



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERDE ATIK TEKSTİL FİBER VE
ÇİMENTO KATKISININ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Derya Nur BOZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERDE ATIK TEKSTİL FİBER VE
ÇİMENTO KATKISININ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Derya Nur BOZ
(21434979036)
ORCID: 0009-0008-7478-5732**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Eray Yıldırım
ORCID: 0000-0002-5134-0625**

ŞUBAT 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 21434979036 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Derya Nur BOZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERDE ATIK TEKSTİL FİBER VE ÇİMENTO KATKISININ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Eray YILDIRIM**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Eyübhan AVCI**
Bursa Teknik Üniversitesi

.....
Dr. Öğr. Üyesi Hatice DURMUŞ
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Teslim Tarihi : 26.02.2025
Savunma Tarihi : 04.02.2025



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Derya Nur BOZ

İmzası:





Haklarını ödeyemeyeceğim annem ve babama,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans derslerim ve tez çalışmalarım süresince yardım ve desteklerini benden esirgemeyen, akademik bilgi birikimimi artırıp bana çok şey katan, rehberlik eden danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Eray Yıldırım’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın ilerleyip gelişmesinde, deneysel çalışmalarım sırasında bana her türlü yardımı gösteren ve desteklerini benden esirgemeyen Ayşegül Kaymaz’a ve deney sürecinde yardım eden lisans bitirme öğrencilerine teşekkürü bir borç bilirim.

Atık poliamid fiber göndererek tez çalışmama katkı sağlayan FLOKCAN Tekstil firmasına teşekkür ederim.

Disiplinli çalışma ve emek gerektiren bu süreçte hayatımın diğer aşamalarında olduğu gibi yanımda olan, tüm eğitim hayatımda maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen fedakâr ve sevgi dolu canım anneme, babama, abime ve kız kardeşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Şubat 2025

Derya Nur BOZ
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
KISALTMALAR.....	x
SEMBOLLER.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Literatür Özeti	2
2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	9
2.1 Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri	11
2.1.1 Dinamik kompaksiyon.....	11
2.1.2 Vibro kompaksiyon	12
2.1.3 Taş kolonlar.....	12
2.1.4 Patlatma	13
2.1.5 Kompaksiyon kazıkları.....	13
2.1.6 Jet grouting.....	14
2.1.7 Derin karıştırma yöntemi	15
2.2 Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri	15
2.2.1 Kompaksiyon	16
2.2.2 Drenaj	16
2.2.3 Kireç ile stabilizasyon.....	16
2.2.4 Uçucu kül ile stabilizasyon	17
2.2.5 Bitüm ile stabilizasyon	17
2.2.6 Çimento ile stabilizasyon.....	18
2.2.7 Yapay polimerler ile stabilizasyon	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1 Materyal.....	20
3.1.1 Pazaryeri kili	21
3.1.2 Portland çimentosu	23
3.1.3 Tekstil atık poliamid fiber.....	24
3.2 Yöntem	25
3.2.1 Dane çapı dağılımının bulunması.....	25
3.2.2 Kıvam limitleri tayini	27
3.2.3 Özgül ağırlık deneyi	29
3.2.4 Standart proktor deneyi.....	30
3.2.5 Serbest basınç deneyi.....	31
3.2.6 Ultrasonik darbe hızı testi (UPV).....	32

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	34
4.1 Kıvam Limitleri Deney Sonuçları	34
4.2 Özgöl Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	36
4.3 Standart Proktor Deney Sonuçları.....	36
4.4 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	41
4.5 Ultrasonik Darbe Hızı Testi (UPV) Sonuçları	49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ	60



KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway Officials
ASTM	: American Society for Testing Materials
CBR	: The California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
Ç	: Çimento
F	: Fiber
ITS	: Indirect Tensile Test
K	: Kum
SK	: Sade Kil
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TS	: Türk Standartları
UCS	: Unconfined Compressive Strength
USCS	: Unified Soil Classification System
UPV	: Ultrasonik Pulse Velocity (Ultrasonik Darbe Hızı)

SEMBOLLER

Al₂O₃	: Alüminyum oksit
BaO	: Baryum oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
Fe₂O₃	: Demir (III) oksit
G_s	: Zemin danelerinin bağıl yoğunluğu
K₂O	: Potasyum oksit
LL	: Likit limit
MgO	: Magnezyum Oksit
Na₆O₁₈P₆	: Sodyum heksametafosfat
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
q_u	: Serbest basınç dayanımı
R²	: Determinasyon katsayısı
Rb₂O	: Rubidyum oksit
SiO₂	: Silisyum dioksit
SrO	: Selestit
w_{opt}	: Su muhtevası
γ_k	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
μs	: Mikro saniye
°C	: Santigrat derece

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması [41].	19
Çizelge 3.1 : Deneylerin numunelerine ait notasyon bilgileri.	20
Çizelge 3.2 : Kil numunesinin fiziksel özellikleri.	22
Çizelge 3.3 : Pazaryeri kilinin kimyasal içeriği [42].	22
Çizelge 3.4 : Portland çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler [43].	23
Çizelge 3.5 : Deneyde kullanılan Poliamid fiberin teknik özellikleri [44].	24
Çizelge 4.1 : Sade kil numunesine ait Atterberg Limitleri Deney Sonuçları.	34
Çizelge 4.2 : Sade kil-kum numunesine ait Atterberg Limitleri Deney Sonuçları.	35
Çizelge 4.3 : Sade kile ait Özgül ağırlık deney verileri ve (Gs) sonucu.	36
Çizelge 4.4 : Kil-kum numunesine ait Özgül ağırlık deney verileri ve (Gs) sonucu.	36
Çizelge 4.5 : Standart proktor deneyi sonuçları [50].	37
Çizelge 4.6 : Serbest basınç deneyi sonuçları.	42
Çizelge 4.7 : Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) Testi değerleri.	50

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Zemin cinsine göre iyileştirme metotları [22].....	10
Şekil 2.2 : Dinamik Kompaksiyon Uygulaması [24].	11
Şekil 2.3 : Vibro Kompaksiyon Uygulaması [26].....	12
Şekil 2.4 : Jet Enjeksiyonu Uygulaması [31].....	15
Şekil 3.1 : (a) Zeminin çeneli kırıcıda kırılması, (b) Kil zemin 4 No’lu elekten ayrıştırılıp elenmesi, (c) Pazaryeri kilinin elendikten sonraki genel görünümü.	21
Şekil 3.2 : Pazaryeri kilinin dane dağılım eğrisi.	23
Şekil 3.3 : Deneyde kullanılan atık poliamid fiber.....	24
Şekil 3.4 : Yıkamalı elek analizi aşamaları.....	26
Şekil 3.5 : (a) 152H tipi hidrometre, (b) hazırlanan numunenin hidrometre mikseri ile karıştırılması işlemi, (c) hidrometre okumalarına başlamadan hemen önce, (d) hidrometre okumalarının yapılması işlemi	27
Şekil 3.6 : (a)Numunenin hazırlanması, (b) Casagrande cihazındaki numune.....	28
Şekil 3.7 : (a) Numunelerin 3 mm indirme çalışması, (b) çatlaklar oluşan numunelerin kaba alınması	28
Şekil 3.8 : (a) Piknometreye konulan malzemelere saf su ilave edilmesi, (b) damıtılmış su ile üzeri kaplanan numunelerin vakumlanarak hava boşluklarının alınması, (c) piknometrelerin boş kalan hacimlerinin damıtılmış su ile tamamen doldurulması, (d) numunelerin ortam sıcaklığına (20°C) getirilmesi.	29
Şekil 3.9 : Standart Proktor deneyi aşamaları	30
Şekil 3.10 : Serbest basınç deneyi cihazı ve değer okunması.....	31
Şekil 3.11 : Ultrasonik darbe hızı(UPV) deneyi cihazı.	32
Şekil 4.1 : Plastisite kartında zemin sınıfının gösterilmesi [21].	35
Şekil 4.2 : Şekil 4.2:Sade kil ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50].	39
Şekil 4.3 : Sade kile çimento ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50]..	39
Şekil 4.4 : Şekil 4.4:Kil-kum ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50].	40
Şekil 4.5 : Kil-kum zemine çimento ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50].	40
Şekil 4.6 : Sade kil ve kil-kum zeminlere fiber katkısının numunelerin iç yapısındaki köprüleme etkisine ait görüntüleri.	43
Şekil 4.7 : SK0.5F, SK1.0F, SK1.5F, SKÇ, SKÇ0.5F, SKÇ1.0F ve SKÇ1.5F numunelerinin kırım sonrası görüntüleri.	44
Şekil 4.8 : Şekil 4.8:SKK, SKK0.5F, SKKÇ, SKKÇ0.5F, SKK1.0F, SKK1.5F, SKKÇ1.0F ve SKKÇ1.5F numunelerinin kırım sonrası görüntüleri.	44
Şekil 4.9 : Sade kil + fiber katkısının serbest basınç dayanımları.	46

Şekil 4.10 : Sade kil + %10 çimento + fiber katkısının serbest basınç dayanımları. .	46
Şekil 4.11 : Sade kil + kum + fiber katkısının serbest basınç dayanımları.....	47
Şekil 4.12 : Sade kil + kum + %10 çimento + fiber katkısının serbest basınç dayanımları.	47
Şekil 4.13 : Sade kil zemine çimento ve fiber katkısının serbest basınç dayanımına etkisi.	48
Şekil 4.14 : Kil-kum zemine çimento ve fiber katkısının serbest basınç dayanımına etkisi.	48
Şekil 4.15 : Serbest basınç dayanım değerleri ile Ultrasonik darbe hızı arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği.....	52
Şekil 4.16 : Serbest basınç dayanım değerleri ile UPV geçiş süresi arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği.....	52



YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERDE ATIK TEKSTİL FİBER VE ÇİMENTO KATKISININ ZEMİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Dünyanın büyük şehirlerindeki nüfusun hızla artması, yeraltı ve yerüstü yapılaşmanın artmasına neden olarak sınırlı arazi kaynaklarının daha verimli kullanılması gerekliliği ortaya çıkarmıştır. Zemin koşullarının yapı inşası için uygun olmaması durumunda, yapı güvenliğini sağlamak amacıyla zemin iyileştirme uygulamalarına başvurulur. Zemin iyileştirme uygulamalarının hedefi yalnızca zeminin taşıma kapasitesini artırmak, sıvılaşma riskini önlemek ve oturmaları kontrol altına almakla kalmayıp aynı zamanda çevresel etkileri de minimize eden ve maliyeti düşürmeye yönelik sürdürülebilir çözümler sunmalıdır. Zemin iyileştirme alanındaki teknolojik ilerlemeler, geleneksel çimento ve kireç bazlı yöntemlerin ötesine geçerek, son dönemlerdeki endüstriyel gelişmeler ile farklı katkı malzemelerinin de bu alanda kullanımını mümkün kılmaya başlamıştır. Maliyet etkinliği, uygulama kolaylığı ve tekrar edilebilmesi gibi avantajları sayesinde fiber lif takviyeli zeminler, eski yöntemlere göre daha cazip bir alternatif olarak öne çıkmaya başlamıştır.

Bu tez çalışmasında yüksek plastisiteli kil ve kil-kum karışımı zeminlere tekstil atığı poliamid fiber eklenmesinin mühendislik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında Bilecik ili, Pazaryeri bölgesinden elde edilen kil numunesi, yapılan zemin sınıflandırma deneyleri sonucunda Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi'nde (USCS) yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, kil ve kil-kum karışımlarına toplam ağırlığın %10'u oranında çimento ve sırasıyla %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında atık tekstil poliamid fiber katılarak 16 farklı karışım deney numunesi oluşturulmuştur. Belirlenen karışım oranlarına göre hazırlanan karışımlar, eşit şekilde karışması için özen gösterilerek hazırlanmış ve sonrasında standart proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Standart Proktor deneyi ile karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlığına ulaştıkları optimum su içeriği değerleri tespit edildikten sonra, bu değerlere karşılık gelen optimum su içeriğinde numuneler hazırlanmış ve farklı kür sürelerinde (0, 3, 7, 28 ve 90 gün) bekletilmiştir. Kür süresi sonunda numuneler üzerinde serbest basınç ve ultrasonik darbe hızı testi deneyleri yapılarak, karışımların geçen zaman içindeki dayanım ve iç yapı değişimleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde tekstil atığı poliamid fiber lifin, %1.0'a kadar olan oranlarda dayanımı ve mühendislik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Pazaryeri kili, Atık tekstil fiber, Zemin stabilizasyonu, Serbest basınç dayanımı, Ultrasonik darbe hızı (UPV).

EFFECT OF WASTE TEXTILE FIBER AND CEMENT ADDITIVES ON THE ENGINEERING PROPERTIES OF THE SOIL IN HIGH PLASTICITY CLAY SOILS

SUMMARY

The rapid increase in the population in the world's major cities has led to an increase in underground and aboveground construction, necessitating more efficient use of limited land resources. When ground conditions are unsuitable for building construction, ground improvement techniques are employed to ensure the safety of the structure. Ground improvement techniques aim to not only enhance soil bearing capacity, mitigate liquefaction hazards, and manage settlements but also to offer sustainable solutions that minimize environmental effects and reduce costs. Technological advancements in ground improvement have moved beyond traditional cement and lime-based methods, enabling the use of various additives in recent industrial developments.

In this thesis study, the effect of adding textile waste polyamide fiber to high plasticity clay and clay-sand mixture soils on their engineering properties was investigated. In the first stage of the study, the clay sample obtained from the Pazaryeri region of Bilecik province was determined to be in the high plasticity clay (CH) class in the Unified Soil Classification System (USCS) as a result of the soil classification tests. In the study, 16 different mixture test samples were created by adding cement at the rate of 10% of the total weight and waste textile polyamide fiber at the rates of 0.5%, 1.0% and 1.5%, respectively, to clay and clay-sand mixtures. The mixtures prepared according to the determined mixing ratios were prepared with care to ensure equal mixing and were then compressed with standard proctor energy. After the optimum water content values at which the mixtures reached their maximum dry unit volume weight were determined by the Proctor test, samples were prepared at the optimum water content corresponding to these values and kept for different curing periods (0, 3, 7, 28 and 90 days). At the end of the curing period, free pressure and ultrasonic pulse velocity experiments were performed on the samples and the strength and internal structure changes of the mixtures over time were examined. As a result of the studies, it has been shown that textile waste polyamide fiber positively affects the strength and engineering properties at rates up to 1.0%.

Keywords: Pazaryeri clay, Waste textile fiber, Soil stabilization, Unconfined compressive strength, Ultrasonic pulse velocity (UPV).

1. GİRİŞ

Zemin, bir yapının oturduğu ve yükünü taşıdığı doğal bir ortam olduğundan, yapılacak yapının tüm yükünü güvenle taşıyabilecek kadar sağlam ve stabil olmalıdır. Ülkemizdeki zemin koşulları, yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesi için her zaman uygun olmamakta, bu nedenle hem yeni yapılar için hem de mevcut yapıların ömrünü uzatmak amacıyla zemin iyileştirme uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Zemin iyileştirme yöntemleriyle, zeminlerin iç yapısı değiştirilerek daha sağlam ve dayanıklı hale getirilmesi amaçlanır. Bu sayede, zeminlerin taşıma kapasitesi artırılarak binaların yükünü daha iyi taşıyabilmesi sağlanır. Aynı zamanda, zemin iyileştirmeleri sayesinde zeminlerdeki su basıncı azaltılarak sıvılaşma riski ortadan kaldırılır ve oturmalar kontrol altına alınır. Özellikle kil ve silt gibi zeminlerde, iyileştirme yöntemleriyle oturmalar önceden kontrol edilir ve yapının ömrü boyunca oturmaya bağlı sorunlarla karşılaşılması engellenir [1].

Son yıllarda, zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirmek için, farklı oranlarda karıştırılan alternatif malzemelerin kullanımı hem maliyet etkinliği hem de kısa sürede uygulama imkânı sunması nedeniyle günümüzde yaygınlaşan bir uygulamadır. Zemin iyileştirme çalışmalarında, zayıf zeminlerin özelliklerini geliştirmek amacıyla farklı malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında doğal kaynaklardan elde edilenler olduğu gibi, sanayi süreçlerinden elde edilen atık veya yan ürünler de yer almaktadır. Özellikle, endüstriyel atıklar, lifler ve polimerler gibi malzemeler zeminlerin dayanımını artırmak için katkı maddesi olarak tercih edilmektedir. Zemin içerisindeki gerilmeleri üstlenen yüksek mukavemete sahip lifler, zemin-yapı etkileşiminde oluşan gerilme konsantrasyonlarını azaltarak yapıların hasar görmesini önlemeye yardımcı olur. Atıkların geri kazanımı, depolama ve bertaraf işlemlerinden kaynaklanan çevresel yükü azaltarak hem doğal kaynakların korunmasına hem de maliyetin azalmasına katkı sağlar.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, yüksek plastisiteli kil zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla porland çimentosu ve tekstil atığı poliamid fiberin birlikte kullanılmasının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Tüm deneysel çalışmalar, Bursa Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarlarında, ilgili ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak titizlikle gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, Bilecik ili Pazaryeri ilçesinden elde edilen kil zemin ve Flokcan Tekstil San. Tic. Ltd. Şti.'nden temin edilen atık poliamid fiber kullanılmıştır. Kil zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre deneyi ve Atterberg kıvam limit deneyleri yapılmıştır. Çalışmaların devamında kil ve kil-kum zeminlere ağırlığınca %10 oranında Portland çimentosu ve % 0.5, % 1.0, % 1.5 oranlarında tekstil atığı poliamid fiber lif eklenerek toplam 16 farklı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımların standart proktor deneyleriyle optimum su içeriği ve maksimum kuru birim ağırlıkları belirlenmiştir. Belirlenen optimum su muhtevası oranlarında hazırlanan numuneler, 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin sonunda sırasıyla serbest basınç ve ultrasonik darbe hızı deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde yüksek plastisiteli kil zeminlere çimento ve atık poliamid lif katılarak elde edilen karışımların, farklı kür sürelerindeki mukavemet özellikleri incelenmiş ve bu katkı maddelerinin zeminlerin dayanımını ne ölçüde artırdığının belirlenmesi hedeflenmiştir.

1.2 Literatür Özeti

Literatürde, kil zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli katkı maddelerinin kullanıldığı birçok araştırma bulunmaktadır. Son yıllarda, zeminlerin mühendislik performansını artırmak amacıyla lif ve bağlayıcı maddeler (uçucu kül, çimento gibi) kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu araştırmalarda, özellikle lif katkısının zemin-lif karışımları üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde incelenmiş ve zemin güçlendirmede sağladığı faydalar değerlendirilmiştir. Lifin ana katkı maddesi olarak kullanıldığı zemin iyileştirme çalışmaları, literatürde geniş yer bulmuş olup, bu çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Öztürk (2007) yaptığı çalışmada, kaolinit kiline farklı oranlarda polipropilen lif eklenerek zeminin kayma mukavemeti üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. Çalışma kapsamında kesme kutusu, serbest basınç, CBR ve doğrusal büzülme testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, polipropilen lif katkısının zeminin kayma açısı, kohezyon, serbest basınç dayanımı ve CBR değerlerinde artışa neden olduğunu; buna karşın büzülme oranını azalttığını ortaya koymuştur. Bu veriler, polipropilen lifin zemin stabilizasyonunda etkili ve ekonomik bir seçenek olduğunu göstermektedir [2].

Yılmaz ve Sevensan (2010), Ankara kiline farklı oranlarda Çayırhan termik santrali uçucu külü ve çeşitli polipropilen lifler eklenerek bu karışımların tek eksenli basınç dayanımlarındaki değişimi incelemiştir. Öncelikle, Çayırhan uçucu külü ve Ankara kilinin sınıflama deneyleri yapılmış, ardından kilin kompaksiyon özellikleri, kil ve üç farklı uçucu kül içeriği (%10, %20, %30) kullanılarak belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, katkısız ve uçucu kül katkılı kil karışımları, %0.5 ve %1.0 oranlarında polipropilen lif eklenerek hazırlanmış ve 19 mm uzunluğunda iki tip lif (M tipi ve F tipi) kullanılmıştır. Uçucu külün pozolanik etkisini değerlendirmek için lifsiz karışımlar 1, 7, 14 ve 28 gün, lifli karışımlar ise 28 gün süreyle kürlenmiş ve ardından tek eksenli basınç dayanımları ölçülmüştür. Sonuçlar, %1.0 lif katkısının %0.5 lif katkısına göre daha yüksek bir dayanım artışı sağladığını, ancak liflerin etkisinin tutarlı bir eğilim göstermediğini ortaya koymuştur [3].

Çetin (2011) tarafından yapılan çalışmada, İstanbul Eyüp Akpınar bölgesinden alınan yumuşak kilin taşıma kapasitesini artırmak amacıyla, C tipi uçucu kül, eskitilmiş kopolimer ve polipropilen lifler kullanılarak deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Granülometri analizi ve Atterberg limit testleri ile zeminin yüksek plastisiteli kil olduğu belirlenmiş, numuneler için optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Numuneler, 7 günlük kür süresinin ardından serbest basınç testine tabi tutulmuş ve mukavemet değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar, farklı bileşimlerin, yüksek plastisiteli kilin mukavemetini farklı oranlarda artırdığını göstermiştir [4].

Chegenizadeh ve Nikraz (2011), doğal liflerin kil zeminlerin mukavemet davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmada, Batı Avustralya'dan temin edilen kil zemin örnekleri kullanılmış ve doğal lifler rastgele karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Lifler, farklı uzunluklarda ve %1, %2, %4 oranlarında zemine eklenmiştir. Doğal lif katkısının zeminin mukavemetine etkisini değerlendirmek amacıyla serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, lif oranı arttıkça kil-lif numunelerinin mukavemetinin de belirgin şekilde yükseldiğini göstermiştir. Testler sırasında lif katkısının zeminin süneklik davranışını artırdığı gözlemlenmiştir [5].

Çetinkaya (2012) çalışmasında, yüksek plastisiteli bağlama kilinin mühendislik özelliklerinin, uçucu kül ve polipropilen lif katkılarıyla iyileştirilmesini incelemiştir. Bu amaçla, farklı oranlarda kil, uçucu kül ve polipropilen lif içeren karışımlar hazırlanarak standart Proktor, serbest basınç ve CBR testleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, uçucu kül ve polipropilen lif katkısının zeminlerin CBR ve serbest basınç dayanımlarında önemli artışlar sağladığını göstermiştir. En uygun karışımın, eşit oranlarda kil ve uçucu kül ile %1.0 polipropilen lif içeren bileşim olduğu belirlenmiştir [6].

Sen ve Kashyap (2012) çalışmalarında, toprak stabilizasyonunu sağlamak amacıyla atık malzemelerden elde edilen polipropilen fiberlerin iki farklı zemin türüne eklenerek karşılaştırmalı bir analiz yapmıştır. Silt ve kil zeminlere farklı oranlarda fiber ilave edilerek numuneler hazırlanmış ve bu numuneler serbest basınç ve kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre polipropilen fiber katkısının her iki zemin türünde de olumlu sonuçlar verdiği ve zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılabileceğini sonucuna varılabilir [7].

Olgun (2013) çalışmasında, polipropilen lif katkılarının, çimento ve uçucu kül ile stabilize edilen killi zeminlerin geoteknik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Stabilizasyon amacıyla zemin %8 ve %30 oranında çimento ve uçucu kül eklenmiş, farklı lif oranları (%0.25, %0.50, %0.75, %1.0) ve lif uzunlukları (6 mm, 12 mm, 20 mm) kullanılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Stabilize edilen zeminlerin basınçları ve kayma dayanımları, 7 ve 28 günlük kür süresi sonrasında test edilmiştir. Zeminlerin hacim değişimi, büzülme sınırı ve çatlakların azalması değerleri üzerinden

analiz edilmiştir. Polipropilen lif ile stabilize edilmiş zeminler arasındaki mikroyapısal etkileşimler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenmiştir. Araştırmaya göre, lif içeriği ve lif uzunluğu boyunca büzülme sınırı ve çatlak azaltma değerleri artarken, hacim kaybının azalması; en yüksek dayanım değerlerinin ise %0.5-0.75 lif içeriği ve 12 mm lif uzunluğunda elde edildiği belirlenmiştir [8].

Peter ve diğ. (2016) bu çalışmada, Hindistan cevizi özü (%0-3) ve Hindistan cevizi lifi (%0-1) kullanılarak stabilize edilen yumuşak zeminlerin mühendislik özelliklerini araştırmayı hedeflemiştir. Bu amaçla, Cochin deniz kiline belirlenen oranlarda Hindistan cevizi özü ve lifi eklenerek çeşitli numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Standart Proctor, Statik Üç Eksenli Basınç ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testleri uygulanmıştır. Deney sonuçları, Hindistan cevizi özü ve lif katkısının zemin stabilizasyonunda bazı mühendislik parametrelerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu katkı maddelerinin zemin iyileştirmedeki tam potansiyelini ortaya koymak için daha kapsamlı ve çeşitli deneysel araştırmalara ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır [9].

Sharma ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, killi zeminin stabilizasyonunu sağlamak amacıyla çimento ve lif katkılarını kullanmıştır. Zemin özelliklerinin değerlendirilmesi için özgül ağırlık, kompaksiyon ve CBR (Kaliforniya Taşıma Gücü) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, çimento ve polyester lif katkısının optimum nem içeriğini artırırken, maksimum kuru yoğunluğu azalttığını göstermiştir. Buna ek olarak, CBR değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, çimento ve lif katkılarının zemin dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur [10].

Ardabili ve Erken (2017) çalışmada, fiber katkısının iki farklı kum zemin numunesi ve Portland çimentosu ile zeminlerin gerilme ve şekil değiştirme davranışına etkisini incelemiştir. Fiber ile takviye edilen çimentolu zeminlerde serbest basınç, üç eksenli basınç, eğilmede çekme ve quasi statik testler yapılmıştır. Sonuçlar, fiber katkısının çimentolu zeminlerde hem pik hem de kalıcı dayanımı artırdığını, ancak suyun pik dayanımını azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca fiberin, zeminlerde pik sonrası mukavemet kaybını azalttığı ve numunelerin aşırı kırılmalık göstermesini engellediği görülmüştür. Liflerin çatlakları köprüleme görevi yaparak numunelerin tamamen dağılmasını engellemiştir [11].

Aysu (2020), yüksek plastisiteli kil zeminlere cam lifi katkısının mukavemet, geçirgenlik ve konsolidasyon özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmada, 12 mm uzunluğundaki cam lifler, kil zemin ile %0.25, %0.50, %0.75, %1.0, %1.25 ve %1.50 oranlarında rastgele karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Katkılı ve katkısız kil numunelerine taşıma gücü, konsolidasyon ve permeabilite testleri uygulanarak, cam lifi katkısının kil zeminin taşıma kapasitesi, oturma davranışı ve geçirgenlik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda, zemin numunesinin mukavemet ve kayma dayanımının %0.75 cam lifi katkısı ile en yüksek değere ulaştığı belirlenmiştir. Permeabilite testlerinde, lif oranı %0.75'e kadar artırıldığında zemin geçirimsiz hale gelmiş, bu oranın üzerine çıkıldığında ise geçirimsizlikte bir artış gözlenmiştir. Konsolidasyon testlerinde ise, lif oranının artmasıyla sıkışma indisi yükselme eğilimi gösterirken, %0.5'in üzerindeki lif oranları kabarma indisinde artışa neden olmuştur [12].

Taha ve diğ. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, katkı maddesi olarak kullanılan polipropilen fiberlerin kil zeminlerin mekanik davranışları üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çin'in İç Moğolistan ve Hebei Eyaletlerinden temin edilen zemin örneklerine farklı oranlarda polipropilen lifler eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler, Standart Proktor deneyi, üç eksenli basınç testi, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), konsolidasyon testi ve mikroyapı analizi (SEM) gibi çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Araştırma bulguları, polipropilen fiber katkısının kil zeminlerde boşluk oranını, konsolidasyon katsayısını ve hidrolik iletkenliği azaltırken, CBR değerini artırdığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, polipropilen fiberlerin, kil zeminlerin sıkıştırılabilirliğini, kesme mukavemetini, konsolidasyon özelliklerini ve taşıma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiği saptanmıştır [13].

Yarbaşı ve Kalkan (2020) yaptıkları çalışmada, killi zeminlerin direnç özelliklerini artırmak amacıyla atık plastik PET fiber kullanılarak zemin stabilizasyonu üzerine bir araştırma yapmıştır. Araştırma kapsamında, tek eksenli basınç deneyleri uygulanmış ve ardından numunelere donma-çözülme testleri uygulanarak zemin performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, atık plastik şişe lifleri ile güçlendirilmiş killi zeminlerin, takviyesiz kumlu zeminlere oranla belirgin şekilde daha yüksek mukavemet sağladığını göstermiştir. Ayrıca, bu atık plastik PET liflerinin kullanımı, çevresel sürdürülebilirliğe ve maliyete katkıda bulunacağı düşünülmektedir [14].

Terzi (2021) çalışmasında, kil zeminlere eklenen bazalt fiber katkısının kayma direnci parametrelerine etkisini araştırmıştır. Deneysel çalışmalarda, farklı uzunluklarda (6 mm, 12 mm ve 24 mm) bazalt fiberler kullanılmış ve bu fiberler %0, %1, %1.5, %2 ve %2.5 oranlarında kil zemine ilave edilmiştir. Zemin özelliklerini değerlendirmek amacıyla sınıflandırma testleri, konsolidasyon ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, bazalt fiber oranı ve uzunluğunun artmasıyla kayma direncinde doğrusal bir artış gözlemlenmemiştir. Kohezyon açısından en büyük artış, %1.5 oranında ve 12 mm uzunluğunda bazalt fiber içeren numunede elde edilmiştir; ancak genel olarak bazalt fiberin kohezyon üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir [15].

Correia ve Rocha (2021) bu araştırmada, Brezilya'nın Santa şehrinden alınan lateritik toprak örneklerini incelemiştir. Killi ve yüksek plastisiteli toprak, farklı oranlarda (%0.1 ve %0.25) geri dönüştürülmüş polipropilen liflerle karıştırılmıştır. Lifler, 18 mikrometre çapında ve 12 mm uzunluğunda olup, toprağın kuru içeriğine eklenmiştir. Toprak örneklerine serbest basınç dayanımı (UCS), doğrudan kesme ve dolaylı çekme dayanımı (ITS) testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, UCS testlerinde lif katkısının toprağın dayanımını artırdığını ve zeminin gevrek kırılmadan sünek kırılmaya geçtiğini göstermiştir. Özellikle %0.25 lif içeriği ve %95 sıkıştırma derecesi en yüksek dayanım performansını sergilemiştir. Doğrudan kesme ve dolaylı çekme dayanımı testlerinde, lif içeriğinin %0.1'den %0.25'e çıkarılması, killi toprağın mekanik dayanımı üzerinde önemli bir etki yaratmıştır. Çekme mukavemeti açısından, lif oranındaki artışın toprak dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, fiberlerin arayüzdeki yönelimi ve "köprüleme" etkisi dolaylı çekme mukavemet testlerinde gözlemlenmiştir [16].

Kekeç (2022), alkaliye dayanıklı cam fiber katkısının kil zeminlerin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, Sakarya ili Sapanca ilçesinden elde edilen kil zemin ve bir firmadan temin edilen alkali direnci yüksek cam fiberler kullanılmıştır. Zemin sınıflandırma işleminin ardından, kil zemin içerisine 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 40 mm uzunluklarında cam fiberler farklı oranlarda eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan serbest basınç testleri, fiber katkısı bulunan tüm numunelerde zemin dayanımının arttığını göstermiştir. Bu sonuçlar, alkaliye dayanıklı cam fiberlerin zemin stabilizasyonunda etkili bir katkı malzemesi olduğunu ortaya koymuştur [17].

Shagiwal (2023) yaptığı çalışmada, Bartın kentindeki düşük taşıma kapasitesine sahip yumuşak killi zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirerek güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Zemin iyileştirme çalışmalarında Portland çimentosu, doğal zeolit ve polipropilen lif olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır. Zemine %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında Portland çimentosu eklenmiş; çimento ağırlığının %0, %20, %40, %60 ve %80'i zeolit ile değiştirilmiştir. Ayrıca, karışımlara %0, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Numuneler 3, 7 ve 28 günlük kürlenme periyotlarının sonunda numunelerde serbest basınç ve dolaylı çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, çimento ilavesinin zemin dayanımını artırdığını, ancak lif oranının artmasıyla homojen dağılımın zorlaştığını ve dayanımın azaldığını göstermiştir. %20 doğal zeolit ve %0.25 polipropilen lif içeren karışımlar, en yüksek mukavemeti ve en düşük deformasyonu sağlamıştır. SEM analizleri, mikro yapıdaki değişimlerin mekanik performansla ilişkili olduğunu doğrulamıştır [18].

Soğancı ve Orman (2024) yaptıkları çalışmalarda, Nevşehir'in Ürgüp ilçesinden alınan killi zeminin, atık polipropilen elyaf katkısıyla stabilize edilmesini incelemiştir. Zeminin geoteknik özelliklerini, optimum su içeriğini ve ilave edilebilecek polipropilen elyaf miktarını belirlemek amacıyla hidrometre, özgül ağırlık, Atterberg limitleri ve Standart Proktor deneyleri uygulanmıştır. Düşük ve yüksek plastisiteli killi zeminlere farklı oranlarda eklenen atık polipropilen elyaf, çeşitli kür sürelerinde mukavemet değerlerinde artışa neden olmuştur. Deney sonuçları, polipropilen elyaf katkısının kil zeminlerin stabilizasyonunda etkili bir yöntem olabileceğini göstermiştir [19].

Yapılan literatür araştırması sonucunda fiber ve çimento katkısının zemin özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğu anlaşılmıştır. Ancak atık tekstil poliamid fiber ve çimentonun birlikte kullanıldığı bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu çalışma, tekstil atıklarından elde edilen poliamid fiberin, yüksek plastisiteli kil ve kil-kum karışımı zeminlerin mühendislik davranışları üzerindeki etkilerini inceleyerek literatüre katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Mühendislik yapılarının inşasında, zemin bir taşıyıcı olarak ele alındığında, üzerine yapılacak yapının güvenliği ve sağlamlığı açısından belirli özelliklere sahip olması gerekir. Ancak, bu koşullar her zaman sağlanamayabilir. İnşa edilecek olan yapıların uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde hizmet verebilmesinde, zeminin bulunduğu çevre büyük bir öneme sahiptir. Zemin özelliklerinin gerekli mühendislik gereksinimlerini karşılamadığı durumlarda, yapıların temel güvenliğini ve yapısal dengesini sağlamak amacıyla zemin güçlendirme çalışmaları yapılır. Zemin güçlendirme çalışmaları, sorunlu zeminlerde uygulanmaktadır. Özellikle deprem bölgeleri ve sıvılaşma riski olan yerlerde, zemin güçlendirme, yapıların sağlamlığını artırarak olası zararları en aza indirmeyi amaçlar.

Zemin iyileştirme işlemlerinin amacı, zemindeki boşlukları en aza indirmek, bu boşlukları çeşitli katkı maddeleriyle doldurmak ve zeminin özelliklerini güçlendirmektir. Zeminin yeterli taşıma kapasitesine ve dayanımına sahip olmaması; aşırı oturmalar, yanal ve/veya dikey yüklerin etkisiyle taşıma kapasitesinde azalmalar, temel kazılarında karşılaşılan sorunlar, şev stabilitesinin bozulması, sıvılaşma ve borulanma gibi problemler, zemin iyileştirme ihtiyacının başlıca nedenlerindendir. [20].

Zemin iyileştirme ile taşıma kapasitesi yetersiz olan zeminlerin taşıma gücünü artırmak, toplam oturma miktarını istenilen seviyeye düşürmek, su geçirgenliğini azaltmak, konsolidasyon oranını yükseltmek, zemin sıvılaşma riskini en aza indirmek, istinat duvarlarını desteklemek ve dolgu ile şevlerin değişkenliğini azaltmak amaçlanmaktadır. Bu iyileştirme yöntemleri uygulandıktan sonra zeminde kayma dayanımında artış, killi zeminlerin kıvamında iyileşme, kumlu zeminlerin sıkılık oranında artış, sıkışabilirlikte azalma, şişme ve büzülme potansiyelinde azalma, geçirgenlik oranında düşüş ve borulanmaya karşı dirençte artış gözlemlenebilir [21].

Bilim insanları, farklı zemin türleri ve zemin koşullarına uygun birçok zemin iyileştirme yöntemi geliştirmiş olup, bu yöntemler zemin özelliklerine, iyileştirme amacına, uygulanabilir derinliğe, kullanılan araç ve malzemelere, ayrıca yöntemlerin performansına göre değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 2.1’de, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için zemin tipine göre uygun iyileştirme yöntemleri sunulmuştur.

Zemin Cinsi	Stabilizasyon Metotları	Zeminin Cinsi	Stabilizasyon Metotları
Çeşitli Dolgular		Gevşek Kumlar	
Sığ	Kazı/Geri Dolgu	Sığ	Çimento Stabilizasyon
Derin	Dinamik Kompaksiyon		Bitüm Stabilizasyon
	Kum Kolonları		Dinamik Kompaksiyon
Organik Zeminler		Derin	Vibraflatasyon
Sığ	Kazı/Geri Dolgu		Vibrakompaksiyon
	Geotekstilller		Taş Kolonları
Derin	Sürşarj		Enjeksiyon
	Geotekstilller		Drenaj Kuyuları
	Kum Kolonları		Dondurma
Tabakalı	Sürşarj	Sıvılaşabilen Zeminler	
	Patlatma	Sığ, Derin, Tabakalı	Dinamik Kompaksiyon
	Dinamik Kompaksiyon		Taş Kolonları
	Kompaksiyon Enjeksiyonu		Drenaj
	Taş Kolonları		Enjeksiyon
Killer		Şişebilen Zeminler	
Sığ, Derin, Tabakalı	Mekanik Stabilizasyon	Sığ, Derin, Tabakalı	Kireç Stabilizasyon
	Kireç Stabilizasyon		Drenaj
	Dondurma		Enjeksiyon
	Drenaj		Çimento Stabilizasyon
	Geosentetik		Uçucu Kül
	Kireç-Çimento Kolonları		Tuz Katkısı
Gevşek Siltler			Kimyasal Katkılar
Sığ	Kazı/Geri Dolgu	Çatlaklı Kayalar	
	Tuz Katkısı	Sığ, Derin, Tabakalı	Enjeksiyon
	Dinamik Kompaksiyon		Ankraj
Derin	Sürşarj		Şatkrit
	Taş Kolonları		Yüzeyaltı Yatay Drenajı
	Elektro-Osmos		

Şekil 2.1 : Zemin cinsine göre iyileştirme metotları [22].

2.1 Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri

2.1.1 Dinamik kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon, suya doygun olmayan zeminlerin veya karışık malzemelerle doldurulmuş toprakların derinliklerindeki mühendislik özelliklerini güçlendirmek ve yapılar üzerindeki oturmaları azaltmak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, 10-40 ton ağırlığındaki büyük kütleler, 10-45 metre yükseklikten zemin üzerine bırakılarak zemin içinde yayılan güçlü titreşimler oluşturur. Bu titreşimler sonucu zemin tanecikleri birbirine yaklaşarak boşluklar azalır ve zemin sıkılaşır. Özellikle gevşek, iri taneli zeminler bu yöntemle kolayca iyileştirilebilir ve %70'e varan sıkılık değerlerine ulaşılır. Hem uygulaması kolay hem de maliyeti düşük olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir zemin iyileştirme yöntemidir.

İnşaat sektöründe, arazinin yüksekliğinin değiştirilmesi, havaalanı ve yol yapımında zemin oluşturulması gibi birçok farklı amaç için toprak dolgu yöntemine sıklıkla başvurulur. Bu teknik, özellikle arazinin yükseltilmesi gereken durumlarda, havaalanı ve yol yapımında, zemin koşullarının iyileştirilmesi gerektiğinde ve su yapılarının inşasında tercih edilir. Mevcut zeminin yerine daha uygun özelliklere sahip bir zemin tabakası oluşturularak, yapının güvenliği ve ömrü artırılabilir [23].

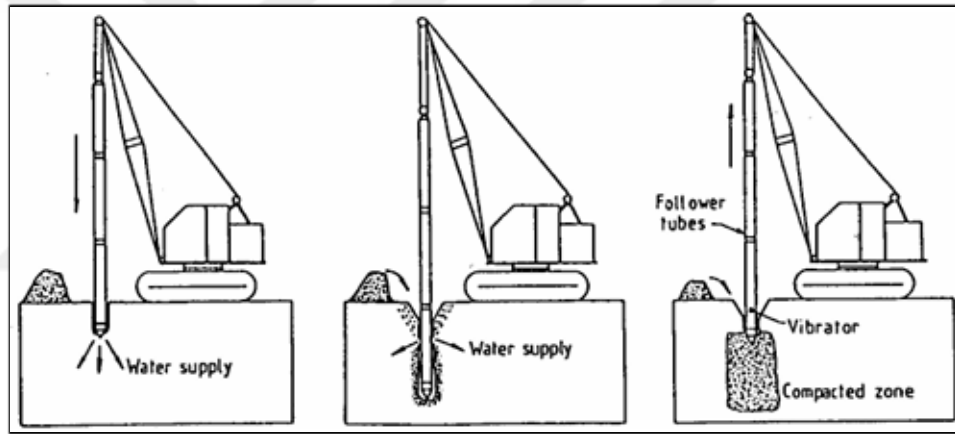


Şekil 2.1 : Dinamik Kompaksiyon Uygulaması [24].

2.1.2 Vibro kompaksiyon

Derin ve granüler zeminlerin güçlendirilmesinde kullanılan vibro kompaksiyon, yüksek enerjili titreşimler uygulayarak zeminin sıkıştırılması işlemidir. Yaklaşık 20 metre derinliğe kadar uygulanabilen bu yöntem, kullanılmayan alanların yeniden kullanıma açılmasında etkili bir çözüm sunar. Özellikle tersane, liman ve marina gibi yapıların inşasında sıkça tercih edilir.

Bu teknikte, titreşimli bir sondaj aleti kullanılarak zemine bir delik açılır ve yüksek basınçlı su ile zemin gevşetilir. Ardından, aynı delikten dolgu malzemesi basılarak zeminin içine yerleştirilir (Şekil 2.3). Bu işlem sırasında oluşan titreşimler sayesinde, sondanın çevresindeki toprak sıkıştırılır ve yaklaşık 2.5-3 metre çapında bir alan güçlendirilir. Bu yöntemle, 10-15 metre derinliğe kadar olan zemin tabakalarının taşıma kapasitesi artırılabilir [25].



Şekil 2.2 : Vibro Kompaksiyon Uygulaması [26].

2.1.3 Taş kolonlar

Taş kolonlar, zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olup, çakıllardan oluşturulan ve zemin içine yerleştirilen yapay sütunlardır. Bu yöntem sayesinde, yapıların oturma süresi kısalmış ve deprem gibi doğal afetlerde zeminlerin sıvılaşma riski azaltılır. Taş kolonlar, projenin büyüklüğüne ve zemin özelliklerine göre farklı derinliklerde ve boyutlarda uygulanabilir.

Taş kolonlar, yüksek su geçirgenlikleri sayesinde zemin içinde drenaj görevi görerek suyun daha hızlı tahliyesini sağlar. Ayrıca, taş kolonların oluşturulması sırasında çevrelerindeki zemin de sıkışarak güçlenir. Bu iki özelliği sayesinde taş kolonlar, özellikle deprem riskine karşı zeminlerin güçlendirilmesinde etkili bir yöntem olarak

dünya genelinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Taş kolonlar, suyun zeminden kolayca geçmesine izin veren yapısı sayesinde hem zemini güçlendirir hem de su tahliyesini hızlandırır. Kolonların oluşturulması sırasında çevrelerindeki zemin de sıkışarak iyileşir. Bu sayede, özellikle depremde sıvılaşma riski bulunan zeminlerin daha güvenli hale getirilmesi sağlanır. Bu nedenle, taş kolonlar dünya genelinde deprem bölgelerindeki yapıların güvenliği için sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Zemin iyileştirme çalışmalarında taş kolonlar, doğal yamaçların ve dolguların stabilitesini artırmak, yapıların temellerinin daha sağlam bir zemin üzerine oturtulmasını sağlamak, zemin oturmalarını azaltmak, kil zeminlerin sıkışma sürecini hızlandırmak ve kumlu zeminlerin sıvılaşma riskini önlemek amacıyla yaygın olarak kullanılır [27].

2.1.4 Patlatma

Patlatma yöntemi, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan, zemin içerisine yerleştirilen patlayıcı maddeler sayesinde güçlü titreşimler oluşturarak zemini sıkıştıran riskli bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle kohezyonsuz gevşek zeminlerin derinliklerinde sıkıştırma sağlamak hem de granüler zeminlerin sıkışmasını hızlandırmak amacıyla kullanılır. Patlama sonucu zemin hacminde yaklaşık %6 oranında azalma ve göreceli sıkılık değerinde ise %35 ila %85 arasında artış elde edilebilir. Ancak, bu yöntemin başarı oranı zeminin özelliklerine, patlatma işleminin doğru yapılıp yapılmamasına ve zemin malzemesindeki ince taneciklerin oranına bağlıdır. Bu nedenle, patlatma yöntemi uygulanmadan önce detaylı zemin araştırmaları yapılması ve uzman görüşü alınması gerekmektedir [28].

2.1.5 Kompaksiyon kazıkları

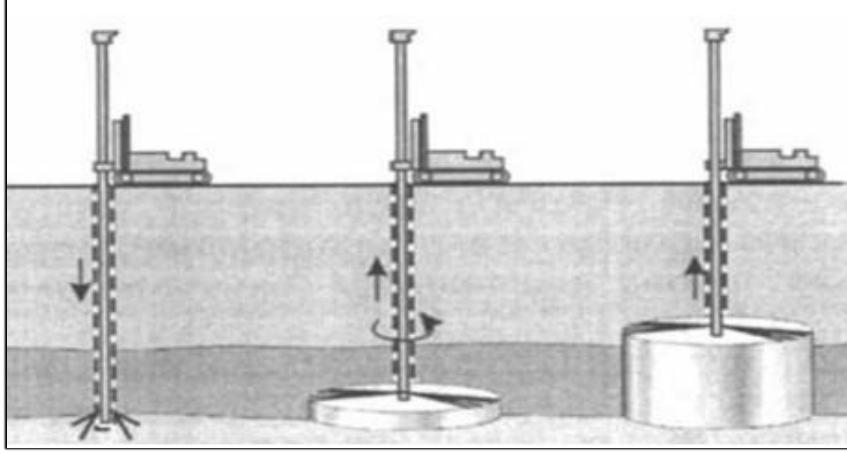
Gevşek kum tabakalarının sıkıştırılması amacıyla kullanılan kompaksiyon kazıkları, zemine çakılan özel bir tür yer değiştirme kazığıdır. Bu yöntem, özellikle kumun sıvılaşma riskini azaltarak, çökeltiler ve silt gibi zeminlerin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırır. Uygulamada, zemine çakılan içi boş bir boru içerisine iri taneli dolgu malzemesi doldurulur. Bu sırada boru yukarı çekilerek dolgu malzemesi sıkıştırılır ve zemin içerisinde bir kolon oluşturulur. Franki kazığı, bu yöntemin en etkili uygulamalarından biri olup, çok yüksek basınç ve çekme kuvvetlerini güvenle taşıyabilir.

Hem kazık çakma işlemi sırasında hem de dinamik etki sayesinde zemin sıkıştırılır. Bu etki, kum zeminlerin tamamen suya doymuş veya kuru olduğu durumlarda en yüksek seviyeye ulaşır. Kazıklar arasındaki mesafe genellikle 1-1.5 metre arasında değişir. Kompaksiyon kazıkları, vibroflot ve terraprobe sondalarına göre daha ekonomik ve pratik bir çözüm sunar, özellikle suya doymuş zeminlerde etkili sonuçlar verir [29].

2.1.6 Jet grouting

Jet grout yöntemi, inşaatlarda zeminlerin dayanımını artırmak ve yapı yüklerini daha derinlere taşımak için kullanılan etkili bir tekniktir. Farklı zemin türlerinde uygulanabilmesi sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yöntemde, yüksek basınçla zemin içine püskürtülen su-çimento karışımı gibi bir madde, mevcut zeminle karışarak daha dayanıklı bir yapı oluşturur. Böylece zemin, dış etkilere karşı daha dirençli hale gelir. Diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden ayrılan en önemli özelliği ise, jet grout uygulamasında kullanılacak malzeme miktarı ve elde edilecek zemin özellikleri, uygulama öncesinde oldukça kesin bir şekilde tahmin edilebilir. Bu sayede hem maliyet hem de proje süreci daha iyi planlanabilir [30].

Jet grout yöntemi, belirlenen derinliğe kadar sondaj yapılan zemine, yüksek basınç altında çimento harcı gibi bir enjeksiyon malzemesinin püskürtülmesiyle uygulanır. Sondaj sırasında boru aynı zamanda döndürülerek yukarı çekilir ve böylece zeminde belirli boyutlarda sütunlar (kolonlar) oluşturulur (Şekil 2.4). Bu sütunların çapını büyütmek için çimento harcına ek olarak hava veya su da kullanılabilir. Bu yöntem, zemin içerisindeki malzemeyi karıştırarak sağlam bir kolon oluşturmaya açısından diğer enjeksiyon yöntemlerinden ayrılır. Jet grout yöntemi ile zemin parametreleri iyileştirilerek taşıma kapasitesi artırılır, oturmalar önlenir, sıvılaşma riski minimize edilir ve kesişen jet enjeksiyonları sayesinde su geçirgenliği azaltılarak hidrolik bariyer oluşturulur. Bu yöntemle oluşturulan geniş çaplı kolonlar, zemin stabilitesini önemli ölçüde artırır.



Şekil 2.3 : Jet Enjeksiyonu Uygulaması [31].

2.1.7 Derin karıştırma yöntemi

İnce taneli zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için derin karıştırma yöntemi sıklıkla tercih edilir. Bu yöntemde, zemin içerisine kireç veya çimento karıştırılarak sağlam sütunlar oluşturulur. Zamanla sertleşen bu sütunlar, zeminin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırır. Bu teknik, özellikle İsveç ve Japonya'da yaygın olarak tercih edilir. Kireç, farklı formlarda (toz, bulamaç) kullanılabilir ancak karışımın homojen olması çok önemlidir. Aksi takdirde, kireç su tutarak kolonlarda deformasyonlara neden olabilir [32].

2.2 Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerinde, toprak tabakaları sıkıştırılarak güçlendirilir ve bu tabakaların içerisindeki fazla su, drenaj sistemleri aracılığıyla uzaklaştırılır. Böylece zemin, daha stabil hale getirilir [33].

Zeminlerin taşıma kapasitesinin yetersiz olması ve derin zemin iyileştirme yöntemlerinin yüksek maliyetli olması nedeniyle, toprağın yüzeyine yakın kısımlarını güçlendirmeye yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin bazıları zeminlerin fiziksel özelliklerini değiştirmek amacıyla katkı maddeleri kullanılarak uygulanırken, bazıları ise zemin yapısını bozmadan sadece mekanik işlemlerle gerçekleştirilir. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri, genellikle düşük veya orta seviyedeki yapı yüklerine maruz kalan yapılar veya demiryolu, karayolu gibi altyapı projelerinde tercih edilir.

2.2.1 Kompaksiyon

Kompaksiyon, toprak kütlesinin yoğunluğunu artırmak amacıyla yapılan bir işlemdir. Bu işlemde, toprak tanecikleri birbirine yaklaştırılarak aralarındaki hava boşlukları azaltılır. Bu sayede zemin daha stabil hale gelir. Kompaksiyon işlemi, genellikle inşaat sahalarında kullanılan özel makinelerle gerçekleştirilir [34].

Toprak dolgu, inşaat projelerinde sıkça kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem, inşaat alanının istenen seviyeye getirilmesi, havalimanları ve karayolları gibi büyük yapıların alt yapısının hazırlanması ve zemin koşullarının iyileştirilmesi gibi çeşitli amaçlarla kullanılır. Özellikle doğal zeminin taşıma kapasitesinin yetersiz olduğu durumlarda, toprak dolgu ile daha uygun bir zemin oluşturulur.

Dolgu işlerinde kullanılan topraklar, doğal ortamlarından alınıp inşaat alanına taşınır. Bu ham toprakların doğrudan kullanılması, dolgu zemininin boşluk oranının yüksek olmasına, suyun kolayca geçmesine ve sıkışmaya yatkın olmasına yol açar. Bunun yanı sıra, bu toprakların farklı bölgelerindeki mühendislik özellikleri farklılık gösterir, bu da dolgunun istenilen özelliklere sahip olmamasına neden olur [23].

2.2.2 Drenaj

Bir zeminin taşıma kapasitesi ve dayanımı, içindeki su miktarına göre değişir. Su miktarının artması, özellikle killi zeminlerde, zeminin zayıflamasına ve taşıma gücünün azalmasına yol açar. Bu nedenle, yapılar için uygun bir zemin elde etmek için zemindeki su miktarını azaltmak gerekir. Drenaj sistemleri, topraktan suyu uzaklaştırarak bu sorunu çözer. Böylece toprak daha sağlam hale gelir. Ancak, drenaj sisteminin etkili olması için topraktaki su seviyesinin her yerde aynı olması gerekir. Aksi takdirde, toprakta su birikintileri oluşur ve bu da toprağın yapısını bozarak yapıların güvenliğini tehlikeye atabilir [35].

2.2.3 Kireç ile stabilizasyon

Kireç, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan en eski malzemelerden biridir. Özellikle kil bakımından zengin zeminlerde ve yol yapımında kireç kullanımı yaygındır. Kireç, kil ile reaksiyona girerek zemin içerisinde boşlukları dolduran bir yapışkan madde oluşturur. Bu sayede zemin daha sağlam hale gelir ve şişme gibi sorunlar önlenir.

Kireç, şişme ve yapışkanlık özelliği yüksek olan zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan ekonomik bir bağlayıcıdır. Kireç, kil ile etkileşime girerek zemin yapısını güçlendirir ve bu sayede zemin daha dayanıklı hale gelir [36].

Kireçle zemin iyileştirme yöntemi pratik ve uygulanabilir bir çözümdür. Yapılan laboratuvar testleriyle, zemine en uygun kireç miktarı ve iyileştirme derinliği belirlenir. Daha sonra, iş makineleri kullanılarak kireç zemin üzerine yayılır ve sıkıştırılır.

2.2.4 Uçucu kül ile stabilizasyon

Uçucu kül, kömürle çalışan elektrik santrallerinde yakıt olarak kullanılan kömürün yanması sonucu oluşan ve baca gazlarından ayrıştırılan ince bir tozdur. Bacalarda bulunan filtreler sayesinde toplanan bu ince toz, çimento sanayisinde başta olmak üzere çeşitli sektörlerde değerlendirilir [37].

Uçucu kül, inşaat sektöründen çevre mühendisliğine kadar geniş bir alanda stabilizasyon amacıyla kullanılan çok yönlü bir malzemedir. Beton, yol alt yapısı, zemin iyileştirme ve atık yönetimi gibi alanlarda kullanılan uçucu kül, hem maliyet açısından avantajlı hem de çevresel etkileri azaltması nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm olarak kabul edilmektedir.

Uçucu kül ile stabilizasyon, yapı malzemelerinin mekanik özelliklerini güçlendirerek ömürlerini uzatırken, aynı zamanda atıkların değerlendirilmesi yoluyla çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir uygulamadır. Bu yöntem, inşaat ve sanayi sektörlerinde yaygın olarak benimsenmiştir.

2.2.5 Bitüm ile stabilizasyon

Zeminlerin dayanımını artırmak ve suyun zararlı etkilerine karşı korumak için kullanılan bitümlü stabilizasyon yöntemi, petrol rafinerilerinden elde edilen bitümün zeminle karıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu sayede zemin, daha dayanıklı hale gelir ve suyun olumsuz etkilerine karşı korunur. Bitüm, zemindeki tanecikler arasındaki bağları güçlendirerek zemin erozyonunu önler.

Yol yapımında kullanılan bitümlü malzemeler, iri taneli malzemelerle etkileşime girerek yolun dayanımını artırırken, ince taneli zeminlerde su geçirmezlik özelliği kazandırır. Çimento ve reçineye göre daha ekonomik olması nedeniyle sıklıkla tercih edilen bitüm, özellikle asfalt olarak adlandırdığımız karışımlarda, küçük parçacıklardan oluşan zeminlerin sudan etkilenmesini önler ve zemin parçacıklarını birbirine bağlayarak yolun ömrünü uzatır. Bu sayede yol, su ve rüzgarın aşındırıcı etkilerine karşı daha dirençli hale gelir [35].

2.2.6 Çimento ile stabilizasyon

Çimento ile zemin iyileştirme yöntemi, organik yapıda olmayan tüm zeminlerde kullanılabilir. Yüzeysel iyileştirmelerde sıklıkla tercih edilen Portland çimentosu, kolay bulunabilmesi ve yüksek dayanım sağlaması açısından avantajlı olsa da, sertleşmesinin uzun sürmesi dezavantajdır. Çimento ile stabilizasyon uygulamalarında zeminin cinsi ve çimento-su karışımı oranı dikkat edilmesi gereken önemli faktörlerdir [38].

Çimento, özellikle karayolları, demiryolları ve havaalanı pistleri gibi yüksek trafik yüküne maruz kalan yapıların zeminlerini güçlendirmek için sıkça kullanılan bir malzemedir. Yüzeysel stabilizasyonun yanı sıra, çimento; şevlerin daha güvenli hale getirilmesi, derin kazıların stabilitesinin sağlanması, kazıklarda oluşan olumsuz etkilerin azaltılması, zemin hareketlerinin önlenmesi ve dolgu altında oluşan oturmaların hızlandırılması gibi birçok mühendislik probleminin çözümünde de kullanılır.

2.2.7 Yapay polimerler ile stabilizasyon

Polimerler, birçok küçük parçanın birbirine bağlanarak oluşturulan uzun zincirli şekillerdir. Yaşamın temel yapı taşlarından olan polimerler, büyük boyutlu moleküllerdir. İnsan vücudunda proteinler ve enzimler gibi biyolojik işlev gören polimerler bulunurken, bitkilerde selüloz ve nişasta gibi depolama görevi üstlenen polimerler yer alır. Günümüzde polimerlerin birçok kullanım alanı vardır. Polimerlerin bu denli tercih edilmesinin sebebi, düşük yoğunlukları, kolay işlenebilirlikleri, kimyasallara karşı dirençleri, hava koşullarına dayanıklılıkları, yüksek mekanik özellikleri, yalıtım özellikleri, hijyenik yapıları, özelliklerinin kolayca değiştirilebilmesi, çeşitli optik görünümlere sahip olabilmeleri ve ekonomik olmalarıdır.

Fiberler, doğada yetişen bitki veya hayvansal kaynaklardan elde edilen doğal fiberler ve insanların belirli işlemlerle elde ettiği yapay fiberler olmak üzere iki ana başlıkta incelenir [39]. Doğal ve sentetik polimerler, moleküler yapılarına göre farklı sınıflarda incelenir. Doğal kaynaklardan elde edilen polimerlerin kimyasal yapılarında değişiklikler yaparak üretilen yarı sentetik polimerler de bu sınıflandırmada yer alır. Polimer liflerin mekanik özellikleri, çap ve uzunluk oranları ile yakından ilişkilidir. Çapları mikron mertebesinde olan bu liflerin, çapları küçüldükçe yüzey alanı artar ve bu da liflerin bazı özelliklerini etkiler [40]. Çizelge 2.1, polimerlerin sınıflandırılması konusunda detaylı bilgi vermektedir.

Çizelge 2.1 : Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması [41].

Polimerler		
Doğal Polimerler	Sentetik Polimerler	Yarı-Sentetik Polimerler
DNA, RNA, Proteinler	Polietilen	Rejenere Selüloz ve türevleri
Selüloz ve türevleri	Polipropilen	Modifiye Nişasta
Nişasta	Poli(etilen teraftalat)	
Agaroz	Polistiren	
Doğal kauçuk	Poli(vinil klorür)	

Petrol rafinerilerinde ve tekstil fabrikalarında yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen sentetik polimer lifler, yüksek mukavemetleri sayesinde birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Akrilik, polipropilen, naylon gibi bu lifler, genellikle düşük esnekliğe sahip olmalarına rağmen, hafiflikleri, dayanıklılıkları ve kimyasallara karşı dirençleri sayesinde tekstil, otomotiv ve inşaat gibi sektörlerde tercih edilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, kil zeminlerin stabilizasyonu için çimento ve atık poliamid fiber katkısının zeminlerin dayanımını nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Araştırma kapsamında hazırlanan karışımların mühendislik özelliklerini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen deneyler, kullanılan malzemeler ve deney numunelerinin notasyonları detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

3.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan doğal zemin numunesi, Bilecik'in Pazaryeri ilçesinden temin edilmiştir. Numune, Bursa Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne ait Geoteknik Laboratuvarı'na taşınarak standart prosedürlere uygun olarak etüvde kurutulmuş ve daha sonra çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Her bir deney numunesine ait detaylı bilgiler Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 : Deneylerin numunelerine ait notasyon bilgileri.

Deney numunelerinin karışım oranları	Notasyonlar
Sade kil	SK
Sade kil + %0.5 fiber	SK0.5F
Sade kil + %1.0 fiber	SK1.0F
Sade kil + %1.5 fiber	SK1.5F
Sade kil + çimento	SKÇ
Sade kil + çimento + %0.5 fiber	SKÇ0.5F
Sade kil + çimento + %1.0 fiber	SKÇ1.0F
Sade kil + çimento + %1.5 fiber	SKÇ1.5F
Sade kil +%50 kum	SKK
Sade kil +%50 kum + %0.5 fiber	SKK0.5F
Sade kil +%50 kum + %1.0 fiber	SKK1.0F
Sade kil +%50 kum + %1.5 fiber	SKK1.5F
Sade kil +%50 kum + çimento	SKKÇ
Sade kil +%50 kum + çimento + %0.5 fiber	SKKÇ0.5F
Sade kil +%50 kum + çimento + %1.0 fiber	SKKÇ1.0F
Sade kil +%50 kum + çimento + %1.5 fiber	SKKÇ1.5F

Deneylerde kullanılan atık poliamid fiber ise Flokcan Tekstil firmasından temin edilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan kum ve kil, deney öncesinde sabit bir sıcaklıkta 24 saat bekletilerek etüvde kurutulmuştur. Çimento ve fiber ise herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan doğrudan deneylere dahil edilmiştir.

Doğal malzeme temel alınarak hazırlanan deney numunelerinde, toplam ağırlığın %10'u kadar çimento, %50'si kadar kum ve farklı oranlarda (sırasıyla %0.5, %1 ve %1.5) tekstil atığı poliamid fiber kullanılmıştır.

3.1.1 Pazaryeri kili

Bu araştırmada kullanılan doğal zemin olan kil, Bilecik ilinin Pazaryeri ilçesinden temin edildikten sonra Bursa Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Burada, çeneli kırıcı ile istenen boyutlara getirilmek üzere parçalanmış zemin, ardından 4 No'lu elekten geçirilerek deneylerde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.1a ve Şekil 3.1b). Araştırmada kullanılan kil zeminin genel görünümü Şekil 3.1c'de, fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de, kimyasal özelliklerine ait veriler Çizelge 3.3.'de ve dane dağılım eğrisi ise Şekil 3.2'de sunulmuştur.



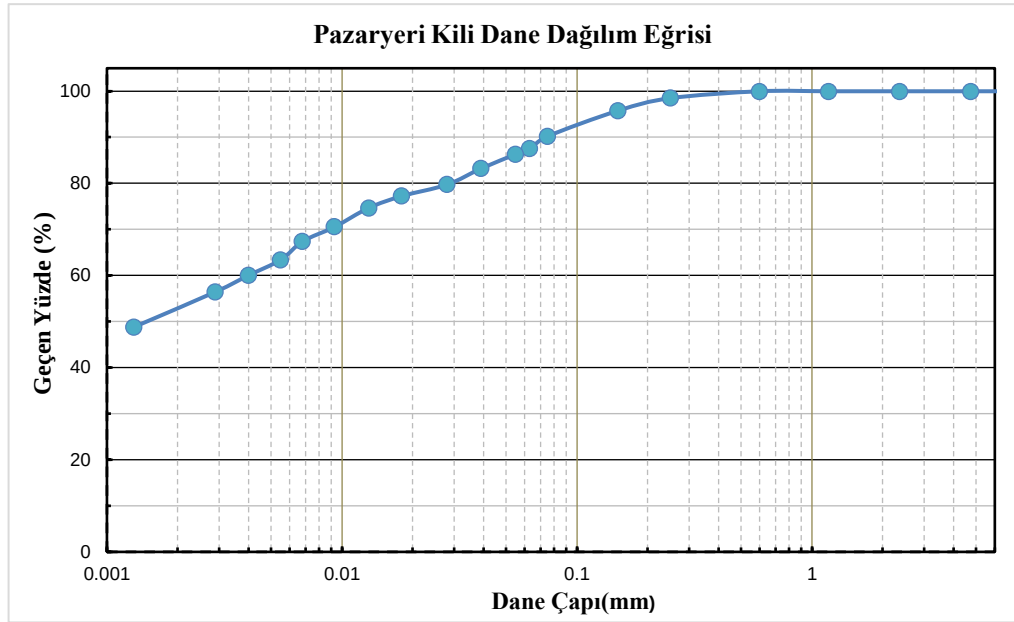
Şekil 3.1 : (a) Zeminin çeneli kırıcıda kırılması, (b) Kil zemin 4 No'lu elekten ayrıştırılıp elenmesi, (c) Pazaryeri kilinin elendikten sonraki genel görünümü.

Çizelge 3.2 : Kil numunesinin fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Likit Limit LL (%)	51.5
Plastik Limit PL (%)	21.96
Plastisite İndisi Pl (%)	29.54
Özgül Ağırlık G_s	2.72
Silt Oranı M (%)	30
Kil Oranı C (%)	41

Çizelge 3.3 : Pazaryeri kilinin kimyasal içeriği [42].

Bileşen	Kil (%)
Al_2O_3	16.4
SiO_2	37
K_2O	6.3
CaO	4.8
TiO_2	4.3
Fe_2O_3	26
ZnO	1
ZrO_2	1.5
BaO	0.5
SrO	0.2
Rb_2O	0.2
MnO	0.3
P_2O_5	0.1
MgO	-



Şekil 3.2 : Pazaryeri kilinin dane dağılım eğrisi.

3.1.2 Portland çimentosu

Deneyleerde, Bursa Çimento Fabrikası menşeli CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri, ayrıntılı olarak Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4 : Portland çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler [43].

Fiziksel Analiz		Kimyasal Analiz	
Özgöl ağırlık	3.09 gr/cm ³	SiO ₂ (%)	21.82
Özgöl yüzey (Blain, cm ² /g)	3830 cm ² /g	Al ₂ O ₃ (%)	6.49
Priz başlama süresi	Min. 60dk	Fe ₂ O ₃ (%)	1.93
Hacim genişmesi	Max. 10 mm	CaO (%)	60.74
2 günlük basınç dayanımı	Min. 20.0 Mpa	MgO (%)	1.08
28 günlük basınç dayanımı	Min. 42.5 Mpa	SO ₃ (%)	2.62
		Cl- (%)	0.012
		Kızdırma kaybı (%)	1.65
		Çözünmeyen kalıntı (%)	4.5

3.1.3 Tekstil atık poliamid fiber

Çalışmada kullanılan fiber Bursa Barakfakih Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Flokcan Tekstil San. ve Dış. Tic. A.Ş.'den atık malzeme şeklinde temin edilmiştir. Sentetik lifler arasında yer alan poliamid lifler (fiberler), yüksek aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı, sertlik ve esnekliğin ideal bir dengeye sahip olması, işlenmesinin kolaylığı ve kimyasallara karşı dayanıklılığı gibi birçok avantaj sunar. Poliamid fiberler, yüksek mukavemeti, düşük ağırlığı ve iyi yalıtım özellikleri sayesinde tekstil, otomotiv ve havacılık gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Poliamid fiber görünümü Şekil 3.3'te ve teknik özellikleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Deneyde kullanılan atık poliamid fiber.

Çizelge 3.5 : Deneyde kullanılan Poliamid fiberin teknik özellikleri [44].

Malzeme	Poliamid
Renk	Şeffaf
Çap	13-15 mikron
Özgül Ağırlığı	1.12 – 1.14 g/cm ³
Gerilme Kuvveti	85 - 100 MPa
Elastik Modülü	3000 - 3500 MPa
Darbe Dayanımı	4 - 10 kJ/m ²
Deformasyon Sıcaklığı	75°C
Erime Sıcaklığı	255 - 265°C
Uzunluk	12 mm

3.2 Yöntem

Pazaryeri kiline ağırlıkça %10 çimento, %50 ince sıva kumu, %0.5, %1, %1.5 poliamid fiber ilavesiyle farklı karışım numunelerinin zemin iyileştirme değerleri irdelenmiştir. Katkı malzemelerinin zemin mekaniği üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla farklı oranlarda hazırlanan karışımlara çeşitli zemin deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada, TS 1900-1 standardına uygun olarak zeminlerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar ortamında etüvde kurutma, Atterberg limit deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan farklı karışım numunelerine Standart Proktor deneyi uygulanarak her bir karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği belirlenmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numunelere, farklı kürlenme sürelerinde (1, 3, 7, 28 ve 90 gün) serbest basınç ve ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyleri uygulanarak, malzemelerin zaman içindeki mukavemet ve dayanım gelişimi incelenmiştir.

3.2.1 Dane çapı dağılımının bulunması

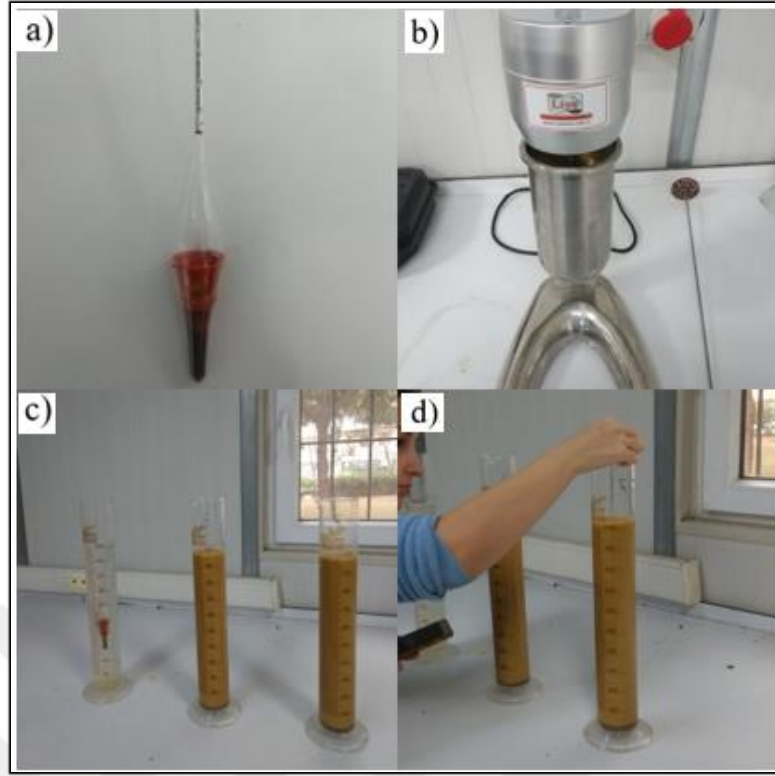
Yıkamalı eleme analizi, zeminlerin tane boyutu dağılımını ve özellikle kil-silt içeriğini belirlemek için kullanılan bir laboratuvar deneyidir. Bu yöntemle, zemin numunesindeki farklı çaplardaki tanelerin ağırlıkça yüzdelik oranları hesaplanır. Zemin örneğinden bir miktar alınarak, 105 ± 5 °C sıcaklığındaki etüvde kurutulur ve kuru malzeme miktarı kaydedilir. Bu örnek bir kabın içine konur, üzeri tamamen kapanacak şekilde su eklenir ve zemin taneciklerinin ayrışması amacıyla bir gün boyunca su altında bekletilir. Numuneyi kaplamak için kullanılan her bir litre suya 2 gr sodyum heksametafosfat ($\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{P}_6$) ilave edilir. Zemin numunesi, su ile karıştırılarak sıvı bir hale getirilir ve iyice çalkalanır.

Hazırlanan bu karışım, 0.075 mm göz açıklığına sahip bir elekten geçirilerek, daha küçük taneciklerin ayrılması sağlanır. Büyük taneciklerin eleğe zarar vermemesi için, daha geniş göz açıklığına sahip bir ön elek kullanılır. Bu sayede iri parçacıklar ilk elekte ulaşmadan tutulur. Eleme işlemi, elekten akan su berraklaşınca kadar devam ettirilir. Eleme işlemi sonucunda eleklerde kalan malzemeler, kurutulmak üzere 105 ± 5 °C sıcaklığındaki bir etüve yerleştirilir. Tamamen kuruyan numune, farklı göz açıklığına sahip bir dizi elekten geçirilerek tane boyutlarına ayrılır (Şekil 3.4). Elde edilen veriler kullanılarak, zeminin tane boyutu dağılımı hesaplanır [45].



Şekil 3.4 : Yıkamalı elek analizi aşamaları.

200 No'lu elek üzerinde tutulan, yani göz açıklığı 0.075 mm'den büyük olan tanecikler, geleneksel eleme yöntemi ile ayrıştırılırken; aynı elekten geçen, daha küçük boyutlu tanecikler için ise hidrometre deneyi tercih edilir. Hidrometre deneyinde kullanılacak zemin örneği, hassas bir teraziyle 40-60 gram arasında tartılır. Daha sonra, numune üzerine yaklaşık 150 mililitre hidrojen peroksit çözeltisi eklenir. Belirli bir süre bekletildikten sonra, numune düşük ısıda ısıtılır. Karışımın hacmi 50 mililitreye düştüğünde numune 105 °C'de etüvde kurutulur. Kuru numune, 100 mililitre sodyum heksametafosfat çözeltisi ile karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. Elde edilen karışım, 75 mikron göz açıklığına sahip bir elekten geçirilerek büyük parçacıklar ayrılır ve hacmi 1000 mililitreye tamamlanacak şekilde su eklenir. Elek üzerinde kalan numuneler etüvde kurutulduktan sonra, sırasıyla 4.75 milimetre, 600 mikron, 200 mikron ve 75 mikron göz açıklığına sahip eleklerden geçirilerek farklı boyutlardaki tanecikler ayrıştırılır. Her bir elekte kalan malzemelerin ağırlıkları dikkatlice ölçülür ve hidrometre ölçümleri 30. saniyede, ardından 1., 2. ve 4. dakikalarda yapılır. Sonrasında, 8., 15., 30., 60., 120. ve 480. dakika ölçümleri ile hidrometre okumaları tamamlanarak gerekli formüllerle ince daneli zemine ait dane dağılımı çizilir [45]. Şekil 3.5'te hidrometre deneyi yapılırken çekilmiş görseller verilmiştir.

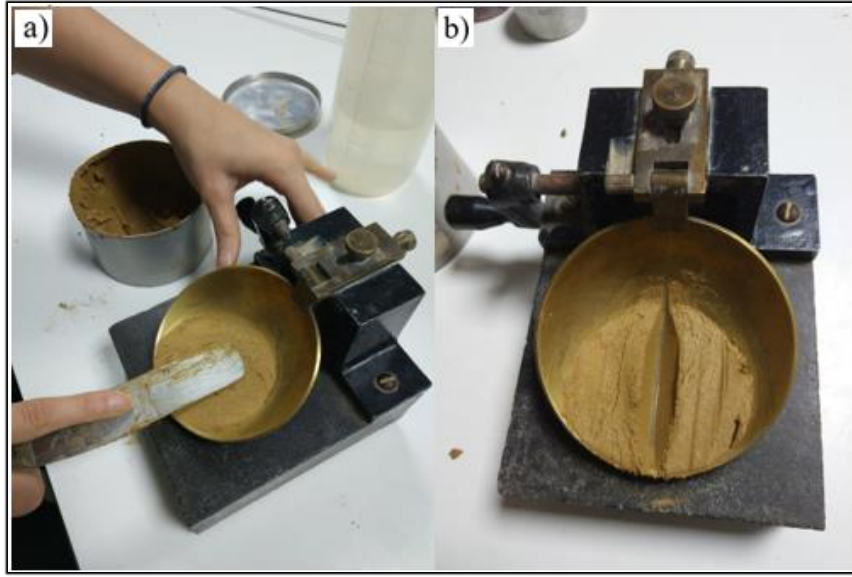


Şekil 3.5 : (a) 152H tipi hidrometre, (b) hazırlanan numunenin hidrometre mikseri ile karıştırılması işlemi, (c) hidrometre okumalarına başlamadan hemen önce, (d) hidrometre okumalarının yapılması işlemi.

3.2.2 Kıvam limitleri tayini

Likit limit, bir zeminin plastik halden sıvı hale geçme sınırını ifade eden, su içeriği açısından kritik bir değerdir. Bu çalışmada, likit limiti değerini belirlemek amacıyla Casagrande cihazı kullanılarak tek nokta yöntemi uygulanmıştır.

Killi zemin örneği, 0.425 mm göz açıklığına sahip bir elekten geçirilerek ince tanecikler elde edilir. Bu taneciklerden yaklaşık 150-200 gram alınıp, toplam numuneye oranı hesaplanır. Numuneler, su ile bir kap içerisine konur ve yaklaşık 16-20 saat boyunca hava almayacak şekilde bekletilerek suyun numunenin her tarafına nüfuz etmesi sağlanır. Kaptan alınan numune, homojen bir karışım elde etmek amacıyla en az 10-15 dakika boyunca karıştırılır. Daha sonra, Casagrande cihazı adı verilen özel bir alete belirli bir miktar numune alınır ve numune, cihazın kabına düz bir yüzey oluşturacak şekilde yerleştirilir. Oluk açma bıçağı yardımıyla numune ikiye ayrılır ve cihazın kolu saniyede iki devir olacak şekilde döndürülerek numunenin iki parçası birbirine yaklaştırılır (Şekil 3.6). Oluk tamamen kapanana kadar geçen süre boyunca yapılan devir sayısı kayda alınır.



Şekil 3.6 : (a) Numunenin hazırlanması, (b) Casagrande cihazındaki numune.

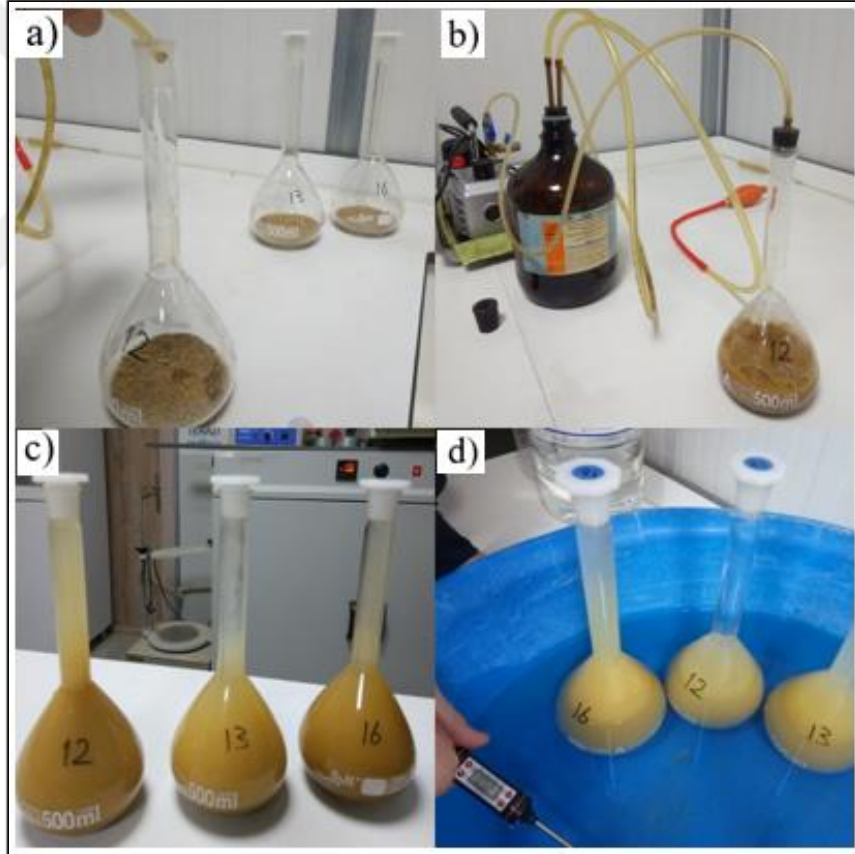
Plastik limit, bir zeminin Atterberg sınırlarından biri olup, zeminin plastik davranış gösterdiği maksimum su içeriğini ifade eder. Plastik limit deneyinde, daha önce likit limit deneyi için hazırlanan numuneden yaklaşık 20 gram alınır. Bu numune, düz bir yüzey üzerinde yaklaşık 3 milimetre çapında bir silindir haline gelinceye kadar yoğurulur. Silindirin çapı 3 milimetrenin altına düşmeye başladığında ve yüzeyinde ilk çatlaklar görülmeye başladığında yoğurma işlemi durdurulur. Çatlamış parçalar toplanır ve su içeriği ölçülür. Bu ölçüm sonucu elde edilen değer, numunenin plastik limiti olarak kabul edilir. Şekil 3.7’de plastik limit değeri tayini için yapılan işlemler verilmiştir. Bir zeminin likit limit ve plastik limit değerleri arasındaki fark, o zeminin plastisite indisini verir.



Şekil 3.7 : (a) Numunelerin 3 mm indirme çalışması, (b) çatlaklar oluşan numunelerin kaba alınması.

3.2.3 Özgöl ağırlık deneyi

Özgöl Ağırlık deneyi, zeminlerin temel özelliklerinden biri olan dane ağırlığının hacme oranını belirlemek için kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler üzerinde uygulanır. Öncelikle, zemin numunesi 4 No'lu elekten geçirilerek istenen tane boyutuna ayrılır. Elde edilen numune yaklaşık 100-120 gram olacak şekilde tartılarak 500 mililitrelik bir piknometreye aktarılır. Piknometreye numune alındıktan sonra yarısına kadar saf su ilave edilir ve hava kabarcıklarının tamamen çıkması için vakum altında en az iki saat boyunca çalkalanır. Bu işlemin ardından piknometre dışı iyice kurulanır ve numune ile suyun ağırlığı hassas bir terazi aracılığıyla ölçülür (Şekil 3.8). Deneydeki tüm veriler kaydedilir ve aşağıda bulunan formül yardımıyla özgül ağırlık hesaplanır. Deney en az iki kez tekrarlanır ve sonuçların ortalaması alınarak sonuca ulaşılır.



Şekil 3.8 : (a) Piknometreye konulan malzemelere saf su ilave edilmesi, (b) damıtılmış su ile üzeri kaplanan numunelerin vakumlanarak hava boşluklarının alınması, (c) piknometrelerin boş kalan hacimlerinin damıtılmış su ile tamamen doldurulması, (d) numunelerin ortam sıcaklığına (20°C) getirilmesi.

3.2.4 Standart proktor deneyi

Standart Proktor testi, bir zemin örneğinin farklı su içeriklerindeki sıkışma davranışını inceleyerek, zeminin en uygun çalışma koşullarını belirlemeye yönelik bir deneydir. Bu test, zeminlerin yapı taşıma kapasitesi, oturması ve stabilitesi gibi mühendislik projelerinde kritik öneme sahip özellikleri değerlendirmede temel bir araçtır.

Atık fiber liflerin zeminlerin sıkışma özelliğine etkisini incelemek için, belli oranlarda lif içeren numuneler, farklı su içeriklerinde sıkıştırılarak optimum su içeriği bulunmaya çalışılmıştır. Numuneler homojen bir şekilde karıştırılmaya özen gösterilmiştir. Hazırlanan zemin karışımları, standart Proktor kalıbına üç eşit tabaka halinde yerleştirilmiş ve her tabaka 25 standart darbeye maruz bırakılmıştır. Darbelerin eşit dağılımına dikkat edilerek, numuneler maksimum yoğunluğa ulaştırılmaya çalışılır. Sıkıştırma işleminin ardından numunelerden alınan örnekler, 24 saat boyunca etüvde kurutularak ağırlıkları ölçülür.

Elde edilen veriler ışığında, kuru birim hacim ağırlığı ve su içeriği değerleri kullanılarak çizilen kompaksiyon eğrisi, zeminin sıkıştırılabilirliği ve su ile olan ilişkisini gösterir. Bu eğrinin en yüksek noktası, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığına karşılık gelirken, bu noktaya denk gelen su içeriği ise optimum su içeriği olarak tanımlanır [45]. Şekil 3.9’da standart proktor deneyinin yapılış aşamaları yer almaktadır.



Şekil 3.9 : Standart Proktor deneyi aşamaları.

3.2.5 Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyleri, zeminimize eklenen katkının taşıma kapasitesine olan etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu deneyler sayesinde, zeminimize eklenen fiber katkısının taşıma kapasitesine olan etkisi değerlendirilmiştir.

Standart Proktor deneyi sonuçlarına göre belirlenen optimum su içeriğinde, belirlenen her bir oranda 100mm yüksekliğinde ve 50mm çapa sahip üçer adet silindirik numune hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken boşluk kalmayacak şekilde sıkıştırılarak homojen bir yapıya kavuşmasına ve atık lifin eşit dağılmasına özen gösterilmiştir. Numunelerin boyutları deney öncesinde not alınmıştır. Hazırlanan numuneler, 0, 3, 7, 28 ve 90 gün süreyle kür edilerek her bir sürenin sonunda ne kadar su içerdikleri yeniden ölçülüp kontrol edilmiştir. Ardından, TS 1900-1 standardına uygun olarak serbest basınç testine tabi tutulmuşlardır (Şekil 3.10).

Numune, serbest basınç deney aleti içindeki iki plaka arasında, hareketli plakanın numunenin üst yüzeyine tam temas edeceği şekilde yerleştirilir. Yük halkası saati ve düşey deformasyon ölçüm cihazı sıfırlandıktan sonra yükleme işlemi başlatılır. Numune, plakalar arasında sıkıştırılarak yüklenmeye hazır hale getirilir ve okumalar not edilir. Düşey yük, elastik bir yük hücresi ile, düşey deformasyon ise deformasyon saati ile belirlenir. Ölçümler, maksimum değere ulaşıp, ardından bir miktar düşüş gözlenene kadar devam ettirilir. Her bir karışım ve kür süresi için üçer adet numune üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ortalaması alınarak analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 3.10 : Serbest basınç deneyi cihazı ve değer okunması.

3.2.6 Ultrasonik darbe hızı testi (UPV)

Ultrasonik test yönteminde, numune veya yapı içerisine gönderilen ultrasonik dalgaların, malzemenin homojenliğine ve iç yapısına bağlı olarak değişim göstermesi prensibinden yararlanılır. Bu sayede, yapı içerisinde bulunan kusurlar veya donatıların yerleri ve boyutları hakkında bilgi edinmek mümkün olur. Ultrasonik dalgaların malzemede yayılma hızındaki değişimler, bu yöntemin temelini oluşturur [46].

Ultrasonik dalga hızına dayalı tahribatsız muayene yöntemleri, malzemelerin iç yapılarının karakterizasyonu, kusur tespiti ve kalınlık ölçümü gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kalın numunelerde bile yüksek doğrulukla çok küçük kusurların tespit edilebilmesi ve tek yüzeyden ölçüm yapılabilmesi gibi avantajları sayesinde diğer muayene yöntemlerine göre sıklıkla tercih edilir. Yüksek hızda ölçüm yapma ve hızlı sonuç alma imkânı sunması ise bu yöntemin bir diğer önemli avantajıdır. Ancak, pürüzlü yüzeyli ve küçük boyutlu numunelerde uygulanması zorluklar çıkarabilir. Bu yöntemin etkili kullanımı için deneyim gerekmektedir [47,48].



Şekil 3.11 : Ultrasonik darbe hızı(UPV) deneyi cihazı.

Belirlenen karışım oranlarına göre hazırlanan 50x100 mm boyutlarındaki toplam 80 adet silindirik zemin numunesi üzerinde ultrasonik P-dalga hızı testleri yapılmıştır. Bu testler, 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin ardından ASTM C 597 (2009) standartlarına uygun bir şekilde, 0,1 µs hassasiyette sinyal süresine ve 54 kHz frekanslı Pundit (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [49]. Bu cihaza ait görüntü Şekil 3.11’de sunulmuştur. Numunelerin boyu ve çapı hassas kumpas ile ölçülerek not edilmiştir. Ölçüm öncesinde, numune ile problar arasında sağlıklı bir bağlantı oluşturmak amacıyla, numunenin temas yüzeyleri ve probların uç kısımları ultrason jel ile kaplanmıştır. Bu sayede, ölçüm sırasında hava kabarcıklarından kaynaklanan hatalar önlenmeye çalışılmıştır. Ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla, doğrudan iletim yöntemi tercih edilmiş ve ölçüm değerleri kaydedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, yüksek plastisiteli kil toprağının mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çimento ve tekstil atığı poliamid fiber olmak üzere iki farklı katkı malzemesi kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, Atterberg limitleri, özgül ağırlık deneyleri, standart proktor deneyleri, serbest basınç deneyleri ve ultrasonik darbe hızı testi deneyleri yapılmıştır.

Pazaryeri kiline ve kil-kum karışımına çimento ve tekstil atığı poliamid fiber katkısı yapılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmada ilk olarak kıvam limit değerleri bulunmuştur. Belirlenen farklı oranlarda hazırlanan karışımlara standart proktor deneyleri yapılarak karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği değerleri tespit edilmiştir. Optimum su içeriğine göre hazırlanan karışımlara serbest basınç deneyi ve ultrasonik darbe hızı testi (UPV) gerçekleştirilmiştir.

4.1 Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında, sade kil (SK) ve sade kil-kum (SKK) karışımlarına ait numuneler hazırlandıktan hemen sonra Atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan karışımların fiziksel özellikleri, TS 1900-1 (2006) standardına uygun olarak belirlenen likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri ile Çizelge 4.1 ve 4.2’de sunulmuştur.

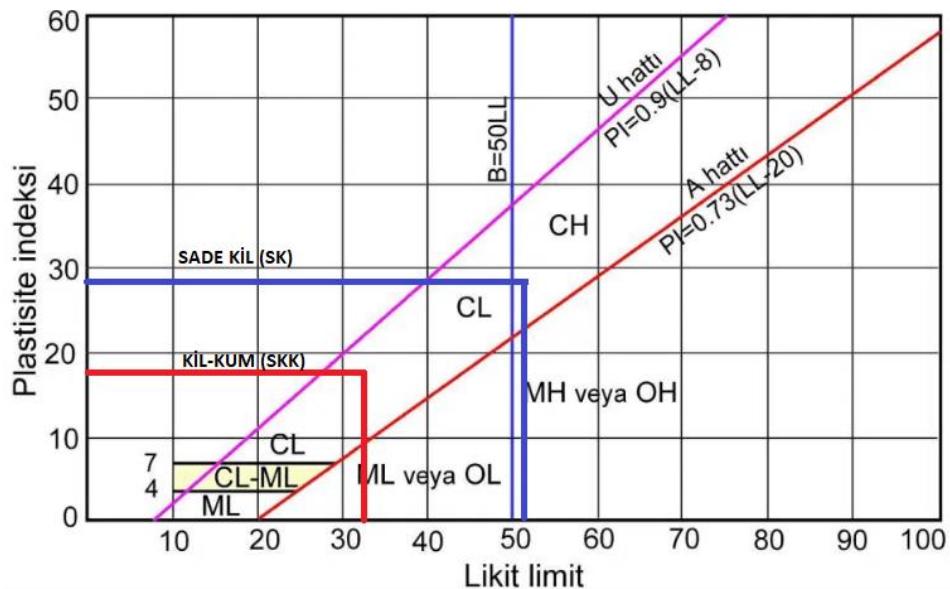
Çizelge 4.1 : Sade kil numunesine ait Atterberg Limitleri Deney Sonuçları.

5 Noktada Likit Limit						Plastik Limit	
Kap No	B11	B3	B12	B19	B25	B4	B2
Kap Kütlesi	19,63	17,5	17,11	18,18	24,15	19,12	23,17
Kap + Yaş	52,25	44,89	49,05	41,08	50,79	28,11	30,58
Düşüş Sayısı, N	49	37	24	20	13	-	-
Kap + Kuru	42,12	35,91	38,16	33,08	41,21	26,51	29,23
Su Ağırlığı	10,13	8,98	10,89	8	9,58	1,6	1,35
Kuru Numune	22,49	18,41	21,05	14,9	17,06	7,39	6,06
Su Muhtevası w(%)	45,04	48,78	51,73	53,69	56,15	21,65	22,28
Likit Limit (LL) =51,50						Plastik Limit (PL)=21,96 Pl (%) = 29,54	

Çizelge 4.2 : Sade kil-kum numunesine ait Atterberg Limitleri Deney Sonuçları.

5 Noktada Likit Limit						Plastik Limit	
Kap No	B38	B25	B3	B5	B30	B9	B2
Kap Kütlesi	23,12	24,14	17,49	19,92	20,1	24,34	24,66
Kap + Yaş	36,43	38,44	34,16	35,89	38,47	30,47	32,06
Düşüş Sayısı, N	38	28	23	21	17	-	-
Kap + Kuru	33,14	34,86	29,88	31,7	33,58	29,59	31,04
Su Ağırlığı	3,29	3,58	4,28	4,19	4,89	0,88	1,02
Kuru Numune	10,02	10,72	12,39	11,78	13,48	5,25	6,38
Su Muhtevası w(%)	32,83	33,4	34,54	35,57	36,28	16,76	15,99
Likit Limit (LL) =33,97						Plastik Limit (PL)=16,37	
						PI (%) = 17,60	

Yapılan deneyler sonucunda sade kil ve kil-kum numunesinin likit limit ve plastik limit değerlerine bağlı olarak hesaplanan plastisite indisi de bulunmuştur. Pazaryeri kilinin likit limit değeri %51.50, plastisite indeksi ise %29.54 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, USCS sınıflandırmasına göre numunenin yüksek plastikliğe sahip kil (CH) olduğunu göstermektedir. İnce kum ilavesiyle hazırlanan kil-kum karışımının likit limit değeri %33.97, plastisite indeksi ise %17.60 olarak bulunmuştur. Bu yeni değerler, karışımın düşük plastikliğe sahip kil (CL) olarak sınıflandırıldığı anlamına gelir. Sade kil (SK) ve kil-kum (SKK) numunelerinin plastisite kartında yüksek ve düşük plastisiteli kil aralığında olduğu Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Plastisite kartında zemin sınıfının gösterilmesi [21].

4.2 Özgöl Ağırlık Deneyi Sonuçları

Özgöl ağırlık tayini amacı ile ASTM D854-14 standardına uygun olarak, sade kil ve sade kil-kum karışımlarından oluşan toplam altı numune üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [32]. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ardından, elde edilen veriler standart formüller aracılığıyla hesaplanarak, sade kilin özgül ağırlığı 2.72 ve kil-kum karışımının özgül ağırlığı ise 2.4345 olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sade kil ve kil-kum karışımına ait deney verileri sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3 : Sade kile ait Özgöl ağırlık deney verileri ve (G_s) sonucu.

Numune adı	Piknometre No	Sıcaklık, t (°C)	Pik. Kütlesi, M1 (g)	Pik.+su kütlesi, M2 (g)	Pik.+kuru zemin kütlesi, M3 (g)	Pik.+kuru zemin kütlesi+su, M4 (g)	G_s	G_s Ortalama
Sade kil	12	20	150.36	674.62	278.55	756.02	2.73969	2.72004
	13	20	154.72	678.72	281.26	758.4	2.70038	
	16	20	159.23	672.66	259.08	735.55	2.70157	

Çizelge 4.4 : Kil-kum numunesine ait Özgöl ağırlık deney verileri ve (G_s) sonucu

Numune adı	Piknometre No	Sıcaklık, t (°C)	Pik. Kütlesi, M1 (g)	Pik.+su kütlesi, M2 (g)	Pik.+kuru zemin kütlesi, M3 (g)	Pik.+kuru zemin kütlesi+su, M4 (g)	G_s	G_s Ortalama
Kil-Kum	2	20	155.56	682.98	259.87	744.29	2.42581	2.4345
	3	20	158.96	680.28	266.02	743.52	2.44318	
	6	20	156.91	681.04	261.69	741.06	2.34093	

4.3 Standart Proktor Deney Sonuçları

Bu çalışmada, toplam 16 farklı karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği değerlerini belirlemek için standart Proktor yöntemi ile kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Deneyler, numunelerin hazırlanmasıyla birlikte hemen gerçekleştirilmiştir.

Pazaryeri kiline ve kil-kum zeminin ağırlıkça %10 oranlarının çimento ve % 0.5, % 1.0, % 1.5 oranlarında poliamid lif karıştırılmıştır. TS 1900-1 (2006) standardında belirtilen prosedüre uygun olarak hazırlanan karışımlar, standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda, karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına ait sıkışma değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Standart proktor deneyi sonuçları [50].

Sıra No	Karışımlar	Optimum Su Muhtevası, %	Max Kuru Birim Hacim Ağırlığı, (gr/cm ³)
1	SK	15	1.77
2	SK0,5F	16.4	1.81
3	SK1,0F	17.1	1.76
4	SK1,5F	15.8	1.73
5	SKÇ	15.9	1.77
6	SKÇ0,5F	15.5	1.76
7	SKÇ1,0F	18.2	1.74
8	SKÇ1,5F	16.6	1.745
9	SKK	13.9	1.92
10	SKK0,5F	13.8	1.91
11	SKK1,0F	14	1.9
12	SKK1,5F	14.5	1.85
13	SKKÇ	14.1	1.86
14	SKKÇ0,5F	13.9	1.87
15	SKKÇ1,0F	16.2	1.82
16	SKKÇ1,5F	15.6	1.83

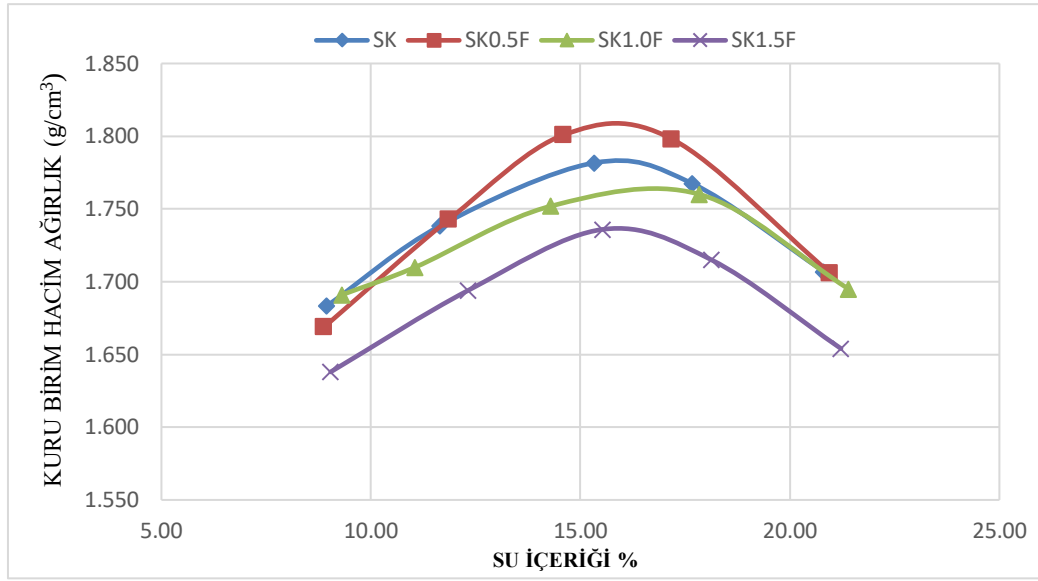
Poliamid fiberlerin farklı oranlarda eklendiği sade kil zeminlerde gerçekleştirilen standart Proktor deneyleri sonucunda, poliamid fiber oranındaki artışla birlikte optimum su içeriği artarken, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise %0.5 fiber oranına kadar artış göstermiş, daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. Sade kil zemininde 1.77 g/cm³ olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı, SK1.5F karışımında 1.73 g/cm³'e düşmüştür.

Poliamid fiberin kil zeminine göre daha fazla su çekmesi ve daha düşük birim ağırlığa sahip olması, karışımın optimum su içeriğini artırmıştır. Ayrıca, fiberlerin zemin tanecikleri arasındaki boşlukları doldurarak zemin yapısını değiştirdiği için, maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmıştır. Sade kile fiber ilavesiyle elde edilen sonuçlara ait kompaksiyon eğrileri grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.

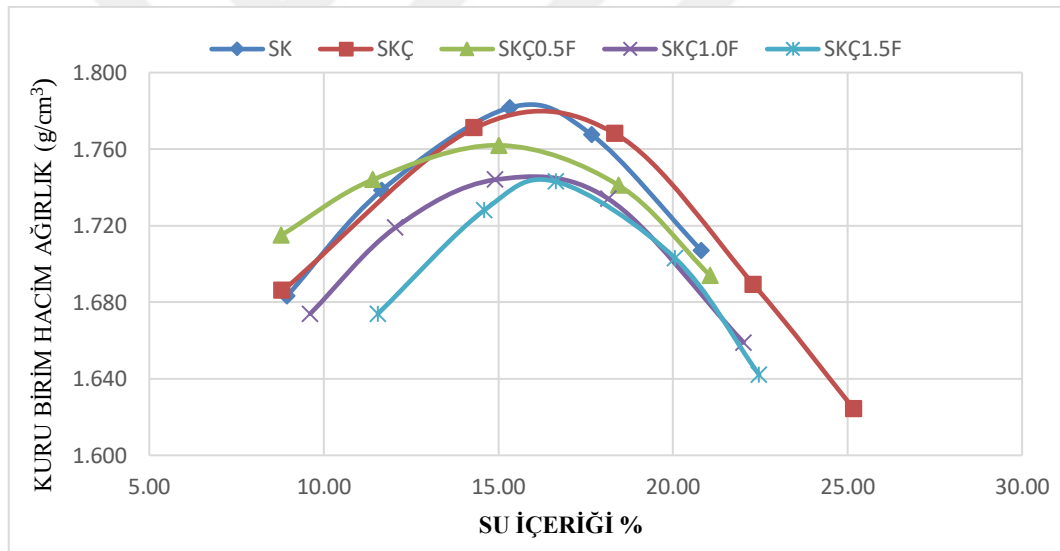
Çimento ve poliamid fiberin birlikte kullanıldığı karışımların kompaksiyon deney sonuçları, poliamid fiber oranının artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığını, ancak optimum su içeriğinin çoğunlukla arttığını göstermiştir. Çimentonun, zemin malzemesine göre daha ince yapıda olması nedeniyle daha fazla su emdiği ve bu nedenle karışımın su ihtiyacının arttığı düşünülmektedir. Yalnızca %0.5 fiber oranında küçük bir azalma gözlemlenmiştir.

Çimento ve polipropilen fiber içeren karışımlar arasında en yüksek optimum su içeriği değeri, SKÇ1.0F karışımında görülmüştür. Sade kile çimento ve fiber ilavesiyle elde edilen sonuçlara ait kompaksiyon eğrileri grafiği Şekil 4.3’te verilmiştir. Kil-kum karışımına çimento ve poliamid fiber ilavesi ile yapılan kompaksiyon deneylerinde, fiber oranının artmasıyla optimum su içeriği artarken, maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmıştır. Poliamid fiber ile birlikte sade kile kumun eklenmesi, karışımın daha az yoğun ve daha fazla su tutabilen bir yapıya sahip olmasına neden olduğu sonucuna varılabilir.

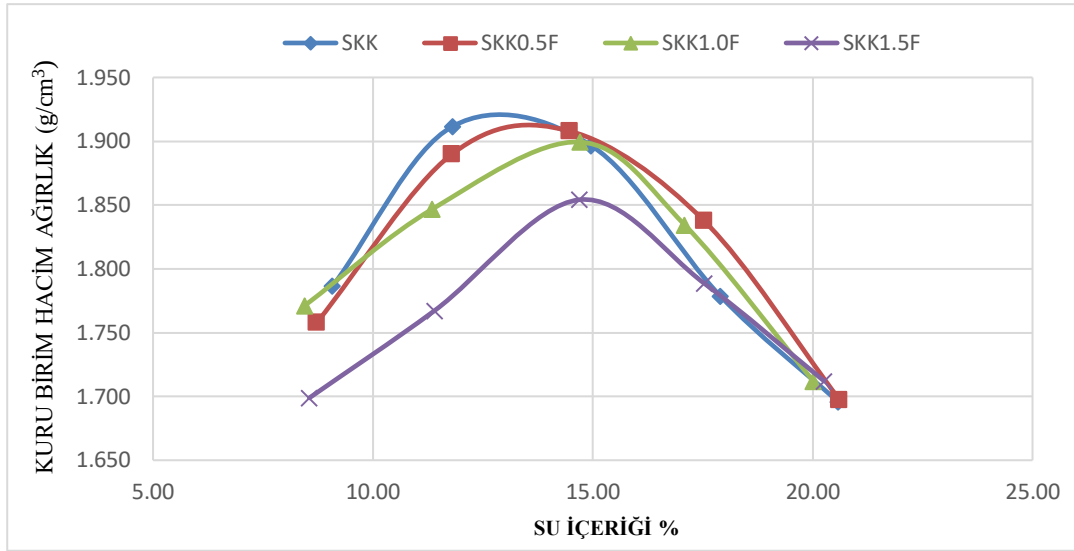
Sade kil-kum zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.92 gr/cm³ iken, SKK1,5F karışımının maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.85 gr/cm³ ‘e düşmüştür. Sade kil-kum zemine çimento ve fiber eklenmesiyle yapılan kompaksiyon deneyi sonuçlarını incelediğimizde ise optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri, önceki numunelerde olduğu gibi fiber oranındaki artışla benzer bir eğilim göstermiştir. En düşük optimum su içeriği ve en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri, SKKÇ0.5F karışımında elde edilmiştir. Deney sonuçlarına ait kompaksiyon eğrilerinin grafikleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te sunulmuştur.



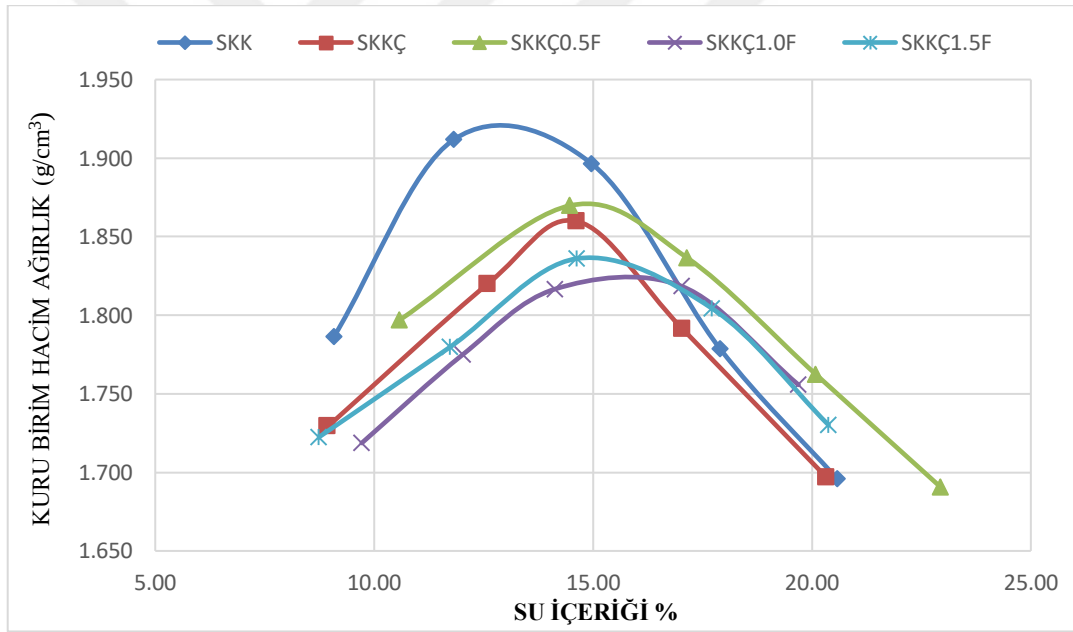
Şekil 4.2 : Sade kil ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50].



Şekil 4.3 : Sade kile çimento ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50].



Şekil 4.4 : Kıl-kum ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50].



Şekil 4.5 : Kıl-kum zemine çimento ve poliamid fiber karışımlarının kompaksiyon eğrileri [50].

Farklı katkı oranları içeren numunelerin standart Proktor deneyleri sonucunda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri, 1.73 gr/cm^3 ile 1.91 gr/cm^3 arasında dağılım göstermiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, kil-kum karışımında 1.92 gr/cm^3 ile en yüksek değere ulaşırken, SK1.5F karışımında 1.73 gr/cm^3 ile en düşük değerde kalmıştır. Numunelerin optimum su ihtiyacı, %13.8 ile %18.2 arasında değişkenlik göstermiştir. SKK0.5F karışımı %13.8 ile en düşük, SKKÇ1.5F karışımı ise %18.2 ile en yüksek optimum su içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir.

4.4 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

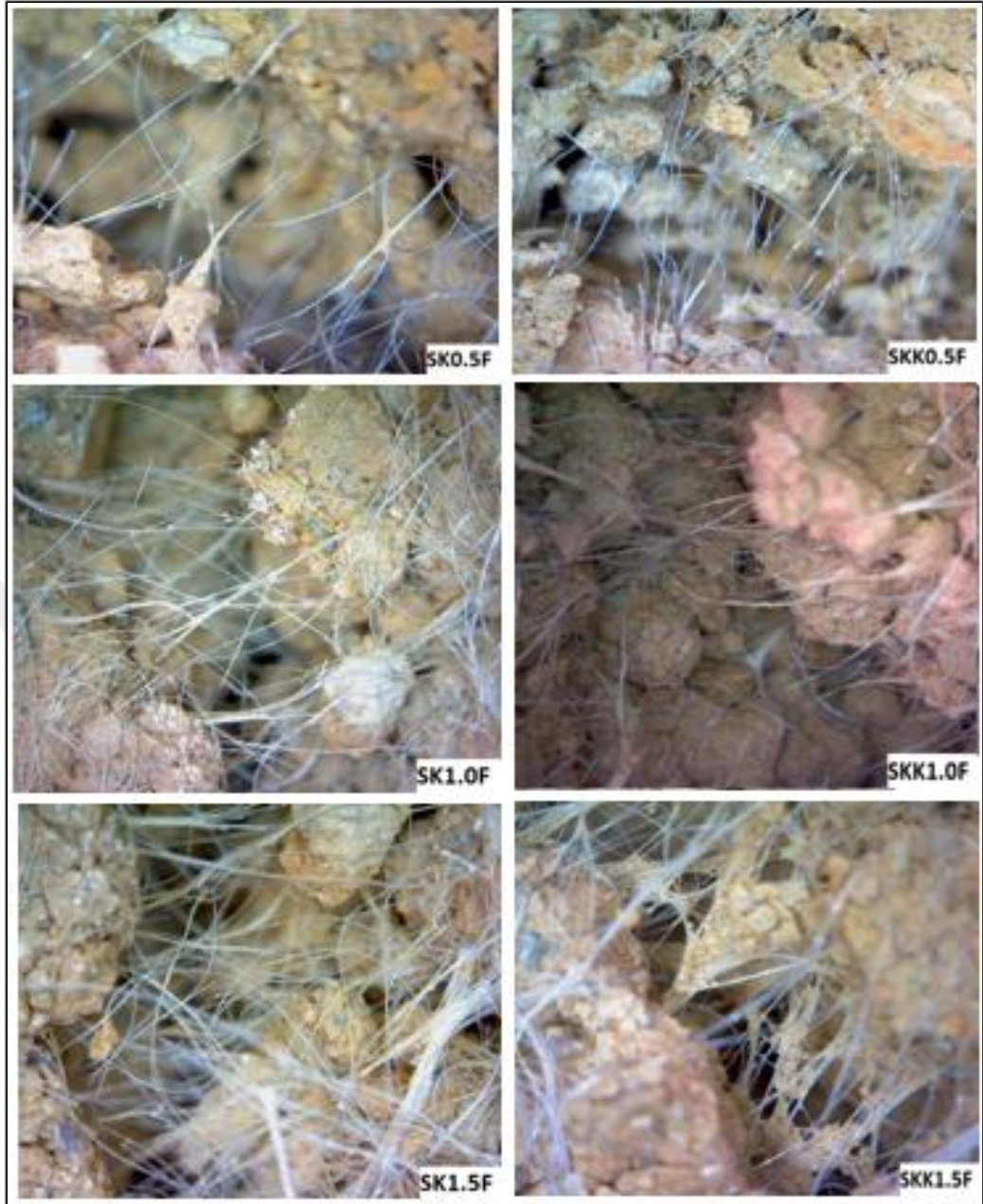
Bu tez çalışmasında, öncelikle standart Proktor deneylerinden elde edilen optimum su içeriklerine göre hazırlanan ve 0, 3, 7, 28 ile 90 günlük kür sürelerine tabi tutulan silindirik numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Numuneler, kürleme işlemi öncesi ve sonrası olmak üzere iki kez hassas ölçüm aleti ile ölçümleri yapılmış ve bu değerler kayıt altına alınmıştır. Uzunluk ve çap değerleri karşılaştırılarak, kürleme sürecinde meydana gelen boyutsal değişimler belirlenmiştir. Yapılan deneylerde elde edilen serbest basınç değerleri, Çizelge 4.6'da detaylı olarak sunulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde çimento katkısının serbest basınç dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Atık tekstil poliamid fiber eklenmesiyle elde edilen sonuçlara bakıldığında, %1.0'a kadar olan oranlarda basınç dayanımını olumlu etkilemiş ancak bu oranın üzerine çıkılması durumunda ise azalma eğilimi sergilemiştir. Zemin içinde kullanılan poliamid fiberlerin miktarı, zemin iyileştirme sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Numunedeki mikro çatlakların birleşimiyle oluşan makro çatlaklar, fiberlerin varlığı sayesinde daha yavaş gelişir. Fiberler boşluklar arasında köprüleme etkisi yaparak hem küçük çatlakların oluşumunu geciktirir hem de büyük çatlakların büyümesini durdurarak numunenin kırılma direncini artırır. Poliamid fiber katkılı numuneler, Q-scope markasına ait dijital mikroskop ile fiber-zemin arasındaki etkileşim (köprüleme etkisi) ve iç yapısının görüntüleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Yapılan deneylerde, en yüksek basınç dayanımı 54.24 kg/cm^2 ile SKÇ1.0F karışımının 90 günlük numunesinde elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise 2.21 kg/cm^2 ile SK karışımının 0 günlük numunesinde tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6 : Serbest basınç deneyi sonuçları

Sıra No	Karışımlar	q_u (kg/cm ²)				
		Kür süresi				
		0 günlük	3 günlük	7 günlük	28 günlük	90 günlük
1	SK	2.21	4.22	8.06	11.02	12.46
2	SK0.5F	3.47	5.12	8.5	11.24	17.53
3	SK1.0F	4.15	5.41	9.78	12.61	17.64
4	SK1.5F	4.06	5.31	9.17	12.37	17.38
5	SKÇ	6.53	27.64	27.81	34.56	46.54
6	SKÇ0.5F	6.58	29.37	30.53	38.77	52.48
7	SKÇ1.0F	6.62	29.86	30.91	44.61	54.24
8	SKÇ1.5F	6.46	28.68	30.39	43.9	48.51
9	SKK	2.68	3.33	5.48	8.63	10.19
10	SKK0.5F	3.18	4.19	5.85	11.8	13.18
11	SKK1.0F	4.73	4.77	8.91	13.67	17.69
12	SKK1.5F	4.25	4.87	8.09	13.37	17.23
13	SKKÇ	5.31	30.25	37.13	49.81	49.91
14	SKKÇ0.5F	6.63	35.32	42.31	49.99	51.34
15	SKKÇ1.0F	5.39	39.68	43.52	50.92	53.68
16	SKKÇ1.5F	5.33	33.87	40.88	50.66	52.59

Çizelge 4.6'daki verilere bakıldığında, tüm karışımlar için kür süresinin uzamasıyla birlikte serbest basınç dayanımında belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Zemine eklenen %10 çimento ilavesinin zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirerek basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu durum, çimentonun zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili bir katkı maddesi olduğunu göstermektedir. Çimento ve atık fiber katkılı karışımların numunelerinde, uygulanan yük altında deforme olmuş ve nihayetinde kırılmıştır. Bu numunelerin kırılma şekillerine ait bazı görseller, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.6 : Sade kil ve kil-kum zeminlere fiber katkısının numunelerin iç yapısındaki köprüleme etkisine ait görüntüleri.



Şekil 4.7 : SK0.5F, SK1.0F, SK1.5F, SKÇ, SKÇ0.5F, SKÇ1.0F ve SKÇ1.5F numunelerinin kırım sonrası görüntüleri.



Şekil 4.8 : SKK, SKK0.5F, SKKÇ, SKKÇ0.5F, SKK1.0F, SKK1.5F, SKKÇ1.0F ve SKKÇ1.5F numunelerinin kırım sonrası görüntüleri.

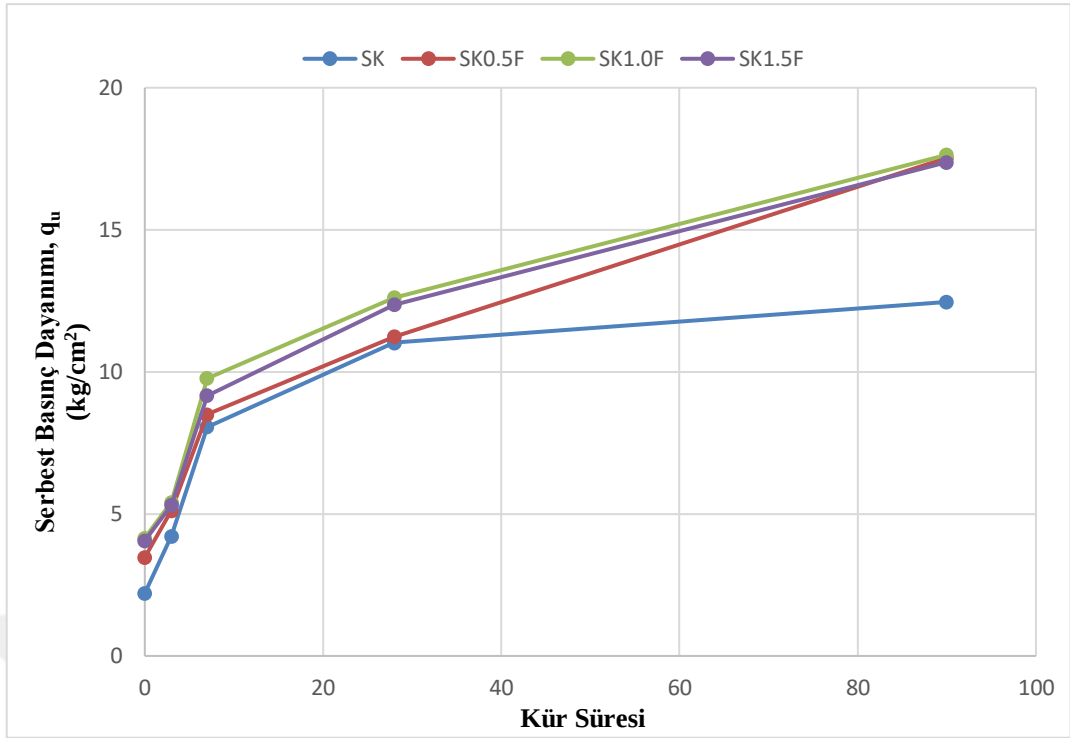
Sade kil zemine poliamid fiber katılarak hazırlanan karışımların (SK0.5F, SK1.0F ve SK1.5F) serbest basınç dayanımı değerlerine baktığımızda, sade kil zeminin (SK) basınç dayanımı değerlerini iyileştirdiği artışın ardından bir miktar düşürdüğü görülmüştür (Şekil 4.9). Poliamid fiber içeren karışımların kürlenme süresi uzadıkça, basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kırım sonrası numunelerin boyutlarında önemli ölçüde küçülme ve şekillerinde büzülme eğilimi göstermiştir.

Sade kil zemine çimento ve poliamid fiber eklenerek oluşturulan karışımların (SKÇ0.5F, SKÇ1.0F, SKÇ1.5F) dayanım özellikleri incelendiğinde, çimentonun dayanım üzerindeki belirgin etkisi görülmüştür. Poliamid fiber ilavesi artışa katkı sağlamış ancak %1.0 fiber oranı sonrası dayanımda azalma gözlemlenmiştir. Kürlenme süresinin artmasıyla çimentonun bağlayıcı özelliği güçlenerek karışımların dayanımı artmıştır (Şekil 4.10).

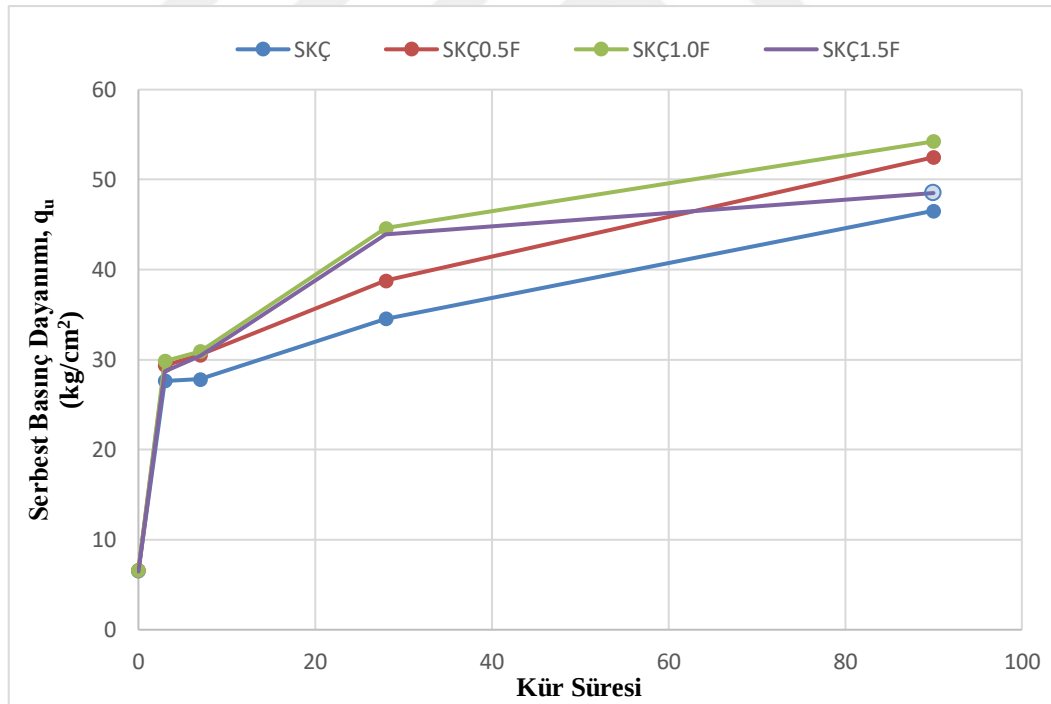
Sadece kil-kum karışımı olan zemine farklı oranlarda poliamid fiber katılarak hazırlanan numunelerin (SKK0.5F, SKK1.0F ve SKK1.5F) serbest basınç dayanım değerlerine bakıldığında, poliamid fiber ilavesi başlangıçta zeminin dayanımını artırmış ancak daha sonraki aşamalarda bu artışın durduğu ve hatta hafif bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Kürlenme süresinin uzamasıyla birlikte ise karışımların dayanımı devamlı bir artış göstermiştir (Şekil 4.11).

Kil-kum karışımına %10 oranında çimento ve farklı miktarlarda poliamid fiber ekleyerek hazırlanan karışımların (SKKÇ0.5F, SKKÇ1.0F, SKKÇ1.5F) dayanım değerleri incelendiğinde, diğer karışım numunelerine benzer bir davranış göstermiş ve fiber oranı arttıkça önce yükselmiş, sonra azalma tespit edilmiştir (Şekil 4.12).

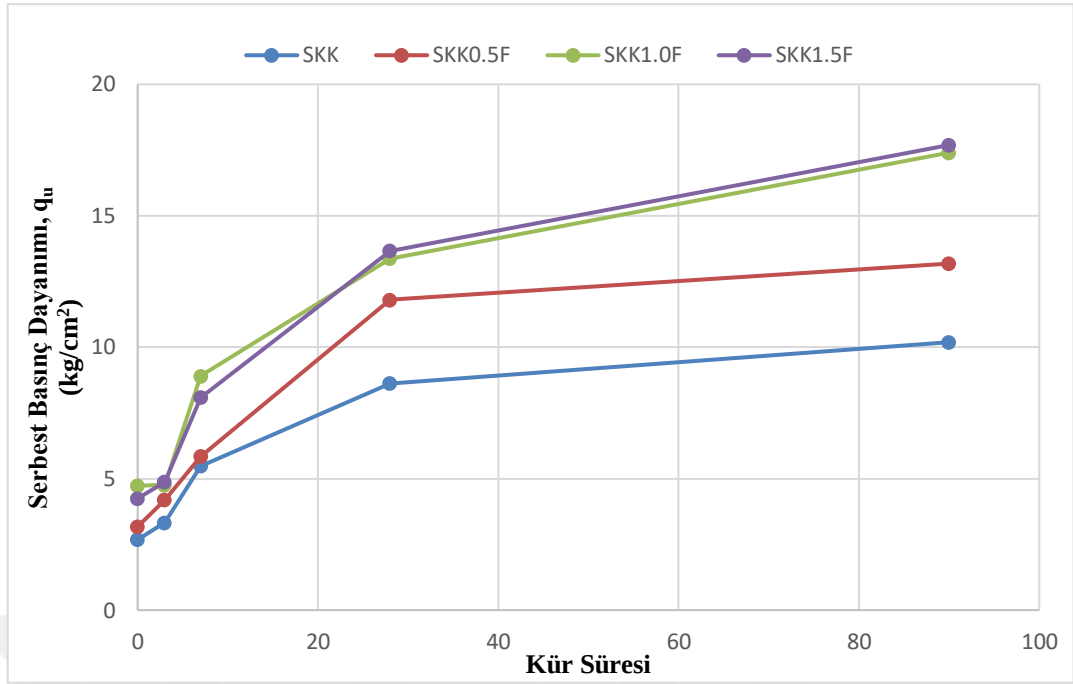
Sade kil ve kil-kum zemine fiber ile çimento katkısının dayanım özelliklerindeki değişimler sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sunulmuştur. Bu sonuçlar, tekstil atığı fiberin uygun oranlarda kullanıldığında karışımın dayanımını artırdığını, ancak aşırı kullanımının ise istenmeyen sonuçlara yol açabileceğini göstermektedir.



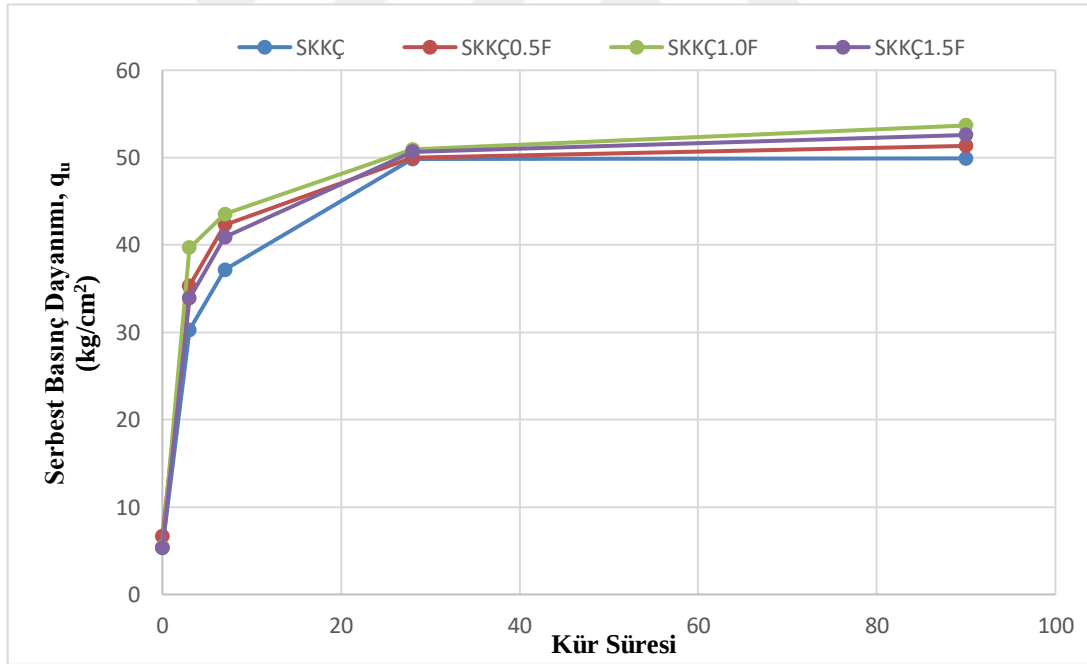
Şekil 4.9 : Sade kil + fiber katkısının serbest basınç dayanımları



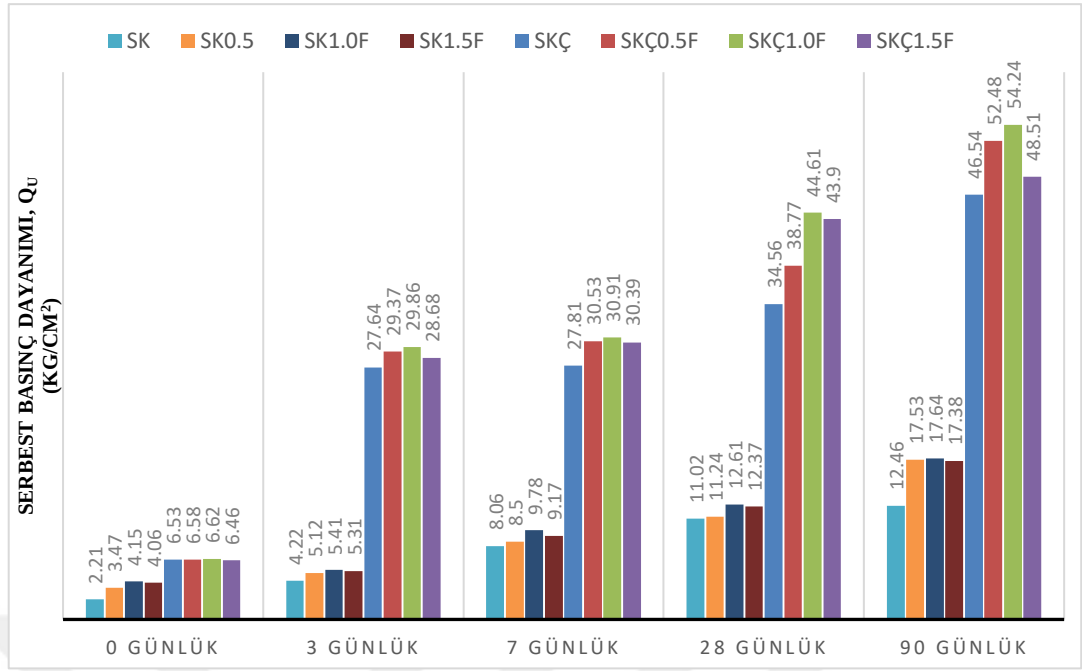
Şekil 4.10 : Sade kil + %10 çimento + fiber katkısının serbest basınç dayanımları



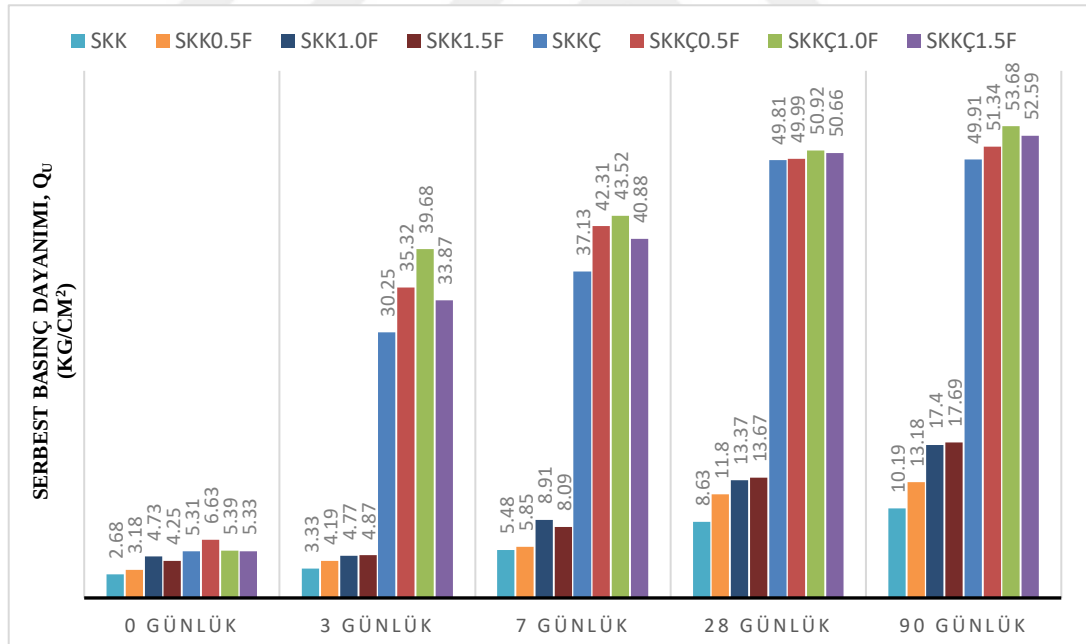
Şekil 4.11 : Sade kil + kum + fiber katkısının serbest basınç dayanımları



Şekil 4.12 : Sade kil + kum + %10 çimento + fiber katkısının serbest basınç dayanımları



Şekil 4.13 : Sade kil zemine çimento ve fiber katkısının serbest basınç dayanımına etkisi



Şekil 4.14 : Kil-kum zemine çimento ve fiber katkısının serbest basınç dayanımına etkisi

4.5 Ultrasonik Darbe Hızı Testi (UPV) Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında, çimento ve poliamid fiber katkılı zeminlerin iç yapısını nasıl değiştirdiğini ve bu değişimin ses dalgalarının zeminde yayılma hızını nasıl etkilediğini anlamak amacıyla; 50x100 mm boyutlarında, 80 adet silindir şeklinde hazırlanan zemin örnekleri üzerinde, 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda ultrasonik darbe hızı testi yapılmıştır. Çizelge 4.7'de UPV (Ultrasonik Darbe Hızı) testi ile elde edilen malzemenin belirli bir kalınlığında ultrasonik dalga'nın geçiş süresini (mikro saniye cinsinden) ve ultrasonik dalga'nın malzemede yayılma hızını (m/s) gösteren ölçüm sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 4.7'deki verilere baktığımızda, kullanılan katkı malzemeleri (çimento, poliamid fiber) ve karışım oranlarının, numunelerin gözeneklilik, yoğunluk gibi içsel özelliklerini değiştirerek ses dalgalarının yayılma hızını ve geçiş süresini doğrudan etkilediği görülmektedir. Genel olarak, fiber takviyeli numunelerde çimentoya kıyasla daha düşük ultrasonik darbe hızı değerleri gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, fiber oranının artması ile malzeme içindeki boşlukları doldurarak numuneye homojen olmayan bir yapı kazandırdığı için ses dalgalarının düzgün bir şekilde ilerlemesini engellediği şeklinde yorumlanabilir. Katkı malzemesi olarak Portland çimentosu (CEM I 42.5R) ile hazırlanan numunelerde ise, diğer numunelere kıyasla ultrasonik P-dalga hızı değerlerinin anlamlı ölçüde daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum Portland çimentosunun kimyasal yapısından dolayı suyla temas ettiğinde daha fazla bağlayıcı ve daha az gözenekli homojen bir yapı oluşturmasıyla açıklanabilir.

Numunelerin kür süresi boyunca elde edilen sonuçlarda, kür süresi uzadıkça numunenin içindeki ultrasonik dalga'nın geçiş süresi azalmaya başladığını ve ultrasonik darbe hızının arttığını göstermiştir. Bu durum, kür sürecinde numune içindeki gözeneklerin azalması ve bağların güçlenmesiyle, ses dalgalarının daha homojen bir ortamda yayılmasına bağlı olarak açıklanabilir. Yapılan Ultrasonik darbe hızı test ölçümlerine göre, 90 günlük kür süresine sahip SKÇ numunesi, 2320 m/s gibi en yüksek ultrasonik darbe hızı ve 43.1 mikro saniye gibi en kısa geçiş süresi ile en iyi performansı sergilemiştir. Aksine, 0 günlük kür süresine sahip olan SK1.5F numunesi, 405 m/s gibi en düşük ultrasonik darbe hızı ve 247 mikro saniye gibi en uzun geçiş süresi ile en zayıf performansı göstermiştir.

Çizelge 4. 7 : Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) Testi değerleri

Sıra No	Karışımlar	Kür Süresi									
		0 günlük		3 günlük		7 günlük		28 günlük		90 günlük	
		μs	m/s	μs	m/s	μs	m/s	μs	m/s	μs	m/s
1	SK	159.9	612	99.9	995	98.1	997	96.7	1014	95.9	1043
2	SK0.5F	169.4	590	114.8	871	106.9	935	104.2	960	97.8	1024
3	SK1.0F	192.9	518	184.2	543	180.3	555	179	574	116.6	858
4	SK1.5F	247	405	229	437	217	461	209	479	203	493
5	SKÇ	77.4	1292	56.6	1799	55.6	1783	51.5	1942	43.1	2320
6	SKÇ0.5F	93.8	1057	60.1	1664	59.1	1692	58.2	1718	49.5	1962
7	SKÇ1.0F	104.6	977	74.1	1379	68.2	1442	63.8	1516	61.9	1613
8	SKÇ1.5F	106.3	956	80.8	1261	73.3	1354	69.7	1399	67.8	1433
9	SKK	111.4	898	110.2	905	109.7	912	107.4	924	99.6	1004
10	SKK0.5F	131.1	763	126.8	786	119.4	838	116.6	858	100.4	996
11	SKK1.0F	136.8	724	128.9	759	123.3	797	118.3	821	102.7	967
12	SKK1.5F	142.8	701	134.2	724	127.1	764	121.9	796	115.4	853
13	SKKÇ	65.6	1524	62.3	1567	59.8	1617	56.9	1706	49.8	1978
14	SKKÇ0.5F	77.4	1292	66.1	1513	65.9	1517	59.7	1643	54.1	1831
15	SKKÇ1.0F	91.7	1091	82.3	1251	72.6	1368	61.8	1597	55.7	1753
16	SKKÇ1.5F	101	990	97.4	1027	78.9	1267	64.2	1544	58.2	1698

Serbest Basınç ile Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) deneyi arasındaki ilişki

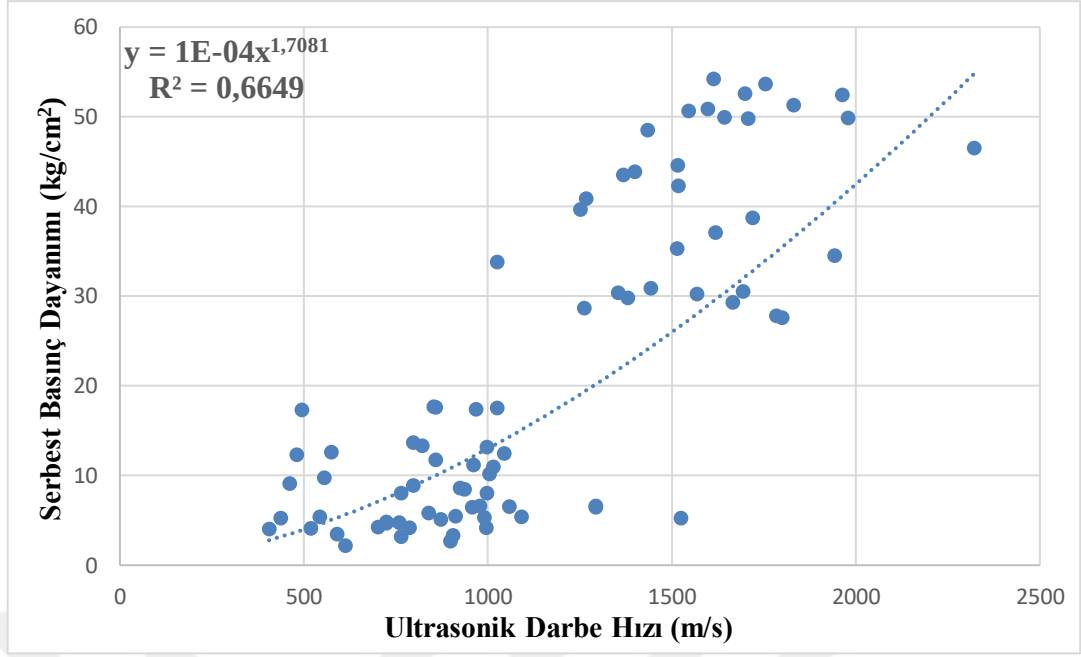
Bu çalışmada, numunenin iç yapısı hakkında bilgi veren ultrasonik darbe hızı ile bu numunenin dayanıklılığını gösteren serbest basınç dayanım değerleri arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla her iki deneyden elde edilen veriler kullanılarak dağılım grafiği oluşturulmuştur. Verilerin dağılımını en iyi tanımlayan üssel eğilim çizgisine ait determinasyon katsayısı (R-kare) değeri belirlenmiştir.

Oluşturulan eğilim çizgisinin ne kadar iyi bir tahmin sağladığını belirten determinasyon katsayısı (R^2), bağımsız değişkendeki değişimlerin bağımlı değişkendeki değişimi ne kadar açıkladığını yüzde olarak gösterir. Bağımsız değişkenlerdeki değişimlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini ölçen (R^2), oluşturulan modelin güvenilirliği hakkında önemli bir ipucu verir. Bu değer, modelin gerçek verilerle ne kadar uyumlu olduğunu gösterir ve değer 1'e yaklaştıkça modelin daha iyi bir tahmin gücüne sahip olduğu anlaşılır [51].

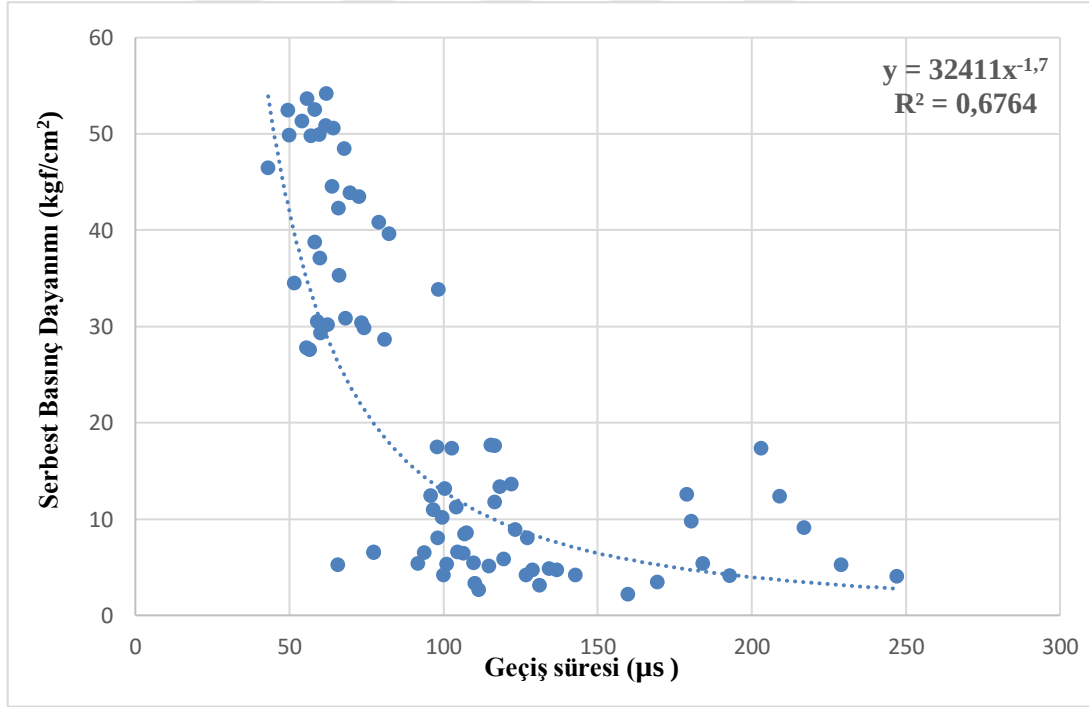
Şekil 4.15'te sunulan üssel dağılım grafiğinde, ultrasonik darbe hızı ile serbest basınç değerleri arasında doğrusal olmayan pozitif bir korelasyon olduğunu görülmektedir. Elde edilen üssel regresyon modeli, bu iki değişken arasındaki ilişkiyi kısmen açıklamakla birlikte, determinasyon katsayısı (R^2) değeri 0.6649 olarak bulunmuştur. Bu değer, model verilerinin yaklaşık %66'sını açıkladığını ve değişkenler arasındaki ilişkinin orta düzeyde iyi olduğunu ifade etmektedir. Sonuç olarak ultrasonik darbe hızındaki artış genellikle serbest basınç dayanımındaki artışla bağlantılıdır ancak diğer faktörlerin de bu ilişkiyi etkileyebileceği düşünülebilir.

Şekil 4.16'da verilen dağılım grafiğinde, ultrasonik dalga hızının numune içerisinde ne kadar sürede ilerlediği ile malzemenin dayanıklılığı (serbest basınç dayanımı) arasındaki ilişki incelenmiştir. Grafik incelendiğinde basınç dayanımı arttıkça, geçiş süresinin üssel olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, iki değişken arasında negatif bir korelasyon olduğunu göstermektedir.

Üssel eğilim grafiğinin determinasyon katsayısı (R^2) değeri 0.6764 olarak bulunmuştur. Bu, geçiş süresindeki değişimin, serbest basınç dayanımındaki değişimin yaklaşık olarak %67'sini açıklayabileceği anlamına gelmektedir. Bu değer, modelin iyi bir uyum sağladığını fakat bütün veri ilişkilerini açıklamadığını belirtir. Diğer bir deyişle, modelin bazı önemli faktörleri göz ardı edebileceğini ya da verilerde gözlemlenmeyen başka bir ilişki olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 4. 15 : Serbest basınç dayanım değerleri ile Ultrasonik darbe hızının arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği



Şekil 4. 16 : Serbest basınç dayanım değerleri ile UPV geçiş süresi arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen yapıların güvenliği hem ülkemizde hem de dünya genelinde inşaat mühendisliğinin en önemli sorunlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle yüksek miktarda su tutan killer, suyla temas ettiklerinde hacim değiştirerek yapıların sağlamlığını tehdit eder. Bu durum, binaların çökmesi, oturması veya hasar görmesi gibi ciddi sorunlara yol açar. Bu nedenle, geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerinin yüksek maliyetli ve çevreye zararlı olması nedeniyle, daha uygun maliyetli ve çevre dostu alternatif çözümler bulmak büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, tekstil atığı poliamid fiber ve çimento kombinasyonunun yüksek plastisiteli kil zeminlerin dayanım özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla yüksek plastisiteli kil ve kil-kum karışımı zeminlere ağırlıkça %10 çimento, %0.5, %1, %1.5 oranında tekstil atığı poliamid fiber ilavesi ile 16 farklı karışım hazırlanmıştır. Deneylerin bu karışımlar, homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra kompaksiyon, serbest basınç ve ultrasonik darbe hızı testi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara dair öneriler aşağıda sunulmuştur.

Farklı oranlarda katkı malzemesi ilave edilen zemin karışımlarının sıkıştırma deneyleri, optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerlerindeki değişimlerin sınırlı bir aralıkta değiştiğini göstermiştir. Atık poliamid fiber katkı oranının %1.0'a kadar artmasıyla optimum su içeriği genel olarak artış gösterme eğiliminde olsa da, daha yüksek oranlarda azalma eğilimi gözlenmiştir. En düşük ve en yüksek optimum su içeriği değerleri sırasıyla sade kil (%15) ve SKÇ1.0F karışımı (%18.2) ile elde edilmiştir.

Çimento ve poliamid fiberin kullanıldığı karışımlarda, %0.5 fiber oranından sonra kuru birim hacim ağırlığında azalma olduğu belirlenmiştir. Farklı karışımların kuru birim hacim ağırlıkları 1.73 ile 1.92 g/cm³ arasında bir aralıkta dağılım göstermiştir. En düşük değer SK1.5F karışımında, en yüksek değer ise SKK karışımında ölçülmüştür.

Çimento ve poliamid fiberin kullanıldığı karışımlarda, %0.5 fiber oranından sonra kuru birim hacim ağırlığında azalma olduğu belirlenmiştir. Bu durum, ilavesinin oranı arttıkça, fiberin düzgün karışmaması ve homojen dağılmamasının bu yapıyı zayıflattığını göstermektedir.

Serbest basınç deneyleri sonucunda, çimento ilavesinin kil ve kil-kum zeminlerin basınç dayanımı önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Poliamid fiber oranının artışı, serbest basınç dayanımını belirli bir noktaya kadar iyileştirmiştir. Ancak, %1.0 fiber oranından sonra bu artış yerini azalışa bırakmıştır. Bu azalmanın sebebi numune hazırlama sürecinde fiberlerin karışımlarda homojen dağıtılamaması ve sıkıştırma işlemi esnasında oluşan topaklanmalardan kaynaklandığı görülmüştür. Poliamid fiber ilavesinin hem sade kil hem de kil-kum karışımlarının dayanımına olan pozitif etkisi, belirli bir eşik değerden sonra negatif hale gelmiştir.

Kür süresinin bariz bir şekilde dayanıma doğrudan etki ettiği görülmektedir. Çimento ve fiber katkılı SKÇ1.0F karışımı, 90 gün kür sonucunda 54.24 kg/cm² değeri ile en yüksek dayanımı göstermiştir. SK karışımı, hiç bekletilmeden denendiğinde (0 günlük kür süresi), 2.21 kg/cm² değeri ile en düşük serbest basınç dayanımı elde edilmiştir.

Ultrasonik Darbe Hızı(UPV) deneyi, farklı kür sürelerinde hazırlanan çimento ve tekstil atığı poliamid fiber katkılı numunelerin dayanım özellikleri ve ses dalgalarını iletim hızı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, malzemenin yoğunluğuna ve gözeneklilik oranı gibi iç yapısındaki değişimlerin ses hızını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Poliamid fiberlerin eklenmesi ile fiber oranı arttıkça malzemenin iç yapısında topaklaşmasına neden olarak homojenliğini bozarak ses dalgalarının yayılmasını zorlaştırdığı görülmüştür. Portland çimentosu içeren numunelerde, diğer numunelere göre daha yüksek ses hızı değerleri ölçülmüştür.

Numunelerin kür süresinin uzamasıyla birlikte, numune içindeki gözeneklilik azalmış, böylece ses dalgalarının yayılımı için daha homojen bir ortam oluşmuş ve sonuç olarak ultrasonik darbe hızı artmıştır. Bu durum, malzeme içindeki bağların güçlenmesi ve daha sıkı bir yapıya kavuşmasıyla da ilişkilidir. Yapılan Ultrasonik test ölçümlerine göre en yüksek ultrasonik darbe hızı (2320 m/s) ve en kısa geçiş süresi (43.1 µs) SKÇ numunesinde, en düşük ultrasonik darbe hızı (405 m/s) ve en uzun geçiş süresi (247 µs) ise SK1.5F numunesinde elde edilmiştir.

Yapılan deneylerin tüm sonuçları değerlendirildiğinde, yüksek plastisiteye sahip kil zeminlerde belirli oranlarda tekstil atığı poliamid fiber kullanımı, zemin iyileştirme çalışmalarında olumlu sonuçlar vermiştir. Bu bulgu, poliamid fiberin bu tür zeminlerde alternatif bir katkı malzemesi olarak çözüm sunabileceğini göstermektedir.

Tekstil sanayi atığı olan poliamid fiberin zemin güçlendirme çalışmalarında kullanılmasının atıkların değerlendirilmesi, çevresel ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlaması sebebiyle geoteknik mühendisliği uygulamalarında çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmanın devamında yapılacak araştırmalarda, deney setinin genişletilmesiyle daha kapsamlı sonuçlar elde edilebilir. Farklı kür süreleri, çeşitli katkı oranları ve farklı zemin türleriyle yapılan deneyler, elde edilen bulguların genellenebilirliğini artıracaktır. Ayrıca, farklı laboratuvar deneylerinin eklenmesiyle, malzemelerin davranışları hakkında daha detaylı ve kapsamlı bilgi edinilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Özaydın, K.** (1995). *Zemin Mekaniği*. İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi.
- [2] **Öztürk, S.** (2007). *Engineering properties of kaolinite clay reinforced with polypropylene fiber* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [3] **Yılmaz, Y. & Sevincan, Ü.** (2010). Polipropilen lif ve uçucu kül katkılı ankara kilinin bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, (pp. 133-142). İstanbul: İstanbul Kültür Üniversitesi.
- [4] **Çetin, A. Y.** (2011). *Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [5] **Chegenizadeh, A. & Nikraz, H.** (2011). Study on strength of fiber reinforced clayey sand. *In Proceedings of the International Conference on Science and Engineering (ICSE 2011)* (pp. 356-359). Research Publishing Services.
- [6] **Çetinkaya, M.** (2012). *Polipropilen liflerin uçucu kül zemin karışımlarında geoteknik özelliklere etkisi*, Y. Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [7] **Sen, A. & Kashyap, R.** (2012). Atık lif malzemeleri kullanılarak toprak stabilizasyonu (Doktora tezi).
- [8] **Olgun, M.** (2013). Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. *Geosynthetics International*, 20(4), 263-275.
- [9] **Peter, L., Jayasree, P. K., Balan, K., & Raj, S. A.** (2016). Laboratory investigation in the improvement of subgrade characteristics of expansive soil stabilised with coir waste. *Transportation Research Procedia*, 17, 558-566.
- [10] **Bhardwaj, A. & Walia, B. S.** (2016). *Influence of Cement and Polyester Fibres on Compaction and CBR Value of Clayey Soil*. (Doctoral dissertation, Dissertation). Punjab Technical University.
- [11] **Erken, A., Ardabili, H. F., Tarhan, A. Ö., & Cantekinler, P. G.** (2017). Tensile strength of cement–fiber treated sands. *In 6th European Geosynthetics Congress* (pp. 25-28).
- [12] **Aysu, Ş.** (2020). *Yüksek plastisiteli kil zeminlerde cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerine etkisi*. (Master's thesis). Konya Teknik Üniversitesi.

- [13] **Taha, M. M., Feng, C. P., & Ahmed, S. H.** (2020). Influence of polypropylene fibre (PF) reinforcement on mechanical properties of clay soil. *Advances in Polymer Technology*, 2020(1), 9512839.
- [14] **Yarbaşı, N. & Kalkan, E.** (2020). Atık PET Elyafarla Güçlendirilmiş Killi Toprakların Mekanik Performansı. *IJESKA*, 2(1), 19-26.
- [15] **Terzi, S.** (2021). *Killi zeminlerin kayma direncine bazalt fiberin katkısı* (Master's thesis). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [16] **Correia, N. D. S. & Rocha, S. A.** (2021). Reinforcing effect of recycled polypropylene fibers on a clayey lateritic soil in different compaction degrees. *Soils and Rocks*, 44(2), e2021061520.
- [17] **Kekeç, E.** (2022). *Alkali dirençli cam elyafı ile rastgele donatılan killi zeminde kayma direnci değişiminin deneysel incelenmesi = Experimental investigation of change in shear resistance on clayey soil randomly reinforced with alkali resistant glass fiber.* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [18] **Shagiwal, J. A.** (2023). *Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin etkisi.* (Master's thesis). Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- [19] **Soğancı, A. S. & Orman, A.** (2024). The Influence of Polypropylene Fiber on High and Low Plasticity Clay. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 178-187. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.41>
- [20] **Sağlam, A.** (1985). Derin kazıların sorunları ve destekleme sistemleri. *Derin Kazılar ve İksa Metodları Sempozyumu*. Boğaziçi University, İstanbul.
- [21] **Sağlam, A.** (2011). Zeminlerin iyileştirilme yöntemleri (Sunum). *Onbirinci Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ulusal Kongresi*.
- [22] **Doğu, O.** (2005). *Jet Grouting Tekniği İle Zemin Islahı.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [23] **Özaydın, K.** (2016). *Zemin Mekaniği*. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [24] Keller Ground Engineering. (b.t.). *Dynamic compaction*. Retrieved September 4, 2024, from <https://www.keller.co.uk/expertise/techniques/dynamic-compaction>
- [25] **Demiröz, A. & Karaduman, M.** (2009). Zemin iyileştirme metotları. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 8(3), 176-192.
- [26] **Bell, F.** (1993). *Engineering Treatment of Soils* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482288971>
- [27] **Mihalis, I. K., Papadopoulos, B. P., Anagnostopoulos, A. G., & Vlavianos, G.** (2003). The contribution of stone columns to the improvement of the stability conditions of embankments on soft clays. In *Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds*, Prague, Czech Republic, 25-28th August 2003 (pp. 827-832).
- [28] **Tunç, A.** (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.

- [29] **Ayan, E.** (2009). *Derin zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulamadan örnekler.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **Fırat, A. T.** (2001). *Jet Grouting Yöntemi İle Temel Takviyesi.* (Doctoral dissertation). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Tunçdemir, F.** (2004). Temel zeminlerinin enjeksiyon tekniğiyle iyileştirilmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 430(2), 59-64.
- [32] **Ergun, U.** (1996). Bir Önyüklem Uygulaması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği. *Beşinci Ulusal Kongresi*, 3, 834-835.
- [33] **Aksoy, S., Kızıroğlu, S., & Kurtulmaz, E.** (1994). Kütahya şehir geçişi düşey bant dren uygulaması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Beşinci Ulusal Kongresi*, Ankara.
- [34] **Mutman, A. & Kavak, A.** (2010). Dinamik kompaksiyon uygulaması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Üçüncü Ulusal Kongresi* (ss. 723-728). İstanbul.
- [35] **Uzuner, B. A.** (2011). *Temel mühendisliğine giriş* (4. Baskı). Derya Kitabevi.
- [36] **Aydın, S.** (2010). *Yenikent (Ankara) yerleşim alanı killilerinin kireç ve uçucu küllle geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [37] **AASHTO.** (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.* American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington DC.
- [38] **Kiliç, G.** (2008). *Çimento ile zemin stabilizasyonu* (Master's thesis). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] **Aral, M.** (2006). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] **Pişkin, E.** (1987). *Polimer teknolojisine giriş.* İnkılap Kitabevi, Ankara.
- [41] **Karaca, K.** (2018). *Kimyasal stabilizasyon tekniklerinin bentonit üzerindeki etkilerinin incelenmesi.* (Master's thesis). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [42] **Poyraz, S. & Ural, N.** (2022). Atık Porselen Karonun (APK) Kil Zeminlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 771-782.
- [43] Bursa Çimento. (2024, 28 Eylül). CEM I 42,5 R Portland Çimento Ürün Özellikleri. <https://www.bursacimento.com.tr/urun/cem-i-425-r-portland-cimento>
- [44] Flokcan Tekstil Sanayi Ticaret Ltd.Şti. (2024). *Atık Poliamid Fiber Test Analiz Sonuçları.* Bursa.
- [45] **TS 1900-1,** (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini.* Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

- .
- [46] **Yaman, İ. Ö.** (2005). *Betonda tahribatsız muayene metodları*. TMMOB Sonbahar Dönemi Seminerleri. İmar Mevzuatındaki Yeni Gelişmeler. (Sunum). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [47] **Özçep, F., Sanlı, O., & Karabulut, S.** (2012). Tahribatsız test yöntemleri ve ultrasonik hız ölçümleri. *Jeofizik Bülteni*, 22(69-71).
- [48] **Birks, A. S. & Green, R. E.** (2007). *Nondestructive Testing Handbook Third Edition*, Volume 7. American Society for Nondestructive Testing.
- [49] **Astm, C. J. A. I.** (2009). 597, *Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [50] **Boz, D. N., Kaymaz, A., & Yıldırım, E.** (2024). Effect of waste fiber and cement additives on compaction properties of high plasticity clay containing soils. 5. *International Baku Conference on Scientific Research* (ss. 207-217). Odlar Yurdu University, Bakü, Azerbaijan.
- [51] **Ölmez, A.** (2007). *Regresyon yaklaşımlarla kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesi*. (Yüksek lisans tezi, s. 166). Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Derya Nur BOZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği