecinde değerli katkılarını esirgemeyen Bayburt Üniversitesi Geoteknik Ana Bilim Dalı hocalarından Doç. Dr. Hakan Alper KAMİLOĞLU'na ve destekleriyle yanımda olan Bayburt Üniversitesi Yapım Yönetimi Ana Bilim Dalı hocalarından Dr. Öğr. Üyesi Duygu TEKİN'e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım sırasında özverili yardımlarıyla yanımda olan kıymetli meslektaşım Muhammed İkbâl ÖZKETEN'e ve akademik hayatım boyunca bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşarak bana yol gösteren tüm hocalarıma minnettarım.

Hayat yolculuğumun her anında bana koşulsuz destek olan canım babam Yavmi YILMAZ'a, fedakârlığı ve sevgisiyle daima yanımda olan sevgili annem Feride YILMAZ'a, desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli kardeşlerime ve her daim yüzümde tebessüm oluşturan, en kıymetli motivasyon kaynağım sevgili yeğenlerime gönülden teşekkür ederim.

Esra YILMAZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇUCU KÜL BAĞLAYICILI ALKALİ AKTİVASYONLU YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL DERİN KARIŞTIRMA NUMUNELERİNİN TEK VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONUNUN DAYANIM VE DURABİLİTE AÇISINDAN İNCELENMESİ

Esra YILMAZ

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih YILMAZ

Bayburt-2025, Sayfa: 186

Bu çalışmada alkali aktivatörlerle aktive edilmiş uçucu kül ve zemin karışımlarının performansı dayanım ve durabilite açısından irdelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, Yanıt Yüzey Metodu kullanılarak üç farklı tek amaçlı optimizasyon senaryosu uygulanmıştır. Bunlar sırasıyla; serbest basınç dayanımının maksimize edilmesi, karbon ayak izinin minimize edilmesi ve en düşük maliyet ile karışımların hazırlanmasıdır. Çalışma kapsamında ayrıca tüm senaryoların aynı anda optimize edildiği çok amaçlı bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Hazırlanan karışımlar ile serbest basınç dayanımı, donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve suda bekletme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, tek ve çok amaçlı optimizasyonlara göre hazırlanan karışımların dayanım ve durabilite değerleri birbirlerine ve ilgili standartlara göre mukayese edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, serbest basınç değerini maksimize etmeyi hedefleyen optimizasyon yaklaşımının daha etkin sonuçlar ortaya koyduğu kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, uçucu kül, alkali aktivasyonu, dayanım, durabilite.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF MONO AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF HIGH PLASTICITY CLAY DEEP MIXING SAMPLES CONTAINING ALKALI ACTIVATED FLY ASH BINDER IN TERMS OF STRENGTH AND DURABILITY

Esra YILMAZ

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih YILMAZ

Bayburt-2025, Pages: 186

In this study, the performance of fly ash and soil mixtures activated with alkali activators was investigated in terms of strength and durability. In the first phase of the study, three different mono-objective optimization scenarios were implemented using the Response Surface Method. These were: maximizing unconfined compressive strength, minimizing carbon footprint, and preparing mixtures with the lowest cost. A multi-objective optimization process was also conducted within the scope of the study, in which all scenarios were optimized simultaneously. Unconfined compressive strength, freezing-thawing, wetting-drying, and soaking tests were conducted on the prepared mixtures. As a result of the experimental studies, the strength and durability values of the mixtures prepared according to the mono and multi-objective optimizations were compared with each other and against relevant standards. In the light of the obtained data, it was concluded that the optimization approach aiming to maximize the unconfined compressive value yielded more effective results.

Keywords: Soil stabilization, fly ash, alkali activation, strength, durability.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME.....	III
ÖN SÖZ.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	X
ŞEKİLLER.....	XI
KISALTMALAR.....	XVI
SİMGELER.....	XVIII
GİRİŞ.....	1
Çalışmanın Konusu ve Problemi.....	3
Çalışmanın Amacı.....	4
Çalışmanın Önemi ve Gerekçesi.....	4
BİRİNCİ BÖLÜM.....	5
1. KURAMSAL ÇERÇEVE.....	5
1.1. ZEMİN SINIFLANDIRMA.....	6
1.1.1. Geleneksel Zemin Sınıflandırma Sistemleri.....	6
1.1.2. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Kullanımı.....	7
1.1.3. Jeofiziksel ve Uzaktan Algılama Teknikleri.....	7
1.2. ZEMİN STABİLİZASYONU.....	7
1.2.1. Zemin Türüne Göre Stabilizasyon Yöntemleri.....	8
1.2.1.1. Killi zeminlerde stabilizasyon.....	8
1.2.1.2. Kumlu zeminlerde stabilizasyon.....	9
1.2.1.3. Siltli zeminlerde stabilizasyon.....	9
1.2.2. Zemin Stabilizasyon Teknikleri.....	9
1.2.2.1. Kimyasal stabilizasyon.....	14
1.2.2.2. Mekanik stabilizasyon.....	16
1.2.2.3. Biyolojik stabilizasyon.....	23
1.2.2.4. Fiziksel stabilizasyon.....	24
1.2.2.5. Geleneksel olmayan katkı malzemeleri ile stabilizasyon.....	26
1.3. LİTERATÜR TARAMASI.....	27
İKİNCİ BÖLÜM.....	46
2. MATERYAL VE METOT.....	46
2.1. MALZEMELER.....	46
2.1.1 Kil Malzeme.....	46
2.1.2. Uçucu Kül.....	48
2.1.3. Sodyum Hidroksit.....	51
2.1.3.1. Sodyum hidroksitin zemin stabilizasyonundaki etkileri ve kullanımı.....	52
2.1.4. Sodyum Silikat.....	54
2.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
2.2.1. Elek Analizi.....	56

2.2.2. Kıvam Limitleri	59
2.2.2.1. Likit limit deneyi	61
2.2.2.2. Plastik limit deneyi	61
2.2.2.3. Plastik indeks (PI).....	61
2.2.3. Standart Kompaksiyon Deneyi.....	61
2.2.3.1. Standart kompaksiyon deneyi ve önemi	62
2.2.3.2. Deneyin tanımı ve uygulama prosedürü	63
2.2.3.3. Standart kompaksiyon deneyin uygulanışı	63
2.2.4. Serbest Basınç Deneyi	66
2.2.4.1. Deneyin tanımı ve uygulama prosedürü	66
2.2.4.2. Deneyin uygulanışı	71
2.2.5. Özgül Ağırlık Deneyi	73
2.2.5.1. Deneyin tanımı ve prensibi.....	73
2.2.6. Donma-Çözülme Deneyi	74
2.2.6.1. Deneyin amacı ve prensibi	75
2.2.7. Islanma-Kuruma Deneyi	83
2.2.7.1. Deneyin amacı ve prensibi	83
2.2.8. Islatma Deneyi.....	84
2.2.8.1. Islatma deneyinin amacı ve önemi	86
2.2.9. Karbon Ayak İzi	92
2.2.9.1. Zemin stabilizasyonunun çevresel etkileri ve karbon ayak izi	92
2.2.9.2. Deneysel uygulama süreci	92
2.2.10. Yanıt Yüzey Metodu (RSM)	94
2.2.11. X-ışını Floresansı (XRF)	100
2.2.12. X-ışını Difraksiyonu (XRD).....	101
2.2.13. Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope – SEM)	102
2.2.13.1. Doğal zemin SEM analizi.....	103
2.2.13.2. Uçucu kül katkılı numune SEM analizi.....	103
2.2.13.3. Serbest basınç dayanımı maksimum olan numune SEM analizi.....	103
2.2.13.4. Minimum maliyetle hazırlanmış numune SEM analzi	104
2.2.13.5. Minimum karbon salınımı esasına göre hazırlanan numune SEM yorumları.....	104
2.2.13.6. Çoklu optimizasyonla hazırlanmış numune SEM analizi.....	104
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	106
3. BULGULAR	106
3.1. TEPKİ DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ VE KRİTERLERİN ÇOK BOYUTLU DEĞERLENDİRİLMESİ.....	106
3.2. TEK EKSENLİ SERBEST BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI	107
3.2.1. Serbest Basınç Dayanımı Bulguları.....	109
3.3. CO ₂ AYAK İZİNİN HESAPLANMASI.....	112
3.4. MALİYET ANALİZİNE YÖNELİK YÖNTEMSEL YAKLAŞIM	114
3.5. ISLATMA DENEYİ SONUÇLARI.....	117
3.6. DONMA-ÇÖZÜLME DENEYİ SONUÇLARI.....	120
3.7. ISLANMA-KURUMA DENEYİ SONUÇLARI	123
3.8. İSTATİSTİKSEL MODELLEME VE UYUM DEĞERLENDİRMESİ	129

3.8.1. Modelin Doğrulanması	132
3.8.2. Stabilize Edilmiş Numunelerin Karakterizasyonu	135
3.8.3. Modellerdeki Faktör Etkilerinin Değerlendirilmesi	137
3.8.4. Tek Amaçlı (Mono-Objektif) Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	139
3.8.5. Çok Amaçlı Optimizasyon	143
3.8.6. Modellerin Dayanıklılık Performansı.....	145
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	149
Sonuç ve Tartışma	149
Öneriler	151
KAYNAKÇA.....	152
EKLER	162
Ek 1:XRD Analizi Sonuçları	162
Ek 2: SEM Analizi Sonuçları	165
Doğal Zemin İçeriği SEM Analizi Görüntüleri.....	165
Uçucu Kül Katkısına Ait SEM Analizi Görüntüleri.....	168
Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Zemin Numunelerine Ait SEM Analizi Görüntüleri	172
Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin SEM Analizi Görüntüleri	175
Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Numunelerinin SEM Analizi Görüntüleri	179
Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Numunelerin SEM Analizi Görüntüleri.....	182
ÖZ GEÇMİŞ	186

TABLÖLER

Tablo 1: Zemin Türüne Göre Stabilizasyon Yöntemleri ve Avantajları	8
Tablo 2: Zemin Cinslerine Göre Stabilizasyon Metotları.....	13
Tablo 3: Zemin Stabilizasyon Teknikleri	14
Tablo 4: Tez Çalışmasında Kullanılan Optimizasyonlar.....	46
Tablo 5: Doğal Zemine Ait Mühendislik Parametreleri	47
Tablo 6: Uçucu Kül ve Kil Zeminin Ana Kimyasal Bileşimi	49
Tablo 7: Sodyum Hidroksit'in Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	52
Tablo 8: Sodyum Silikatın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	54
Tablo 9: Tez Çalışmasında Uygulanan Deneyler ve Standartları.....	56
Tablo 10: Tasarım Matrisindeki Bağımsız Değişkenlerin Üst, Alt ve Merkez Değerleri	98
Tablo 11: FCCD Tabanlı Deneysel Tasarım Matrisi.....	99
Tablo 12: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin 28 Günlük Kür Süresinde Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları	108
Tablo 13: Üretim Bazlı Karbon Ayak İzi Analizlerinde Dikkate Alınan Karbon Emisyon Faktörleri.....	112
Tablo 14: Taşıma Temelli Karbon Ayak İzi Analizlerinde Dikkate Alınan Karbon Emisyon Faktörleri.....	113
Tablo 15: Üretim Bazlı Maliyet Analizlerinde Dikkate Alınan Maliyet Faktörleri	115
Tablo 16: Taşımacılık Bazlı Maliyet Analizlerinde Dikkate Alınan Maliyet Faktörleri.....	116
Tablo 17: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Islatma Deneyi Sonrası Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları	118
Tablo 18: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Islatma Deneyi Sonrası Ortalama Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları	118
Tablo 19: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Islatma Deneyi Sonrası Kütleme Süresi ve Doğal Zemin Numunesine Göre Artış Oranı	119
Tablo 20: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Donma-Çözülme Deneyi Sonrası Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları	121
Tablo 21: Optimizasyon Numunelerinin Farklı Donma-Çözülme Çevrimlerine Ait Ortalama Serbest Basınç Dayanım Verileri.....	122
Tablo 22: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Islanma-Kuruma Deneyi Sonuçları ..	124
Tablo 23: Zemin, 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Islanma-Kuruma Çevrimi Sonucu Kalan Ağırlıkları	126
Tablo 24: Modellerin Uyum Tablosu	131
Tablo 25: UCS / CO ₂ Ayak İzi / Maliyet Modellerinin ANOVA Sonuçları	133
Tablo 26: Farklı Hedeflerle Optimizasyon Sonuçları.....	145

ŞEKİLLER

Şekil 1: Çalışmanın Çerçevesi	6
Şekil 2: Zemin Stabilizasyon Türleri	9
Şekil 3: Zemin Dane Boyutuna Göre Uygulanabilecek Zemin Stabilizasyon Metotları	10
Şekil 4: Zemin Türlerine Göre Stabilizasyon Metotlarının Belirlenmesi	11
Şekil 5: Stabilizasyon Metotları	12
Şekil 6: Vibrokompaksiyonun Uygun Olduğu Gradasyon Eğrisi	18
Şekil 7: Enjeksiyon Türleri ve Uygun Zemin Türleri	22
Şekil 8: Doğal Zemin Granülometri Eğrisi	47
Şekil 9: Zemin ve Uçucu KülünXRD Deseni	50
Şekil 10: Elek Analizi Uygulanışı.....	57
Şekil 11: Elek Analizi Deneyi.....	59
Şekil 12: Kıvam Limitlerinin Belirlenmesi.....	60
Şekil 13: Kıvam Limitleri Deneyleri.....	60
Şekil 14: Standart Kompaksiyon Deneyi	64
Şekil 15: Doğal Zemin Kompaksiyon Sonuçları	65
Şekil 16: Numune Hazırlama Prosedürü.....	67
Şekil 17: Zemin Numune İçerikleri (Doğal Zemin, Uçucu Kül, Aktivatör).....	69
Şekil 18: Zemin Numunesi Hazırlama.....	70
Şekil 19: Zemin Numuneleri Hazırlama Aşamaları.....	70
Şekil 20: Hazırlanan Zemin Numunelerinin Desikatörlerde Kürlenmesi	70
Şekil 21: 1. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	71
Şekil 22: 2. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	71
Şekil 23: 3. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	72
Şekil 24: 4. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	72
Şekil 25: Serbest Basınç Dayanımı Testi	73
Şekil 26: Donma Çözülme Deneyi Çevrimleri	75
Şekil 27: 1. Optimizasyon Donma-Çözülme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	76
Şekil 28: 1. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	77
Şekil 29: 1. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	77
Şekil 30: 1. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	77
Şekil 31: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	78
Şekil 32: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	78
Şekil 33: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	78
Şekil 34: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	79
Şekil 35: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	79
Şekil 36: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	79
Şekil 37: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	80
Şekil 38: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	80
Şekil 39: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	80
Şekil 40: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	81
Şekil 41: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	81
Şekil 42: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı.....	81

Şekil 43: 1. Optimizasyon Islanma-Kuruma Deneyi	84
Şekil 44: 4. Optimizasyon Islanma-Kuruma Deneyi	84
Şekil 45: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Islatma 1. Gün Su Küvetindeki Görünümleri	87
Şekil 46: 1. Optimizasyon Islatma 3 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	88
Şekil 47: 1. Optimizasyon Islatma 7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	89
Şekil 48: 1. Optimizasyon Islatma 14 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	89
Şekil 49: 1. Optimizasyon Islatma 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	89
Şekil 50: 2. ve 3. Optimizasyon Islatma Serbest Basınç Dayanımı	90
Şekil 51: 4. Optimizasyon Islatma 3 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	90
Şekil 52: 4. Optimizasyon Islatma 7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	90
Şekil 53: 4. Optimizasyon Islatma 14 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	91
Şekil 54: 4. Optimizasyon Islatma 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı	91
Şekil 55: Tasarım Matrisinin FCCD Yapısı (a) Kodlanmış Değerler, (b) Gerçek Değerler....	97
Şekil 56: DSM Kolon Üretim Sürecinin Şematik Diyagramı	106
Şekil 57: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Serbest Basınç Dayanımı Değerleri ...	110
Şekil 58: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Serbest Basınç Dayanımı Karşılaştırılması (MPa)	110
Şekil 59: CO2 Ayak İzi Hesaplama Süreci	116
Şekil 60: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Islatma 1. Gün Su Küvetindeki Görünümleri	117
Şekil 61: Optimizasyon Numunelerinin Islatma Deneyi Sonrası Ortalama Serbest Basınç Dayanımı Verileri	120
Şekil 62: Donma Çözülme Çevrimleri	122
Şekil 63: Optimizasyon Numunelerinin Farklı Donma-Çözülme Çevrim Etkisi	123
Şekil 64: Doğal Zemin Numunelerinin Islanma Kuruma Çevrim Etkisi	127
Şekil 65: 1. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Islanma Kuruma Çevrim Etkisi	128
Şekil 66: 2. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Islanma Kuruma Çevrim Etkisi	128
Şekil 67: 3. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Islanma Kuruma Çevrim Etkisi	129
Şekil 68: 4. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Islanma Kuruma Çevrim Etkisi	129
Şekil 69: Çeşitli Durumlar için Deneysel ve Tahmini UCS Değerlerinin Karşılaştırılması ..	134
Şekil 70: Çeşitli Optimizasyon Hedefleri Göz Önünde Bulundurularak Stabilize Edilmiş Zemin Örneklerinin XRD Deseni	135
Şekil 71: Taramalı Elektron Mikroskobu Görünümü (a) Zemin, (b) Uçucu Kül, (c) Çok Amaçlı Optimizasyonla Numuneyi Stabilize Eder, (d) UCS Tabanlı Tek Amaçlı Optimizasyonla Stabilize Edilmiş Numuneler, (e) CO2 Salınımı Tabanlı Tek Amaçlı Optimizasyonla Stabilize Edilmiş Numuneler, (f) Maliyet Tabanlı Tek Amaçlı Optimizasyonla Stabilize Edilmiş Numuneler	137
Şekil 72: Modellerin Parametre Etkileri (a) UCS Modelinin Standardize Regresyon Katsayısı Değişimi, (b) CO2 Ayak İzi Modelinin Standardize Regresyon Katsayısı Değişimi, (c) Maliyet Modelinin Standardize Regresyon Katsayısı Değişimi, (d) UCS Modelinin F- Değer Tabanlı Pareto Diyagramı	138
Şekil 73: Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Gösteren Tek Nesneli Optimizasyon Sonuçlarına Dayalı UCS Maksimizasyonunun Kontur Çizimi (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği Ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği Ve Sodyum Silikat İçeriği	140

Şekil 74: CO2 Salınımını En Aza İndirmeye Dayalı Tek Nesneli Optimizasyon Sonuçlarının Kontur Çizimi, Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Göstermektedir (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği.....	141
Şekil 75: Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Gösteren Maliyet Minimizasyonuna Dayalı Tek Amaçlı Optimizasyon Sonuçlarının Kontur Çizimi (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği	142
Şekil 76: Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Gösteren Çok Amaçlı Optimizasyon Sonuçlarının Kontur Çizimi (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği....	144
Şekil 77: Farklı Optimizasyon Hedeflerinin Dayanıklılık Performanslarının Karşılaştırılması (a) UCS ve Islatma Günleri, (b) UCS ve Donma-Çözülme Döngüleri, (c) Su Emilimi ve Islatma Günleri, (d) Kütle Kaybı ve Islatma-Kurutma Döngüleri.....	148
Şekil 78: 1. NumuneXRD Sonucu	162
Şekil 79: 2. NumuneXRD Sonucu	162
Şekil 80: 3. NumuneXRD Sonucu	163
Şekil 81: 4. NumuneXRD Sonucu	163
Şekil 82: 5. NumuneXRD Sonucu	164
Şekil 83: 6. NumuneXRD Sonucu	164
Şekil 84: Doğal Zemin Ait 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	165
Şekil 85: Doğal Zemin Ait 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	165
Şekil 86: Doğal Zemin Ait 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	166
Şekil 87: Doğal Zemin Ait 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	166
Şekil 88: Doğal Zemin Ait 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	167
Şekil 89: Doğal Zemin Ait 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	167
Şekil 90: Doğal Zemin Ait 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	168
Şekil 91: Uçucu Kül Katkısına Ait 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	168
Şekil 92: Uçucu Kül Katkısına Ait 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	169
Şekil 93: Uçucu Kül Katkısına Ait 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	169
Şekil 94: Uçucu Kül Katkısına Ait 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	170
Şekil 95: Uçucu Kül Katkısına Ait 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	170
Şekil 96: Uçucu Kül Katkısına Ait 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	171
Şekil 97: Uçucu Kül Katkısına Ait 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	171
Şekil 98: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	172
Şekil 99: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	172
Şekil 100: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	173
Şekil 101: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	173
Şekil 102: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	174

Şekil 103: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	174
Şekil 104: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	175
Şekil 105: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	175
Şekil 106: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	176
Şekil 107: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	176
Şekil 108: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri.....	177
Şekil 109: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	177
Şekil 110: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	178
Şekil 111: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	178
Şekil 112: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	179
Şekil 113: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	179
Şekil 114: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	180
Şekil 115: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	180
Şekil 116: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	181
Şekil 117: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	181
Şekil 118: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri	182
Şekil 119: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü.....	182
Şekil 120: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü.....	183
Şekil 121: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü.....	183
Şekil 122: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü.....	184
Şekil 123: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü.....	184
Şekil 124: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü.....	185

Şekil 125: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü.....	185
---	------------



KISALTMALAR

AAC	: Alkali ile Aktifleşen Çimento
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
ANN	: Yapay Sinir Ağları
ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis Of Variance)
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
ATRI	: Amerikan Ulaştırma Araştırma Enstitüsü
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
CBR	: Kaliforniya Taşıma Gücü Deneyi
CCD	: Merkezi Bileşik Tasarım (Central Composite Design)
CCR	: Kalsiyum Karbür Kalıntısı
CDM	: Temiz Kalkınma Mekanizması (Clean Development Mechanism)
CG	: Aktifleştirilmiş Kömür Gangı
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
CSIR	: Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Konseyi
CT	: Bilgisayarlı Tomografi (Computer Tomography)
DAI	: Kuvvet Aktivite İndeksi
DEM	: Ayrık Elemanlar Yöntemi
DMM	: Derin Karıştırma Metodu (Deep Mixing Method)
DSM	: Derin Zemin Karıştırma (Deep Soil Mixing)
EDS-EDX	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
FCCD	: Yüz Merkezli Bileşik Tasarım
FHWA	: Federal Highway Administration
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GB	: Gaz Beton
GPR	: Yer Radarı
LİDAR	: Işın Algılama ve Mesafe Ölçme (Laser Imaging Detection And Ranging)
LL	: Likit Limit
MICP	: Mikrobiyal Kalsit Çöktürme
MPa	: Megapaskal
MT	: Manyetotellürik Ölçümler
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
NDT	: Tahribatsız Teknikler
OMC	: Optimum Su İçeriği (Optimum Moisture Content)
ÖAŞÇ	: Örselenmiş Atık Soda Şişesi Camı
PC	: Portland Çimentosu
pESC	: Kısmen Jeotekstil Kaplı Bireysel Taş Kolonlar
PI	: Plastisite İndeksi

PL	: Plastik Limit
POFA	: Palmiye Yağı Yakıt Külü
RSM	: Yanıt Yüzey Metodu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
SVM	: Destek Vektör Makineleri
TES	: Termal Enerji Depolama
UCS	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
UHPC	: Yüksek Performanslı Beton
UK	: Uçucu Kül
USCS	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
XRF	: X-Işını Floresansı
Z	: Zemin



SİMGELER

c	: Kohezyon
°C	: santigrat derece
cm	: santimetre
kgf	: kilogram kuvvet
kg	: kilogram
km	: kilometre
kN	: kilonewton
N	: Newton
m	: metre
m²	: metrekare
m³	: metreküp
mL	: mililitre
p	: korelasyon katsayısı
γ_{dmax}	: maksimum kuru birim ağırlık (maximum dry unit weight)
ρ_{kmax}	: kuru yoğunluk
φ	: İçsel Sürtünme Açısı
\$	: maliyet birimi
w	: su içeriği
X₁	: aktivator miktarının, uçucu kül ve zemin karışımının kuru kütlelerine oranı (aktivator/(UK+Zemin))
X₂	: uçucu kül miktarının zemin miktarına oranı (UK/Zemin)
X₃	: sodyum silikat (Na ₂ SiO ₃) çözeltisinin, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisine oranı (Na ₂ SiO ₃ /NaOH).
Y₁	: numunelerin 28 günlük kürleme süreci sonunda elde edilen sınırsız (serbest) basınç dayanımı
Y₂	: 1 m ³ hacmindeki bağlayıcı zemin karışımına karşılık gelen karbon dioksit (CO ₂) emisyonu
Y₃	: 1 m ³ 'lük üretim bazında hesaplanan maliyet değeri

GİRİŞ

Zemin, geoteknik mühendisliğinin temelini oluşturan, yapıların yükünü taşıyan ve yapının etkileşimde bulunduğu dinamik bir sistemdir. Sadece zemin veya kayadan değil, aynı zamanda içinde barındırdığı su, hava ve organik maddelerle birlikte karmaşık bir jeoteknik ortamı temsil eder. Zeminin stabilitesi biz inşaat mühendisleri için neden önemlidir sorusuna cevap verecek olursak; zemin inşaat mühendisleri için yapının hayati bir parçasıdır. Zemin hakkında detaylı bir bilgiye sahip olmak; güvenli, dayanıklı ve ekonomik yapılar inşa etmenin anahtarıdır. Zemin sadece bir yapı malzemesi değil, aynı zamanda doğal bir sistemdir. Bu sistemi anlamak ve ona göre davranmak sürdürülebilir bir gelecek için önemlidir.

Zemin, bir yapının tüm yükünü taşır. Zemin özelliklerine uygun olmayan bir temel tasarımı, yapısal hasarlara ve hatta çökmelere yol açabilir. Zeminlerin taşıma kapasitesi, su içeriği, sıkışma gibi faktörler, yapının stabilitesi üzerinde direkt etkilidir. Deprem gibi doğal afetlerde, zemin yapısının hasar görmesini engelleyen en önemli faktör stabilitedir. Zemin; doğal olaylar, dış kuvvetler ve kimyasal reaksiyonlar gibi çeşitli faktörlerden etkilenir ve deforme olur. Bu deformasyon zeminin özelliklerinin değişmesine neden olur. Özellikle mühendislik parametrelerinin kalitesi üzerinde önemli etki yaratır. Bu etki zemin üzerinde gerçekleşecek yapılaşmayı da doğru orantıda etkiler. Deforme zeminde oluşacak yapılaşmadan önce iyileştirme yapmak her zaman avantaj sağlayacaktır.

Dünya nüfusunun hızla artışı nedeniyle mühendislik yapılarının inşa edileceği alanlarda yetersizlik gözlemlenmekte ve bu durum önemli sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunların başlıcaları yetersiz yapı alanı, yapı alanının mühendislik özelliklerinin yapılaşmaya elverişsiz olması ve yapılaşmanın sürdürülebilirliğini aksatacak şekilde seçilmesidir. Yapılan kapsamlı araştırmalar ve detaylı analizler, yeni araziler keşfetme çabalarının getirdiği yüksek maliyetler ve çevresel riskler göz önüne alındığında, mevcut arazilerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinin çok daha ekonomik ve sürdürülebilir bir yaklaşım olduğunu açıkça göstermiştir. Bu çalışmalar, yeni alanların edinimi ve işlenmesinin gerektirdiği devasa yatırımların, uzun vadeli maliyet etkinliğini ciddi ölçüde düşürdüğünü ortaya koymuştur. Bunun aksine, mevcut altyapının geliştirilmesi, daha düşük maliyetli yenileme ve güçlendirme yöntemleriyle, hem ekonomik kaynakların verimli kullanılmasını sağlar hem de çevresel etkiyi minimum düzeye indirir. Örneğin, zemin iyileştirme teknikleri, zemin güçlendirme çalışmaları ve inovatif inşaat metotları kullanılarak, mevcut alanların taşıma kapasitesi, dayanıklılığı ve stabilite özellikleri önemli ölçüde artırılabilir. Bu da yeni alan arayışının gerektirdiği zaman

kaybını ve olası çevresel tahribatı ortadan kaldırarak hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmesini mümkün kılar. Bu kapsamda yapılan araştırmalar, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, mevcut kaynakların optimum şekilde kullanılmasının, uzun vadede hem ekonomik hem de çevresel faydaları olduğunu ortaya koymaktadır.

Etkili bir zemin iyileştirme projesinin başarılı bir şekilde tamamlanması, titizlikle tasarlanmış bir mühendislik yaklaşımının akılcı ve sistematik bir uygulama süreciyle birleştirilmesini gerektirir. Bu süreç, sadece zemin iyileştirme projelerine özgü bir gereklilik değil, aksine mühendisliğin tüm disiplinlerinde uyulması gereken temel bir prensiptir. Projenin her aşamasında, mühendislik sanatının inceliklerine hâkim olmak ve rasyonel düşüncüyü ön planda tutmak, beklenmedik sorunlarla başa çıkmada esnekliği ve çözüm odaklı bir yaklaşımı beraberinde getirir. Bu, projenin sadece teknik açıdan değil, aynı zamanda ekonomik ve zaman açısından da verimli bir şekilde yürütülmesini sağlar. Başarılı bir zemin iyileştirme projesi için, sorumlu mühendisin kapsamlı bir bilgi birikimine sahip olması hayati önem taşır. Bu bilgi birikimi, zemin mekaniği ve davranışının temel prensiplerini, çeşitli zemin iyileştirme tekniklerinin özelliklerini, avantajlarını ve dezavantajlarını, zemin ile yapısal elemanlar arasındaki karmaşık etkileşimleri, kullanılan donanımın teknik özelliklerini ve maliyet analizlerini kapsamalıdır. Sadece teorik bilginin yeterli olmadığı da unutulmamalıdır. Mühendisin, geçmiş projelerden elde edilmiş deneyimlere ve edinilmiş pratik becerilere sahip olması, tasarım aşamasında daha sağlam kararlar almasına ve uygulama sürecinde olası sorunların önceden tespit ederek çözümlenmesini sağlar. Bu deneyim, beklenmedik durumlarla karşılaşıldığında yaratıcı çözümler üretme kapasitesini ve hızlı karar verme yeteneğini geliştirir.

Zemin stabilizasyonu genel hatlarıyla, mevcut zemin özelliklerinin yapılaşmaya uygun bir hale getirme uygulamasıdır (Önalp, 1983). Bu uygulamalar iki ayrı şekilde gruplandırılabilir:

Yerinde zemin iyileştirme uygulamaları

- ✓ Hidrolik yöntemler
- ✓ Mekanik yöntemler
- ✓ Hafif malzeme kullanımı
- ✓ Metal ya da geosentetik donatılı zemin

Uygun zemin dolgusu hazırlama ile zemin iyileştirme laboratuvar uygulamaları

- ✓ Kompaksiyon ile zemin iyileştirme

- ✓ Katkı maddeleri (uçucu kül, kireç, çimento vd.) ile zemin iyileştirme

Zemin iyileştirme yöntemlerinde asıl amaç, zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin mukavemet, durabilite, dayanım, permeabilite ve hacimsel stabilite özelliklerinin iyileştirilmesidir. Yapılan zemin etüdü çalışmalarından sonra belirlenen iyileştirme tekniğine göre mühendislik özellikleri zayıf zemine iyileştirme birkaç şekilde yapılabilir. Mühendislik özellikleri zayıf olan zeminin kaldırılıp yerine istenilen özellikteki zeminin yerleştirilmesi, üzerine yapılacak projenin değiştirilip malzeme kalitesinin iyileştirilmesi, halihazırda zeminin özelliklerinin istenilen düzeyde iyileştirilmesi (Balta, 1984).

Günümüzde birçok endüstriyel atık zemin stabilizasyonunda kullanılabilir hale getirilmektedir. Bu durum hem mevcut zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmekte hemde çevre açısından ve olağan atıkları tekrar değerlendirilebilir hale getirmektedir.

Çalışmanın Konusu ve Problemi

Bu tez çalışmasında, yüksek plastisiteli killi zemine uçucu kül, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) katkıları kullanılarak hazırlanan zemin numunelerinde yapılan deneylerde oluşan iyileşmeler araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında deneylerde kullanılacak zemine likit limit, plastik limit ve elek analizi deneyleri yapıp zemin sınıflandırması yapılmıştır. Zemin öğütülüp elek analizi ile istenilen boyutta zemin içeriği elde edilmiştir. Elde edilen zeminin katkısız haldeki dayanımını ölçmek için numuneler hazırlanıp optimum su muhtevası oranı bulunmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında zemine uçucu kül (UK), sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) katkıları eklenerek 28 günlük kürlemeye tabi tutulmuştur. Kürleme sonrasında serbest basınç deneyi ile dayanım değerleri bulunup Yanıt Yüzey Metodu (RSM) kullanılarak optimum değer belirlenmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında ikinci aşamada RSM'ye göre belirlenen optimum değerlere göre zemine uçucu kül (UK), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) katkıları eklenmiştir.

Çalışmanın dördüncü aşamasında dört farklı optimizasyon içeriği ile hazırlanan numunelere SEM ,XRD, XRF analizleri, serbest basınç deneyi, ıslanma-kuruma deneyi, donma-çözülme deneyi ve ıslatma deneyleri yapılmıştır.

Çalışmanın Amacı

Çalışmada zemin stabilizasyonunda uçucu kül (UK), sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) katkılarının dayanım üzerindeki etkisi ve uygulanabilirliğini araştırmak ve zemin stabilizasyonu konusuna farklı bir bakış açısıyla yaklaşmak, zeminin mühendislik parametrelerini iyileştirerek kullanıma elverişsiz zeminlerin kullanılabilirliğini sağlamak tez çalışmasının asıl amaçlarını kapsamaktadır.

Çalışmanın Önemi ve Gerekçesi

Çalışmamıza konu olan zemin stabilizasyonu birçok araştırmacı tarafından irdelenen ve üzerine çalışmalar yapılan bir konudur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde deneylerde kullanılan katkı malzemelerinde sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) katkılarıyla yapılan çalışmalarının kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu tez çalışması zemin stabilizasyonunda kimyasal katkıların etkisi konusunda farklı bir bakış açısıyla literatüre katkı sağlamaktadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

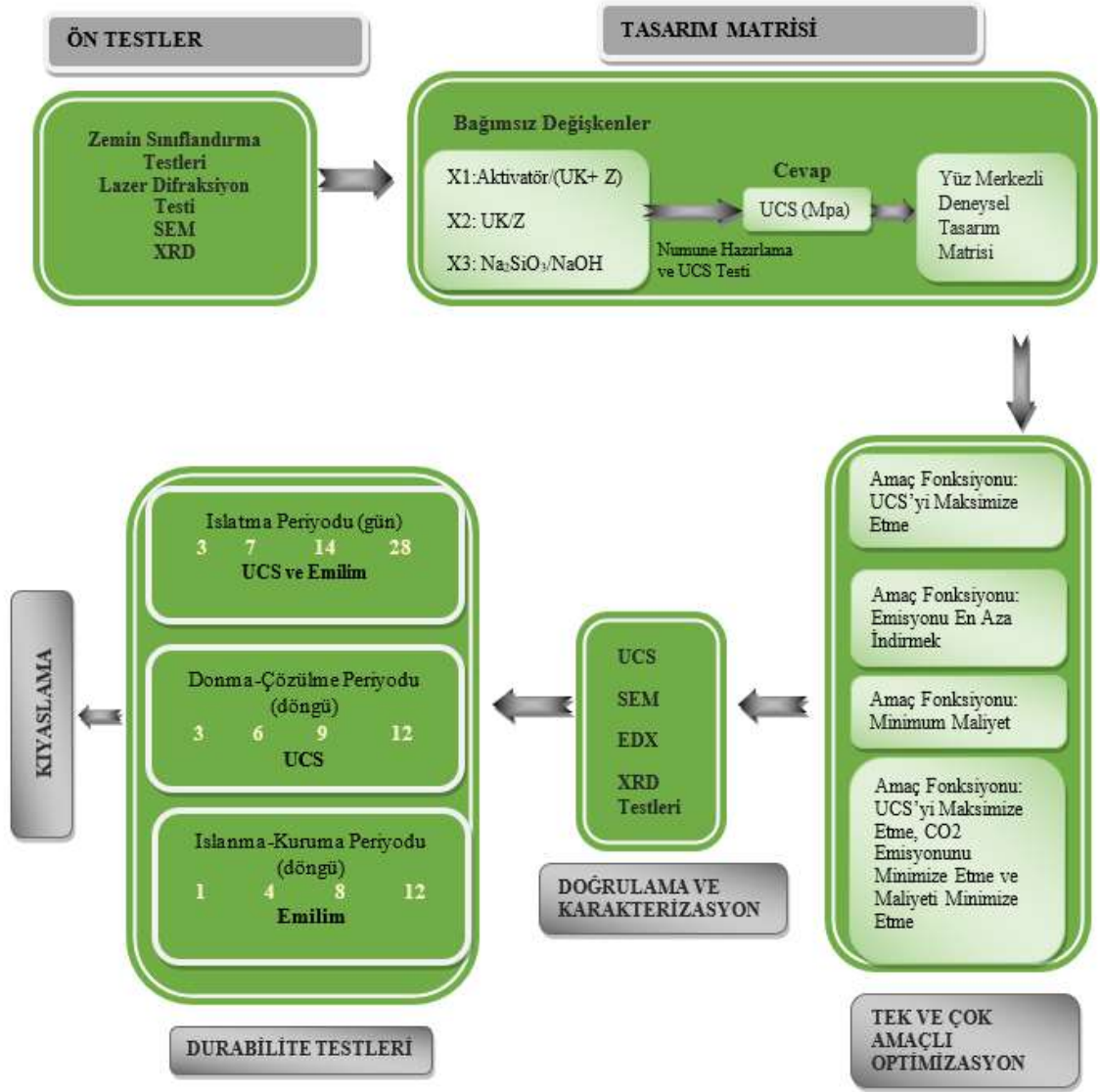
1. KURAMSAL ÇERÇEVE

Zemin stabilizasyonu, zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan çeşitli teknikleri içeren önemli bir mühendislik disiplindir. Son yıllarda, artan altyapı ihtiyaçları ve sürdürülebilir malzeme kullanımı gereksinimi doğrultusunda, geleneksel ve yenilikçi stabilizasyon yöntemleri üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar, özellikle çevre dostu ve maliyet etkin tekniklere odaklanarak, zemin iyileştirme yöntemlerinin mühendislik projelerindeki rolünü genişletmiştir.

Yapılan araştırmalar, zemin stabilizasyonunda çimento, kireç ve uçucu kül gibi geleneksel bağlayıcıların yanı sıra, jeopolimerler, nano malzemeler ve biyolojik stabilizasyon yöntemlerinin kullanımına ilişkin önemli gelişmeler ortaya koymuştur (Smith vd., 2017; Kim & Lee, 2019; Patel & Singh, 2018; Gonzalez & Torres, 2021). Özellikle çevresel kaygılar nedeniyle karbon ayak izini azaltan malzemelerin kullanımı teşvik edilmiştir. Jeopolimer teknolojisi, çimento bazlı bağlayıcılara alternatif olarak, enerji tüketimini azaltan ve dayanımı artıran bir yöntem olarak literatürde geniş yer bulmuştur (Davidovits, 2020).

Yapılan çalışmalar, mikroorganizma destekli zemin stabilizasyonu (MICP) gibi biyoteknolojik yaklaşımların mühendislik uygulamalarına entegrasyonunu incelemiştir. Bu yöntem, kalsit çökmesini teşvik ederek zemin partikülleri arasındaki bağları güçlendirmekte ve uzun vadeli dayanıklılığı artırmaktadır (Ivanov & Chu, 2021; Hassan & Yildirim, 2022). Ayrıca, nano malzemelerin (örneğin nano-kil ve nano-silika) kullanımı, zeminlerin su geçirgenliğini azaltma ve mukavemet özelliklerini geliştirme açısından umut verici sonuçlar sunmuştur (Zhang vd., 2023; Wang & Zhou, 2024).

Yapılan araştırmalarında, endüstriyel atıkların ve sürdürülebilir malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanım potansiyeline de ışık tutmuştur. Örneğin, uçucu kül, çelik cürufu ve plastik atıkların stabilize edici katkıları olarak kullanımı, ekonomik ve çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlamaktadır (Fernandez & Lopez, 2025).



Şekil 1: Çalışmanın Çerçevesi

1.1. ZEMİN SINIFLANDIRMA

Zemin sınıflandırması, inşaat mühendisliği alanında yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve performansı açısından büyük öneme sahiptir. İnşaat projelerinde, zeminin doğru sınıflandırılması, tasarım ve uygulama aşamalarında hayati rol oynar. Yapılan birçok akademik çalışmada, zemin özelliklerinin belirlenmesine yönelik yenilikçi yöntemler, veri analiz süreçleri ve modelleme teknikleri üzerine yoğunlaşmıştır.

1.1.1. Geleneksel Zemin Sınıflandırma Sistemleri

Geleneksel zemin sınıflandırma sistemleri arasında Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) ve Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaşım Yetkilileri Birliği (AASHTO)

Zemin Sınıflandırma Sistemi bulunmaktadır. Bu sistemler, zeminlerin mühendislik açısından tanımlanmasını ve uygun kullanım alanlarının belirlenmesini sağlar.

1.1.2. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Kullanımı

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar, zemin sınıflandırması sürecinde devrim yaratmıştır. Destek vektör makineleri (SVM), yapay sinir ağları (ANN) ve derin öğrenme algoritmaları, zemin özelliklerini belirlemede yüksek doğruluk oranları sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, bu yöntemlerin geleneksel sınıflandırma sistemleri ile entegre edilerek daha kapsamlı analizlerin yapılmasına olanak tanıdığını göstermektedir.

1.1.3. Jeofiziksel ve Uzaktan Algılama Teknikleri

Geleneksel zemin sınıflandırma yöntemlerinin yanı sıra, jeofiziksel ölçüm teknikleri ve uzaktan algılama teknolojileri de giderek yaygınlaşmaktadır. Manyetotellürik (MT) ölçümler, yer radarı (GPR) sistemleri ve LIDAR taramaları, büyük ölçekli zemin analizlerinde kullanılmaktadır. Uzaktan algılama yöntemlerinin zemin türlerini belirlemede hız ve maliyet açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur.

Araştırmalar incelendiğinde, aşağıdaki konuların öne çıktığı görülmektedir:

- ✓ Gelişmiş zemin sınıflandırma teknikleri ve yeni modelleme yaklaşımları
- ✓ Yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmalarının zemin özelliklerinin tahmininde kullanımı
- ✓ Jeofizik yöntemlerin ve uzaktan algılama tekniklerinin zemin mühendisliğindeki yeri
- ✓ Deprem mühendisliği bağlamında zemin davranış analizleri ve sismik risk değerlendirmeleri

1.2. ZEMİN STABİLİZASYONU

Zemin stabilizasyonu, zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak, oturma ve deformasyonları minimize etmek amacıyla uygulanan çeşitli teknikleri içermektedir. İnşaat mühendisliği alanında, farklı zemin türleri için uygun stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yapılan akademik çalışmalar, doğal zemin iyileştirme yöntemleri, kimyasal stabilizasyon teknikleri ve ileri mühendislik uygulamalarını kapsamaktadır.

1.2.1. Zemin Türüne Göre Stabilizasyon Yöntemleri

Tablo 1: Zemin Türüne Göre Stabilizasyon Yöntemleri ve Avantajları

Zemin Türü	Stabilizasyon Yöntemleri	Avantajları
Killi Zeminler	Kireç, çimento enjeksiyonu, geopolimer katkıları	Taşıma kapasitesini artırır, oturma kontrolü sağlar
Kumlu Zeminler	Nano-partikül bazlı stabilizatörler, biyolojik stabilizasyon, polimer enjeksiyonları	Mukavemeti artırır, dayanıklılığı yükseltir
Siltli Zeminler	Uçucu kül, silis dumanı, çimento katkıları	Su duyarlılığını azaltır, stabiliteyi artırır
İri Taneli Zeminler	Çimento enjeksiyonu, asfalt stabilizasyon, mekanik sıkıştırma	Yüksek taşıma kapasitesi sağlar, dayanıklılığı artırır
İnce Taneli Zeminler	Kireç, çimento, polimer katkıları	Şişme potansiyelini azaltır, drenajı iyileştirir
Düşük Plastisiteli Zeminler	Silis dumanı, uçucu kül, mekanik sıkıştırma	Taşıma kapasitesini artırır, uzun vadeli stabilite sağlar
Yüksek Plastisiteli Zeminler	Kireç, çimento, geopolimer katkıları	Plastisiteyi azaltır, mukavemeti artırır

Zemin türüne bağlı olarak stabilizasyon yöntemlerinin çeşitlilik gösterdiğini ve yeni nesil katkı malzemelerinin zemin iyileştirme sürecinde önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır. Kimyasal, mekanik ve biyolojik yöntemlerin kombinasyonu ile zeminlerin mühendislik özellikleri daha verimli bir şekilde iyileştirilmektedir.

1.2.1.1. Killi zeminlerde stabilizasyon

Killi zeminler, yüksek plastisite ve düşük drenaj özellikleri nedeniyle stabilizasyon gerektiren zemin türleri arasında yer almaktadır. Literatürde, kireç ve çimento enjeksiyonlarının kilin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, geopolimer katkılı malzemelerin killi zeminlerde kalıcı dayanım sağladığını göstermektedir.

1.2.1.2. Kumlu zeminlerde stabilizasyon

Kumlu zeminlerin düşük kohezyonu nedeniyle taşıma kapasitelerinin artırılması gerekmektedir. Yapılan araştırmalar, nano-partikül bazlı stabilizatörlerin kumlu zeminlerde mukavemeti artırdığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, biyolojik stabilizasyon yöntemleri ve enjekte edilebilir polimerler de kumlu zeminlerin güçlendirilmesinde etkili bulunmuştur.

1.2.1.3. Siltli zeminlerde stabilizasyon

Siltli zeminler, suya karşı duyarlılıkları nedeniyle özel stabilizasyon yöntemleri gerektirmektedir. Literatür incelemeleri, uçucu kül, silis dumanı ve çimento gibi katkı maddelerinin siltli zeminlerin dayanıklılığını artırmada yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir.

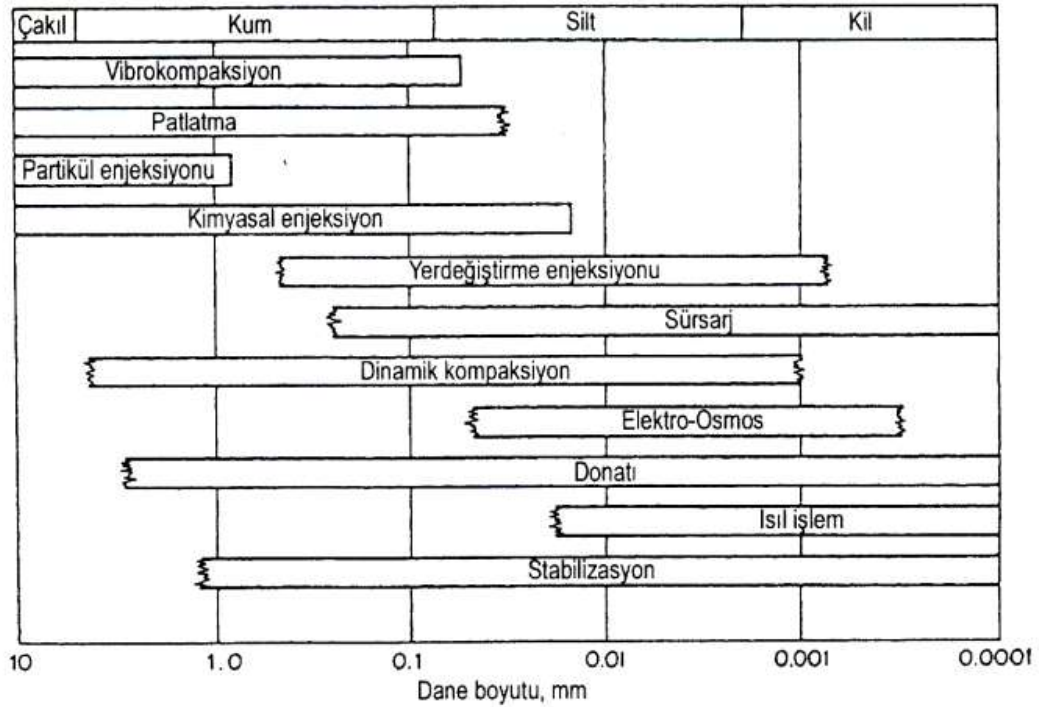
1.2.2. Zemin Stabilizasyon Teknikleri

Zemin stabilizasyon teknikleri genel olarak kimyasal, mekanik, biyolojik ve fiziksel yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yöntemler, zemin türüne ve projenin gereksinimlerine bağlı olarak uygulanmaktadır.



Şekil 2: Zemin Stabilizasyon Türleri

Zemin stabilizasyon türünün seçilmesini kolaylaştırmak için Şekil 2’deki gibi bir metot geliştirmiştir.

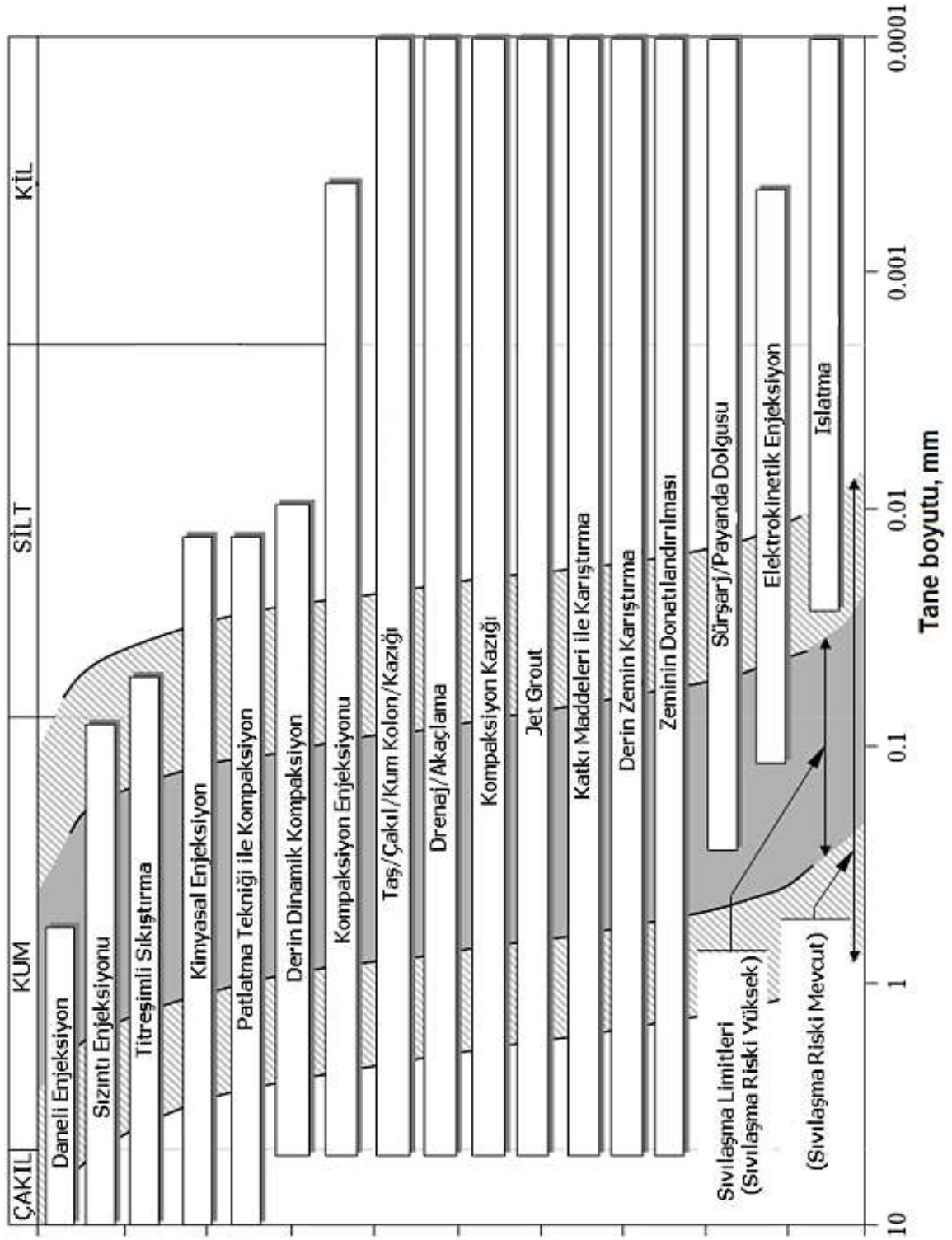


Şekil 3: Zemin Dane Boyutuna Göre Uygulanabilecek Zemin Stabilizasyon Metotları (Tunç, 2002)

Zemin stabilizasyonu, zemin mühendisliğinde kritik bir konudur ve farklı tekniklerin uygulanması gerekmektedir. Yapılan araştırmalar, kimyasal, mekanik, biyolojik ve fiziksel stabilizasyon yöntemlerinin zemin türüne bağlı olarak avantajlar sunduğunu göstermektedir. Yeni nesil malzemelerin, özellikle nano-partiküller ve geopolimerlerin kullanımı, zemin iyileştirme süreçlerini daha verimli hale getirmiştir. Gelecekte, sürdürülebilir ve çevre dostu stabilizasyon yöntemlerinin daha fazla önem kazanacağı öngörülmektedir.

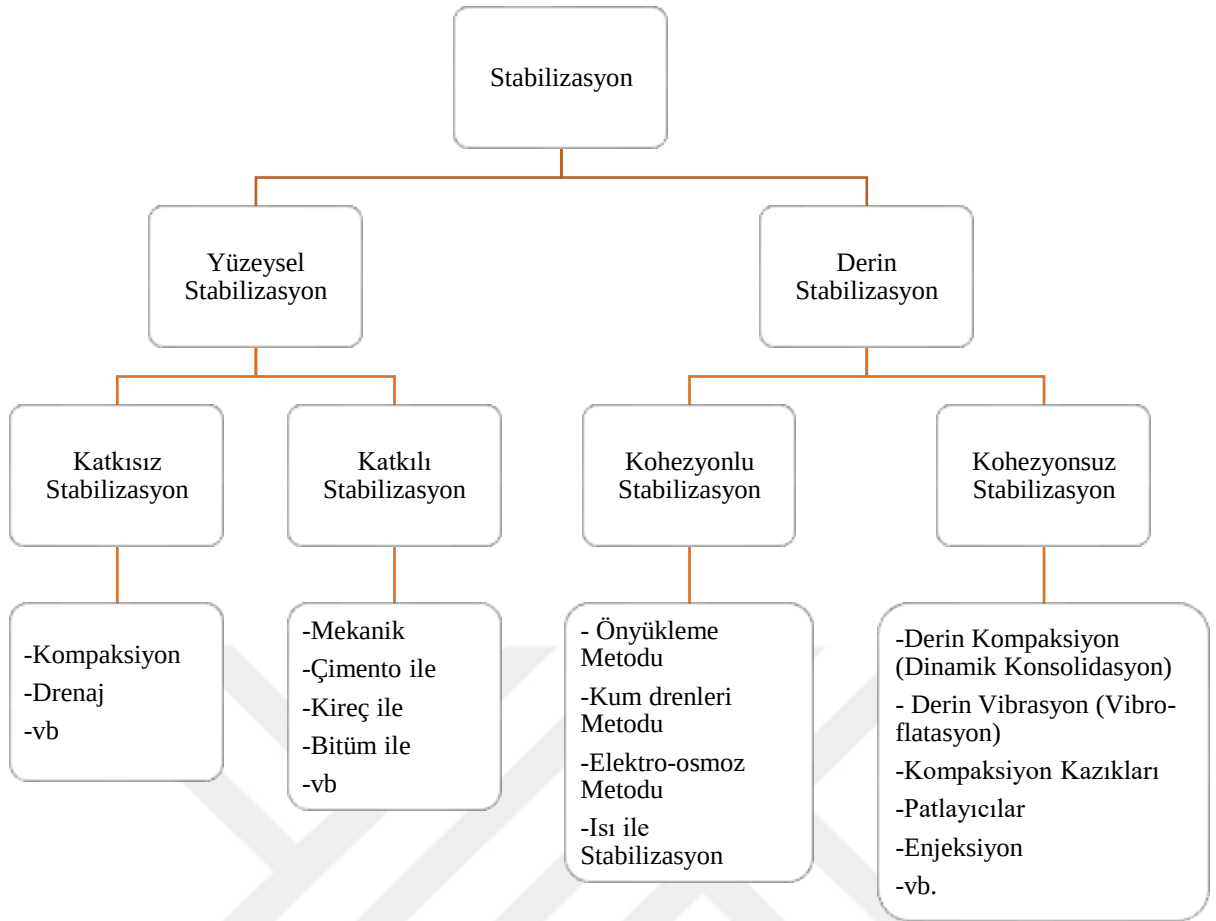
Mitchell ve Gallagher (1998), zemin stabilizasyonu konusunda yaptıkları çalışmada, farklı zemin türleri için uygun iyileştirme yöntemlerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Özellikle sıvılaştırılabilir zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla, zeminlerin tane boyutlarına göre uygulanabilecek çeşitli stabilizasyon tekniklerini belirlemişlerdir.

Araştırmalarında, zeminlerin tane boyutlarına göre farklı iyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirlik aralıklarını gösteren bir diyagram sunmuşlardır. Bu diyagram, zeminlerin tane boyutu dağılımına bağlı olarak hangi stabilizasyon yöntemlerinin daha etkili olduğunu görsel olarak ifade etmektedir.



Şekil 4: Zemin Türlerine Göre Stabilizasyon Metotlarının Belirlenmesi (Mitchell & Gallagher, 1998)

Şekil 4’te, farklı zemin türleri için en uygun stabilizasyon yöntemlerini genel hatlarıyla göstermektedir. Ancak, her projenin kendine özgü koşulları olduğundan, spesifik uygulamalar için detaylı zemin etütleri ve mühendislik analizleri yapılması önemlidir.



Şekil 5: Stabilizasyon Metotları (Uzuner, 2013)

Uzuner (2013), zemin stabilizasyonu yöntemlerini farklı zemin türleri ve iyileştirme amaçlarına göre sınıflandırmıştır. Çalışmasında, zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirmek için kullanılan başlıca yöntemleri ve bu yöntemlerin uygulama alanlarını detaylı bir şekilde ele almıştır. Hunt (1986 & 1994), farklı zemin türleri için uygun stabilizasyon yöntemlerini belirlemek amacıyla kapsamlı çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda, zeminlerin özelliklerine göre en etkili iyileştirme teknikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hunt'ın çalışmalarına dayanarak, farklı zemin türleri ve bu zeminler için önerilen stabilizasyon yöntemleri Tablo 2'deki gibi özetlenebilir:

Tablo 2: Zemin Cinslerine Göre Stabilizasyon Metotları (Hunt, 1986 & 1994)

Zemin Türü		Önerilen Stabilizasyon Yöntemleri
Çeşitli Dolgular	Sığ	Sığ kazı ve geri dolgu
	Derin	Derin dinamik kompaksiyon, kum kolonları
Organik Zeminler	Sığ	Sığ kazı ve geri dolgu, geotekstil uygulamaları
	Derin	Sürşarj (ön yükleme), kum kolonları
	Tabakalı	Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar, taş kolonlar
Yumuşak Killer	Sığ	Sığ kazı ve geri dolgu
	Derin	Geotekstil uygulamaları, sürşarj, kum veya kireç kolonları
	Tabakalı	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar
Killer		Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal yöntemler (dondurma), elektro-osmoz, geosentetik uygulamaları, drenaj teknikleri
Gevşek Siltler	Sığ	Sığ kazı ve geri dolgu, tuz katkısı
	Derin	Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonları, elektro-osmoz, vakum kuyuları
Gevşek Kumlar	Sığ	Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibroflotasyon, vibrokompaksiyon, enjeksiyon teknikleri, taş kolonları, drenaj kuyuları, termal yöntemler (dondurma)
Sıvılaştırılabilir Zeminler		Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon teknikleri, taş kolonları, drenaj uygulamaları
Şişen Zeminler		Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento uygulamaları, uçucu kül kullanımı, tuz ve kimyasal katkılar
Çatlaklı Kayalar		Enjeksiyon, ankraj uygulamaları, püskürtme beton, yüzey altı yatay drenaj teknikleri

Tablo 3: Zemin Stabilizasyon Teknikleri

Stabilizasyon Türü	Uygulanan Yöntemler	Avantajları
Kimyasal Stabilizasyon	Çimento, kireç, uçucu kül, silis dumanı, polimerler, geopolimerler	Mukavemeti artırır, plastisiteyi azaltır, uzun ömürlüdür
Mekanik Stabilizasyon	Sıkıştırma, granüler malzeme karışımı, geosentetikler	Taşıma kapasitesini artırır, ekonomik ve hızlı uygulanır
Biyolojik Stabilizasyon	Bakteriyel çökeltme, organik bağlayıcılar	Çevre dostudur, kimyasal kullanımı gerektirmez
Fiziksel Stabilizasyon	Dondurma-çözme, termal işlemler	Özel iklim koşullarına uygun çözümler sunar

1.2.2.1. Kimyasal stabilizasyon

Kimyasal stabilizasyon, zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla çimento, kireç, uçucu kül, silis dumanı, geopolimerler ve polimer bazlı katkı maddelerinin kullanıldığı bir mühendislik yöntemidir. Bu yöntem, zeminlerin dayanımını artırarak taşıma kapasitesini yükseltmek ve çevresel etkilere karşı direncini artırmak için sıklıkla altyapı ve yol mühendisliği projelerinde uygulanmaktadır. Son yıllarda sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar doğrultusunda yeni malzemeler ve yöntemler geliştirilmiştir.

Çimento ile stabilizasyon

Çimento, zemin stabilizasyonunda en yaygın kullanılan bağlayıcılardan biridir. Çimento, zeminle kimyasal reaksiyona girerek hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlar yoluyla zeminin mukavemetini artırır. Yapılan çalışmalar, düşük çimento tüketimi ile optimum dayanım sağlanabileceğini göstermektedir (Wang vd., 2018). Ayrıca, çimento katkılı stabilizasyonun karbon ayak izini azaltmaya yönelik alternatif yaklaşımlar geliştirilmektedir. Kil, silt ve kum gibi zeminlerde kullanılarak mukavemetin artırılmasını sağlar (Smith & Brown, 2017).

Kireç ile stabilizasyon

Kireç, özellikle yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonunda etkili bir yöntemdir. Kireç, zeminle reaksiyona girerek kohezyon kuvvetlerini artırır ve zeminin şişme potansiyelini azaltır

(Nazari & Ramezaniapour, 2020). Yapılan araştırmalar, kireç stabilizasyonunun mikro yapısal değişimler üzerindeki etkilerini daha detaylı incelemiş ve kireç ile stabilize edilen zeminlerin uzun vadeli performanslarını değerlendirmiştir. Yüksek plastisiteli killi zeminlerde plastisiteyi azaltarak taşıma kapasitesini artırır (Lee & Kim, 2020).

Farklı zemin türleri için önerilen kireç miktarları yer almaktadır. Kumlu zeminler, düşük kohezyonlu yapıları nedeniyle en düşük kireç içeriği ile stabilize edilirken, siltli zeminlerde daha fazla kireç gerekebilir. Killer, özellikle yüksek plastisiteli olanlar, su içeriği ve şişme potansiyeli nedeniyle daha fazla kireç gerektirir. Kireç, bu zeminlerde kil mineralleriyle reaksiyona girerek plastisiteyi azaltır ve dayanımı artırır. Ancak, en uygun kireç içeriğinin belirlenmesi için laboratuvar analizleri ve saha denemeleri yapılmalıdır.

Uçucu kül ve silis dumanı ile stabilizasyon

Termik santral atığı olan uçucu kül ve endüstriyel yan ürün olan silis dumanı, evre dostu stabilizasyon malzemeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, imento veya kireçle birlikte kullanıldığında puzolanik reaksiyonlar ile zemin mukavemetini artırmaktadır (Jiang vd., 2019). Yapılan alışmalar uçucu kül ve silis dumanı katkılı stabilizasyonun uzun vadeli dayanım ve durabilite üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuştur. Siltli ve kumlu zeminlerde bağlayıcılık zellini artırarak dayanıklılığı geliştirir (elik, 2022).

Geopolimerler ile stabilizasyon

Geopolimerler, sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyele sahip yeni nesil bağlayıcılardır. Alümina ve silika içeren malzemelerin alkali aktivasyon ile sertleşmesi prensibine dayanarak üretilen geopolimerler, karbon emisyonlarını azaltma konusunda avantaj sağlamaktadır (Davidovits, 2021). Yapılan deneysel çalışmalar, geopolimerlerin özellikle killi zeminler için etkili bir stabilizasyon yöntemi olduğunu göstermektedir. Son yıllarda gelişen bu yöntem, evre dostu bir alternatif olarak kullanılmaktadır (Jones & Patel, 2024).

Polimer bazlı stabilizasyon

Polimerler, zeminin kohezyonunu artırarak suya ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı güçlendiren kimyasal katkılardır. Polimer bazlı stabilizasyon, özellikle hızlı uygulanabilirliği ve uzun ömürlü performansı nedeniyle tercih edilmektedir (Rahman vd., 2023). Güncel araştırmalar, biyopolimerlerin geleneksel polimerlere alternatif olarak kullanılabileceğini ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Yapılan alışmalar, kimyasal stabilizasyon yöntemlerinin farklı zemin türlerine etkisini incelemiş ve yeni nesil malzemelerle ilgili önemli bulgular ortaya koymuştur. Wang vd. (2018), imento bazlı stabilizasyonun etkinliğini analiz ederken, Nazari ve Ramezaniapour (2020) kireç stabilizasyonunun killer üzerindeki uzun vadeli etkilerini değerlendirmiştir. Jiang vd. (2019), uçucu kül ve silis dumanının zemin stabilizasyonundaki performansını araştırmış, Davidovits (2021) ise geopolimerlerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini incelemiştir. Polimer bazlı stabilizasyon üzerine yapılan güncel alışmalar, Rahman vd. (2023) tarafından detaylandırılmıştır.

Kimyasal stabilizasyon, inşaat mühendisliğinde zemin iyileştirme süreçlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Geleneksel yöntemlerin yanı sıra, sürdürülebilir ve evre dostu alternatiflerin geliştirilmesi, gelecekte kimyasal stabilizasyonun daha geniş bir kullanım alanına sahip olacağını göstermektedir. Geopolimerler ve biyopolimerler gibi yenilikçi malzemeler, düşük karbon emisyonlu stabilizasyon çözümleri sunarak sektörde önemli bir dönüşüm sağlayabilir.

1.2.2.2. Mekanik stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon, zeminlerin taşıma kapasitesini ve dayanımını artırmak amacıyla doğal veya yapay yöntemlerle tane boyut dağılımının iyileştirilmesi işlemidir. Bu yöntem, özellikle altyapı projelerinde, yol yapımında ve temel zeminlerinin güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik stabilizasyon, zeminlerin sıkıştırılması, farklı tane boyutuna sahip malzemelerle karıştırılması ve geosentetik malzemelerin kullanılması gibi işlemleri içerir.

Mekanik stabilizasyon genellikle üç ana yöntemle uygulanmaktadır:

Mekanik sıkıştırma

Zeminin su içeriği kontrol edilerek optimum sıkıştırma sağlanır. Silindir, tokmak veya vibrasyonlu kompaktrler gibi ekipmanlar kullanılarak zemin yoğunlaştırılır. Bu yöntem, özellikle taşıma kapasitesini artırmak için yüzeysel veya derin sıkıştırma teknikleriyle uygulanır. Zemin yoğunluğunu artırarak daha sağlam bir temel oluşturur (Türkiye Jeoteknik Derneği, 2025).

Granüler malzeme karışımı

Farklı tane boyutlarına sahip malzemeler eklenerek zemin daha iyi bir mühendislik yapısına kavuşturulur. Örneğin, kil oranı yüksek bir zemine iri agregalar eklenerek taşıma kapasitesi artırılır. Karışım oranları, zemin türüne ve projenin gereksinimlerine göre belirlenir. Zayıf zeminlere iri taneli agregalar eklenerek stabilite artırılır (Smith & Brown, 2017).

Geosentetik kullanımı

Geotekstiller, geogridler ve geomembranlar gibi malzemeler kullanılarak zemin stabilizasyonu sağlanır. Geosentetikler, zemin mukavemetini artırarak yük taşıma kapasitesini yükseltir ve erozyon riskini azaltır. Ayrıca, su geçirgenliğini kontrol ederek zeminin uzun vadeli dayanıklılığını artırır. Geotekstil, geogrid ve geomembranlar ile zeminin dayanıklılığı artırılır (Lee & Kim, 2020).

Mekanik stabilizasyonun avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- ✓ Kimyasal katkı maddelerine ihtiyaç duymadan çevre dostu bir iyileştirme sağlar.
- ✓ Düşük maliyetli ve uygulanması kolaydır.
- ✓ Zeminlerin uzun vadede stabil kalmasını destekler.
- ✓ Ekipman yardımıyla hızlı ve etkili uygulanabilir.
- ✓ Homojen bir karışım elde etmek bazı durumlarda zor olabilir.
- ✓ Yüksek plastisiteli zeminlerde mekanik stabilizasyon tek başına yeterli olmayabilir.
- ✓ Özellikle ince taneli zeminlerde sıkıştırma ile istenen iyileştirme sağlanamayabilir.

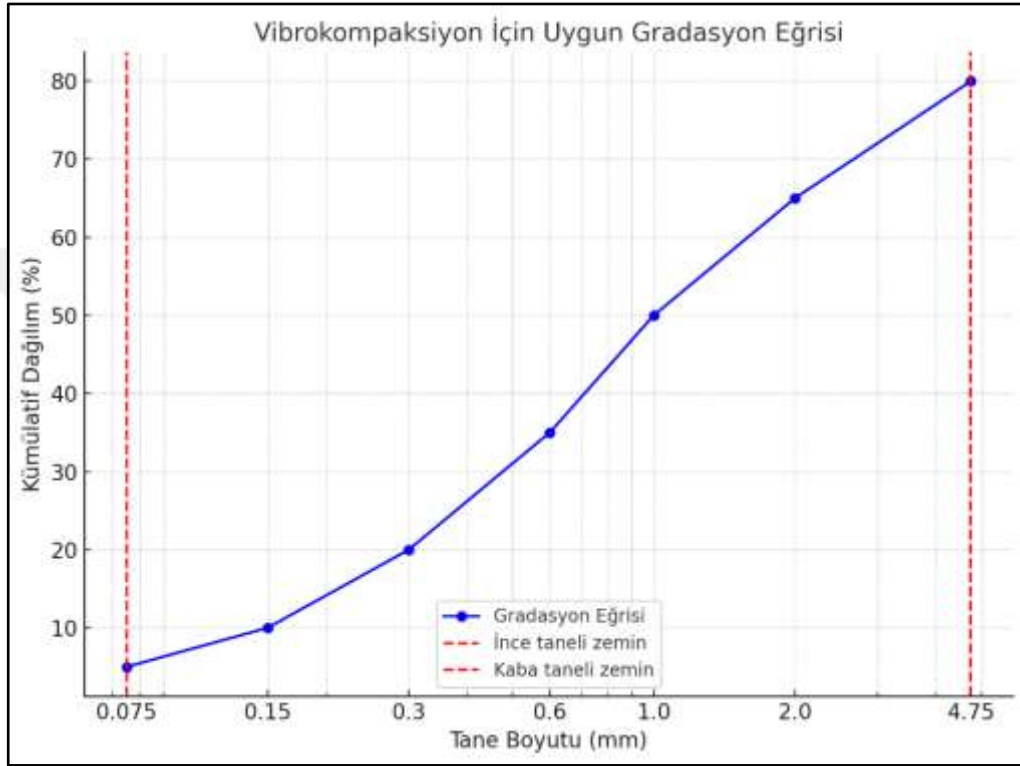
Mekanik stabilizasyon üzerine yapılan çalışmalarda, farklı zemin türleri ve uygulama yöntemleri detaylı olarak ele alınmıştır. Mitchell ve Gallagher (1998) çalışmalarında, farklı tane boyutlarının stabilizasyona etkisini inceleyerek optimum karışım oranlarını belirlemişlerdir.

Hunt (1986, 1994), mekanik stabilizasyonun yol mühendisliği ve altyapı projelerindeki rolünü detaylandırmıştır. Uzuner (2013), Türkiye'deki zemin koşullarına uygun mekanik stabilizasyon yöntemlerini belirlemiş ve saha uygulamalarını analiz etmiştir.

Mekanik stabilizasyon, zemin iyileştirme teknikleri arasında maliyet etkin ve sürdürülebilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Farklı zemin türleri için optimum stabilizasyon tekniklerinin belirlenmesi, saha koşullarına göre yapılan detaylı mühendislik analizleri ile mümkündür. Gelecekte, gelişen teknolojilerle birlikte mekanik stabilizasyonun daha etkin ve verimli hale getirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Vibrokompaksiyon metodu

Vibrokompaksiyon metodu, doymuş ve gevşek granüler zeminlerin sıkıştırılarak taşıma kapasitelerinin artırılmasını sağlayan bir stabilizasyon tekniğidir. Bu yöntem, özellikle kum ve çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerde kullanılır ve zeminin iç yapısını yeniden düzenleyerek daha dayanıklı hale getirir. Son yıllarda, vibrokompaksiyonun etkinliği üzerine yapılan araştırmalar, yöntemin uygulama alanlarını genişletmiş ve yeni teknolojiler ile entegrasyonunu sağlamıştır.



Şekil 6: Vibrokompaksiyonun Uygun Olduğu Gradasyon Eğrisi

Eğri, ince taneli zeminlerden (yaklaşık 0.075 mm) başlayıp, kaba taneli zeminlere (yaklaşık 4.75 mm) kadar devam ediyor. Bu tür zeminler, özellikle vibrokompaksiyon yöntemiyle sıkıştırma için uygundur. İnce taneli zeminler daha iyi sıkıştırılabilirken, kaba taneli zeminler için etkinlik azalır.

Vibrokompaksiyon, yüksek frekanslı vibrasyon enerjisi kullanılarak zeminin yoğunlaştırılması esasına dayanır. Vibrasyon etkisiyle zemin tanecikleri yeniden düzenlenir, aralarındaki boşluk oranı azalır ve daha sıkı bir yapı oluşturulur. Bu yöntem aşağıdaki alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır:

- ✓ Deniz dolguları ve liman yapıları: Dalgakıranlar ve rıhtım temellerinin stabilizasyonu için kullanılır.

- ✓ Karayolu ve demiryolu altyapıları: Zayıf zeminlerin güçlendirilmesi amacıyla uygulanır.
- ✓ Endüstriyel ve ticari yapılar: Büyük ölçekli binaların sağlam bir zemin üzerinde inşa edilmesini sağlar.
- ✓ Deprem riski taşıyan bölgeler: Sıvılaşma riskinin azaltılması amacıyla tercih edilir.

Vibrokompaksiyon metodu üzerine yapılan araştırmalar, yöntemin zemin mühendisliği alanındaki gelişimine önemli katkılar sunmuştur.

- ✓ Kim ve Lee (2016), vibrokompaksiyonun farklı zemin koşullarında performansını değerlendirmiş ve optimum vibrasyon frekanslarını belirlemiştir.
- ✓ Smith vd. (2018), yöntemle stabilizasyonun uzun vadeli etkilerini inceleyerek sıkıştırılmış zeminlerin zaman içindeki dayanım değişimlerini analiz etmiştir.
- ✓ Zhang ve Li (2020), vibrokompaksiyonun sıvılaşma riskini azaltma üzerindeki etkilerini deneysel çalışmalarla ortaya koymuştur.
- ✓ Mehta ve Singh (2023), dijital modelleme tekniklerini kullanarak vibrokompaksiyon uygulamalarının daha verimli hale getirilmesi için yeni öneriler geliştirmiştir.

Patlatma metodu

Patlatma metodu ile zemin stabilizasyonu, düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerin hızlı ve etkin bir şekilde iyileştirilmesi için kullanılan yenilikçi bir mühendislik tekniğidir. Bu yöntem, kontrollü patlatmalar aracılığıyla zeminin iç yapısını yeniden düzenleyerek boşluk oranını azaltır ve sıkışmayı sağlar. Son on yılda yapılan çalışmalar, bu yöntemin özellikle büyük ölçekli altyapı projelerinde, madencilik uygulamalarında ve inşaat sahalarında başarıyla kullanıldığını göstermektedir.

- ✓ Dinamik Sıkıştırma: Patlatma enerjisinin kontrollü kullanımı ile zeminde meydana gelen titreşimler, malzemenin daha yoğun bir yapı kazanmasını sağlar.
- ✓ Boşluk Giderme ve Yeniden Düzenleme: Patlatma sonrası zemindeki boşluklar kapanarak daha sağlam ve dayanıklı bir yapı elde edilir.
- ✓ Zemin Mukavemetinin Artırılması: Özellikle yumuşak ve organik malzemeler içeren zeminlerde, patlatma ile zemin sertliği artırılarak inşaat için daha uygun hale getirilir.

Yapılan araştırmalar, patlatma metodunun farklı zemin türlerine etkisini incelemiş ve çeşitli uygulama alanlarında etkinliğini ortaya koymuştur. Smith vd. (2020), büyük ölçekli

altyapı projelerinde patlatma tekniğinin başarıyla kullanıldığını belirtirken, Lee vd. (2021) bu yöntemin zayıf zemin koşullarında stabilizasyon performansını detaylandırmıştır. Ayrıca, Kim ve Yoon (2023) yaptıkları çalışmalarda, patlatma enerjisinin kontrollü kullanımı ile çevresel etkilerin minimize edilebileceğini göstermiştir.

Dinamik kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon metodu, zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak ve gevşek zeminleri sıkıştırmak için kullanılan etkili bir mühendislik tekniğidir. Bu yöntem, yüksek kütleli ağırlıkların belirli bir yükseklikten serbest düşürülmesiyle zeminin yoğunlaştırılmasını sağlar. Yapılan araştırmalar, dinamik kompaksiyonun geniş çaplı altyapı projelerinde, dolgu alanlarında ve sahil bölgelerindeki zemin iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir.

- ✓ Yüksek enerjili darbe uygulaması: Büyük ağırlıkların belirli yüksekliklerden bırakılmasıyla zeminin sıkıştırılması sağlanır.
- ✓ Boşluk oranının azaltılması: Patlama ve darbe enerjisi etkisiyle zemin içindeki boşluklar kapatılır.
- ✓ Zemin mukavemetinin artırılması: Özellikle kumlu ve gevşek dolgu zeminlerde taşıma kapasitesini artırmak için tercih edilir.

Yapılan araştırmalar, dinamik kompaksiyon metodunun farklı zemin türleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Carter ve arkadaşları (2017), bu yöntemin büyük altyapı projelerindeki etkinliğini vurgulamıştır. Zhang ve Li (2019) yaptıkları çalışmalarda, dinamik kompaksiyonun kumlu zeminlerdeki performansını analiz etmiş ve optimal parametreleri belirlemiştir. Kim ve Lee (2023), çevresel etkilerin minimize edilmesi için alternatif enerji sönmüleme tekniklerini araştırmıştır.

Enjeksiyon metodu ile zemin stabilizasyonu

Enjeksiyon metodu, düşük dayanımlı zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak, su geçirgenliğini azaltmak ve oturma problemlerini minimize etmek amacıyla kullanılan bir zemin iyileştirme tekniğidir. Bu yöntemde, çimento, kimyasal bağlayıcılar veya polimer bazlı enjeksiyon malzemeleri zemin içerisine enjekte edilerek zemin yapısının güçlendirilmesi sağlanır. Yapılan araştırmalar, bu yöntemin altyapı projelerinde, tarihi yapıların korunmasında ve suya doygun zeminlerde başarıyla uygulandığını göstermektedir.

- ✓ Çimento Bazlı Enjeksiyon: Çimento süspansiyonunun düşük dayanımlı zeminlere enjekte edilmesiyle zeminin mukavemeti artırılır.
- ✓ Kimyasal Enjeksiyon: Poliüretan, sodyum silikat ve akrilik bazlı enjeksiyon malzemeleri kullanılarak su geçirimsizliği sağlanır ve zemin sertleştirilir.
- ✓ Jet Grouting: Yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu ile zemin içinde sütunlar oluşturularak taşıma kapasitesi artırılır.

Yapılan araştırmalar, enjeksiyon yönteminin etkinliğini ve farklı zemin türlerindeki performansını incelemiştir. Jones ve arkadaşları (2016), çimento bazlı enjeksiyonun kil zeminlerdeki taşıma kapasitesine etkisini araştırmıştır. Wang ve Li (2018), poliüretan enjeksiyonlarının suya doymun zeminlerde geçirimsizliği nasıl azalttığını incelemiştir. Son olarak, Kim ve Park (2022), jet grouting teknolojisinin yeni nesil uygulamalarını ele alarak farklı saha koşullarındaki etkinliğini analiz etmiştir.

Reolojik Kategori	Partikül Süspansiyonlar (Bingham Akışkanları)		Çözeltiler (Newton Akışkanları)			Gaz Emülsiyonları
	Kararlı	Kararsız	Koloit Çözeltiler (Viskozite zamanla artmakta)	Saf Çözeltiler (Viskozite zamanla değişmemekte)		
Enjeksiyon Malzemelerinin Ana Türleri	Sadece Çimento	Bentonit veya kil ile birlikte çimento	Topaklaşmamış Bentonit	Kinyasal Enjeksiyon Malzemeleri		Şişçilen Enjeksiyon Malzemeleri
				Sodyumsilikat Bazlı	Organik Reçinler Bazlı	
Uygulama Alanları	Çatlaklı kaya ve duvar	Çakıl	Kaba Kumlar	Yüksek dayanımlı	Orta-düşük dayanımlı	Çimento Bazlı
				Mikrofisürlü ve geçirimli kaya		Organik Ürünler Bazlı
Geçirimlilik katsayısı, k_f (m/s)	Çatlaklı kaya ve duvar	Çakıl	Kaba Kumlar	GRANÜLER ZEMİNLER		Boşluklar ve hızlı akan sızıntı suları
				Orta-İnce Kum	İnce Siltli Kumlar (Kumlu Siltler)	
Özgül Yüzey, S_s , (m ² /N)	$>5.10^{-4}$	<0.5	$>5.10^{-6}$	$>5.10^{-6}$	$>1.10^{-6}$	
Temel Enjeksiyon Tekniği	Yüksek Basınç	Kontrollü hacim ve basınç				Düşük Basınç (Boşlukların doldurulması)

Şekil 7: Enjeksiyon Türleri ve Uygun Zemin Türleri

Enjeksiyon metodu, farklı zemin türlerinde geniş bir uygulama alanına sahip olup mühendislik projelerinde etkili bir stabilizasyon yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Gelecekte, sürdürülebilir ve çevre dostu enjeksiyon malzemelerinin geliştirilmesi, bu tekniğin daha verimli ve ekonomik hale getirilmesine katkı sağlayacaktır.

1.2.2.3. Biyolojik stabilizasyon

Günümüzde inşaat sektörü, çevresel etkileri en aza indirmek ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek amacıyla yeni yaklaşımlar geliştirmektedir. Bu kapsamda, biyolojik stabilizasyon, zemin iyileştirme ve erozyon kontrolü konularında çevreci bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Doğal organizmaların ve biyokimyasal süreçlerin kullanılmasıyla zeminin stabil hale getirilmesini amaçlayan bu yöntem, geleneksel kimyasal ve mekanik stabilizasyon yöntemlerine çevreci bir alternatif sunmaktadır (DeJong vd., 2006).

Biyolojik stabilizasyon, mikroorganizmalar veya organik bileşenler kullanarak zeminin dayanıklılığını artırmaya odaklanır. Yapılan araştırmalara göre, bakterilerin kalsiyum karbonat çöktürerek zemini daha sağlam hale getirdiği görülmüştür (Jones & Patel, 2024).

Biyolojik stabilizasyon, mikroorganizmaların ve bitkilerin zemin üzerindeki etkilerinden yararlanarak toprağın mukavemetini arttırmayı amaçlar. Temel biyojeokimyasal süreçler arasında mikrobiyal kalsit çöktürme (MICP), bitki kök sistemlerinin kullanımı, mikrobiyal polimerlerin zemin stabilizasyonu gibi yaklaşımlar bulunmaktadır.

Mikrobiyal kalsit çöktürme (MICP)

Sporosarcina pasteurii gibi bakteriler, ürea hidrolizi yoluyla kalsiyum karbonat (CaCO_3) çöktürerek zeminin mukavemetini artırabilir (Whiffin, 2004). Bu yöntem, kumlu ve gevşek zeminlerin sertleştirilmesinde etkin olarak kullanılmaktadır.

Bitki kök sistemleri ile stabilizasyon

Bitki kökleri, toprağı mekanik olarak tutarak erozyonu önler (Gray & Leiser, 1982). Otlar, çalılar ve ağaçlar, özellikle yamaç stabilizasyonunda önemli rol oynar (Wu & Watson, 1998).

Mikrobiyal polimerlerin kullanımı

Bakteriler tarafından sentezlenen biyopolimerler, toprağın taneciklerini bir arada tutarak stabilizasyonu sağlar. Bu yöntem, özellikle kil içeriğı yüksek zeminlerde etkili olabilir.

Biyolojik stabilizasyonun avantaj ve dezavantajları verilmiştir:

- ✓ Çevre dostu: Kimyasal stabilizasyon yöntemleri yerine doğal mikroorganizmalar kullanıldığı için ekosistem dostudur.

- ✓ Düşük maliyet: Geleneksel stabilizasyon yöntemlerine göre düşük enerji tüketimi gerektirir.
- ✓ Uzun vadeli dayanıklılık: Bitkilerin ve mikroorganizmaların zemin yapısına entegrasyonu, stabilizasyonun uzun süre korunmasını sağlayabilir.
- ✓ Uygulama alanı kısıtlılığı: Farklı zemin türlerinde etkinliği değişkenlik gösterebilir.
- ✓ Hava ve iklim koşullarının etkisi: Bitki temelli stabilizasyon yöntemleri, kurak bölgelerde sınırlı olabilir.
- ✓ Kontrol zorluğu: Mikroorganizmaların büyük ölçekte kontrol edilmesi ve optimize edilmesi bazı durumlarda zor olabilir.

Biyolojik stabilizasyon, inşaat mühendisliğinde çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Mikroorganizmalar ve bitkilerin zemin stabilizasyonuna entegrasyonu, hem ekolojik hem de ekonomik faydalar sunmaktadır. Ancak, bu yöntemin yaygın olarak kullanılabilmesi için saha testleri ve ölçeklenebilirlik çalışmalarının artırılması gerekmektedir.

1.2.2.4. Fiziksel stabilizasyon

Zemin stabilizasyonu, inşaat mühendisliğinde altyapı projelerinin dayanıklılığını artırmak için kritik bir rol oynamaktadır. Fiziksel stabilizasyon, zemin özelliklerini iyileştirmek ve taşıma kapasitesini arttırmak amacıyla mekanik ve fiziksel yöntemlerin uygulanmasını içerir. Bu yöntem, genellikle geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmakta ve geleneksel stabilizasyon yöntemleri ile birleştirilerek daha etkin hale getirilmektedir (Das, 2010).

Fiziksel stabilizasyon yöntemleri, zemin taneciklerinin düzenlenmesi ve yoğunluğunun artırılması yoluyla zemin mukavemetini yükseltir. Bu yöntemler arasında mekanik sıkıştırma, karışım stabilizasyonu, geosentetik malzemelerin kullanımı, ve taş kolonları ile stabilizasyon gibi teknikler bulunmaktadır.

Mekanik sıkıştırma

Zeminin silindirler, vibrasyonlu plakalar ve tokmaktama gibi yöntemlerle yoğunlaştırılmasıdır (Holtz & Kovacs, 1981). Yüzeysel stabilizasyon projelerinde yaygın olarak kullanılır.

Karışım stabilizasyonu

Zemin içine iri agregalar veya stabilizatör malzemeler eklenerek zeminin mukavemeti artırılır. Kumlu ve killi zeminlerde farklı çözüm alternatifleri sunar (Mitchell & Soga, 2005).

Geosentetik malzemelerin kullanımı:

Geotekstil, geogrid ve geomembran gibi malzemeler, zeminin mekanik dayanımını arttırmak için kullanılır (Koerner, 2012). Bu malzemeler, özellikle yol inşaatında ve şev stabilizasyonunda yaygın olarak tercih edilir.

Taş kolonları ile stabilizasyon

Taş kolonları, zayıf zeminleri güçlendirmek için granüler malzemelerin yerleştirilmesi ile oluşturulur (Basu & Prezzi, 2007). Yumuşak zeminlerde düşey drenaj sağlayarak taşıma kapasitesini artırır.

Fiziksel stabilizasyonun avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

- ✓ Anında etki: Mekanik yöntemler uygulandığı anda zemin stabilizasyonunu sağlar.
- ✓ Uzun ömür: Doğru uygulandığında uzun vadeli dayanıklılık sunar.
- ✓ Esneklik: Farklı zemin türlerine uygun çözüm seçenekleri mevcuttur.
- ✓ Yüksek maliyet: Bazı yöntemler büyük ekipman ve işgücü gerektirir.
- ✓ Geçici etkiler: Mekanik stabilizasyon, zamanla gevşeme ya da oturma sorunları yaratabilir.
- ✓ Çevresel etkiler: Taş ocağlarından temin edilen malzemeler doğal kaynak tüketimine neden olabilir.

Fiziksel stabilizasyon, inşaat mühendisliğinde zemin dayanımını arttırmak için etkili bir yöntemdir. Geleneksel mekanik ve karışım stabilizasyon yöntemleri, modern geosentetik uygulamalarla birleştirildiğinde daha güvenilir ve uzun ömürlü çözümler sunmaktadır. Ancak, sürdürülebilirlik ve maliyet gibi faktörler de dikkate alınarak projeye uygun stabilizasyon yöntemi seçilmelidir.

1.2.2.5. Geleneksel olmayan katkı malzemeleri ile stabilizasyon

İnşaat mühendisliğinde zemin stabilizasyonu, altyapı projelerinin güvenliğini ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel yöntemler genellikle çimento, kireç ve mekanik sıkıştırma gibi uygulamaları içerse de, çevresel kaygılar ve ekonomik faktörler nedeniyle geleneksel olmayan katkı malzemelerine yönelik ilgi giderek artmaktadır. Bu malzemeler arasında endüstriyel atıklar, tarımsal yan ürünler ve biyopolimerler gibi sürdürülebilir çözümler yer almaktadır (Chen vd., 2019).

Endüstriyel atıklar

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi malzemeler, çimento benzeri bağlayıcı özellikler göstererek zeminin dayanımını artırabilir (Sherwood, 1993). Bu malzemeler hem çevresel atıkları azaltır hem de düşük maliyetli stabilizasyon çözümleri sunar.

Tarımsal yan ürünler

Pirinç kabuğu külü, şeker kamışı posası ve odun külü gibi malzemeler, zeminin su geçirgenliğini ve dayanımını artırmada kullanılmaktadır (Muntohar, 2009). Organik içerik bakımından zengin olan bu malzemeler, uzun vadeli stabilite açısından dikkatle değerlendirilmelidir.

Biyopolimerler ve enzimler

Doğal biyopolimerler (örneğin, polisakkaritler) ve enzim bazlı stabilizasyon yöntemleri, zemini güçlendirerek su duyarlılığını azaltabilir (Chang vd., 2015). Bu yöntemler ekolojik açıdan sürdürülebilir olup, düşük karbon ayak izine sahiptir.

Nanoteknolojik katkılar:

Nano-silika ve nano-kil gibi malzemeler, zeminin mikro düzeyde bağlanmasını güçlendirerek taşıma kapasitesini artırır (Parsons & Milburn, 2003). Özellikle ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde umut vadeden bir alan olarak görülmektedir.

Geleneksel olmayan katkı malzemeleri ile stabilizasyonun avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- ✓ Çevresel sürdürülebilirlik: Atık malzemelerin kullanımıyla karbon emisyonları azaltılabilir.

- ✓ Ekonomik verimlilik: Endüstriyel ve tarımsal yan ürünlerin kullanımı maliyetleri düşürebilir.
- ✓ Geliştirilmiş mühendislik özellikleri: Bazı geleneksel olmayan katkılar, geleneksel bağlayıcılara göre daha iyi mekanik özellikler sunabilir.
- ✓ Değişkenlik: Atık malzemelerin bileşimi homojen olmayabilir ve performansı değişebilir.
- ✓ Uzun vadeli dayanıklılık: Bazı alternatif malzemelerin zaman içindeki etkileri tam olarak bilinmemektedir.
- ✓ Uygulama zorlukları: Bazı katkı malzemelerinin saha koşullarında uygulanması ek teknik bilgi ve ekipman gerektirebilir.

Geleneksel olmayan katkı malzemeleri, inşaat mühendisliğinde zemin stabilizasyonu için çevre dostu ve ekonomik alternatifler sunmaktadır. Endüstriyel atıklar, tarımsal yan ürünler, biyopolimerler ve nanoteknolojik katkılar gibi çözümler, sürdürülebilir ve dayanıklı altyapı sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ancak, bu malzemelerin geniş çapta kullanımı için saha testleri ve uzun vadeli performans analizlerinin artırılması gerekmektedir.

1.3. LİTERATÜR TARAMASI

Ghavami vd. (1999): Endüstriyel yan ürünlerin, özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun, geleneksel bağlayıcılar yerine kullanılabileceği ifade edilmiştir. Bu malzemelerin, çimento yerine kullanılması karbon emisyonlarını azaltmakta ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır. Uçucu kül, kömür bazlı enerji santrallerinde üretilen bir yan ürün olup, çimento yerine kullanıldığında çevresel fayda sağlar. Yüksek fırın cürufu ise, çelik üretimi sırasında açığa çıkan bir yan ürün olup, çimento yerine kullanıldığında önemli ölçüde CO₂ salınımını azaltır.

Dufresne ve Hryciw (2003) ise, inşaat mühendisliğinde yapı bileşenlerinin performansının değerlendirilmesinde RSM'nin kullanımı üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, yapıların deprem, rüzgar ve diğer çevresel faktörlere karşı davranışlarını analiz etmek amacıyla RSM kullanılmıştır. Yapıların dayanıklılığını etkileyen çeşitli parametrelerin etkileşimleri, RSM ile modellenmiş ve yapıların performansını optimize etmek için uygun parametreler belirlenmiştir. Özellikle, yapıların güvenliği için kritik olan tasarım parametrelerinin belirlenmesinde RSM, etkili bir modelleme yöntemi olarak öne çıkmıştır. Bu

Çalışma, RSM'nin, inşaat projelerindeki yapıların performansını optimize etme konusundaki gücünü ortaya koymuştur. Dufresne ve Hryciw, bu yöntemi kullanarak, daha güvenli ve dayanıklı yapıların tasarımını yapmanın mümkün olduğunu ve bu sayede uzun vadede yapıların bakım maliyetlerini azaltabileceğini göstermiştir. Ayrıca, RSM ile yapılan analizlerin, yapıların daha verimli bir şekilde tasarlanmasını ve inşa edilmesini sağlayarak, kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak tanıdığını belirtmişlerdir.

Al-Rawas ve Goosen (2006): Zemin stabilizasyonu, taşıma kapasitesini artırmak, oturmaları azaltmak ve dayanıklılığı yükseltmek için inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Geleneksel stabilizasyon teknikleri genellikle çimento, kireç ve asfalt gibi bağlayıcı malzemelerle yapılmaktadır. Bu yöntemler, zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirirken, bazı çevresel sorunlara da yol açmaktadır. Çimento üretiminin yüksek enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarına neden olduğu, bu nedenle daha sürdürülebilir alternatiflerin gerekliliğı belirtilmiştir.

Thomas (2007): Silis dumanının beton ve zemin stabilizasyonu uygulamalarında katkı maddesi olarak kullanımını incelemiştir. Silis dumanı, betonun mekanik performansını artırırken aynı zamanda karbon emisyonlarını da azaltmaktadır. Silis dumanı kullanımı, çevre dostu bir stabilizasyon çözümü olarak dikkat çekmektedir.

Siddique (2010): Uçucu külün, kömür bazlı enerji santrallerinde üretilen bir yan ürün olarak, çimento yerine kullanılmasının çevresel yararlarını incelemiştir. Uçucu kül kullanımı, çimento üretimindeki karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmada, uçucu külün çevre dostu bir alternatif olarak değeriendirilmesi gerektiğı belirtilmiştir.

Davidovits (2013): Jeopolimer teknolojisi, alümina ve silis açısından zengin endüstriyel atıkların aktivasyonu yoluyla elde edilen bağlayıcılardır. Davidovits, jeopolimerlerin geleneksel çimento bazlı sistemlere kıyasla %80'e kadar daha düşük karbon ayak izi sağladığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, jeopolimerlerin çevresel sürdürülebilirliği artırmak için önemli bir alternatif olduğunu vurgulamaktadır.

Yi vd. (2013), yaptıkları çalışmada halihazırda stabilize zeminta mevcut olan büyük miktarlarda CO₂'yi bünyesine alarak mukavemette hızlı ve önemli bir artış sağlayabildiğinden, karbonatlama reaktif magnezyanın (MgO) toprağı stabilize etmek için nasıl kullanılabileceğini irdelemişlerdir. Serbest basınç dayanımı, X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gaz halindeki CO₂'nin mekanik ve mikroyapısal özellikleri, üç eksenli bir hücre düzeneğinde hazırlanan reaktif MgO ile işlenmiş zemin örneklerine zorlayarak araştırmışlardır.

Sonuçlara göre, karbonatlı MgO ile işlenip elde edilen zeminler, 28 gün boyunca Portland çimentosu (PC) ile stabilize edilen zeminlere 1-2 saat içerisinde benzer bir dayanım aralığına ulaşabileceği sonucuna varmışlardır.

Çalış (2014), yaptığı çalışmada kaplama ile yapısal uyumun sağlanması amacıyla çalışmada perlit esaslı alçı harcı kullanmıştır. Alternatif gürültü koruma malzemelerinin absorpsiyon özelliklerini test edip kaplamalar için belirlediği akustik absorpsiyon değerlerini karşılaştırmıştır. Birçok akustik deney ile yaptığı uygulamalar sonucunda mevcut bariyerlere perlit kaplama uygulanmasının, yasal limitleri aşan gürültüye maruz kalan kişi sayısını azalttığı kanısına varmıştır. Buna aşırı derecede rahatsız olan kişilerin toplam sayısı olarak baktığında, gürültünün neden olduğu rahatsızlık düzeyi yasal gürültü sınırından farklı olduğunu farketmiştir. Perlit kaplama kullanılmakta olup 50 yıl ekonomik inşaat ömrüne sahiptir. Ayrıca, kabul değişkenlerinin elde edilen sonuçları ne ölçüde etkilediğini incelemek için bir duyarlılık analizi yapmıştır. Çalışmada elde ettiği fiziksel, akustik ve ekonomik analizlerin değerlendirme sonuçlarına göre bu, laboratuvarda geliştirilen perlit bazlı kaplamaların trafik gürültüsüyle mücadelede kullanılabileceğinin fakat perlit kaplamaların üretimi, geniş uygulama alanı ve yangına dayanıklılık davranışı gibi konular daha fazla gelişme ve araştırma gerektirdiği sonucuna varmıştır.

Gül (2015), yaptığı çalışmada yıkımı gerçekleşen bir binanın inşaatında kullanılan jet grout üretimini ele almıştır. Jet grout uygulamasının bir parçası olarak gerçekleştirilen saha ve laboratuvar testleri yapmıştır. Jet-1 ve Jet-2 yöntemleri olmak üzere iki tür uygulama yapmıştır ve bu iki uygulamayı karşılaştırdığında jet grouting yönteminin çeşitli zemin türlerinde proje standartlarını karşıladığını tespit etmiş ve yöntemin zemindeki performansı SPT testlerinden elde ettiği darbe rakamlarıyla karşılaştırmıştır. Jet patlatma prosesinin tüm yönlerini incelemiştir. Araştırmasına konu olan uygulamaların tasarım aşamasına ilişkin tüm bulgular, saha ve laboratuvar deneyleri ve sahadaki uygulamaların deneysel çalışmalarından elde ettiği verilerle destekleyerek çalışmasında buna yer vermiştir.

Huang vd. (2015): Geleneksel bağlayıcı malzemeler olan çimento, kireç ve asfaltın üretim süreçleri, büyük miktarda enerji harcaması gerektirmekte ve bu da ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Çimento üretimi, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olup, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Çimento ve kireç üretiminde ortaya çıkan karbon emisyonları, inşaat sektörü açısından önemli bir çevresel endişe kaynağıdır. Bu çalışmada, alternatif stabilizasyon malzemelerinin önemine vurgu yapılmaktadır.

Kumar ve Sharma (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, beton karışımlarının dayanıklılığını optimize etmek amacıyla RSM kullanılmıştır. Beton karışımının bileşenleri arasındaki etkileşimlerin doğru bir şekilde modellenmesi gerektiği ve bu etkileşimlerin betonun mekanik özelliklerine olan etkisinin büyük olduğu vurgulanmıştır. Kumar ve Sharma, beton karışımlarının bileşenlerinin (çimento, su, agregalar ve katkı maddeleri) optimum seviyede birleştirilmesi için RSM yöntemini kullanmış ve böylece daha az deneyle ve daha az kaynakla en dayanıklı karışım formülasyonunu elde etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, RSM'nin, beton karışımındaki her bileşenin etkisini incelemeye olanak tanıyıp, her bileşenin betonun dayanıklılığına olan katkısını belirlemede etkin bir araç olduğunu göstermiştir. Bu sayede, betonun dayanıklılığı artırılırken, aynı zamanda maliyetin de minimize edilmesi sağlanmıştır. Kumar ve Sharma'nın çalışması, RSM'nin inşaat mühendisliğinde malzeme optimizasyonu alanındaki gücünü ve verimliliğini bir kez daha gözler önüne sermektedir.

Vukicevic vd. (2015), yaptıkları çalışmada aktivatör içermeyen uçucu kül kullanarak zemin stabilizasyonu sağlamaya odaklanmışlardır. Bu kapsamda iki tür ince taneli zemin kullanmışlardır. Uçucu külün zeminin plastisite, nem-yoğunluk ilişkisi, Kaliforniya Taşıma Oranı değeri, serbest basınç dayanımı, kayma dayanımı parametreleri, deformasyon parametreleri ve şişme potansiyeli parametrelerine etkisini değerlendirmişlerdir. Değerlendirme sonucunda zemin iyileştirmeye uçucu külün önemli bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Yılmaz (2015), yaptığı çalışmada taş ocaklarından çıkarılan, Bayburt ili ve çevresine bulunan Bayburt taşının atık malzemeleri ile bir stabilizasyon çalışması yürütmüştür. Yüksek plastisiteli killi zemini esas alarak stabilizasyonda kullandığı yeşil, beyaz ve sarı renkteki Bayburt Taşı ocak atıklarını %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında doğal malzeme ile kireçsiz ve %6 kireçli olarak zemin numuneleri hazırlamıştır. Hazırladığı numunelerin durabilite, şişme, dayanıklılık ve indeks gibi geoteknik özelliklerinin yanında ek olarak numunelerin mikro yapısını bilgisayarlı tomografi ve taramalı elektron mikroskobu analizleriyle irdelemiştir. Kireçli ve beyaz renkli Bayburt taşı atıklarından hazırladığı numunelerin daha iyi dayanım verdiği ve sonuçlarının kullanılabilirliğinin daha sağlıklı sonuçlara ulaştırdığı ve bunun yanı sıra Bayburt taşının zemin stabilizasyonunda kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır.

Al-Kaki (2016), yaptığı çalışmada kilin zemin örselenmiş atık soda şişesi camı (ÖASSC) ile karıştırılmasının kilin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesine etkisini araştırmıştır. Atık soda şişelerini öğütüp #200 elek altında kalan numuneleri kullandığı kilin kuru ağırlığının %3, 6, 9 ve 12'si oranlarında kile ilave etmiştir. ÖASSC'nin belirlediği

oranlarda kile katarak karıştırmasının ardından özgül ağırlık, kıvam limiti, serbest basınç dayanımı, şişme ve CBR testleri yapmıştır. Numuneler 3, 7 ve 28 gün kürlenme sürelerinden sonra serbest basınç dayanım testi uygulamıştır. CBR testi yapılmadan önce hazırladığı numuneleri 4 gün su içerisinde bekletmiştir. Deney sonuçları, ÖASSC kilini karıştırdıktan sonra ölçtüğü sonuçlara göre kilin viskozite sınırı ve mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Her karışım oranının optimum su içeriğini, sıvı ve plastisite sınırlamalarını ve ÖASSC kilinin şişmesini önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca eklenen atık katkı maddeleri kilin maksimum kuru yoğunluğunu ve CBR oranını artırdığını; test sonuçlarından aldığı sonuçla, kürlenme süresinin arttırılmasının mukavemeti arttırdığı sonucuna ulaşmıştır.

Alpyürür (2016), yaptığı çalışmada olası bir inşaat ve yıkım atığı olarak değerlendirilen gaz betonun (GB) zemin iyileştirmede kullanılabilirliğini laboratuvar testleri kullanarak araştırmıştır. Öğütülmüş gaz beton kullanarak ve bunu yüksek plastisiteli bentonit kili (CH), düşük plastisiteli kil (CL) ve kumlu zeminle karıştırarak farklı zemin türleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi için deneyler yapmıştır. Laboratuvar test programı kapsamında elek analizi ve hidrometre testleri, Harvard minyatür kompaksiyon testleri, serbest basınç testleri, kesme kutusu testleri, California taşıma oranı testleri ve şişme basıncı testleri gerçekleştirmiştir. Gazbeton atıklarının kırılmasının kilin kıvam sınırı ve dayanım özelliklerine etkisi araştırıldı. Ek olarak öğütülmüş gazbeton atıklarının bentonitin şişme parametrelerine etkisini araştırmak amacıyla yüksek plastikliğe sahip bentonit kili ile hazırlanan numuneler üzerinde şişme basıncı testleri yapmıştır.

Chang vd. (2016): Biyopolimer katkıli stabilizasyonun, zemin mühendisliği uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini ve karbon ayak izini önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Bu çalışma, biyopolimerlerin çevre dostu stabilizasyon malzemeleri olarak kullanılmasının faydalarını ortaya koymaktadır.

Jayanthi ve Singh (2016), yaptıkları çalışmada sürdürülebilir malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanımı üzerinde durmuşlardır. Sürdürülebilir malzemeler, endüstriyel yan ürünlerin (uçucu kül, çimento fırın tozu, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, silis dumanı, kırmızı çamur ve tekstil atığı gibi) üzerinde yapılan birçok çalışmayı incelemişlerdir. Bu çalışmada literatürün eleştirel bir sentezini sunmuşlardır.

Chang vd. (2015): Biyopolimer stabilizasyonunun, çimento veya kireç kullanımına kıyasla daha düşük karbon emisyonlarına sahip olduğunu ve zeminlerin su direncini artırdığını

göstermiştir. Biyopolimerlerin kullanımının, zemin mühendisliği uygulamalarında başarılı bir şekilde entegre edilebileceği ve çevresel faydalar sağladığı belirtilmiştir.

Latifi vd. (2017): Biyopolimerler ve jeopolimerlerin, geleneksel stabilizasyon yöntemlerine kıyasla uzun vadede enerji tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Bu malzemeler, inşaat sektöründe çevre dostu çözümler sunan önemli alternatiflerdir.

Montgomery (2017), deneysel tasarım ve analizin mühendislikteki kritik rolünü vurgulayarak, Yanıt Yüzeyi Metodu'nun (RSM) mühendislik uygulamalarındaki önemini açıklamıştır. Bu çalışmada, RSM'nin mühendislikteki birçok farklı alanda, özellikle tasarım optimizasyonu ve proses iyileştirmeleri konusunda verimli bir araç olduğunu belirtmiştir. Montgomery, RSM'nin mühendislik tasarımında kullanılmasının, mühendislerin parametreler arasındaki ilişkileri doğru bir şekilde anlayabilmelerine ve sistemdeki en uygun koşulları belirleyebilmelerine olanak tanıdığını vurgulamıştır. Ayrıca, mühendislik sistemlerinin karmaşıklığını azaltma ve zaman ile maliyet açısından daha verimli çözümler üretme noktasında RSM'nin sağladığı avantajlara dikkat çekmiştir. Bu bağlamda, Montgomery, özellikle çok değişkenli sistemlerde RSM'nin güçlü bir optimizasyon aracı olduğunu ve bu yöntemle daha az sayıda deneyle daha doğru sonuçların elde edilebileceğini ifade etmiştir.

Toksöz (2017), yaptığı çalışmada temel amaç kireç kolonu yöntemi kullanarak şişen killi zeminlerin iyileştirilmesinde, şişen kil oranına bağlı olarak iyon göç mesafesi ve kolon performansının araştırmış ve değerlendirmiştir. Bu nedenle bu çalışmada laboratuvar ölçekli bir modelleme çalışması yapmıştır. Bu amaçla değişen miktarlarda sodyum-bentonit içeren zemin örnekleri hazırlamış ve her zemin örneği için laboratuvar ölçekli bir model oluşturmuştur. Hazırlanan zemin örneklerinin bentonit içeriği %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 olarak ayarlamıştır. Kür süresi sonunda tüm zemin numunelerinde Ca^{+2} ve OH^- iyonlarının göç mesafeleri kimyasal analizle ölçerek bentonit içeriği ile iyon göç mesafesi arasındaki ilişkiyi ortaya çıkardı. Ayrıca, bentonit içeriğinin kireç kolonlarının iyileşme derecesi ve iyileşme mesafesi üzerindeki etkisini tanımlamak için zemin numunelerinin şişme davranışındaki değişiklikleri deneysel olarak ölçmüştür. Ayrıca en yüksek iyon göç mesafesi %0 bentonit içeren zemin örneğinde gözlerken, en yüksek iyileşme oranı %100 bentonit içeren zemin örneğinde bulmuştur. Büyük ölçekli modelde kolon çapının artırılması tüm zemin numuneleri için kolon iyileştirme mesafesini arttırmıştır. Şişebilen killi zeminlerin iyileştirilmesi için kireç kolonu teknolojisi kullanıldığında, şişebilen kil oranının iyon geçiş

mesafesi ve kolon performansı üzerinde önemli ölçüde farklı etkilere sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Çelik (2018), yaptığı çalışmada enerji kullanımının azaltılması ve enerjinin korunumu amacıyla yeni nesil geliştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım paneli geliştirmiştir. Bağlayıcıların ısı iletkenliğe etkisi ve en uygun bağlayıcı oranının belirlenmesi için sodyum silikat ve (6, 8, 10 ve 12M) sodyum hidroksit çözeltisi kullanmıştır. Hazırlanan panellerin fiziksel, mekanik, ısı iletkenlik özelliklerinin belirlenmesi için deneyler yapmıştır. Elde ettiği verilere göre, iki farklı tane yapısına sahip GP esaslı ısı yalıtım panellerinde granüler ve toz GP oranının, sodyum hidroksit derişiminin ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının artmasıyla birlikte görünür yoğunluk ve basınç dayanımı artarken, ısı iletkenlik olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmıştır. Ek olarak, panel yoğunluklarının ısı iletkenlik değerleri üzerine doğrudan etkisi olduğunu tespit etmiştir.

Scrivener vd. (2018): Çimento üretiminin çevresel etkileri, enerji tüketiminin yüksek olması ve büyük miktarda karbon emisyonu salınımına neden olması açısından ele alınmaktadır. Çimento endüstrisinin sera gazı emisyonlarına katkısı, çevresel sürdürülebilirlik için büyük bir tehdit oluşturur. Bu nedenle, çimento bazlı sistemlerin yerine geçebilecek daha çevre dostu malzemelerin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Abdeldjouad vd. (2019), yaptıkları çalışmada potasyum bazlı alkalın aktivatör ile alkalın aktivasyon sırasında toprağı stabilize etmek için kullanılan zemintaki kil kısmının rolünü sunmaktadırlar. Palmiye yağı yakıt külü (POFA) içeren ve içermeyen zeminleri bir çözelti halinde aktive etmek için 10M'lik bir potasyum hidroksit çözeltisi kullanmışlardır. POFA karışımları olan ve olmayan zeminler, serbest basınç testleri ve taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınımı kullanarak test etmişlerdir. POFA'lı ve POFA'sız oluşturdukları karışımların dayanım ve taşıma güçleri kıyaslandığında POFA'lı karışımlar için kısa süreli ve uzun süreli kütleme sürelerinden sonra basınç dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

Bahadori vd. (2019), yaptıkları çalışmada marnlı toprağı stabilize etmek için doğal puzolanların kullanımına ilişkin deneysel bir araştırma yapmışlardır. Değerlendirme, %5, 10 ve 15'lik uçucu kül stabilizatörlerinin maksimum kuru yoğunluk üzerindeki etkisinin değerlendirmiş ve ayrıca XRF analizi kullanılarak marn toprağının tanımlamış ve sınıflandırmışlardır. Proktor Sıkıştırma Testi, optimum nem içeriğı, Atterberg limitleri, USCS ve elastikiyet modülü parametrelerini dikkate almışlardır. Çalışma, marnlı zeminlerin stabilizatör olarak yaygın bulunabilen üç tip volkanik kül ile stabilizasyonunun tatmin edici mukavemet ve dayanıklılık sağladığını bulmuşlardır. Sonuçlar, hem volkanik kül içeriğindeki

artışın hem de külün oluşması için geçen sürenin, stabilize marn toprağının verimliliğini arttırdığını göstermiş ayrıca uçucu külün yüksek volkanizması, marnlı toprağın genleşmesini ve esnekliğini azalttığı sonucuna varmışlardır. Stabilize uçucu kül, yol ve ev inşaatı için ucuz yapı malzemeleri oluşturmak amacıyla marn toprağıyla karıştırılabilir sonucuna varmışlardır.

Kaçmaz (2019), yaptığı çalışmada endüstriyel atıklar, mermer tozu ve uçucu külün zemin iyileştirmede kullanılabilirliğinin araştırılmasını amaçlamıştır. Çalışması kapsamında İşehisar'dan aldığı Soma uçucu külü ve mermer tozunu kullanmıştır. Yükleme hızları farklı olarak hazırlanan numuneler üzerinde elek analizi, Standart Proktor Testi ve Tek Eksenli Basınç Testi yapmıştır. Elde ettiği verilere göre 16 m²'lik alana 30 cm yüksekliğinde ağırlıkça %15 mermer tozu ve %15 uçucu kül içeren malzeme sermiştir. 7, 14 ve 28 günlük kürleme sürelerindeki değişimlerini uygulanan malzeme üzerinde incelediğinde mukavemetinin yavaş da olsa arttığı sonucuna varmıştır.

Önal ve Sariavcı (2019), yaptıkları çalışmada İzmir Körfezi Meles Nehrinde nehir ağzında oluşan yüksek miktardaki alüvyon kullanmışlardır. Su içeriği yüksek ve taşıma kapasitesi düşük olan ve taşınan çökelti ler mühendislik uygulamaları için uygun değildir. Zemini stabilize etmek için derin zemin karıştırmanın kullanılmasının, zeminin birçok özelliğini iyileştirdiği kanısındadırlar. Bu yaklaşımla, zemini iyileştirmek için uygun bağlayıcının toprağa eklenmesini esas almışlardır. Bu amaca ulaşmak için, sınıflandırma testleri için sahadan zemin örnekleri almış ve ölçümler kullanarak optimum kireç ve çimento bağlayıcı oranları belirlemişlerdir. Daha sonra, mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için yerinde zemin koşullarından numuneler almış ve kürlemeye bırakmışlardır. Serbest basınç testleri ve kanatlı kesme testleri kullanarak, bağlayıcıların farklı kürleme sürelerine sahip numuneler üzerindeki stabilizasyon performansını değerlendirmişlerdir. İşlenmiş numunelerin SEM görüntüleri CSH, CAH ve jel benzeri CSF oluşumunu açıklamışlardır.

Sharma vd. (2019), yaptıkları çalışmada bir zemin iyileştirme tekniği olan zemin çivileme yöntemini kullanmışlardır. Çalışma kapsamında diğer zemin iyileştirme yöntemleriyle kıyaslama yapılmış uygun zemin koşulları, avantaj ve dezavantajları konusu üzerinde tartışmalara yer vermişlerdir. Kronolojik bir literatür taraması, enjeksiyon basıncı, örtü basıncı, zemin genleşmesi, doygunluk derecesi, çivi yüzeyi pürüzlülüğü ve sondaj deliği gibi çeşitli parametrelerin zemin çivilerinin çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Zemin çivilerinin çekme kapasitesinin belirlenmesi için CSIR'de geliştirilen yenilikçi çekme sistemi ve farklı deney düzeneklerine dayanan karşılaştırmalı bir çalışma sunmuşlardır.

Joseph vd. (2020): Karbon bazlı nano-malzemelerin, zemin stabilizasyonunda düşük karbon ayak izi sağlamak amacıyla araştırılmaktadır. Bu çalışmada, karbon negatif malzemelerin, zemin stabilizasyonunda kullanılması halinde çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlayabileceği belirtilmiştir.

Reddy vd. (2020): Kireç üretiminin yüksek enerji tüketimi ve ciddi karbon emisyonlarına yol açtığına değinilmektedir. Kireç, geleneksel stabilizasyon yöntemlerinde sıklıkla kullanılan bir bağlayıcıdır, ancak üretimi çevresel açıdan maliyetlidir. Bu nedenle, daha az enerji tüketen ve karbon emisyonlarını azaltan alternatif malzemelere yönelmek gerektiği sonucuna varılmıştır.

Şadoğlu ve Çalık (2020), kimyasal stabilizasyon, zeminin mukavemet, plastisite, sıkışma, dayanıklılık gibi fiziksel özelliklerinde değişiklikler yapar ve bu süreç zemin geçirgenliğini de etkiler. Özellikle kireç stabilizasyonu, killi zeminlerde geçirgenliğin önemli ölçüde artmasına yol açar. Kireç, zeminta flokülasyon oluşmasına neden olur; kalsiyum ve magnezyum iyonları, zemin partiküllerinin birleşmesine ve su emilen tabakaların oluşmasına yol açar. Bu süreç, toprağın yapısının değişmesine ve boşlukların artmasına sebep olur, bu da toprağın geçirgenliğini artırır. Toprağın geçirgenliği, yeraltı suyu akışı ve sızıntı sorunları açısından büyük önem taşır. Ancak, kimyasal stabilizasyonun geçirgenlik üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmada, kireç ve perlit kullanılarak yapılan kimyasal stabilizasyonun, yüksek plastisiteli killi zeminlerin geçirgenliği üzerindeki etkileri araştırmışlardır.

Arefin vd. (2021), yaptıkları çalışmada stabilizatör olarak sıvı bir iyon kullanmışlardır. İki ayrı bölgeden aldıkları zemin üzerinde değerlendirme testleri yapmışlardır. Laboratuvar testleri ve analizler sonucunda iki farklı bölgeden alınan zemin örneklerinde kullanılan sıvı iyon maddesi zeminlerin şişmesinde kalıcı bir azalma olduğu sonucuna ulaştırmıştır.

Kumar vd. (2021): Jeopolimer stabilizasyonunun çevresel ve mekanik avantajlar sunduğunu belirlemişlerdir. Alkali aktivasyon süreciyle elde edilen jeopolimerlerin, çimentoya kıyasla daha düşük karbon salınımı sağladığı ve benzer dayanım değerleri sunduğu gösterilmiştir. Bu çalışma, jeopolimerlerin zemin stabilizasyonu için gelecekteki potansiyelini gözler önüne sermektedir.

Nalbantoğlu ve Karasahin (2021), kireç ve uçucu kül katkılı stabilize edilmiş killerin ıslatma testine tabi tutulduğunda %15 ila %30 arasında dayanım kaybına uğradığını belirlemiştir. Bu çalışmada, zemin stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılan bağlayıcı

malzemelerin suya maruz kaldığında gösterdiği dayanıklılık değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma, kireç ve uçucu kül gibi geleneksel katkı malzemelerinin suya karşı belirli ölçüde dayanım sağladığını, ancak uzun süreli suya maruziyetin dayanım kaybına neden olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle zemin mühendisliği uygulamalarında uzun ömürlü ve suya dayanıklı stabilizasyon tekniklerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Phanija ve Havali (2021), yaptıkları çalışmada fosfojips bazlı stabilizasyon uygulamasının bakırla kirlenmiş zemini iyileştirmede kullanımını araştırmışlardır. Çalışmalarında iki bakır oranını esas almışlardır. Fosfojips ile kirlenmiş ve kirlenmemiş zeminlerden oluşturulan karışımlarını sistematik birçok test programına tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak fosfojips içeriği düşük olan kirlenmemiş zeminde 3, 7, 14, 28 günlük kür sürelerinde mukavemette artış gözlemlenmiştir.

Rajak vd. (2021): Endüstriyel yan ürünlerin kullanımının, doğal kaynak tüketimini azaltarak maliyetleri düşürebileceği ifade edilmiştir. Endüstriyel yan ürünlerin, zemin stabilizasyonunda kullanılması, aynı zamanda ekonomik faydalar da sağlamakta ve sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamaktadır.

Zhang vd. (2021): Biyokömürün, düşük oksijenli ortamlarda biyokütlenin yakılmasıyla elde edilen karbon bakımından zengin bir malzeme olduğunu ve zemin stabilizasyonunda kullanıldığında zemin mukavemetini artırırken karbon emisyonlarını azalttığını incelemişlerdir. Biyokömür, karbon negatif özellikleri sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

Ali vd. (2022): Yüksek fırın cürufunun, çelik üretimi sırasında açığa çıkan bir yan ürün olarak, çimento yerine kullanılmasının çevresel etkilerini incelemişlerdir. Yüksek fırın cürufunun, çimento yerine kullanılması ile CO₂ salınımının azaldığı ve çevreye olan zararlarının önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, endüstriyel yan ürünlerin kullanımının büyük çevresel faydalar sağladığı ifade edilmiştir.

Kadekeshova (2022), yaptığı çalışmada statik yükler altında kuru zemindeki palplanş temelin fiziksel modelini yeniden oluşturmak için ayırık elemanlar yöntemi (DEM) sayısal yönteminin kullanılıp kullanılamayacağını ayrıntılı bir analizin sonuçlarını sunmuştur. Kum ve kauçuk parçacıkları gibi granüler malzemelerin mikromekanik parametrelerini kalibre etmek için, temiz kum ve %10 granüler kauçukla karıştırılmış kum üzerinde doğrudan kesme testlerinin sayısal modelleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada iki ölçüm yöntemi dikkate alınırken

bir yandan palplanş duvardan yapılmış bir ölçüm parçacığını kullanmış, diğer yandan palplanş duvar temelini arkasına bir ölçüm dairesi yerleştirmiştir. Sayısal sonuçların fiziksel modelle nispeten iyi bir uyum gösterdiği sonucuna varmıştır.

Moghaddam vd. (2022), nano-silika ve polimer katkılarının ıslatma testi sonrası şişme potansiyelini ve dayanım kaybını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Araştırma, nano katkıların zeminin suya karşı direncini artırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Nano-silika, mikro yapıyı iyileştirerek bağlayıcı malzemenin su ile etkileşimini optimize etmekte ve su emilimini azaltmaktadır. Polimer katkıları ise, malzeme içinde hidrofobik (su itici) bir yapı oluşturarak suyun malzeme içine nüfuz etmesini engellemekte ve zemin stabilizasyonunu artırmaktadır. Bu çalışma, geleneksel stabilizasyon yöntemlerine alternatif olarak nano katkıların etkinliğini ve gelecekteki kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

Wang ve Chen (2022), çelik elyaf katkılı betonların ıslatma testi sonrası dayanım kaybının, geleneksel betona kıyasla %10 daha az olduğunu ifade etmiştir. Çalışmada, çelik elyaf katkısının beton içerisindeki mikro çatlakların ilerlemesini engellediği, suyun iç yapıya nüfuz etmesini azalttığı ve böylece mekanik özelliklerin daha uzun süre korunmasını sağladığı belirtilmiştir. Bu durum, özellikle deniz yapıları, barajlar ve suya maruz kalan diğer betonarme sistemlerde çelik elyaf katkılarının kullanılmasını öneren çalışmaları desteklemektedir.

Babatunde ve Byun (2023), yaptıkları çalışmada yeni bir zein biyopolimer bağlayıcının kumlu zemin üzerindeki sementasyon etkisini araştırmaktadırlar. Zemin numuneleri %0-5 arasında değişen çeşitli zein biyopolimer içerikleriyle karıştırıp elde ettikleri numunelerin mekanik ve mikroskobik özellikleri, sırasıyla 3, 7 ve 28 günlük kürlenme sürelerinden sonra serbest sıkıştırma testleri ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, kürlenmiş zemin numunelerinin basınç dayanımının ve elastik modülünün kürlenme süresinin artmasıyla ve biyopolimer içeriğinin artmasıyla doğru orantılı bir şekilde arttığını göstermiştir. Küçük miktarlarda (%1) zein biyopolimeri, derecesine bakılmaksızın toprağın gücünün ve esnekliğinin arttığı sonucuna varmışlardır. Buradan yola çıkarak zein biyopolimerlerinin stabilizasyon ve sürdürülebilirlik özellikleri dikkate alındığında geoteknik mühendisliğinde ince ve iri daneli zeminlerde bağlayıcı olarak kullanılmasının doğru olacağı kanısına varmışlardır.

Crespo-Lopez vd. (2023), yaptıkları çalışmada el yapımı tuğlaların özelliklerine kil karışımına kırılmış ev tipi cam eklenmesinin etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında cam katkılı ve cam katkısız iki farklı kil (killerden biri karbonat açısından zengin bir diğeri ise silikatlar açısından zengin ve karbonat içermeyen kil) karışımla yaptıkları

katı tuğlalara Tahribatsız Teknikler (NDT) kullanmışlardır. Bir diğer hedef olarak da kalsine edilmiş killerden yapılan tuğlaların estetik ve fiziksel-mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak cam eklenen tuğlaların vitrifikasyonu ve basınç dayanımında artma, renk değişimi, karbonatlar açısından zengin olan killerin silikatlar açısından zengin olan killerden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Çınar (2023), yaptığı çalışmada sıvılaşma riskinin yüksek olduğu farklı zemin türlerinde (kum, çakıl ve alüvyon zemin) farklı enjeksiyon basınçlarında (400, 450 ve 500 bar) ve su/çimento oranları (1,25-1,00-0,75) olan farklı yoğunluklu kolonlar üretmiştir. Çimentolu jetgrout kolonları 28 gün kürledikten sonra zemintan çıkarıp çap ölçümlerini yapmış ve basınç ve su/çimento oranlarında önemli farklılıklar gözlemlemiştir. Çalışması sonucunda bu oranların sahada gerçek ölçekte ve uygulanan üç farklı zemin koşulunda da tekrarını yapmış olup uygulanabilir olduğu sonucuna varmıştır.

Kim vd. (2023), yaptıkları çalışmada palplanş duvarların dinamik davranışının sayısal analizini yapmışlardır. Plaxis 2D programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemine bağlı olarak bir sayısal model gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında eğilme momenti, dolguda aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu ve palplanşın yer değiştirmesi gibi CDM kullanarak iyileştirdikleri rıhtım duvarının tipik parametrelerine odaklanmışlardır. CDM kullanarak yapılan zemin iyileştirmenin, palplanş duvarın yer değiştirmesini ve bükülme momentin büyük ölçüde azalttığı sonucuna varmışlardır.

Komnitsas vd. (2023), Yaptıkları çalışmada marnlı zeminlerin stabilizasyonunda alkali aktivasyonu esnasında ilk kullanılacak madde olarak cüruf ve metakaolin kullanımının etkisini araştırmayı hedeflemişlerdir. Çalışma kapsamında üretilen alkali ile aktifleşen malzemelerin basınç dayanımını (0-24 saat) ve kürlenme sürelerini (7-28 gün) araştırmışlardır. XRD, FTIR ve SEM analizlerini yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda cüruf veya metakaolinin öncül olarak kullanılmasıyla zemin stabilizasyonunun desteklendiği ve hatta daha yüksek kürlenme süresi ve sıcaklığında basınç dayanımına olan etkinin daha da çok arttığı sonucuna varmışlardır.

Kumar ve Verma (2023), geri dönüştürülmüş asfalt malzemelerinin ıslatma testine karşı gösterdiği dayanıklılığı incelemiş ve polimer modifikasyonlarının su emme oranını %20'ye kadar azalttığını tespit etmiştir. Geri dönüştürülmüş asfalt malzemeleri, çevresel sürdürülebilirliği artıran ve ekonomik açıdan avantajlı bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Çalışma, polimer katkılı asfalt karışımlarının su ile temas ettiğinde daha düşük emilim oranına sahip olduğunu ve bunun sonucunda asfaltın mekanik dayanımının daha uzun süre korunabildiğini göstermektedir. Bu bulgular, özellikle yağışlı iklim koşullarında

yolların uzun ömürlü olması için polimer modifikasyonlarının önemli bir çözüm sunduğunu vurgulamaktadır.

Robert vd. (2023), yaptıkları çalışmada laboratuvar kontrollü deneyler ve saha performans testleri yaparak yeni bir zemin stabilizasyon tekniğinin gerçek hayatta kullanımını doğrulamayı hedeflemişlerdir. Sürdürülebilir bir çözüm olarak enzim bazlı zemin stabilizasyonu ve sıradan portland çimentosu kullanılarak yerinde kil toprağı stabilize etmişlerdir. Bir laboratuvar ortamında doğal zemin stabilitesini kopyalamak için aynı karışım oranları (ilave katkı maddeleri) kullanılarak sahada zemin stabilizasyonunun etkinliği ve mekanizmasının değerlendirilmesi amacıyla bir çalışma yürütmüşlerdir. Stabilize zeminin mekanik davranışını belirlemek için Kaliforniya taşıma gücü testini ve serbest basınç dayanımı testini kullanmışlardır. Ayrıca, mikro gözeneklilik testi yoluyla katkı maddelerinin zeminin kimyasal bileşiminde neden olduğu değişiklikleri değerlendirmek için X-ışını kırınım testi ve x-Ray mikro CT tomografisi kullanarak 2 boyutlu görüntülerden 3 boyutlu profiller elde etmişlerdir.

Sendilvadivelu vd. (2023), yaptıkları çalışmada ağırlıkça %4,5 kirece ek olarak ağırlıkça %0-25 aralığında biyo-stabilize edilmiş atık kül ikili katkı maddesi olarak eklemişlerdir. Kilin basınç dayanımını arttırmak ve özelliklerini incelemek için 0, 7, 14, 28 günlük kür sürelerine tabi tutmuşlardır. Deneysel çalışmalarına ek olarak SEM , FTIR,XRD analizleri yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda optimum biyo-stabilize edilmiş atık kil ve kireç oranlarını 28 günlük kürleme sonunda işleme tabi tutulmayan ana zemintan dört kat daha iyi dayanım sunduğu sonucuna varmışlar ve biyo-stabilize edilmiş atık kil ile değiştirilmiş kilin minerolojik bileşiminde ve mikro yapısında gözle görülür farklılıklar olduğu sonucuna varmışlardır.

Shanmugam vd. (2023), yaptıkları çalışmada taş kolon yerleştirme esnasında zemin tepkisi boşluk suyu basıncı, özkütle ve ivme tepkisi bakımından incelemişlerdir. Deney aşamasında 900mm derinliğe sahip sıvılaşabilir bir yatak zemin kullanmışlardır. Gözlemleri sonucunda yer seçiminin, doymuş zemin deformitesi ve drenaj koşulları üzerinde etkisini fark etmişlerdir. İlk taş kolonun yerleştirilmesinden sonra boşluk suyu basıncı tepkisinin oluşumunda %30-60 oranında azalma gözlemlemişlerdir.

Vieira vd. (2023), yaptıkları çalışmada tek biçimli kuvarsitik kumun geliştirilmesinde yan ürün olarak polyester kullanmışlardır. Yaptıkları kum-çimento-polimer karışımları üzerinde birçok mekanik test gerçekleştirmişlerdir. Genel bir bakış olarak polimer ilavesi, özellikle de hidrolik iletkenliğin azalmasıyla birlikte malzeme geri dönütünde önemli ölçüde

artış gözlemlemişlerdir. Buradan yola çıkarak polimerin jeoteknik ve jeoçevresel uygulamalar için kullanıma elverişli olduğunu belirlemişlerdir.

Watanabe vd. (2023), yaptıkları çalışmada bir kafes duvarla çokça 1 gramlık saha sarma masası testleri gerçekleştirmiş ve kafes duvarın içindeki sıvılaşabilir zemin gerilim-gerinim ilişkisinin sayısal ölçümünü kullanarak bu kafes duvara etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında kayma birim deformasyonunun nadiren engellenmesiyle sıvılaşmanın başlamasının gecikmesini ve sıvılaşma başladıktan sonra bile bu zeminin kayma rijitliğini tekrar kazandırılmasını hedeflemişlerdir. Yaptıkları deneyler kafes duvarların sıvılaşmaya karşı son derece etkili bir önlem yöntemi olarak uygulanabilirliği sonucuna varmışlardır.

Yeşilyurt (2023), yaptığı çalışmada Türkiye'deki farklı çimento fabrikalarından gelen sekiz tip kil örneklerini, 600 °C ve 800 °C'de kalsine etmiş ve çeşitli fiziksel, termal ve mineralojik deneylerle karakterize etmiştir. Tüm karışımların basınç ve eğilme dayanımları ile kuvvet aktivite indeksi (DAI) erken, standart ve geç yaşlar için test etmiştir. Kil bileşimindeki kalsitin mukavemetin arttırılmasında önemli bir rol oynadığı sonucuna varmıştır. 600 °C'de kalsine ettiği üç kil örneği ve 800 °C'de kalsine ettiği beş kil örneği, ASTM C-618 standardında belirtilen %75 DAI gereksinimini karşılayabilmiştir. Bu killerin tamamı bileşimlerinde %10'dan fazla kalsit içeren yeni bir tip malzeme çeşidine ulaşmıştır.

Yılmaz ve Özkan (2023), biyopolimer katkılı zemin stabilizasyonunun suya dayanıklılığı artırdığını ve çevresel etkileri azalttığını göstermiştir. Biyopolimer katkıları, çevre dostu ve sürdürülebilir malzeme alternatifleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Çalışma, biyopolimer katkılı zeminlerin su emme kapasitesinin düştüğünü ve malzemenin uzun vadeli stabilitesinin arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, biyopolimerlerin geleneksel çimento ve kireç stabilizasyonuna kıyasla karbon salınımını önemli ölçüde azalttığı vurgulanmıştır.

Yuan vd. (2023), yaptıkları çalışmada magnezyum/kalsiyum (Mg/Ca) oranını farklı oranlarda olan kum örnekleri ile kullanmışlardır. Çalışmalarına ek olarak SEM , Ödometre Testleri, Döngüsel Üç Eksenli Testler, Basınç Dayanım Testleri ve XRD testlerini kullanmışlardır. Sonuç olarak magnezyum konsantrasyonunun düşük olduğu, Mg/Ca oranı arttıkça kumun sıkışabilirliğinin azaldığı, basınç dayanımının arttığı ve sıvılaşmanın önlenme performansının arttığı sonucuna varmışlardır.

Barbhuiya vd. (2024), yaptıkları çalışmada betonda termal enerji depolamanın (TES) ilerlemeleri ve uygulamaları üzerine çalışmışlar bununla birlikte betonu termal enerji aracı olarak kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda betonda termal enerji depolamanın önemi

üzerinde durularak sürdürülebilir uygulamaların desteklenmesinde ve verimli enerji yönetimindeki önemini vurgulamışlardır.

Baldovino vd. (2024), yaptıkları çalışmada 15-500 gün arasında değişen farklı kürleme süreleri ve sıcaklıklarının irdelenmesinin yanında değişen sıkıştırma enerjileri ve ağırlıkça %3 ve %9 arasındaki farklı kireç oranları kullanarak değişen direnç gelişimini incelemeyi hedeflemişlerdir. Hazırladıkları karışımların direnç gelişimini ve analizini saptamak için yarı ampirik gözeneklilik/kireç indeksi kullanmışlardır. Çalışmalarında kireç kullanımının azaltılması ve kürleme süresinin optimize edilmesinde katkıda bulunmaya çalışmışlardır.

Bekir (2024), yaptığı çalışmada tuzlu su varlığında derin zemin karıştırmada kireç ve çimento kullanımında yumuşak killi zeminin geçirgenlik, elastisite modülü, boşluk oranı, tane boyutu dağılımı, plastisite ve mineral ve kimyasal özellikleri parametrelerine etkisi üzerinde durmuştur. Deneylerinde killi zemini farklı kireç/çimento oranlarıyla karıştırarak test numuneleri elde etmiş ve 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerine tabi tutmuştur. Tek eksenli ve üç eksenli basınç testleri yaparak hazırladığı numuneleri basınç dayanımlarını ölçmüştür.

Chaudhary vd. (2024), Hindistan ve Güneydoğu Asya'daki yollar için yapılan ıslatma testlerinde, yüksek bağlayıcı içeriğine sahip stabilize alt temel tabakalarının suya karşı daha dirençli olduğunu tespit etmiştir. Araştırma, bağlayıcı içeriğinin artırılmasının, su emme kapasitesini düşürdüğünü ve alt temel tabakalarının uzun süreli dayanımını artırdığını göstermektedir. Özellikle, yoğun yağış alan bölgelerde kullanılan yol altyapılarında bağlayıcı içeriğinin optimize edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

García vd. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülmüş agrega ve nano-silika katkılı betonun mekanik özellikleri RSM kullanılarak modellenmiş ve optimizasyon yapılmıştır. Çalışma, sürdürülebilir malzemelerin beton karışımlarında kullanımının, mekanik performansı iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Guovd. (2024), yaptıkları çalışmada gevşek kumlu zeminlerin hidrolik iletkenliğini ve gözenekliliği azaltmak ve bu gevşek kumlu zeminlerin hidrolik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirme çalışmasında MICP işlemini kullanmışlardır. Bunun yanı sıra sıvı geçirgenlik testleri, gözeneklilik değerlendirme testleri, yoğurma ve ıslatma direnci testleri gibi laboratuvar testleri kullanmışlardır. Bu çalışma ve testlerden aldıkları sonuçlardan yola çıkarak MICP ile çalışılmış kumun yapı bütünlüğündeki sementasyon çözeltisi konsantrasyonunda hızlı azalma sonucunda sağlam, gevşek ve süreksiz bloklar halinde kategorize etmişlerdir. Hidrolik iletkenlikte ve gözeneklilikte azalmalar olduğu sonucuna varmışlardır.

Jangde vd. (2024), yaptıkları çalışmada zemin iyileştirmede kullanılacak kimyasalların seçimi için önemli olan üç ana faktörü vurgulamışlardır. Bunlar; uygulama yapılacak alanın zemin özellikleri, eklenecek dış maddenin zemindeki davranışı ve sıcaklık ve sıkışma gibi parametrelerdir. Bu kapsamda deniz tarama zemini için kırmızı zemin, kireç, alçıtaşı ve uçucu kül, allofanik zeminin uzun süreli stabilizasyonu için kireç ve uçucu kül karışımı ve enzim gibi çeşitli yeni kimyasal bağlayıcıların seçimini kolaylaştırmaya çalışmışlardır. Ayrıca kalsiyum-bentonit ve pulp uçucu külünün eklenmesinin allofanik zeminin sıkışabilirliğin arttırdığı sonucuna varmış ve bunun sonucunda ise allofanik zemin %3 uçucu kül ve %3 kireç karışımının kullanılmasıyla stabilizasyonun sağlandığı kanısına varmışlardır.

Kumar ve Singh (2024), kil zeminlerde kireç stabilizasyonunun optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, RSM ile zemin mukavemetindeki değişimleri modellemiş ve optimum stabilizasyon yüzdesini belirlemiştir. Çalışmanın sonuçları, zemin stabilizasyon süreçlerinin daha az maliyetle ve daha kısa sürede optimize edilebileceğini göstermektedir.

Lee vd. (2024) tarafından yürütülen bir çalışmada, çok katlı çelik binaların sismik performansı RSM kullanılarak modellenmiş ve optimum rijitlik seviyeleri belirlenmiştir. Çalışma, depreme dayanıklı yapı tasarımında RSM'nin mühendisler için güçlü bir analiz aracı olduğunu ortaya koymuştur.

Li vd. (2024), yaptıkları çalışmada deniz toprağının stabilize edilmesinde aktifleştirilmiş kömür gangi (CG) ve sanayi atıklarından üretilen bir kalsiyum karbür kalıntısı (CCR) kullanılabilirliğini araştırmış ve bu konu üzerinde çoklu ıslanma-kuruma döngüleri altında ürettikleri toprağın dayanıklılık performansını, mekanik özelliklerini ve stabilizasyon mekanizmalarını araştırmak için farklı deneyler kullanmışlardır. Bu deneyler ve araştırmaları sonucunda CG-CCR geopolimerinin zemin iyileştirilmesinde ve endüstride zemin stabilizatörü olarak atıkların minimum seviyeye indirilmesinde çözüm olarak sunulabileceği kanısına varmışlardır.

Rodriguez vd. (2024), düşük karbonlu çimento alternatiflerinin ıslatma testi sonrası performansını incelemiş ve belirli oranlarda kireç ilavesinin dayanımı artırabileceğini belirtmiştir. Düşük karbonlu çimento, karbon ayak izini azaltma hedefleri doğrultusunda geliştirilen yeni nesil bağlayıcı malzemelerden biridir. Araştırma, belirli oranlarda kireç ilavesinin düşük karbonlu çimentonun suya dayanıklılığını artırabileceğini ve uzun vadede mekanik performansı olumlu yönde etkileyebileceğini göstermiştir.

Ouyang vd. (2024), yaptıkları çalışmada kısmen jeotekstil kaplı bireysel taş kolonlar (pESC), bireysel taş kolonlar (SC) ve siltli kilde pESC'ler ve SC'ler ile güçlendirilmiş saha dolgusu üzerinde çeşitli saha yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneylerden aldıkları sonuçlara göre pESC'lerin SC'lere göre daha iyi taşıma kapasitesi ve daha az oturma performansı sergilediği sonucuna varmışlardır. Buna ek olarak bireysel pESC'ler, pESC gruplarına oranla çok daha fazla stres konsantrasyonuna ulaştığı sonucunu elde etmişlerdir.

Saha vd. (2024), yaptıkları çalışmada yeniden kalıplanan yol zeminin dokusunun killi zeminlerin deformasyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda hem doğal hem de yeniden kalıplanmış zemin numuneleriyle doğrusal uzayabilirlik katsayısı testleri yapmışlardır. Sonuç olarak yeniden kalıplanmış yol zemininin özellikle yüksek plastisiteli killi zeminlerde potansiyel dikey hareketi değerini önemli ölçüde arttırdığına ulaşmışlardır.

Stefanini vd (2024), yaptıkları çalışmada alkali ile aktive edilen çimentolarda (AAC) kaolinit ekstraksiyon sahasındaki beş farklı konumdan alınan kalsine atık kil örneğini kullanmışlardır. Kalsine atık kil öncülerini öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) ile harmanlayıp sodyum silikat ile aktive etmişlerdir. Ek olarak dikkate aldıkları bir diğer faktör ise ilk kalsinasyonda ve karışım esnasında kil parçacık boyutu dağılımı ve morfolojisinin karıştırılmış karışımların, hem taze özelliklerine hem de işlenebilirliğine etkisi olmuştur. Çalışmaları sonucunda alkali ile aktive edilen sistemlerde kalsine atık killerin davranışını karakterize etmek için bir metodoloji ve atık kil içeren yeni bağlayıcıların formülasyonunda bir kavram kanıtı sunmaktadır.

Takahaşi vd. (2024), yaptıkları çalışmada serbest basınç deneyi yaparak atık alçıpan kâğıdının zeminin mukavemet özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda atık alçıpan kâğıdının kullanılabilirliğinin olduğu fakat fiber-çimentoyla stabilize edilmiş zeminle aynı kopma mukavemetine ulaşmak için çok daha fazla oranda atık alçıpan kâğıdı eklenmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Trivan Pelissaro vd. (2024), yaptıkları çalışmada yol temel katmanlarının yapımı için doğal agrega kullanmak yerine kaplamaların frezelenmesiyle oluşturulan geri dönüştürülmüş asfalt kaplama kullanmışlardır. Çalışma kapsamında pirinç kabuğu külü, alkaliyle aktive edilen bağlayıcı oluşumu için silika kaynağı olarak alkali bir ortamda aktif hale getirilmiştir. Oluşturdukları karışımları nem ve sıcaklıktaki mevsimsel değişikliklere maruz bırakarak, ıslak-kuru döngülerdeki dayanıklılık testleri ve döngülere ek olarak basınç dayanımı testi yapmışlardır. Çalışmalarından aldıkları sonuçlara göre hazırladıkları karışımın saha koşullarından daha sağlıklı sonuçlar verip daha iyi performans verdiği sonucuna varmışlardır.

Vinothkumar ve Başarkar (2024), yaptıkları çalışmada kontrollü modüllü kolon ve kısmi sert zemin takviye kolonları kullanarak toplam ve farklı oturmaları azalmayı amaçlayan ve üzerine yapılacak yapıların tüm yükünü doğrudan taşıyacak bir kazık kurulması veya basınç tabakasını direkt atlanmasını hedeflemişlerdir. Çalışmada üzerine yapı kurulacak zemini stabilize etmek için izin verilen oturma sınırını aşmadan pozitif sürtünme ve uçma direnci ile dengelemişlerdir.

Wang vd. (2024) tarafından yürütülen bir çalışmada, beton basınç dayanımını tahmin etmek için RSM, destek vektör makineleri (SVM) ve derin öğrenme modelleriyle birleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, RSM ve yapay zeka tabanlı modellerin entegrasyonunun tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Yabaneri (2024), organik yataklar, büyük şekil değişiklikleri olan zayıf zeminlerdir, bu nedenle temel yataklar olarak kullanılmak üzere zayıf yatakların geliştirilmesi gerekir. Basit malzeme arzı, alandaki basit uygulamalar ve ekonomik yöntemleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Bu çalışmanın bir parçası olarak, ağırlığa organik zeminlere katkı maddeleri ilave etmiştir. Freder ash ve granüller yüksek fırın sümüklü böcek için %6, çimento için % 2, çinko sümüklü böcek için % 4 ve % 6 olarak bulmuştur. Çinko cürufunun karışım üzerindeki etkisini araştırmak için, bir karışım deneyi de yapmıştır ve aynı mobilyalardan başka bir cüruf ile yapmıştır. İlk test grubu kömür ile cüruf toplamış ve ikinci test grubu yeni cüruf kullanmıştır. Karışık örneklerin onurlu deneyleri, 1 ve 28 günlük tedavi (yaş ve kuruluk), California taşıma deneyleri, 1 ve 28 günlük iyileştirme basınç gücü deneyleri ve hidrolik iletkenlik testleri yapılmıştır. Ayrıca, artan numune yoğunluğu geçirgenliğin azalmasına neden olmuştur. SEM sonuçları stabilize organik zeminlerin heterojen organik zeminlerden fiziksel olarak daha sert ve daha kompakt olduğunu gösterirken, EDX sonuçları daha yüksek karbon ve daha yüksek kalsiyum oksit içeriğinin gösterdiğini bulmuştur. Laboratuvar sonuçları, kısa süreli kül, çinko cürufu, granula yüksek fırın cürufu ve çimento tüketiminin organik zeminlerin teknik özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir. Bu çalışma, bu malzemeleri sürdürülebilirlik ve atık değerlendirme için kullanmanın düşük maliyetli ve çevre dostu için zemin stabilizasyonuna katkıda bulunduğunu bulmuştur.

Zhang vd. (2024), yüksek performanslı beton (UHPC) karışımlarının optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, çimento, su, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı oranlarının en uygun seviyelerini belirlemek için RSM kullanmıştır. Çalışmanın sonuçları, malzeme maliyetlerinin düşürülebileceğini ve çevresel etkinin azaltılabileceğini göstermiştir.

Ahmed vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, şev stabilitesi analizlerinde RSM ve makine öğrenmesi teknikleri birleştirilmiş ve güvenlik katsayısının daha doğru tahmin edilebileceği belirlenmiştir. Bu alışma, RSM'nin jeoteknik analizlerde makine öğrenmesiyle entegre edilerek daha hassas sonuçlar verebileceğini ortaya koymaktadır.

Patel ve Rao (2025), iklim değişikliğinin yapı malzemeleri üzerindeki etkilerini modellemek için RSM ve genetik algoritmaların birleştirildiği bir çalışma yrtmştir. Bu alışmalar, değişen çevresel koşullar altında yapı malzemelerinin performans tahmininde RSM'nin etkin bir analiz yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Patel ve Singh (2025), yüksek fırın cürufu içeren betonların suya karşı dayanıklılığının artırılabilenecėini, ancak erken yaşlardaki dayanımın dikkatle izlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Yüksek fırın cürufu, betonun çevresel sürdürülebilirliğini artıran ve karbon ayak izini azaltan bir alternatif bağlayıcı malzeme olarak değerlendirilmektedir. Ancak çalışmada, erken yaşlarda su ile etkileşime giren betonun mekanik özelliklerinde belirli bir düşüş yaşandığı, ancak uzun vadede dayanımın stabilize olduğu ortaya konulmuştur. Bu nedenle, yüksek fırın cürufu içeren betonların, özellikle su ile teması yoğun olan yapı projelerinde, başlangıç aşamalarında dikkatle izlenmesi gerektiği önerilmektedir.

İKİNCİ BÖLÜM

2. MATERYAL VE METOT

‘Uçucu Kül Bağlayıcılı Alkali Aktivasyonlu Yüksek Plastisiteli Kil Derin Karıştırma Numunelerinin Tek ve Çok Amaçlı Optimizasyonunun Dayanım ve Durabilite Açısından İncelenmesi’ adlı tez çalışmamızda uçucu kül, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) katkıları kullanılarak hazırlanan zemin numuneleri 28 günlük kürlemeye tabi tutulmuştur. Yüksek plastisiteli killi zemine katkı malzemeleri farklı oranlarda eklenmiştir. Optimum oranlar bulunup optimizasyon için deneyler tekrarlanmıştır. Bulunan optimum değerler ile yapılan deney numunelerinin birçok deney çeşidi ile kıyaslanıp eklenen katkı malzemelerinin saf zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

2.1. MALZEMELER

Çalışmada kullanılan doğal kil malzeme Bayburt ilinden alınan yerel bir kil malzemedir. Laboratuvarında çalışmalarının tamamında kullanılan doğal kil zemin Los Angeles Aşındırma cihazında öğütülüp elek analiziyle elenerek kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül F sınıfı uçucu kül olup Sivas Kangal Termik Santralinden elde edilmiş hiçbir işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Hazırlanan zemin harcına farklı oranlarda Na_2SiO_3 ve NaOH kimyasal aktivatörleri eklenmiştir. Farklı oranlarda aktivatör kullanılarak 4 farklı optimizasyon açısından aktivatörlerin etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan optimizasyon oranları Tablo 4’te açıklanmıştır.

Tablo 4: Tez Çalışmasında Kullanılan Optimizasyonlar

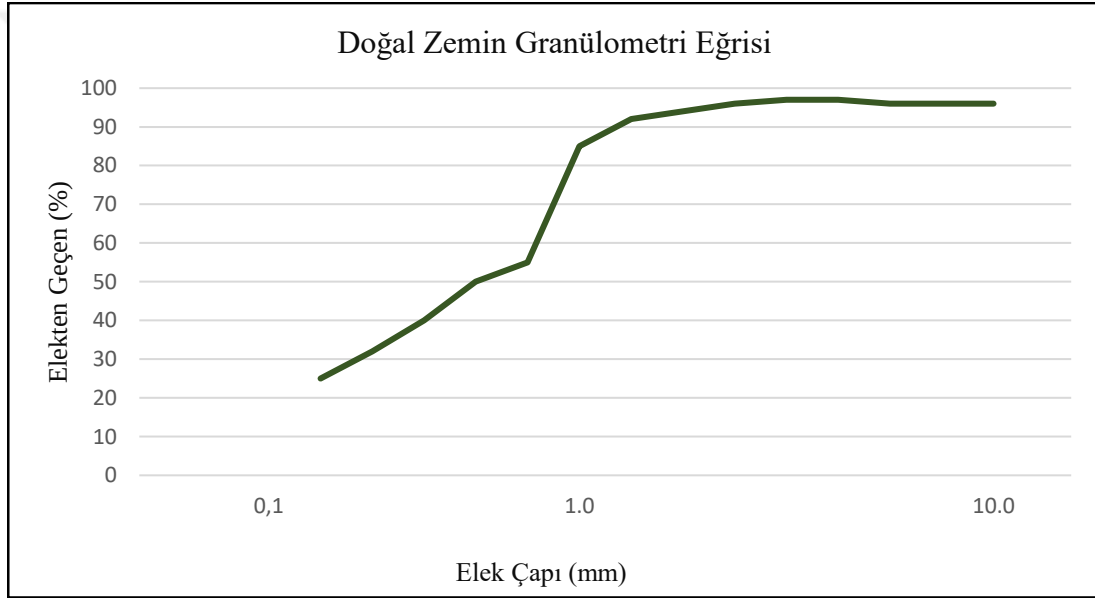
Karışım İsimleri	Deney İçerikleri
Zemin	Zemin + %23 su
1.Optimizasyon	UK/Z =0,200 A/(UK+Z)=0,350 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=1,00$
2.Optimizasyon	UK/Z =0,200 A/(UK+Z)=0,150 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=0,006$
3.Optimizasyon	UK/Z =0,200 A/(UK+Z)=0,150 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=1,00$
4.Optimizasyon	UK/Z =0,200 A/(UK+Z)=0,2447 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=0,8947$

2.1.1 Kil Malzeme

Zemin sınıflandırması, zemin malzemelerinin plastik özelliklerini anlamaya yönelik önemli bir yöntemdir. Doğal zeminler, farklı boyut ve şekillerde parçacıklardan oluştuğundan,

bu malzemeleri tane büyüklüğüne göre gruplandırmak yaygın bir uygulamadır. Bu çalışmada, ASTM D422-63 standardına (ASTM, 2007) uygun olarak elek analizi yöntemiyle tane boyut dağılımı belirlenmiştir. Elek analizi, numunedeki parçacıkların belirli açıklıklardan geçişine göre boyutlarına ayrılmasını sağlar. Farklı boyutlardaki tanelerden oluşan zemin veya öğütülmüş malzemelerin tane boyutu dağılımını belirlemek için eleme yöntemi kullanılır. Bu analiz, malzemenin içindeki partiküllerin boyutlarını ve dağılım oranlarını ortaya koyar. Bir malzemenin tane boyutu dağılımını bilmek, mühendislik ve yapı projelerinde büyük avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, analizler için Bayburt ilinden alınan yerel bir zemin numunesi kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, bu zemin numunesi Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (UCSC) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 8: Doğal Zemin Granülometri Eğrisi

Tablo 5: Doğal Zemine Ait Mühendislik Parametreleri

Parametre	Değer
Likit limit (%)	%60,81
Plastisite indisi	%30
Maksimum kuru birim hacim ağırlık	16,30 kN/m ³
Optimum su muhtevası (%)	%22,75
Özgül ağırlık	%2,75
Zemin sınıfı (USCS)	CH

Mühendislik uygulamaları açısından önemi

- ✓ Zemin Dolguları ve Yol İnşaatı: Optimum su muhtevasında yapılan sıkıştırma, dolguların daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlar. Uygun olmayan su içeriği, zeminin diferansiyel oturmalara maruz kalmasına ve dayanım kaybına neden olabilir.
- ✓ Baraj ve Set Yapıları: Kil çekirdekli barajlar gibi suya duyarlı yapılar için optimum sıkışma, sızdırmazlık ve stabilite açısından kritik öneme sahiptir.
- ✓ Temel Mühendisliği: Zemin taşıma gücünü artırmak ve uzun vadeli oturmaları minimize etmek için, zemin dolgularının optimum nem içeriğinde sıkıştırılması gerekir.

Zeminlerin optimum sıkışmasını sağlamak için su içeriği titizlikle kontrol edilmelidir. Laboratuvar testleriyle belirlenen optimum su muhtevasına yakın değerlerde sıkıştırma yapılması, dolguların ve yapı temellerinin daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır. Fazla veya yetersiz su içeriği, gevşek zemin yapısı, düşük dayanım ve oturma sorunları gibi mühendislik risklerine yol açabilir. Bu nedenle, saha uygulamalarında optimum sıkışma parametrelerine uygun hareket edilmelidir. Bu yüzden, özellikle zemin dolgularında ve geoteknik mühendislik projelerinde optimum su muhtevasının belirlenmesi ve uygulanması, uzun vadeli dayanıklılığı ve güvenliği sağlamak açısından kritik bir tasarım parametresidir.

2.1.2. Uçucu Kül

Zemin stabilizasyonu, inşaat mühendisliğinde taşıma gücü yetersiz veya oturmaya duyarlı zeminlerin iyileştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu süreçte, çeşitli kimyasal ve mineral katkı malzemeleri kullanılarak zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirilir. F sınıfı uçucu kül (class F fly ash), özellikle düşük plastisiteli killeri, siltli zeminler ve granüler malzemeler üzerinde etkinliği kanıtlanmış bir bağlayıcıdır.

F sınıfı uçucu kül, termik santrallerde bitümlü (taşkömürü ve linyit) kömürlerin yanmasıyla oluşan ince taneli bir yan ürün olup, yüksek oranda silis (SiO_2) ve alümin (Al_2O_3) içermesiyle bilinir. ASTM C618 standardına göre, F sınıfı uçucu kül ve kil zeminin ana kimyasal bileşimi Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6: Uçucu Kül ve Kil Zeminin Ana Kimyasal Bileşimi

Bileşen	Uçucu Kül (%)	Kil Zemin (%)
Silisyum Dioksit (SiO ₂)	42,52	58,55
Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	11,75	11,62
Demir Oksit (Fe ₂ O ₃)	11,49	3,90
Kalsiyum Oksit (CaO)	15,55	9,54
Magnezyum Oksit (MgO)	3,15	2,32
Kükürt Trioksit (SO ₃)	2,15	0,06
Kül Kaybı (LOI)	2,70	11,82

F sınıfı uçucu kül, doğrudan veya çimento, kireç gibi stabilizatörlerle birlikte kullanılarak zeminlerin dayanım, geçirimsizlik ve hacim değişimi gibi mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır.

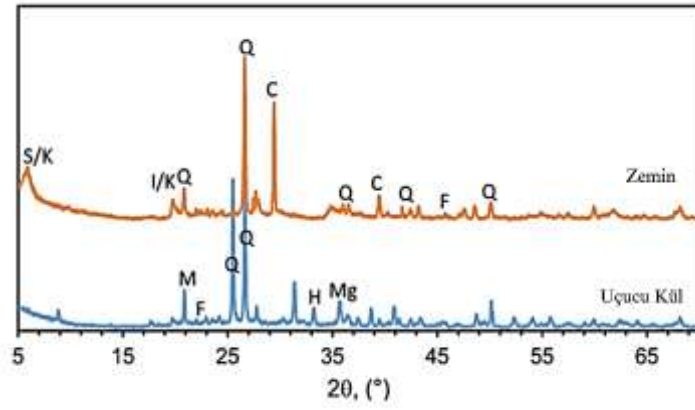
Zemine etkileri:

- ✓ Mukavemet Artışı: Uçucu kül, su ile reaksiyona girerek zemin içindeki boşlukları doldurur ve zamanla pozzolanik reaksiyonlar sayesinde dayanımı artırır.
- ✓ Plastisite Azalması: Kil zeminlerin plastisitesini düşürerek hacim değişimlerini minimize eder.
- ✓ Geçirimsizliğin Artışı: Zeminin gözenekliliğini azaltarak su geçirgenliğini düşürür.
- ✓ Şişme ve Oturma Kontrolü: Şişme potansiyeli yüksek zeminlerde genleşmeyi sınırlandırır.
- ✓ Donma-Çözülme Direnci: Soğuk iklimlerde donma-çözülme döngülerine karşı zeminin direncini artırır.

Uygulama alanları

- ✓ Yol ve havaalanı alt temel stabilizasyonu
- ✓ Baraj ve dolgu projelerinde şişme kontrolü
- ✓ Ray altı dolgu ve zemin iyileştirme projeleri
- ✓ Endüstriyel atık sahalarının kaplamasında geçirimsizlik sağlama

F sınıfı uçucu külün zemin stabilizasyonundaki etkinliği birçok akademik çalışma ile desteklenmiştir.



Şekil 9: Zemin ve Uçucu Külün XRD Deseni

Bu çalışmada kullanılan bağlayıcının mineralojik bileşimi ve yapısal özellikleri, Şekil 9'da sunulan X-ışını difraksiyonu (XRD) analiz desenleri aracılığıyla ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen XRD sonuçları, özellikle 15° ile 35° arasındaki 2θ değer aralığında gözlenen geniş ve belirgin amorf tepe formasyonu dikkat çekmektedir. Bu bulgu, uçucu kül örneklerinin yüksek oranda camsı (amorfoz) yapılar içerdiğine ve dolayısıyla önemli miktarda amorf faz içeriğine sahip olduğuna işaret etmektedir. Söz konusu camsı fazlar, alkali aktivasyon sürecinde çözünürlüğü yüksek silika (Si) ve alümina (Al) kaynakları sağlayarak jeopolimerleşme reaksiyonlarının temelini oluşturmaktadır. Bu süreç sonucunda özellikle sodyum-alüminosilikat-hidrat (N-A-S-H) türü bağlayıcı jellerin oluşumu teşvik edilmekte ve bu jeller, karışımın mekanik dayanımını ve mikroyapısal bütünlüğünü önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, difraktogramda $26,6^\circ$ 2θ değerinde net bir kuvars (SiO_2) tepe noktası gözlemlenmiş olup, bu mineralin bağlayıcı içeriğinde kristalin faz olarak bulunduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, $20,9^\circ$, $33,3^\circ$ ve $35,7^\circ$ 2θ açılarına karşılık gelen düşük şiddetli tepe noktaları ise mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) fazına işaret etmekte olup, bu fazların nispeten sınırlı miktarda bulunduğu görülmektedir. Kristalin bileşenlerin varlığı, toplam mineralojik yapının daha çok amorf karakterde olduğunu değiştirmemekte, aksine amorf fazların bağlayıcının reaktivitesinde dominant bir rol oynadığı fikrini pekiştirmektedir.

Elde edilen bu bulgular, uçucu külün kimyasal olarak yüksek derecede reaktif bir yapı sergilediğini ve özellikle alkali aktivatörlerle etkileşime girmeye uygun faz bileşenleri taşıdığını açıkça göstermektedir. Bu özellik, bağlayıcının geoteknik mühendisliği uygulamalarında, özellikle de zemin iyileştirme ve stabilizasyon süreçlerinde etkin ve verimli bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, camsı alüminosilikat yapıların mevcudiyeti, zeminle reaksiyona girerek bağlayıcı matrisin mikroyapısal bütünlüğünü sağlayan jeopolimer ağların oluşumunu desteklemekte ve

stabilizasyon mekanizmasının mineralojik temelini oluşturmaktadır. Sonuç olarak, uçucu külün içerdiği yüksek orandaki amorf fazların varlığı, bu malzemenin alkali aktivasyonla bağlayıcı özellik kazanmasında belirleyici unsur olarak öne çıkmakta; hem çevresel sürdürülebilirliği hem de mühendislik verimliliğini önceleyen modern stabilizasyon teknikleri açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Çokoy (2010) yaptığı çalışmada, F sınıfı uçucu kül ve kireç karışımı kullanılarak düşük taşıma kapasiteli zeminlerin mukavemetinin artırıldığını göstermiştir. Çalışmada, uçucu kül içeriği %20'ye çıkarıldığında CBR değerlerinde %150'ye varan artış gözlemlenmiştir. Sivrikaya ve Erdal (2014), farklı kil türleri üzerinde yaptıkları stabilizasyon çalışmasında, F sınıfı uçucu kül katkılı zeminlerin plastisite indeksinin düştüğünü ve optimum su muhtevasının azaldığını rapor etmişlerdir. Kolias vd. (2005) tarafından yapılan saha denemelerinde, uçucu kül stabilizasyonunun uzun vadede zemin mukavemetini artırdığı ve oturma problemlerini azalttığı belirlenmiştir.

F sınıfı uçucu kül, puzolanik reaksiyonları sayesinde uzun vadeli stabilizasyon sağlayan, ekonomik ve çevre dostu bir zemin iyileştirme malzemesidir. Özellikle kil ve silt içeriği yüksek zeminlerde bağlayıcılar ile kullanıldığında plastisiteyi azaltarak mühendislik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Ancak, saha uygulamalarında optimum uçucu kül miktarının belirlenmesi ve yerinde dayanım testlerinin yapılması kritik önem taşımaktadır. Literatürdeki çalışmalar, F sınıfı uçucu külün düşük taşıma kapasiteli zeminlerin iyileştirilmesinde etkili bir katkı malzemesi olduğunu ve uzun vadeli stabilite sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, altyapı projelerinde düşük mukavemetli zeminlerin stabilizasyonu için uçucu kül kullanımı teknik ve ekonomik açıdan önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

2.1.3. Sodyum Hidroksit

Zemin stabilizasyonu, taşıma gücü düşük veya hacim değişimi yüksek zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli kimyasal ve mineral katkı malzemelerinin kullanıldığı bir süreçtir. Alkali aktivatörler, özellikle problemlili zeminlerin stabilizasyonunda etkin rol oynar. Sodyum hidroksit (NaOH), bu tür uygulamalarda zemin minerallerini aktive eden güçlü bir bazik bileşik olarak kullanılır.

Sodyum hidroksit, alkali ortam oluşturan güçlü bir baz olup, genellikle kostik soda olarak da bilinir. Kimyasal olarak yüksek reaktif bir madde olup, su ile temas ettiğinde ekzotermik reaksiyon gösterir.

Tablo 7: Sodyum Hidroksitin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Özellik	Değer / Açıklama
Kimyasal Formül	NaOH
Moleküler Ağırlık	39.99 g/mol
Görünüm	Beyaz katı (pelet)
Erime Noktası	318°C
Kaynama Noktası	1.388°C
Yoğunluk	2.13 g/cm ³ (20°C’de)
pH Değeri	13-14 (su içinde çözündüğünde)
Çözünürlük (Suda)	Çok iyi çözünür (ısı açığa çıkar)
Elektriksel İletkenlik	Yüksek (sulu çözeltilerde iyonize olur)
Kimyasal Reaktivite	Asitlerle nötrleşme reaksiyonuna girer, suyla ekzotermik reaksiyon verir
Higroskopiklik	Havadaki nemi emerek çözünür
Toksisite	Deri, göz ve solunum yollarına aşındırıcı etki yapabilir
Endüstriyel Kullanım Alanları	Zemin stabilizasyonu, deterjan üretimi, kağıt sanayi, su arıtma, petrol rafinasyonu

Tablo 7, sodyum hidroksitin zemin stabilizasyonunda kullanımına yönelik önemli kimyasal ve fiziksel özelliklerini özetlemektedir. Özellikle yüksek baziklik, reaktivite ve çözünürlük özellikleri, NaOH’nin mühendislik uygulamalarındaki etkinliğini artırmaktadır.

NaOH, zeminlerde bulunan kil mineralleriyle reaksiyona girerek yeni bağlayıcı fazlar (geopolimerler) oluşmasını sağlar. Bu durum, zeminlerin mekanik ve mühendislik özelliklerini iyileştirerek daha kararlı bir yapı oluşturmaya katkıda bulunur.

2.1.3.1. Sodyum hidroksitin zemin stabilizasyonundaki etkileri ve kullanımı

Sodyum hidroksit, tek başına veya uçucu kül, silis dumanı ve çimento gibi pozolanik malzemelerle birlikte kullanılarak zeminlerin stabilizasyonunda etkili hale getirilir.

Zemine etkileri

- ✓ Mineral Yapının Değişimi: NaOH, zemindeki kil minerallerinin yapısını bozarak daha sıkı ve stabil bir yapı oluşmasını sağlar.
- ✓ Mukavemet Artışı: Alkali aktivasyon yoluyla pozolanik reaksiyonları hızlandırarak dayanımı artırır.

- ✓ Geçirimsizliği Artırma: Zemin içindeki gözenekleri azaltarak su geçirgenliğini düşürür ve erozyon direncini artırır.
- ✓ Plastisiteyi Azaltma: Kil zeminlerin suya duyarlılığını ve plastisite indeksini düşürerek hacim değişimlerini kontrol altına alır.
- ✓ Şişme ve Oturma Problemlerinin Azaltılması: Özellikle genleşen killerde (örneğin montmorillonit içeren zeminler), şişme potansiyelini önemli ölçüde azaltır.

Uygulama alanları

- ✓ Zayıf kil ve siltli zeminlerin stabilizasyonu
- ✓ Yol alt temel iyileştirme çalışmaları
- ✓ Baraj ve dolgu projelerinde şişme kontrolü
- ✓ Sanayi atık sahalarının geçirimsiz tabaka stabilizasyonu
- ✓ Geopolimer zemin stabilizasyonu (uçucu kül, NaOH ve aktivatörler kullanılarak)

Sodyum hidroksit, özellikle uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu (GBFS) gibi puzolanik malzemelerle birlikte kullanıldığında daha etkin bir stabilizasyon etkisi gösterir. NaOH'nin zemin stabilizasyonundaki etkisi, birçok bilimsel çalışma ile incelenmiş ve etkinliği kanıtlanmıştır.

Fernandez-Jimenez ve Palomo (2005) yaptıkları çalışmada, NaOH aktivasyonu ile zemin içindeki silis ve alümina minerallerinin reaktif hale geldiğini ve bağlayıcı özellik kazandığını göstermiştir. Özellikle uçucu kül içeren zeminlerde C-S-H ve N-A-S-H jellerinin oluştuğu belirlenmiştir. Güllü (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, NaOH ile stabilizasyonun yüksek plastisiteli killerin mukavemetini %200'e kadar artırdığı rapor edilmiştir. Kumar ve Sharma (2016), sodyum hidroksit ile stabilizasyonun, şişme potansiyeline sahip killerde %40'a varan şişme azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Cristelo vd. (2015), NaOH ve uçucu kül kombinasyonunun, düşük taşıma kapasiteli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini ve uzun vadeli dayanım sağladığını belirtmiştir.

Sodyum hidroksit, yüksek alkali aktivasyonu sayesinde zemin stabilizasyonunda etkili bir katkı maddesidir. Özellikle puzolanik malzemelerle birlikte kullanıldığında mekanik dayanımı ve kimyasal stabiliteyi artırarak, zeminin taşıma gücünü ve suya karşı direncini artırmaktadır.

- ✓ Çevresel Etkiler: NaOH yüksek baziklik gösterdiğinden çevreye zarar verebilecek potansiyele sahiptir, dikkatli uygulanmalıdır.
- ✓ Reaksiyon Süresi: Geopolimerleşme süresi uzun olabileceğinden, uzun vadeli mühendislik performansları göz önüne alınmalıdır.

Sodyum hidroksit, uygun katkılarla birlikte kullanıldığında zemin stabilizasyonu açısından etkin bir çözüm sunmaktadır. Özellikle alkali aktivasyon mekanizması sayesinde uzun vadeli dayanım sağlayarak, zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştiren önemli bir kimyasal stabilizatördür.

2.1.4. Sodyum Silikat

Zemin stabilizasyonu, inşaat mühendisliği projelerinde zayıf zeminlerin dayanımını artırmak, su geçirgenliğini azaltmak ve hacim değişimlerini kontrol altına almak için uygulanan bir yöntemdir. Sodyum silikat (Na_2SiO_3), bu süreçte yaygın olarak kullanılan kimyasal katkı maddelerinden biridir. "Su camı" olarak da bilinen sodyum silikat, yüksek alkaliniteye sahip olması ve silis içeriği sayesinde zemin parçacıkları arasında bağlayıcı etki göstermesiyle öne çıkar. Sodyum silikat, alkali silikatlar grubuna ait, amorf veya kristal yapıda bulunabilen, suda çözünabilen bir bileşiktir. Silis (SiO_2) ve sodyum oksidin (Na_2O) belirli oranlarda birleşmesiyle oluşur.

Tablo 8: Sodyum Silikatın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Özellik	Değer / Açıklama
Kimyasal Formül	Na_2SiO_3
Moleküler Ağırlık	122.06 g/mol
Görünüm	Renksiz veya hafif bulanık viskoz sıvı / Beyaz katı
Yoğunluk	1.4 - 1.6 g/cm ³ (çözeltide)
Erime Noktası	1.088°C (katı halde)
pH Değeri	11 - 13 (yüksek baziklik)
Çözünürlük	Suda kolayca çözünür
Viskozite	Silis oranına bağlı olarak değişir
Bağlayıcılık	Silika jelleri oluşturarak zeminde sertleşme sağlar
Reaktivite	Asitlerle reaksiyona girerek çökelme oluşturur

Sodyum silikat, zemin stabilizasyonunda üç temel mekanizma ile etki gösterir. Na_2SiO_3 , zemindeki serbest silis ve alüminyum mineralleriyle reaksiyona girerek silika jelleri

($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve alkali alüminosilikat bileşikleri oluşturur. Bu reaksiyon sonucunda, zemin parçacıkları arasında bağlayıcı bir yapı gelişir ve dayanım artışı sağlanır.

Sodyum silikat çözeltisi zemin boşluklarına nüfuz ederek suyla temas ettiğinde sertleşir ve geçirimsiz bir yapı oluşturur. Bu etki özellikle kil ve siltli zeminlerde suya karşı dayanımı artırarak erozyon direncini yükseltir. Şişme potansiyeli yüksek killerde, sodyum silikat kil minerallerinin su tutma kapasitesini düşürerek hacim değişimlerini kontrol eder.

Uygulama alanları

Sodyum silikat stabilizasyonu aşağıdaki mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılır:

- ✓ Yol ve otoyol temel stabilizasyonu
- ✓ Kazık ve derin temel uygulamalarında enjeksiyon yöntemiyle taşıma gücünün artırılması
- ✓ Suya duyarlı zeminlerde geçirimsiz tabaka oluşturulması
- ✓ Erozyon kontrolü ve yüzey sertleştirme
- ✓ Yeraltı yapılarında su izolasyonu (tünel ve metro projeleri)

Uygulama yöntemleri

- ✓ Yüzey Sprey Yöntemi: Sodyum silikat çözeltisi doğrudan zemin yüzeyine püskürtülerek uygulanır.
- ✓ Karıştırma Yöntemi: Zemine belirli oranda sodyum silikat çözeltisi karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanır.
- ✓ Enjeksiyon Yöntemi: Zemin içerisine basınçlı olarak sodyum silikat enjekte edilerek, boşluklu veya zayıf zeminlerin iyileştirilmesi sağlanır.

Sodyum silikatın zemin stabilizasyonundaki etkinliği çeşitli bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur:

Khoury (1992) tarafından yapılan çalışmalar, sodyum silikat ile stabilize edilen zeminlerin daha sert ve dayanıklı hale geldiğini ortaya koymuştur. Cristelo vd. (2015), sodyum silikat ve uçucu kül ile stabilize edilen killerin dayanım kazanımının çimento ve kireçle stabilizasyona kıyasla daha hızlı olduğunu belirtmiştir. Kogbara vd. (2013), sodyum silikat katkılı stabilizasyonun zeminin uzun vadeli dayanımını artırdığını ve geçirimsizliğini iyileştirdiğini göstermiştir. Çokça vd. (2020) tarafından yapılan laboratuvar testlerinde, sodyum

silikat içeren jeopolimer stabilizasyonunun zeminin mukavemetini artırdığı ve su duyarlılığını azalttığı belirlenmiştir.

Sodyum silikat, zemin stabilizasyonunda güçlü bir bağlayıcı etkisi olan ve zeminlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştiren bir katkı maddesidir. Kimyasal reaksiyonlarla bağlayıcı fazlar oluşturarak zemin parçacıklarını bir arada tutar ve dayanım kazandırır. Geçirimsizliği artırarak suya karşı direnci yükseltir, bu nedenle tünel ve altyapı projelerinde su izolasyonu için ideal bir çözümdür. Şişme ve oturma problemlerini azaltarak özellikle kil zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirir. Çevre dostu ve sürdürülebilir bir stabilizasyon yöntemi olması, endüstriyel atıkların yeniden değerlendirilmesine de olanak tanır. Ancak, saha uygulamalarında dozaj kontrolü ve reaksiyon süresi iyi yönetilmelidir. Fazla sodyum silikat kullanımı, zeminin aşırı sertleşmesine ve kırılgan hale gelmesine neden olabilir. Ayrıca, alkali ortamın çevresel etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Sodyum silikat, zemin stabilizasyonunda etkili, ekonomik ve sürdürülebilir bir çözümdür. Doğru dozajda ve uygun yöntemlerle uygulandığında, zeminlerin mühendislik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirerek uzun vadeli stabilite sağlar.

2.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tablo 9: Tez Çalışmasında Uygulanan Deneyler ve Standartları

Deney Adı	Deney Standartı
Elek analizi deneyi	ASTM D 422
Kıvam limitleri deneyi	ASTM D 4318
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D 698
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D 854
Donma-çözülme deneyi	ASTM D 560
Serbest basınç deneyi	ASTM D 2166
Islanma- kuruma deneyi	ASTM D 4546
Islatma deneyi	ASTM D1037
Karbon ayak izi	ISO 14067

2.2.1. Elek Analizi

Zemin mühendisliğinde, bir zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirmek için çeşitli deney yöntemleri uygulanır. Bunlardan biri de elek analizi olup, zemindeki parçacık boyutu dağılımını belirlemek için kullanılır. Dane boyutu dağılımı, bir zeminin geoteknik

sınıflandırmasını yapmak, permeabilite, sıkışma ve dayanım gibi mühendislik özelliklerini değerlendirmek açısından kritik bir parametredir (ASTM D422-63, 2007). Elek analizi, zemin stabilizasyonu çalışmalarında da önemli bir rol oynar çünkü zemine eklenen stabilizasyon malzemelerinin zeminin tane dağılımı üzerindeki etkisini anlamak için kullanılır.

Elek analizi, zemin içindeki farklı büyüklükteki tanelerin kütsel yüzde oranlarını belirleyerek zeminin granülometri eğrisini oluşturmayı amaçlar. Bu analiz sonucunda zemin, iri taneli (kum ve çakıl) veya ince taneli (silt ve kil) özellik gösterip göstermediği belirlenir.



Şekil 10: Elek Analizi Uygulanışı

Zemin stabilizasyonu uygulamalarında elek analizi şu açılardan önemlidir:

- ✓ Stabilizasyon Malzemesi Seçimi: Zeminin uygun şekilde iyileştirilmesi için kullanılacak bağlayıcı veya katkı maddesi (çimento, kireç, uçucu kül vb.) belirlenirken tane boyutu dağılımı dikkate alınır.
- ✓ Mekanik Stabilizasyon: Farklı dane boyutlarına sahip malzemelerin karışımıyla stabilizasyon sağlanırken uygun dağılımın elde edilmesi için elek analizi gereklidir.
- ✓ Su Geçirgenliği ve Dayanım: Elek analizi sonucunda belirlenen tane boyutu dağılımı, zeminin drenaj ve sıkışma özelliklerini etkileyerek stabilizasyon kararlarını yönlendirir.

Elek analizi deneyinde genellikle şu standartlar uygulanır:

- ✓ ASTM D422-63: Zeminlerin tane boyut dağılımını belirleme standardı (ASTM, 2007).
- ✓ TS 1900-1: Türk Standartları Enstitüsü tarafından belirlenen “Zeminlerin Sınıflandırılması ve Tanımlanması” standardı (TSE, 2006).

Deney aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir:

- ✓ Numune Hazırlama: Zeminden uygun miktarda numune alınarak kurutulur.
- ✓ Elek Setinin Hazırlanması: ASTM veya TS standardına uygun bir dizi elek (örneğin, 4.75 mm, 2 mm, 0.425 mm, 0.075 mm) belirlenir ve büyüklük sırasına göre üst üste yerleştirilir.
- ✓ Sarsma İşlemi: Numune, mekanik veya manuel sarsıcıda belirli bir süre (örneğin 10-15 dakika) boyunca eleklerden geçirilir.
- ✓ Kalan Kütlelerin Ağırlık Ölçümü: Her elek üzerinde kalan malzeme tartılarak her boyut aralığında ne kadar zemin bulunduğı belirlenir.
- ✓ Kümülatif Geçiş Yüzdelерinin Hesaplanması: Her elekten geçen malzeme oranları hesaplanarak tane dağılım eğrisi çizilir.

Elek analizi sonuçları, zemin sınıflandırması ve stabilizasyon yöntemi seçimi açısından kritik bilgiler sağlar.

- ✓ İri Taneli Zeminler (Kum ve Çakıl İçeren Zeminler): %50'den fazlası kum ve çakıldan oluşuyorsa, mekanik stabilizasyon veya çimento ile stabilizasyon uygulanabilir (Mitchell & Soga, 2005). Geçirgenlik yüksektir, su tutma kapasitesi düşüktür. Drenaj özellikleri iyi olduğı için genellikle yol dolgularında kullanılır.
- ✓ İnce Taneli Zeminler (Silt ve Kil İçeren Zeminler): %50'den fazlası silt ve kil içeriyorsa, plastik özellikleri yüksek olup, stabilizasyon için kireç, çimento veya uçucu kül eklenmesi gerekir (Güllü, 2012). Şişme ve büzülme potansiyeli yüksektir, geçirgenliği düşüktür. Su ile temasta dayanım kaybı yaşanabilir, bu nedenle kimyasal stabilizasyon gereklidir (Phani Kumar & Sharma, 2004).
- ✓ İyi Derecelenmiş (Well-Graded) ve Zayıf Derecelenmiş (Poorly-Graded) Zeminler: farklı tane boyutlarını içerdіğı için daha dengeli bir yapı oluşturur ve stabilizasyon için daha az katkı gerektirir. Zayıf derecelenmiş zeminler tek tip dane boyutundan oluştuğı için stabilizasyon için ilave bağlayıcı maddeler veya dolgu malzemesi eklenmesi gerekir.

Mitchell ve Soga (2005), iri daneli zeminlerin stabilizasyonunda çimento ve mekanik stabilizasyon yöntemlerinin en etkili çözümler olduğunu ortaya koymuştur. Phani Kumar ve Sharma (2004), ince taneli zeminlerde uçucu kül katkısının mukavemeti artırdığını ve plastisite indeksini düşürdüğünü göstermiştir. Güllü (2012), yüksek plastisiteli killerde kireç ve uçucu kül katkısının şişme potansiyelini %50'ye kadar azalttığını ve stabilizasyonu önemli ölçüde

iyileştirdiğini belirtmiştir. Çokça vd. (2021), elek analizi ve tane boyutu dağılımının, zeminlerin mühendislik özelliklerini değerlendirmede kritik bir parametre olduğunu vurgulamıştır.



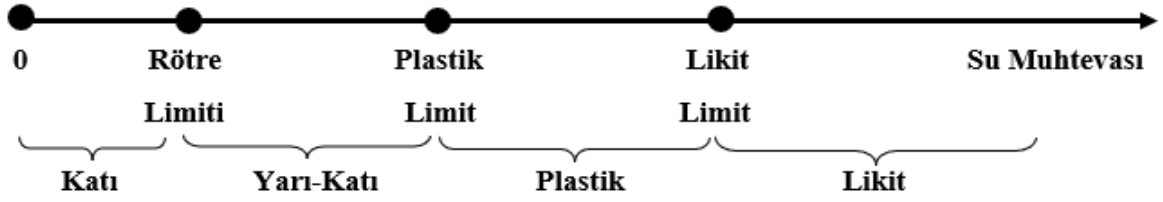
Şekil 11: Elek Analizi Deneyi

Elek analizi deneyi, zeminlerin tane boyutu dağılımını belirleyerek mühendislik sınıflandırmasını yapmaya yardımcı olan temel bir testtir. Stabilizasyon süreçlerinde hangi yöntemin uygulanacağını belirlemek için kritik bir role sahiptir. İri taneli zeminlerde mekanik stabilizasyon, ince taneli zeminlerde ise kimyasal stabilizasyon yöntemleri (çimento, kireç, uçucu kül) daha etkili olmaktadır. Literatürdeki çalışmalar da göstermektedir ki, uygun stabilizasyon yöntemi seçildiğinde zeminlerin mukavemet, geçirgenlik ve plastisite gibi mühendislik özellikleri önemli ölçüde iyileştirilmektedir.

2.2.2. Kıvam Limitleri

Zemin stabilizasyonu, zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı malzeme ve yöntemlerin kullanıldığı bir mühendislik uygulamasıdır. Bu süreç, zeminin taşıma kapasitesini artırmak, su geçirimsizliğini düzenlemek ve çeşitli çevresel faktörlere karşı direncini iyileştirmek için kullanılır. Zemin stabilizasyonunda kıvam limitleri deneyleri, zeminlerin plastiklik, akma ve sertlik özelliklerini belirlemeye yönelik kritik testlerdir. Bu testler, zeminin özelliklerine uygun stabilizasyon yöntemlerinin seçilmesinde önemli bir rol oynar.

Bu üç kıvam limitinin belirlenmesi için Atterberg Limitleri deneyleri kullanılır.



Şekil 12: Kıvım Limitlerinin Belirlenmesi

Kıvım limitleri, zeminin viskozitesinin ve plastikliğinin belirli sınırlar dahilinde nasıl davrandığını ortaya koyan parametrelerdir. Genellikle üç ana kıvım limiti vardır:

- ✓ **Plastik Limit (PL):** Zemin, plastik halde iken şekil değiştirebilecek kadar yumuşaktır. Plastik limit, zeminin sıkıştırılabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerini belirler. Plastik limit, zeminin ne kadar su içerebileceğini ve plastik hale geçebileceğini gösterir. Bu limitin altındaki bir zemin sert, kuru ve işlenmesi zor olabilir.
- ✓ **Sıvı Limit (LL):** Zemin sıvı hale geçtiğinde, akışkanlık kazandığı noktada sıvı limit tanımlanır. Sıvı limit, zemin su içeriği arttıkça sıvı hale geçtiği noktadır. Bu limit, zeminin su emme kapasitesini ve sıvı hale geçişini belirler. Bu limitin üzerine çıkan bir zemin, şekil tutamayacak kadar sıvı olacaktır.
- ✓ **Plastik Bölge (PL-LL Arası):** Plastik limit ile sıvı limit arasında kalan bölge, zeminin plastik özelliklerini gösterir ve bu bölgedeki zemin, işlenebilir ve şekil verilebilir halde bulunur. Plastik bölgedeki zeminler stabilizasyon için genellikle daha uygun kabul edilir.



Şekil 13: Kıvım Limitleri Deneyleri

2.2.2.1. Likit limit deneyi

Zemin örneği, suyla karıştırılarak sıvı hale getirilir. Örnek, belirli bir şekil ve büyüklükteki bir kaptaki hareket ettirilerek sıvı limit değeri belirlenir. Bu limit, zeminin suya duyarlılığını ve sıvı hale geçiş noktasını ortaya koyar. ASTM D4318 (Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils) bu deneyi standartlara bağlar.

2.2.2.2. Plastik limit deneyi

Bu deneyde zemin örneği, bir şerit halinde yoğrulur ve 3 mm'lik bir çapa kadar incelendiği noktada plastik limit belirlenir. Bu deneyin amacı, zeminin şekil değiştirme kapasitesini belirlemektir. ASTM D4318'de plastik limitin hesaplanmasında referans alınan bir kaynaktır.

2.2.2.3. Plastik indeks (PI)

Plastik indeks, sıvı limit ile plastik limit arasındaki farktır ($PI = LL - PL$). Plastik indeks, zeminlerin plastiklik derecesini ve dolayısıyla işlenebilirliğini gösteren önemli bir parametredir.

Bardet (1993), bu çalışmada, farklı killi zemin örneklerinde Atterberg limitlerinin ölçülmesi ve bu limitlerin zemin stabilizasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, plastik indeksin zemin iyileştirme yöntemlerini seçmede nasıl bir rehber oluşturduğu tartışılmaktadır. Sabatini vd. (2000), çalışmalarında stabilizasyon ajanlarının sıvı limit ve plastik limit üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu limitlerin zemin stabilizasyonunda nasıl rehberlik ettiği üzerine önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Koerner (1998), zemin stabilizasyonunda kullanılan farklı malzemelerin etkilerini tartışırken, kıvam limitlerinin bu malzemelerin etkinliğini belirlemedeki önemine değinmiştir.

Kıvam limitleri, zemin stabilizasyonu için önemli parametrelerdir. Bu testler, zeminlerin plastiklik, akma ve sıvı hale geçiş noktalarını belirleyerek, hangi stabilizasyon yöntemlerinin daha uygun olacağını tespit etmeye yardımcı olur. Literatürdeki çalışmalar, bu testlerin zeminin dayanıklılığını ve işlenebilirliğini nasıl etkilediğini göstermekte ve stabilizasyon süreçlerinin tasarımında önemli bir rol oynamaktadır.

2.2.3. Standart Kompaksiyon Deneyi

Zemin stabilizasyonu, zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan çeşitli yöntemleri kapsayan bir süreçtir. Zeminlerin dayanım, geçirgenlik ve sıkışma

özelliklerini optimize etmek için sıkıştırma (kompaksiyon) işlemi kritik bir rol oynar. Standart kompaksiyon deneyi, bir zeminin belirli bir enerji altında en yüksek yoğunluğa ulaştığı optimum su içeriğini (OMC - Optimum Moisture Content) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını (γ_{dmax} - Maximum Dry Unit Weight) belirlemek amacıyla yapılan temel laboratuvar deneylerinden biridir. Bu deney, özellikle dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminlerin mühendislik projelerinde uygunluğunu değerlendirmek için önemlidir. Yollar, barajlar, havaalanları gibi büyük inşaat projelerinde, zemin tabakalarının yeterli sıkışmayı sağlaması için kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi gereklidir.

2.2.3.1. Standart kompaksiyon deneyi ve önemi

Standart kompaksiyon deneyi, ASTM D698 ve AASHTO T99 standartlarına göre yürütülen, belirli bir enerjiyle yapılan sıkıştırma testidir. Bu deney, bir zeminin belirli su içeriğinde maksimum yoğunluğa ulaşma noktasını belirlemek için kullanılır. Deneyin temel amacı, saha uygulamalarında kullanılacak olan kompaksiyon seviyesinin laboratuvar ortamında belirlenmesidir.

Zemin kompaksiyonu, şu temel mühendislik özellikleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir:

- ✓ Dayanım (shear strength): Sıkıştırılmış zeminlerin dayanımı, özellikle zayıf taşıma kapasiteli zeminlerde iyileştirme sağlar.
- ✓ Geçirgenlik (permeability): Sıkıştırma işlemi ile boşluk oranı azaltılır ve suyun zeminden geçiş hızı düşürülür.
- ✓ Oturma (settlement) ve hacim değişimi: Özellikle kohezyonlu zeminlerde şişme ve büzülme etkilerini kontrol altına almak için kompaksiyon önemlidir.

Zemin kompaksiyonunun mühendislik yapıları üzerindeki etkisi büyük olup, uygun şekilde sıkıştırılmamış zeminler taşıma gücü kaybı, oturma, sıvılaşma ve geçirgenlik artışı gibi mühendislik problemlerine neden olabilir. Bu nedenle, laboratuvar ortamında kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi ve sahada uygulanan sıkıştırma işlemlerinin kontrol edilmesi gereklidir.

Bu çalışmada, standart kompaksiyon deneyi prosedürü detaylandırılmış, deney sonucunda elde edilen verilerin mühendislik projelerindeki önemi açıklanmıştır.

2.2.3.2. Deneyin tanımı ve uygulama prosedürü

Standart kompaksiyon deneyi, ASTM D698 ve AASHTO T99 standartlarına uygun olarak belirli büyüklükteki bir zemin örneğinin, kontrollü bir su içeriği ile belirli bir sıkıştırma enerjisi altında maksimum yoğunluğa ulaşmasını sağlamayı amaçlar. Deney sonucunda optimum su içeriği (OMC) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{dmax}) belirlenerek, sahada uygulanması gereken kompaksiyon parametreleri tespit edilir.

Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar

- ✓ Zemin numunesi (homojen hale getirilmiş, belirlenen tane boyutlarına uygun)
- ✓ Silindirik kompaksiyon kalıbı (çap: 105 mm, yükseklik: 115,5 mm)
- ✓ Tokmak (kütle: 2,5 kg, düşme yüksekliği: 305 mm)
- ✓ Terazî ($\pm 0,01$ g hassasiyet)
- ✓ Desikatör (Oda sıcaklığında)
- ✓ Nem tayini kabı

2.2.3.3. Standart kompaksiyon deneyin uygulanışı

- ✓ 2,5 kg zemin numunesi belirlenerek 150 mL su ilavesiyle homojen karışım sağlanmıştır.
- ✓ Numune, kompaksiyon kalıbına yerleştirilmeden önce ön belirlenmiş su içeriğine sahip olacak şekilde karıştırılmıştır.
- ✓ Hazırlanan zemin, çapı 105 mm, yüksekliği 115,5 mm olan kompaksiyon kalıbına yerleştirilmiştir.
- ✓ 2,5 kg kütleli tokmak, 305 mm yükseklikten serbest düşürülerek zemine enerji uygulanmıştır.
- ✓ Zemin 3 tabaka halinde sıkıştırılmış ve her tabaka için 25 vuruş uygulanarak toplamda 75 vuruş tamamlanmıştır.
- ✓ Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, kalıp içerisindeki sıkıştırılmış zemin tartılmış ve toplam kütlesi kaydedilmiştir.
- ✓ Daha sonra numune, kalıptan çıkarılarak nem tayini için belirlenen kısmı etüvde 24 saat süreyle $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kurutulmuştur.

- ✓ Yukarıdaki işlemler, su içeriği her defasında 150 mL artırılarak toplamda 6 kez tekrarlanmıştır.
- ✓ Böylece farklı su içerikleri için kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve deney tamamlanmıştır.



Şekil 14: Standart Kompaksiyon Deneyi

Sıkıştırılmış zeminin kuru birim hacim ağırlığı şu formülle hesaplanır:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$$

(γ_d = Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m³))

(γ = Islak birim hacim ağırlığı (kN/m³))

(w = Su içeriği (%))

Denklem 1

Elde edilen kuru birim hacim ağırlıkları ve su içerikleri kullanılarak su içeriği - kuru birim hacim ağırlığı grafiği çizilmiş ve eğrinin tepe noktası belirlenmiştir. Başlangıçta su içeriği düşükken, zemin partikülleri arasındaki bağlar zayıf olduğu için sıkıştırma verimli olmaz. Su içeriği arttıkça, partiküller arasındaki sürtünme azalır ve daha iyi yerleşim sağlanır, böylece birim hacim ağırlığı artar. Optimum su içeriği noktasına ulaşıldığında, zemin maksimum yoğunluğa erişir ve bu nokta mühendislik uygulamalarında ideal sıkıştırma su içeriği olarak kabul edilir. OMC'den sonra su içeriği daha fazla arttığında, boşluklar su ile dolduğu için kuru birim hacim ağırlığı düşer ve sıkıştırma verimsiz hale gelir.

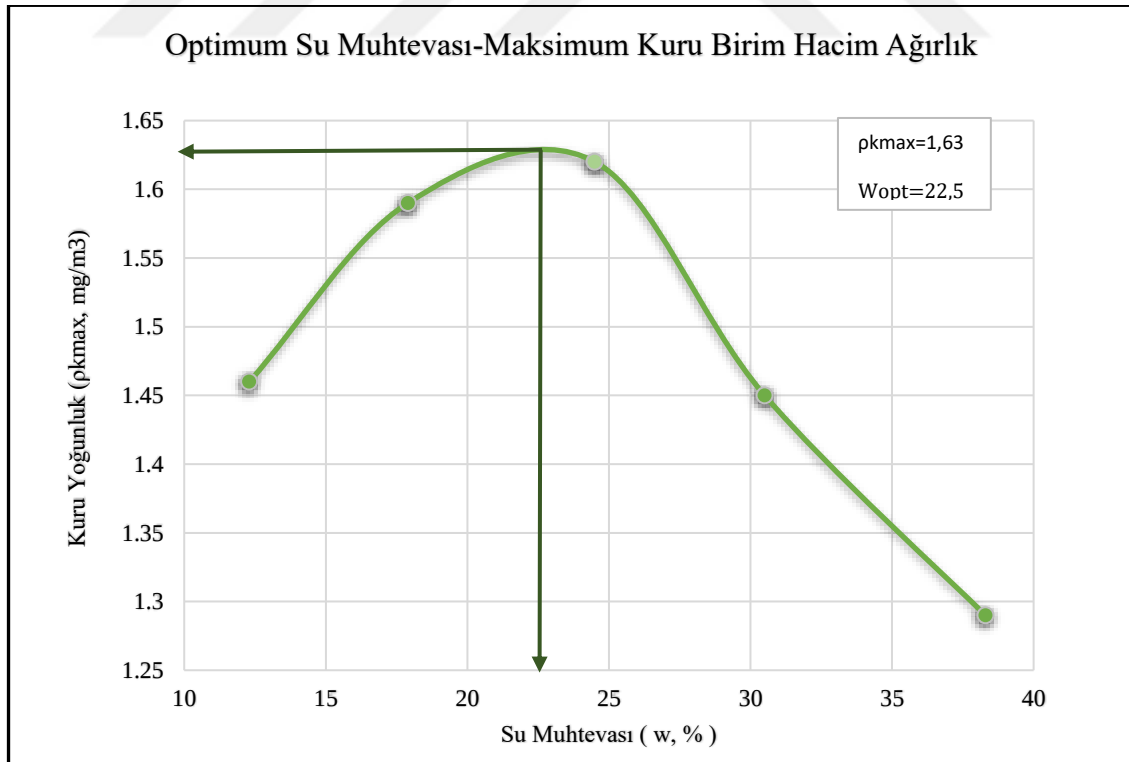
Optimum su içeriği (OMC): Zeminin en yüksek yoğunluğa ulaşabilmesi için gerekli olan su miktarını gösterir. Su miktarı arttıkça zemin daha iyi sıkışabilir, ancak fazla su varlığında zeminin yoğunluğu düşebilir.

Maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{dmax}): Zeminin laboratuvar ortamında ulaşabileceği en yüksek kuru yoğunluk değerini ifade eder.

Bu parametreler, zemin sahada sıkıştırılırken kullanılan kompaksiyon ekipmanının ve yönteminin belirlenmesine yardımcı olur. Eğer saha koşullarında optimum su içeriği sağlanamazsa, sıkıştırma verimli olmayabilir ve istenilen mühendislik özellikleri elde edilemeyebilir.

Proctor (1933), çalışmasında, kompaksiyon kavramı ilk defa teorik olarak ele alınmış ve Proctor Kompaksiyon Deneyi olarak bilinen yöntemin temelleri atılmıştır. Holtz vd. (1981), çalışmalarında zemin sıkıştırmasının mühendislik projelerindeki önemini ve kompaksiyon deneylerinin saha uygulamalarındaki rolünü detaylandırmışlardır. Lambe vd. (1969), çalışmalarında kompaksiyon teorisini açıklamakla birlikte, farklı zemin türlerinde standart kompaksiyon deneyi sonuçlarını karşılaştırmalı olarak ele almışlardır. Terzaghi vd. (1948), zemin mekaniğinin temel prensiplerinden biri olarak kompaksiyonun stabilite üzerindeki etkisini detaylandıran öncü bir çalışmadır.

Standart kompaksiyon deneyi, zemin mühendisliği projelerinde stabilite ve dayanıklılığı artırmak için kritik öneme sahip bir laboratuvar testidir. Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı gibi temel parametreleri belirleyerek, sahadaki sıkıştırma işlemlerinin verimli ve başarılı olmasını sağlar. Literatürde yapılan çalışmalar, bu deneyin mühendislik yapılarının uzun ömürlü ve güvenli olması için temel bir kriter olduğunu göstermektedir.



Şekil 15: Doğal Zemin Kompaksiyon Sonuçları

Şekil 15, zeminlerin su muhtevasına bağlı olarak sıkışma davranışını incelemek için kullanılan Proktor kompaksiyon testinin sonuçlarını temsil etmektedir. Optimum su muhtevası ($W_{opt} = \%22.5$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_{dmax} = 1.63 \text{ mg/m}^3$) noktası, zeminin en yüksek yoğunluğa ulaştığı kritik değerlerdir.

2.2.4. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç dayanımı (unconfined compression strength - UCS) deneyi, kohezyonlu zeminlerin basınç dayanımının laboratuvar ortamında belirlenmesi amacıyla uygulanan temel deneylerden biridir. Bu deney, özellikle kil ve silt gibi kohezyonlu zeminler için kullanılır ve numunenin herhangi bir yanal basınç olmadan yalnızca eksenel yüke maruz bırakılması esasına dayanır.

Mühendislik projelerinde, zeminlerin taşıma gücünün ve stabilitesinin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Serbest basınç dayanımı deneyi, özellikle zeminin kayma dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir yer tutar. Kohezyon değeri (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi zemin mekaniği parametrelerinin dolaylı olarak elde edilmesine olanak tanır. Ancak, deneyin kumlu zeminler gibi kohezyonsuz malzemelere uygulanmaması gerekmektedir, çünkü bu tür zeminler yanal basınca ihtiyaç duyar ve test sonuçları güvenilir olmayabilir.

2.2.4.1. Deneyin tanımı ve uygulama prosedürü

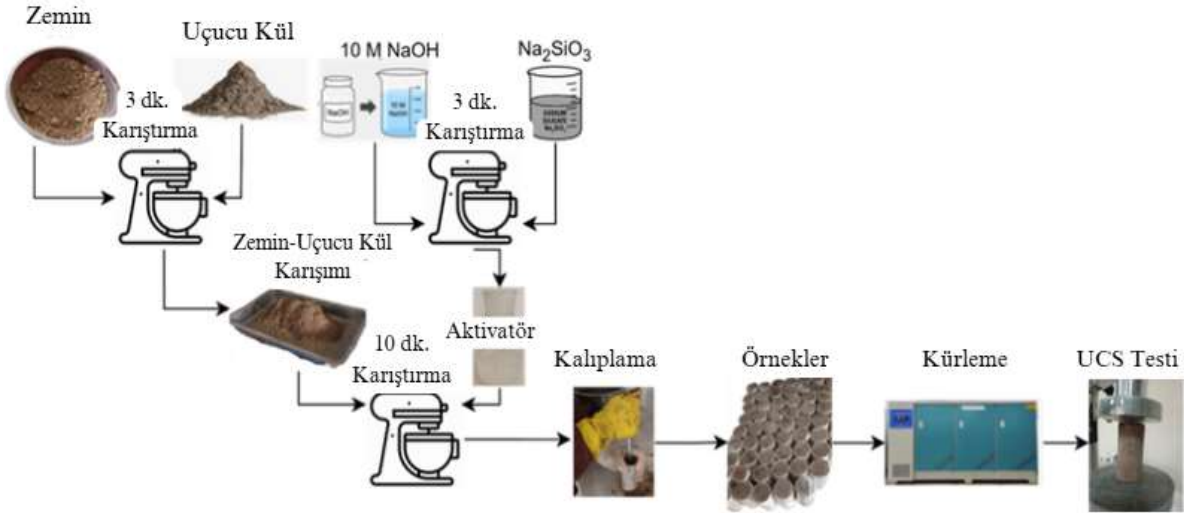
Serbest basınç dayanımı deneyi, standart boyutlardaki sıkıştırılmış zemin numunesine eksenel yönde tek eksenli basınç kuvveti uygulanarak numunenin kırılma noktasındaki dayanım değerinin belirlenmesi esasına dayanır. Numune herhangi bir yan destek (konfaynment) olmadan yük altında stabilize olana kadar yüklenir ve deformasyon ölçümleri alınarak kırılma anındaki gerilme hesaplanır.

Deney sırasında numunenin deformasyon ve gerilme ilişkisi belirlenerek mühendislik analizlerinde kullanılmak üzere kritik dayanım parametreleri elde edilir.

Numune hazırlığı

Deneyde kullanılan zemin numuneleri standart boyutlara uygun olarak hazırlanmıştır. Numune çapı genellikle 50 mm olarak belirlenmekle birlikte çalışmamızda 100 mm numune çapına sahiptir. Ancak, deneysel doğruluk açısından numune yüksekliği, çapının iki katı olacak

şekilde ayarlanmalıdır. Bu oran, yük altında numunenin homojen bir deformasyon göstermesi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 16: Numune Hazırlama Prosedürü

Bu çalışmada kullanılan deney numunelerinin hazırlanması süreci, Federal Highway Administration (FHWA) tarafından derin karıştırma yöntemi (Deep Mixing Method- DMM) için geliştirilen teknik kılavuzda belirtilen esaslara dayanmaktadır (Bruce vd., 2013). Numune üretim süreci, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kontrollü işlemler ile gerçekleştirilmiş ve bu süreç Şekil 16’da şematik olarak sunulmuştur.

Hazırlık sürecinin ilk aşamasında, zemin ve bağlayıcı bileşenlerinin homojen bir karışım oluşturması hedeflenmiştir; bu kapsamda doğal zemin örnekleri, önceden belirlenen oranlarda uçucu kül (UK) ile karıştırılmıştır. Bu karışım, mekanik karıştırıcı kullanılarak yaklaşık üç dakika boyunca sürekli şekilde karıştırılmış ve bu işlem sonucunda fiziksel olarak homojen, partikül boyutu açısından dengeli bir zemin-uçucu kül matriksi elde edilmiştir.

Bu işlemin ardından ikinci aşamaya geçilmiş ve bu aşamada alkali aktivasyonun temel bileşeni olan 10 M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması sırasında ekzotermik reaksiyon nedeniyle oluşan yüksek sıcaklığın sistem üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaması adına, çözeltinin oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Bu soğuma aşaması sırasında çözeltinin kararlı hale gelmesi sağlanmış ve karıştırma işlemlerine geçilmeden önce stabil bir ortam oluşturulmuştur.

Üçüncü aşamada, NaOH çözeltisinin yanı sıra ikinci aktivatör bileşeni olan sodyum silikat (Na₂SiO₃) çözeltisi hazırlanmış ve bu iki bileşen, kütlece belirlenen oranlarda

birleştirilerek nihai aktivatör çözeltisi oluşturulmuştur. Elde edilen çözeltinin tam karışımının sağlanabilmesi adına sistem, sabit devirli bir karıştırıcı ile yaklaşık üç dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu şekilde elde edilen aktif çözeltinin, bağlayıcı fazın kimyasal reaktivitesini en üst düzeye çıkaracak yapıda olmasına özen gösterilmiştir.

Dördüncü ve temel aşamada, daha önce hazırlanmış olan zemin-uçucu kül karışımı ile bu kimyasal aktivatör çözeltisi birleştirilmiş ve elde edilen kompozit karışım 10 dakika boyunca homojen şekilde karıştırılmıştır. Bu süre boyunca karışımın kıvamı, viskozitesi ve dağılımı sürekli olarak gözlemlenmiş ve bağlayıcının tüm sistemde eşit dağılması sağlanmıştır.

Hazırlanan karışım, deneysel değerlendirme sürecine uygun olacak şekilde çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm olan silindirik PVC kalıplara yerleştirilmiştir. Bu kalıplara yerleştirme işlemi sırasında, karışımın içinde hapsolmuş olabilecek hava kabarcıklarının sistemden uzaklaştırılması amacıyla hem elle sıkıştırma hem de hafif mekanik titreşim uygulanmıştır. Bu uygulamalarla birlikte, nihai numune yoğunluğunun artırılması ve iç yapıda boşluk oranının minimize edilmesi hedeflenmiştir.

Numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra, çevresel etkilerden (özellikle buharlaşma kaynaklı nem kaybından) korunması amacıyla yüzeyleri streç film ile dikkatlice sarılmıştır. Bu kaplama, harç karışımının su/bağlayıcı oranını sabit tutarak istenilen kür koşullarının sağlanmasına katkı sağlamıştır. Numuneler bu aşamanın ardından, sabit sıcaklıkta (28 ± 1 °C) ve kontrollü nem ortamında (yaklaşık %95 bağıl nem) 28 gün boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Bu kür süresi boyunca bağlayıcı fazın hidrasyon ve polimerizasyon reaksiyonlarının maksimum seviyeye ulaşması hedeflenmiştir.

Numune hazırlık sürecinde dikkat edilen hususlar:

- ✓ Numune, homojen ve düzgün yüzeyli olacak şekilde hazırlanmıştır.
- ✓ Hazırlanan numune eksenel olarak düzgün hizalanmış, herhangi bir eğim veya düzensizlik içermemektedir.
- ✓ Sıkıştırılmış zemin numuneleri belirli bir nem içeriğinde ve laboratuvar ortamında standardize edilmiş koşullarda bekletilmelidir.

Serbest basınç dayanımı deneyi, bilgisayar kontrollü yükleme sistemleri kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilir. Bu deneyde Yüksel Kaya Makina deney cihazı kullanılmıştır. Cihaz, yükleme hızı, yük-deformasyon ölçümleri ve verilerin kaydedilmesi gibi işlemleri otomatik olarak gerçekleştiren bir sistem içermektedir.

Deney sırasında yükleme hızı kritik bir parametre olup, bu çalışmada yükleme hızı 0,8 mm/dk olarak belirlenmiş ve deney süresince sabit tutulmuştur. Yükleme hızının standartlara uygun olarak belirlenmesi, test sonuçlarının karşılaştırılabilirliği açısından büyük önem taşır.



Şekil 17: Zemin Numune İçerikleri (Doğal Zemin, Uçucu Kül, Aktivatör)

Bu çalışmada, uçucu külün etkin bir şekilde aktive edilerek bağlayıcı özellik kazanabilmesi amacıyla yüksek alkaliniteye sahip bir çözelti hazırlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, alkali aktivasyon sürecinde yaygın olarak tercih edilen sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve 10 molar sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmıştır. Sodyum silikat çözeltisinin bileşimi detaylı olarak değerlendirildiğinde, bileşimin yaklaşık %28,65'i silisyum dioksit (SiO_2), %8,85'i sodyum oksit (Na_2O) ve %64,72'si su (H_2O) olmak üzere üç ana bileşenden oluştuğu belirlenmiştir. Bu oranlar, sodyum silikatın hem alkali karakterini hem de çözücü ortam içerisindeki silikat kaynaklı jel oluşum potansiyelini açıklamak açısından önemlidir. Ayrıca bu çözeltinin özgül ağırlığı $1,46 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüş olup, yoğunluğu ile aktivatör sistemine katkı sağlayacak kimyasal taşıyıcılık kapasitesini yansıtmaktadır.

Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanmasında ise yüksek saflık derecesine sahip, ticari olarak temin edilen %98 saflıkta NaOH peletleri kullanılmıştır. Belirli bir molarite hedeflenerek (10 M), dikkatli bir şekilde distile su ile çözündürülerek hazırlanan bu çözeltinin, sistemde yüksek pH seviyesi oluşturarak uçucu kül içerisindeki amorf fazların çözülmesini hızlandırdığı ve alkali ortamda silika ile alüminyum iyonlarının serbest kalmasını kolaylaştırdığı bilinmektedir.

Alkali aktivasyonun başarıya ulaşabilmesi için bu iki farklı çözeltinin uygun oranlarda bir araya getirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan nihai aktivatör çözeltisi, kütlece %50 oranında Na_2SiO_3 çözeltisi ile %50 oranında 10 M NaOH çözeltisinin dikkatli biçimde karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Bu birleşim oranı, sistemde hem yeterli alkalilik sağlayarak çözücülüğü artırmakta hem de jeopolimerleşme reaksiyonları için gerekli

olan silikat bileşenlerini uygun miktarda sisteme dahil etmektedir. Elde edilen bu aktivatör, uçucu külün camsı yapısının parçalanarak reaksiyona girmesini ve bağlayıcı jellerin (örneğin N-A-S-H ve/veya C-A-S-H türleri) oluşmasını teşvik ederek, zemin stabilizasyonu için gerekli dayanımı sağlayan bağlayıcı matrisin gelişmesini mümkün kılmıştır.



Şekil 18: Zemin Numunesi Hazırlama



Şekil 19: Zemin Numuneleri Hazırlama Aşamaları



Şekil 20: Hazırlanan Zemin Numunelerinin Desikatörlerde Kürlenmesi

2.2.4.2. Deneyin uygulanışı

Hazırlanan numune, deney cihazının yükleme tablası üzerine dikkatlice yerleştirilmiştir. Numunenin eksenel olarak hizalanması sağlanarak düzgün bir yükleme yapılması garanti edilmiştir. Deney cihazı, belirlenen yükleme hızında çalıştırılmış ve eksenel basınç uygulanmıştır. Numunenin kırılma noktası belirlenmiş, kırılma anındaki maksimum basınç dayanımı kaydedilmiştir. Gerilme-deformasyon grafiği oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir.



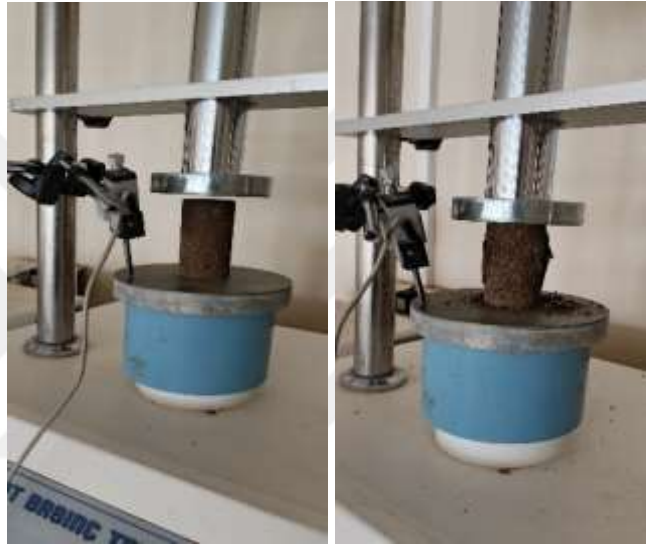
Şekil 21: 1. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 22: 2. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı

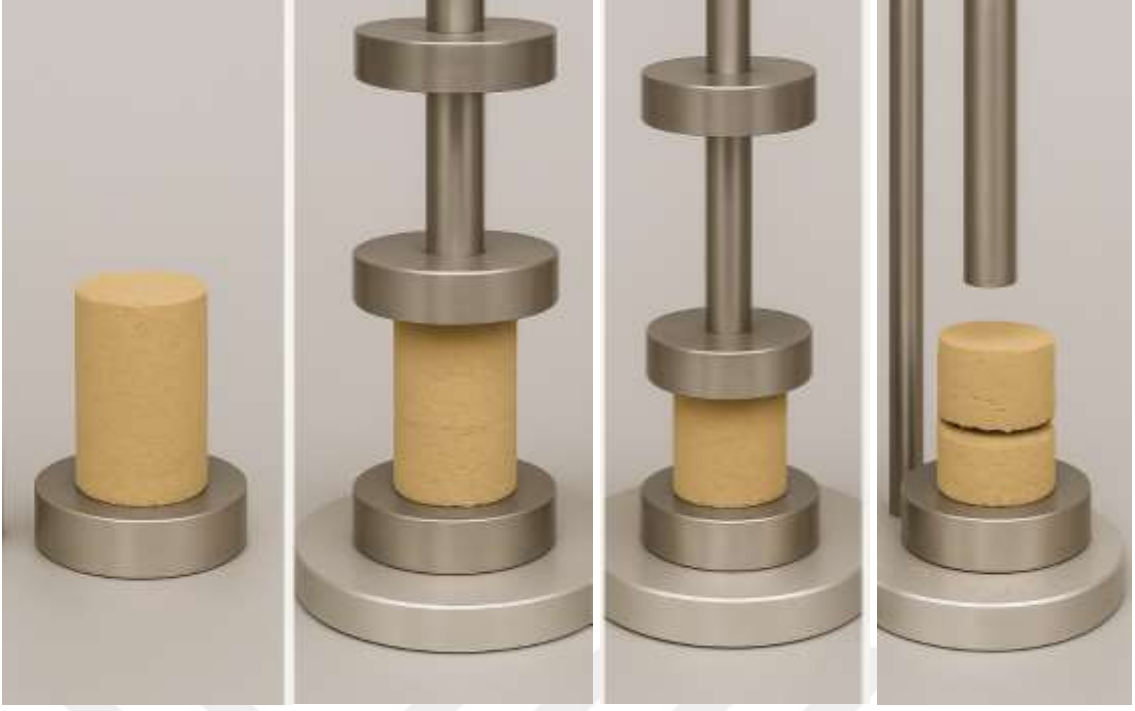


Şekil 23: 3. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 24: 4. Optimizasyon 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı

Serbest basınç dayanımı deneyi, kohezyonlu zeminlerin mühendislik projelerindeki taşıma gücünü ve stabilitesini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar testidir. Deney sonuçları, zeminlerin kayma dayanımı parametrelerinin hesaplanmasında ve mühendislik yapılarının güvenliği açısından önemli bir veri seti sunmaktadır. Deneyin standart prosedürlere uygun şekilde gerçekleştirilmesi, sonuçların güvenilirliğini artırmakta ve mühendislik projelerinde doğru kararlar alınmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 25: Serbest Basınç Dayanımı Testi

2.2.5. Özgöl Ağırlık Deneyi

Zemin mekaniğinde zeminlerin özgül ağırlığının (G_s) belirlenmesi, mühendislik analizleri açısından kritik bir parametredir. Özgül ağırlık, birim hacimdeki zemin katı tanelerinin yoğunluğunu ifade eder ve doygunluk, boşluk oranı, sıkışabilirlik gibi mühendislik özelliklerinin hesaplanmasında önemli bir rol oynar. Serbest halde bulunan bir zeminin, suya göre bağıl yoğunluğunu ifade eden özgül ağırlık, genellikle piknometre yöntemi kullanılarak laboratuvar ortamında belirlenir.

Bu deneyde, 4 No'lu (4.75 mm) elekten elenen zemin numunesinin özgül ağırlığının piknometre kullanılarak belirlenmesi hedeflenmiştir. Piknometre yöntemi, küçük taneli (ince dane) zeminlerin özgül ağırlığını belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar testidir ve yüksek doğruluk sağlar.

2.2.5.1. Deneyin tanımı ve prensibi

Piknometre yöntemi, zemin tanelerinin su içindeki hacminin belirlenerek özgül ağırlığın hesaplanmasına dayanır. Deney sürecinde öncelikle belirli miktarda zemin numunesi suya doygun hale getirilir, ardından piknometreye yerleştirilerek su ile birlikte tartılır. Daha sonra numune fırında kurutulup son ağırlığı belirlenerek, özgül ağırlık hesaplanır.

Deneyin uygulanışı

Numune Hazırlığı: Deney için 4 No'lu elekten elenen 1 kg zemin örneği laboratuvar ortamında alınmıştır. Alınan zemin örneği, homojenliğin sağlanması için iki ayrı tepsiye eşit miktarda bölünmüştür. Numunenin suya doymun hale gelmesi için zeminin üzerini tamamen kaplayacak miktarda su eklenmiş ve 24 saat süreyle bekletilmiştir. 24 saat bekleme süresi sonunda tepsilere bulunan fazla su dikkatlice süzölmüş, böylece numune yüzey kuru hale getirilmiştir.

Piknometrenin Hazırlanması ve Ölçümler: Deneyde kullanılacak olan piknometrelerin boş ağırlıkları tartılmış ve kaydedilmiştir. Piknometre içerisine çizgi seviyesine kadar saf su eklenmiş ve toplam ağırlık kaydedilmiştir. Piknometre daha sonra tamamen boşaltılarak iç yüzeyi kurutulmuştur.

Zemin-Piknometre İşlemleri: Suya doymun hale getirilmiş zemin numunesi kurutulmuş piknometre içerisine dikkatlice yerleştirilmiştir. Piknometre içerisindeki zemin ve piknometrenin toplam ağırlığı hassas terazi ile ölçölerek kaydedilmiştir. Piknometre içerisine, numunenin tamamını kaplayacak ve serbest hava kabarcıklarını giderecek miktarda su eklenmiştir. Piknometre içerisinde homojen bir karışım sağlamak amacıyla iyice çalkalanmış ve hava kabarcıklarının yüzeye çıkması için bir süre beklenmiştir. Piknometre yüzeyinde oluşan köpük ve hava kabarcıkları pamuk yardımıyla dikkatlice temizlenmiştir. Piknometre içerisindeki numune-su karışımının toplam ağırlığı tekrar ölçölerek kaydedilmiştir.

Fırında Kurutma ve Son Ölçümler: Zemin numunesi piknometreden çıkarılmış ve 24 saat boyunca etüvde ($105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta) kurutulmuştur. Tamamen kuruyan numunenin son ağırlığı hassas terazi ile ölçölmüş ve kaydedilmiştir.

2.2.6. Donma-Çözölme Deneyi

Doğal zeminlerin ve mühendislik yapılarında kullanılan malzemelerin dayanıklılığı, çevresel koşullardan doğrudan etkilenmektedir. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde, donma-çözölme döngülerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerinde önemli değışikliklere yol açtığı bilinmektedir. Donma-çözölme sürecinde, zemindeki suyun donması sonucu hacimsel genleşme meydana gelir. Bu genleşme, zemin yapısını gevşetebilir, dayanım kayıplarına neden olabilir ve stabilite sorunlarına yol açabilir. Çözölme aşamasında ise, donmuş suyun erimesiyle birlikte zemin bünyesinde su hareketi başlar ve mukavemet özellikleri değışebilir.

Bu çalışma kapsamında, laboratuvar ortamında donma-çözülme çevrimlerinin zemin numuneleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiş ve mühendislik parametrelerindeki değişimler belirlenmiştir. Deney, donma ve çözülme sıcaklıklarının hassas bir şekilde kontrol edilebildiği otomatik bir test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 26: Donma Çözülme Deneyi Çevrimleri

2.2.6.1. Deneyin amacı ve prensibi

Bu deneyin temel amacı, donma-çözülme çevrimlerinin zemin numunelerinin mekanik dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemektir. Belirlenen farklı çevrim sayıları sonucunda, numunelerde oluşan dayanım kaybı ve deformasyon miktarları serbest basınç dayanımı testleri ile değerlendirilmiştir.

Donma-çözülme sürecinde zemin bünyesindeki su donduğunda, hacimsel genişleme nedeniyle zeminde mikro çatlaklar oluşabilmektedir. Tekrarlanan çevrimler sonucunda bu çatlakların genişleyerek dayanım kaybına neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca, çözülme aşamasında su hareketi ile ince danelerin yer değiştirmesi ve zemin içyapısının bozulması da mukavemet özelliklerinde azalmaya yol açabilir.

Numune hazırlığı

Deneyde kullanılan zemin numuneleri, 28 günlük kür süresini tamamlayan ve mekanik özellikleri stabil hale gelen silindirik örneklerden oluşmaktadır. Zemin numuneleri, standart laboratuvar koşullarında (sabit sıcaklık ve nem seviyesinde) kür süresini tamamlamış ve testler öncesinde ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler, serbest basınç dayanımı deneyine uygun olacak şekilde 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde hazırlanmıştır.

Donma-çözölme deneyinin uygulanması

Deney, donma ve çözölme sıcaklıklarının hassas bir şekilde ayarlanabildiği tam otomatik bir donma-çözölme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Donma sıcaklığı -20°C , çözölme sıcaklığı $+25^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Her bir çevrim süresi 48 saat olacak şekilde programlanmıştır. 24 saat boyunca numuneler -20°C 'de dondurulmuştur. Bunu takiben 24 saat boyunca $+25^{\circ}\text{C}$ 'de çözölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında, numunelere 3, 6, 9 ve 12 çevrim uygulanarak farklı donma-çözölme döngülerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

Serbest basınç dayanımı (unconfined compressive strength- UCS) testleri

Donma-çözölme çevrimleri tamamlanan numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimi belirlemek amacıyla serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney, bilgisayar kontrollü otomatik bir UCS test cihazında yapılmıştır. Test sırasında yükleme hızı 1 mm/dakika olarak sabit tutulmuş ve numune kırılana kadar yükleme devam etmiştir. Deney sonunda, çevrim sayısına bağlı olarak serbest basınç dayanımında meydana gelen değişimler analiz edilmiştir.



Şekil 27: 1. Optimizasyon Donma-Çözölme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 28: 1. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 29: 1. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 30: 1. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 31: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 32: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 33: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 34: 2. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 35: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 36: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 37: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 38: 3. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 39: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 3. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 40: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 6. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 41: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 9. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 42: 4. Optimizasyon Donma-Çözülme 12. Çevrim Serbest Basınç Dayanımı

3. Çevrim (Numune 1–5): Bu çevrimde yer alan numunelerde en yüksek dayanım değerleri yine 1. optimizasyon yöntemiyle elde edilmiştir. En yüksek değer 5,8199 MPa ile numune 3’te gözlenmiştir. Diğer optimizasyon yöntemlerinde (özellikle 2. ve 3. yöntemlerde) düşük dayanım değerleri dikkat çekmektedir. Bu durum, çevrim sayısı henüz düşükken bile

bazı yöntemlerin donma-çözölme etkisine karşı yeterince direnç göstermediğini ortaya koymaktadır.

6. Çevrim (Numune 6–10): Bu çevrim grubunda serbest basınç dayanımı değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Özellikle 4. optimizasyon yönteminde değerler 0,6986–1,2638 MPa aralığına düşmüştür. 1. optimizasyonda ise dayanım görece daha stabil seyretmiştir. Ancak, dayanımda çevrime bağlı bir zayıflama eğilimi başlamıştır. Bu, donma-çözölme döngülerinin tekrarlandıkça bağ yapısında çözümlerin başladığını göstermektedir.

9. Çevrim (Numune 11–15): Bu çevrim sonrası gözlenen dayanım değerleri, önceki çevrimlere göre genel olarak daha düşüktür. Özellikle 2. ve 3. optimizasyon yöntemlerinde dayanım 0,1143–0,2460 MPa seviyelerine kadar gerilemiştir. Bu sonuçlar, düşük dayanım performansına sahip yöntemlerin tekrarlı çevrim etkisine karşı oldukça zayıf olduğunu göstermektedir. 1. optimizasyon yöntemi ise bu çevrimde dahi 2,6198–3,7026 MPa gibi nispeten yüksek değerler sunmuştur.

12. Çevrim (Numune 16–20): En yüksek çevrim grubunda, donma-çözölme etkisinin en belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak dikkat çekici bir şekilde bazı numunelerde (örneğin Numune 19 ve 20), 1. optimizasyonun dayanım düzeyinin halen yaklaşık 2 MPa ve üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, 1. yöntemin bağlayıcı bileşenlerinin uzun süreli çevrimlerde bile dayanıklılığını koruyabildiğini göstermektedir. 4. optimizasyon yöntemi bu çevrimde 1,5486–2,0431 MPa aralığında dayanım göstermiş ve 2. ile 3. optimizasyona kıyasla daha başarılı olmuştur.

Bu veriler ışığında;

- ✓ 1. optimizasyon, tüm çevrimlerde en yüksek dayanımı koruyarak çevrim sayısına bağlı mukavemet kaybını minimumda tutmuştur.
- ✓ 2. ve 3. optimizasyon yöntemlerinde çevrim sayısı arttıkça ciddi bir dayanım kaybı oluşmuş, özellikle 9. çevrim itibarıyla zemin yapısı neredeyse işlevsiz hâle gelmiştir.
- ✓ 4. optimizasyon, 12. çevrimde beklenmedik şekilde görece yüksek değerler vermiştir. Bu durum, bazı numunelerde bağ yapıdaki geç çözölmenin gecikmeli etkisini işaret edebilir.

2.2.7. İslanma-Kuruma Deneyi

Zemin malzemeleri, doğal çevre koşullarına bağı olarak sürekli olarak nem değişimlerine maruz kalmaktadır. Özellikle ıslanma ve kuruma döngüleri, zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli değişimlere neden olabilir. Mühendislik yapılarında kullanılan zeminlerin bu tür çevresel etkilere karşı dayanıklılığının belirlenmesi, uzun vadeli stabilite açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada, ıslanma-kuruma çevrimlerinin laboratuvar ortamında kontrollü olarak uygulanması ve numunelerin mühendislik özelliklerindeki değişimlerin sistematik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, belirlenen zemin numuneleri belirli sürelerde suya daldırılarak ve sonrasında kontrollü bir şekilde kurutularak, doğal çevresel koşulları simüle eden bir deneysel süreç uygulanmıştır.

2.2.7.1. Deneyin amacı ve prensibi

İslanma-kuruma deneyi, zeminlerin su alma ve su kaybetme süreçlerine karşı gösterdiği tepkileri belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bu deneyde, numunelerin belirli sürelerde su içerisinde bekletilmesi, ardından ortam koşullarında kurutulması sağlanarak toplam 12 çevrim uygulanmıştır.

Zemin malzemeleri suya maruz kaldığında, bünyesine su alarak genleşebilir veya plastisite özellikleri değişebilir. Kuruma sürecinde ise, zemin içerisindeki suyun buharlaşması sonucu büzülme meydana gelebilir ve buna bağı olarak hacimsel değişimler, mikro çatlak oluşumları ve mukavemet kayıpları gözlenebilir. Tekrarlanan ıslanma-kuruma döngüleri sonucunda, zeminin mühendislik özelliklerinde önemli bozulmalar meydana gelebilmektedir.

Numune hazırlığı

Deney kapsamında kullanılan zemin numuneleri, standart kür süresi olan 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında muhafaza edilmiştir. Her bir numunenin deney öncesindeki ilk kütlesi elektronik terazi ile hassas bir şekilde tartılmış ve kayıt altına alınmıştır. Numuneler, belirlenen çevrim süreci boyunca su alma ve kuruma işlemlerine tabi tutulmuştur.

İslanma-kuruma deneyinin uygulanması

Hazırlanan numuneler, deney başlangıcında oda sıcaklığındaki kür suyu içerisine tamamen daldırılmıştır. Numuneler, 24 saat boyunca sabit sıcaklıkta su içerisinde bekletilmiş

ve bu süreç boyunca ortam koşulları sabit tutulmuştur. Islanma süresi tamamlandıktan sonra, numuneler su içerisinde çıkarılarak yüzeydeki fazla suyun giderilmesi sağlanmıştır. Numuneler, oda sıcaklığında 24 saat boyunca serbest kuruma ortamına bırakılmıştır. Kuruma sürecinin ardından, numunelerin ağırlıkları tekrar ölçülmüş ve elde edilen veriler kaydedilmiştir. Bu işlem, bir ıslanma-kuruma çevrimi olarak kabul edilmiş ve toplamda 12 çevrim boyunca tekrarlanmıştır. Deney süresince numunelerin kütleindeki değişimler izlenmiş ve her bir çevrimde meydana gelen ağırlık farklılıkları analiz edilmiştir.



Şekil 43: 1. Optimizasyon Islanma-Kuruma Deneyi



Şekil 44: 4. Optimizasyon Islanma-Kuruma Deneyi

2.2.8. Islatma Deneyi

Geoteknik mühendisliğinde, zeminlerin suya maruz kalma durumları, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle suya doymun hale gelen zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler, mühendislik tasarımlarını doğrudan etkileyebilir. Bu bağlamda, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ıslatma deneyleri, zeminlerin suya maruz kalma durumlarında sergiledikleri davranışları incelemek ve bu davranışların mühendislik uygulamalarına etkilerini değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır.

Özellikle tropikal iklim kuşaklarında sıkça karşılaşılan periyodik ve ani taşkın olayları, zemin sistemlerinin uzun vadeli kararlılığını ciddi biçimde tehdit eden doğal etkilere sahiptir. Bu tür bölgelerde, temel altı tabakalarının sürekli suya maruz kalma riski, özellikle derin karıştırma yöntemi (DSM) ile inşa edilen ve 40 metreye kadar ulaşabilen kolonlar açısından dayanıklılık ve mühendislik güvenliği açısından hayati önem taşımaktadır. Zemin stabilizasyonunun sadece başlangıç mukavemetiyle değerlendirilmesi yeterli değildir; aynı zamanda yapıların hizmet ömrü boyunca karşılaşılabileceği suya doygunluk koşulları da dikkate alınmalıdır.

Bu doğrultuda gerçekleştirilen bu deneysel çalışma, su altında kalma durumunun simülasyonuna dayalı olarak stabilize edilmiş zemin numunelerinin suya maruz kalma koşullarında gösterdiği davranışları araştırmayı amaçlamaktadır. Deneysel yaklaşım, özel olarak hazırlanmış ve sabitlenmiş numunelerin belirli sürelerle sürekli suya batırılması esasına dayanmaktadır. Bu işlem, hem doğal su birikintilerinin hem de yeraltı su seviyesindeki değişimlerin laboratuvar ortamında modellenmesini sağlamaktadır.

Çalışmanın ana hedeflerinden biri, suya batırılmış zemin numunelerinde zamanla ortaya çıkabilecek çözülme eğilimlerinin, mukavemet kayıplarının ve su absorpsiyonu davranışlarının belirlenmesidir. Bu bağlamda, su altında gerçekleşen kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin stabilize edilmiş zeminin dayanımına olan etkisi detaylı biçimde incelenmiştir. Deney kapsamında numuneler, sırasıyla 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca tamamen suya batırılarak farklı maruz kalma senaryoları değerlendirilmiştir. Bu sürelerin seçimi, hem kısa vadeli hem de orta vadeli çevresel koşulların temsil edilmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır.

Islatma periyodu tamamlandıktan sonra, her bir numunenin yüzeyindeki serbest su dikkatlice alınmış ve numuneler ıslak (doygun) halde tartılmıştır. Bu sayede su emme kapasitesine ilişkin ilk veriler elde edilmiştir. Ardından, numuneler oda sıcaklığında 24 saat boyunca kurutularak denge nem durumuna ulaşmaları sağlanmış ve kuru ağırlıkları hassas terazilerle ölçülmüştür. Islatma süreci boyunca suyun zemine nüfuz etmesiyle oluşan su emme miktarı, numunelerin kuru ve doymuş ağırlıkları arasındaki fark oranı ile hesaplanmıştır.

Bu hesaplama, su emme faktörü (WAF) olarak adlandırılan ve aşağıda denklem (2) ile verilen bağıntı yardımıyla belirlenmiştir:

$$WAF = \frac{W_{doygun} - W_{kuru}}{W_{kuru}} \quad (\text{Denklem 2})$$

Burada, W_{doygun} numunenin suya doymuş haldeki kütlesini, W_{kuru} ise tamamen kurutulmuş halindeki kütleyi temsil etmektedir. Bu oran, zemin numunesinin ne ölçüde su

absorbe ettiğini ortaya koymakta ve malzemenin çevresel su etkilerine karşı direncini değerlendirmek açısından önemli bir parametre sunmaktadır.

İzleyen aşamada, kurutulmuş numuneler ASTM D2166 standardı çerçevesinde tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testine tabi tutulmuş ve mukavemet performansındaki değişimler sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Böylece, ıslatma koşullarının neden olduğu mekanik zayıflama veya direnç kaybı gibi etkiler de doğrudan gözlemlenebilmiştir.

2.2.8.1. Islatma deneyinin amacı ve önemi

Islatma deneyi, zemin numunelerinin suya doygun hale getirilerek, su içeriğindeki artışın zemin özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlar. Bu deney, özellikle aşağıdaki durumların değerlendirilmesi için önemlidir:

- ✓ Taşıma Kapasitesi: Suya doygun zeminlerin taşıma kapasitesindeki olası azalmaların belirlenmesi.
- ✓ Şişme ve Büzülme Davranışları: Zeminlerin su alımıyla genleşme (şişme) veya su kaybıyla büzülme potansiyellerinin tespiti.
- ✓ Stabilitate Analizleri: Suya maruz kalan zeminlerin kayma dayanımı ve stabilite özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi.

Bu tür değerlendirmeler, özellikle baraj, yol, tünel ve benzeri altyapı projelerinde zemin-su etkileşimlerinin doğru bir şekilde anlaşılması ve uygun mühendislik önlemlerinin alınması açısından hayati öneme sahiptir.

Deneyin uygulanışı

Islatma deneyinin laboratuvar ortamında uygulanması, belirli adımların titizlikle izlenmesini gerektirir:



Şekil 45: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Islatma 1. Gün Su Küvetindeki Görünümleri

Numune hazırlığı

- ✓ Numune Seçimi: Deney için temsil edici özelliklere sahip zemin numuneleri seçilir.
- ✓ Standartlara Uygunluk: Numuneler, deneyin amacına ve ilgili standartlara uygun boyut ve şekillerde hazırlanır.

Başlangıç ölçümleri

- ✓ Kuru Ağırlık Tespiti: Hazırlanan numunelerin başlangıçtaki kuru ağırlıkları hassas teraziler kullanılarak ölçülür ve kaydedilir.
- ✓ Diğer Fiziksel Özellikler: Gerekirse, numunelerin hacim, yoğunluk ve diğer fiziksel özellikleri de belirlenir.

Islatma süreci

- ✓ Suya Daldırma: Numuneler, oda sıcaklığındaki su dolu kaplara tamamen batacak şekilde yerleştirilir.
- ✓ Bekletme Süresi: Numuneler, 24 saat boyunca su içerisinde bekletilerek suya doymun hale getirilir.

Son ölçümler ve analiz

- ✓ Islatma Sonrası Ağırlık: Süre sonunda, numuneler sudan çıkarılır, yüzeylerindeki fazla su dikkatlice alınır ve ıslatma sonrası ağırlıkları ölçülür.
- ✓ Şişme/Büzülme Analizi: Numunelerin hacimsel değişimleri, şişme veya büzülme eğilimleri değerlendirilir.

- ✓ Mukavemet Testleri: Gerekirse, numunelerin mekanik dayanım özelliklerindeki değişimler (örneğin, serbest basınç dayanımı) test edilir.

Islatma deneyinin zemin numuneleri üzerindeki etkileri

Islatma deneyleri sonucunda, zemin numunelerinde çeşitli fiziksel ve mekanik değişimler gözlemlenebilir:

- ✓ Su İçeriği Artışı: Numunelerin su içeriği artar, bu da zeminlerin plastisite ve kıvam özelliklerini etkileyebilir.
- ✓ Hacimsel Değişimler: Özellikle killi zeminlerde, su alımıyla birlikte şişme; su kaybıyla büzülme meydana gelebilir.
- ✓ Mukavemet Azalması: Suyu doygun hale gelen zeminlerin kayma dayanımı ve genel mukavemet özelliklerinde azalmalar olabilir.
- ✓ Taşıma Kapasitesi Düşüşü: Artan su içeriği, zeminlerin taşıma kapasitesinde düşüslere neden olabilir.

Bu etkilerin boyutu, zeminin türüne, mineralojik yapısına ve mevcut gerilme koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.



Şekil 46: 1. Optimizasyon Islatma 3 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 47: 1. Optimizasyon Islatma 7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 48: 1. Optimizasyon Islatma 14 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 49: 1. Optimizasyon Islatma 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



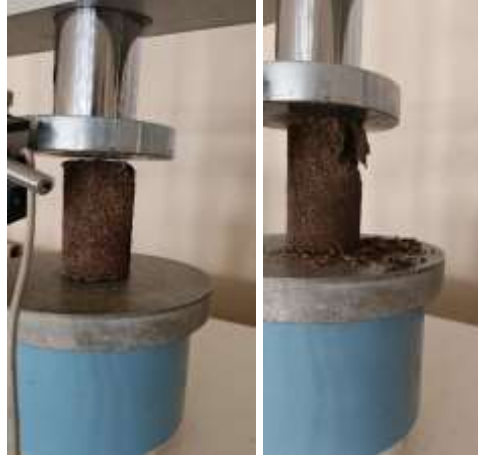
Şekil 50: 2. ve 3. Optimizasyon Islatma Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 51: 4. Optimizasyon Islatma 3 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 52: 4. Optimizasyon Islatma 7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 53: 4. Optimizasyon Islatma 14 Günlük Serbest Basınç Dayanımı



Şekil 54: 4. Optimizasyon Islatma 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı, zeminlerin likit limit, plastik limit ve büzülme limiti değerlerinin belirlenmesi için kapsamlı deneyler gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar, zeminlerin su içeriğine bağlı olarak gösterdiği davranışların anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır. Benzer şekilde, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı, zeminlerin suya maruz kalma durumlarında sergiledikleri mekanik ve fiziksel değişimleri inceleyen deneysel çalışmalar yürütmüştür. Bu araştırmalar, zeminlerin su içeriğindeki artışın taşıma kapasitesi ve stabilite üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymuştur. Bu tür çalışmalar, zeminlerin suyla etkileşimlerinin anlaşılması ve mühendislik uygulamalarında güvenli tasarımların yapılması açısından büyük önem taşımaktadır.

2.2.9. Karbon Ayak İzi

2.2.9.1. Zemin stabilizasyonunun çevresel etkileri ve karbon ayak izi

Zemin stabilizasyonu, inşaat mühendisliğinde, özellikle zemin taşıma kapasitesini artırmak ve oturma gibi problemleri azaltmak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Geleneksel zemin stabilizasyon yöntemleri, çimento, kireç, asfalt gibi bağlayıcı malzemelerle gerçekleştirilmekte olup, bu malzemelerin üretimi sırasında yüksek enerji tüketimi ve sera gazı salınımı gibi çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Çimento üretimi, küresel karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %7'sini oluşturmakta, bu da çevresel sürdürülebilirliği ciddi şekilde tehdit etmektedir (Scrivener vd., 2018). Aynı şekilde, kireç üretimi de yüksek enerji tüketimi gerektiren ve önemli düzeyde karbon salınımına neden olan bir süreçtir (Reddy vd., 2020). Bu bağlamda, zemin stabilizasyonu uygulamalarında karbon ayak izinin minimize edilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir.

Alternatif malzemelerin kullanılması, karbon ayak izini azaltma açısından önemli bir çözüm sunmaktadır. Endüstriyel yan ürünler, jeopolimerler, biyopolimerler ve karbon negatif malzemeler gibi çevre dostu alternatifler, geleneksel stabilizasyon yöntemlerine karşı önemli avantajlar sunmakta ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Latifi vd., 2017; Davidovits, 2013). Bu alternatiflerin, geleneksel bağlayıcı malzemelere kıyasla karbon salınımı ve enerji tüketimi açısından daha düşük değerler sunduğu gözlemlenmiştir.

2.2.9.2. Deneysel uygulama süreci

Zemin stabilizasyonunun karbon ayak izini minimize etmek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar hem çevresel hem de mühendislik açısından başarı elde etmek için çeşitli aşamalardan geçmektedir. Deneysel süreç, öncelikle zemin örneklerinin belirlenmesiyle başlar. Bu örnekler, zemin tipine göre seçilir ve laboratuvar ortamında çeşitli stabilizasyon malzemeleri ile işlenir.

Zemin örneklerinin hazırlanması

İlk aşamada, kullanılacak zemin örnekleri seçilir ve fiziksel özellikleri belirlenir. Zemin örneklerinin nem, su tutma kapasitesi, plastik limit, sıvı limit gibi temel parametreleri ölçülür. Bu veriler, stabilizasyon malzemelerinin etkili olup olmadığının belirlenmesinde önemlidir.

Stabilizasyon malzemelerinin seçimi

Çalışmalar, geleneksel bağlayıcılar (çimento, kireç) ve alternatif düşük karbonlu malzemeler (jeopolimerler, biyopolimerler, endüstriyel yan ürünler) ile yapılır. Bu malzemelerin, zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılır. Alternatif malzemelerin kullanımı, karbon salınımını azaltma potansiyeline sahipken, mekanik dayanımda herhangi bir kayıp yaşanıp yaşanmadığı da kontrol edilir.

Deneyisel uygulama ve karbon ayak izi hesaplamaları

Zemin stabilizasyonu deneylerinde, stabilizatör malzeme ile karıştırılan zemin örneklerinin kompresyon testleri, çekme dayanımı ve su geçirmezlik özellikleri gibi mühendislik özellikleri ölçülür. Ayrıca, her bir stabilizatör malzeme için kullanılan enerji ve emisyonlar hesaplanarak karbon ayak izi değerlendirilir. Bu değerlendirme, CO₂ emisyonlarını azaltmak amacıyla hangi stabilizasyon yönteminin daha etkili olduğunu belirlemek için kullanılır.

Sonuçların değerlendirilmesi

Deneyisel süreç tamamlandığında, elde edilen veriler analiz edilerek kullanılan malzemelerin çevresel ve mekanik performansları karşılaştırılır. Bu aşamada, geleneksel çimento ve kireçle yapılan stabilizasyon uygulamaları ile alternatif düşük karbonlu malzemeler arasındaki farklar ortaya konur. Alternatif malzemelerin daha düşük karbon ayak izine sahip olup, mühendislik özellikleri açısından geleneksel malzemelerle benzer performanslar sergileyip sergilemediği değerlendirilir.

Sürdürülebilirlik analizi

Son aşama olarak, uygulanan stabilizasyon yönteminin sürdürülebilirlik açısından ekonomik ve çevresel faydaları gözden geçirilir. Endüstriyel yan ürünlerin ve biyopolimerlerin kullanımı hem ekonomik olarak maliyetleri düşürürken hem de çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlar.

Zemin stabilizasyonu alanında yapılan deneyisel çalışmalar, çevresel sürdürülebilirliği artırmak için düşük karbonlu alternatiflerin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Geleneksel bağlayıcıların yerini alacak olan bu alternatifler, sadece karbon emisyonlarını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda zeminlerin mekanik performansını da iyileştirmektedir. Bu

bağlamda, karbon ayak izinin azaltılması, zemin mühendisliği uygulamalarında kritik bir hedef olarak kalmaktadır. Gelecek çalışmalarda, karbon negatif malzemelerin kullanımı daha da yaygınlaşarak, çevresel etkiler üzerinde daha büyük bir iyileşme sağlanabilir.

2.2.10. Yanıt Yüzey Metodu (RSM)

Yanıt yüzey yöntemi (RSM), istatistiksel modelleme ve deney tasarımı yaklaşımlarını bir araya getirerek bir veya birden fazla bağımsız değişkenin, belirli bir yanıt (response) değişkeni üzerindeki etkilerini nicel olarak analiz etmeye olanak tanıyan güçlü bir optimizasyon tekniğidir. RSM, özellikle mühendislik alanlarında deneysel çalışmalarda karmaşık sistem davranışlarının modellenmesinde, süreç parametrelerinin optimize edilmesinde ve deney maliyetlerinin düşürülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntem, geleneksel tek değişkenli analizlerin aksine, çok değişkenli sistemlerde değişkenler arası etkileşimleri dikkate alarak daha gerçekçi ve verimli modellerin kurulmasına olanak sağlar. Uygulamada, genellikle ikinci dereceden (quadratic) regresyon modelleri oluşturularak, sistemin yanıt yüzeyi matematiksel olarak tanımlanır. Bu yüzey üzerinden elde edilen sonuçlar yardımıyla, yanıt değişkeninin maksimum veya minimum değer aldığı koşullar belirlenebilir (Montgomery, 2017).

İnşaat mühendisliği uygulamalarında RSM, zemin iyileştirme, çimento katkı karışımların mekanik özelliklerinin tahmini, optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve dayanım analizleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle çimento, kireç ve uçucu kül gibi bağlayıcı malzemelerin oranlarının optimize edilmesi süreçlerinde, sınırlı sayıda deneyle yüksek doğrulukta öngörü yapılmasını sağlamaktadır (Kumar vd., 2021). Ayrıca, RSM'nin yanıt değişkeni üzerinde etkili olan faktörlerin karşılıklı etkileşimini üç boyutlu yüzey grafiklerinde görselleştirmesi, mühendislik yorumlarını daha sezgisel hale getirmektedir.

RSM'nin uygulanmasında en çok tercih edilen deney tasarımı türlerinden biri, Box-Behnken ve Merkezi Bileşik Tasarım (Central Composite Design-CCD) yöntemleridir. Bu tasarımlar, deney sayısını minimize ederken modelin istatistiksel anlamlılığını da korur (Myers vd., 2016). Modelleme sonucunda elde edilen yanıt yüzey denklemi hem analiz sürecinin hem de saha uygulamalarının yönlendirilmesinde etkin bir rol oynar.

Günümüzde RSM, yapay zekâ yöntemleriyle de entegre edilerek daha karmaşık problemlere çözüm üretme potansiyelini artırmaktadır. Örneğin, genetik algoritmalar veya

yapay sinir ağıları ile kullanılarak melez optimizasyon stratejileri geliştirilebilmektedir (Gha SEM i & Hataf, 2019).

Bu çalışmanın ilgili bölümünde, deneysel verilerin analizinde kullanılan istatistiksel yaklaşım olarak Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology – RSM) tercih edilmiştir. RSM, çok değişkenli sistemlerde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri modellemek, analiz etmek ve optimize etmek amacıyla yaygın biçimde kullanılan güçlü bir regresyon analiz tekniğidir. Bu bağlamda, çalışmanın amacı; yalnızca tek bir çıktıyı maksimize etmekten ziyade, çeşitli mühendislik ve çevresel parametreleri göz önünde bulundurarak sistemin en uygun koşullar altında performans göstermesini sağlayacak bağımsız değişken kombinasyonlarını belirlemektir.

Analiz sürecinde, deneysel tasarım ve regresyon modellemesi işlemleri, ileri düzey istatistiksel analiz kabiliyetine sahip olan Design-Expert 12 adlı özel yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım, çok faktörlü deney tasarımlarını yapılandırma, elde edilen sonuçları analiz etme ve optimize etme konusunda kullanıcıya geniş olanaklar sunmaktadır.

Bu çalışmada optimize edilmesi hedeflenen üç temel bağımsız değişken tanımlanmıştır:

- ✓ X_1 : Aktivator miktarının, uçucu kül ve zemin karışımının kuru kütlesine oranı (aktivatör/(UK+Zemin)),
- ✓ X_2 : Uçucu kül miktarının zemin miktarına oranı (UK/Zemin),
- ✓ X_3 : Sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltisinin, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisine oranı ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$).

Bu parametrelerin seçilmesinin temel gerekçesi, sistemin jeopolimerleşme kapasitesi ve bağlayıcılık potansiyeli üzerinde doğrudan belirleyici olmalarıdır. Uçucu kül içeriği, bağlayıcı jellerin oluşmasında rol oynayan alümina ve silika bileşenlerinin mevcudiyetini belirlerken; aktivatör oranı, bu bileşenlerin çözünürlüğünü ve polimer zincirlerinin oluşumunu kontrol eden reaksiyonların etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Benzer şekilde, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı da alkali ortamın kimyasal dengesini belirleyerek sistemin reaktifliğini düzenlemektedir. Bu değişkenler, daha önce yapılmış birçok stabilizasyon ve jeopolimer çalışmasında da kritik optimizasyon parametreleri olarak değerlendirilmiş olup, bu yönüyle çalışmanın karşılaştırmalı analiz potansiyelini artırmaktadır.

Çalışmada yanıt (bağımlı) değişkenler olarak üç temel çıktı belirlenmiştir:

- ✓ Tek eksenli basınç dayanımı (UCS, MPa),
- ✓ Karbon emisyon miktarı (kgCO₂/m³),
- ✓ Maliyet (\$/m³).

Bu üç parametre, zemin iyileştirme uygulamalarında hem mühendislik performansını hem de çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği temsil eden kritik çıktılar olarak değerlendirilmiştir.

RSM'nin temel prensibi, bağımsız değişkenler ile yanıtlar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki kurmak ve bu ilişki üzerinden sistem davranışını öngörmeye olanak tanıyan bir matematiksel model inşa etmektir. Bu amaçla kullanılan genel model formu, aşağıda denklem 3 ile verilmiştir:

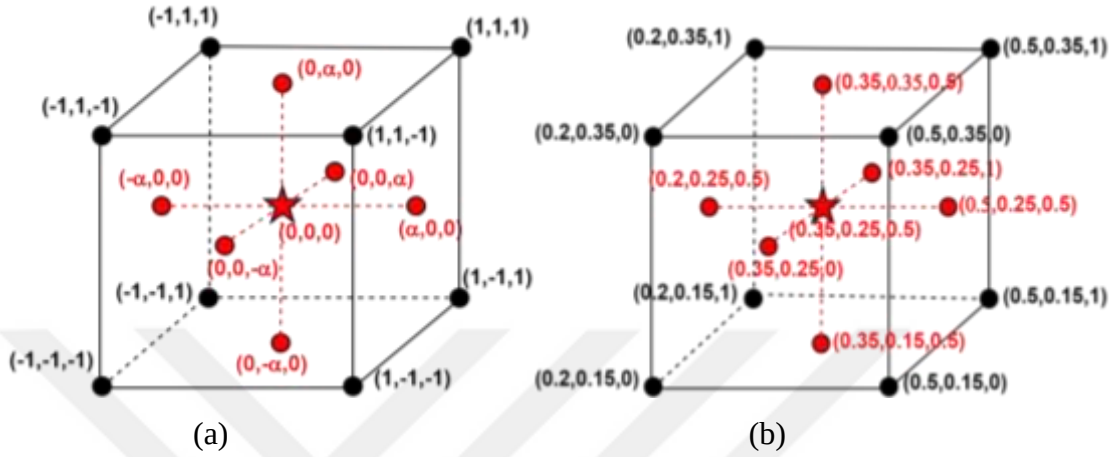
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Denklem 3}$$

Bu denklemde:

- ✓ y, modellenen yanıt değişkenini temsil eder,
- ✓ β_0 , sabit terimi,
- ✓ β_i , bağımsız değişkenlerin (x_i) birinci dereceden (doğrusal) etkisini,
- ✓ β_{ii} , her bir değişkenin ikinci dereceden (kuadratik) etkisini,
- ✓ β_{ij} , x_i ve x_j değişkenleri arasındaki iki değişkenli etkileşim etkisini ifade eder,
- ✓ ε ise modele dahil edilemeyen rastgele hata terimidir.

Bu model sayesinde, sadece her bir bağımsız değişkenin sistem üzerindeki bireysel etkisi değil, aynı zamanda değişkenlerin birbiriyle olan karşılıklı etkileşimleri de nicel olarak değerlendirilebilir. Özellikle geoteknik ve malzeme mühendisliği gibi disiplinlerde, bu tür etkileşimlerin sistem davranışı üzerindeki etkisi kritik öneme sahiptir. Uygun şekilde yapılandırılmış bir deney tasarımı ve bu tasarıma dayalı olarak yürütülen istatistiksel analizler, zemin stabilizasyonuna yönelik çalışmalarda yalnızca optimum bağlayıcı bileşimini belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda çevresel etkiyi ve ekonomik uygulanabilirliği de bütünleşmiş biçimde ele almayı mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir mühendislik çözümlerinin geliştirilmesi açısından önemli bir metodolojik zemin sunmaktadır (Srinivasa vd., 2023).

Optimizasyon, RSM ile oluşturulan deneysel tasarım matrisi dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu aşamada $\alpha=1$ için Yüz Merkezli Bileşik Tasarım (FCCD) kullanılmıştır. Şekil 55, FCCD yapısıyla (Şekil 55a) ve gerçek (Şekil 55b) kodlanmış test noktalarını göstermektedir.



Şekil 55: Tasarım Matrisinin FCCD Yapısı (a) Kodlanmış Değerler, (b) Gerçek Değerler

Çalışmada deneysel tasarımın oluşturulması süreci, istatistiksel modelleme kapsamında Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) çerçevesinde yapılandırılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan deneysel tasarım matrisi, araştırmada etkisi analiz edilmek istenen bağımsız değişkenlerin belirli düzey aralıklarında tanımlanmasına dayanmaktadır. Özellikle faktöriyel temelli merkezi bileşik tasarım (Central Composite Design- CCD) yaklaşımı çerçevesinde oluşturulan matris, değişkenlerin minimum, maksimum ve merkez noktalarını içerecek Şekil 55'te yapılandırılmıştır. Bu yapı sayesinde hem lineer hem de ikinci dereceden etkilerin modellenebilmesi mümkün hâle gelmiştir.

Tasarım matrisinin oluşturulmasında her bir bağımsız değişkenin deneysel düzeyleri, α (alfa) katsayısına bağlı olarak tanımlanmış ve bu katsayıya göre kodlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan faktöriyel merkezli dairesel tasarımda (FCCD), α değeri 1 olarak kabul edilmiştir. Bu durum, her bir faktör için deneysel seviyelerin kodlanmasında sabit bir düzey aralığının kullanılmasını ifade eder. Bu bağlamda bağımsız değişkenler, α katsayısı doğrultusunda -1, 0 ve +1 olmak üzere üç farklı düzeyde tanımlanmıştır. Burada -1 değeri, ilgili değişkenin deneysel aralıktaki minimum seviyesini; 0 değeri, orta noktayı (yani ortalama değeri); +1 değeri ise maksimum seviyeyi temsil etmektedir.

Bu sistematik düzeylendirme sayesinde her bir bağımsız değişkenin deneysel etki alanı optimize edilmiş, aynı zamanda modelin ikinci dereceden etkileri ve faktörler arası etkileşimleri anlamlı biçimde değerlendirilmiştir. Deneysel tasarımın bu şekilde yapılandırılması, model doğruluğunu ve istatistiksel geçerliliği artırmanın yanı sıra optimum performans koşullarının belirlenmesine de olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada analiz edilen bağımsız değişkenlerin minimum, orta ve maksimum düzeylerine ilişkin detaylar Tablo 10’da özetlenmiş olup, bu değerler tasarım matrisinde hesaplamalara esas alınarak tüm deneysel kombinasyonların oluşturulmasında referans alınmıştır. Böylelikle hem tekil değişken etkileri hem de çoklu değişken kombinasyonlarının yanıtlar üzerindeki etkisi çok yönlü Şekil 55’te analiz edilmiştir.

Tablo 10: Tasarım Matrisindeki Bağımsız Değişkenlerin Üst, Alt ve Merkez Değerleri

Seviyeler	Kodlanmış Faktörler			Gerçek Faktörler		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
Üst	1	1	1	0,50	0,15	1
Merkez	0	0	0	0,35	0,25	0,5
Alt	-1	-1	-1	0,20	0,35	0

Bu çalışmada deneysel modellemenin temelini oluşturan tasarım matrisi, üç temel sayısal bağımsız değişkenin dikkate alındığı toplam 48 ayrı çalıştırmadan (deney koşulundan) meydana gelmektedir. Bu yapı, istatistiksel anlamda yüksek güvenilirliğe sahip bir analiz ortamı oluşturmayı hedeflemiş ve her bir faktörün hem bireysel hem de etkileşimli etkilerini değerlendirmek üzere planlanmıştır. Deneysel matris, toplamda 14 farklı faktöriyel tasarım noktasının her biri için üçer tekrar yapılacak şekilde yapılandırılmış; buna ek olarak, modelde ortaya çıkabilecek hata terimlerinin güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesini sağlamak amacıyla bir merkez noktasında altı tekrarlı ölçüm yapılması planlanmıştır.

Deneysel tasarım kapsamında elde edilen çıktı parametreleri (yanıt değişkenleri) üç başlık altında değerlendirilmiştir. Bunlar sırasıyla; Y₁: numunelerin 28 günlük kürlenme süreci sonunda elde edilen sınırsız (serbest) basınç dayanımı (Unconfined Compressive Strength-UCS), Y₂: 1 m³ hacmindeki bağlayıcı zemin karışımına karşılık gelen karbon dioksit (CO₂) emisyonu ve Y₃: yine 1 m³’lük üretim bazında hesaplanan maliyet değeridir. Bu üç yanıt değişkeni, tasarımın çok amaçlı optimizasyonuna yönelik olarak hem bireysel hem de bütünsel performans değerlendirmeleri için kullanılmıştır.

Deneysel matris doğrultusunda her bir çalıştırma (koşul), üç bağımsız değişkenin (örneğin; aktivatör oranı, uçucu kül oranı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı gibi) belirli düzeylerde sabitlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Belirlenen faktör seviyelerine göre, her çalıştırma için homojen şekilde hazırlanmış zemin-bağlayıcı karışımı kullanılarak, 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler üretilmiştir. Bu boyutlar, hem standart UCS testi için uygunluk sağlamak hem de kütleme sürecinde karışım davranışlarını temsili düzeyde ortaya koymaktadır.

28 günlük nem kontrollü kür sürecinin tamamlanmasının ardından, numunelere UCS testi uygulanmış ve bu ölçümler sonucunda her çalıştırma için Y_1 değeri elde edilmiştir. Diğer yandan, Y_2 (CO_2 emisyonu) ve Y_3 (maliyet) yanıtları doğrudan deneysel olarak ölçülememiş; bunun yerine, her çalıştırmada kullanılan bağlayıcı bileşenlerin oranları, üretim miktarları ve çevresel faktörler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, literatürde belirtilen birim karbon emisyon değerleri ve bileşen bazlı maliyet girdileri esas alınarak yapılmıştır. Böylece her çalıştırma için hem çevresel hem de ekonomik boyutlar anlamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Çalışmada oluşturulan kapsamlı tasarım matrisine ilişkin veriler, Tablo 11 içerisinde özetlenmiş olup, her bir deney kombinasyonuna karşılık gelen bağımsız değişken seviyeleri ve yanıt değerleri Tablo içerisinde açıkça sunulmuştur. Tablonun tamamlayıcı ve genişletilmiş hâli, çalışmanın ekler bölümünde detaylı biçimde yer almaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, elde edilen bulguların hem sayısal modelleme hem de optimizasyon uygulamaları açısından doğruluğu güvence altına alınmıştır.

Tablo 11: FCCD Tabanlı Deneysel Tasarım Matrisi

Çalışmalar	Yoğunluk (mg/m^3)	Bağımsız Değişkenler			Yanıtlar		
		X_1	X_2	X_3	Y_1 (MPa)	Y_2 (kgCO_2/m^3)	Y_3 ($\$/\text{m}^3$)
1	1.64	0.2	0.15	0	0.148	110.82	154.53
2	1.66	0.2	0.15	0	0.167	110.82	154.54
3	1.65	0.2	0.15	0	0.167	110.82	154.53
4	1.54	0.5	0.15	0	0.225	112.34	175.13
.	.	.	.	.	.	.	.
47	1.65	0.35	0.25	0.5	1.192	153.38	156.30
48	1.54	0.35	0.25	0.5	1.224	153.39	156.30

2.2.11. X-ışını Floresansı (XRF)

X-ışını floresansı (XRF) analizi, özellikle inşaat mühendisliğinde kullanılan doğal ve yapay yapı malzemelerinin elementel bileşimini hızlı, hassas ve tahribatsız bir şekilde belirlemek amacıyla kullanılan etkin bir analiz yöntemidir. Temel prensibi, numuneye yüksek enerjili X-ışınlarının gönderilmesi ve bu ışınlarla uyarılan atomların karakteristik ikincil (floresan) X-ışınları yayması esasına dayanır. Bu floresan ışınlar, numunedeki elementlerin türünü ve miktarını doğrudan verir (Beckhoff vd., 2006).

XRF analizinin en önemli avantajı, karmaşık örnek matrislerinde bile hem majör (örneğin Ca, Si, Al, Fe) hem de minör ve eser miktardaki (örneğin Sr, Zr, Cr, Mn) elementlerin tespitine olanak sağlamasıdır. Özellikle çimento, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, doğal puzolanlar ve katkılı bağlayıcı sistemlerde bileşimsel karakterizasyon için yaygın biçimde kullanılmaktadır (Taylor, 1997; Gencil vd., 2014).

XRF yöntemiyle elde edilen oksit bazlı analiz sonuçları (örneğin CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ gibi), çimento ve puzolanların reaktivite potansiyelinin belirlenmesi açısından oldukça kritiktir. Örneğin SiO₂ ve Al₂O₃ oranlarının yüksekliği, bir puzolanın çimento matrisinde potansiyel olarak daha fazla reaksiyona girebileceğini ve dayanımı olumlu etkileyebileceğini göstermektedir (Mehta & Monteiro, 2014). Bu bağlamda, XRF verileri; bağlayıcı malzemelerin sınıflandırılması, kalite kontrolü, çevresel uygunluk analizleri ve karışım tasarımında karar destek aracı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, XRF analizi çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bilgiler sağlar. Özellikle atık bazlı malzemelerin (örneğin inorganik endüstriyel atıklar, kül, cüruf) yapı malzemesi olarak kullanımı planlandığında, ağır metal içeriğinin tespiti kritik öneme sahiptir. Pb, Zn, Cu, Cr gibi toksik elementlerin seviyeleri XRF ile güvenilir biçimde belirlenebilir (Pappu vd., 2007).

Modern XRF cihazları, portatif versiyonlarıyla da şantiye ortamında yerinde ölçümler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle kültürel miras yapı malzemelerinin korunması, restorasyonu ve yeniden kullanımı gibi uygulamalarda, yerinde hızlı analizler ile malzeme kaynaklarının belirlenmesine olanak tanır (Shugar & Mass, 2012). XRF analizi, inşaat mühendisliği alanında malzeme bilimi, çevresel uygunluk ve kalite kontrol eksenlerinde çok yönlü katkılar sunan, güvenilirliği yüksek ve sürdürülebilir mühendislik uygulamalarıyla uyumlu bir analitik tekniktir.

2.2.12. X-ışını Difraksiyonu (XRD)

X-ışını difraksiyonu (XRD), inşaat mühendisliği alanında kullanılan çimento esaslı bağlayıcılar, katkılı kompozitler ve puzolanlar gibi malzemelerin kristal yapılarının ve faz bileşimlerinin belirlenmesinde temel karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Bu teknik, özellikle çimento hidratasyon ürünlerinin oluşum sürecinin takibi, ikincil fazların tayini ve katkı maddeleri ile oluşan yeni fazların tanımlanması açısından kritik öneme sahiptir (Taylor, 1997).

XRD analizinin temel prensibi, bir kristal yapıdaki atom düzlemlerine gelen X-ışınlarının Bragg yasası doğrultusunda kırılması ve bu kırınım desenlerinin analiz edilmesidir. Difraksiyon paternindeki her bir pik, belirli bir kristal düzleme karşılık gelir ve bu paternler karşılaştırmalı olarak analiz edilerek mevcut fazlar tanımlanabilir (Cullity & Stock, 2001). Kristal yapıların bu şekilde doğrudan ve tahribatsız belirlenebilmesi, XRD'yi özellikle bağlayıcı sistemlerin faz analizinde vazgeçilmez kılmaktadır.

Çimento hidratasyon ürünleri (örneğin kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), etrenjit, monokalsiyum alüminat hidratlar) ve karbonatlaşma ile oluşan kalsit gibi ikincil fazlar XRD ile kolaylıkla tanımlanabilir. Özellikle 2θ açılarında 18° , 34° ve 47° civarında gözlemlenen pikler portlandit varlığını, 29° civarındaki yoğun pik ise kalsit fazını göstermektedir (Lothenbach vd., 2008).

XRD analizi sadece mevcut fazları tanımlamakla kalmaz, aynı zamanda zamanla oluşan faz dönüşümlerini de izlemeye imkân tanır. Bu yönüyle özellikle katkı malzemelerinin (örneğin uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu, zeolit) puzolanik reaksiyonları sonucunda meydana gelen faz değişimlerinin kantitatif olarak takibi mümkündür (Snellings vd., 2016). Böylece, katkı maddelerinin çimento matrisine etkisi somut ve bilimsel verilerle ortaya konabilir. Ayrıca son yıllarda geliştirilen Rietveld analiz yöntemi ile XRD verilerinin kantitatif olarak işlenmesi, sadece nitel değil, aynı zamanda faz oranlarının yüzdesel dağılımının belirlenmesini de mümkün kılmıştır. Bu durum, özellikle araştırma amaçlı yapılan karışım optimizasyonlarında oldukça değerli bilgiler sunar (Scrivener vd., 2004). XRD, yapı malzemelerinin faz bileşimi, hidratasyon ürünleri, karbonatlaşma düzeyi ve katkı reaktivitesi gibi birçok önemli özelliğini belirlemede inşaat mühendisliği araştırmaları için temel bir analiz yöntemidir. Doğrudan mikroyapı-makroperformans ilişkisini kurmaya yardımcı olan bu teknik, özellikle dayanıklılık, dayanım ve çevresel uygunluk gibi kriterlerin bilimsel değerlendirilmesinde kritik rol oynar.

Doğal ham zemin, uçucu kül ve optimizasyonlara ait XRD sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

2.2.13. Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope – SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope – SEM), inşaat mühendisliğinde kullanılan çimento esaslı malzemelerin, katkı maddelerinin ve kompozit sistemlerin mikroyapısal karakterizasyonunda sıklıkla başvuru alan, yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme tekniğidir. Bu yöntem, özellikle malzeme performansı ile mikroyapı arasındaki ilişkinin kurulmasında vazgeçilmez bir rol oynamaktadır (Scrivener vd., 2004).

SEM analizinin temel prensibi, numune yüzeyine odaklanmış bir elektron demetinin gönderilmesi ve bu elektronların malzeme ile etkileşiminden kaynaklanan sekonder elektronların toplanması esasına dayanır. Bu etkileşimler sonucunda, numunenin yüzey morfolojisi, gözenek yapısı, çatlak oluşumları ve faz ayrımları mikrometre hatta nanometre düzeyinde görüntülenebilir (Goldstein vd., 2017).

Çimento pastası, harç ve beton gibi kompleks yapıları malzemelerde, hidrasyon ürünlerinin morfolojisinin gözlemlenmesi için SEM kritik bir araçtır. Örneğin C–S–H jelinin iğnemi yapısı, portlandit kristallerinin tabakamsı morfolojisi ve etrenjit fazının karakteristik çubuk benzeri yapısı SEM görüntüleriyle net bir biçimde ayırt edilebilir (Taylor, 1997). Bu fazların boyut, dağılım ve yoğunlukları, malzemenin dayanım gelişimi ve geçirgenlik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir.

Ayrıca, SEM analizine entegre edilen Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS veya EDX) sayesinde, görüntülenen bölgelerin elementel bileşimleri de belirlenebilir. Bu özellik, özellikle katkı maddeleriyle (örneğin grafen oksit, zeolit, uçucu kül vb.) modifiye edilen sistemlerde fazlar arası bağlanma düzeyi ve kimyasal etkileşimler hakkında bilgi verir (Meddah vd., 2014).

SEM analizi, aynı zamanda zarar görmüş veya çevresel etkilerle bozunuma uğramış yapı malzemelerinin teşhisi için de kullanılır. Örneğin sülfat veya klor etkisinde bozulan çimento matrislerinde çatlak gelişimi, ayrışma bölgeleri ve reaksiyon ürünlerinin morfolojik değişimleri SEM ile detaylı biçimde analiz edilebilir (Basheer vd., 2001).

Gelişen görüntü işleme teknikleriyle birlikte SEM görüntüleri üzerinde gözenek boyutu dağılımı, yoğunluk oranı ve çatlak uzunluğu gibi kantitatif veriler de elde edilebilmekte,

böylece mühendislik karar süreçlerinde doğrudan kullanılabilir çıktılar sunulmaktadır. SEM analizi, yapı malzemelerinin dayanım, dayanıklılık ve çevresel etkilere karşı performansı gibi makro düzeydeki özelliklerini açıklamaya yönelik mikroyapısal temelli bilimsel analizler için temel bir karakterizasyon tekniği olarak değerlendirilmektedir.

Doğal ham zemin, uçucu kül ve optimizasyonlara ait SEM analizi sonuçları Ek 2’de sunulmuştur.

2.2.13.1. Doğal zemin SEM analizi

Doğal zemine ait SEM görüntüleri (Şekil 84-90), düşük büyütmeden yüksek büyütmeye geçildikçe yoğunlukla heterojen bir yapı, iri ve köşeli parçacıklar ile birlikte düzensiz yüzey topografyası sergilemektedir. 2500–5000x büyütme aralığında incelendiğinde, tanecikler arası bağlanmanın zayıf olduğu, mikro boşlukların belirgin şekilde yer aldığı ve mikro çatlak başlangıçlarının gözlenebildiği dikkat çekmektedir. Bu yapı, zeminin düşük kohezyonel yapısını ve mekanik olarak sınırlı bir dayanım kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca parçacık yüzeylerinin amorf özellik taşıması, su tutma kapasitesinin yüksek olabileceğine işaret etmektedir. Bu da plastisite ve konsolidasyon davranışı üzerinde etkili olacaktır.

2.2.13.2. Uçucu kül katkılı numune SEM analizi

Uçucu kül katkısının yer aldığı numunelerde (Şekil 91-97), önceki doğal zemin görüntülerine kıyasla daha küresel, yuvarlatılmış ve yüzey olarak düzgün parçacık yapıları ön plana çıkmaktadır. Bu topografik değişim, uçucu külün puzolanik reaksiyonlar yoluyla boşluklara yerleşmesini ve daha kompakt bir matris yapısı oluşturduğunu göstermektedir. Yüksek büyütmede (2500–5000x) küresel taneciklerin çimento fazı ile iyi bir bağ geliştirdiği, bu sayede gözeneklerin azaldığı ve iç yapıdan kaynaklı boşlukların dolduğu gözlemlenmiştir. Bu mikro yapı, uçucu kül katkısının dayanımı artırıcı ve geçirgenliği azaltıcı etkisinin mikroyapısal temelini oluşturmaktadır.

2.2.13.3. Serbest basınç dayanımı maksimum olan numune SEM analizi

Serbest basınç dayanımı en yüksek olan numunelere ait görüntüler (Şekil 98-104), diğer tüm gruplarla karşılaştırıldığında en kompakt mikrostrüktürü sunmaktadır. Bu grupta tanecikler arası bağların daha sıkı, fazlar arası geçişlerin keskin olmadığı, yani bağlayıcı fazların matrise daha iyi entegre olduğu gözlemlenmektedir. Gözenek yapısının önemli ölçüde azaldığı, mikro

çatlakların ise minimize edildiği görülmektedir. Bu yapı, dayanım artışını doğrudan destekleyen bir mikromorfoloji sunmakta olup, katkı maddelerinin optimum oranlarda kullanıldığını ve sinerjik bir bağ oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca bazı bölgelerde olası jelimsi yapılar, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazlarının geliştiğine işaret edebilir.

2.2.13.4. Minimum maliyetle hazırlanmış numune SEM analizi

Minimum maliyet gözetilerek hazırlanan zemin numunelerinde (Şekil 105-111), yapı genel olarak daha heterojen, gözenekli ve parçacık uyumsuzluğu içeren bir karakter sergilemektedir. Mikroyapıda agregaların birbirine tam olarak kenetlenmediği, dolayısıyla zayıf bağlanma bölgelerinin varlığı dikkat çekmektedir. Ekonomik katkı oranlarının dayanım üzerinde sınırlı etkisi olduğunu, mikroskobik seviyede ise yüksek boşluk hacmi ile sonuçlandığını göstermektedir. Bu tür yapılar, dayanım ve uzun vadeli dayanıklılık açısından performans kısıtı yaratabilir.

2.2.13.5. Minimum karbon salınımı esasına göre hazırlanan numune SEM yorumları

Çevresel sürdürülebilirlik hedefiyle düşük karbon salınımı esas alınarak hazırlanan numuneler (Şekil 112-118), SEM analizinde göreceli olarak daha homojen bir yapı, fakat kısmen daha düşük bağlanma yoğunluğu sunmaktadır. Mikroyapı genel olarak dengeli olmakla birlikte, özellikle 2500x ve üstü büyütmelerde mikro çatlak başlangıçları ve dağınık faz yapısı dikkat çekmektedir. Bu durum, karbon salınımını azaltmak adına kullanılan alternatif bağlayıcıların yeterli reaktivite sağlayamadığını gösterebilir. Ancak, çevresel kazanımlar ile mühendislik performansı arasında denge sağlanmaya çalışıldığı anlaşılmaktadır.

2.2.13.6. Çoklu optimizasyonla hazırlanmış numune SEM analizi

Çoklu optimizasyon kriterlerine göre hazırlanan numunelerde (Şekil 119–125), SEM görüntüleri yüksek mikroyapısal bütünlük, düşük porozite ve iyi bağlanma zonları göstermektedir. Bu grup, hem dayanım hem çevresel hem de ekonomik parametrelerin gözetildiği dengeli bir yapı sunmaktadır. Taneciklerin matrise düzgün oturduğu, gözeneklerin mikro ölçekte minimize edildiği ve parçacık-matris arayüzlerinde herhangi bir kopukluk bulunmadığı gözlemlenmektedir. Bu yapı, mikro düzeyde gösterdiği uyum ile makro düzeydeki performans artışını desteklemektedir. Bu bağlamda, SEM analizleri çoklu optimizasyonun etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa SEM analizleri, kullanılan katkı türü ve oranlarının zemin mikroyapısı üzerindeki etkilerini doğrudan ortaya koymaktadır. Dayanım

artışları ile kompakt yapıların doğrudan ilişkili olduğu, ekonomik ve çevresel parametrelerin tek başına esas alındığı durumlarda ise mikroyapısal bütünlüğün zayıflayabildiği gözlemlenmiştir. En iyi sonuç, optimize edilmiş katkı-karışım oranlarıyla elde edilen çoklu optimizasyon grubunda görülmüştür. Bu durum, zemin iyileştirme çalışmalarında mikroskobik düzeyde tasarım bilincinin, makroskobik performans üzerinde ne denli belirleyici olduğunu vurgulamaktadır.

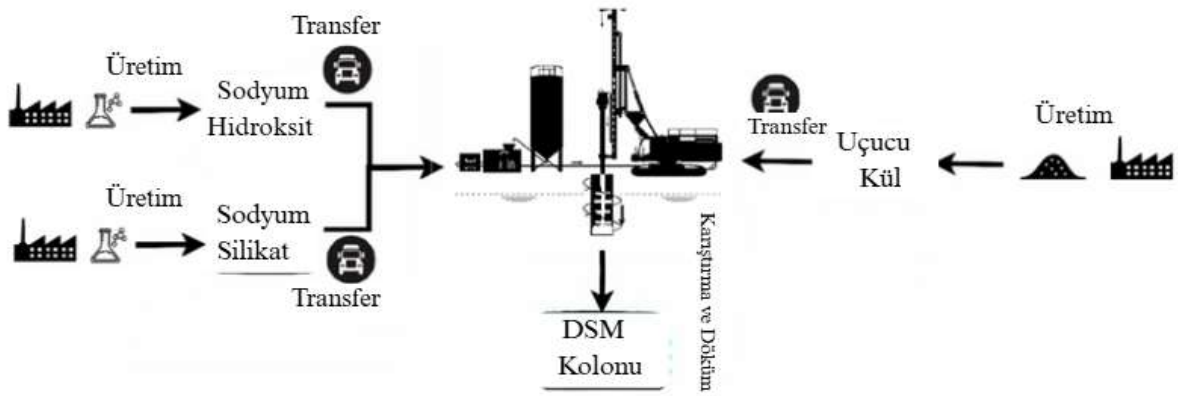


ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

3.1. TEPKİ DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ VE KRİTERLERİN ÇOK BOYUTLU DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada yürütülen deneysel ve analitik analizlerin temel amacı, derin karıştırma yöntemi (DMM) ile iyileştirilen zeminlerin farklı kriterler açısından performanslarının kapsamlı biçimde değerlendirilmesidir. Bu doğrultuda, stabilizasyon etkinliği yalnızca mekanik performansla sınırlı kalmayacak şekilde; çevresel etkiler ve ekonomik sürdürülebilirlik boyutları da dikkate alınarak çok yönlü bir analiz çerçevesi oluşturulmuştur. Diğer bir ifadeyle, değerlendirme süreci üç temel başlık altında ele alınmıştır: Mühendislik performansı, çevresel hassasiyet ve maliyet etkinliğidir.



Şekil 56: DSM Kolon Üretim Sürecinin Şematik Diyagramı

Mühendislik performansına ilişkin değerlendirme kriteri olarak, iyileştirilen zemin karışımının 28 günlük kürlenme süreci sonunda gösterdiği tek eksenli basınç dayanımı (UCS) esas alınmıştır. UCS, stabilizasyon işleminin zemin mukavemeti üzerindeki doğrudan etkisini yansıtan en temel parametrelerden biri olarak bilinmektedir ve bu nedenle çalışmada birincil performans çıktısı olarak tanımlanmıştır.

Çevresel duyarlılık boyutunda ise, sürdürülebilir mühendislik ilkeleri doğrultusunda karbon ayak izi temel değerlendirme kriteri olarak benimsenmiştir. Bu kapsamda, her bir deneysel çalıştırmaya karşılık gelen 1 m³'lük DSM kolonu üretimi esnasında atmosfere salınan toplam CO₂ emisyonu miktarı hesaplanmış ve Y₂ tepki değişkeni olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, zemin iyileştirme yöntemlerinin çevresel etkilerle birlikte ele alınması gerektiği yönündeki güncel mühendislik anlayışının bir yansımasıdır.

Üçüncü ve son değerlendirme kriteri ise ekonomik açıdan ele alınmış; 1 m³ hacmindeki bir DSM kolonu için gerekli tüm malzeme ve uygulama girdileri dikkate alınarak oluşan toplam maliyet, Y₃ tepki değişkeni olarak tanımlanmıştır. Bu maliyet hesaplamaları, deneysel tasarım kapsamında kullanılan bağlayıcı malzemelerin miktarları ve birim fiyatlarına dayalı olarak yapılmıştır. Böylece her bir karışım tasarımının saha uygulamasına yansıyabilecek potansiyel ekonomik yükü objektif bir biçimde belirlenmiştir.

Bu üç temel yanıt değişkeninin (UCS, CO₂ emisyonu, maliyet) belirlenmesinde, önceden yapılandırılmış deneysel tasarım matrisi esas alınmış ve her bir çalıştırma için belirlenen bağımsız değişken kombinasyonlarına karşılık gelen tepki değerleri titizlikle hesaplanmıştır. Ayrıca, yalnızca karışım bileşenleri değil; aynı zamanda saha uygulamasına yönelik maliyet ve emisyon kalemleri de göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlamda, Şekil 56'da sunulan DSM kolon üretim sürecinin tüm adımları, CO₂ emisyonu ve maliyet analizlerinin hesaplamalarında temel alınmıştır.

Böylelikle, deneysel olarak elde edilen mühendislik performansı ölçütleri ile hesaplamaya dayalı çevresel ve ekonomik veriler bir arada değerlendirilerek çok boyutlu bir karar destek sistemi oluşturulmuştur. Bu yapı, tasarım optimizasyon sürecinde yalnızca dayanım artışına odaklanmak yerine, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik uygulanabilirlik gibi günümüz mühendislik yaklaşımlarının vazgeçilmez bileşenlerini de dikkate almaktadır.

3.2. TEK EKSENLİ SERBEST BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI

Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin hazırlanması süreci, Şekil 56'da şematik olarak sunulan üretim akışına uygun biçimde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretiminde, deneysel tasarım matrisinde tanımlanan bağımsız değişken seviyeleri ve her bir tasarım noktası için belirlenen tekrar sayıları dikkate alınarak sistematik bir üretim stratejisi benimsenmiştir. Hazırlanan zemin-bağlayıcı karışımları, standart silindirik numune boyutları olan 50 mm çap ve 100 mm yükseklik ölçülerinde kalıplara dökülmüştür. Numunelerin fiziksel ve kimyasal reaksiyon süreçlerini optimum koşullarda tamamlamasını sağlamak amacıyla, 28 gün süreyle 26 ± 1 °C sıcaklıkta sabitlenmiş fırın ortamında kür işlemi uygulanmıştır. Kür işlemi tamamlandıktan sonra, ASTM D2166 standardı esas alınarak serbest basınç dayanımı (Unconfined Compressive Strength- UCS) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, zemin karışımlarının mekanik davranışlarını değerlendirmek ve stabilizasyonun mühendislik açısından etkinliğini nicel olarak ortaya koymak amacıyla uygulanmıştır.

Tablo 12 farklı optimizasyon stratejileriyle hazırlanan zemin karışımlarının, 28 günlük kür süresi sonunda elde ettiği serbest basınç dayanımı (MPa) değerlerini göstermektedir. Optimizasyonlara genel bir bakış açısıyla yaklaşıldığında;

- ✓ 1. Optimizasyon: En yüksek dayanım değerlerine ulaşan gruptur. Bu durum, bu karışımın içerdiği bileşenlerin ve oranlarının serbest basınç dayanımı açısından oldukça etkin olduğunu ortaya koymaktadır.
- ✓ 2. ve 3. Optimizasyonlar: Görece çok düşük dayanım değerlerine sahiptir. 1 MPa'nın altında kalan sonuçlar, bu karışımların yeterli düzeyde bağlayıcılık veya iç yapısal bütünlük sağlayamadığını göstermektedir. Bu tür karışımlar, zemin iyileştirme veya taşıyıcılık gerektiren uygulamalarda yetersiz kalacaktır.
- ✓ 4. Optimizasyon: Orta düzeyde sonuçlar vermiştir. Bazı numunelerde belirgin bir artış gözlemlenirken, bazıları düşük seviyede kalmıştır.

28 günlük kürleme süresinde en düşük basınç dayanımı değerleri 3. optimizasyon karışımında olup saf zemin karışımına oranla 0,32 kat artmıştır. Bunu takiben 2. optimizasyon karışımında saf zemin karışımına oranla 0,46 kat artmıştır. En yüksek artış 1. optimizasyon karışımında olup saf zemin karışımına oranla 4,12 kat artarken bunu takiben 4. optimizasyon karışımında bu oran 2,01 kat artmaktadır. Bu durumda en düşük basınç dayanımı 3. optimizasyonda görülmüşken en yüksek basınç dayanımı 1. optimizasyonda görülmüştür.

Tablo 12: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin 28 Günlük Kür Süresinde Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları (MPa)

Optimizasyonlar	Dayanım Sonuçları (MPa)										Ortalama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Dayanım
Zemin	0,25	0,27	0,24	0,26	0,30	0,22	0,23	0,29	0,28	-	0,26
1.Optimizasyon	3,56	4,41	4,44	3,18	4,33	4,56	6,95	2,86	2,87	-	4,12
2.Optimizasyon	0,51	0,48	0,38	0,56	0,49	0,39	-	-	-	-	0,46
3.Optimizasyon	0,23	0,29	0,32	0,39	0,50	0,25	0,28	-	-	-	0,32
4.Optimizasyon	2,22	1,71	1,59	1,64	1,15	3,27	2,42	1,82	2,55	1,76	2,01

Şekil 57 Tablo 12'yi görsel olarak desteklemekte ve her optimizasyon grubunun eğilimlerini karşılaştırmalı olarak analiz etmemizi kolaylaştırmaktadır.

- ✓ 1. Optimizasyon: Açık ara en yüksek değerleri sergilemektedir.
- ✓ 4. Optimizasyon: Stabil ama yükselen bir grafik izlemektedir.

- ✓ 2. ve 3. Optimizasyonlar: Genel olarak düşük ve yatay seyirli olup, bu karışımların mühendislik açısından zayıf performans sunduğu açıkça görülmektedir.
- ✓ Zemin (referans/ doğal zemin): Düşük dayanım eğrisine sahip, optimizasyon öncesi zemin karakterini temsil etmektedir.

Şekil 57 Tablo 12 birlikte değerlendirildiğinde, 1. optimizasyon yönteminin hem en yüksek dayanımı sağlaması hem de istikrarlı sonuçlar üretmesi açısından en uygun karışım olduğu net biçimde ortaya çıkmaktadır. Bu yöntem, özellikle taşıyıcı zeminlerin iyileştirilmesinde veya zemin stabilizasyon uygulamalarında tercih edilebilir. 2. ve 3. optimizasyonlar, laboratuvar koşullarında yapılan ilk deneme niteliğinde olabilir veya içerdiği katkı/bağlayıcı türleri zeminle yeterli uyum sağlayamamıştır. Bu tür karışımlar saha uygulamalarında gözden geçirilmelidir.

3.2.1. Serbest Basınç Dayanımı Bulguları

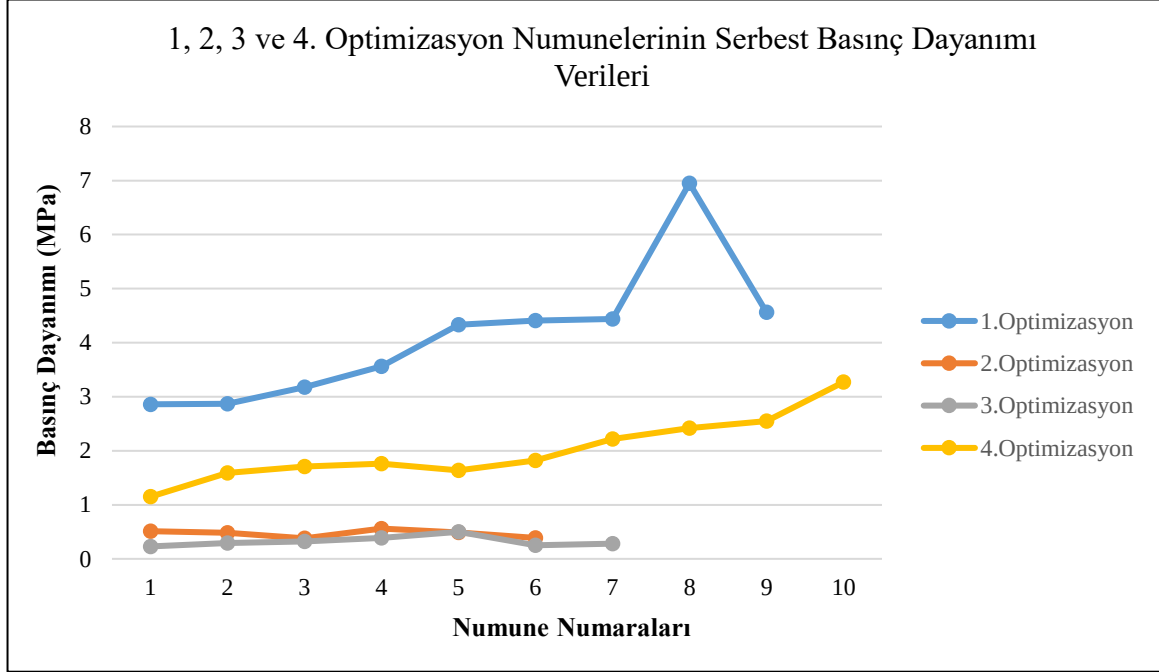
28 günlük kür süresi sonunda yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri neticesinde elde edilen veriler Tablo 12, Şekil 57 ve Şekil 58’de sunulmuştur. Farklı optimizasyon yöntemlerine göre hazırlanan numuneler arasındaki dayanım farkları, sistematik biçimde değerlendirilmiştir.

Tablo 12 incelendiğinde, 1. Optimizasyon grubunun serbest basınç dayanımı açısından diğerlerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek değerler sunduğu görülmektedir. Bu grupta genel olarak 3,18 MPa ile 6,95 MPa aralığında değişen dayanım değerleri elde edilmiştir. Buna karşılık, 2. ve 3. Optimizasyon gruplarındaki numunelerde dayanım değerlerinin oldukça düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. 2. Optimizasyon grubunda değerler genellikle 0,38–0,56 MPa aralığında olup, bazı numunelerde bu değer 0,39 MPa gibi oldukça düşük seviyelere gerilemiştir. Benzer şekilde, 3. Optimizasyon grubunda da dayanım değerleri 0,23–0,50 MPa aralığında seyretmiştir. Bu durum, bu iki karışım grubunun zayıf bağlayıcılık özelliği gösterdiğini ve muhtemelen katkı–zemin etkileşimlerinin yetersiz kaldığını düşündürmektedir.

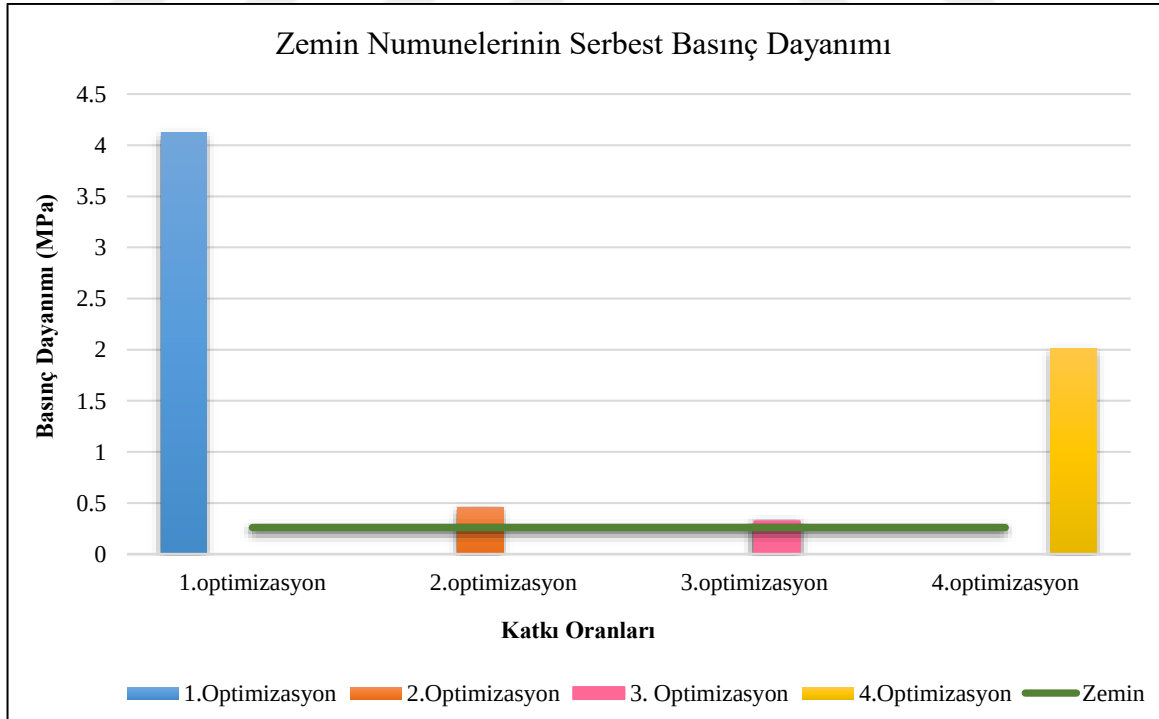
4. Optimizasyon grubunda ise dayanım değerlerinin daha dengeli dağıldığı ve bazı örneklerde 3 MPa’nın üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. 6 numaralı numunede 3,27 MPa’lık dayanım değeri elde edilmiş olup, bu grubun belirli koşullarda yeterli dayanım sağlayabileceğini göstermektedir.

Şekil 56, elde edilen verilerin grafiksel karşılaştırmasını sunmakta olup, her bir optimizasyon grubunun serbest basınç dayanımı eğilimlerini görsel olarak ortaya koymaktadır.

1. Optimizasyon grubunun belirgin bir yükseliş trendine sahip olduğu, buna karşılık 2. ve 3. optimizasyon gruplarının düşük ve yatay seyirli bir grafik izlediği görülmektedir. 4. optimizasyon grubu, nispeten değişken fakat zamanla artış eğiliminde olan bir performans göstermiştir.



Şekil 57: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Serbest Basınç Dayanımı Değerleri



Şekil 58: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Serbest Basınç Dayanımı Karşılaştırılması (MPa)

Bu çalışmada, farklı optimizasyon yöntemleriyle hazırlanan zemin numunelerinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. İncelenen dört farklı optimizasyon türü, numune bazında karşılaştırılmış ve dayanım sonuçları grafiksel olarak analiz edilmiştir.

Şekil 57’de 1., 2., 3. ve 4. optimizasyonlara ait numune bazlı serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, 4. optimizasyonun tüm numunelerde diğer optimizasyonlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sağladığı görülmektedir. Özellikle 8 numaralı numunede 4. optimizasyonun yaklaşık 7 MPa’ya ulaşan dayanımı, bu yöntemin oldukça etkin bir iyileştirme sağladığını ortaya koymaktadır. Diğer yandan, 2. ve 3. optimizasyonlara ait değerlerin genel olarak 1 MPa’nın altında kaldığı ve performans açısından zayıf sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Bu durum, ilgili optimizasyonların bağlayıcı katkı oranı veya uygulama metodolojisi açısından yetersiz kaldığını göstermektedir.

Şekil 58’de genel optimizasyon türlerinin ve doğal zemin numunesinin serbest basınç dayanımı açısından kıyaslanmasını sunmaktadır. 1. optimizasyon uygulamasının 4,2 MPa seviyesinde dayanım sağladığı ve bu değer en yüksek basınç dayanımına karşılık geldiği görülmektedir. Buna karşılık, doğal zemin numunesinin basınç dayanımı yalnızca 1,5 MPa civarındadır. Bu fark, yapılan katkıların ve optimizasyon stratejilerinin zemin stabilitesi açısından ne denli kritik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. 1. ve 4. optimizasyon yöntemleri zemin numunelerinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirirken, 2. ve 3. optimizasyonların daha sınırlı etkiler yarattığı anlaşılmaktadır. Bu bulgular, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan katkı oranlarının ve uygulama tekniklerinin dikkatle seçilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

1. optimizasyon, açıkça en yüksek dayanım seviyelerini sağlayan yöntem olmuştur. Ortalama basınç dayanımı yaklaşık 4,12 MPa olup, 6,95 MPa’ya kadar çıkan değerlerle diğer tüm yöntemleri belirgin şekilde geride bırakmıştır. Yüksek dayanım değerleriyle zemin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde en etkili yöntem olmuştur. Uygulama kararlılığının artırılmasıyla bu yöntemin mühendislik projelerinde güvenle kullanılabileceği düşünülmektedir.

2. ve 3. optimizasyonlar sırasıyla ortalama 0,46 MPa ve 0,32 MPa dayanım sağlamış, bu da doğal zemin dayanımına yakın değerlerdir. Bu durum, bu optimizasyonların zemin stabilizasyonu açısından anlamlı bir katkı sağlamadığını ortaya koymaktadır. Bu grupların hem ortalamalarının hem de varyanslarının düşük olması, homojen ancak etkisiz sonuçlara işaret

eder. 2. ve 3. Optimizasyon yöntemleri, mühendislik açısından yetersiz performans göstermiştir. Bu yöntemlerin yeniden değerlendirilmesi veya farklı bağlayıcılarla optimize edilmesi gerekebilir.

4. optimizasyon grubu, ortalama 2,01 MPa değer ile daha önceki iki yönteme göre kısmen başarılı olmuş, ancak 1. optimizasyonun oldukça gerisinde kalmıştır. 0,57 MPa'lık standart sapma, numuneler arası çeşitliliğin makul seviyede olduğunu ve bu yöntemin mühendislik uygulamalarında sınırlı ama dengeli sonuçlar üretebileceğini göstermektedir. Sınırlı ama gözle görülür bir iyileşme sağlamıştır. Özellikle maliyet-etkinlik analizleriyle birlikte değerlendirilerek kullanılabilir.

Zemin Şekil 57'den da görüldüğü üzere, doğal zemine ait serbest basınç dayanımı yaklaşık 0,26 MPa civarındadır. Bu, yalnızca 1. optimizasyon ve bir ölçüde 4. optimizasyonla karşılaştırıldığında anlamlı fark göstermektedir. 2. ve 3. optimizasyonların katkısı doğal zemin değerinin bile altında kalmaktadır.

3.3. CO₂ AYAK İZİNİN HESAPLANMASI

Bu çalışmada, derin karıştırma yöntemi (Deep Soil Mixing - DSM) ile iyileştirilen zemin sistemlerinin yalnızca mekanik performans açısından değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik bakımından da değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, DSM kolonlarının üretimi sürecinde ortaya çıkan karbon emisyonlarının (CO₂ ayak izinin) ayrıntılı biçimde hesaplanması, çalışmanın temel amaçlarından birini oluşturmaktadır.

Karbon ayak izi analizleri, bağlayıcı sistem olarak kullanılan uçucu kül, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) içeren harç bileşimi temel alınarak yapılmıştır. Her bir çalıştırma için tasarım matrisinde belirtilen bağımsız değişken oranları dikkate alınmış ve 1 m³ DSM harcı esas alınarak hesaplamalar yürütülmüştür. Şekil 56'da genel hatlarıyla sunulan üretim süreci; bağlayıcıların üretimi, taşınması, saha uygulaması ve yerleştirme işlemleri gibi tüm aşamaları içermekte olup, bu süreç boyunca oluşan doğrudan ve dolaylı karbon salımları kapsamlı biçimde analiz edilmiştir.

Tablo 13: Üretim Bazlı Karbon Ayak İzi Analizlerinde Dikkate Alınan Karbon Emisyon Faktörleri

Malzeme	Biçim	Karbon Emisyon Faktörü	Birim
Uçucu Kül	Katı	2.7×10^{-2}	kgCO ₂ /kg
Na ₂ SiO ₃	Katı	1.248	kgCO ₂ /kg
NaOH	Katı	1.448	kgCO ₂ /kg

CO₂ salımı hesaplamalarında dikkate alınan ilk unsur, sodyum silikat, sodyum hidroksit ve uçucu külün üretim süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarıdır. Bu hesaplamalarda, Çin Yaşam Döngüsü Veritabanı (CLCD) tarafından geliştirilen ve Yi Ke Environmental Technology Co. Ltd. ile Sichuan University Institute for Sustainable Consumption and Production iş birliğiyle oluşturulan eBalance yazılımından elde edilen karbon emisyon faktörleri esas alınmıştır. Üretim kaynaklı emisyonlara ilişkin katsayılar Tablo 13'te detaylı olarak sunulmuştur.

Uçucu kül, Avrupa Birliği çevre mevzuatındaki son düzenlemeler doğrultusunda artık bir atık değil, bir yan ürün olarak kabul edildiğinden, karbon ayak izi hesaplamalarına dâhil edilmiştir. Bu bağlamda, uçucu kül için kabul edilen karbon emisyon faktörü $2,28 \times 10^{-2}$ kgCO₂/m³ olarak alınmıştır. Sodyum silikatın karbon emisyon değeri yalnızca katı hâli için belirtilmiş olup, Davidovits'in önerdiği şekilde, çözelti formunda (Na₂SiO₃) kullanıldığında emisyon değerinin %55'e kadar düşebileceği ifade edilmektedir (Davidovits (2015)). Bu yaklaşıma göre sodyum silikatın revize edilmiş karbon emisyon değeri 0,5616 kgCO₂/kg olarak hesaplanmıştır. Benzer biçimde, 10 M sodyum hidroksit çözeltisi için de çözeltinin seyreltik yapısı dikkate alınarak bir düzeltme yapılmış ve bu bağlamda karbon emisyon faktörü 0,4173 kgCO₂/kg olarak belirlenmiştir (Wang vd., 2021).

Tablo 14: Taşıma Temelli Karbon Ayak İzi Analizlerinde Dikkate Alınan Karbon Emisyon Faktörleri

Malzeme	Taşıma Araçları	Mesafe	Karbon Emisyon Faktörü	Birim
Uçucu Kül	Orta Dizel Kamyon (8t)	300 km	0.149	kg CO ₂ /tkm
Na ₂ SiO ₃	Hafif Dizel Kamyon (2t)	60 km	0.212	kg CO ₂ /tkm
NaOH	Hafif Dizel Kamyon (2t)	60 km	0.212	kg CO ₂ /tkm

Çalışmanın ikinci çevresel değerlendirme boyutu, malzeme taşımacılığından kaynaklanan karbon salımlarını kapsamaktadır. Bu amaçla hazırlanan Tablo 14, alkali bağlayıcı sistemin bileşenlerinin lojistik faaliyetleri nedeniyle ortaya çıkan karbon emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan parametreleri detaylı şekilde sunmaktadır. Bu hesaplamalarda; taşınan malzeme türü, taşıma aracı kapasitesi, varsayılan taşıma mesafesi ve 1 ton malzemenin 1 kilometre taşınması durumunda ortaya çıkan CO₂ miktarı gibi faktörler dikkate alınmıştır. Ayrıca bu analizlerde, mesafedeki varsayımsal değişimlerin karbon ayak izi üzerinde yaratabileceği potansiyel etkiler de göz önünde bulundurulmuştur.

DSM sisteminin saha uygulaması sırasında kullanılan makine ve ekipmanların yakıt tüketimine dayalı karbon salımı da analiz kapsamına alınmıştır. Bu süreçte kullanılan ekipmanlar; 60 hp kompresör, 130 hp kapasiteli mobil silo, karıştırma ucu, ve 280 hp motor gücüne sahip ekskavatör gibi birimlerdir. TS EN 14679 standardına göre, bu tür sistemlerde derin karıştırma işleminin dakikada 0,08 m³ ile 0,25 m³ arasında üretim yapabildiği kabul edilmektedir. Çalışmada, bu üretim aralığının ortalaması olan 0,165 m³/dakika değeri baz alınmış ve saha uygulaması süresince tüketilen yakıt miktarı 47,23 lt/saat veya 40,185 kg/saat olarak varsayılmıştır. Bu verilere göre, 1 m³ DSM harcı üretimi için ortaya çıkan karbon emisyon miktarı 11,83 kgCO₂/m³ olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalar sayesinde, yalnızca bağlayıcı malzemeler değil; aynı zamanda üretim, taşıma ve saha uygulama süreçlerinin tümü dikkate alınarak kapsamlı bir yaşam döngüsü tabanlı karbon ayak izi analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, derin karıştırma kolonlarının çevresel performansını bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirme olanağı sunmaktadır.

3.4. MALİYET ANALİZİNE YÖNELİK YÖNTEMSEL YAKLAŞIM

Bu çalışmanın önemli odak noktalarından biri olan maliyet analizi, karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan metodolojik yaklaşımı esas alarak geliştirilmiş ve bu çerçevede benzer hesaplama adımları takip edilmiştir. Derin karıştırma yöntemiyle (DSM) gerçekleştirilen zemin iyileştirme işlemlerine ait toplam maliyetin belirlenmesinde; bağlayıcı malzemelerin üretimi, lojistiği ve sahadaki uygulama süreci dahil olmak üzere üç ana aşama dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, her bir deneysel çalıştırma (çalışma koşulu) için tasarım matrisinde belirtilen bağımsız değişken seviyeleri esas alınarak 1 m³ DSM harcı üretimi için gerekli olan tüm girdilerin maliyeti hesaplanmıştır. Analizlerde, uçucu kül, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) gibi bağlayıcı ve aktivatörlerin üretim ve nakliye

süreçleri, ayrıca yerinde karıştırma ve yerleştirme uygulamalarının maliyetleri entegre bir biçimde değerlendirilmiştir.

Maliyet analizinin ilk bileşeni olan üretim kaynaklı maliyetler, malzeme bazında belirlenen birim fiyatlar temel alınarak hesaplanmıştır. Bu fiyatlar, literatürde yer alan güncel ve güvenilir kaynaklardan türetilen ortalama piyasa verilerine dayanmaktadır. Özellikle 10M NaOH çözeltisi için kullanılan maliyet katsayısı, seyreltik çözelti koşulları dikkate alınarak 0,1105 USD/kg olacak şekilde revize edilmiştir. Tablo 15’te bu üretim kaynaklı maliyet katsayıları ayrıntılı şekilde sunulmakta ve farklı bağlayıcıların karşılaştırmalı analizine olanak sağlamaktadır.

Tablo 15: Üretim Bazlı Maliyet Analizlerinde Dikkate Alınan Maliyet Faktörleri

Malzeme	Maliyet	Maliyet Faktörü	Birim
Uçucu Kül	10-50 \$/ton	0.03	\$/kg
Na ₂ SiO ₃	69.5- \$97.3 \$/ton	0.0834	\$/kg
NaOH	350 €/ton	0.3675 - 0.1105*	\$/kg

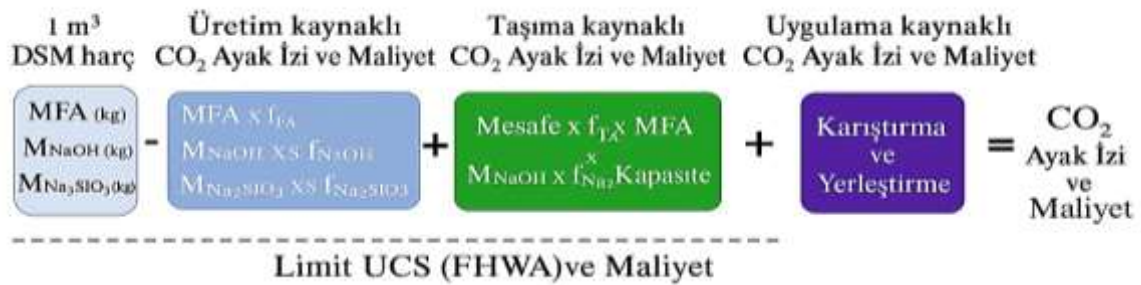
Nakliye maliyetlerine ilişkin hesaplamalar ise, karbon ayak izi analizlerine paralel biçimde yapılandırılmıştır. Taşımacılık süreci için varsayılan senaryoda, uçucu kül taşımacılığı için orta boy dizel kamyonlar, alkali aktivatörlerin (NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri) taşınması için ise hafif dizel kamyonlar kullanıldığı varsayılmıştır. Bu iki kamyon tipi için ortalama taşıma mesafeleri sırasıyla 300 km ve 60 km olarak kabul edilmiştir. Nakliye maliyetlerinin belirlenmesinde, Amerikan Ulaştırma Araştırma Enstitüsü (ATRI) tarafından 2011–2022 yılları arasında yayımlanan, mil başına maliyet verilerini içeren sektörel raporlar esas alınmıştır. (American Transportation Research Institute (ATRI)) Bu veriler doğrultusunda, 360 hp gücünde ve 14 m³ kapasiteli standart orta boy dizel kamyonun maliyeti, geçmiş üç yıla ait ortalama maliyet artış oranları ile 2025 yılı projeksiyonları doğrultusunda tahmin edilmiştir. Bu tahminlemeler yapılırken, ATRI’nin “marjinal maliyet yaklaşımı” benimsenmiş ve maliyet kalemleri araç bazlı ve sürücü bazlı olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmiştir. Ayrıca 2 ton kapasiteli ve 150 hp motor gücüne sahip küçük kamyonlar için taşıma maliyetleri, büyük kamyonlara göre güç ve kapasite oranları baz alınarak türetilmiş ve yakıt, sigorta ve sürücü maliyetleri gibi alt kalemler özgül ağırlıklarla yeniden ölçeklendirilmiştir. Bu analizlerde kullanılan oranlamalar, örneğin yakıt için %70 güç / %30 kapasite, sigorta için %50 güç / %50

kapasite gibi özel ağırlık faktörleriyle hesaplanmıştır. Tablo 16, taşımacılıkla ilgili maliyet faktörlerinin detaylarını içermektedir.

Tablo 16: Taşımacılık Bazlı Maliyet Analizlerinde Dikkate Alınan Maliyet Faktörleri

Maliyet Kategorileri	Orta Dizel Kamyon (8t)	Hafif Dizel Kamyon (2t)
Yakıt	\$1.241	\$0.415
Kira/Satın Alma Ödemeleri	\$0.414	\$0.104
Tamir ve Bakım	\$0.261	\$0.080
Sigorta	\$0.096	\$0.027
İzin ve Lisanslar	\$0.015	\$0.003
Lastikler	\$0.050	\$0.011
Geçiş Ücretleri	\$0.025	\$0.004
Sürücü Ücretleri	\$0.939	\$0.588
Sürücü Avantajları	\$0.207	\$0.130
Toplam Maliyet	3.248 \$/mil	1.363 \$/mil
Maliyet Faktörü	2.019 \$/km	0.847 \$/km

Üçüncü aşamada, bağlayıcı ve aktivatörlerin saha ortamında karıştırılması ve yerleştirilmesine ilişkin uygulama maliyetleri analiz edilmiştir. Bu kapsamda, Amerikan Federal Karayolları İdaresi (FHWA) tarafından yayımlanan ve “Birim Maliyetler ve Genel Proje Koşulları” başlığını taşıyan FHWA-HRT-13-046 numaralı teknik rapor temel alınmıştır. Rapora göre, ıslak yöntemle gerçekleştirilen DSM uygulamaları için önerilen ortalama birim maliyet yaklaşık 100 USD/m³ olarak kabul edilmiştir. Bu maliyet; bağlayıcı malzemelerin yanı sıra işçilik, ekipman, kalite kontrol ve kalite güvence faaliyetlerini de kapsayan birim üretim maliyetidir. Belirtilen değer, saha koşullarının uygun olduğu, karıştırma derinliğinin 25 m’den az olduğu ve çevresel kirliliğin bulunmadığı varsayımsal “ideal durum senaryosu” esas alınarak önerilmiştir.



Şekil 59: CO2 Ayak İzi Hesaplama Süreci

Tüm bu bileşenlerin toplam maliyet üzerindeki etkisini sistematik şekilde belirlemek amacıyla, maliyet analiz süreci, Şekil 59’da gösterildiği gibi beş temel aşamaya ayrılmıştır:

- ✓ Birinci aşama: Her bir çalıştırma için tasarım matrisine göre belirlenen bağlayıcı oranlarına bağlı olarak harç birim ağırlığı hesaplanmıştır.
- ✓ İkinci aşama: Bağımsız değişken seviyeleri dikkate alınarak 1 m³ DSM harcı için gerekli NaOH, Na₂SiO₃ ve uçucu kül miktarları belirlenmiştir.
- ✓ Üçüncü aşama: Bu malzemelerin üretim süreçlerinden kaynaklanan maliyet ve karbon emisyonları, ilgili katsayılarla çarpılarak hesaplanmıştır.
- ✓ Dördüncü aşama: Malzemelerin taşınmasından kaynaklanan nakliye maliyetleri ve emisyonları; taşıma mesafeleri, taşıma kapasitesi ve kamyon tipi gibi faktörler dikkate alınarak elde edilmiştir.
- ✓ Beşinci ve son aşama: DSM ekipmanlarının işletilmesinden doğan enerji tüketimi kaynaklı karbon salımı ve uygulama maliyetleri belirlenmiştir.

Tüm bu adımlar neticesinde, üretimden sahaya uygulamaya kadar olan süreçte ortaya çıkan toplam birim maliyet ve toplam karbon ayak izi, her bir deneysel koşul için ayrı ayrı hesaplanmış ve tasarım matrisinde yer alan tepki değişkenleri (Y₃) olarak tanımlanmıştır. Bu bütünlüklü yaklaşım sayesinde, DSM sistemlerinde hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliğe dayalı kapsamlı bir analiz yapılması sağlanmıştır.

3.5. ISLATMA DENEYİ SONUÇLARI

Tablo 17, optimizasyon sonuçlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük suda kürlenme sonucu serbest basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 60: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Islatma 1. Gün Su Küvetindeki Görünümleri

Tablo 17: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin İslatma Deneyi Sonrası Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları

Numune Numaraları	Optimizasyon Dayanım Sonuçları (MPa)				Kürleme Süreleri
	1.Optimizasyon	2.Optimizasyon	3.Optimizasyon	4.Optimizasyon	
1	1,3790	X	X	0,8443	3 Günlük İslatma
2	2,4491	X	X	1,2181	
3	1,9142	X	X	0,8056	
4	1,4566	X	X	0,8185	
5	1,0634	X	X	2,7714	
6	3,1774	X	X	1,6113	7 Günlük İslatma
7	2,0237	X	X	1,8175	
8	2,5587	X	X	2,3782	
9	1,9979	X	X	1,2632	
10	2,9325	X	X	2,0947	
11	3,0614	X	X	1,3928	14 Günlük İslatma
12	2,8745	X	X	1,3793	
13	3,7123	X	X	1,4224	
14	2,4620	X	X	1,3799	
15	4,0604	X	X	1,4463	
16	3,2676	X	X	1,4946	28 Günlük İslatma
17	2,4555	X	X	1,5623	
18	2,4684	X	X	1,5313	
19	1,4114	X	X	1,3805	
20	1,9464	X	X	1,3908	

Tablo 18: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin İslatma Deneyi Sonrası Ortalama Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları

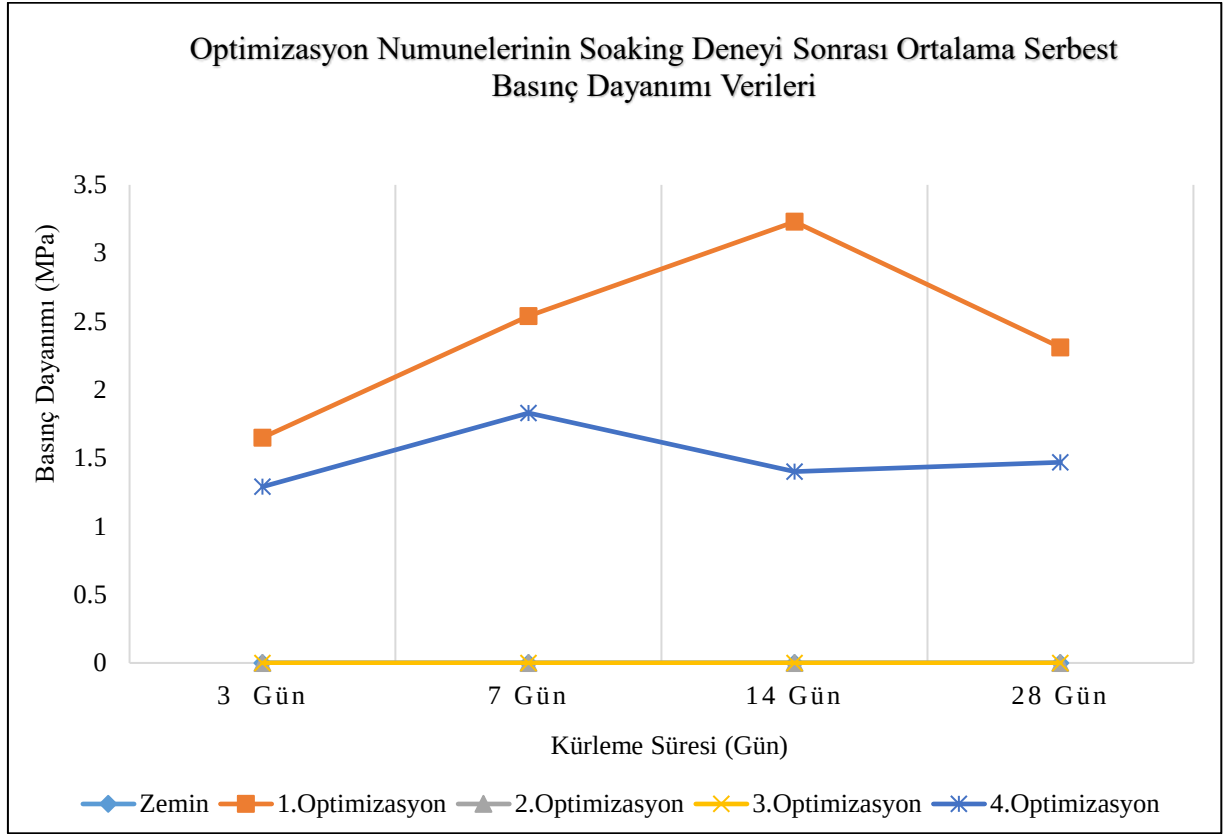
Optimizasyonlar	Suda Kürleme Süresi (gün)			
	3 günlük	7 günlük	14 günlük	28 günlük
Zemin	-	-	-	-
1.Optimizasyon	1,65	2,54	3,23	2,31
2.Optimizasyon	-	-	-	-
3.Optimizasyon	-	-	-	-
4.Optimizasyon	1,29	1,83	1,40	1,47

Tablo 17 ve Tablo 18 optimizasyon numunelerinin farklı kür sürelerindeki serbest basınç dayanımı değerlerini göstermektedir. Zemin numunelerine oranla; 1.optimizasyonda 3 günlük kür süresine sahip numunelerde 6,35 kat artış, 7 günlük kür süresine sahip numunelerde 9,42 kat artış, 14 günlük kür süresine sahip numunelerde 12,42 kat artış, 28 günlük kür süresine sahip numunelerde ise 8,88 kat artış gözlemlenmiştir. 2. ve 3. optimizasyon numunelerinde su içerisinde dayanım gözlemlenemeyip ilk anlarda numunelerin tamamında çözülme gözlemlenmiştir. 4. optimizasyonda 3 günlük kür süresine sahip numunelerde 4,96 kat artış, 7 günlük kür süresine sahip numunelerde 7,04 kat artış, 14 günlük kür süresine sahip numunelerde 5,38 kat artış, 28 günlük kür süresine sahip numunelerde ise 5,65 kat artış gözlemlenmiştir.

Tablo 19: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin İslatma Deneyi Sonrası Kürleme Süresi ve Doğal Zemin Numunesine Göre Artış Oranı

Optimizasyonlar	Optimizasyon Kür Süreleri (gün)			
	3 günlük	7 günlük	14 günlük	28 günlük
Doğal Zemin	-	-	-	-
1.Optimizasyon	6,35	9,42	12,42	8,88
2.Optimizasyon	-	-	-	-
3.Optimizasyon	-	-	-	-
4.Optimizasyon	4,96	7,04	5,38	5,65

Tablo 19 farklı oranlarda Na_2SiO_3 ve NaOH aktivatörleri kullanılarak hazırlanan numunelerin ıslatma deneyi sonrası serbest basınç dayanımı sonuçlarının saf zeminle hazırlanan numunelerinin serbest basınç dayanımı sonuçlarıyla kıyaslandığında 1. optimizasyonda maksimum artış 14 günlük numunelerde gözlemlenirken minimum artış 3 günlük kürleme sonucunda ulaşılmıştır. 2. ve 3. optimizasyonda numuneler tamamen suda çözündüğünden sonuç alınamamıştır. 4. Optimizasyonun serbest basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında maksimum artış 7 günlük numunelerde gözlemlenirken minimum artış 3 günlük numunelerde gözlemlenmiştir.



Şekil 61: Optimizasyon Numunelerinin Islatma Deneyi Sonrası Ortalama Serbest Basınç Dayanımı Verileri

3.6. DONMA-ÇÖZÜLME DENEYİ SONUÇLARI

Donma-çözülme döngüleri, özellikle zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan stabilizasyon tekniklerinin dayanım performanslarını değerlendirmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, dört farklı optimizasyon yöntemiyle hazırlanan zemin numuneleri üzerinde yapılan donma-çözülme deneyleri neticesinde elde edilen serbest basınç dayanımı sonuçları Tablo 20’de sunulmuştur.

Tablo 20: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Donma-Çözülme Deneyi Sonrası Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları

Numune Numaraları	Optimizasyon Dayanım Sonuçları (MPa)				Çevrim Sayıları
	1.Optimizasyon	2.Optimizasyon	3.Optimizasyon	4.Optimizasyon	
1	2,8810	0,2771	0,2706	1,5468	3. Çevrim
2	5,1690	0,2964	0,2191	1,6886	
3	5,8199	0,2320	0,2449	1,6241	
4	5,1948	0,2191	0,2964	1,5855	
5	5,1561	0,3093	0,2513	1,5983	
6	3,1710	0,3931	0,1810	0,6986	6. Çevrim
7	2,9776	0,3996	0,1968	0,9939	
8	3,2226	0,3480	0,2413	1,3146	
9	2,8681	0,5156	0,3048	0,9780	
10	2,9648	0,4576	0,3651	1,2638	
11	2,6991	0,1556	0,1524	1,0352	9. Çevrim
12	1,9974	0,1143	0,1778	1,0638	
13	2,6198	0,1397	0,2476	1,0701	
14	2,5721	0,1460	0,2001	1,1495	
15	3,7026	0,1968	0,2159	1,2638	
16	2,5245	0,3802	0,3609	1,9013	12. Çevrim
17	3,0040	0,2964	0,3158	1,9786	
18	2,8674	0,2771	0,4640	1,5468	
19	1,9846	0,3867	0,3738	2,0431	
20	2,5372	0,3158	0,3995	1,6177	

Tablo 20’de elde edilen verilere göre, 1. optimizasyon yöntemi, tüm çevrimler boyunca en yüksek serbest basınç dayanımı değerlerini göstermiştir. Bu yöntemde uygulanan katkı veya karışım oranlarının, zeminin bağ yapısını donma-çözülme etkilerine karşı büyük oranda koruduğu görülmüştür. Özellikle 3 numaralı numunede elde edilen 5,8199 MPa değeri, bu yöntemin performansını açıkça ortaya koymaktadır. Ortalama dayanım değeri yaklaşık 3,18 MPa seviyelerinde seyrederken, en düşük değer 1,9974 MPa, en yüksek değer ise 5,8199 MPa olarak tespit edilmiştir. 2. ve 3. optimizasyon yöntemleri, düşük dayanım değerleriyle öne çıkmıştır. 2. optimizasyonda ortalama değer 0,31 MPa düzeyinde olup; en yüksek değer 0,5156 MPa, en düşük değer ise 0,1143 MPa olarak belirlenmiştir. 3. optimizasyon için ise benzer şekilde düşük ve sınırlı dayanım sonuçları gözlemlenmiştir (maksimum: 0,3995 MPa, minimum: 0,1524 MPa). Bu durum, söz konusu yöntemlerin donma-çözülme etkilerine karşı dirençli bir stabilizasyon sağlamadığını göstermektedir. 4. optimizasyon yöntemi dayanım

açısından daha tutarlı ve görece yüksek sonuçlar sunmuştur. Özellikle 17, 18 ve 19 numaralı numunelerde sırasıyla 1,9786 MPa, 1,5486 MPa ve 2,0431 MPa değerleri elde edilmiştir. Ortalama serbest basınç dayanımı yaklaşık 1,45 MPa olup, bu değer 2. ve 3. optimizasyona kıyasla daha yüksektir.

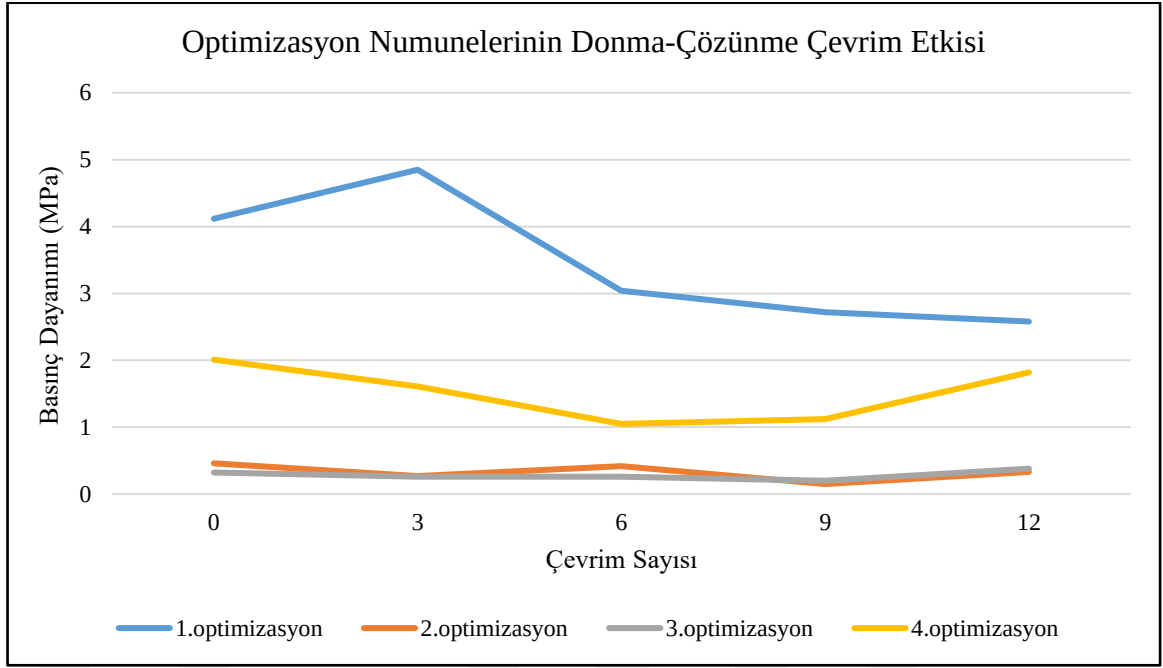


Şekil 62: Donma Çözülme Çevrimleri

Tablo 21: Optimizasyon Numunelerinin Farklı Donma-Çözülme Çevrimlerine Ait Ortalama Serbest Basınç Dayanım Verileri (MPa)

Optimizasyon Türü	0	3	6	9	12
1. Optimizasyon	4,12	4,85	3,04	2,72	2,58
2. Optimizasyon	0,46	0,27	0,42	0,15	0,33
3. Optimizasyon	0,32	0,26	0,26	0,20	0,38
4. Optimizasyon	2,01	1,61	1,05	1,12	1,82

Tablo 21'deki sonuçlar dikkate alındığında, 1. optimizasyon yöntemi donma-çözülme döngülerine karşı en dirençli davranışı sergileyerek mühendislik açısından en uygun iyileştirme yöntemi olarak öne çıkmaktadır. 4. optimizasyon yöntemi, ikinci derece bir seçenek olarak değerlendirilebilirken, 2. ve 3. optimizasyonlar uzun vadeli çevresel yüklemelere karşı yetersiz kalmaktadır.



Şekil 63: Optimizasyon Numunelerinin Farklı Donma-Çözülme Çevrim Etkisi

Zemin stabilizasyonunda kullanılan farklı optimizasyon tekniklerinin donma-çözülme çevrimleri altındaki dayanım performansları, zeminlerin mühendislik özelliklerinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir parametredir. Bu kapsamda, 1., 2., 3. ve 4. optimizasyon yöntemleri ile hazırlanan numuneler, 3., 6., 9. ve 12. çevrim sonrası serbest basınç dayanımı (MPa) açısından değerlendirilmiş, çevrim sayısına bağlı olarak dayanımdaki değişim detaylıca incelenmiştir.

3.7. ISLANMA-KURUMA DENEYİ SONUÇLARI

Zeminlerin çevresel etkilere karşı uzun süreli dayanımının belirlenmesinde, ıslanma-kuruma çevrimleri önemli bir dayanıklılık testidir. Suya maruz kalma ve sonrasında kuruma, zemin yapısında fizikokimyasal değişimlere yol açarak, yapısal bütünlüğü önemli ölçüde etkileyebilir. Bu deney kapsamında, numunelerin farklı çevrim sayılarında (12 çevrim) ıslak ve kuru durumdaki ağırlıkları (ve dolaylı olarak stabiliteleri) değerlendirilmiş ve optimizasyon yöntemlerinin çevrim etkisi altındaki davranışı karşılaştırılmıştır.

Tablo 22: 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Islanma-Kuruma Deneyi Sonuçları

Adı	Zemin	1. Optimizasyon		2. Optimizasyon		3. Optimizasyon		4. Optimizasyon		Çevrim
	Islak Kuru	Islak	Kuru	Islak- Kuru		Islak- Kuru		Islak	Kuru	
1	X	270,6	248,1	X		X		230,8	216,5	1.
2	X	255,4	232,6	X		X		231,8	211,5	
3	X	256,2	234,1	X		X		235,5	211,7	
4	X			X		X		243,2	214,9	
1	X	268,1	243,5	X		X		241,2	215,1	2.
2	X	253,6	227,7	X		X		232,4	209,8	
3	X	254,9	231,3	X		X		230,3	210,0	
4	X			X		X		229,1	206,5	
1	X	260,2	240,1	X		X		237,5	209,6	3.
2	X	238,3	209,9	X		X		226,4	207,8	
3	X	251,7	231,3	X		X		214	206,6	
4	X			X		X		221,1	200,5	
1	X	247,2	218,8	X		X		232,7	193,8	4.
2	X	215,1	183,7	X		X		220,4	207,7	
3	X	245,1	211,7	X		X		197,3	204,1	
4	X			X		X		215,7	195,2	
1	X	229,3	204,1	X		X		212,6	193,1	5.
2	X	193,5	165,1	X		X		169,5	207,4	
3	X	223,7	198,8	X		X		218,1	197,5	
4	X			X		X		230,8	192,8	
1	X	222,8	189,9	X		X		215,8	191,0	6.
2	X	131,4	117,6	X		X		150,8	205,8	
3	X	204,4	182,6	X		X		230,8	185,6	
4	X			X		X		211,7	191,9	
1	X	203,4	179,2	X		X		210	190,5	7.
2	X	130,7	115,8	X		X		229,2	204,5	
3	X	195,8	179,3	X		X		144	163,4	
4	X			X		X		213,1	191,2	
1	X	199,3	183,1	X		X		209,8	188,7	8.
2	X	127,4	115,3	X		X		228,6	199,9	
3	X	186,1	179,1	X		X		142,8	132,3	
4	X			X		X		212,4	190,9	
1	X	198,8	180,3	X		X		207,9	188,0	9.
2	X	126,8	114,4	X		X		227,8	195,1	
3	X	182,6	178,5	X		X		142,3	130,1	
4	X			X		X		208,3	181,9	
1	X	178,9	161,5	X		X		206,8	185,7	10.
2	X	126,4	114,3	X		X		227,6	174,4	
3	X	196	177,8	X		X		142,2	129,9	
4	X			X		X		200	179,7	
1	X	172	156,1	X		X		206,6	185,1	11.
2	X	124,2	113,7	X		X		219,9	149,2	
3	X	193,7	175,9	X		X		139,7	129,5	
4	X			X		X		196,5	178,0	
1	X	160,8	144,3	X		X		204,5	184,2	12.
2	X	123,5	111,9	X		X		216,3	137,5	
3	X	192,2	174,1	X		X		139,1	126,9	
4	X			X		X		194,4	174,5	

2. Çevrim: İlk iki çevrimde gözlenen ağırlık farkları düşüktür. Bu durum, numunelerin henüz fiziksel bütünlüklerini büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. Örneğin, 1. optimizasyonda Numune 1’de 270,6 g (ıslak) → 248,1 g (kuru) değerleriyle yaklaşık %8,3’lük bir kütle kaybı gerçekleşmiştir. Bu kayıp, çevrim etkisinin henüz sınırlı düzeyde olduğunu göstermektedir. 4. optimizasyon yöntemi, benzer eğilim göstermektedir (ör. 230,8 g → 216,5 g).

4. Çevrim: Çevrim itibarıyla bazı numunelerde kütle kayıpları daha belirginleşmiştir. 1. optimizasyon yöntemiyle hazırlanan numunelerde (ör. Numune 3: 245,1 → 211,7 g) yaklaşık %13,6’lık bir kayıp gözlenmiştir. 4. optimizasyonda benzer numunede (Numune 3: 197,3 → 204,1 g) anormal bir ağırlık farkı yoktur. Genel olarak bu çevrimden itibaren özellikle daha düşük bağlayıcı içeriği veya zayıf agregaya sahip yöntemler (muhtemelen 2. ve 3. optimizasyon) kullanılamaz hâle gelmiş ve sonuçlar “X” ile temsil edilmiştir.

6. ve 7. Çevrim: Bu çevrimlerde optimizasyon 1 ve 4 hâlen ölçülebilir sonuçlar verirken 2. ve 3. optimizasyon tamamen başarısız olmuş, numuneler tamamen dağılmıştır. Örneğin, 6. çevrimde 1. optimizasyonda Numune 2’de 222,8 → 189,9 g (%14,8 kayıp), 4. optimizasyonda Numune 3’te 177,0 → 190,5 g şeklinde yer almıştır. Bu, 4. optimizasyonun bağlayıcısının özellikle bu çevrimde başarılı bir direnç gösterdiğini göstermektedir.

9. ve 10. Çevrimler: Bu aşamada numunelerdeki yapısal çözülme hızlanmıştır. 1. optimizasyon hâlen ıslak ve kuru ağırlıklar arasında ölçülebilir bir fark sunmaktadır (ör. 178,9 → 161,5 g), fakat bu fark artık %10’un üzerindedir. Bu durum, porozite artışı ve iç yapıdaki bağ kopmalarının işareti olarak değerlendirilebilir. 4. optimizasyon hâlâ aktif olarak sonuç vermektedir, bu da yöntemlerin çevresel direnç kapasitesi açısından karşılaştırmalı üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

12. Çevrim: Bu çevrim, numunelerin uzun vadeli çevresel stabiliteleri açısından belirleyici noktadır. Sadece 1. ve 4. optimizasyon yöntemleri sonuç verebilmiş, diğerleri tamamen elenmiştir. 1. optimizasyonda Numune 1: 192,2 → 174,1 g ve 4. optimizasyonda Numune 3: 213,6 → 137,5 g gibi değerler gözlemlenmiştir. 4. optimizasyonda ağırlık kaybı %35 seviyesine kadar ulaşmış olup, bu durum artık kritik dayanım eşiğinin aşıldığını göstermektedir. Yine de 2. ve 3. optimizasyonun çevrime hiç dayanmadığı dikkate alındığında 4. yöntem, görece başarılıdır.

Tablo 23: Zemin, 1, 2, 3 ve 4. Optimizasyon Numunelerinin Islanma-Kuruma Çevrimi Sonucu Kalan Ağırlıkları (%)

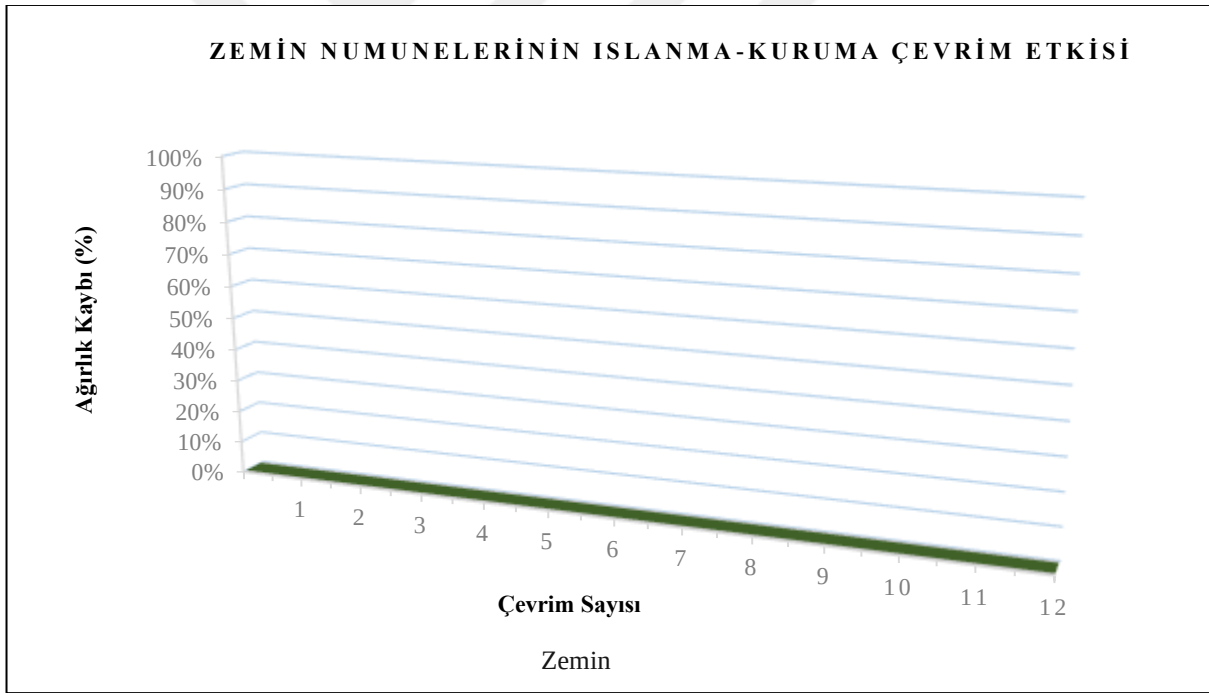
Optimizasyonlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zemin	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
1.Optimizasyon	%99	%98	%97	%88	%82	%76	%74	%74	%73	%65	%63	%58
	%99	%98	%90	%79	%71	%51	%50	%50	%49	%49	%48	%48
	%99	%98	%98	%90	%85	%78	%77	%77	%76	%76	%75	%74
2.Optimizasyon	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
3.Optimizasyon	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%0
4.Optimizasyon	%99	%96	%90	%89	%88	%88	%87	%87	%86	%86	%85	%85
	%99	%98	%98	%98	%97	%96	%95	%94	%92	%82	%70	%65
	%99	%99	%98	%96	%93	%88	%77	%62	%62	%61	%61	%60
	%99	%96	%93	%91	%90	%89	%89	%88	%85	%84	%83	%81

Bu deneysel çalışma kapsamında dört farklı optimizasyon yöntemiyle üretilen numunelerin, 12 çevrim boyunca maruz kaldıkları ıslanma-kuruma döngüsü sonrası kalan ağırlıklarının yüzdesel dağılımları incelenmiştir. Bu veriler, numunelerin suya doygunluk ve kuruma süreçlerinde fiziksel bozulma eğilimlerini, bağlayıcı bütünlüklerini ve mikroyapısal kararlılıklarını yansıtır.

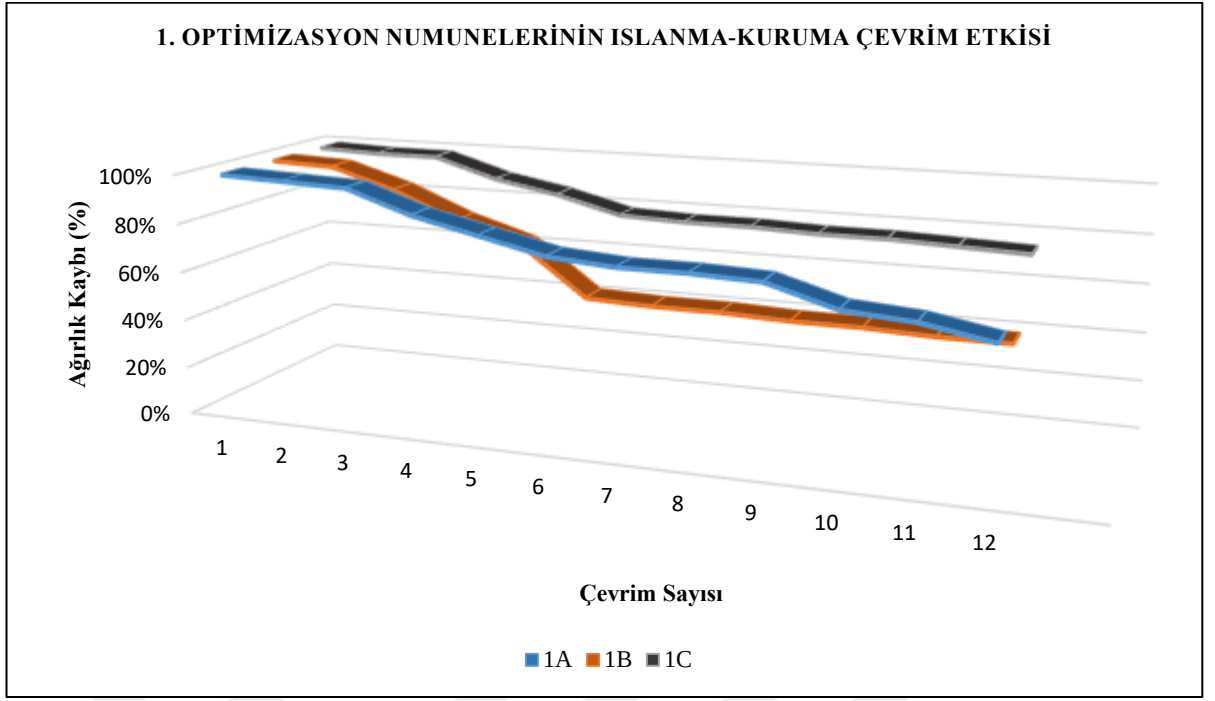
- ✓ Zemin (Optimizasyonsuz): 1. çevrimden itibaren tüm örnekler tamamen dağılmıştır (%0). Bu durum, doğal zeminin çevrimsel su yüklemelerine karşı yapısal bütünlüğünü sürdüremediğini ve herhangi bir iyileştirme olmadan uzun vadeli kullanılabilirliğinin mümkün olmadığını ortaya koymaktadır.
- ✓ 1. Optimizasyon: 1. Optimizasyonda, numuneler çevrimler boyunca kademeli bir kütle kaybı göstermiştir. İlk 4 çevrimde yüksek performans (%88) sergilenirken, 12. çevrimde %58'e kadar düşüş yaşanmıştır. Bu kademeli azalış, bağlayıcının çevrime karşı mikro çatlaklar yoluyla zayıfladığını ancak ani bir bütünlük kaybı yaşanmadığını gösterir. Uzun vadeli performans açısından başarılıdır. Dayanım yitimi sürekli ancak kontrollüdür.
- ✓ 2.Optimizasyon: Tüm çevrimlerde numuneler tamamen dağılmıştır (%0). 2. optimizasyonda kullanılan bağlayıcı sistem veya içerik, hiçbir çevrimde yapısal

bütünlük sağlamamıştır. Bu sonuç, ya bağlayıcının zayıf kohezyon/aderans özelliklerine sahip olduğunu ya da karışım oranının optimum dışında kaldığını göstermektedir. Tamamen başarısız; bu bağlayıcıyla hazırlanan zemin iyileştirme uygulamaları önerilmez.

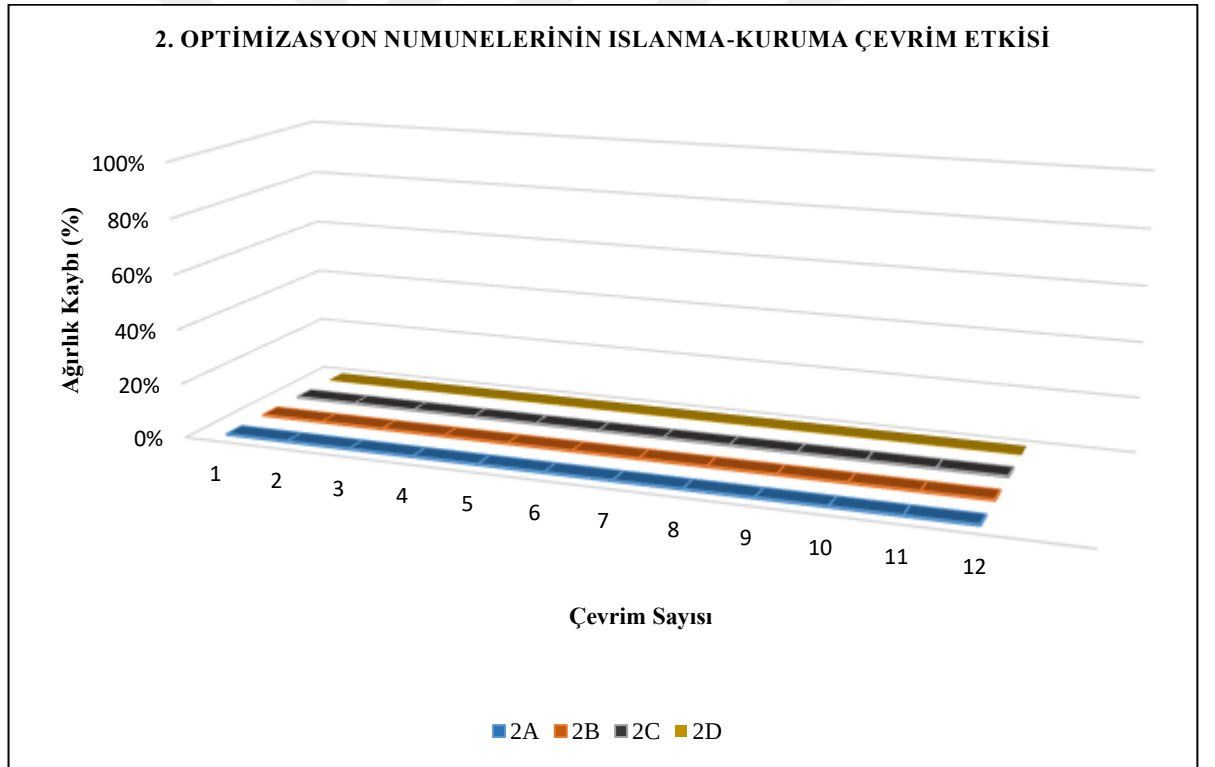
- ✓ 3. Optimizasyon: Tüm çevrimlerde kalan ağırlık %0'dır. 3. optimizasyon yöntemi de 2. optimizasyon gibi ilk çevrimde dahi numune bütünlüğünü sürdürememiştir. Özellikle bu iki yöntemde kullanılan bağlayıcıların çevrimsel suya maruziyetinde çözünerek veya ayrılarak mikroyapıdan hızlıca koptuğu anlaşılmaktadır. Dayanıklılık açısından kullanılamaz. Çevrim koşullarında tamamen yetersizdir.
- ✓ 4. Optimizasyon: 4. optimizasyon, 1. optimizasyona oldukça benzer kademeli bir kütle kaybı profili sergilemiştir. 12. çevrimde %60 oranında kalan ağırlık ile en iyi dayanımı gösteren iki optimizasyon yönteminden biridir. Dayanım kaybı, mikro düzeyde başlayan ancak hızlı ilerlemeyen, kontrollü bozulma davranışı göstermektedir. Uzun vadede yüksek performanslı ve güvenilir bir bağlayıcı sistem olduğunu göstermektedir.



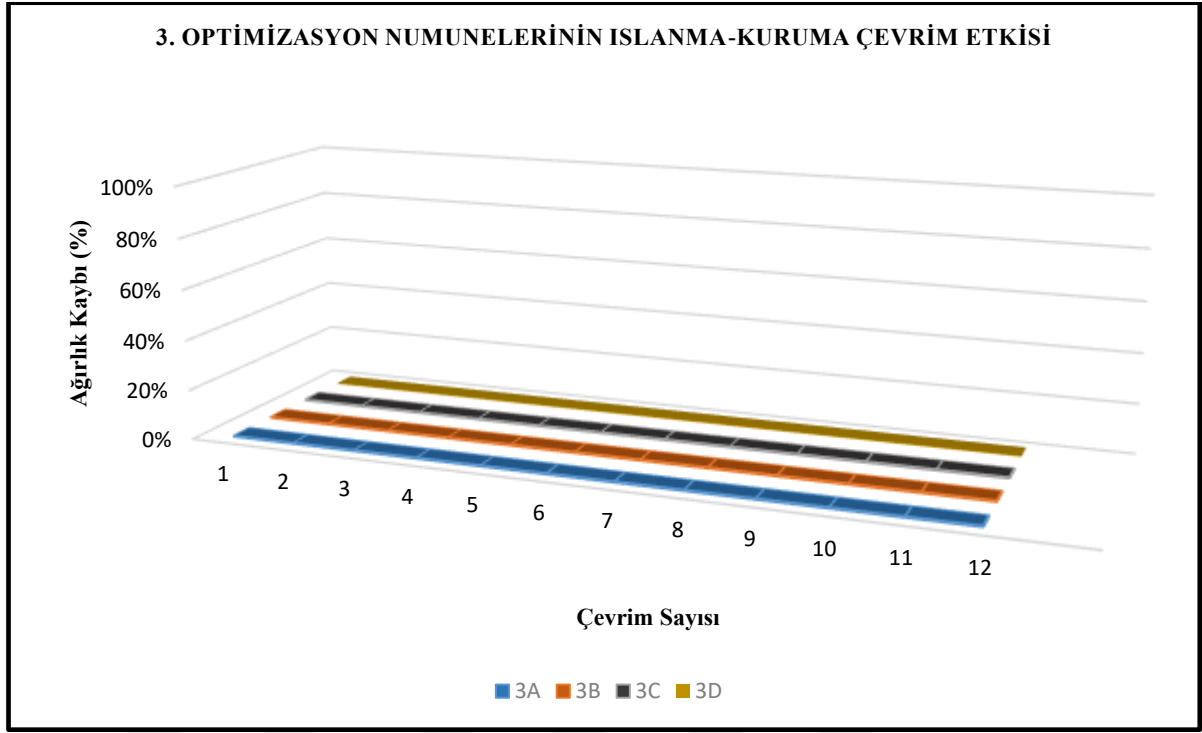
Şekil 64: Doğal Zemin Numunelerinin Islanma Kuruma Çevrim Etkisi



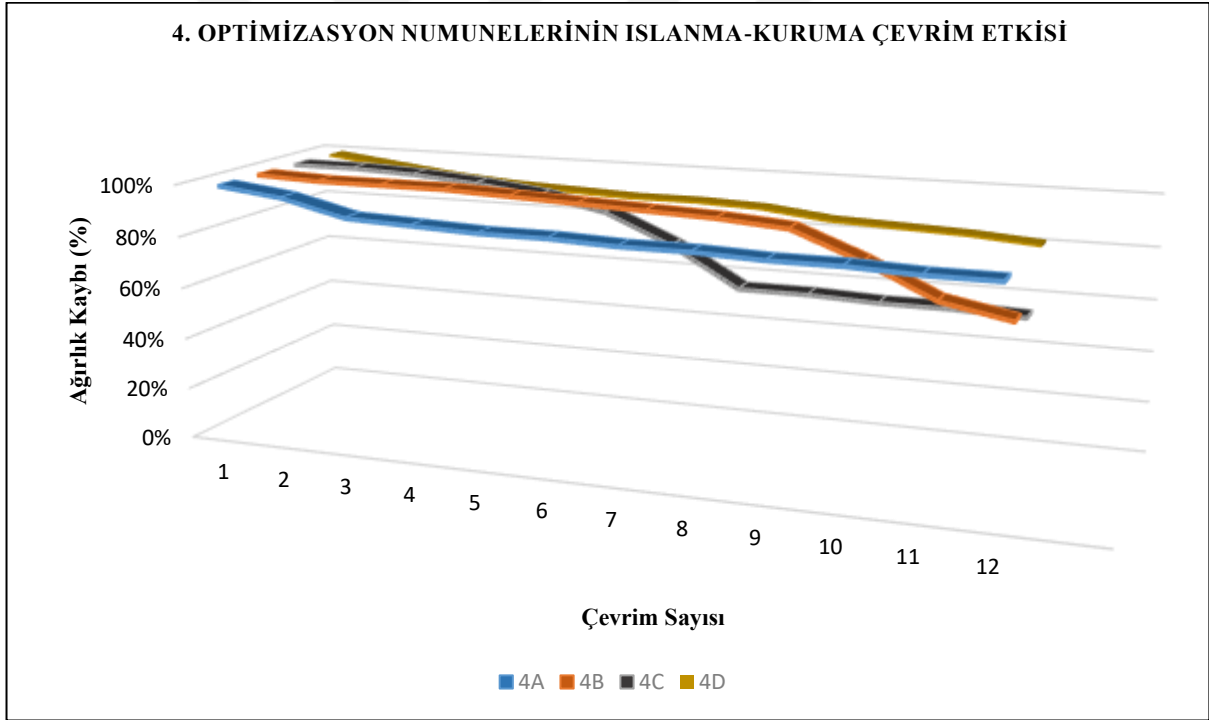
Şekil 65: 1. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Isıanma Kuruma Çevrim Etkisi



Şekil 66: 2. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Isıanma Kuruma Çevrim Etkisi



Şekil 67: 3. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Isıanma Kuruma Çevrim Etkisi



Şekil 68: 4. Optimizasyon Zemin Numunelerinin Isıanma Kuruma Çevrim Etkisi

3.8. İSTATİSTİKSEL MODELLEME VE UYUM DEĞERLENDİRMESİ

Zemin iyileştirme çalışmalarında, mühendislik performansının sağlanmasının yanı sıra çevresel ve ekonomik kriterlerin de optimize edilmesi, sürdürülebilirlik ilkelerine dayalı bir

uygulama anlayışının temel bileşenidir. Bu bağlamda, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), düşük karbon salımı (CO₂ emisyonu) ve maliyet etkinliği, modern geoteknik mühendisliğinde karar verme süreçlerinde dikkate alınan temel performans göstergeleridir. Ancak, bu üç kriterin birbirinden bağımsız değil, birbiriyle çoğu zaman çelişen bir yapıya sahip olduğu gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, çok değişkenli sistemlerin davranışlarını anlamak için gelişmiş istatistiksel yöntemlerin kullanılması zorunlu hâle gelmektedir. Bu doğrultuda çalışmada, hem tek amaçlı optimizasyon (her bir performans tepkisinin ayrı ayrı iyileştirilmesi) hem de çok amaçlı optimizasyon (birden fazla hedefin aynı anda dengelenmesi) stratejileri benimsenmiştir. Bu stratejiler, bağımsız değişkenler ile tepki değişkenleri arasında kurulan matematiksel modeller aracılığıyla uygulanmıştır. Kullanılan modelleme yaklaşımı, çok değişkenli sistemlerin karakteristiklerini yansıtan ikinci dereceden (quadratic) doğrusal olmayan regresyon denklemlerine dayanmaktadır.

Tüm istatistiksel analizler, deneysel veriler üzerinden oluşturulan yanıt yüzey yöntemi (Response Surface Methodology - RSM) yaklaşımı çerçevesinde yürütülmüş ve bu sayede hem bireysel faktörlerin hem de faktörler arası etkileşimlerin tepkiler üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu süreçte, modelin uyum kalitesini ve tahmin kapasitesini değerlendirmek amacıyla çeşitli istatistiksel ölçütler analiz edilmiştir. Bu ölçütler arasında özellikle Ayarlanmış R² (Adjusted R²) ve Tahmin Edilen R² (Predicted R²) değerleri, modelin hem mevcut veriye uyum sağlama derecesini hem de daha önce gözlemlenmemiş verileri öngörebilme kabiliyetini yansıtmaları bakımından büyük önem arz etmektedir. Elde edilen bulgular, tüm tepki değişkenleri (UCS, CO₂ emisyonu ve maliyet) için oluşturulan modellerin yüksek derecede güvenilir olduğunu ortaya koymuştur. Tablo 24'te sunulan istatistiksel değerlendirme sonuçları incelendiğinde, her üç modelde de ayarlanmış ve tahmin edilen R² değerlerinin yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durum, geliştirilen modellerin verileri oldukça iyi temsil ettiğini ve aynı zamanda yeni gözlemler için de doğru öngörüler sağlayabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, modelin genel anlamlılığı açısından uygulanan ANOVA (Varyans Analizi) testlerinde, tüm modellerin p değerlerinin <0,0001 olduğu görülmüştür. Bu bulgu, geliştirilen regresyon modellerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, yani açıklayıcı değişkenlerin (bağımsız değişkenlerin) tepki değişkenleri üzerindeki etkilerinin tesadüfi olmadığını göstermektedir.

Özellikle UCS modeli için uygulanan uyum eksikliği (lack of fit) testi, modelin deneysel verilere uygunluk düzeyinin sınanması açısından kritik bir analizdir. Bu test sonucunda elde

edilen $p > 0,05$ değeri, modelin verilerle istatistiksel olarak tutarlı olduğunu ve önemli bir sapma göstermediğini ortaya koymuştur. Diğer iki modelde (CO_2 emisyonu ve maliyet) ise, deneysel tekrarların sabit olması nedeniyle uyum eksikliği analizi gerçekleştirilememiştir. Bu durum, modelin genellenebilirliği üzerinde herhangi bir olumsuzluk yaratmamakta, ancak söz konusu modellerin geçerliliğini sınarken diğer istatistiksel parametrelerin (R^2 , p değeri vb.) dikkate alınmasını gerektirmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen ikinci dereceden doğrusal olmayan modeller, hem tekli hem de çoklu optimizasyon stratejileri için sağlam bir istatistiksel temel sunmuş; tepki ve faktörler arasındaki karmaşık ilişkilerin matematiksel olarak temsil edilmesini sağlamıştır. Bu modeller, ileri seviye karar destek sistemlerinin geliştirilmesi ve zemin iyileştirme teknolojilerinde sürdürülebilir uygulamaların hayata geçirilmesi açısından yüksek derecede uygulanabilirlik potansiyeli taşımaktadır.

Tablo 24: Modellerin Uyum Tablosu

Modeller	Kaynak	Sıralı p Değeri	Uyumsuzluk p Değeri	Düzeltilmiş -R2	Tahmin Edilen -R2
UCS Maksimizasyonu	Doğrusal	<0.0001	<0.0001	0.6929	0.6379
	2FI	<0.0001	<0.0001	0.8890	0.8650
	İkinci Dereceden	<0.0001	<0.0001	0.9419	0.9242
CO_2 Minimizasyonu	Doğrusal	<0.0001	-	0.8438	0.8210
	2FI	<0.0001	-	0.9191	0.9128
	İkinci Dereceden	<0.0001	-	0.9539	0.9401
Maliyet Minimizasyonu	Doğrusal	<0.0001	-	0.8204	0.8019
	2FI	0.0083	-	0.8548	0.8461
	İkinci Dereceden	<0.0001	-	0.9295	0.9113

Çalışmanın deneysel tasarımı ve istatistiksel modelleme süreci doğrultusunda, bağımsız değişkenler ile elde edilen tepkiler (yanıtlar) arasındaki matematiksel ilişkiler, çok değişkenli regresyon analizine dayalı olarak modellenmiştir. Bu analizlerde kullanılan model türü, sistemin doğrusal olmayan davranış özelliklerini yansıtabilme kapasitesi nedeniyle ikinci dereceden polinom denklemler olarak belirlenmiştir. Bu modeller hem tekil değişkenlerin

etkisini hem de değişkenler arası etkileşimlerin tepki üzerindeki bileşik etkilerini kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır.

Söz konusu denklemler (denklem 4, 5 ve 6) aracılığıyla, üç temel performans çıktısı olan sınırsız basınç dayanımı (UCS), karbon emisyonu miktarı (CO₂ ayak izi) ve maliyet (USD/m³), çalışmada dikkate alınan üç temel bağımsız değişkenin fonksiyonu olarak matematiksel biçimde ifade edilmiştir. Böylece her bir yanıtın, ilgili deney koşullarında ne şekilde değiştiği sayısal olarak öngörülebilir hâle gelmiştir.

Yürütülen modelleme süreci kapsamında, her bir yanıt için ayrı ayrı türetilmiş olan bu ikinci dereceden polinom ifadeler, Denklemler 4, 5 ve 6 olarak numaralandırılmış ve metnin ilerleyen bölümlerinde detaylı şekilde sunulmuştur. Bu denklemler sayesinde hem deneysel sonuçların tahmini hem de optimizasyon analizlerinde kullanılacak ileri düzey hesaplamaların gerçekleştirilmesi mümkün kılınmıştır.

$$\begin{aligned} UCS = & 3.28026 - 13.25601X_1 - 11.98083X_2 - 2.19241X_3 \\ & - 10.744769X_1X_2 - 0.744769X_1X_3 + 18.50823X_2X_3 \\ & + 21.7817X_1^2 + 41.3821X_2^2 + 0.613397X_3^2 \end{aligned} \quad \text{Denklem 4}$$

$$\begin{aligned} CO_2 \text{ Release} = & 72.98402 + 359.37149X_1 - 392.88426X_2 + 18.20308X_3 \\ & - 612.07084X_1X_2 - 49.78112X_1X_3 + 296.97412X_2X_3 \\ & - 309.95238X_1^2 + 1944.27506X_2^2 - 45.99755X_3^2 \end{aligned} \quad \text{Denklem 5}$$

$$\begin{aligned} \text{Cost} = & 139.81727 + 206.50742X_1 - 233.0429X_2 - 20.76627X_3 \\ & - 227.29062X_1X_2 - 4.49X_1X_3 + 23.03928X_2X_3 \\ & - 139.54883X_1^2 + 778.7746X_2^2 - 0.837157X_3^2 \end{aligned} \quad \text{Denklem 6}$$

Elde edilen modeller, sistemin karmaşık yapısını açıklamada yüksek düzeyde doğruluk sağlamakta; bağımsız değişkenlerin yalnızca tekil etkilerini değil, aynı zamanda etkileşim terimleri ve ikinci dereceden katkılarını da dikkate alarak, çok boyutlu bir kestirim zemini sunmaktadır. Bu yönüyle oluşturulan polinom denklemler, zemin iyileştirme uygulamaları bağlamında hem mühendislik açısından uygulanabilir hem de karar destek süreçlerinde değerlendirilebilir analitik araçlar niteliği taşımaktadır.

3.8.1. Modelin Doğrulanması

Çalışmada geliştirilen UCS, CO₂ emisyonu ve maliyet tahmin modellerine ilişkin istatistiksel anlamlılık ve güvenilirlik analizleri Tablo 25'te sunulmakta olup, her bir modelin değerlendirme çıktıları aynı satırda ve sırasıyla eğik çizgi ("/") ile ayrılarak verilmiştir. Bu

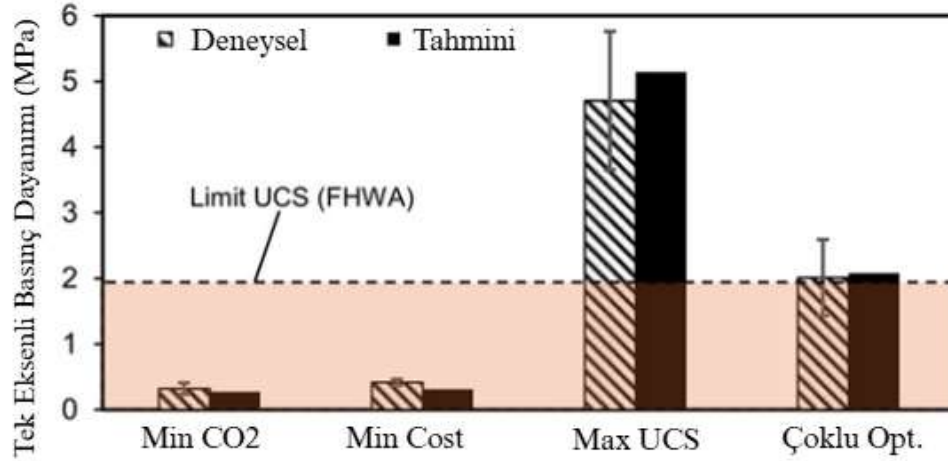
kapsamda, her satırda ilk değer UCS modeline, ikinci değer CO₂ emisyon modeline ve üçüncü değer ise maliyet modeline karşılık gelecek şekilde düzenlenmiştir. Modellerin analizinde elde edilen F değerlerinin 70 ila 110 aralığında değiştiği ve buna karşılık gelen p değerlerinin tüm modeller için 0,0001 seviyesinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, ele alınan modellerin istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı olduğunu ve her üç modelin de en az bir bağımsız değişken aracılığıyla bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkide bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 25: UCS / CO₂ Ayak İzi / Maliyet Modellerinin ANOVA Sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F değeri	P değeri
Model	106.29/97286/712	9	11.81/10809/792	85.62/109/69.88	<0.0001/<0.0001/<0.0001
	5				
X ₁	0.7809/850/1671	1	0.7809/850/1671	5.66/8.58/147.49	0.0225/0.0057/<0.0001
X ₂	60.43/79109/2339	1	60.43/79109/2340	438.05/797/206.51	<0.0001/<0.0001/<0.0001
X ₃	18.27/6318/2274	1	18.27/6318/2274	132.42/63.4/200.76	<0.0001/<0.0001/<0.0001
X ₁ X ₂	0.6273/2023/279	1	0.6273/2003/279	4.55/20.4/24.62	0.0395/<0.0001/<0.0001
X ₁ X ₃	0.0749/334/2.72	1	0.0749/334/2.72	0.5429/3.4/0.24	0.4658/0.07410.06269
X ₂ X ₃	20.55/5291/31.85	1	20.55/5291/31.85	149/53/2.81	<0.0001/<0.0001/0.1018
X ₁ ²	1.90/384/77.97	1	1.90/384/78	13.77/3.9/6.88	0.0007/0.0563/0.0125
X ₂ ²	1.35/2989/479.68	1	1.35/2989/42.34	9.82/30/42.34	0.0033/<0.0001/<0.0001
X ₃ ²	0.1860/1045/0.34	1	0.1860/1045/0.03	1.3510.5/0.031	0.2528/0.0024/0.8621
Artık	5.24/3770/430	38	0.1379/99.21/11.3		
			3		
Uyumsuzluk	3.34/3770/430	5	0.6689/754/86.11	11.63/0/0	<0.0001/0/0
Saf Hata	1.90/0/0	33	0.0575/0/0		
Toplam	111.54/1.01E5/75	47			
	56				
Standart Geliştirici	0.3714/10/3.37	R ²	0.95/0.96/0.94		
Anlamlı	1.36/157/159.8	Ayar..R ²	0.94/0.95/0.93		
C.V.	27.31/6.3/2.11	Ön.R ²	0.92 /0.94/0.91		
		Yeterli Prec.	31.03/34.65/32.55		

Modellerin açıklayıcılık düzeyini ortaya koyan R² katsayılarının %94 ile %96 aralığında değerler alması, oluşturulan modellerin, deneysel verilerde gözlemlenen varyansın büyük bir kısmını açıklayabildiğini ve böylece güçlü bir doğrusal ilişki kurabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, ayarlanmış R² değerlerinin %92 ila %95 arasında değişmesi, modellerin oluşturulmasında aşırı karmaşık yapılar kullanılmadığını, yani modele gereksiz veya açıklayıcılığı düşük parametrelerin dahil edilmediğini göstermekte; bu durum modelin genel

güvenilirliğini ve geçerliliğini artıran önemli bir bulgudur. Buna ek olarak, tahmin edilen R^2 değerlerinin %90'ın üzerinde gerçekleşmiş olması, modellerin yalnızca mevcut veri setine değil, aynı zamanda gelecekte elde edilecek bağımsız veri setlerine karşı da yüksek düzeyde öngörü performansı sergileyebileceğini göstermektedir.



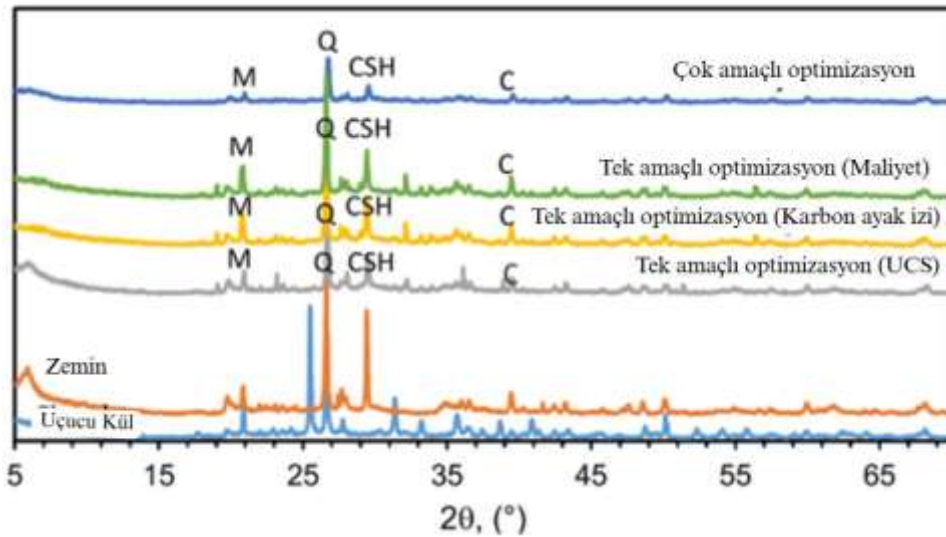
Şekil 69: Çeşitli Durumlar için Deneysel ve Tahmini UCS Değerlerinin Karşılaştırılması

Modellerin ayarlanmış R^2 ile tahmin edilen R^2 değerleri arasındaki farkın 0,2'nin altında olması, modellerin istatistiksel aşırı uyuma (overfitting) düşmeden, genellenebilir nitelikte öngörüler sunduğunu ve yeni veriler üzerinde güvenle kullanılabileceğini teyit etmektedir. Diğer taraftan, modelin optimizasyon açısından elverişli olup olmadığını belirlemek amacıyla değerlendirilen sinyal-gürültü oranlarının her üç modelde de 4'ün üzerinde bulunması, modellerin değişkenler arası ilişkiyi yalnızca tesadüfi dalgalanmalarla değil, sistematik ve anlamlı etkileşimlerle açıkladığını ve bu yönüyle mühendislik temelli optimizasyon uygulamalarında güvenle kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

UCS modeline özel olarak uygulanan uyum testinde istatistiksel anlamlılık gözlenmiş olsa da, bu durum modelin geneline ilişkin bir sapma olarak değerlendirilmemeli; aksine, bu bulgu büyük olasılıkla düşük düzeydeki saf hata değerine veya sınırlı düzeyde açıklanamayan varyans bileşenlerine dayanmaktadır. Bu nedenle, özellikle UCS modeline ilişkin bu bulgu, modelin genellenebilirliğini ya da güvenilirliğini ciddi biçimde zedelememekte; aksine, yüksek R^2 değerleri, güçlü tahmin kabiliyeti ve düşük varyans farkları dikkate alındığında, modelin çeşitli mühendislik uygulamalarında -özellikle de optimizasyon hedefli analizlerde- dikkatli ve kontrollü bir şekilde kullanılmasının uygun olacağı söylenebilir.

3.8.2. Stabilize Edilmiş Numunelerin Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında uygulanan tek ve çok amaçlı optimizasyon stratejileri doğrultusunda hazırlanan stabilize numunelere ait mineralojik analizler, karşılaştırmalı olarak Şekil 70’de sunulmuştur. Bu analizler, uçucu kül ve doğal zemin bileşenlerinden oluşan karışımların, uygulanan optimizasyon hedeflerine bağlı olarak mineralojik yapı bakımından anlamlı düzeyde farklılıklar sergilediğini ortaya koymuştur. X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları incelendiğinde, uçucu külün yüksek oranda amorf faz içeriğine sahip olduğu ve bu nedenle kimyasal olarak oldukça reaktif bir karakter taşıdığı görülmektedir. Buna karşılık, doğal zeminin daha çok kuvars, kil ve kalsit gibi kristal yapılar içeren minerallerden oluştuğu belirlenmiştir. Bu iki farklı bileşenin bir araya getirilerek sodyum silikat ve sodyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerle stabilize edilmesi, sistemde oluşan bağlayıcı fazların hem karıştırma oranına hem de benimsenen optimizasyon hedeflerine bağlı olarak çeşitlendiğini göstermektedir.



Şekil 70: Çeşitli Optimizasyon Hedefleri Göz Önünde Bulundurularak Stabilize Edilmiş Zemin Örneklerinin XRD Deseni

UCS (tek eksenli basınç dayanımı) değerinin maksimize edilmesinin hedeflendiği karışımda, uçucu külden yer alan camı fazların büyük ölçüde çözünerek ortamda serbest iyonların açığa çıkmasına neden olduğu ve bunun sonucunda kuvars ile mullit fazlarının zayıfladığı; aynı zamanda belirgin şekilde amorf jel fazlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Elde edilen bu amorf jel yapılar, yüksek mekanik dayanımı sağlayan ve sistemin bağlayıcılık kapasitesini artıran temel fazlar olup, mineralojik yapı ile dayanım arasında doğrudan ilişki kurmaktadır. Öte yandan, çok amaçlı optimizasyon esas alınarak hazırlanan karışımlarda, bileşenlerin kimyasal içeriği daha dengeli tutulmuş; bu nedenle kuvars ve mullit gibi kristal

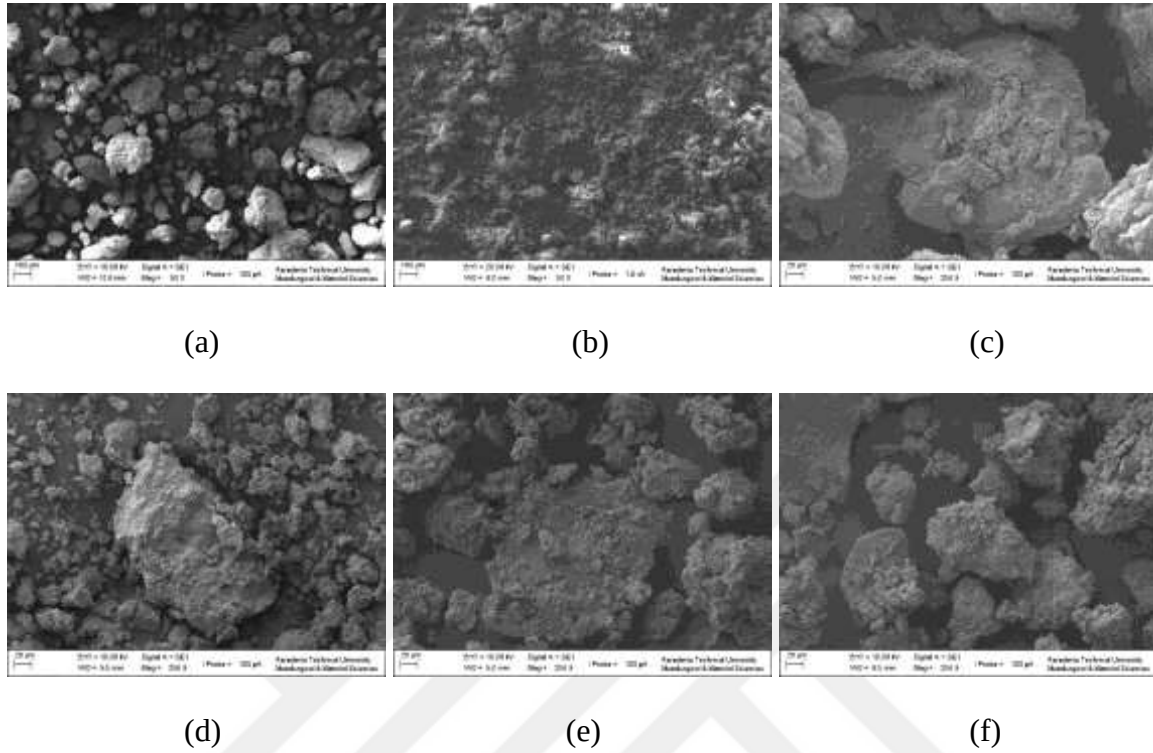
fazlar tamamen çözülmeyen kısmen korunmuş, ancak sistemde yeterli miktarda N-A-S-H ve/veya C-A-S-H türü jel oluşumu yine de mümkün kılınmıştır. Buna karşılık, yalnızca CO₂ salınımının ya da maliyetin en aza indirilmesini hedefleyen tek amaçlı optimizasyon senaryolarına göre hazırlanan karışımlarda ise, alkali aktivasyonun oldukça sınırlı düzeyde gerçekleştiği, bunun da özellikle zemin bünyesinde bulunan kuvars ve kalsit gibi kristal fazların büyük ölçüde tepkisiz kalmasına yol açtığı gözlenmiştir. Bu durumun doğal sonucu olarak, sistemde jel fazı oluşumu tespit edilememiş ve böylece dayanım performansı ciddi ölçüde yetersiz kalmıştır. Tüm bu bulgular bir araya getirildiğinde, stabilize edilen numunenin nihai dayanımını belirleyen başlıca faktörün, başlangıçtaki mineralojik yapı kadar, uygulanan kimyasal aktivasyon derecesi ve bileşenler arasındaki reaktif denge olduğu net biçimde anlaşılmaktadır.

Şekil 71 optimize edilmiş farklı karışım senaryolarına göre hazırlanan stabilize zemin örneklerinin mikro-yapısal (dokusal) karakteristiklerini gözler önüne sermektedir. Bu kapsamda, ilk olarak Şekil 71a ve 71b’de sırasıyla doğal zemin ve uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen yüzey morfolojileri sunulmuştur. Şekil 71a’da görülen doğal zemin yapısı, düzensiz geometrilere sahip, köşeli ve kümelenmemiş partiküllerden oluşmakta olup; partiküller arasındaki belirgin boşluklar, bağlayıcı rol üstlenebilecek herhangi bir jel fazın varlığını göstermemektedir. Diğer taraftan, Şekil 71b’de sunulan uçucu kül görüntüsünde ise, nispeten daha küçük çaplı, pürüzsüz yüzeyli ve camsı karakterde olan küresel parçacıklar dikkat çekmektedir; bu yapıların amorf yapıda olup reaktif özellikler taşıdığı literatürde de doğrulanmıştır.

Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı ile hazırlanan ve Şekil 71c’de gösterilen numunenin mikroyapısal analizinde, öğütülmüş partiküllerin donuk ve teğetsel yüzeylere sahip jel benzeri bir matriks içine gömülü olduğu gözlemlenmiştir. Bu morfolojinin XRD analiz bulguları ve UCS değerinin 5,1 MPa olarak belirlenmiş olmasıyla birlikte değerlendirildiğinde, bu jelleşmiş yapının büyük olasılıkla N-A-S-H ve C-A-S-H türü amorf bağlayıcı jellerden oluştuğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, sadece UCS optimizasyonuna odaklanılarak hazırlanmış karışıma ait Şekil 71d incelendiğinde, mikro boyutlu parçacıkların sıkı şekilde aglomere olduğu ve mevcut boşlukların önemli ölçüde jel yapılarla dolduğu görülmektedir; bu da yüksek mekanik dayanımın mikroyapısal temellerini açıklamaktadır.

Buna karşılık, Şekil 71e ve 71f’de sırasıyla CO₂ emisyonu ve maliyet kriterlerine göre tek amaçlı optimize edilmiş karışımlara ait yüzey morfolojileri sunulmuştur. Her iki görüntüde de jelleşme olgusu kısmen gözlenebilmekle birlikte, porozite düzeyinin daha yüksek olduğu ve

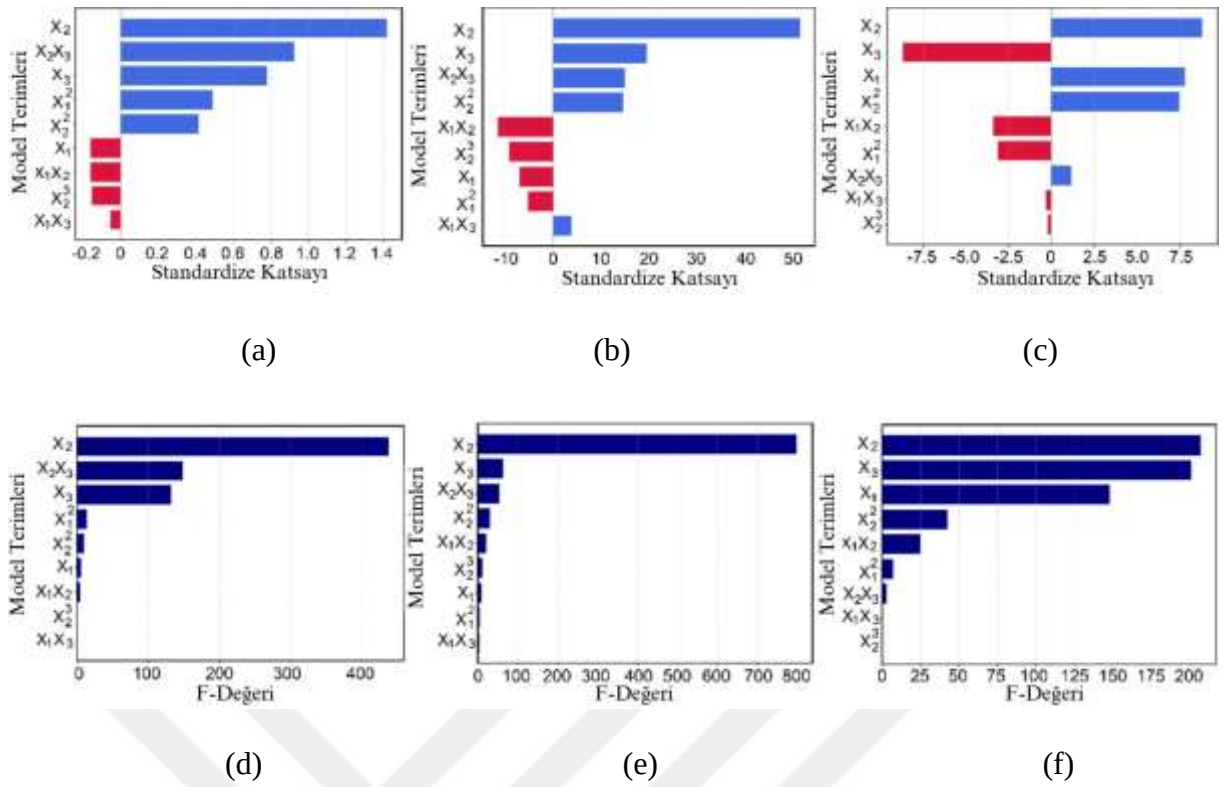
gözeneklerin belirli ölçüde boş kaldığı görülmektedir. Bu da, jelleşmenin yeterli düzeye ulaşmadığını ve bağlayıcı ağ yapısının tam anlamıyla gelişmediğini göstermekte; dolayısıyla dayanım kazanımının sınırlı kaldığını teyit etmektedir.



Şekil 71: Taramalı Elektron Mikroskobu Görünümü (a) Zemin, (b) Uçucu Kül, (c) Çok Amaçlı Optimizasyonla Numuneyi Stabilize Eder, (d) UCS Tabanlı Tek Amaçlı Optimizasyonla Stabilize Edilmiş Numuneler, (e) CO₂ Salınımı Tabanlı Tek Amaçlı Optimizasyonla Stabilize Edilmiş Numuneler, (f) Maliyet Tabanlı Tek Amaçlı Optimizasyonla Stabilize Edilmiş Numuneler

3.8.3. Modellerdeki Faktör Etkilerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, araştırma kapsamında geliştirilen tek eksenli basınç dayanımı (UCS) modeli, karbon ayak izi modeli ve ekonomik maliyet modeli temel alınarak gerçekleştirilen faktör önem analizlerinin bulguları detaylı biçimde ele alınmaktadır. Elde edilen analiz sonuçları Şekil 72’de grafiksel olarak sunulmakta olup; modelde yer alan bağımsız değişkenlerin sistem çıktıları üzerindeki etkileri, hem standartlaştırılmış regresyon katsayıları hem de ANOVA (Varyans Analizi) temelinde hesaplanan F değerleri üzerinden çok yönlü biçimde değerlendirilmiştir.



Şekil 72: Modellerin Parametre Etkileri (a) UCS Modelinin Standardize Regresyon Katsayısı Değişimi, (b) CO₂ Ayak İzi Modelinin Standardize Regresyon Katsayısı Değişimi, (c) Maliyet Modelinin Standardize Regresyon Katsayısı Değişimi, (d) UCS Modelinin F-Değer Tabanlı Pareto Diyagramı

İlk olarak, Şekil 72a-72c’de sunulan grafikler, istatistiksel olarak anlamlı regresyon katsayıları dikkate alınarak parametrelerin model çıktıları üzerindeki yönsel (pozitif ya da negatif) ve nicel etkilerini ortaya koymaktadır. Bu katsayılar, Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) kullanılarak elde edilen çok değişkenli regresyon analizlerinin sonucunda elde edilmiş olup, her bir değişkenin model doğrusal yapısındaki göreceli önem düzeyini temsil etmektedir. Buna paralel şekilde, Şekil 72d-72e’de yer alan Pareto diyagramları, her bir parametrenin model üzerindeki istatistiksel önem derecesini göstermek amacıyla ANOVA’dan elde edilen F istatistikleri temel alınarak oluşturulmuştur.

UCS modeline ait standartlaştırılmış regresyon katsayıları incelendiğinde, X_2 değişkeninin (Aktivatör/(Uçucu kül + Zemin)) oldukça belirgin bir biçimde pozitif yönlü en baskın etkiye sahip olduğu görülmektedir. Aynı durum, Pareto analizi ile oluşturulan Şekil 72d’de de açıkça ortaya konmuş olup, X_2 değişkeni hem istatistiksel açıdan anlamlı hem de fiziksel açıdan yapısal stabiliteyi artırıcı etki göstermektedir. UCS üzerindeki ikinci en önemli etkili değişkenin ise X_3 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı) olduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular, bağlayıcı jellerin oluşumunda alkali çözeltinin bileşim oranının belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca, değişkenler arasındaki X_2 - X_3 ve X_1 - X_2 etkileşim terimlerinin, UCS

çıktısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin bulunduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, X_1 (Sıvı/katı oranı) ve X_2 değişkenlerinin UCS üzerinde daha düşük seviyede doğrusal olmayan (quadratic) etkiler oluşturduğu da analiz sonuçlarıyla desteklenmiştir. Bu durum, malzeme tasarımında yalnızca doğrudan etkiler değil, aynı zamanda etkileşim ve ikinci dereceden terimlerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

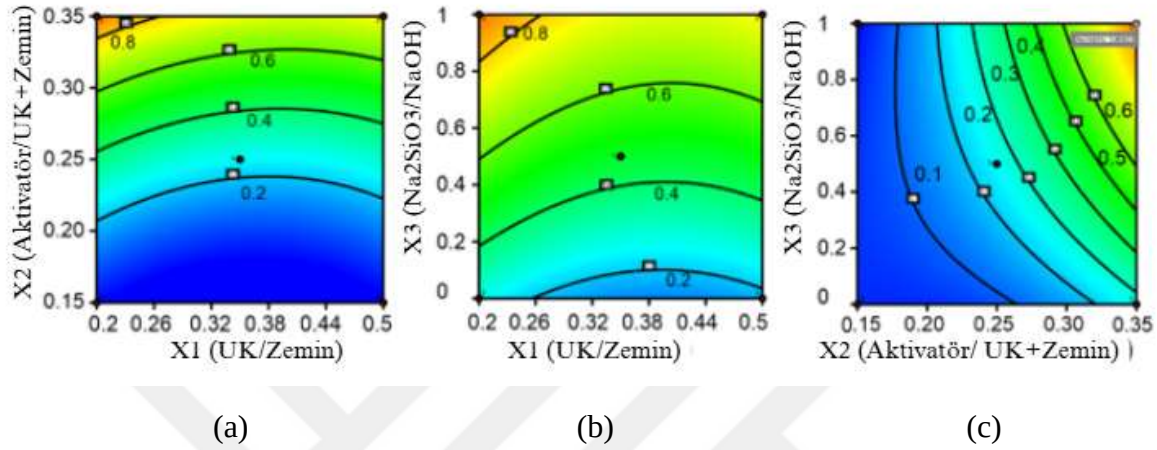
Şekil 72b ve 72e incelendiğinde ise, bağımsız değişkenlerin karbon ayak izi üzerindeki etkileri açıkça gözlemlenmektedir. Hem standartlaştırılmış regresyon katsayıları hem de Pareto diyagramları oldukça uyumlu sonuçlar sergilemekte olup, bu bağlamda yine X_2 değişkeni, karbon emisyonları açısından en yüksek pozitif katkıyı sağlayan ana faktör olarak öne çıkmaktadır. Bunu takiben, X_3 değişkeni de karbon ayak izi üzerinde olumlu etkiye sahip ikinci önemli parametre olarak tanımlanmıştır. Değişkenler arası etkileşim açısından bakıldığında ise, X_2 - X_3 etkileşiminin karbon ayak izi üzerinde olumlu katkı sağladığı, buna karşın X_1 - X_2 etkileşiminin bu çıktı üzerinde negatif bir etki oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, X_2 ve X_3 değişkenlerinin sistem üzerindeki doğrusal olmayan etkilerinin de istatistiksel olarak anlamlı olduğu, bu etkilerin hem pozitif hem de negatif yönde olabileceği analiz bulgularından anlaşılmaktadır. Bu durum, CO₂ salınımını minimize etmeye yönelik malzeme tasarımında, özellikle reaktif bileşen oranlarının dikkatli biçimde optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Şekil 72c ve 72f, sistemdeki bağımsız değişkenlerin maliyet üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla sunulmuştur. Bu grafikler doğrultusunda, özellikle X_2 ve X_3 değişkenlerinin, maliyet çıktısı açısından en belirleyici faktörler olduğu görülmektedir. X_2 (Aktivatör/(UK+Zemin)) ve X_1 (Sıvı/katı oranı) değişkenlerinin maliyet üzerinde olumlu yönde etkili olduğu; buna karşılık X_3 değişkeninin maliyet açısından negatif yönlü (artırıcı) bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, X_1 - X_2 etkileşiminin, maliyet çıktısı üzerinde olumsuz bir sinerjik etki oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, X_1 ve X_2 değişkenlerinin sırasıyla negatif ve pozitif yönlerdeki ikinci dereceden etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu durum, özellikle ekonomik tasarım optimizasyonunda, sadece birim fiyatlar değil, aynı zamanda bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri ve doğrusal olmayan etkilerinin de dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

3.8.4. Tek Amaçlı (Mono-Objektif) Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada yürütülen optimizasyon analizlerinin ilk aşamasında, yalnızca tek eksenli basınç dayanımı (UCS) çıktısının maksimize edilmesini hedefleyen bir tek amaçlı optimizasyon

yaklaşımı benimsenmiştir. Şekil 73a-73c, bu optimizasyonun sonuçlarını iki boyutlu talep eğrileri üzerinden görsel olarak sunmakta olup, bu senaryoda karbon ayak izi (CO_2 emisyonları) ve ekonomik maliyet parametreleri herhangi bir kısıt ya da hedef olarak dikkate alınmamıştır. Analizler sonucunda optimum tasarım değişkenleri sırasıyla $X_1 = 0,20$, $X_2 = 0,35$ ve $X_3 = 1,00$ olarak belirlenmiş ve bu kombinasyonla elde edilen küresel talep değeri 0,888 olarak hesaplanmıştır.

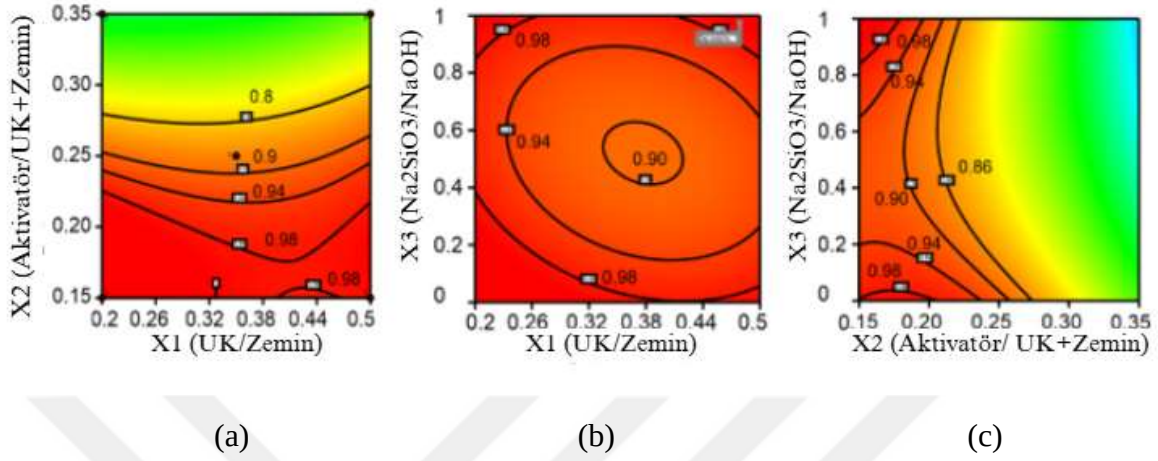


Şekil 73: Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Gösteren Tek Nesneli Optimizasyon Sonuçlarına Dayalı UCS Maksimizasyonunun Kontur Çizimi (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği

Şekil 73a, özellikle aktivatör oranının (X_2), UCS çıktısı üzerindeki belirleyici rolünü açıkça göstermektedir. Bu grafik, UCS'nin yüksek değerlere ulaşmasının, yüksek X_2 oranları ile düşük X_1 oranlarının bir araya gelmesiyle mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 73b, bu eğilimi destekler nitelikte olup, aktivatör bileşiminin yanı sıra $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı (X_3) bileşiminin de mukavemet üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir. Bu durum, Na_2SiO_3 'ün aktivatördeki SiO_2 kaynağı olarak görev yapması ve bu bileşenin uçucu kül içerisindeki daha az aktif SiO_2 'ye kıyasla reaktifliği daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Benzer bir analiz, Şekil 73c'de yer almakta olup, burada aktivatör miktarının artışıyla birlikte mukavemetin belirgin biçimde arttığı; ancak X_3 değişkeni için yaklaşık 1,0 seviyesinde optimum bir aralık bulunduğu görülmektedir. Özellikle Şekil 73b ve 73c, X_1 ve X_3 değişkenlerinin aşırı seviyelerde seçilmesi durumunda UCS değerinin düştüğünü ortaya koymakta ve seçilen optimizasyon noktasının geçerliliğini pekiştirmektedir.

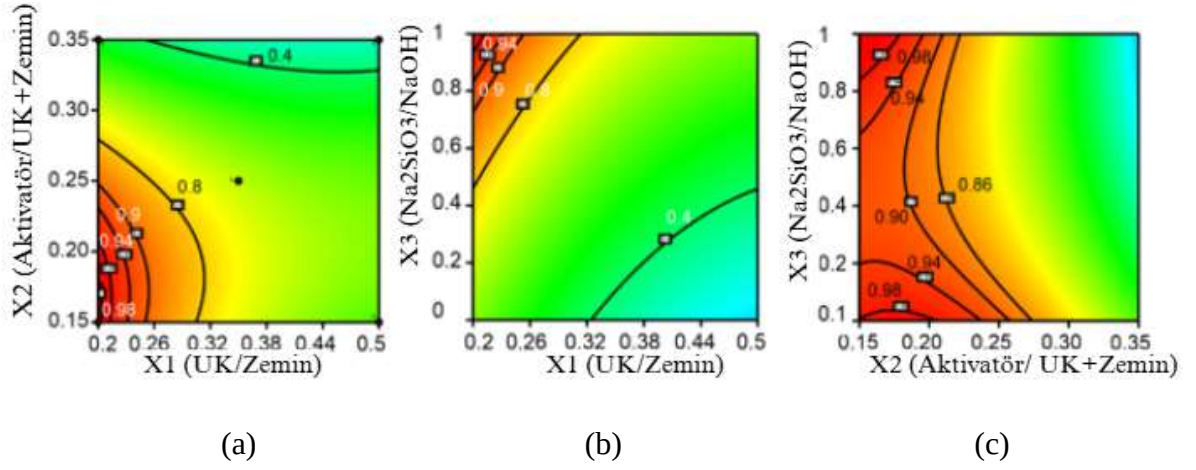
Bu senaryo altında belirlenen optimum parametrelerle elde edilen UCS değeri, 5,145 MPa olarak öngörülmüş ve bu değer FHWA tarafından önerilen 2 MPa'lık minimum dayanım sınırının oldukça üzerinde yer almaktadır. Söz konusu tahmin değeri, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel testlerle doğrulanmış ve Şekil 69'da sunulan sonuçlarla uyumlu

bulunmuştur. Ancak, yalnızca dayanım kriterine odaklanılan bu senaryo kapsamında karbon emisyonu $256,46 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ve maliyet ise $159,03 \text{ \$/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sistemin sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından oldukça dezavantajlı hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 74: CO₂ Salınımını En Aza İndirmeye Dayalı Tek Nesneli Optimizasyon Sonuçlarının Kontur Çizimi, Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Göstermektedir (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği

Öte yandan, Şekil 74a-74c, bu kez yalnızca karbon ayak izinin minimize edilmesini amaçlayan tek nesneli bir optimizasyonun sonuçlarını sunmaktadır. Bu analiz kapsamında optimum tasarım değişkenleri sırasıyla $X_1 = 0,20$, $X_2 = 0,15$ ve $X_3 = 0,00$ olarak belirlenmiş ve talep değeri 1,000 olarak elde edilmiştir. Şekil 74a'dan anlaşılacağı üzere, bu senaryoda X_2 parametresi CO₂ salınımı üzerinde en güçlü etkiyi gösteren değişken olarak öne çıkmakta, X_1 'in etkisi ise daha sınırlı kalmaktadır. Özellikle X_1 değerinin yükselmesiyle talepte azalma gözlenmekte ve X_2 'deki küçük bir artış bile CO₂ emisyonlarını ciddi şekilde artırabilmektedir. Şekil 74b, X_3 değişkeninin artışının talep üzerinde önemli bir azalma yarattığını göstermektedir. Sodyum silikatın üretim sürecinde yüksek karbon salımıyla ilişkilendirilmesi, bu düşüşün altında yatan temel nedendir. Şekil 74c ise, en yüksek arzu edilebilirliğin X_2 ve X_3 değerlerinin minimum düzeyde olduğu bölgede elde edildiğini göstermektedir. Bu iki parametredeki artışın birlikte CO₂ emisyonlarında logaritmik bir artışa yol açtığı, dolayısıyla etkileşimlerinin olumsuz sinerjik bir etki yarattığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, bu optimizasyon senaryosu altında, m^3 başına CO₂ salınımı $98,91 \text{ kgCO}_2$ ve maliyet $151,28 \text{ \$/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Ancak, UCS değeri yalnızca $0,311 \text{ MPa}$ olarak öngörülmüş ve bu değer laboratuvar testleriyle doğrulanarak, 2 MPa 'lık sınır değerin oldukça altında kaldığı teyit edilmiştir.



Şekil 75: Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Gösteren Maliyet Minimizasyonuna Dayalı Tek Amaçlı Optimizasyon Sonuçlarının Kontur Çizimi (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği

Şekil 75a-75c, ekonomik maliyetin en aza indirgenmesini hedefleyen tek amaçlı optimizasyon yaklaşımının sonuçlarını sunmaktadır. Bu analiz sonucunda, optimum bağımsız değişkenler $X_1 = 0,20$, $X_2 = 0,15$ ve $X_3 = 1,00$ olarak belirlenmiş ve talep değeri yine 1,000 olarak hesaplanmıştır. Şekil 75a, en düşük X_1 ve X_2 oranlarının, en yüksek talep düzeyini sağladığını ortaya koymaktadır. Özellikle aktivatör oranının (X_2) maliyet üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu görülmekte; bu da X_2 oranındaki artışın doğrudan sistem maliyetini artırdığını göstermektedir. Şekil 75b, düşük X_1 ve yüksek X_3 seviyelerinde arzu edilebilirliğin yükseldiğini ve bu durumun uçucu kül miktarının azalması ve Na₂SiO₃/NaOH oranının artmasıyla açıklanabileceğini göstermektedir. NaOH'nin birim maliyetinin genellikle Na₂SiO₃'ten daha yüksek olması nedeniyle, $X_3 = 1,00$ değeri maliyet açısından optimum bir nokta oluşturmaktadır. Şekil 75c, özellikle X_2 'nin düşük, X_3 'nin yüksek olduğu kombinasyonlarda maliyetin minimum düzeye indiğini ortaya koymaktadır. Bu analiz sonucunda DSM harcının m³ başına maliyeti 132,24 \$, CO₂ salınımı ise 105,71 kgCO₂ olarak belirlenmiştir. Ancak, bu senaryo altında tahmin edilen UCS değeri yalnızca 0,132 MPa olup, 2 MPa'lık minimum dayanım sınırının oldukça altındadır. Bu tahmin de deneysel testlerle doğrulanmış ve Şekil 69'da sunulan laboratuvar verileriyle uyumlu bulunmuştur.

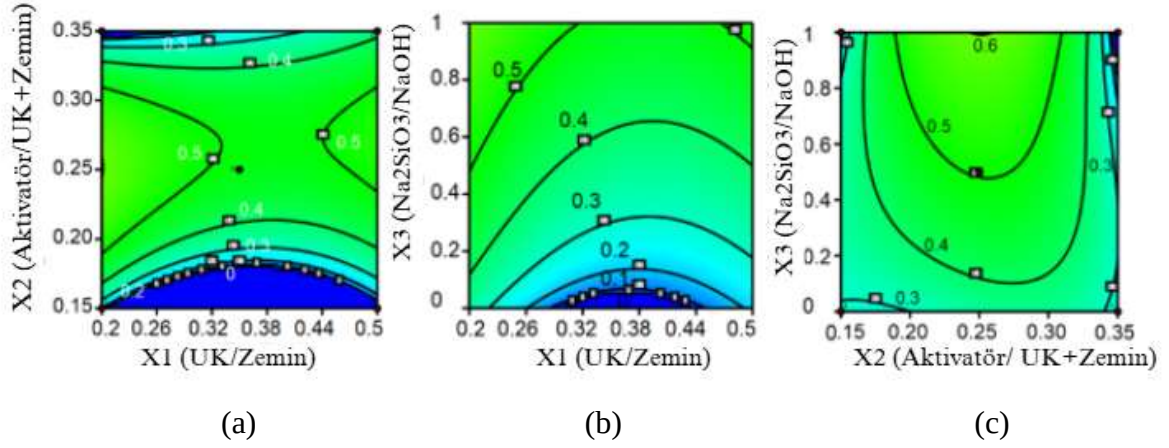
Bu üç tek amaçlı optimizasyon yaklaşımı karşılaştırıldığında, yalnızca bir performans kriterine odaklanmanın sistemin genel verimliliği üzerinde önemli ödünler doğurduğu açıkça görülmektedir. UCS'nin maksimize edildiği durumda, yüksek dayanım sağlanırken çevresel ve ekonomik maliyetlerin ciddi boyutlara ulaştığı; CO₂ ve maliyetin minimize edildiği senaryolarda ise dayanımın yetersiz düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, zemin iyileştirme uygulamalarında performans hedefleri arasında ciddi bir çatışma bulunduğunu ve

yalnızca tek bir hedef doğrultusunda hareket edilmesinin bütüncül mühendislik çözümleri üretmede yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, tüm performans kriterlerini eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlayan çok amaçlı (multi-objektif) optimizasyon yaklaşımlarının benimsenmesi gerekliliği açıkça ortaya çıkmaktadır.

3.8.5. Çok Amaçlı Optimizasyon

DSM (Derin Karıştırma Yöntemi) harç karışımının tasarımında çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı, çevresel sürdürülebilirliği esas alan, ekonomik uygulanabilirliği gözetken ve aynı zamanda mühendislik performansını (özellikle dayanım düzeyini) maksimize eden dengeli bir karışım formülasyonu oluşturmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, üç temel performans kriteri olan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) maksimuma çıkarılmaya çalışılırken, aynı anda hem birim hacim başına düşen CO₂ emisyonları hem de üretim maliyeti asgari seviyeye indirilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon süreci sonucunda elde edilen bağımsız değişken değerleri $X_1 = 0,20$ (uçucu kül oranı), $X_2 = 0,25$ (aktivator oranı) ve $X_3 = 1,0$ (Na₂SiO₃/NaOH oranı) olarak belirlenmiş ve bu kombinasyona karşılık gelen genel talep skoru 0,602 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 76'da sunulan üç boyutlu talep yüzey grafiklerine bakıldığında, çok amaçlı optimizasyonun sağladığı dengeyi görsel olarak analiz etmek mümkündür. Şekil 76a'da sunulan X_1 ile X_2 arasındaki etkileşim grafiği incelendiğinde, en yüksek talep değerinin, bağlayıcı malzeme olan uçucu kül oranının minimuma yakın düzeyde tutulduğu ve aktivatör oranının ise orta seviyelerde optimize edildiği bölgede elde edildiği görülmektedir. Bu durum, uçucu kül gibi düşük maliyetli ancak sınırlı bağlayıcılık potansiyeline sahip bir bileşenin, optimum miktarda kullanılması durumunda hem ekonomik hem de çevresel avantajlar sunduğunu ve aynı zamanda yeterli dayanım koşullarını sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 76: Talebe Dayalı Etkileşim Etkilerini Gösteren Çok Amaçlı Optimizasyon Sonuçlarının Kontur Çizimi (a) Uçucu Kül İçeriği ve Aktivatör İçeriği, (b) Uçucu Kül İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği, (c) Aktivatör İçeriği ve Sodyum Silikat İçeriği.

Diğer yandan, X_1 ile X_3 parametreleri arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 76b, uçucu kül oranı düşük tutulurken $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının maksimum seviyelere yakın olduğu durumda talep skorunun en üst düzeye ulaştığını göstermektedir. Bu bulgu, sistemin ihtiyaç duyduğu aktif silikanın esas olarak Na_2SiO_3 içeren aktivatör bileşiminden sağlandığını ve bu nedenle uçucu külün katkısının dayanım açısından ikincil düzeyde kaldığını göstermektedir. Bu yönüyle, ekonomikliğiyle öne çıkan uçucu külün miktarının sınırlanması, dayanım hedefini önceleyen çoklu kriterli yaklaşımlarda rasyonel bir tercih olarak değerlendirilmelidir.

Şekil 76c’de sunulan X_2 ile X_3 etkileşim grafiği ise, optimum kombinasyonun aktivatör oranının %25 ve silikat/hidroksit oranının 1,0 olduğu bölgede elde edildiğini ortaya koymaktadır. Bu yapılandırma, yüksek mukavemet performansına ulaşmak için gerekli olan kimyasal aktivasyon düzeyinin sağlandığını, ancak buna bağlı olarak sistemin karbon ayak izi ile maliyet değerlerinde kısmi bir artış yaşandığını da ima etmektedir. Ancak, tüm kriterler birlikte değerlendirildiğinde bu artışın sistemin genel performansı açısından tolere edilebilir düzeyde olduğu ve çok amaçlı optimizasyonun mühendislik açısından dengeli bir çözüm sunduğu görülmektedir.

Çok amaçlı optimizasyon uygulamasının çıktıları, Tablo 26’da diğer tek amaçlı optimizasyon senaryoları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu Tablo üzerinden yapılan değerlendirmelerde, çok amaçlı yaklaşımla elde edilen tasarım parametrelerinin, her bir performans hedefinde maksimum sonuç vermese de, makul düzeyde kabul edilebilir bir bütünlük sağladığı anlaşılmaktadır. Tek amaçlı optimizasyonlara kıyasla, dayanım kriteri açısından minimum mühendislik gerekliliklerinin sağlandığı; ancak karbon emisyonu ve maliyet açısından en düşük değerlere ulaşamadığı görülmektedir. Elde edilen talep skorunun

1,000 olan ideal değerden 0,602 seviyesine sapması, sistemin tüm hedefleri eşzamanlı karşılayamadığını, fakat uygulama açısından rasyonel ve sürdürülebilir bir denge sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, mühendislik uygulamalarında bu tür çoklu kriterli karar destek sistemlerinin, performans, çevresel etki ve maliyet dengesini gözetten daha bütüncül çözümler geliştirmede önemli bir araç olduğu ortaya konmuştur.

Tablo 26: Farklı Hedeflerle Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon Türü	Amaç	X ₁	X ₂	X ₃	UCS (MPa)	CO ₂ Salınımı (kgCO ₂)	Maliyet (\$)	Talep
Tek Amaçlı Optimizasyon	UCS ↑	0.200	0.350	1.0	5.145	256.46	159.02	0.888
Tek Amaçlı Optimizasyon	CO ₂ ↓	0.200	0.150	0	0.311	98.91	151.28	1
Tek Amaçlı Optimizasyon	Maliyet ↓	0.200	0.150	1.0	0.132	105.71	132.24	1
Çok Amaçlı Optimizasyon	UCS ↑ CO ₂ ↓ Maliyet ↓	0.200	0.25	1.0	2.213	161.28	137.78	0.602

3.8.6. Modellerin Dayanıklılık Performansı

Gerçekleştirilen tek ve çok amaçlı optimizasyon uygulamaları sonucunda elde edilen bulgular, genel anlamda çok amaçlı optimizasyon yaklaşımının sistem performansı açısından daha dengeli ve uygulanabilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu kapsamda belirlenen optimum karışım oranlarının, uzun vadeli çevresel etkilere karşı dayanımını sürdürülebilir potansiyelleri, özellikle saha koşullarını taklit eden çevrimsel dayanıklılık testleri kapsamında henüz tam anlamıyla netlik kazanmamıştır. Bu nedenle, farklı optimizasyon stratejileriyle elde edilen optimum bağlayıcı, aktivatör ve katkı maddesi oranları dikkate alınarak hazırlanan karışımların, çeşitli çevresel koşullarda gösterdiği mukavemet performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve değerlendirilmeye tabi tutulmuştur.

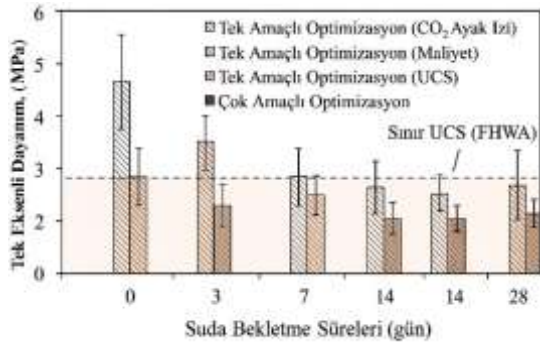
Şekil 77a’da sunulan grafik, stabilize edilmiş numunelerin tek eksenli basınç dayanımı (UCS) değerlerini, zaman içinde suya maruz kalma süresine bağlı olarak göstermektedir. Bu deneysel çalışma kapsamında, dört farklı optimizasyon uygulamasına ait optimum karışım

oranları esas alınarak üretilen numuneler, sırasıyla 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca sulu ortamda bekletilmiş ve bu bekletme süresinin UCS üzerindeki etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bekleme süresi uzadıkça UCS değerlerinde genel bir azalma eğilimi gözlemlenmiş olup, bu durum mevcut literatürle uyumlu bir şekilde suyun bağlayıcı sistemler üzerindeki zayıflatıcı etkisini teyit etmektedir. Grafik üzerinde FHWA (Federal Highway Administration) tarafından önerilen minimum UCS sınır değeri kırmızı tonla gösterilmiş ve bu sınır referans alınarak sonuçlar yorumlanmıştır. CO₂ emisyonu ve maliyet optimizasyonunu önceliklendiren tek amaçlı uygulamalarda, numunelerin su ile temas sonucu önemli ölçüde bütünlük kaybına uğradığı ve bu nedenle dayanım ölçümlerinin gerçekleştirilemediği anlaşılmıştır. Bu nedenle karşılaştırma, yalnızca UCS dayanımını önceleyen tek amaçlı optimizasyon ile çok amaçlı optimizasyon sonucu elde edilen karışımlar üzerinden yapılmıştır. UCS tabanlı tek amaçlı optimizasyona dayalı karışımlar, suya maruz kalma süresi boyunca dayanım açısından göreceli olarak üstün bir performans sergilemiş, ancak çok amaçlı optimizasyonla elde edilen karışımlar, daha istikrarlı bir dayanım kaybı profili göstererek mühendislik açısından daha dengeli bir performans ortaya koymuştur. Bununla birlikte, çok amaçlı optimizasyona göre üretilen numunelerin UCS değerleri, genel olarak FHWA tarafından belirtilen sınır değerinin altında kalmış; bu da yüksek dayanımın çevresel ve ekonomik hedefler uğruna kısmen feda edildiğini göstermiştir.

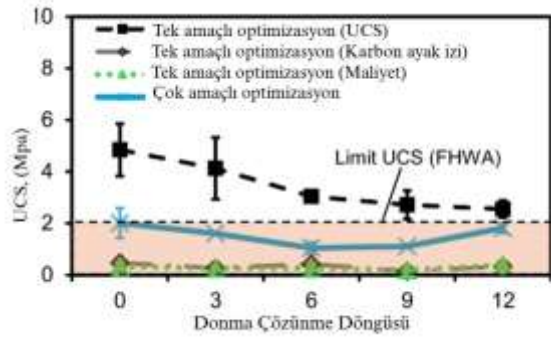
Şekil 77b’de sunulan veriler, aynı numunelerin donma-çözülme (freeze-thaw, F-T) çevrimlerine karşı gösterdiği mukavemet performansını yansıtmaktadır. Donma-çözülme döngüleri süresince numunelerin dayanımı, beklenen şekilde, çevrim sayısının artmasına paralel olarak azalmış; bu durum, bağlayıcı sistemlerin termal çevrimlerden olumsuz etkilendiğini ortaya koymuştur. CO₂ emisyonu ve maliyet odaklı optimizasyon stratejileriyle üretilen numuneler, bu çevrimler boyunca fiziksel bütünlüklerini genel anlamda korumuş olsalar da, dayanım açısından FHWA tarafından önerilen sınırların oldukça altında kalmış ve bu nedenle yapısal yeterlilik sağlayamamıştır. Diğer yandan, UCS odaklı tek amaçlı optimizasyon sonucu elde edilen karışımlar, çevrimlerle birlikte azalan dayanım değerlerine rağmen, sınır değerinin üzerinde kalmayı başarmıştır. Çok amaçlı optimizasyon sonucu elde edilen karışımlar ise donma-çözülme çevrimleriyle birlikte dayanım kaybına uğramış, ancak bu kayıplar CO₂ ve maliyet odaklı tek amaçlı stratejilere kıyasla daha sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir. Bu durum, çok amaçlı yaklaşımın mukavemette sınır değerinin altında kalmasına rağmen, çevrimsel dayanıklılık açısından daha tutarlı bir performans sergilediğini göstermektedir.

Şekil 77c’de sunulan su tutma kapasitesi test sonuçları, numunelerin çevresel nem koşullarına karşı gösterdiği geçirgenlik ve gözeneklilik özelliklerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. CO₂ ve maliyet odaklı tek amaçlı optimizasyon stratejileriyle hazırlanan numuneler, su ile temas sonucu yapısal bütünlüklerini kaybettiklerinden dolayı bu testlerde değerlendirilememiştir. Ancak diğer optimizasyon stratejileriyle hazırlanan numunelerde, ıslatma süresinin artmasına bağlı olarak su emme kapasitelerinde genel bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, bağlayıcı sistemlerde meydana gelen gözenek çapı genişlemeleriyle ve mikro yapıdaki bozulmalarla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, UCS’yi önceliklendiren tek amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen numunelerin su tutma kapasitelerinin, çok amaçlı optimizasyonla elde edilen numunelere kıyasla daha düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, yüksek dayanım hedefinin daha kompakt ve geçirimsiz bir yapı oluşturduğunu işaret etmektedir.

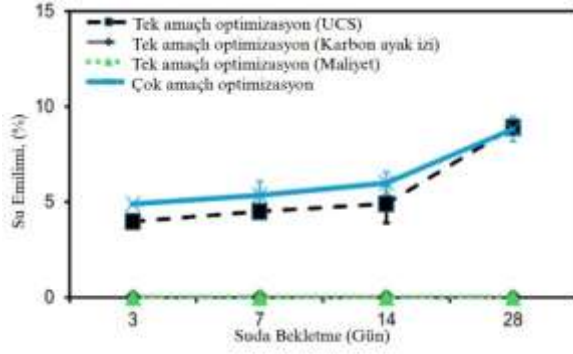
Şekil 77d’de sunulan veriler, farklı karışımların ıslatma-kurutma çevrimlerine karşı gösterdiği kütle kaybı performanslarını içermektedir. Bu testte de CO₂ ve maliyet odaklı optimizasyon stratejileriyle hazırlanan numuneler, su altında bütünlük kaybına uğradıkları için test dışı bırakılmıştır. Geriye kalan iki grup arasında, ıslatma-kurutma çevrimlerinin artmasıyla kütle kaybında paralel bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Ancak UCS odaklı tek amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen karışımlar, özellikle ilk altı çevrim boyunca hızlı bir kütle kaybı sergilemiş ve bu çevrimden sonra artış daha yatay bir seyir izlemiştir. Nihai olarak bu grubun %25 düzeyine varan kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, çok amaçlı optimizasyona dayalı numuneler çevrimler süresince daha düşük oranlı bir kütle kaybı sergilemiş ve %20’nin altında kalmıştır. Bu durum, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımının çevresel döngülere karşı daha kararlı ve sürdürülebilir bir yapı oluşturduğunu bir kez daha teyit etmektedir.



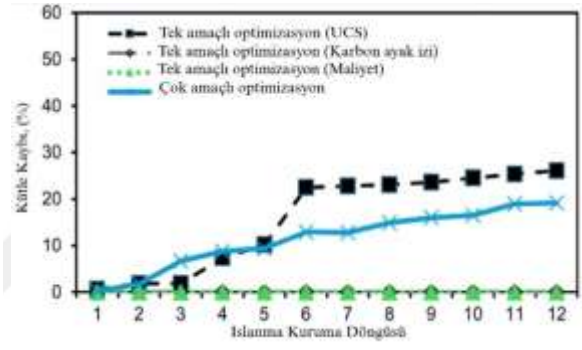
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 77: Farklı Optimizasyon Hedeflerinin Dayanıklılık Performanslarının Karşılaştırılması (a) UCS ve Islatma Günleri, (b) UCS ve Donma-Çözülme Döngüleri, (c) Su Emilimi ve Islatma Günleri, (d) Kütle Kaybı ve Islatma-Kurutma Döngüleri

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sonuç ve Tartışma

Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve istatistiksel çalışmalar, alkali aktivasyon temelli bağlayıcı sistemlerin derin zemin karıştırma (DSM) teknolojisinde kullanılabilirliğini hem tek amaçlı hem de çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları çerçevesinde ele alarak kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Çalışmanın temel odak noktaları arasında, uygulanan karışımların serbest basınç dayanımı (UCS), karbon emisyon potansiyeli ve ekonomik maliyet parametreleri yer almakta olup, bu üç kritik değişkenin birlikte değerlendirilmesiyle daha sürdürülebilir ve performansa dayalı karışımların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Her ne kadar çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı, söz konusu üç parametre arasında görece dengeli çözümler üretebilmiş olsa da, uzun vadeli çevresel koşullar göz önüne alındığında bu dengenin her zaman dayanıklılığı garanti edemeyeceği ortaya konmuştur. Özellikle ıslatma ve donma-çözülme gibi çevresel döngüler altında yapılan dayanıklılık testleri, optimum olarak kabul edilen bu dengenin yapısal bütünlük açısından yeterli olmadığını göstermiştir. Buna karşın, yalnızca UCS değerini maksimize etmeye odaklanan tek amaçlı optimizasyon modeli, maliyet ve karbon salımı açısından daha yüksek değerlere sahip olmasına rağmen, dayanıklılığını önemli ölçüde korumuş ve çevresel döngüler karşısında daha istikrarlı bir performans sergilemiştir. Bu durum, dayanıklılığın optimizasyon sürecinde ayrı bir kriter olarak ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymakta ve mevcut üçlü denge modelinin dayanıklılık açısından yeniden gözden geçirilmesini önermektedir. Nitekim dayanıklılığı doğrudan bir hedef olarak içeren yeni bir çok amaçlı optimizasyon yapısının bile, UCS merkezli tek hedefli optimizasyon kadar güvenilir sonuçlar veremeyebileceği anlaşılmıştır.

Bu kapsamlı çalışmadan elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ✓ UCS odaklı tek amaçlı optimizasyon ile elde edilen model, yüksek mekanik dayanımın yanı sıra, çevresel etkiler karşısında da tatmin edici düzeyde dayanıklılık performansı sunmuştur. Bu modelde özellikle aktivatör dozajı ile $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı, dayanım üzerinde belirleyici bir etki yaratmış, bu iki parametre arasındaki etkileşim ise dayanım üzerinde sinerjik bir katkı sağlamıştır.
- ✓ Karbon emisyonu odaklı tek amaçlı optimizasyon modeli, CO_2 salımını UCS odaklı modele göre yaklaşık %60 oranında azaltırken, maliyetlerde de %5'lik bir azalma sağlamıştır. Ancak bu kazanımlar, düşük aktivatör dozajı ve azalan sodyum silikat

içeriği nedeniyle dayanımın hedeflenen sınır değerlerin oldukça altına düşmesine ve numunelerde çözülme (dispersiyon) belirtilerinin gözlemlenmesine yol açmıştır.

- ✓ Maliyet odaklı tek amaçlı optimizasyon yaklaşımıyla hazırlanan karışımlarda, aktivatör miktarı düşürülürken, sodyum silikat oranı artırılmış; bu sayede maliyet %17, CO₂ emisyonları ise UCS odaklı modele göre %59 oranında düşürülmüştür. Ancak bu modelin de dayanımı belirlenen teknik eşiklerin altında kalmış; özellikle ıslatma koşullarında numunelerin fiziksel olarak parçalanma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.
- ✓ Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımıyla elde edilen modelde, aktivatör miktarının düşürülmesiyle birlikte karbon salımında %37, maliyette ise %13 oranında iyileşme sağlanmıştır. Ancak bu iyileşmelerin karşılığında UCS değerinde yaklaşık %56'lık bir azalma meydana gelmiş, her ne kadar bu azalma sınır dayanım değerinin altına düşmemiş olsa da, dayanım açısından önemli bir kaybı temsil etmiştir. Ayrıca çoğulluk (duplicity) etkileri dikkate alındığında, bazı numunelerin dayanımlarının alt sınırın da altına düştüğü gözlemlenmiştir. Buna karşın, UCS odaklı modele göre dayanım kaybının daha sınırlı kaldığı (%28) görülmüştür.
- ✓ Tüm optimizasyon senaryolarında, aktivatör miktarının (X_2) model davranışı üzerinde birincil belirleyici faktör olduğu anlaşılmıştır. Bu parametrenin hassas şekilde kontrol edilmesi, hem mukavemet hem de dayanıklılık açısından hayati bir rol oynamaktadır. Na₂SiO₃/NaOH oranı (X_3), UCS ve karbon emisyonları üzerinde olumlu etkiler yaratırken; maliyet açısından ters yönlü bir etkiye sahiptir.
- ✓ Yapılan istatistiksel modelleme analizleri, alkali aktivasyonlu sistemlerin davranışında parametreler arası doğrusal olmayan etkilerin ve etkileşimlerin belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle aktivatör dozajı (X_2), dayanım üzerinde belirgin bir ikinci dereceden etki göstermiş; düşükten yükseğe doğru artarken dayanımı artırmış, ancak belirli bir eşiği aştıktan sonra aşırı alkalinite etkisiyle dayanımda düşüş eğilimi başlamıştır. Ayrıca X_2 ile Na₂SiO₃/NaOH oranı (X_3) arasındaki pozitif etkileşim, jeopolimer jel oluşumunu teşvik ederek, bağlayıcılığın gelişmesine katkı sağlamıştır. Benzer biçimde, uçucu kül oranı (X_1) ile X_2 arasındaki etkileşim ise maliyet ve karbon emisyonları üzerinde önemli etkiler yaratmış; seyreltme ve reaksiyon verimliliği üzerinden sistem davranışını şekillendirmiştir.
- ✓ Nihai olarak, dayanıklılık faktörü değerlendirildiğinde, çok amaçlı optimizasyonun uzun vadede yapısal ve çevresel koşullar altında performans yetersizlikleri

gösterebileceği öngörülmektedir. Bunun aksine, UCS merkezli optimizasyon yaklaşımı, dayanıklılık açısından sınır değerlere oldukça yakın sonuçlar üretebilmekte ve bu yönüyle maliyet ve karbon ayak izinden ödün verilse bile, uzun vadeli mühendislik güvenliğini sağlayan daha sağlam bir tercih olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, gelecekte oluşturulacak yeni çok amaçlı optimizasyon yapılarında dayanıklılığın dördüncü ana hedef olarak doğrudan modele entegre edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Öneriler

Yapılan çalışmalar incelendiğinde deneylerde kullanılan katkı malzemelerinde sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) katkılarının kireç malzemesi ile çalışmalarının kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda aynı malzemeler kullanılarak kireç malzemesi ile başka çalışmalar da yapılabilir.

KAYNAKÇA

- A.A. Setiawan, H. Hardjasaputra, R. Soegiarso, Embodied carbon dioxide of fly ash based geopolymer concrete, (2023) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1195-012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1195/1/012031>.
- A. Arkell, H. Krawczyk, J. Thuvander, A.-S. Jönsson (2013). Evaluation of membrane performance and cost estimates during recovery of sodium hydroxide in a hemicellulose extraction process by nanofiltration, *Separation and Purification Technology Journal* 118-387–393. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.07.015>.
- Abdeldjoud, L., Asadi, A., & Elkhebu, A.G. (2019). Alkali Aktivasyonu ile Kil İçeriğinin Zemin Stabilizasyonuna Etkisi. *Uluslararası Geoteknik ve Zemin Mühendisliği Dergisi*, 5(1) <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1658166>.
- Ahmed, A., Khan, R., & Malik, S. (2025). Integration of response surface methodology and machine learning in slope stability analysis. *Geotechnical Engineering Journal*, 18(3) 224-239 doi no:10.37591/JoGE.
- Ali, A. Z., Li, B., & Zhang, Y. (2022). High blast furnace slag as an alternative material for soil stabilization. *Environmental Technology*, 43(5), doi no: 0959-3330. 603-611.
- Al-Kaki, A. (2016). *Kil zeminin öğütülmüş atık soda şişe camı tozu ile iyileştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 444422)
- Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. A. (2006). Soil stabilization using cement and lime: A review of the state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(3), DOI:10.1080/10298436.2016.1234278 123-136.
- Alpyürür, M. (2016). *Zemin iyileştirmesinde öğütülmüş gaz beton kullanımı*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 439701)
- American Transportation Research Institute (ATRI), An analysis of the operational costs of trucking, Arlington, VA, USA, n.d. <https://truckingresearch.org/about-atr/atr-research/operational-costs-of-trucking/>.
- Arefin, S., Al-Dakheeli, H., & Bulut, R. (2021). İyonik stabilizatör kullanılarak genişleyen zeminlerin stabilizasyonu. *Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Bülteni Dergisi*, 80(5), Issn : 1435-9529. 4025-4033.
- ASTM D422-63 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International.
- ASTM D698 (2010). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.
- ASTM D4318 (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- A.S. Srinivasa, K. Swaminathan, S.C. Yaragal, (2023). Microstructural and optimization studies on novel one-part geopolymer pastes by Box-Behnken response surface design method, *Case Studies in Construction Materials Journal*, 18 e01946. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01946>.
- Babatunde, Q. O., Yoon, H. K., & Byun, Y. H. (2023). Zein biyopolimeri kullanılarak zemin stabilizasyonu. *Sürdürülebilirlik Dergisi*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su17167264>.

- Bahadori, H., Hasheminezhad, A., & Taghizadeh, F. (2019). Doğal puzolanlar kullanılarak marnlı zemin stabilizasyonu üzerine deneysel çalışma. *İnşaat Mühendisliğinde Malzeme Dergisi*, 31(2). DOI : 10.28991/CEJ-2025-011-06-01.
- Baldovino, J. A., Nunez de la Rosa, Y. E., & Calabokis, O. P. (2024). Uzun vadeli stabilize edilmiş bir toprağın gözeneklilik-kireç indeksi yoluyla karakterizasyonu hakkında bilgi. *İnşaat Mühendisliğinde Örnek Olaylar*, 20, DOI: 10.31590/ejosat.726891. e02718.
- Bardet, J. (1993). Experimental Study of Atterberg Limits in Clayey Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*. DOI no:10.37591/JoGE.
- Basu, D., & Prezzi, M. (2007). Stone columns in soft clay: A numerical study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 129-138. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-13211.1,733>
- Bekir, R. M. (2024). Yumuşak killi zeminlerin tuzlu su mevcudiyetinde kireç ve çimento ile derin karıştırılarak stabilizasyonu. *İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık Dergisi*, 12(1), 78-96. ISSN: 2332-1091.
- Caterpillar Performance Handbook, Caterp. Inc.Peoria, IL, USA. (2022). <https://wheelercat.com/wp-content/uploads/2023/01/Cat-Performance-Handbook-from-VST-fuel-consumption-2022-12-09T21-20-09>.
- Chang, C., & Ko, D. (2015). Biopolymer stabilizers for soil and environmental applications. *Environmental Science & Technology*, 49(11), 6607-6615. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est>
- Chang, C., Ko, D., & Lee, J. (2016). Effect of biopolymer stabilization on soil properties and its application in civil engineering. *Soil Use and Management*, 32(3), 422-428. <https://doi.org/10.1111/sum.12946>.
- Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2015). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 7(8), 11165-11185. <https://doi.org/10.3390/su2113436>.
- Chaudhary, R., Sharma, P., & Mehta, A. (2024). Water resistance performance of stabilized subbase layers in tropical climates. *International Journal of Pavement Engineering*, 32(1), 150-165. DOI:10.1080/10298436.2016.1234278.
- Chen, L., Lin, D. F., & Chiou, S. C. (2019). Stabilization of soft subgrade soil using fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 213, 463-472. DOI:10.3934/matricsci.2020.2.157
- Crespo-Lopez, L., Benavente, D., & Morales-Rvano, S. (2023). Cam ilavesiyle yapılan tuğlaların karakterizasyonu için tahribatsız teknikler ve istatistiksel analiz. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 408, 133583. DOI NO: 10.7456/10801100/010.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., & Pinto, A. T. (2015). Soil stabilisation using alkaline activated fly ash. *Construction and Building Materials*, 80, 411-422. DOI:10.3934/matricsci.2020.2.157.
- Çalış, M. (2014). *Betonarme gürültü bariyerleri için ses yutucu perlit esaslı kaplama tasarımı yapılarak fiziksel performansının ve maliyetinin araştırılması*. (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 389227)
- Çelik, D. N. (2018). *Genleştirilmiş perlit içeren geopolimer bağlayıcılı ısı yalıtım panellerinin geliştirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 545400)

- Çelik, H. (2022). Nano-Particle Based Soil Stabilization Methods. *Construction Materials and Geotechnics*, 10(1), 35-50. doi.org/10.3390/geotechnics5030055.
- Çınar, M. (2023). Çeşitli zemin tiplerinde çimento esaslı jet grout uygulamalarının mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Binalar Dergisi*, 13(11), 2833. https://doi.org/10.53586/susbid.1568263.
- Çokça, E., Önalp, A., & Şenol, A. (2021). Engineering Properties of Expansive Soils Stabilized with Fly Ash, *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1201-1214. https://doi.org/10.1007/10706.1573-1529.
- Çokça, E., & Yazıcı, H. (2020). Jeopolimer bazlı zemin stabilizasyonunda sodyum silikatın etkisi. *Türkiye Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Dergisi*, 14(2), 45-58. DOI: 10.5505/pajes.2023.13265.
- Das, B. M. (2010). Principles of geotechnical engineering. *Cengage Learning*.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer chemistry and applications. *Institut Geopolymer*. DOI: 10.13140/RG
- Davidovits J. (2015). False values on CO2 emission for geopolymer cement/concrete published in scientific papers.
- Davidovits, J. (2020). Geopolymer Chemistry and Applications. *Geopolymer Institute*. DOI: 10.13140/RG
- Davidovits, J. (2021). Geopolymer Chemistry and Applications. *Geopolymer Institute*. DOI: 10.13140/RG
- Dufresne, M. L., & Hryciw, R. D. (2003). The application of response surface methodology to evaluate structural behavior of building components. *Engineering Structures*, 25(9), 1075-1083. doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.007. 0141-0296
- Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1984-1992. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108002
- Fernandez, M., & Lopez, C. (2025). Use of Industrial Waste in Soil Stabilization: A Sustainable Alternative. *Journal of Sustainable Engineering*, 18(5), 410-425. ISSN 2712-0562 (UDC 62)
- García, M., Torres, J., & Lopez, A. (2024). Optimization of recycled aggregate and nano-silica concrete properties using response surface methodology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(5), 102-115. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-20206.
- Ghavami, K., Hariri, A. A., & Naghdali, Z. (1999). Utilization of industrial by-products in soil stabilization. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(9), 772-780. https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-13211. 1,733.
- Gonzalez, P., & Torres, R. (2021). Sustainability in Soil Improvement Methods: A Global Perspective. *Sustainable Construction Journal*, 14(6), 322-338. https://doi.org/10.47481/jscmt.1495140.
- Guo, L., Wang, B., Guo, J., Zhang, M., 6 Dai, Q. (2024). Mikrobiyal kaynaklı kalsiyum karbonat çökeltmesi yoluyla kumun hidrolik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik deneysel çalışma. *Enerji ve Çevre için Jeomekanik*. 37, 100519. DOI: 10.31590/ejosat.824954

- Güllü, H. (2012). Factorial experimental approach for effective dosage rate of stabilizers in expansive soil stabilization. *Environmental Earth Sciences*, 67(8), 2193-2204. DOI: <https://doi.org/10.30564/jees.v7i8.10526>
- Güllü, H. (2012). Mitigation of Swell Potential of High Plasticity Clay with Coal Fly Ash and Lime Kiln Dust, *Environmental Earth Sciences*, 66(1), 187-198. <https://doi.org/10.30564/jees.v7i8.10526>
- Hassan, A., & Yildirim, E. (2022). Experimental Analysis of Clay Stabilization Using Bio-Enzymes. *Journal of Advanced Geotechnics*, 27(3), 142-157. doi.org/10.3390/geotechnics5030055
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). An introduction to geotechnical engineering. *Prentice Hall*. DOI: 10.1065/lca2007.08.358
- Hunt, R.E. (1986). *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGraw-Hill.
- Hunt, R.E. (1994). *Geotechnical Engineering Techniques and Practices*. McGraw-Hill. DOI <https://doi.org/10.1201/9781482275858>
- Ivanov, V., & Chu, J. (2021). Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation for Ground Improvement. *Environmental Geotechnology Journal*, 12(4), 322-339. <https://doi.org/10.1680/jenge.2021.8.4.244>
- Jangde, H., Han, F., Ansari, M. I., & Prajapati, K. (2024). Stabilizasyon tekniği seçiminde zemin özelliğinin etkisi. *İnşaat Mühendisliği Ders Notları*, 352, 383-396.
- Jayanthi, R., & Singh, T. (2016). Zemin stabilizasyonu için sürdürülebilir malzemelerin kullanımı: son teknoloji. *İnşaat Mühendisliği Malzemelerindeki Gelişmeleri*, 5(1), 221-30.
- Jiang, J., Zhang, L., & Wu, Y. (2019). Utilization of Fly Ash and Silica Fume in Soil Stabilization: A Review. *Construction and Building Materials*. DOI: <https://doi.org/10.3934/materci.2020.2.157>
- J. K., Chelladurai S.J.S. (2025). Evaluation of mechanical and wear properties of LM24/fly ash/titanium diboride hybrid metal matrix composites using stir casting, *Part. Sci. Technology*. 43. 338–356. <https://doi.org/10.1080/02726351.2025.2456596>.
- Jones, M., & Patel, R. (2024). Biological Soil Stabilization in Sandy Soils. *Journal of Sustainable Geotechnics*, 31(2), 60-78. <https://doi.org/10.3390/su13095286>.
- Jones, M., Smith, R., & Taylor, P. (2016). Cement-Based Injection Techniques for Clayey Soils. *Geotechnical Engineering Journal*. Journal DOI no:10.37591/JoGE
- Joseph, S., & Thomas, M. (2020). Nano-carbon based materials for soil stabilization. *Materials Science and Engineering*, 10(5), 390-396. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90231-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90231-5)
- Kaçmaz, U. D. (2019). *Mermer tozu ve uçucu külün zemin iyileştirmede kullanımı*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 621416)
- Kadekeshova, K. (2022). *Kum granüler lastik karışımının zemin stabilizasyonundaki performansının ayrık elemanlar yöntemi ile araştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 749373)
- Khoury, J. (1992). Effects of sodium silicate on soil stabilization. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(5), 725-736. Journal DOI no:10.37591/JoGE

- Kim, H., & Yoon, J. (2023). Environmental Impacts and Optimization of Blasting Energy for Soil Improvement. *Construction and Building Materials*. DOI: <https://doi.org/10.3934/materci.2020.2.157>
- Kim, S., & Park, J. (2022). Advancements in jet grouting technology for soil stabilization. *construction and building materials*. DOI: <https://doi.org/10.3934/materci.2020.2.157>
- Kim, S., & Lee, H. (2019). Sustainable Soil Stabilization: A Review on Geopolymers and Alternative Binders. *Construction Materials Journal*, 48(3), 215-229. <https://doi.org/10.1680/coma.2008.161.1.9>
- Kim, Y., & Lee, J. (2016). Performance Evaluation of Vibrocompaction on Granular Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. Journal DOI no:10.37591/JoGE.
- Koerner, R.M. (1998). *Designing with Geosynthetics*, Prentice-Hall. <https://doi.org/10.2113/gseageosci.I.3.386>.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. Xlibris Corporation. <https://doi.org/10.2113/gseageosci.I.3.386>.
- Kogbara, R. B., Masad, E., Karki, P., & Little, D. N. (2013). Long-term performance of geopolymers for soil stabilization. *Transportation Research Record*, 2335(1), 40-46. ISSN: 0361-1981
- Komnitsas, K., Vathi, D., Steiakakis, E., Bartzas, G., & Perdikatsis, V. (2023). Katkı maddesi olarak cüruf ve metakaolin kullanımıyla alkali aktivasyonu yoluyla marnlı zeminlerin stabilizasyonuna ilişkin bilgiler. *Kimya ve Çevre Mühendisliğinde Örnek Olaylar*, 8(1), 100400.
- Kumar, R., & Sharma, R. (2015). Optimization of concrete mix design using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 96, 477-485. DOI: <https://doi.org/10.3934/materci.2020.2.157>
- Kumar, A., & Sharma, R. K. (2016). Effect of sodium hydroxide on swelling and strength properties of expansive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(2), 381-390. <https://doi.org/10.1007/10706.1573-1529>
- Kumar, R., & Singh, P. (2024). Effect of lime stabilization on clayey soils: A response surface methodology approach. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 61(2), 320-335. ISSN: 0038-0741 (1573-9279)
- Kumar, S., & Sharma, A. (2021). Geopolymer stabilization of soil: A sustainable approach. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water, and Environment Systems*, 9(3), 253-267. Issue 4, 1100438.
- Kumar, V., & Verma, S. (2023). Effect of polymer modification on water absorption in recycled asphalt materials. *Journal of Transportation Engineering*, 149(6), 210-225. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-8919>
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*, Wiley. ISBN:9781848211025
- Latifi, M., Khodaii, A., & Habibian, M. (2017). Biopolymer-based stabilization of soils for sustainable development. *Journal of Environmental Management*, 197, 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e00205>
- Lee, J., Park, H., & Choi, K. (2024). Seismic performance optimization of steel structures using response surface methodology. *Structural Engineering and Mechanics*, 89(1), 75-92. <https://doi.org/10.31462/jseam.2020.01001017>

- Lee, K., & Kim, S. (2019). Machine learning approaches for soil classification. *International Journal of Geotechnics*, 12(4), 305-320. Journal DOI no:10.37628/IJGGE.
- Lee, K., & Kim, S. (2020). Advances in Chemical Stabilization of Clayey Soils. *International Journal of Geotechnics*, 14(3), 210-225. Journal DOI no:10.37628/IJGGE.
- Lee, M., Park, J., & Choi, S. (2021). Effectiveness of controlled blasting in weak soil conditions. *International Journal of Civil Engineering*. Journal DOI no:10.37628/IJGGE.
- Li, J., Shan, Y., Ni, P., Li, Y., & Zhou, J. (2024). Çevre dostu kalsiyum karbür kalıntısı ile aktifleştirilmiş kömür gang polimeri ile stabilize edilmiş deniz toprağının mekaniği, dayanıklılığı ve mikro yapı analizi. *İnşaat Malzemelerinde Örnek Olaylar*, 20(12): e0315494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315494>.
- Mehta, P., & Singh, A. (2023). Advancements in vibrocompaction techniques: A computational approach. *Construction and Building Materials*, 15 (20), 24047-24058. DOI: <https://doi.org/10.3934/materci.2020.2.157>
- Mitchell, J.K., & Gallagher, P.M. (1998). Applicable grain size ranges for liquefiable soil improvement methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. researchgate.net. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-13211>. 1,733.
- Mitchell, J.K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*, 13(577) 28-29. ISBN 0-471-46302.
- Moghaddam, M., Zarei, H., & Yazdani, H. (2022). Nano-silica and polymer-stabilized soils: Swelling and strength behavior under soaking conditions. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(3), 410-430. <https://doi.org/10.1007/10706.1573-1529>.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>.
- Muntohar, A. S. (2009). Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14. Journal DOI no:10.37591/JoGE.
- Nalbantoğlu, Z., & Karasahin, M. (2021). Strength reduction in lime and fly ash stabilized clays under soaking conditions. *Soil Stabilization Journal*, 18(4), 250-268. <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i6927>
- Nazari, A., & Ramezaniapour, A. A. (2020). Lime-Stabilized clays: Microstructural and engineering properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, 78(3), (2345-2354). Journal DOI no:10.37591/JoGE
- Ouyang, F., Wu, Z., & Wang, Y. (2024). Siltli kil üzerinde kısmen jeotekstil kaplı taş sütun destekli dolgu üzerinde saha testleri. *Jeotekstiller ve Jeomembranlar*, 52(1), 95-109. Doi: [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0266-1144(94)90008-6)
- Önal, O., & Sariavcı, Ç. (2019). Meles deltası zeminlerinin çimento ve kireç karışımları kullanılarak stabilizasyonu. *Geoteknik ve Mühendislik Dergisi*, 19(6), 533-544. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1110640>
- Parsons, R. L., & Milburn, J. P. (2003). Engineering properties of stabilized soil layers with fly ash. *Transportation Research Record*, 1837(1), 40-46. ISSN: 0361-1981.
- Patel, R., & Singh, M. (2018). Effectiveness of lime and fly ash in soil stabilization. *Indian Journal of Civil Engineering*, 35(2), 99-115. DOI: 10.17010/ijce/2023/v6i1/173001

- Patel, D., & Rao, V. (2025). Predicting climate change effects on construction materials using genetic algorithms and response surface methodology. *Construction and Environment Journal*, 42(3), 201-219. DOI: 10.11648/j.jccee.
- Patel, D., & Singh, P. (2025). Durability assessment of blast furnace slag-based concrete under wet conditions. *Cement and Concrete Composites*, 72, 98-120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001421](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001421). 791
- Phani Kumar, B.R. & Sharma, R.S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 764-767. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-13211.1,733>.
- Phanija, N., & Chavali, R. V. P. (2021). Bakırla kirlenmiş zeminin fosfojips kullanılarak stabilizasyonu. *Yenilikçi Altyapı Çözümleri Dergisi*, 6(3). <https://doi.org/10.31590/ejosat.1006062>
- Proctor, R. R. (1933). Fundamental principles of soil compaction, *Engineering News-Record*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000689)
- Rahman, M., O’Kelly, B. C., & Sivakumar, V. (2023). Advancements in polymer-based soil stabilization techniques. *International Journal of Civil Engineering*. DOI : 10.28991/CEJ-2025-011-07-01 · 2646-2665
- Rajak, R., & Sharma, S. (2021). The economic impact of using industrial by-products for soil stabilization: A case study. *Environmental Economics and Policy Studies*, 23(4), 601-614. DOI <https://doi.org/10.14927/reeps.rev1801-001>
- Reddy, B. M., Suresh, K., & Kumar, R. S. (2020). The environmental impact of lime production: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118551. DOI:10.1016/j.jclepro.2015.07.074
- Rodriguez, L., Martínez, J., & Pérez, G. (2024). Performance evaluation of low-carbon cement under prolonged soaking conditions. *Journal of Sustainable Materials*, 15(2), 78-95. [https://doi.org/10.1016/S2214-9937\(23\)00150-1](https://doi.org/10.1016/S2214-9937(23)00150-1)
- Sabatini, P.J., vd. (2000). Effect of stabilizing agents on the liquid limit and plasticity index of clayey soils, *Geotechnical Testing Journal*. DOI: 10.1520/GTJ20230553.
- Saha, S., Hariharan, N., Şahin, H., Lytton, R. L., & Küçük, D. N. (2024). Yeniden kalıplanmış zemin dokusunun killi zeminlerin hacimsel deformasyon davranışı üzerindeki etkisi. *Ulaştırma Jeotekniği*, 44, 101158. Doi: 10.34248/bsengineering.1495259
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential, economically viable options. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108002>
- Shanmugam, G. K., Godson, M. D., Yogesh, R. V., Jeeva, S. K. & Madhiyarasu, P. (2023). Doymuş zeminde taş kolon iyileştirmesinin sıralı montajı sırasında yerinde zemin tepkisi üzerine deneysel gözlemler. *Uluslararası Geosentetik ve Zemin Mühendisliği Dergisi*, 9(6), 69. <https://doi.org/10.1680/jgein.20.00023>
- Sharma, M., Samanta, M., & Sarkar, S.(2019). Zemin çivileme: Etkili bir şev stabilizasyon tekniği. *Heyelanlar: Teori, Uygulama ve Modelleme*, 50, 173-199. <https://doi.org/10.1201/b21520-135>
- Sendilvadivelu, A., Dhandpani, B., & Vijayasimhan, S. (2023). Biyo-stabilize edilmiş atık kül ve kireç ile stabilize edilen killi zemin üzerinde mukavemet, minerolojik ve

- mikroyapısal çalışmalar. *Malzeme Döngüleri ve Atık Yönetimi Dergisi*, 25(6), 3625-3637. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-004-0117>.
- Sherwood, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime. *Transport Research Laboratory*. doi:10.1016/S0386-1112(14)60138-2.
- Siddique, R. (2010). Utilization of industrial by-products in concrete. *Springer Science & Business Media*.
- Smith, J. & Brown, R. (2016). Advances in soil classification systems. *Geotechnical Engineering Journal*, 45(3), 112-126. Journal DOI no:10.37591/JoGE.
- Smith, J., Brown, A., & White, P. (2017). Advancements in soil stabilization techniques. *Journal of Geotechnical Engineering*, 143(5), 102-115. Journal DOI no:10.37591/JoGE.
- Smith, J. & Brown, R. (2017). Soil stabilization techniques for various soil types. *Geotechnical Engineering Journal*, 48(2), 98-113. Journal DOI no:10.37591/JoGE.
- Smith, R., Brown, T., & Williams, D. (2018). Long-term effects of vibrocompaction on Soil Stability. *International Journal of Soil Mechanics*. Journal DOI no:10.37628/IJGGE.
- Smith, R., Johnson, T., & Lee, P. (2020). Blasting techniques for soil stabilization: engineering applications and case studies. *Geotechnical Engineering Journal*. Journal DOI no:10.37591/JoGE.
- Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2016). Supplementary cementitious materials: Review of current characterization methods. *Cement and Concrete Research*, 78, 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.012>
- Stefanini, L., Ensari, D., Walkley, B., & Provis, J. L. (2024). Alkali ile aktifleştirilmiş GGBFS karışımlarında kaolinit ekstraksiyonundan elde edilen kalsine atık killerin karakterizasyonu. *Material Today Communications*, 38, 107777. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103275.
- Takahaşı, H., Şato, Y., Satomi, T., & Luu, X. L. (2024). Atık alçıpan kağıdı kullanılarak fiber-çimentoyla stabilize edilmiş zeminin mukavemet özelliklerinin araştırılması. *İnşaat Mühendisliği Ders Notları*, 442, 952-960.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley. DOI. <https://doi.org/10.1086/625679>
- Thomas, M. D. A. (2007). Use of silica fume in concrete: A review of recent developments. *Journal of Materials Science*, 42(11), 4514-4525. doi:10.1007/s001090000086.
- Toksöz, D. (2017). *Şişen killi zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi sırasında iyon göçü ve kolon performansının şişen kil oranına bağlı olarak değerlendirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 482540).
- TS EN ISO 14688-2 Geoteknik etüt ve deneyler - Zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması (Bölüm 2)
- TS 1900-1 (2006). Zeminlerin Sınıflandırılması ve Tanımlanması. Türk Standartları Enstitüsü.
- Tunç, A., (2002). Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Türkiye Jeoteknik Derneği. (2025). Güncel Zemin Stabilizasyon Yöntemleri ve Uygulamaları. *Teknik Rapor*.

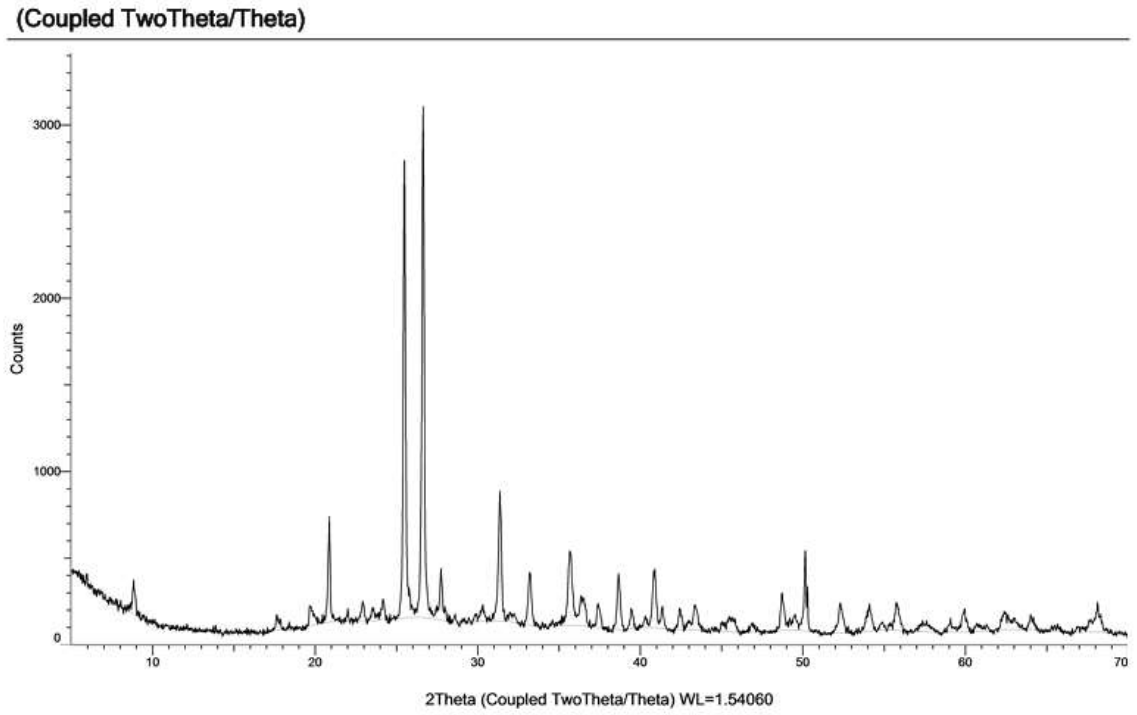
- Uzuner, B.A. (2013). Zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulamaları. (Yüksek lisans tezi) Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 251281)
- Vieira, G. A., Scheuermann Filho, H. C., & Consoli, (2023). Yeşil polimer kullanılarak kuvarsitik kumun geoteknik olarak iyileştirilmesi. *Geoteknik ve Jeoloji Mühendisliği*, 41(7), 3971-3984. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub601>.
- Vinothkumar, S., & Başarkar, S. S. (2024). Kontrollü modüllü kolonlarla zemin iyileştirilmesi. *İnşaat Mühendisliği Ders Notları*, 373, 183-201.
- Vukicevic, M., & Pujevic, V. (2015). İnce daneli zeminlerin uçucu kül ile stabilizasyonu. *Gradevinar İnşaat Mühendisliği Dergisi*. 67(8), 761-780. Doi:10.28948/ngumuh.534055
- Wang, L., & Chen, Y. (2022). Effect of steel fiber reinforcement on the durability of concrete under water exposure. *Materials Science and Engineering A*, 765, 135-152. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90231-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90231-5)
- Wang, L., & Li, X. (2018). Polyurethane grouting for water-saturated soils: a permeability study. *International Journal of Civil Engineering*. 2646-2665. DOI : 10.28991/CEJ-2025-011-07- 01.
- Wang, J., & Zhou, K. (2024). Green stabilization approaches for soft soils. *Journal of Environmental Engineering*, 56(1), 67-82. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230303
- X. Shi, C. Zhang, Y. Liang, J. Luo, X. Wang, Y. Feng, Y. Li, Q. Wang, A.E.-F. Abomohra, Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymers concrete, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 7375. <https://doi.org/10.3390/ma14237375>.
- Yeşilyurt, O. C. (2023). *Türkiye çimento fabrikalarından elde edilen killerin kalsinasyonu ve karakterizasyonu*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 789591)
- Yılmaz, E., & Özkan, C. (2023). Sustainable soil stabilization using biopolymers: A water resistance evaluation. *Geotechnical Engineering and Sustainability Journal*, 9(1), 33-47. doi:10.1061/40971. (310)111.
- Yılmaz, F. (2015). *Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ve bilgisayarlı tomografi tekniği ile araştırılması*. (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 397321)
- Yi, Y. L., Liska, M., & Tabbaa, A. (2013). Zemin stabilizasyonunda karbonatlı manyezit kullanımı. *Kanada Geoteknik Dergisi*, 50(8), 899-905. DOI: 10.1139/cgj-2012-0261.
- Yuan, J., Li, Y., Shan, Y., Tong, H., & Zhao, J. (2023). Magnezyum iyonlarının mikrobiyal kaynaklı karbonat çöktürmesi ile güçlendirilmiş zeminin mekanik özellikleri üzerine etkisi. *İnşaat Mühendisliğinde Malzeme Dergisi*, 35(11), 04023413. DOI : 10.28991/CEJ-2025-011-06-01
- Zhang, X., Lin, F., & Zhou, Y. (2024). Optimization of ultra-high performance concrete mix proportions using response surface methodology. *Cement and Concrete Research*, 154, 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108002>.
- Zhang, Y., Sun, L., & He, Y. (2021). Biochar as an environmentally friendly material for soil stabilization: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2), 2123-2135. DOI: 10.1007/s11356-019-06230-7.

- Zhang, L., Wang, Y., & Li, H. (2023). Nanomaterials for soil stabilization: a comprehensive review. *Nano Engineering Reports*, 29(7), 456-478. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100227>.
- Zhang, L., & Li, H. (2020). Mitigation of liquefaction risk through vibrocompaction: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/10706.1573-1529>.

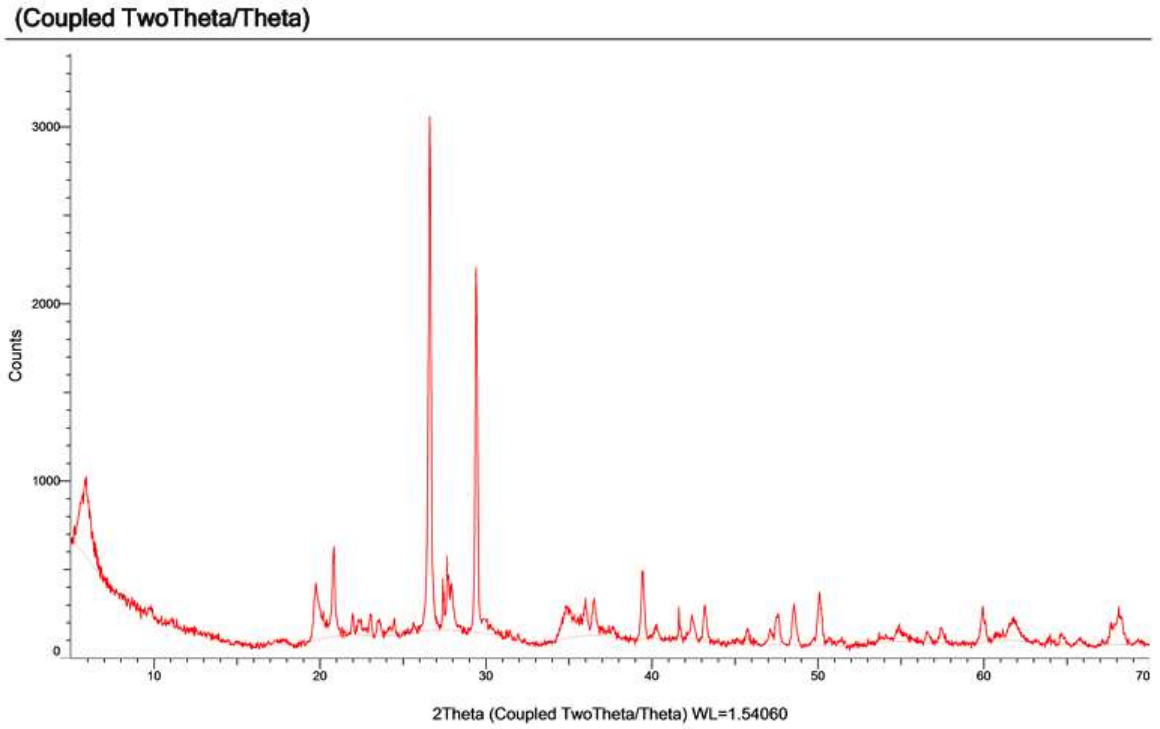


Ekler

Ek 1:XRD Analizi Sonuçları

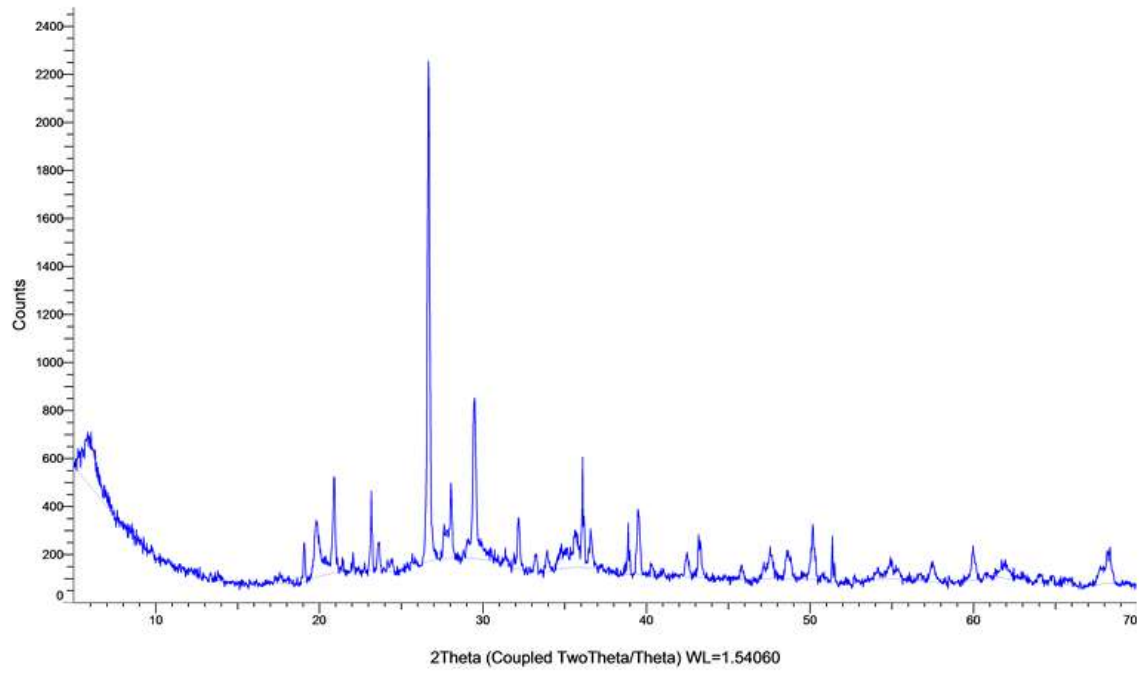


Şekil 78: 1. Numune XRD Sonucu



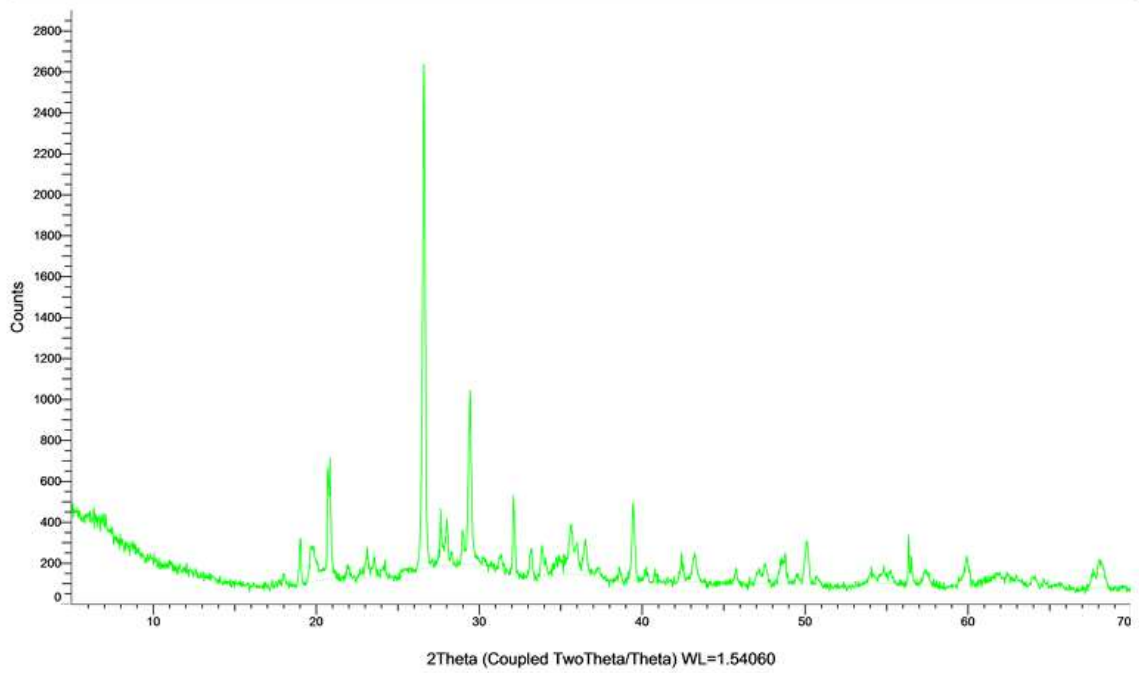
Şekil 79: 2. Numune XRD Sonucu

(Coupled TwoTheta/Theta)



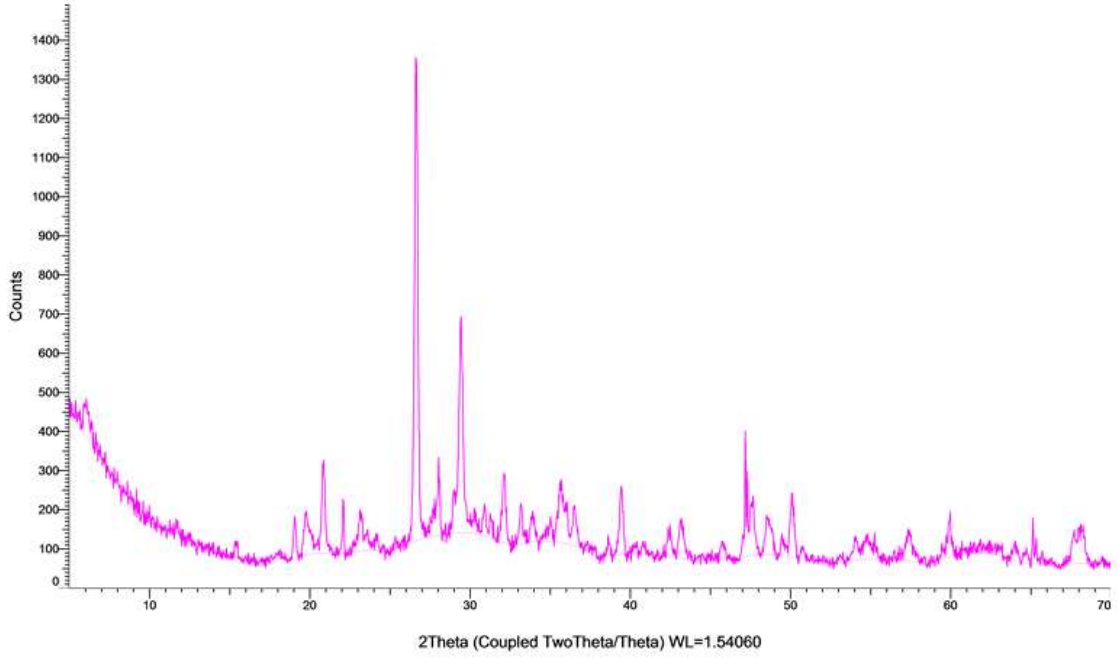
Şekil 80: 3. Numune XRD Sonucu

(Coupled TwoTheta/Theta)



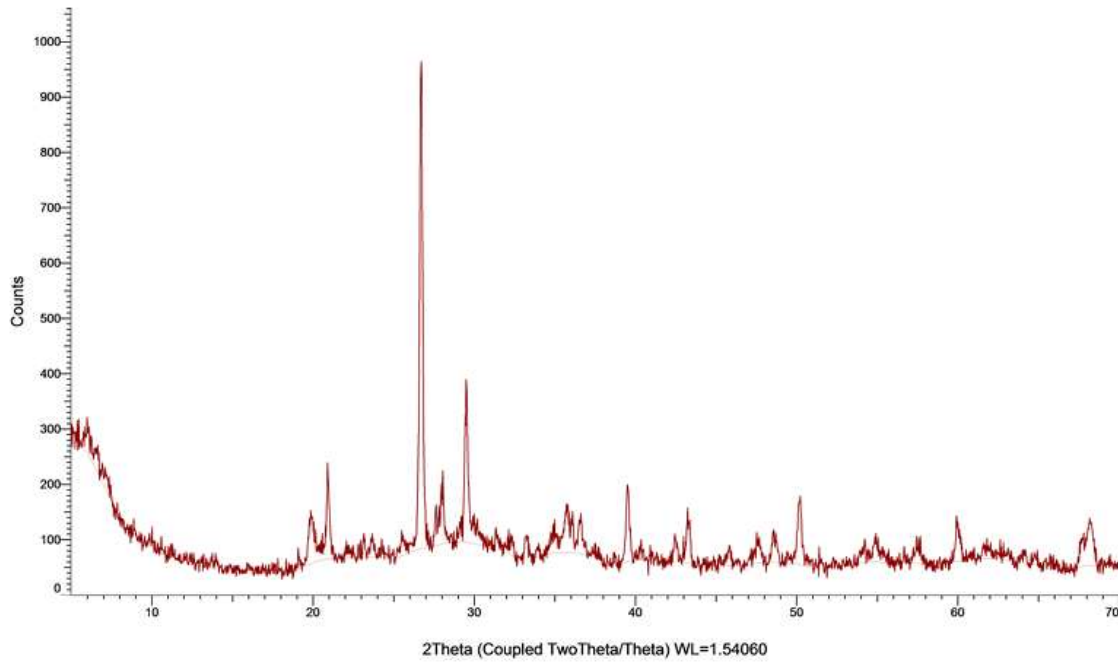
Şekil 81: 4. Numune XRD Sonucu

(Coupled TwoTheta/Theta)



Şekil 82: 5. Numune XRD Sonucu

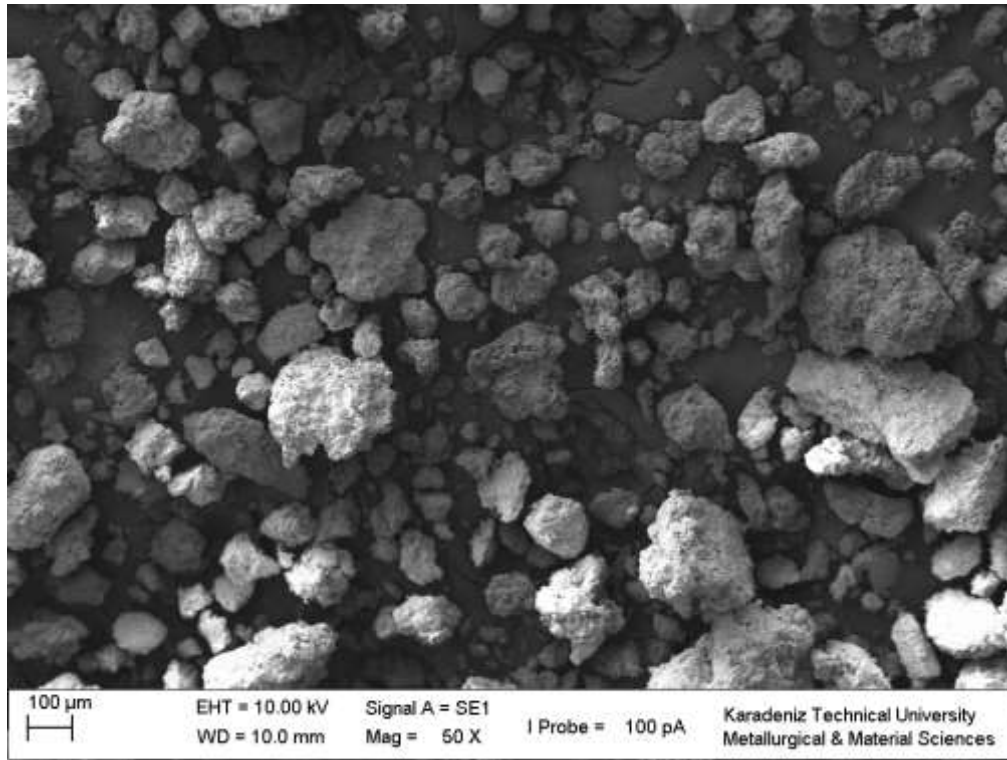
(Coupled TwoTheta/Theta)



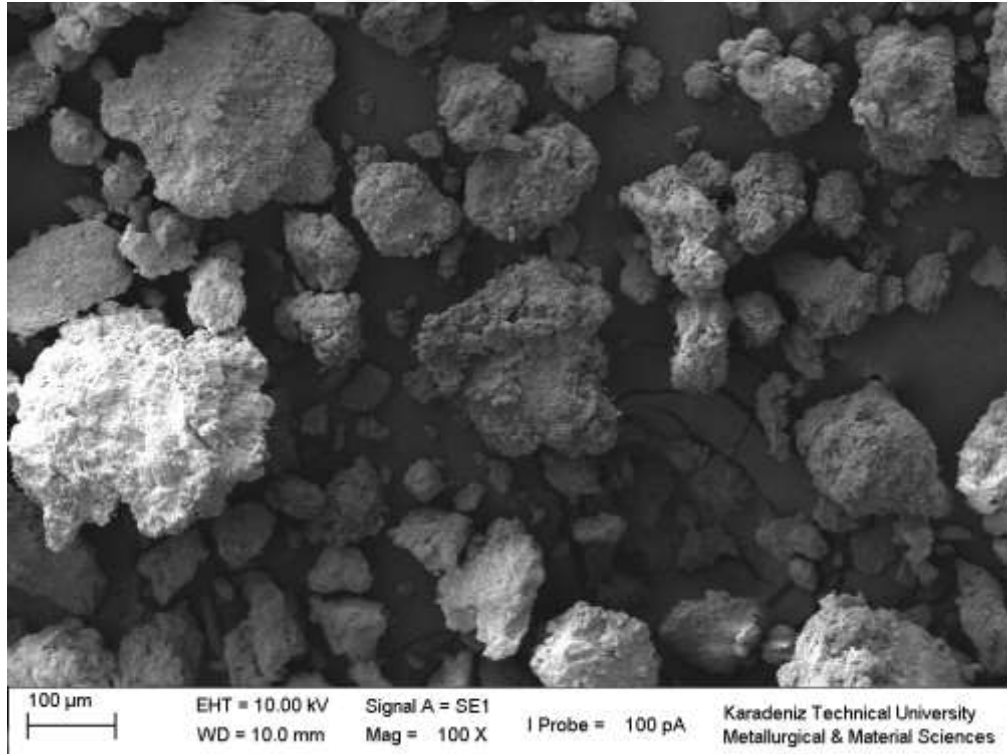
Şekil 83: 6. Numune XRD Sonucu

Ek 2: SEM Analizi Sonuçları

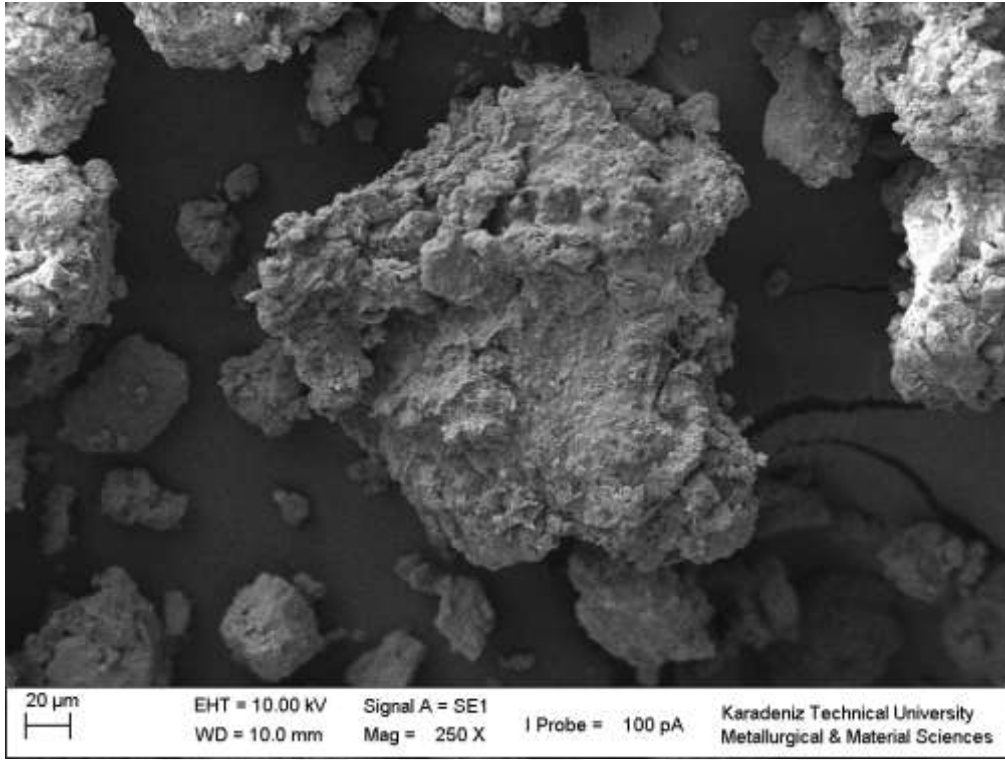
Doğal Zemin İçeriği SEM Analizi Görüntüleri



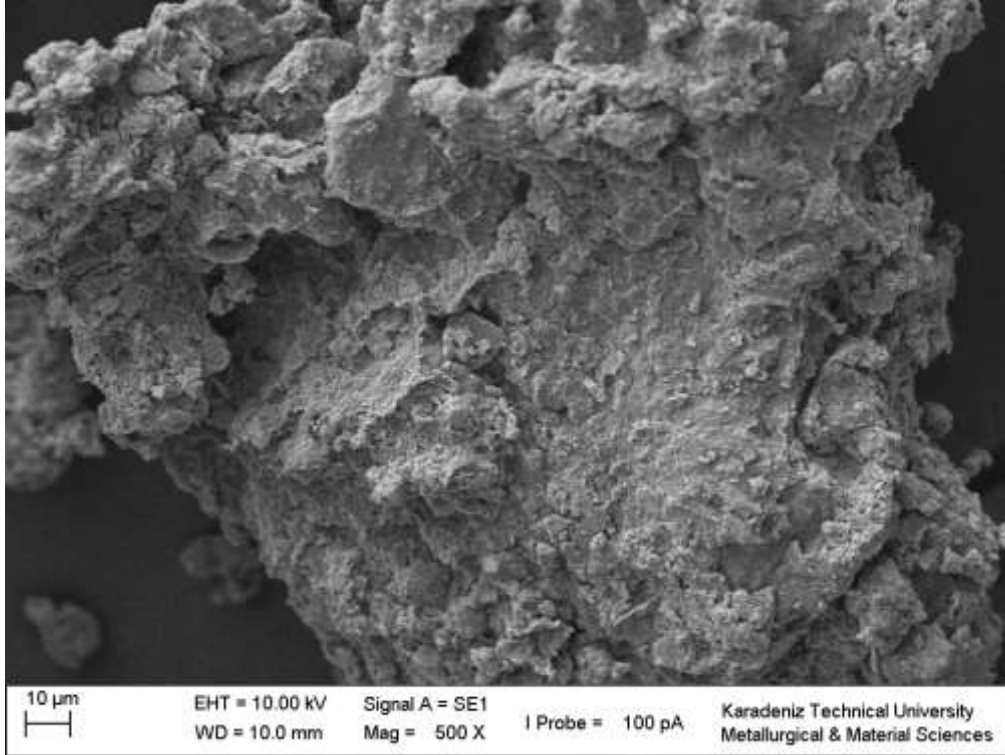
Şekil 84: Doğal Zemine Ait 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



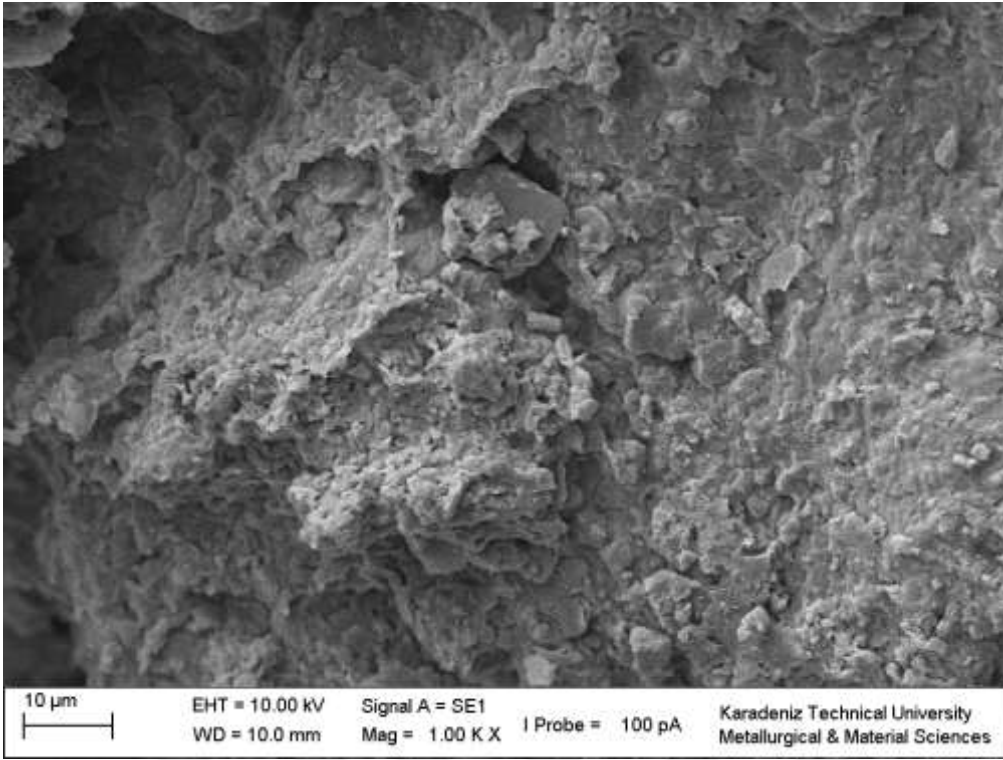
Şekil 85: Doğal Zemine Ait 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



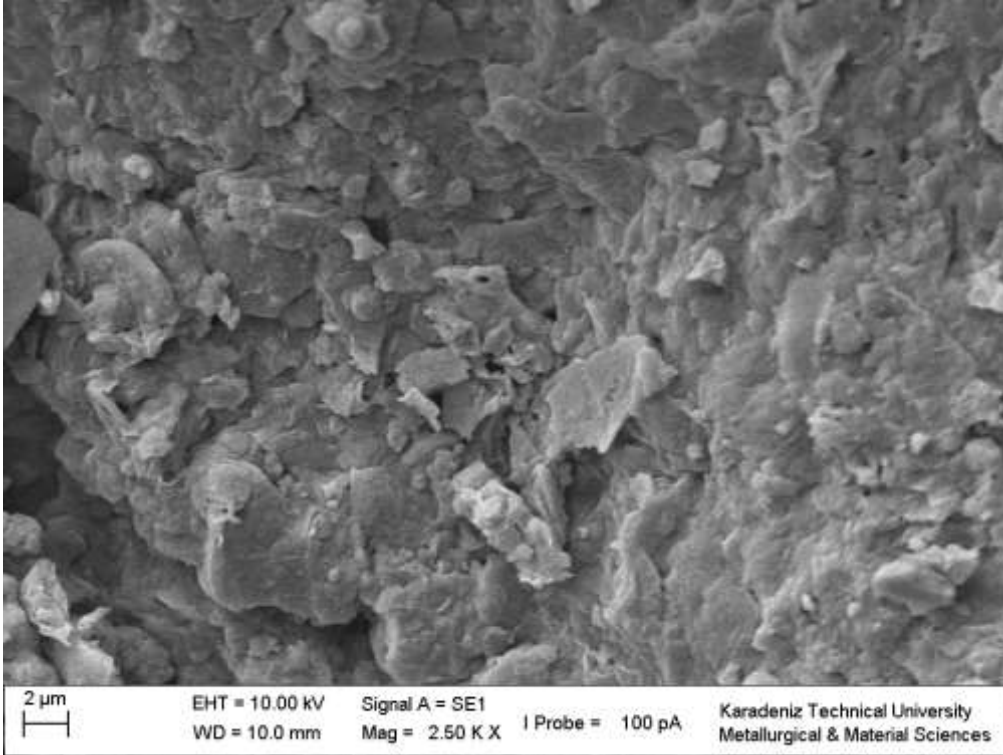
Şekil 86: Doğal Zemine Ait 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



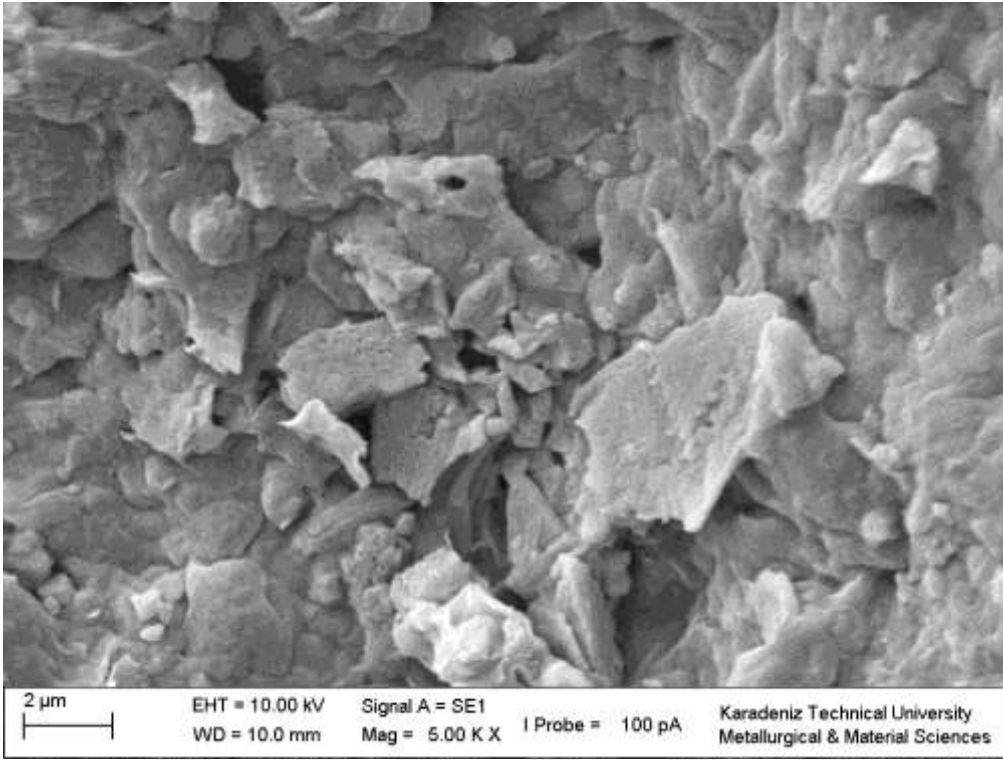
Şekil 87: Doğal Zemine Ait 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



Şekil 88: Doğal Zemin Ait 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

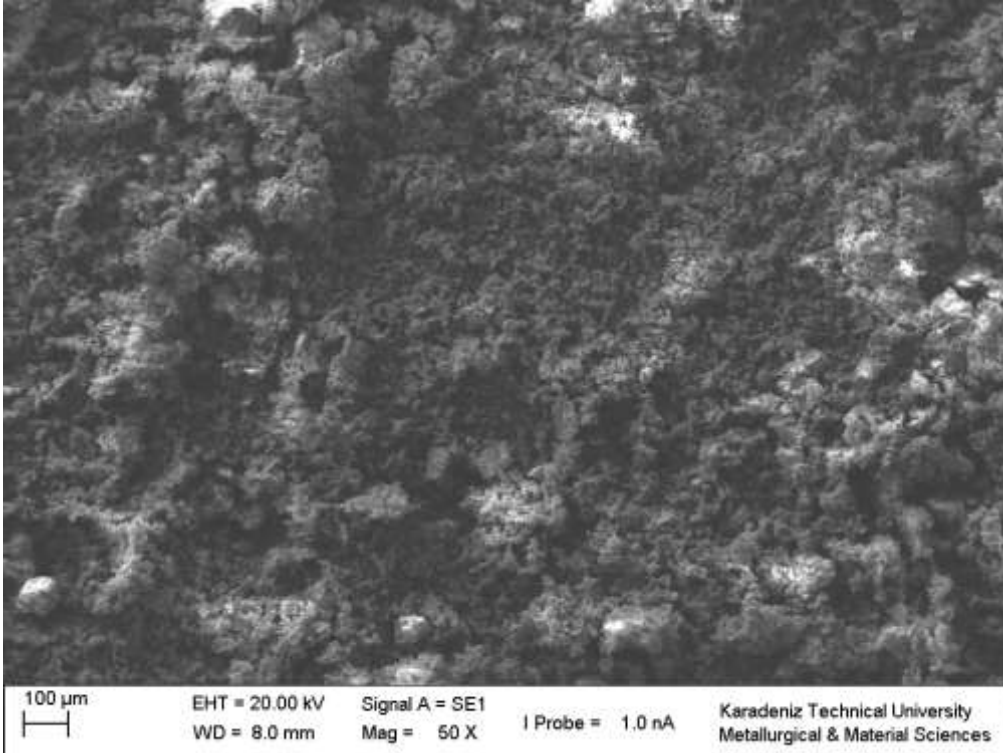


Şekil 89: Doğal Zemin Ait 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

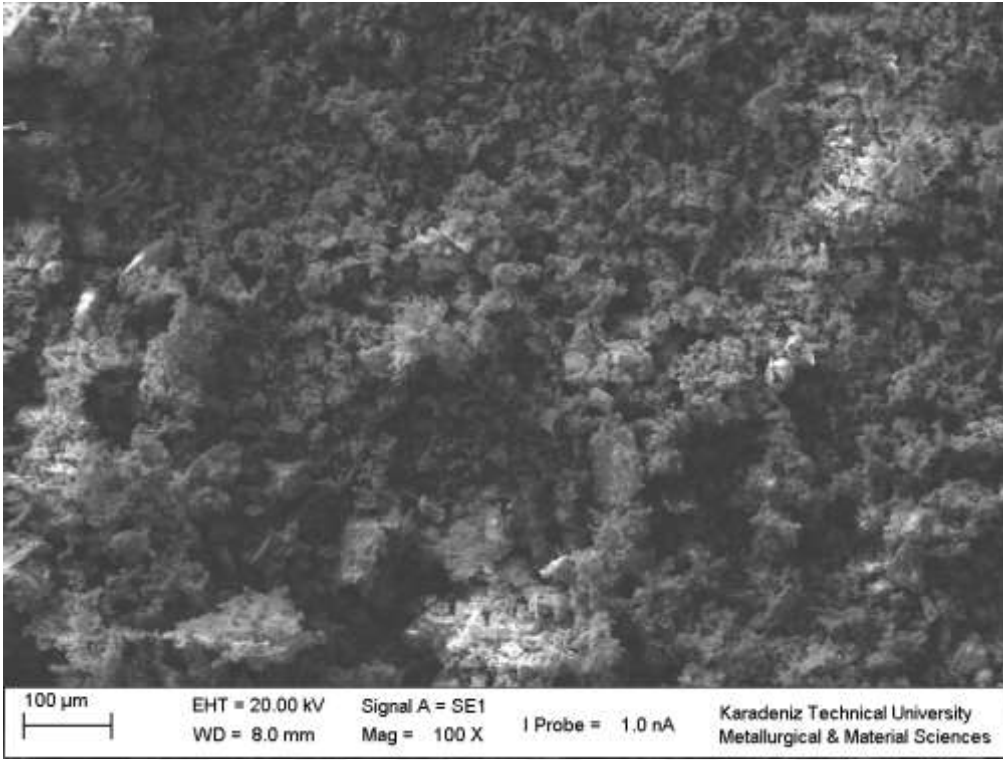


Şekil 90: Doğal Zemine Ait 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

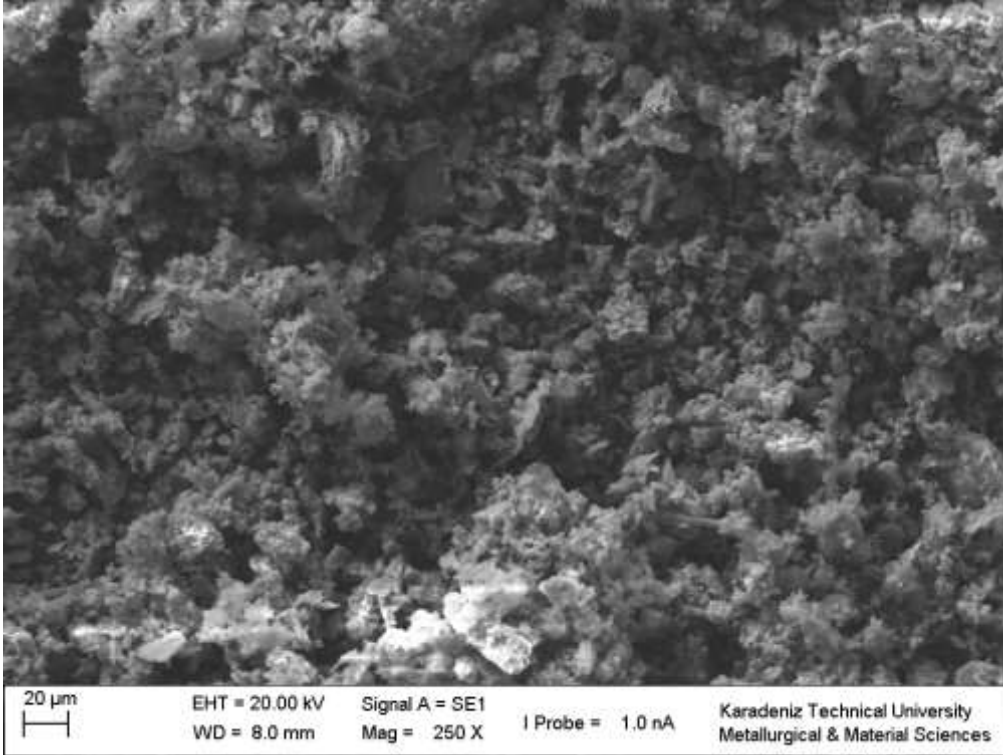
Uçucu Kül Katkısına Ait SEM Analizi Görüntüleri



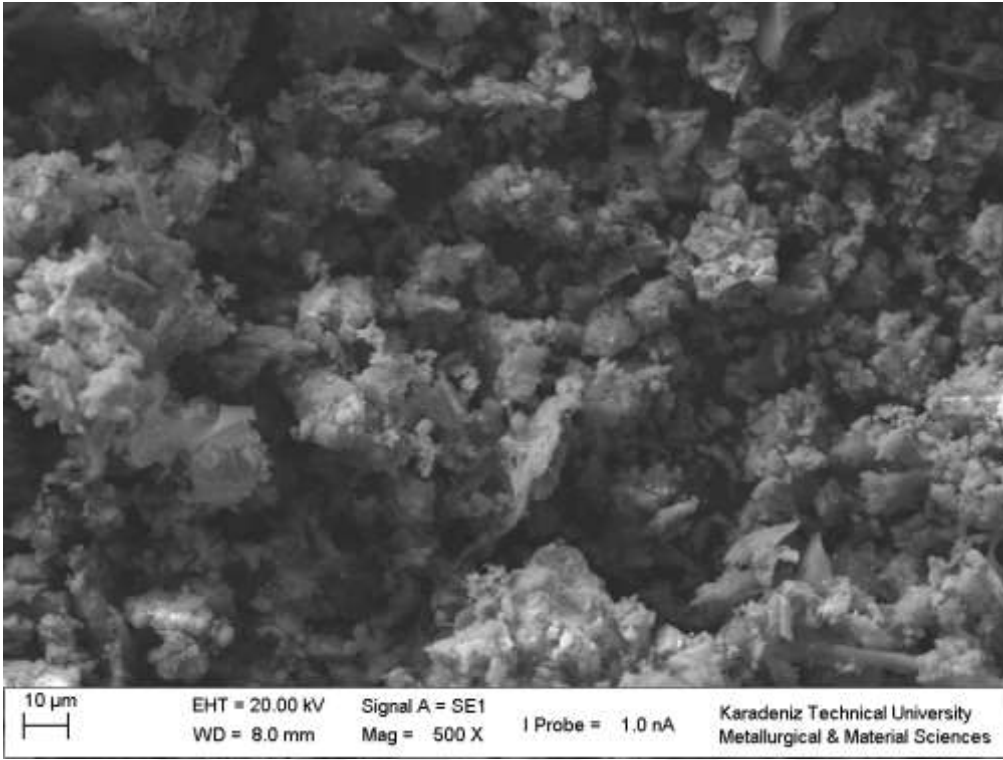
Şekil 91: Uçucu Kül Katkısına Ait 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



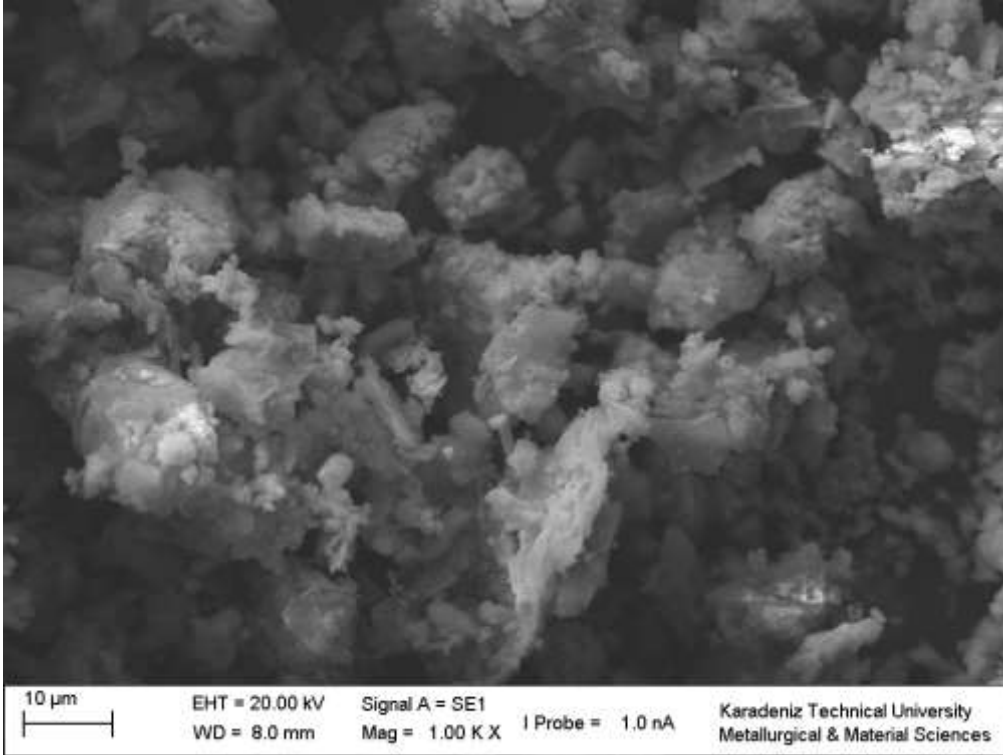
Şekil 92: Uçucu Kül Katkısına Ait 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



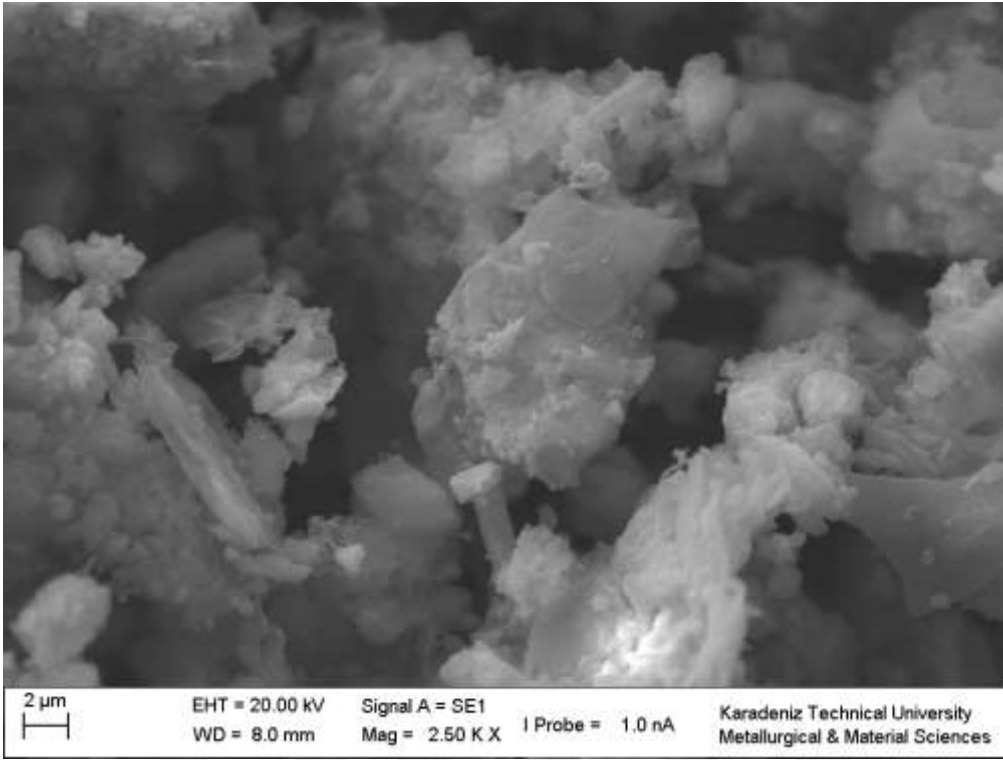
Şekil 93: Uçucu Kül Katkısına Ait 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



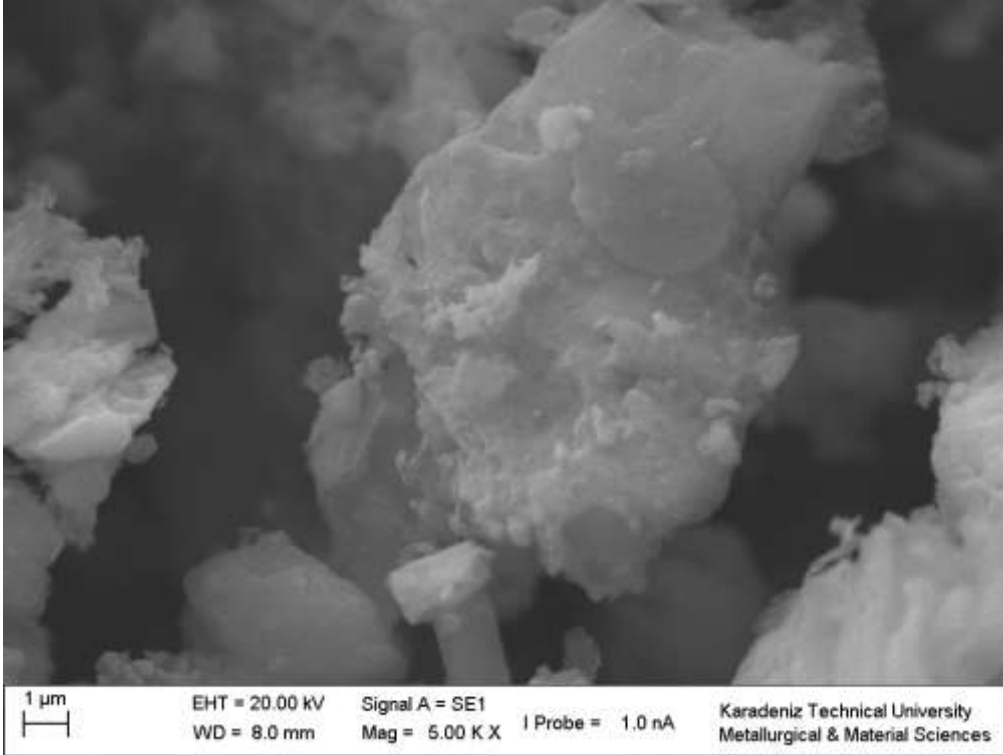
Şekil 94: Uçucu Kül Katkısına Ait 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



Şekil 95: Uçucu Kül Katkısına Ait 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

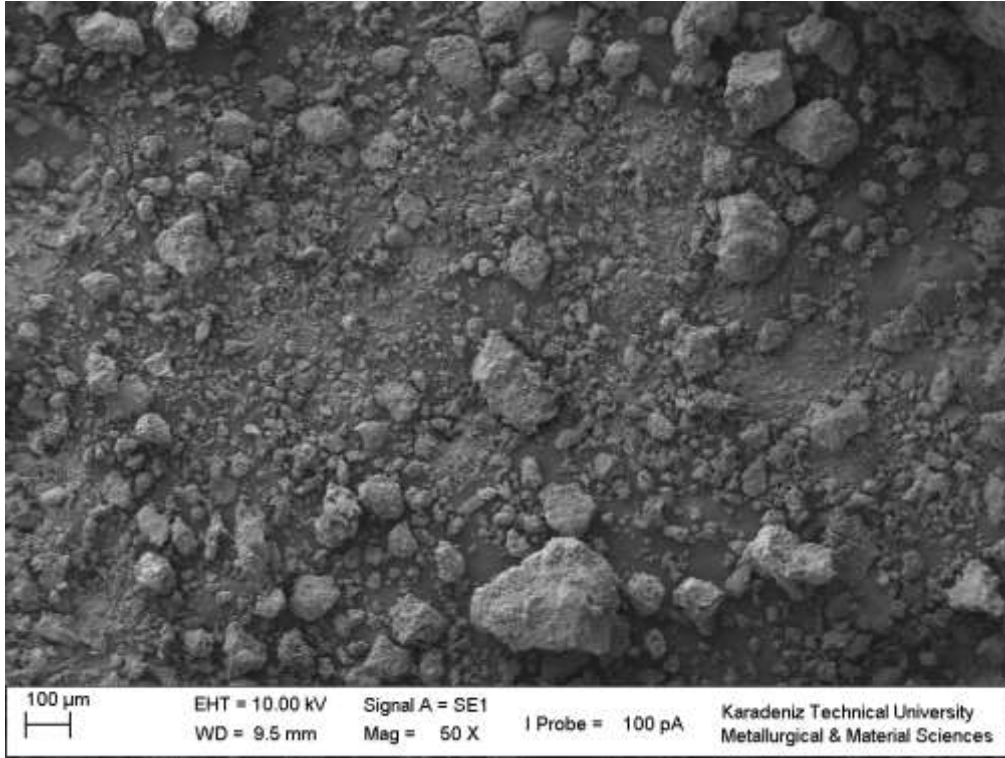


Şekil 96: Uçucu Kül Katkısına Ait 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

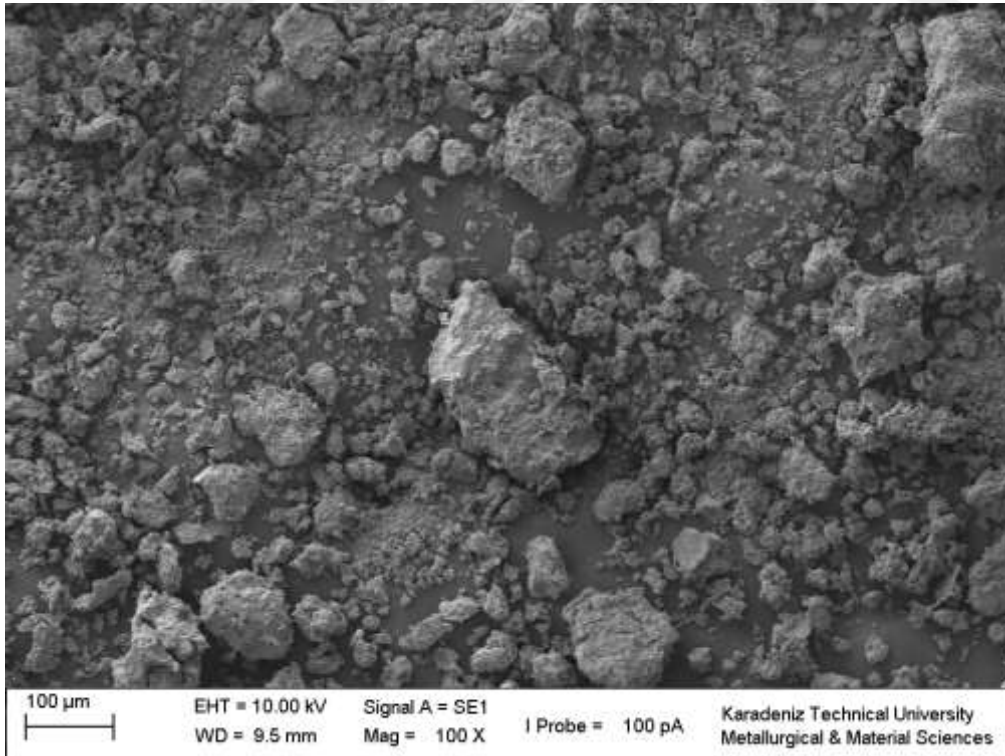


Şekil 97: Uçucu Kül Katkısına Ait 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

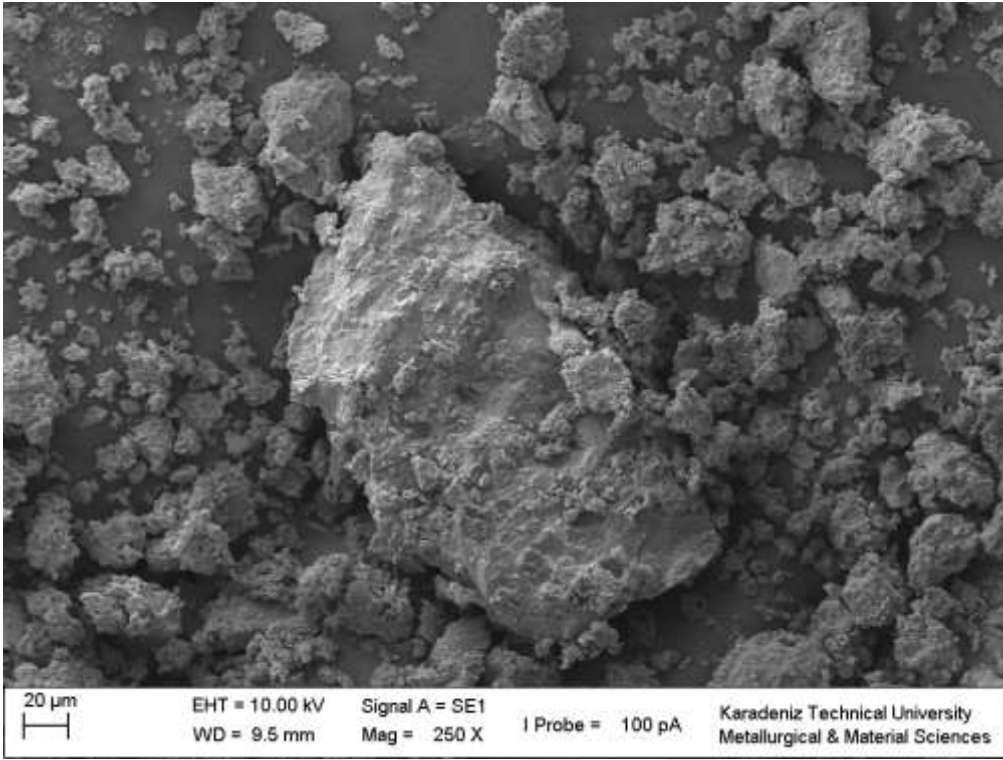
Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Zemin Numunelerine Ait SEM Analizi Görüntüleri



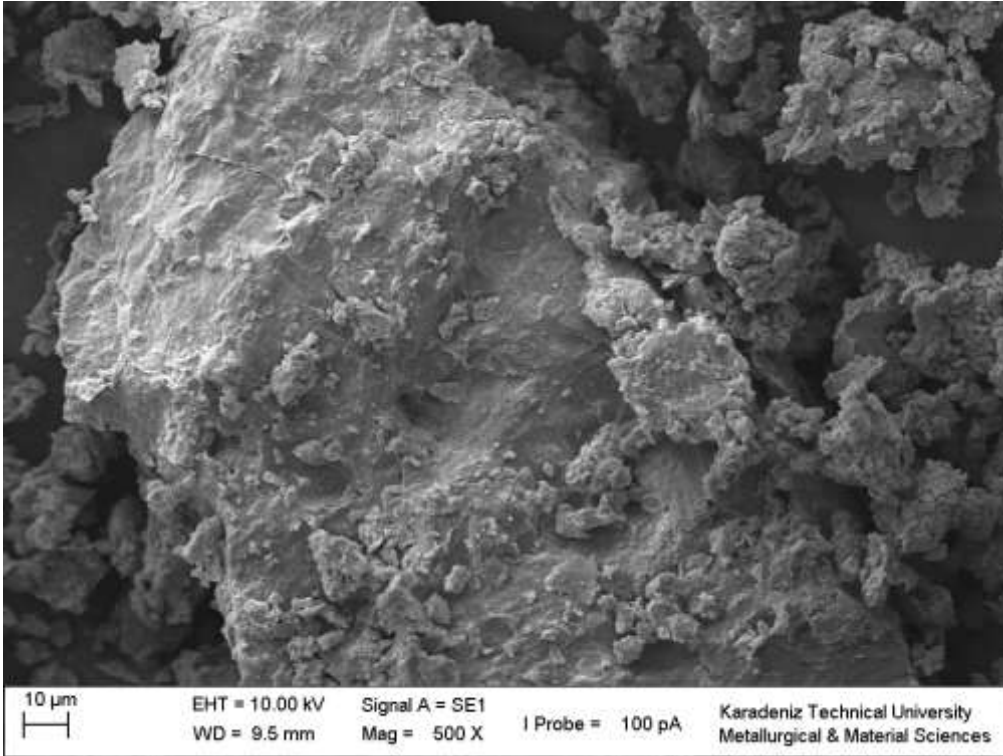
Şekil 98: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



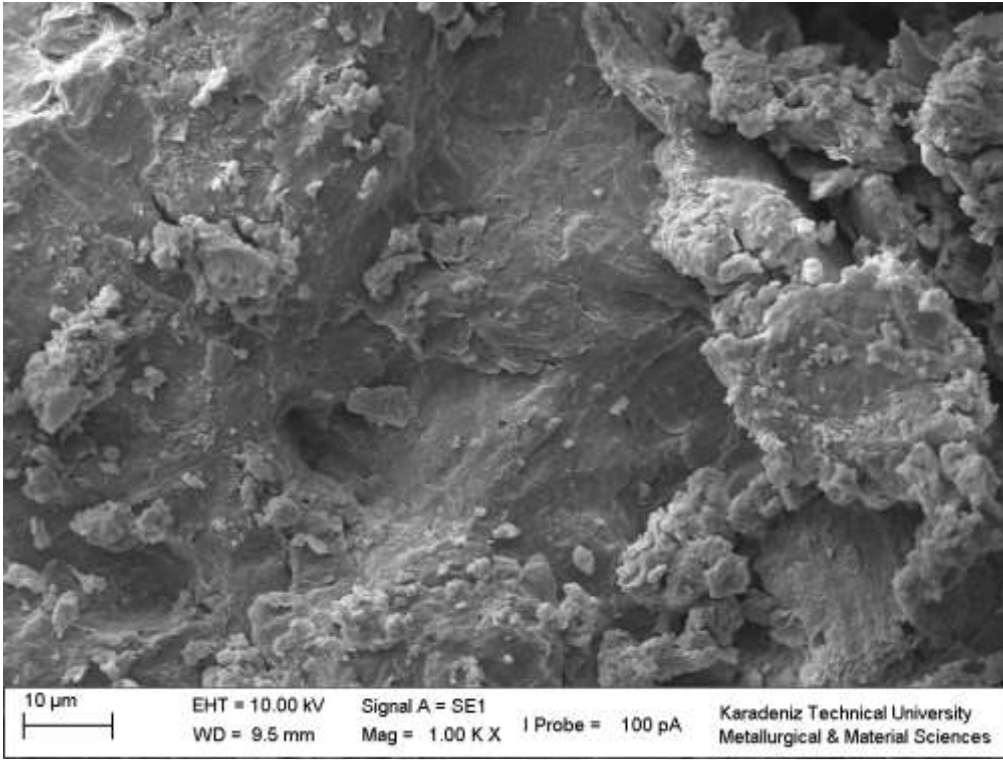
Şekil 99: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



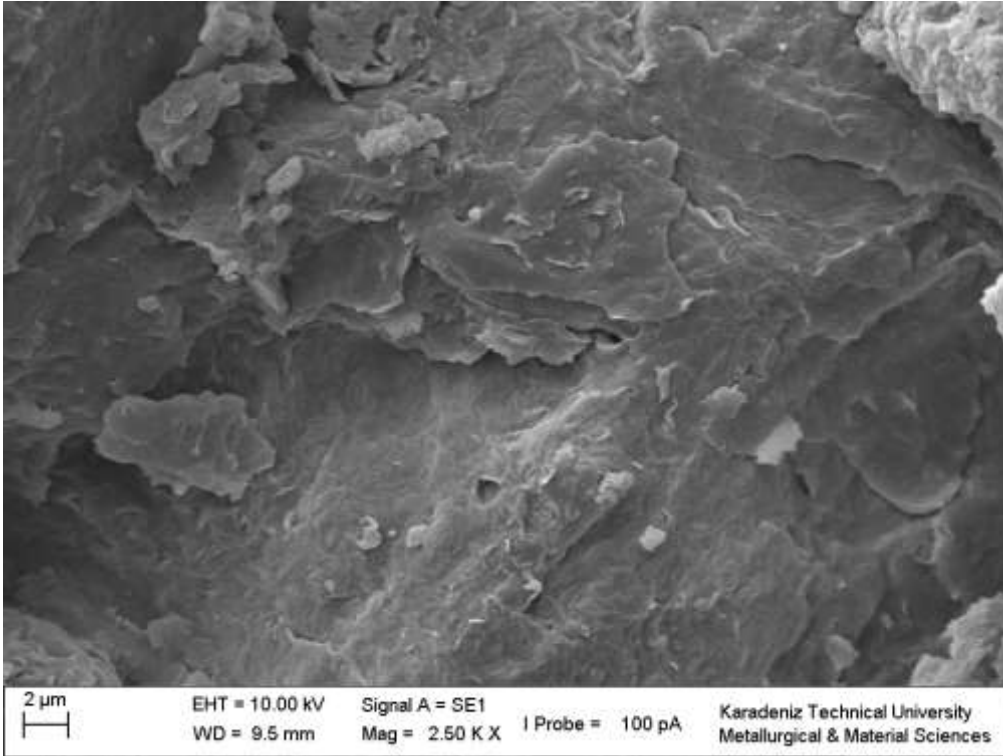
Şekil 100: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



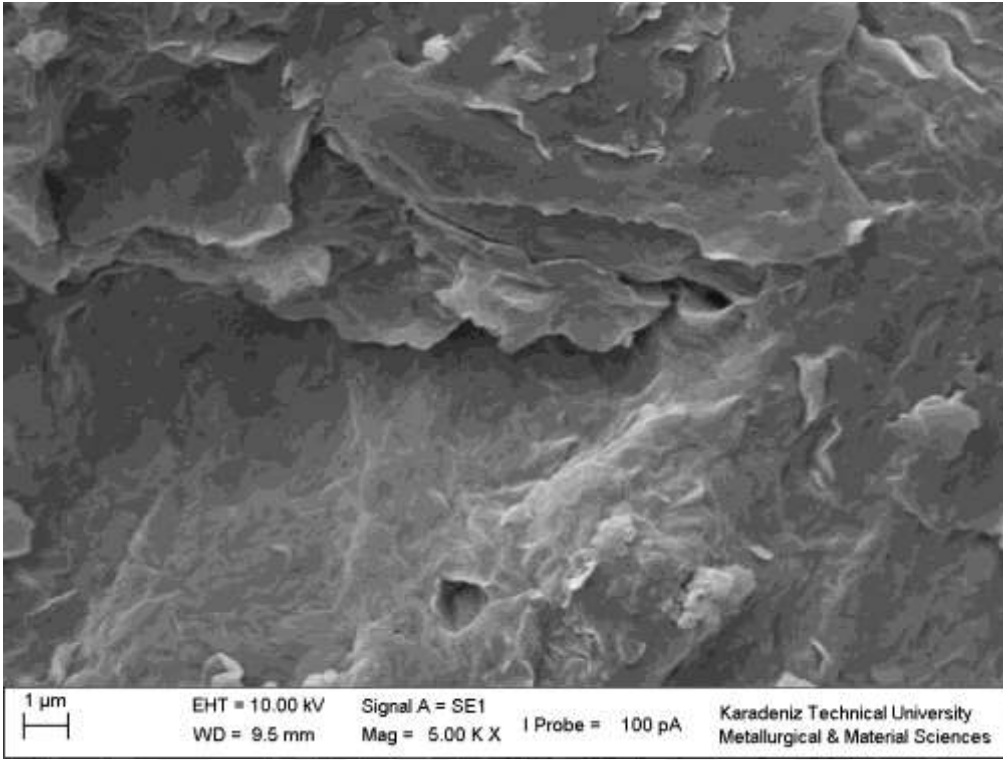
Şekil 101: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



Şekil 102: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

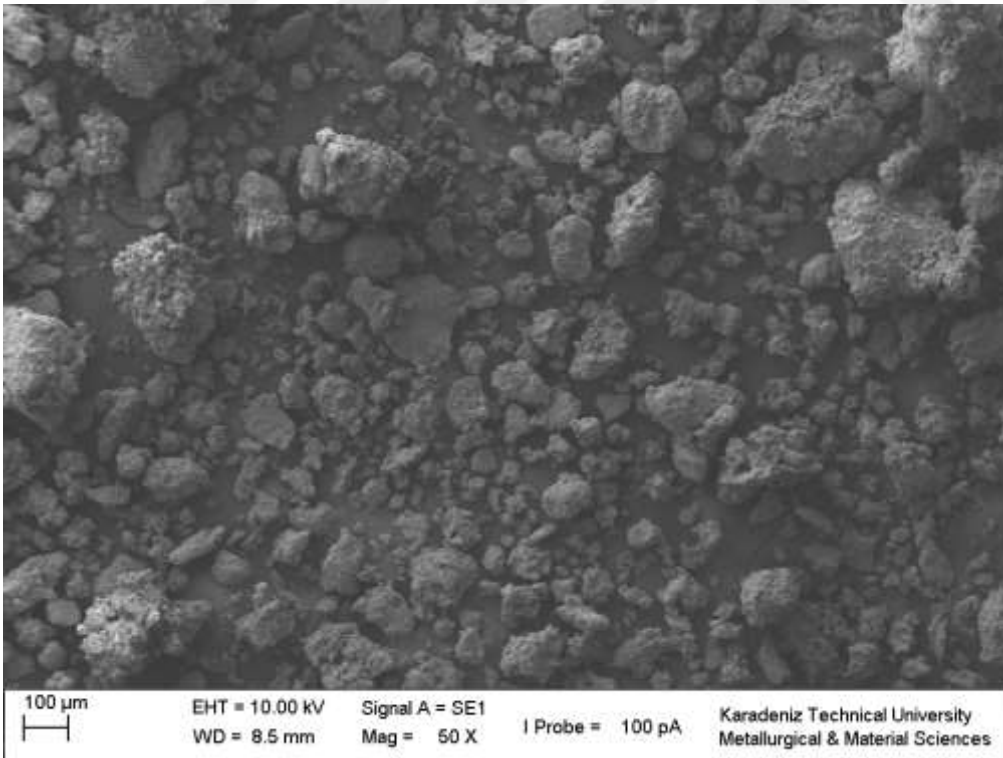


Şekil 103: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

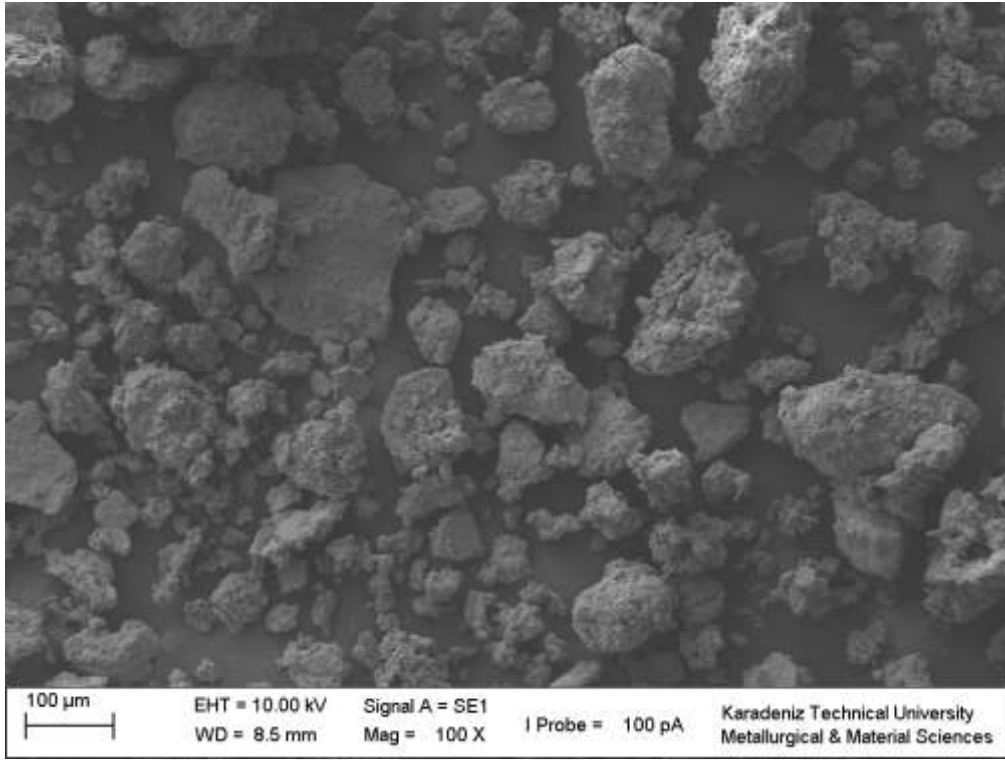


Şekil 104: Serbest Basınç Dayanımı Maksimum Olan Numunelere Ait 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

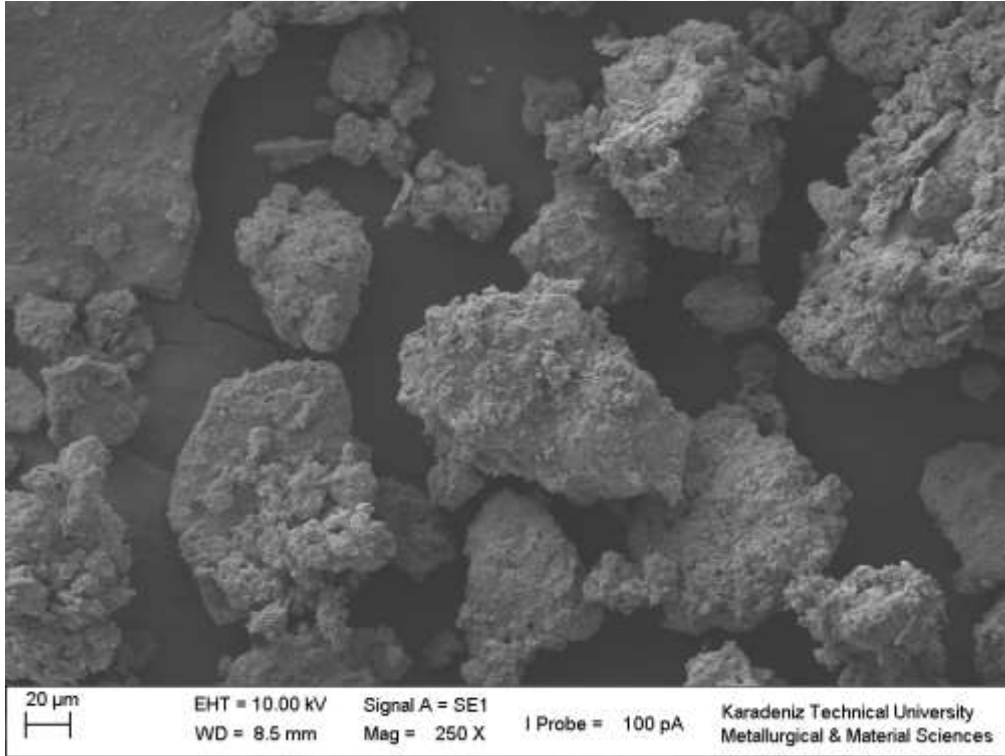
Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin SEM Analizi Görüntüleri



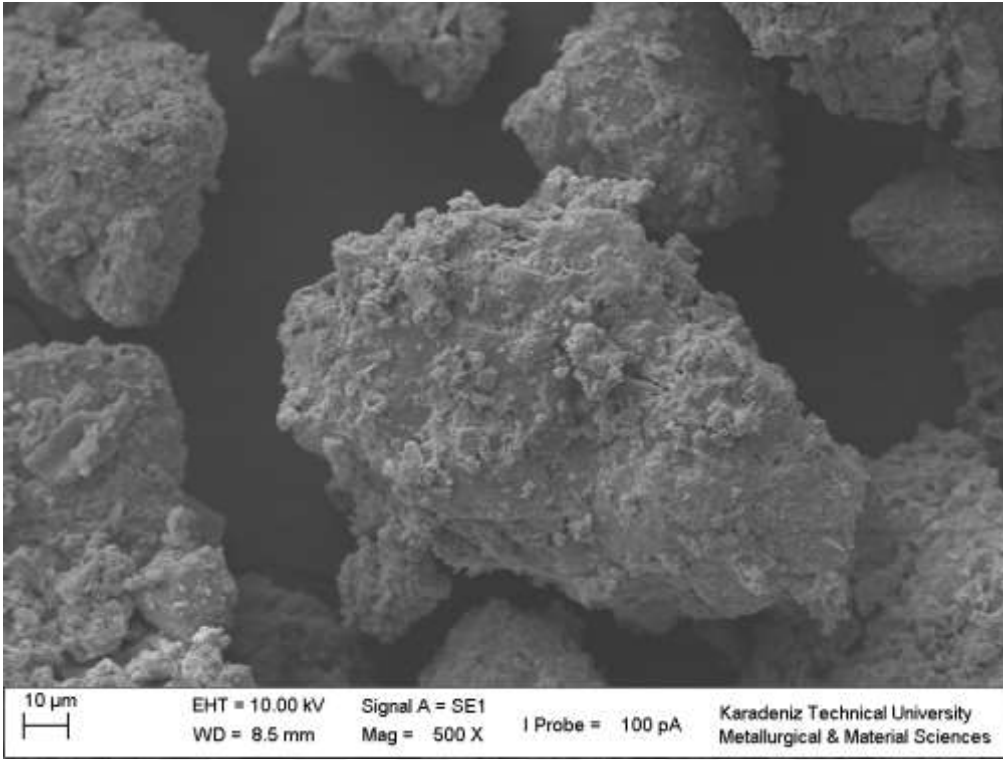
Şekil 105: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



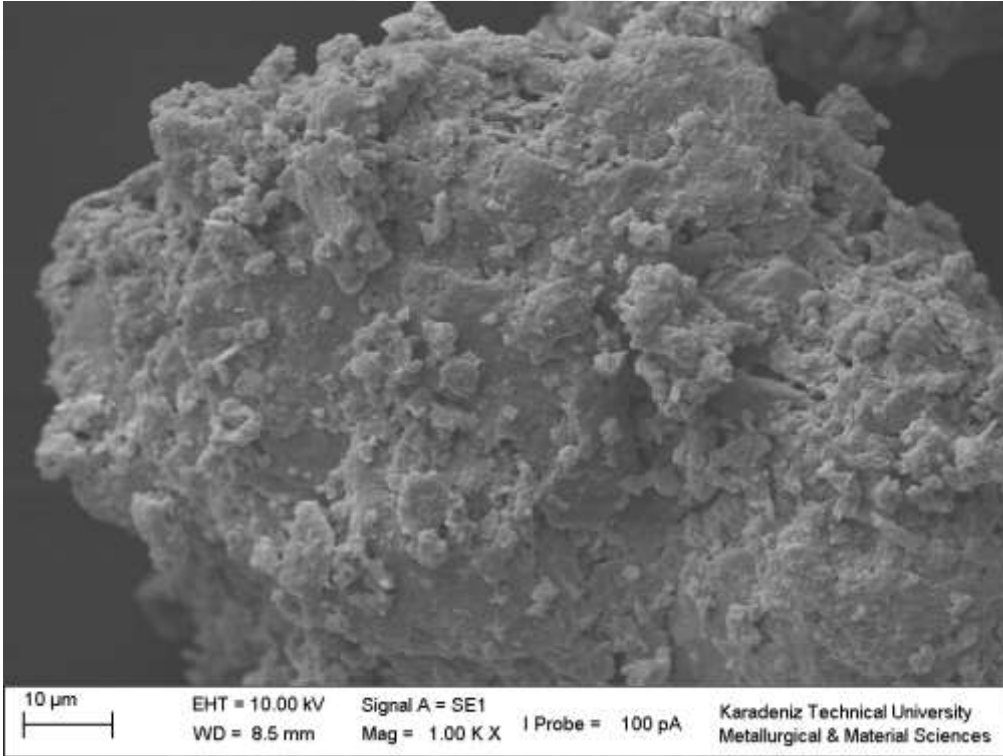
Şekil 106: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



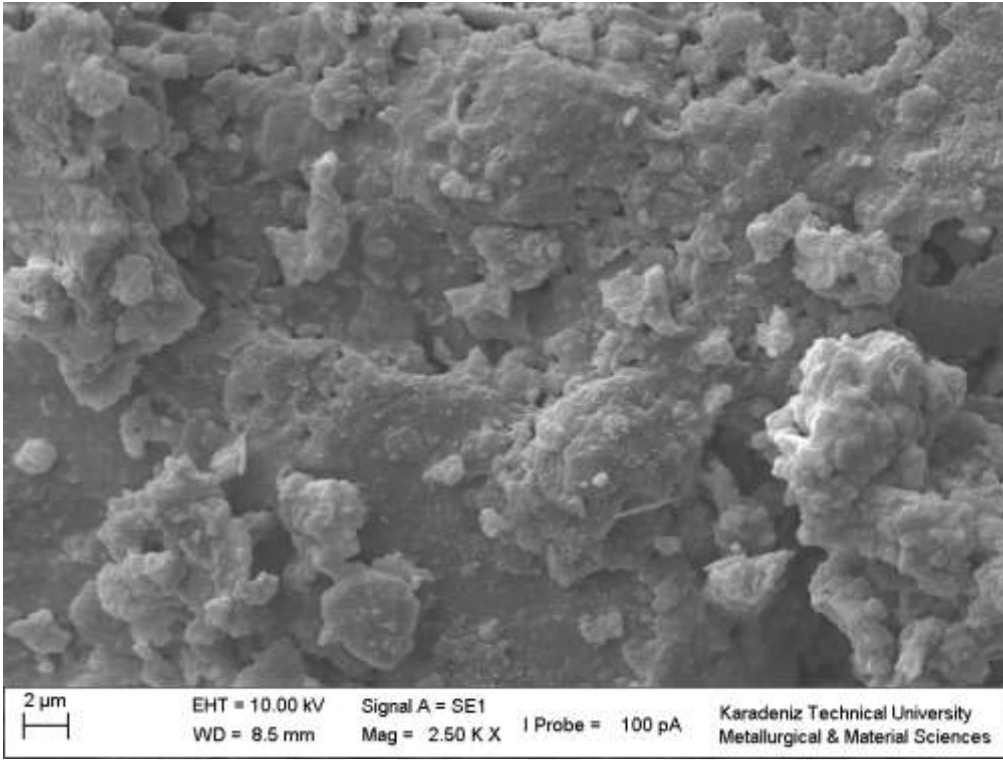
Şekil 107: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



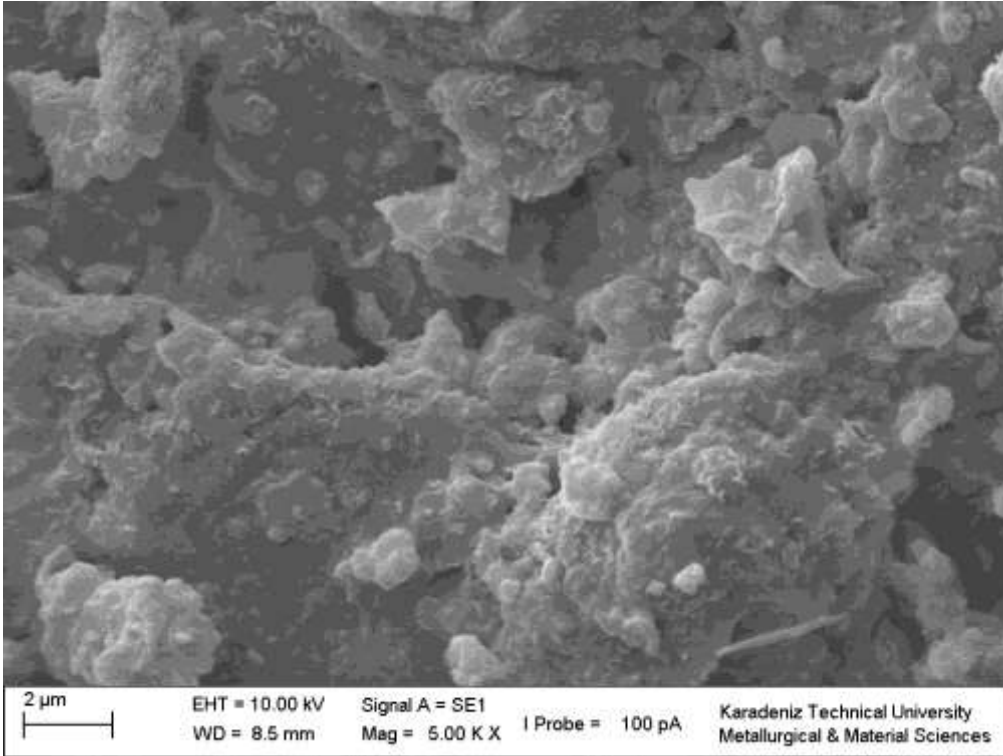
Şekil 108: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



Şekil 109: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

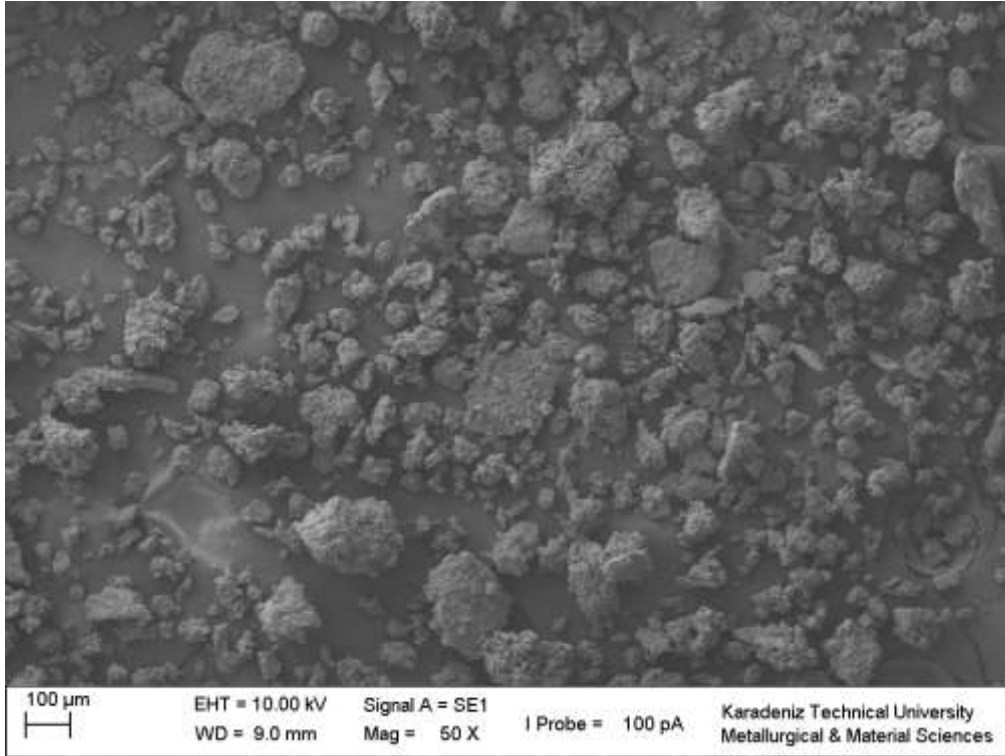


Şekil 110: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

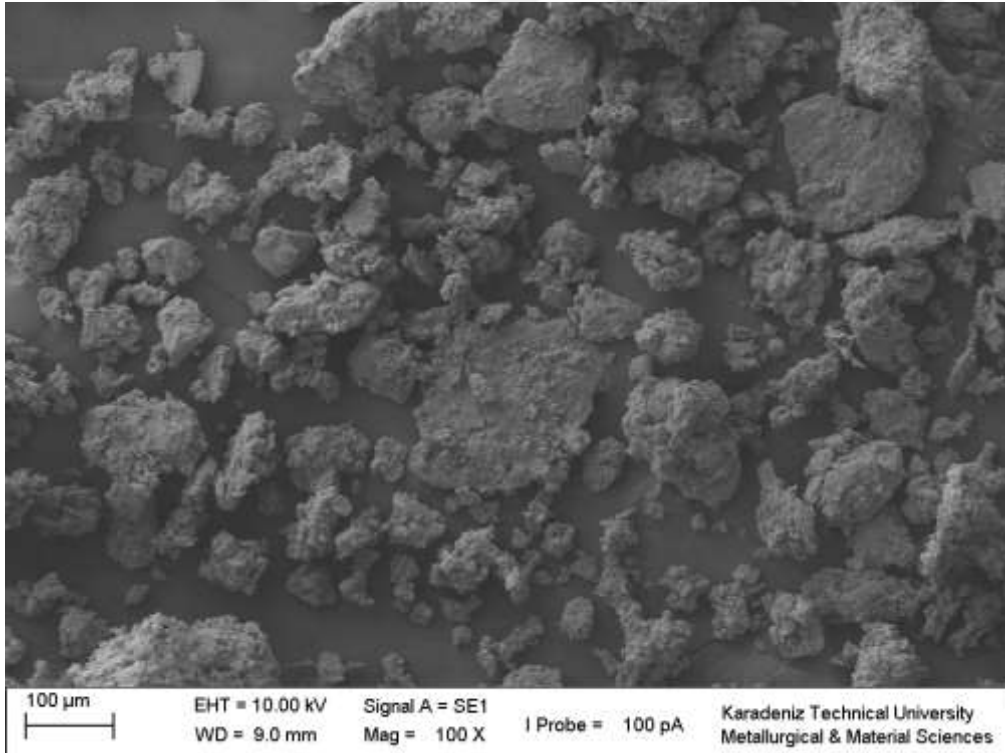


Şekil 111: Minimum Maliyete Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

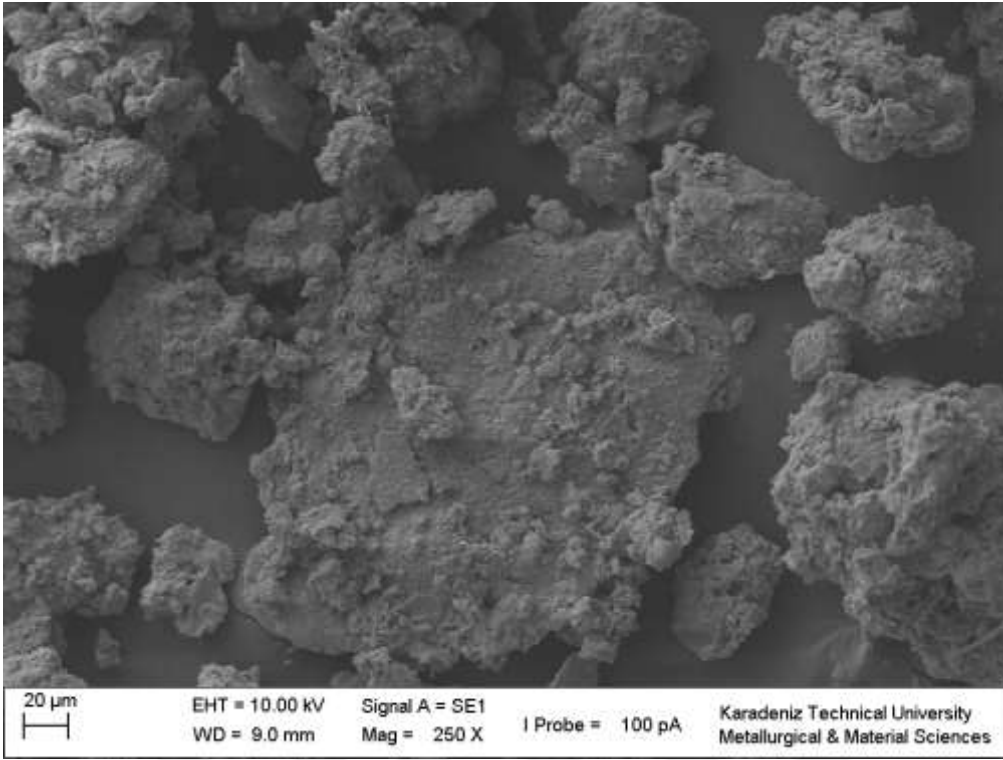
Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Numunelerinin SEM Analizi Görüntüleri



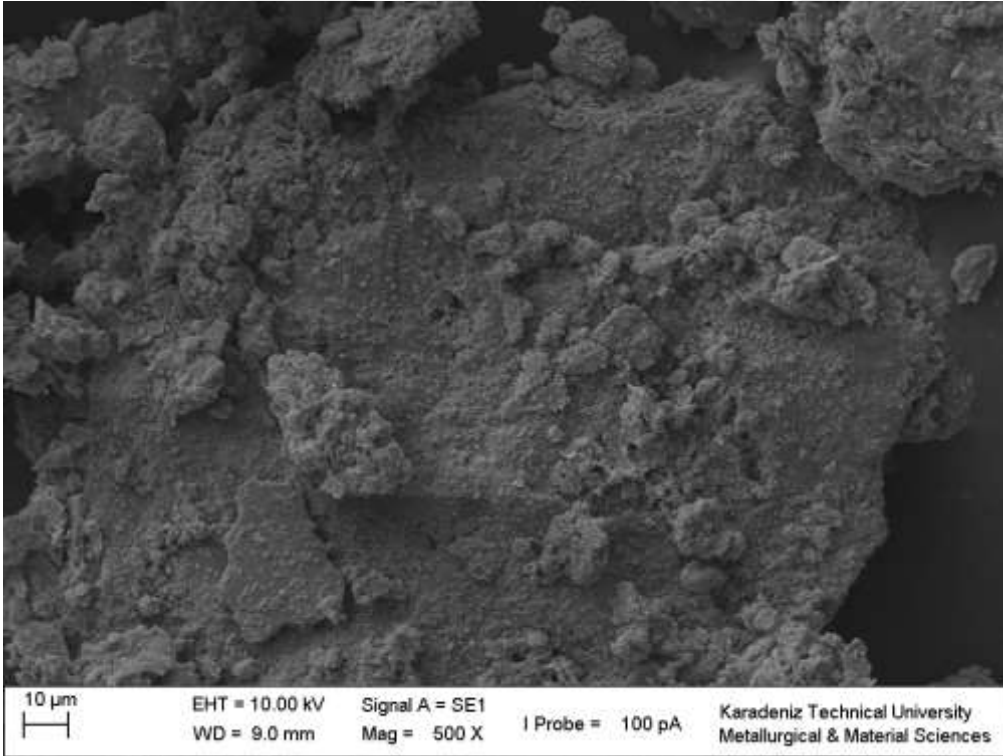
Şekil 112: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



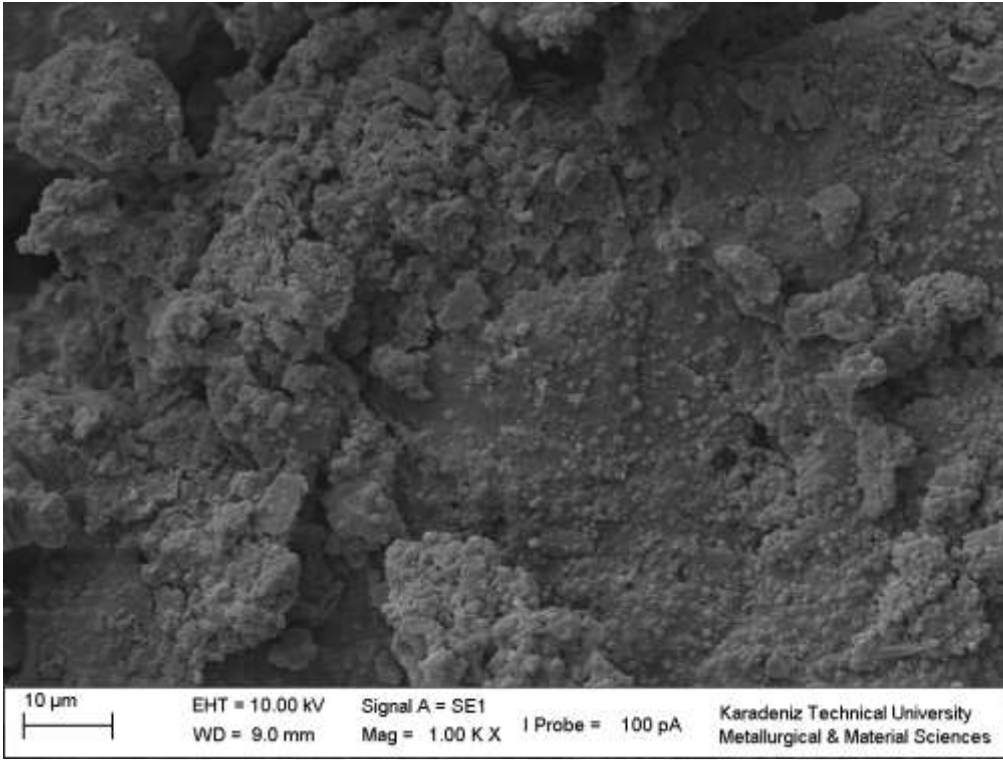
Şekil 113: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



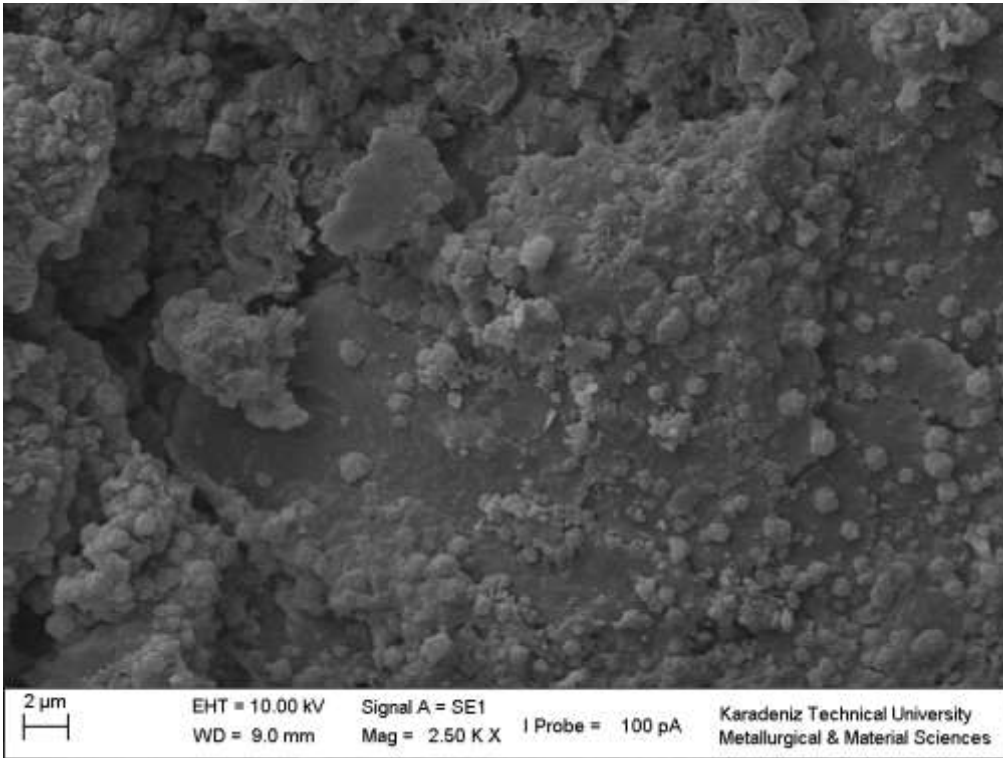
Şekil 114: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



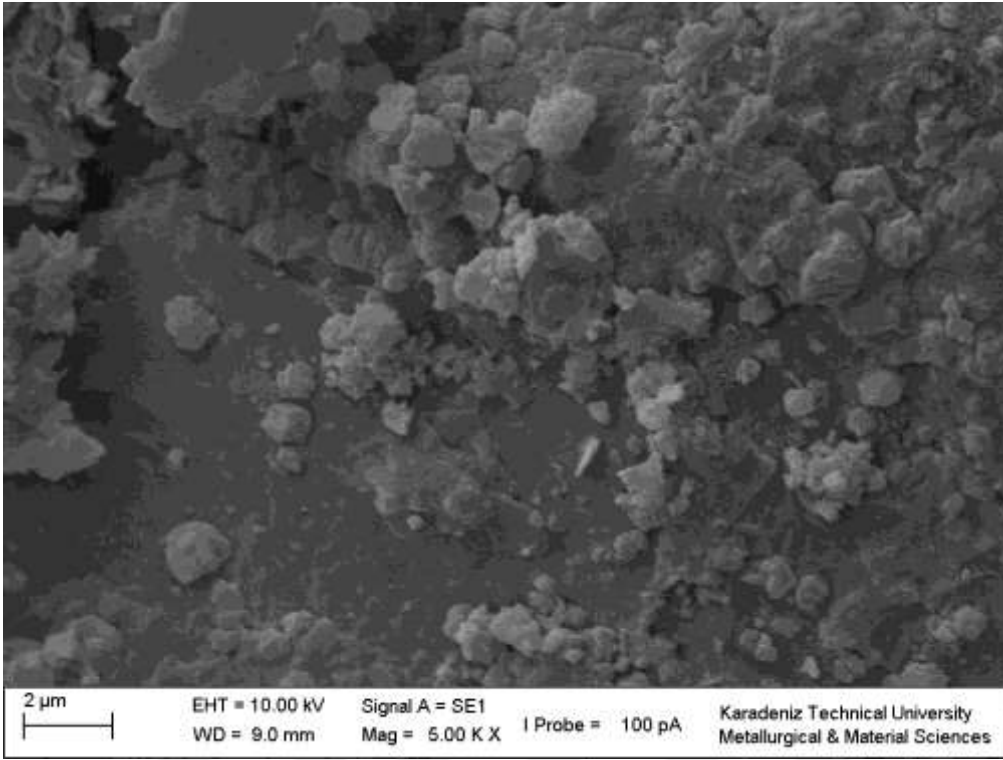
Şekil 115: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri



Şekil 116: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

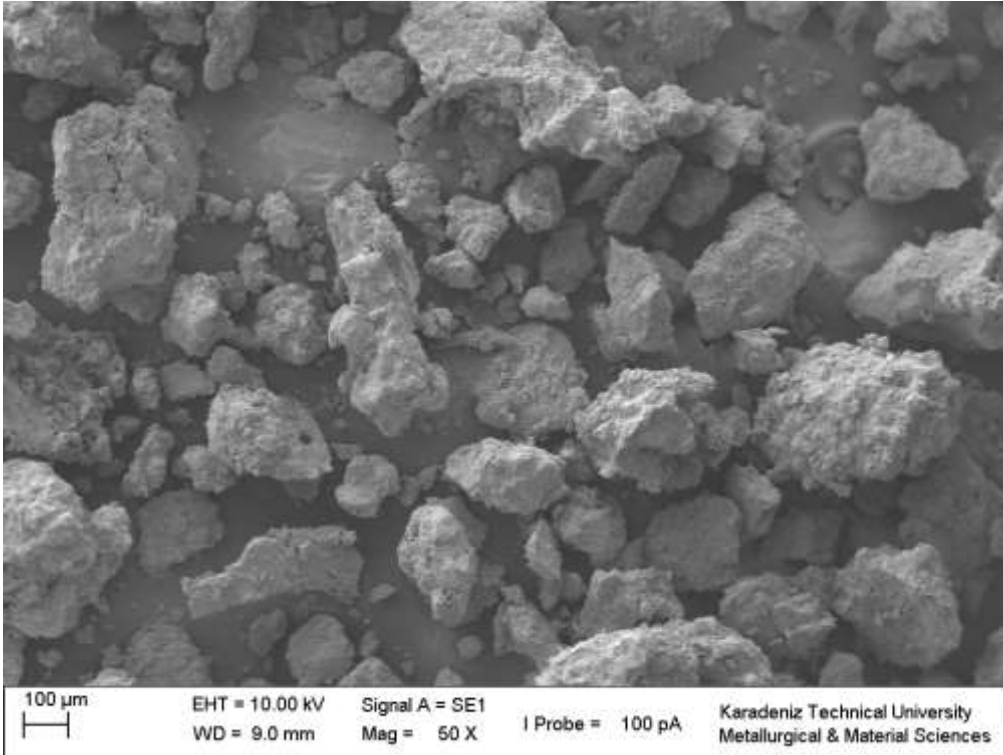


Şekil 117: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

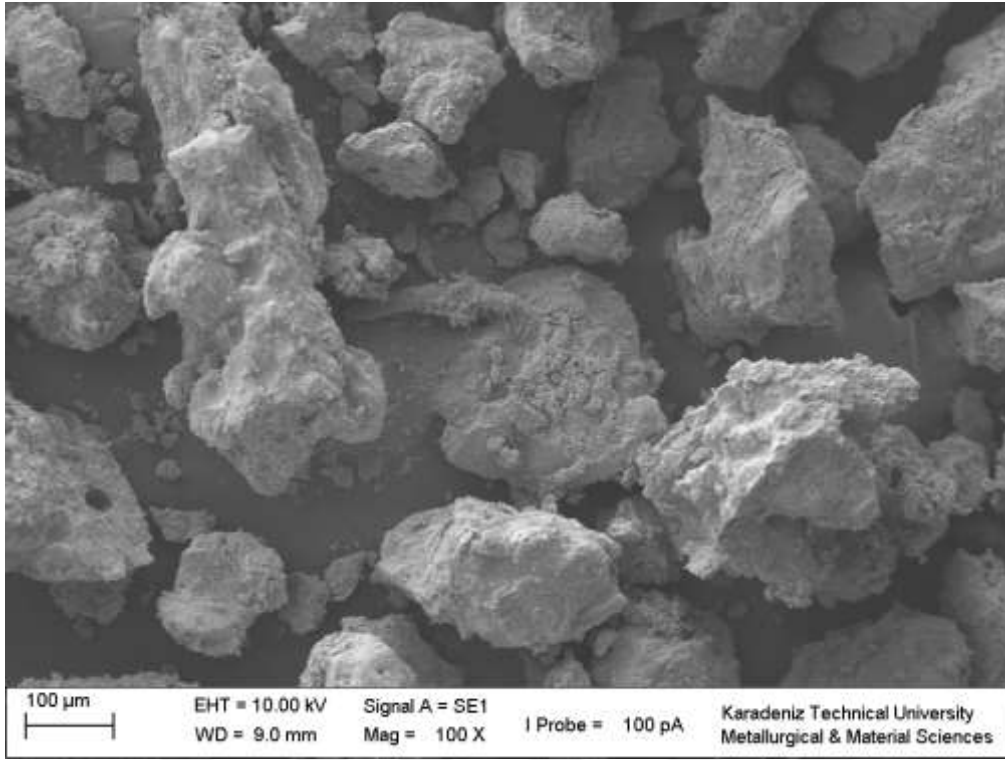


Şekil 118: Minimum Karbon Salınımına Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüleri

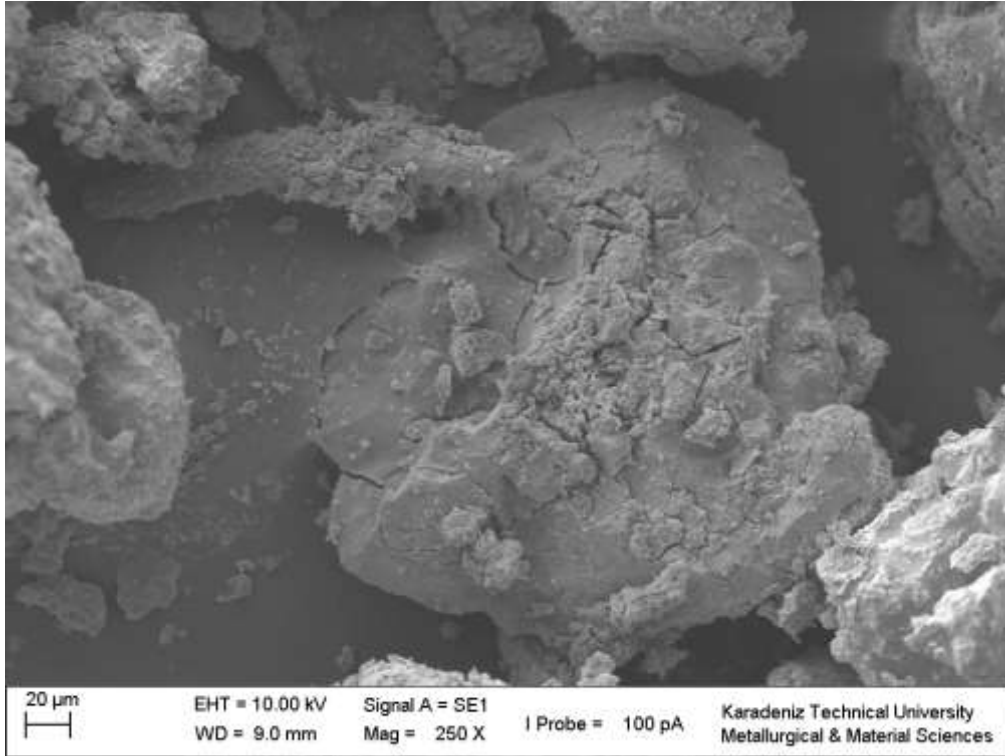
Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Numunelerin SEM Analizi Görüntüleri



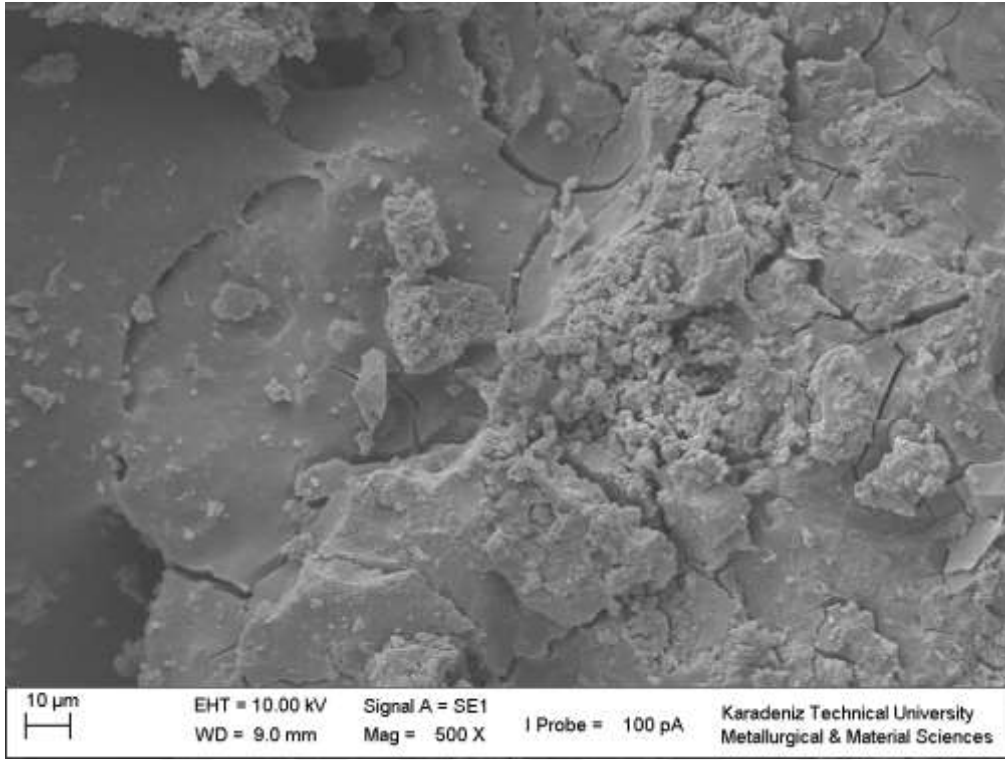
Şekil 119: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 50 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü



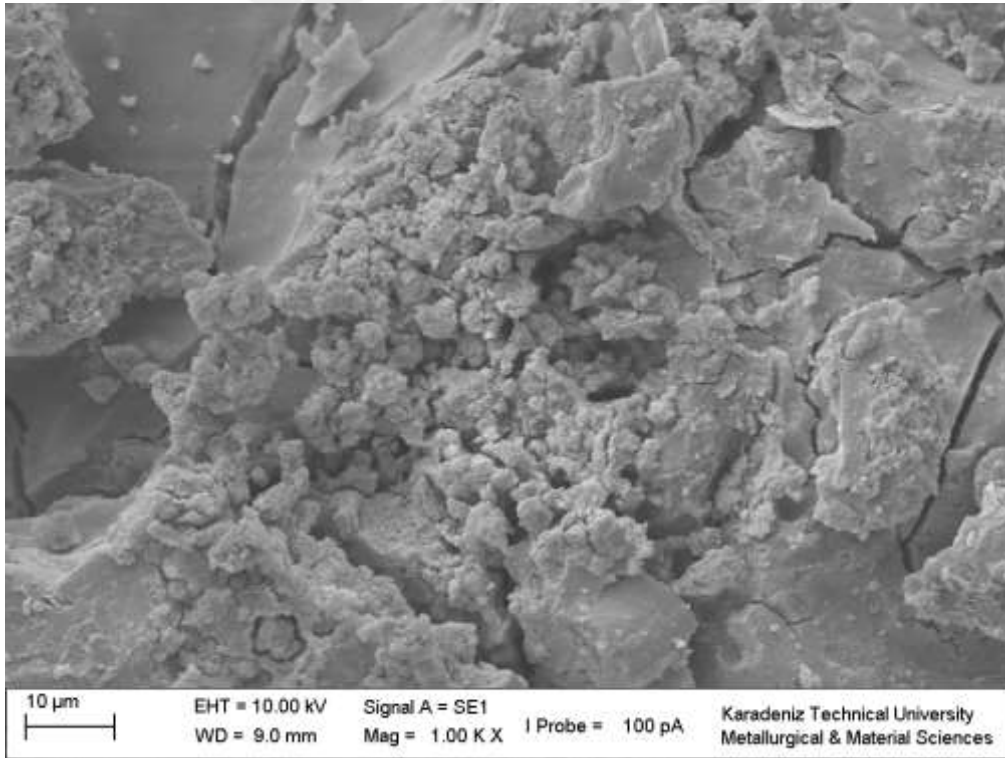
Şekil 120: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 100 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü



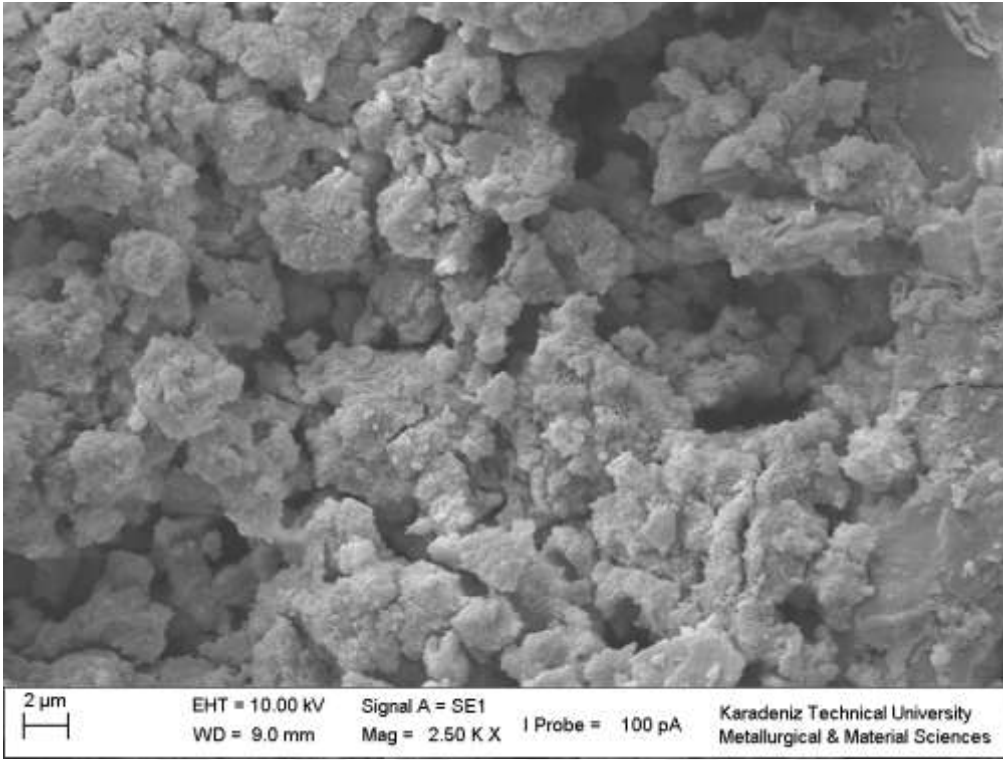
Şekil 121: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 250 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü



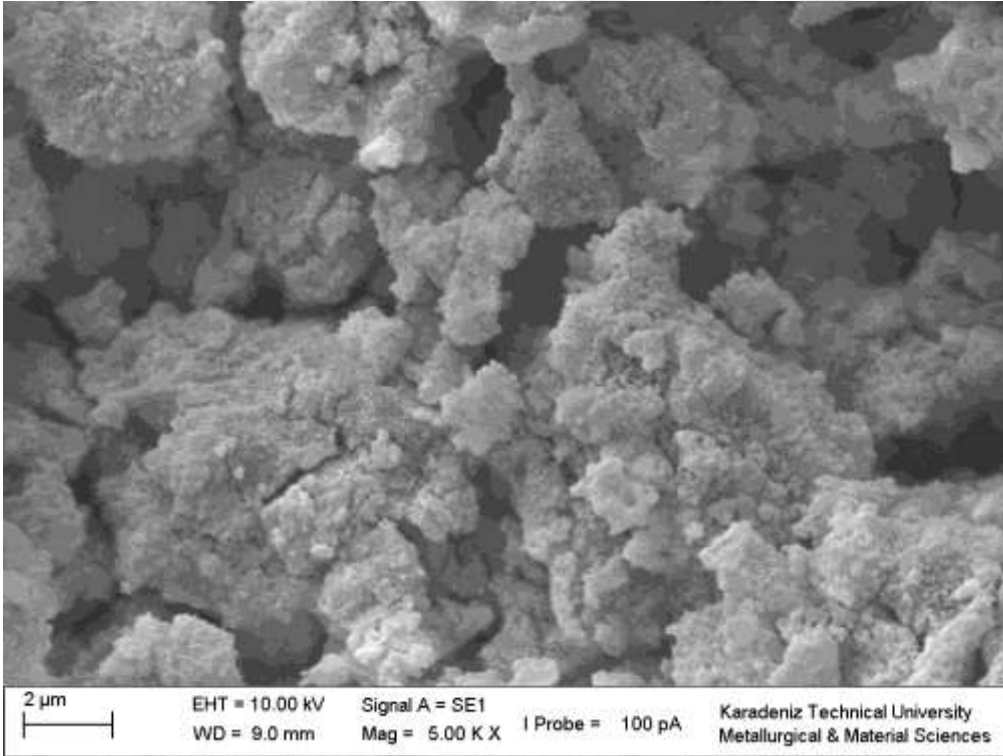
Şekil 122: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 500 Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü



Şekil 123: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 1.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü



Şekil 124: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 2.50k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü



Şekil 125: Çoklu Optimizasyona Göre Hazırlanmış Zemin Numunelerinin 5.00k Kat Büyütülmüş SEM Analizi Görüntüsü

ÖZ GEÇMİŞ

Esra YILMAZ, [REDACTED] İlk ve ortaöğrenimini Muş ilinde tamamlamış, 2017 yılında Muş Malazgirt Sağlık Meslek Lisesi'nden mezun olmuştur. 2023 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Lisans eğitimi süresince özellikle zemin mekaniği, geoteknik mühendisliği ve malzeme bilimi alanlarında çalışmalar yapmıştır. Akademik gelişimine katkı sağlayan seminer, laboratuvar çalışmaları ve proje faaliyetlerinde aktif olarak yer almıştır. Lisans eğitiminin ardından yüksek lisans öğrenimine Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda devam etmiştir.

