



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



BAZALT FİBER VE MİNERAL KATKILARIN
KOHEZYONLU ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

Onur SARAN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Onur SARAN tarafından hazırlanan “Bazalt Fiber ve Mineral Katkıların Kohezyonlu Zeminlerin Geoteknik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması 18/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

.....

Üye

Prof. Dr. Murat OLGUN

.....

Üye

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

.....

Üye

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Onur SARAN

18.07.2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BAZALT FİBER VE MİNERAL KATKILARIN KOHEZYONLU ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Onur SARAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

2023, 197 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ
Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ
Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Killer plastik davranış gösteren, yüksek su içeriklerinde dayanımları önemli ölçüde azalan ve yüksek miktarda oturma yapabilen zeminlerdir. Bu zeminler üzerinde inşaat yapılabilmesi için zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir. Kil zeminlerin mühendislik özellikleri; çimento, kireç, silis dumanı ve uçucu kül gibi kimyasal katkılarla iyileştirilebilmektedir. Ayrıca, son yıllarda fiberlerin zemin iyileştirmesinde kullanımına yönelik çalışmaların sayısı artmaktadır.

Bu tez çalışmasında; bazalt fiber, uçucu kül ve silis dumanı katkılarının problemli zeminin dayanım, geçirimsizlik, şişme özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların tasarımı Taguchi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Taguchi yöntemine özgü 4 parametrelilik ve 4 seviyeli L_{16} tasarım tablosu kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bazalt fiber- uçucu kül ve bazalt fiber-silis dumanı katkılı numuneler için iki ayrı deney tablosu oluşturulmuştur. Bu amaçla bazalt fiber uzunluğu (6-24 mm), bazalt fiber yüzdesi (%0-1.5), kür süresi (1-56 gün), uçucu kül ve silis dumanı içeriği (%0-15) değişken olarak seçilmiştir. Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla her karışıma %3 kireç ilave edilmiştir. S/N ve varyans analizleri yapılarak parametrelerin deney sonucu üzerindeki etki dereceleri ve optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan katkıların killerdeki kuruma çatlaklarına etkisi belirlenmiştir.

Optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç, yarmada çekme, permeabilite ve ıslak CBR deneyleri yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, dayanım deneyleri için optimum parametreler; 18 mm bazalt fiber uzunluğu, %1 bazalt fiber, %10 uçucu kül ve %10 silis dumanı olarak bulunmuştur. Bu seviyelerden sonra dayanım azalmıştır. Kür süresi arttıkça dayanım artmıştır. Dayanım üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kür süresi, silis dumanı/ uçucu kül içeriği, bazalt fiber içeriği ve bazalt fiber uzunluğu olarak belirlenmiştir. Bazalt fiber uzunluğu ve içeriğinin artması ile permeabilite katsayısı yükselmiştir. Ancak silis dumanı ve uçucu kül içeriği arttıkça permeabilite katsayısı azalmıştır. Kullanılan katkılar, kil numunesinde meydana gelen kuruma çatlaklarının miktarını azaltmada etkili olmuştur. SEM görüntüleri ile zemin numunelerinin içyapısındaki boşlukların durumu ve C-S-H jellerinin oluşumu gözlenerek dayanım performansı ile ilişkilendirilmiştir. Deneysel ve istatistiki çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatürle uyumlu olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bazalt fiber, Silis dumanı, Taguchi metodu, Uçucu kül, Zemin stabilizasyonu

ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATION OF EFFECT OF BASALT FIBER AND MINERAL ADDITIVES ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF COHESIVE SOILS

Onur SARAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ

2023, 197 Pages

Jury

**Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ
Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ
Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Assoc. Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI**

Clays are soils that display plastic behaviors, have substantially lowered strength at high water content values, and can show significant subsidence. To construct on these soils, the engineering properties of the ground need to be improved. The engineering properties of clayey soils can be improved using chemical additives such as cement, lime, silica fume and fly ash. Additionally, in recent years, the number of studies on the use of fibers in soil improvement has been increasing.

In this study, the effects of basalt fiber, fly ash and silica fume additives on the strength, permeability, swelling properties and microstructure of the problematic soil were investigated. Experimental studies were designed using the Taguchi method. Experiments were conducted using the L_{16} design table with 4 parameters and 4 levels specific to the Taguchi method. Two separated experimental tables were created for basalt fiber-fly ash and basalt fiber-silica fume modified samples. For this purpose, varying values of basalt fiber length (6–24 mm), basalt fiber content (0–1.5%), curing time (1–56 days), fly ash and silica fume content (0–15%) were selected. To increase the pozzolanic activity, 3% lime was added to all mixtures. The effects of parameters on experiment results and the optimum parameter levels have been determined through of S/N and variance analysis. Additionally, the influence of additives on the desiccation cracking of clays has been identified in the study.

Specimens that were prepared at the optimum water content and maximum density values were subjected to unconfined compressive, splitting tensile, permeability and soaked CBR tests. According to the results of the statistical analyses, the optimum parameters for the strength experiments were determined as a basalt fiber length of 18 mm, a basalt fiber content of 1%, a silica fume content of 10%, and a fly ash content of 10%. After these levels, the strength has decreased. As the curing time increased, the strength has improved. The most effective parameters on the strength were determined as curing time, silica fume/fly ash content, basalt fiber content, and basalt fiber length, respectively. As the basalt fiber length and content increased, the permeability coefficient also increased. However, with the increase in silica fume and fly ash content, the permeability coefficient decreased. The additives used were effective in reducing the amount of desiccation cracks in the clay soil. With the SEM images, the state of the voids and the formation of C-S-H gels in the microstructure structure of the soil samples have been investigated and associated with the strength performance. The results obtained from experimental and statistical studies have been compatible with the literature.

Keywords: Basalt fiber, Fly ash, Silica fume, Soil stabilization, Taguchi method

ÖNSÖZ

Doktora eğitim sürecimde, değerli bilgi ve laboratuvar tecrübelerinden yararlandığım, hiçbir konuda bilgi ve desteğini esirgemeyen, çalışmanın her aşamasında yardımlarıyla yanımda olan, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Atila Demiröz'e göstermiş olduğu ilgiden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında değerli fikirleriyle tezime katkıda bulunan ve tez izleme komitesinde bulunarak değerli görüşleriyle beni yönlendiren Prof. Dr. Murat Olgun ve Prof. Dr. Niyazi Uğur Terzi hocalarıma teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları esnasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Ekrem Burak Toka, Öğr. Gör. Alican Şenkaya ve Muhanad Isam'a teşekkür ederim.

Bu süreçte sevgisi, sabrı ve motivasyonu ile her zaman yanımda olan eşime, anneme ve kardeşime teşekkürlerimi sunarım.

Onur SARAN
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Şişen Kil Zeminler	4
2.2. Kil Mineralojisi	6
2.2.1. Kaolinit	7
2.2.2. İllit.....	8
2.2.3. Montmorillonit.....	8
2.3. Kil Zeminlerde Şişme Mekanizması.....	8
2.4. Şişme Potansiyelini Etkileyen Faktörler	10
2.5. Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması	12
2.6. Doğrudan Yöntemler (nicel) ile Şişen Kil Zeminlerin Sınıflandırılması	16
2.6.1. Ödometre deney yöntemi.....	16
2.7. Zemin Stabilizasyonu	17
2.7.1. Kimyasal stabilizasyon	19
2.7.1.1. Kireç stabilizasyonu.....	20
2.7.1.2. Uçucu kül.....	24
2.7.1.3. Silis dumanı	24
2.8. Bazalt Fiber.....	25
2.9. Literatür Özeti.....	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1. Zemin Özellikleri	39
3.2. Katkı Malzemelerinin Özellikleri	44
3.2.1. Kireç özellikleri	44
3.2.2. Uçucu kül özellikleri.....	44
3.2.3. Silis dumanı özellikleri	45
3.2.4. Bazalt fiber özellikleri	47
3.3. Deney Programının Tasarlanması.....	47
3.3.1. Taguchi yöntemi	48
3.3.2. Deney programı	50
3.4. Numune Hazırlama	52
3.5. CBR Deneyi.....	55
3.6. Permeabilite Deneyi.....	57
3.7. Kuruma Çatlağı Deneyi	58
3.7.1. Görüntü işleme analizi ile çatlak alanlarının belirlenmesi.....	64

3.7.1.1. Sayısal görüntü	65
3.7.1.2. Görüntü analizi yöntemleri	68
3.7.1.3. Eşikleme.....	69
3.7.1.4. Kontur bulma (findcontours)	69
3.8. Büyük Ölçekli Deneylerin Yapılması.....	71
3.9. XRD ve SEM Analizlerinin Yapılması	75
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	77
4.1. Kompaksiyon (Standart Proktor) Deney Sonuçları	77
4.2. Serbest Basınç Deney Sonuçları	80
4.2.1. BF+SD katkılı karışımların serbest basınç deney sonuçları	80
4.2.2. BF+UK katkılı karışımların serbest basınç deney sonuçları	84
4.3. Yarmada Çekme Deney Sonuçları.....	88
4.3.1. BF+SD katkılı karışımların yarmada çekme deney sonuçları	88
4.3.2. BF+UK katkılı karışımların yarmada çekme deney sonuçları.....	92
4.4. Islak CBR (Kaliforniya Taşıma Gücü) Deney Sonuçları	96
4.4.1. BF+SD katkılı karışımların ıslak CBR deney sonuçları	96
4.4.2. BF+UK katkılı karışımların ıslak CBR deney sonuçları	100
4.5. Tasarım Parametrelerinin Dayanım Deneylerine Etkisi	103
4.6. Permeabilite Deney Sonuçları	111
4.6.1. BF+SD katkılı karışımların permeabilite deney sonuçları	111
4.6.2. BF+UK katkılı karışımların permeabilite deney sonuçları.....	112
4.7. Tasarım Parametrelerinin Geçirimsizliğe Etkisi	114
4.8. Büyük Ölçekli Deney Sonuçları	116
4.9. Kuruma Çatlağı Deney Sonuçları	121
4.10. XRD ve SEM Analizi Sonuçları.....	126
4.10.1. XRD analiz sonuçları.....	127
4.10.1. SEM (Scanning Electron Microscope) analizi sonuçları.....	131
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	140
5.1. Sonuçlar	140
5.2. Öneriler	143
KAYNAKLAR	144
EKLER	155

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_c	: Aktivite
μm	: Mikrometre
e	: Boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
$\gamma_{k,max}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
$\gamma_{k,min}$	: Minimum kuru birim hacim ağırlık
D_r	: Rölatif sıklık
kPa	: Kilopaskal
kN	: Kilonewton
w_L	: Likit limit
w_P	: Likit limit
ω_{opt}	: Optimum su muhtevası
ρ_{kmax}	: Maksimum kuru yoğunluk
S/N	: Sinyal/Gürültü oranı
ε	: Birim deformasyon
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
σ_t	: Yarmada çekme mukavemeti
k	: Permeabilite katsayısı
Å	: Angstrom

Kısaltmalar

ANOVA	: Varyans analizi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Topluluğu
BF	: Bazalt fiber
C-A-H	: Kalsiyum alüminat hidrat
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
CEC	: Katyon değiştirme kapasitesi
CH	: Yüksek plastisiteli kil
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
K	: Kireç
ÖYA	: Özgül yüzey alanı
MSD	: Ortalama karesel sapma
PI	: Plastisite indisi
RGB	: Kırmızı yeşil mavi
SD	: Silis dumanı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SLR	: Tek lens yansıtması
UCS	: Serbest basınç mukavemeti
UK	: Uçucu kül
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflama sistemi
YASS	: Yer altı su seviyesi
XRD	: X-Işını difraktometresi

1. GİRİŞ

Günümüzde hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, gelişmiş ülkelere benzer şekilde Türkiye'de de yapı alanlarının hızla tükenmesine neden olmuştur. Buna bağlı olarak her geçen gün yeni yapılaşma alanlarının açılması zorunlu hale gelmiştir. İhtiyaçların artması ve kullanılabilir iyi temel zemini özelliği gösteren yerlerin azalması, problemli zeminler üzerinde mühendislik yapılarının inşasını zorunlu hale getirmiştir. Problemli zeminler genellikle yeterli taşıma kapasitesine sahip olmayıp, yüksek oturma ya da sıvılaşmaya müsait bir ortam oluşturabilirler. Bir inşaat projesinde bu tür zeminlerle karşılaşıldığında ilk seçenek problemli zemini değiştirmek veya projenin yerini daha iyi mühendislik özelliklerine sahip zeminin olduğu bir yere taşımaktır. Ancak bu seçenekler çoğu zaman ekonomik değildir. Bu durumda en iyi seçenek zemin özelliklerinin yerinde stabilize edilmesidir. Bu amaçla, zemine çeşitli katkı maddeleri ekleyerek yapılan zemin stabilizasyon yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla, farklı zemin türlerine çimento, kireç, uçucu kül ve silis dumanı gibi farklı katkı maddeleri ilave edilerek zeminlerin dayanım durumları ve iyileşme performansları ölçülüp gözlemlenmektedir.

Silis dumanı silisyum metali veya ferro-silisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıkta kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince tozdur. Fırınların düşük sıcaklıklardaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO₂ olarak yoğunlaşarak silis dumanını oluşturur. Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO₂ miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşır (Aksoy, 2010).

Endüstriyel atıkların problemli zeminlerin stabilizasyonu için mühendislik malzemesi olarak kullanılması, hem doğanın daha az kirlenmesine neden olabilir hem de ekonomik faydalar sağlar. Endüstriyel bir atık malzeme olan silis dumanının (SD) beton üretiminde, özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında çimento yerine kullanımına yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Silis dumanının beton özellikleri üzerindeki olumlu etkileri birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Xie ve ark., 2018; Wu ve ark., 2019; Adil ve ark., 2020). SD'nın zemin stabilizasyonu için kullanımı ile ilgili literatür çalışmalarından, SD'nın tek başına veya kireç ve çimento gibi farklı katkı maddeleri ile kombinasyon halinde, şişen zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için katkı maddesi olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. SD birçok endüstride

kullanılmasına rağmen, problemlı zeminlerin iyileştirilmesi üzerindeki potansiyel etkisi üzerine yapılan çalışmaların sayısı nispeten azdır. Mühendislik uygulamalarında yüzeysel stabilizasyon için kullanılan silis dumanı katkı maddesinin performansının problemlı zeminlerde de ele alınması gerektiği açıktır.

Uçucu kül elektrik enerjisi elde etmek için yakıt olarak öğütölmüş kömürün kullanıldığı termik santrallerde veya demir, çelik ve bazı metallerin üretimlerinde olduğu gibi elde edilmek istenen esas ürünün yanı sıra yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Atık olarak elde edilen bu ürünlerin depolanması, atılması büyük güçlükler yaratmakta ve çevre kirliliği dâhil topluma büyük sorunlar getirmektedir. Yan ürünlerin değerlendirilmesi, çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesi ve doğal malzemelerin azalmasını önlemektedir. Atık malzemelerin değerlendirilmesi durumunda çevre sorunları azalmakta, enerji tasarrufu ve ekonomi sağlanmaktadır (Güler ve ark., 2005; Alkaya, 2009). Türkiye’de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Ülkemiz için böyle bir atığın depolanmaması veya değerlendirilmemesi hem çevresel problemler açısından hem de ekonomik açıdan bu konuya yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır (Demiröz, 1996). Uçucu kül, puzolanik özellikler ve dolayısıyla yüksek sıkıştırma mukavemeti veren yüksek kalsiyum ve silikat oksit içeriği nedeniyle zemini stabilize etmek için kullanılmaktadır.

Günümüzde zemin iyileştirmesinde kullanılan geleneksel katkı maddelerine (kireç, çimento vb.) alternatif olarak doğal ve yapay fiberlerin kullanıldığı çalışmaların sayısı sürekli artmaktadır. Stabilizasyon için bambu, şeker kamışı, Hindistan cevizi lifi gibi doğal fiberler ve polipropilen, polyester, polietilen, cam, naylon, çelik lif gibi yapay fiberler kullanılmaktadır.

Fiber türlerinden biri de bazalt fiberlerdir. Bazalt fiberler, 1300-1700 °C’de bazalt taşlarının eritilmesiyle elde edilir. Diğer yaygın olarak kullanılan fiber katkı türlerinden çok daha yüksek çekme mukavemeti ve korozyon direncine sahiptir. Bazalt fiber, 21. yüzyılda doğal yeşil ve çevre dostu bir mineral karışımı olarak kabul edilmiştir (Zuhuang ve Yu, 2015; Wang ve ark., 2020). Betonda yalıtım, ses emilimi, ısıya dayanıklı ve takviyeli malzemeler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Konvansiyonel elyaflarla karşılaştırıldığında, bazalt elyafın fiyatı karbon elyafın 1/10’u kadardır. Ayrıca bazalt elyafın çekme mukavemeti ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri polipropilen elyafından önemli ölçüde yüksektir. Günümüzde, bazalt fiberlerin betonda katkı maddesi olarak kullanıldığı birçok çalışma olmasına rağmen,

zemin stabilizasyonundaki çalışmalar daha azdır. Bazalt elyaf takviyesinin mekanizması için, içerik ve uzunluğun takviye etkisi üzerindeki etkisi net değildir, bu nedenle bazalt elyaf takviyeli killi zeminin mühendislik özelliklerini incelemek önemlidir.

Bu tez çalışmasında, problemlili kil zeminin stabilizasyonunda bazalt fiber, uçucu kül ve silis dumanı katkılarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, ortamdaki kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) miktarını ve dolayısıyla puzolanik etkileşimi arttırmak amacıyla tüm karışımlara %3 kireç ilavesi yapılmıştır. Çalışmanın ana amaçları şu şekilde sıralanabilir;

- Zemin – bazalt fiber – kireç – uçucu kül/silis dumanı karışımların mekanik ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi (serbest basınç, yarmada çekme ve CBR dayanımı, permeabilite),
- Mekanik ve dayanım özellikleri üzerinde bazalt fiber içeriği ve bazalt fiber uzunluğu, kür süresi, uçucu kül ve silis dumanı içeriğinin etkisini belirlemek,
- Kullanılan katkı malzemelerinin kil zeminlerdeki kuruma çatlaklarına etkisini belirlemek,
- Oluşturulan karışımların mikro yapısının karışım değişkenleri ile ilişkisini araştırmak.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Şişen Kil Zeminler

Kil; hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan doğal bir ikincil mineraldir (Gündüz ve Dağdeviren, 2009). Bu tür zeminler, taneler arasındaki çekim kuvvetlerinden dolayı topraklar halinde bulunurlar. Taneler arasındaki çekim kuvvetleri; iyonik bağlar, Van der Waals bağları, hidrojen bağları ile oluşabilmektedir. Bu tür zeminler kohezyonlu zeminlerdir. Kohezyonlu zeminler ıslak iken yumuşak, kuru iken serttir (Uzuner, 2013).

Şişen kil zeminler, su ile temas ettiklerinde ani şişme ve büzülme özellikleri gösteren zeminlerdir. Bu tür zeminler dünya çapında yaygın olarak görülmektedir (Huang ve Wu, 2007; Seco ve ark., 2011). Su içeriğindeki değişime bağlı olarak meydana gelen şişme ve büzülme olayları zeminin taşıma gücünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Hacimdeki değişiklik, çatlamalara ve şişen kil üzerine inşa edilen yapılarda hasara yol açarak beraberinde maddi kayıplara neden olabilir. Özellikle hafif binalar ve kaldırımlar (otoyollar vb.) şişen zeminler nedeniyle sıklıkla zarar görmektedir. Aşağıdaki şekillerde bazı hasar örnekleri verilmiştir. Şişen zeminin varlığından kaynaklanan beton plakların kabarması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Endüstriyel binanın bitişiğindeki beton levhaların kabarması

ABD'nin San Angelo kentindeki bir binanın zemin katındaki şişme kaynaklı hasar Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Şişen zemin nedeniyle zemin katta oluşan hasar

Asfalt bir yolda şişme olayından dolayı meydana gelen boyuna çatlaklar Şekil 2.3'te verilmiştir.



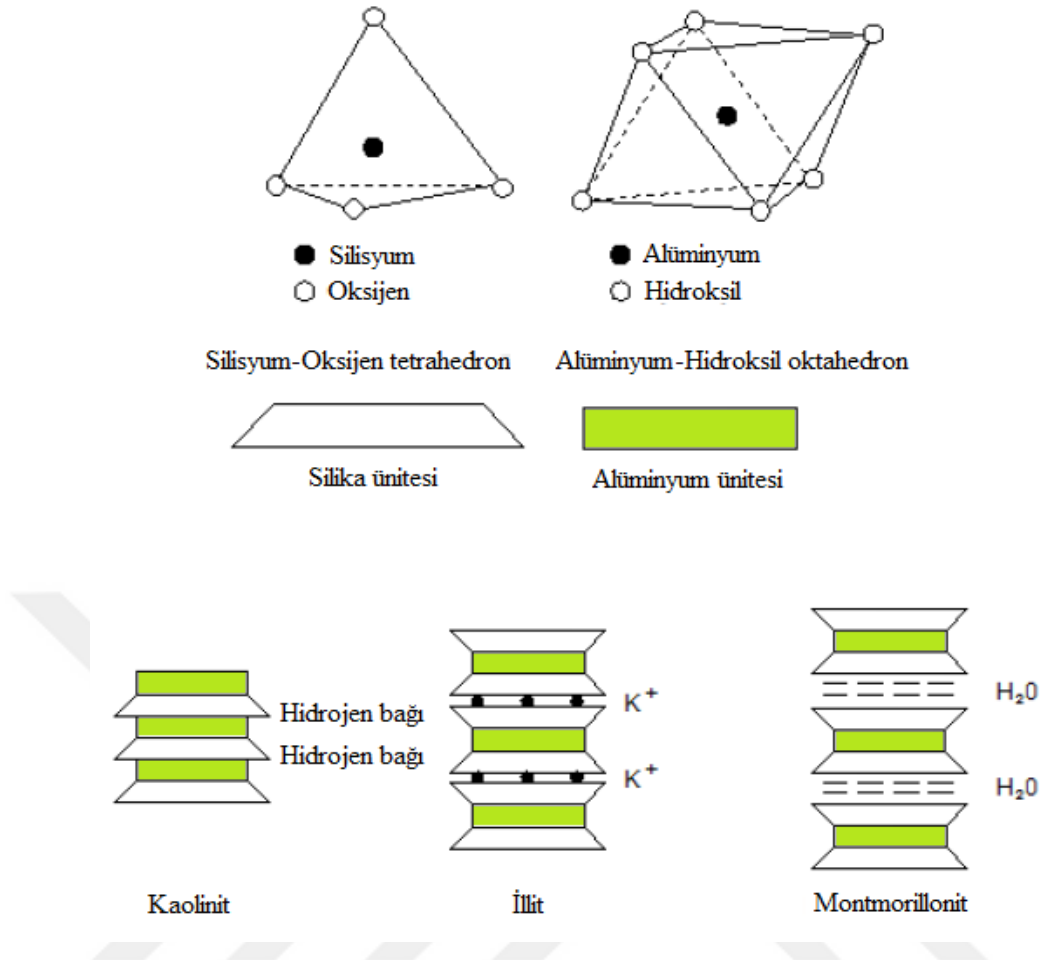
Şekil 2.3. Şişen zemin nedeniyle zarar gören asfalt yol

Şişen zemin sorunları, Antartika kıtası hariç her kıtada mevcuttur (Nelson ve ark., 2015). Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Hindistan, Avustralya ve Sudan gibi ülkeler çok geniş arazilere sahiptir ve bu nedenle özellikle yarı kurak bölgelerindeki inşaat faaliyetlerinde şişen zemin olaylarının birçok örneğine sahiptir (Coduto, 2001). Türkiye'deki şişen kil zeminler, Orta Anadolu'da ve Batı Anadolu'nun bazı bölgelerinde sıklıkla görülmektedir. Ankara, Tokat, Edirne, Kütahya ve Eskişehir şişen kil zeminlerin görüldüğü şehirlere örnektir. Özellikle, Ankara'nın Gölbaşı, Çankaya ve Akyurt ilçelerinde yaygın bir şekilde şişen killerden dolayı hafif yapılarda hasarlar meydana gelmektedir.

2.2. Kil Mineralojisi

Kil hidratasyonu şişme olgusu ile ilgili olmasına rağmen, su ile temas halinde olmak tüm killer için şişmeye neden olmaz (Foster, 1954). Zeminlerin kimyasal stabilizasyonu pH'a, spesifik yüzey alanına, katyon değişim kapasitesine ve zeminin kökenine vb. bağlıdır (Cherian ve Arnepalli, 2015). Tüm bu faktörler kil mineralojisine bağlı olduğundan, bu olgu hem şişme özellikleri hem de stabilizasyon etkinliği açısından önemli bir faktördür.

Kaolinit, illit ve montmorillonit başlıca kil mineralleridir (Verruijt, 2001). Kil minerallerinin kimyasal özellikleri, fiziksel özellikleri ve türü, alüminosilikat katmanları içindeki tabakaların dizilişiyle doğrudan ilişkilidir (Barton ve Karathanasis, 2002). Tetrahedral ve oktahedral levhalar, kil minerallerinin atomik yapısını oluşturan iki ana birimdir (Murray, 2007). Tetrahedron, silikon atomunu çevreleyen merkezlerden dört oksijen atomunun bağlanmasıyla oluşur. Oktahedron oluşumu için katyonlar merkezde ve hidroksiller köşelerde bulunur. Magnezyum, demir ve alüminyum oktahedronu oluşturan ana katyonlardır (Al-Ani ve Sarapaa, 2008). Silika levha, oksijen atomlarının paylaşılması yoluyla tetrahedral birimlerin birleşmesi sonucu oluşur. Paylaşılan hidroksil iyonlarından oktahedronların kombinasyonu, oktahedral tabakaların oluşumuyla sonuçlanır (Knappett ve Craig, 2012). Oktahedral levha, mevcut tek katyon alüminyumsa, gibsit olarak adlandırılır. Brusit, katyon olarak magnezyum içeren oktahedral levhadır (Oweis ve Khera, 1998). Gibbsite levhası nötr olmasına rağmen silis levhası negatif yük taşır (Knappett ve Craig, 2012). Ana kil minerallerinin temel birimlerinin ve yapılarının şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Kil minerallerinin temel birimleri ve ana kil mineralleri (Knappett ve Craig, 2012)

2.2.1. Kaolinit

Kaolinit 1:1 oranında (Silika:Alümina) bir mineraldir (Barton ve Karathanasis, 2002). Kaolinit kristalleri, hidrojen bağı ile birbirine bağlanan tekrarlayan katmanlardan oluşur. Alümina ünitesi ve silika ünitesinin sırasıyla hidroksilleri ve oksijenleri arasında zıt yüzlerde yer alan bir hidrojen bağı oluşur. Hidrojen bağından kaynaklanan kuvvetler güçlüdür ve tabakalar arasına su girmesini engeller (Yong ve Warkentin, 1975).

Kaolinitin spesifik yüzey alanı (ÖYA) 8-20 m²/g, katyon değişirme kapasitesi (CEC) 1-15 meq/100g arasında değişmektedir (Murray, 2007; Al-Ani ve Sarapaa, 2008; Das, 2008; Yong ve ark., 2012). Kaolinit, kayda değer bir şişme potansiyeli göstermeyen düşük aktiviteli bir kil mineralidir (Oweis ve Khera, 1998).

2.2.2. İllit

İllit 2:1 oranında (Silika:Alümina) bir mineraldir (Al-Ani ve Sarapaa, 2008). Her bir illit tabakası, aralarında bir alümina tabakası bulunan iki silis tabakasının birleşimiyle oluşur. İllit tabakaları birbirine potasyum iyonları ile bağlıdır (Yong ve Warkentin, 1975).

İllitin spesifik yüzey alanı 80-120 m²/g, katyon değiştirme kapasitesi 10-40 meq/100g arasında değişmektedir (Al-Ani ve Sarapaa, 2008; Das, 2008; Yong ve ark., 2012). İllit, kaolinite göre daha aktiftir ve orta derecede şişme potansiyeli gösterir (Oweis ve Khera, 1998).

2.2.3. Montmorillonit

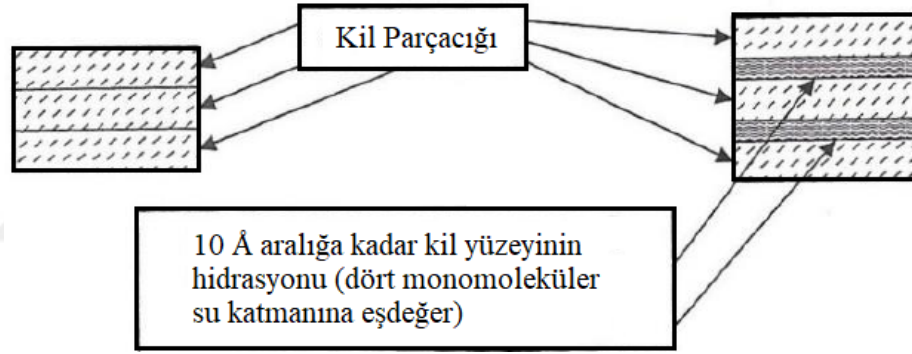
Montmorillonitin temel yapısı illit ile aynıdır (2:1, Silika:Alümina) (Yong ve Warkentin, 1975). Tabakalar arasındaki boşlukta potasyum yerine su molekülleri bulunur ve bu da zayıf bir bağ (Van der Waals bağları) oluşmasına neden olur (Knappett ve Craig, 2012).

Montmorillonitin spesifik yüzey alanı 700-800 m²/g, katyon değiştirme kapasitesi 80-120 meq/100g arasında değişmektedir (Al-Ani ve Sarapaa, 2008; Das, 2008; Yong ve ark., 2012). Montmorillonit, büyük şişme potansiyeline sahip yüksek aktif bir kildir (Yong ve Warkentin, 1975). XRD (X ışını kırılımı) kil minerallerinin hızlıca belirlenmesini sağlar ve numunelerin kimyasal kompozisyonu ile kristalografik yapısı hakkında detaylı bilgi verir. Optik olarak tanımlaması güç olan taneli fazların tanımlanmasında SEM tarama elektronu mikroskobu teknolojileri etkindir (Barton ve Karathanasis, 2002; Al-Ani ve Sarapaa, 2008).

2.3. Kil Zeminlerde Şişme Mekanizması

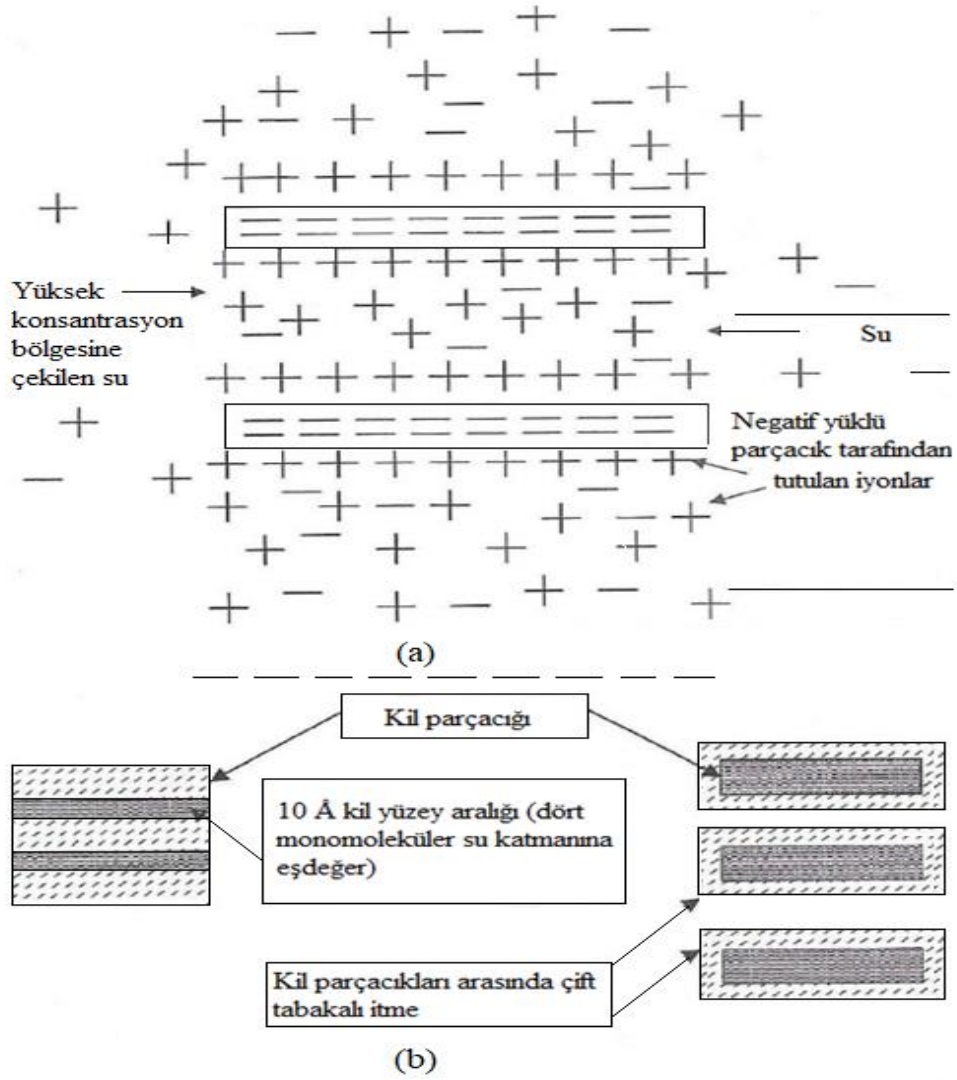
Birçok mühendislik uygulamasında şişmeyi kontrol etmek için zemindeki şişme olayının altında yatan mikroskobik mekanizmaları anlamak esastır. Genişleyen zeminler olarak da bilinen şişen zeminler, suya maruz kaldıklarında hacim olarak şişen zeminlerdir. Bu şişen zeminler tipik olarak suyu çeken ve emen kil mineralleri içerir. Şişen zeminler su ile temas ettiğinde, su molekülleri kil plakaları arasındaki boşluklara çekilir. Daha fazla su emildikçe, plakalar daha fazla birbirinden ayrılmaya zorlanarak

zemin hacminde bir genişlemeye yol açar (Handy, 1995). Smektit grubundan montmorillonit kil mineralleri şişme potansiyeli yüksek olarak değerlendirilmektedir. Smektit grubunun mineralleri, iki silis tabakası arasında bulunan bir oktahedral tabakadan oluşan yapıya sahiptir. Ardışık katmanlar arasındaki bağlanma, Van der Waals kuvvetleri ve yapıdaki yük eksikliklerini dengelemek için mevcut olan katyonlar tarafından yapılır. Bu bağlar zayıftır ve su veya diğer polar sıvıların bölünmesi veya adsorpsiyonu ile kolayca ayrılır. Kil parçacıklarının hidrasyonunun ilk aşamasında, su, yüzeyler üzerinde art arda gelen tek tabakalar halinde adsorbe edilir ve montmorillonit kili parçacıklarını veya katmanlarını birbirinden uzaklaştırır. Bu aşamada yüzey hidrasyon enerjisi şişmeye neden olur (Şekil 2.5). Suyun kil yüzeyi ile etkileşimi, suyun kimyasal potansiyelini azaltır, böylece kimyasal potansiyelde sisteme ilave su akışına neden olan bir gradyan oluşturur (Mitchell, 1993).



Şekil 2.5. Yüzey hidrasyonu (After van Olphen, 1977).

10Å üzerindeki plaka mesafelerinde, yüzey hidrasyon enerjisi artık önemli değildir ve elektriksel çift katmanlı itme, plakalar arasındaki ana itme kuvveti haline gelir (Van Olphen, 1977). Negatif yüklü kil yüzeyinde tutulan değiştirilebilir katyonlar, sudan daha yüksek bir konsantrasyona sahiptir. Katyonlar hareket etme kabiliyetine sahip olmadığından, konsantrasyon farkını eşitlemek için mineral tabakalarının arasına su girer. Sonuç olarak, su, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi mineral katmanlarını açmak için bir ozmotik basınç kuvveti uygular (Mitchell, 1993).



Şekil 2.6. (a) Mineral tabakalar arasında su girişi ile zeminin şişmesi, (b) parçacıklar arası şişme (Mitchell, 1993).

2.4. Şişme Potansiyelini Etkileyen Faktörler

Zemin özellikleri, çevresel faktörler ve gerilme koşulları, şişen zeminlerin şişme özelliklerini etkileyen ana faktörlerdir (Jayalath vd., 2016).

Zemin özellikleri:

- Kilin mineralojik bileşimi (montmorillonit, vermikülit vb. mineraller zeminde hacim değişikliğine neden olurlar. İllit ve kaolinitler ise, tane boyutlarının çok küçük olduğu durumlarda şişebilirler).
- Kilin yapısı (topaklanmış kil parçacıklarının dağılmış parçacıklara sahip killere kıyasla daha fazla şişme eğilimi vardır),

- Zemin suyunun kimyasal bileşimi (artan katyon konsantrasyonu ve katyon değeri, şişmeyi engeller. Örneğin, zemin suyu içerisindeki Mg^{2+} katyonları, Na^+ katyonlarından daha az şişmeye neden olur),
- Plastisite (yüksek likit limite sahip zeminler daha yüksek şişme ve büzülme potansiyeline sahiptir),
- Kilin; katyon değiştirme kapasitesi (CEC), özgül yüzey alanı (ÖYA) ve aktivitesi (A_c) (daha yüksek CEC, ÖYA ve A_c 'ye sahip zeminler killi daha yüksek şişme potansiyeline sahiptir.)
- Zeminin su emme özelliği (zemin emmesi, doymamış zeminlerde negatif boşluk basıncıyla ifade edilen, bağımsız efektif gerilme değişkenidir. Doygunluk, yer çekimi, boşluk boyutu ve şekli, yüzey gerilmesi, zemin tanelerinin elektriksel ve kimyasal karakteristikleri ve suya bağlıdır) şişme potansiyelini etkileyen faktörlerdir.

Çevresel faktörler

- İklim (şişen kil zeminler dünyanın kurak ve yarı kurak bölgelerinde çok yaygındır),
- Sıcaklık değişimleri (ortam sıcaklığındaki bir artış, zemindeki nemin daha serin alanlara, çoğunlukla temellerin veya kaldırım döşemelerinin altına doğru dağılmasına neden olarak altlarında genişlemeye neden olur.)
- Nem değişimleri (nemdeki değişiklikler, esas olarak iklim, yeraltı su seviyesi, drenaj ve yapay su kaynakları, bitkiler, permeabilite ve sıcaklıktan etkilenir).
- Başlangıç su içeriği ((kuru şişebilen bir kil zeminin suya eğilimi veya emmesi, yüksek su muhtevsındaki aynı zeminden daha fazladır),
- Yer altı su seviyesi,
- Yüzey drenajı ve yapay su kaynakları (yüzey drenajından su birikmesi veya insan yapımı hidrolik yapıdan sızıntı şişmeye katkıda bulunur),
- Permeabilite
- Bitki örtüsü şişme potansiyelini etkiler.

Gerilme koşulları

- Gerilme tarihçesi (aynı şartlar altında, normal konsolide killere aşırı konsolide killere kıyasla daha yüksek şişme potansiyeline sahiptir),
- Zemin profili ve mevcut gerilme ve yükleme durumu şişme potansiyelini etkileyen önemli faktörlerdir (yükleme ya da sürşarj yükü taneler arası itki kuvvetlerini dengeler ve şişmeyi azaltır).

Şişen zeminlerden kaynaklanan problemler tipik olarak üst birkaç metrede (yani aktif bölge) su içeriğindeki artışın bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu üst birkaç metredeki su içeriği, iklimsel ve çevresel faktörlerden etkilenir. Bu nedenle, aktif bölgenin derinliği zamanla değişebilir. Daha derin tabaklarda şişme olayı oldukça nadir olduğundan, yüzeye yakın zemin özelliklerinin bilinmesi şişmeye karşı iyileştirici önlemler almak için çok önemlidir (Nelson ve Miller, 1992).

2.5. Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması

Şişen zeminler, dünya genelinde yapılara, özellikle hafif binalara ve kaldırımlara zarar verir. Örneğin, şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık ekonomik kayıpların, depremler ve seller dâhil olmak üzere diğer tüm doğal afetlerden daha fazla olduğu bildirilmiştir (Jones ve Holtz, 1973). Bu nedenle, bir mühendislik yapısının analiz ve tasarım aşamasına kapsamlı zemin sınıflandırmasının uygun ve sağlam bir değerlendirmesinin dâhil edilmesi esastır.

Şişen zeminleri tanımlamak ve sınıflandırmak için doğrudan ve dolaylı yöntemler kullanılabilir. Ödometre testleri, şişme yüzdesini ve şişme basıncı değerlerini belirlemek için doğrudan bir ölçüm yöntemi olarak kullanılabilir. Dolaylı yöntemler ise tane boyutu dağılımı, Atterberg limitleri (likit limiti, plastik limit, büzülme limiti), plastisite indisi, aktivite ve katyon değiştirme kapasitesi gibi zeminin mineralojik ve spektral özellikleri kullanılarak şişme potansiyelinin belirlenmesini kapsar. X-Işını Kırınımı veya Diferansiyel Termal Analiz gibi mineralojik tanımlama prosedürleri de kullanılabilir.

Dolaylı sınıflandırma yöntemleri genellikle, şişen zeminlerin beklenen genişlemelerine göre "kritik olmayan" ile "çok kritik" arasında ifade edildiği niteliksel bir derecelendirme sunar. Bununla birlikte, benzer nitelik derecesine sahip herhangi iki zemin, çok farklı şişme özellikleri gösterebilir (Seed ve ark., 1962). Bu nedenle tatmin

edici bir sınıflandırma yöntemi, gerçek gerilme verileri ve niteliksel derecelendirme ile zemin özelliklerini (yani indeks ve/veya mineralojik özellikler) içermelidir.

Şişme potansiyelini belirlemenin en basit yolu Peck ve ark. (1974) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde; plastisite indisi (PI) kullanılarak zeminin şişme potansiyelinin belirlenebileceği belirtilmiştir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Plastisite indisi (PI) ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Peck ve ark., 1974)

Plastisite İndisi (PI, %)	Şişme Potansiyeli
0-15	Düşük
0-35	Orta
20-55	Yüksek
>35	Çok Yüksek

Zapata ve ark. (2006), şişme potansiyelinin tek başına plastisite indisi ile zayıf bir korelasyon gösterdiğini belirlemiştir. Şişme potansiyelini plastisite indisi ve No. 200 (75 µm) elekten geçen zemin yüzdesi ile ilişkilendirerek korelasyonun önemli ölçüde iyileştiği sonucuna vardılar.

Parçacık boyutunu dikkate alan başka bir yöntem Skempton (1953) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, Atterberg limitleri ve kil yüzdesi (2 µm boyutundan küçük) kullanılarak kilin aktivitesi (A_c) hesaplanmaktadır. Skempton aktiviteye göre şişen zeminleri üç sınıfa ayırmıştır (Çizelge 2.2). Aktif killer, en fazla şişme potansiyeline sahip zemindir.

Çizelge 2.2. Aktivite (A_c) ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Skempton, 1953)

Aktivite değeri (A_c)	Aktiflik derecesi
$A_c < 0.75$	Aktif değil
$0.75 < A_c < 1.25$	Normal
$A_c > 1.25$	Aktif

Chen (1988), şişme potansiyelini belirlemek için No. 200 elekten geçen yüzde, likit limit değeri ve SPT vuruş sayısının kullanıldığı bir ilişki önermiştir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Şişme potansiyelinin arazi ve laboratuvar deney sonuçları ile ilişkisi (Chen, 1988)

Deney verileri			Şişme derecesi		
No.200'den geçen (%)	Likit limit (%)	SPT N değeri	Muhtemel Şişme (%)	Şişme basıncı (kPa)	Şişme Potansiyeli
<30	<30	<10	<1	50	Düşük
30~60	30~40	10~20	1~5	120~250	Orta
60~95	40~60	20~30	3~10	250~1000	Yüksek
>95	>60	>30	>10	>1000	Çok Yüksek

Charlie ve ark. (1984), şişme yüzdesi ve şişme basıncına bağlı olarak hafif yapılarda meydana gelebilecek hasar boyutunu sınıflandırmıştır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. Hacim değişikliği, şişme basıncı ve hafif yapılardaki muhtemel hasarlar arasındaki ilişki (Wayne ve ark., 1984)

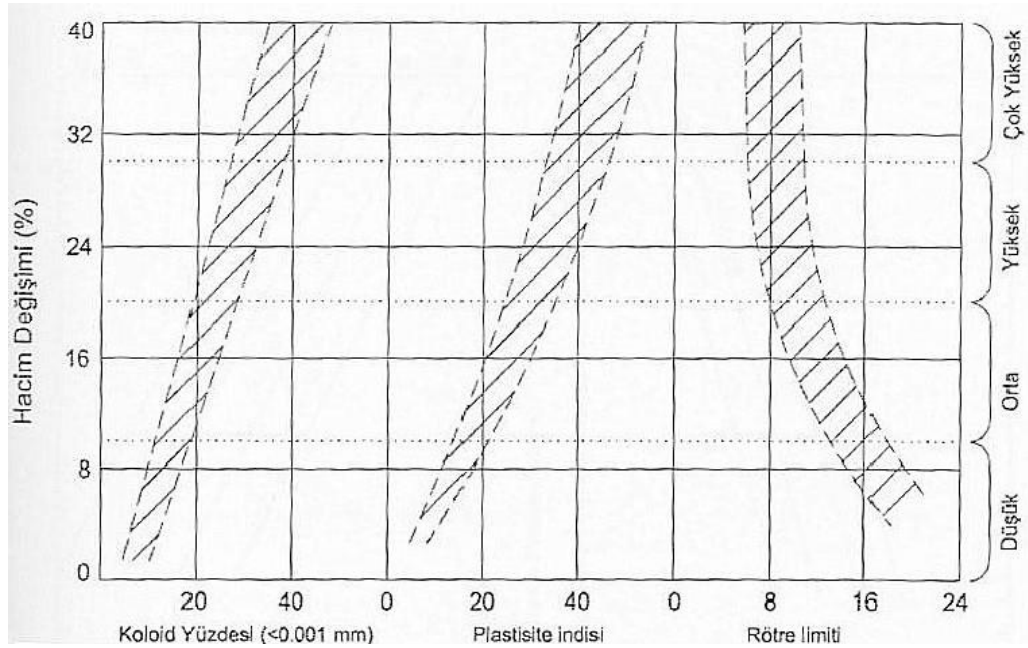
Hacim Değişikliği (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Hafif Yapılardaki Olası Hasar
0~1.5	<50	Düşük
1.5~5	50~250	Orta
5~25	250~1000	Yüksek
>25	>1000	Çok Yüksek

Holtz ve Gibbs (1986)'e göre örselenmemiş zemin numunelerinin şişme davranışını etkileyen faktörler Çizelge 2.5'te grafiksel gösterim ise Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Şişen zeminlerin, kolloid içeriği, plastisite indisi ve rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması (Holtz ve Gibbs, 1986)

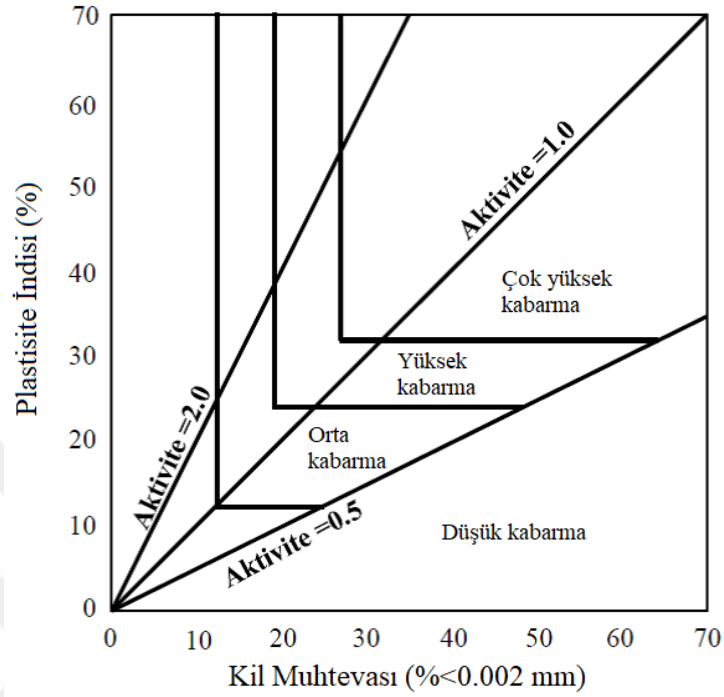
Kolloid içeriği (<0,001 mm)	Plastisite İndisi (PI)	Rötre Limiti (%)	Muhtemel Şişme* (%)	Şişme Derecesi
>28	>35	<11	>30	Çok Yüksek
20~31	25~41	7~12	20~30	Yüksek
13~23	15~28	10~16	10~20	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

*:6.9 kPa sürşarj yükü altında



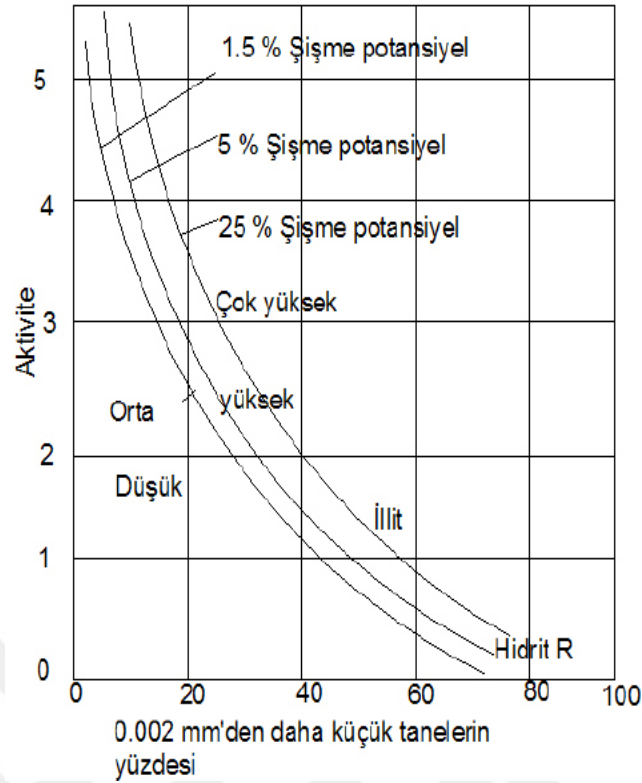
Şekil 2.7. Koloid yüzdesi, plastisite indisi ve rötre limit ile hacim değişimi ilişkileri (Holtz ve Gibbs, 1986)

Van der Merwe (1964), şişme potansiyelini belirlemek için plastisite indisi ve kil yüzdesine dayanan bir abak geliştirmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Van Der Merve tarafından önerilen sınıflandırma sistemi (Van Der Merve, 1964)

Seed ve ark. (1962), standart Proktor enerjisi ile optimum su muhtevasında sıkıştırılan kil zeminlerin, 6.9 kPa sürşarj yükü altında şişme davranışları üzerine yaptıkları çalışmada, aktivite ve kil yüzdesine dayanan bir abak geliştirmişlerdir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Kil yüzdesi ve aktivite ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Seed ve ark., 1962)

2.6. Doğrudan Yöntemler (nicel) ile Şişen Kil Zeminlerin Sınıflandırılması

Doğrudan (nicel) yöntemlerde, zeminin şişme potansiyeli deney sonuçlarına bağlı olarak belirlendiği için bu yöntem zeminde meydana gelecek şişme olayının gerçek fiziksel ölçümünü ifade etmektedir. Bu nedenle, şişme potansiyelinin belirlenmesinde nicel yöntemlerin kullanılması daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Zeminin şişme potansiyelinin ve şişme parametrelerinin doğrudan belirlenebilmesi için geliştirilmiş birkaç deney yöntemi vardır. Ancak, genellikle klasik ödometre deney düzeneği kullanılarak örselenmiş ya da örselenmemiş zemin numunelerin şişme potansiyeli belirlenmektedir.

2.6.1. Ödometre deney yöntemi

Nicel yöntemlerde, zeminin şişme potansiyeli ödometre (konsolidasyon) cihazı kullanılarak elde edilmektedir. Ancak şişme potansiyeli için birden fazla tanımlama mevcut olup uygulamada ise çok sayıda farklı deney metodu önerilmiştir. Şişme davranışı ve şişme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D 4546'da üç farklı

ödometre deney metodu (metot A, metot B, metot C) bulunmaktadır. Bu yöntemlerin tümünde zemin numunesindeki yanal deplasmanlar sınırlandırılmakta ve yalnızca eksenel yükleme yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında, kil zeminin şişme yüzdesini ve şişme basıncını belirlemek için A yöntemi kullanılarak ödometre deneyi yapılmıştır.

A Yöntemi:

Bu yöntemde zemin numunesi, sadece üzerine konulan poroz taş ve yükleme plakasının oluşturduğu 1 kPa'lık sürşarj yükü altında suya doyurularak şişme tamamlanıncaya kadar beklenir. Sonra numunenin şişme öncesindeki boşluk oranı (numunenin başlangıç yüksekliği) elde edilinceye kadar klasik ödometre deneyindeki gibi artan yük kademeleri altında numune yüklenir. Her yük artırımını öncesinde, numunenin uygulanan yük altında tamamıyla konsolide olmasına izin verilir.

Bir boyutlu ödometre koşullarında, numunenin kesit alanı sabit tutulduğundan dolayı serbest şişme yüzdesinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$S (\%) = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada,

S: Serbest şişme yüzdesi (1 kPa sürşarj yükü altında),

H₀: Numunenin başlangıç yüksekliği,

H₁: Şişme sonrasındaki numune yüksekliğidir.

ASTM D4546'ya göre şişme basıncı, şişme tamamlandıktan sonra numuneyi eski haline (boşluk oranı, yükseklik) getirecek basınç olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemin en önemli avantajı, tek numune ile yalnızca şişme potansiyeli değil zeminin konsolidasyon parametreleri de hesaplanabilmektedir (ASTM D4546, 2003).

2.7. Zemin Stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonu, diğer mühendislik ve fiziksel özelliklerin yanı sıra belirli bir zemin kütlelerinin mukavemetini ve stabilitesini geliştirmek için kullanılan çeşitli yöntemleri içeren bir süreç olarak tanımlanabilir. Genellikle herhangi bir inşaat işi için mevcut olan zeminin kullanım amacına uygun olmadığı durumlarda kullanılır. Özellikle yumuşak zeminler olarak nitelendirilen siltli ve killi zeminler, başta mukavemet olmak üzere elverişsiz mühendislik özelliklerine sahiptirler. Söz konusu elverişsiz mühendislik özelliklerini, inşa edilmesi düşünülen yapı göz önünde bulundurularak güçlendirmeye zemin iyileştirme denilmektedir. Stabilizasyon yoluyla, zeminin kayma mukavemeti ve

taşıma kapasitesi artırılır ve şişme-büzülme özellikleri kontrol altına alınarak daha iyi mühendislik özelliklerine sahip zemin ortamı oluşturulur (Archibong ve ark., 2020).

Zemin iyileştirme yöntemlerinin temel amacı, mühendislik özellikleri açısından zayıf olan zeminlerin mukavemet, dayanım, durabilite ve permeabilite gibi özelliklerinin iyileştirilmesidir.

Zemin stabilizasyon yönteminin seçiminde; zaman, maliyet ve uygulanabilirlik faktörleri dikkate alındığında;

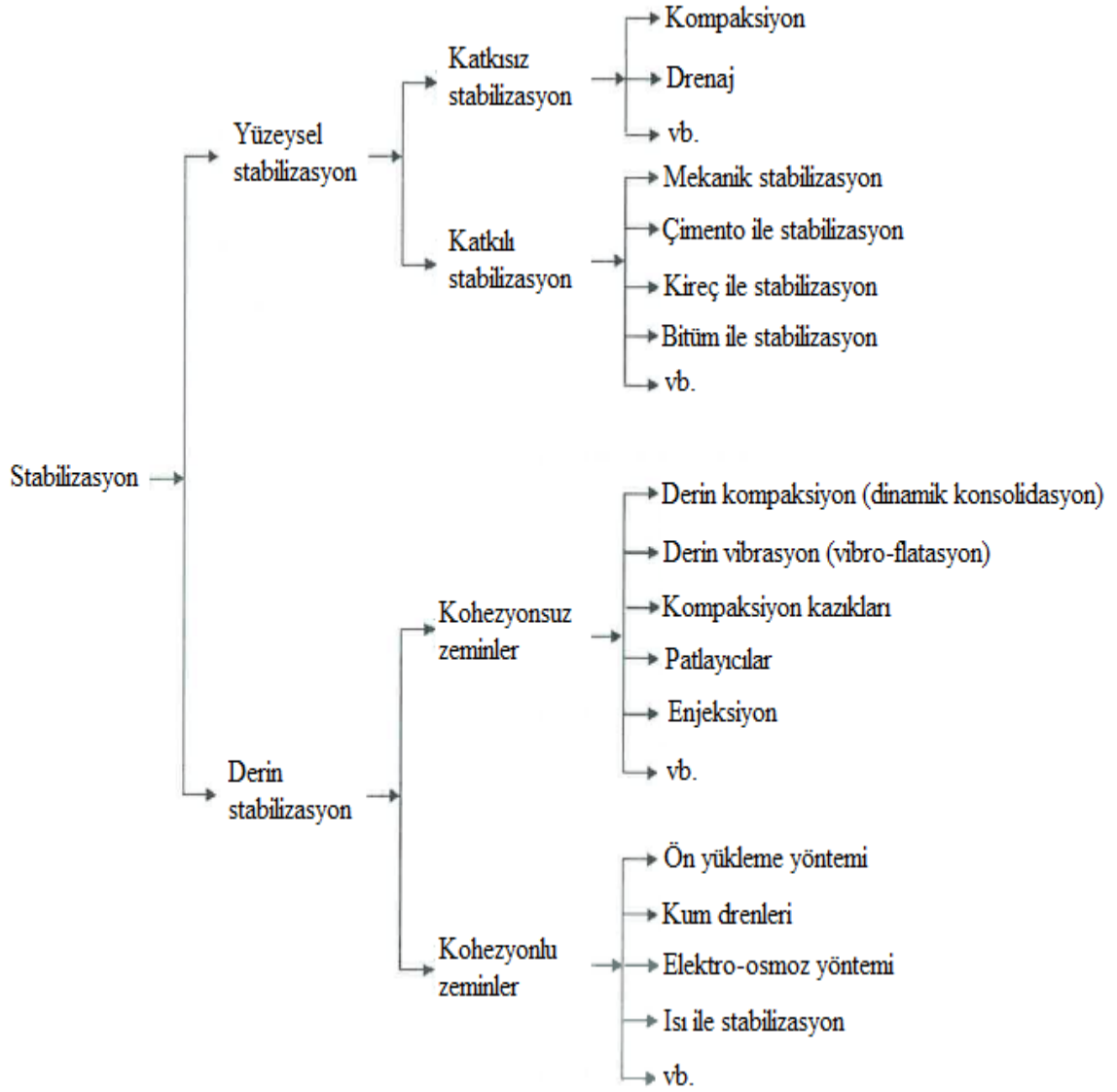
- Mevcut problemin türü,
- Zemin profilinin özellikleri (Granülometri, kıvam, aşırı konsolidasyon oranı, YASS, vb.)
- İyileştirilmesi gereken zemin tabakasının derinliğine,

göre stabilizasyon yöntemi farklılık gösterir.

Zemin iyileştirme yöntemleri, uygulama açısından başlıca üç ana gruba ayrılabilir;

1. Ön yükleme, YASS'nin düşürülmesi, ısıtma işlemleri gibi geçici zemin iyileştirme yöntemleri,
2. Patlama ile sıkıştırma, yüzey kompaksiyonu ve dinamik konsolidasyon gibi yöntemler ile zemine herhangi bir katkı eklemeyen kalıcı olarak yapılan zemin iyileştirme yöntemleri,
3. Jet grout, derin karıştırma ya da kimyasal stabilizasyon gibi zemine farklı katkı maddeleri ekleyerek yapılan kalıcı iyileştirme yöntemleri.

Zemin stabilizasyon yöntemlerinin seçiminde en önemli etkenlerden biri de uygulama derinliğidir. Uygulama derinliğine göre zemin stabilizasyon yöntemleri yüzeysel ve derin stabilizasyon olarak iki ana gruba ayrılır. Uzun (2013), zemin türlerine göre uygulanabilecek zemin stabilizasyon yöntemlerini vermiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Zemin stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013)

Bu tez çalışmasında katkı maddeleriyle zemin iyileştirmesi yapıldığı için aşağıda kimyasal stabilizasyon yöntemleri açıklanmıştır

2.7.1. Kimyasal stabilizasyon

Zeminin olumsuz etkilerini gidermek ya da zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla zemine puzolanik vb. özelliğe sahip maddeler katarak kimyasal reaksiyon sonucu oluşan zemin ıslahına kimyasal stabilizasyon denir. Uygulamada en çok kullanılan kimyasal stabilizasyon maddeleri Portland çimentosu, kireç, bitüm, kalsiyum klorür, sodyum klorür ve selüloz atıklarıdır.

Katkı maddeleri ile stabilizasyon, stabilize edilecek zemin içerisinde homojen şekilde bir stabilizatör eklemek suretiyle zemin kütlesi içerisinde kimyasal reaksiyon oluşturup zeminin istenen mühendislik değerlerine getirilmesidir. Zemin plastisitesini azaltıp kullanılabilir hale getirmek için kullanılan stabilizatörün efektif olması isteniyorsa temelinde yeterli miktarda Ca^{++} iyonları bulunmalıdır. Pozolanik reaksiyonun en efektif şekilde gerçekleşmesi ise alümina ve silis'in yüksek çözünürlüğü ile olur, bunlar sayesinde kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ve kalsiyum-alüminat-hidrat (C-A-H) formları oluşur ve istenilen sonuca varılır. Kimyasal stabilizasyon uygulanırken ve stabilizatörleri seçerken şu faktörler göz önünde bulundurulur.

- Stabilize edilecek zemin tipi,
- Stabilizasyonun amacı,
- İstenen zemin iyileştirme tipi,
- Stabilize edilecek zeminin mukavemeti ve dayanıklılığı,
- Maliyet,
- Çevre koşulları.

Geleneksel kimyasal stabilizatörler şunlardır:

- Çimento,
- Kireç,
- Uçucu kül,
- Bitümlü malzemeler,
- ve yukarıdaki malzemelerin kombinasyonları.

2.7.1.1. Kireç stabilizasyonu

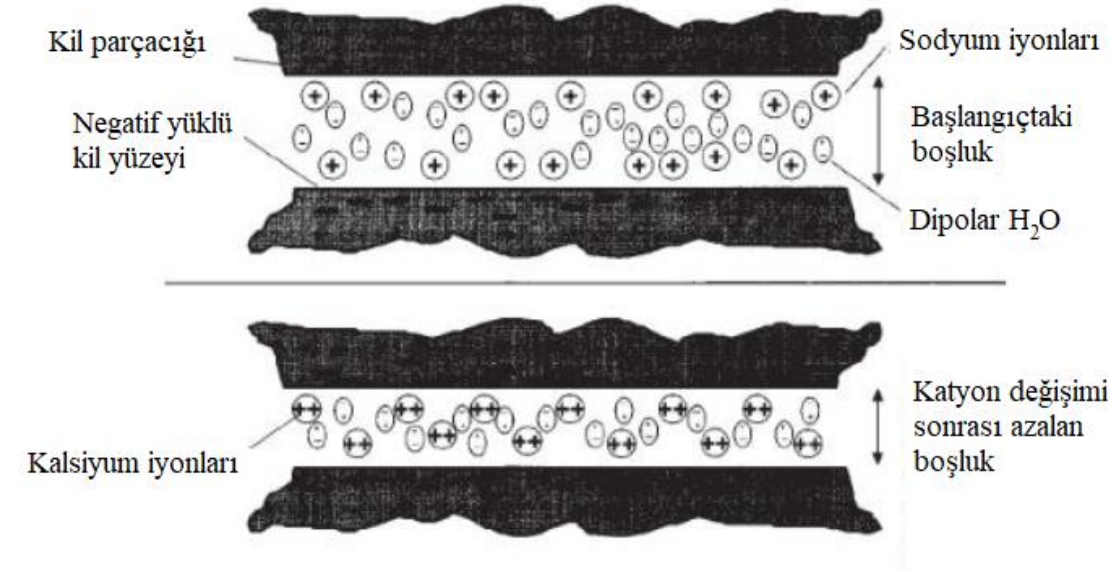
Kireç, insanlığın kullandığı ilk kimyasal yapı malzemelerinden biridir ve birçok zemini stabilize etmek için kullanılabilir. Killi zeminlere kireç eklenmesi, kilin plastisitesini ve şişme potansiyelini azaltır. Kireç stabilizasyonu, zemindeki şişme miktarını azaltmak ve zeminin işlenebilirliğini artırmak amacıyla birçok projede kullanılmıştır. Özellikle yol projelerinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Kireç

ilavesi ayrıca malzemenin kompaksiyon özelliklerini de etkiler. Kireç ilavesi ile zeminin optimum su muhtevası artarken maksimum kuru yoğunluğu azalır.

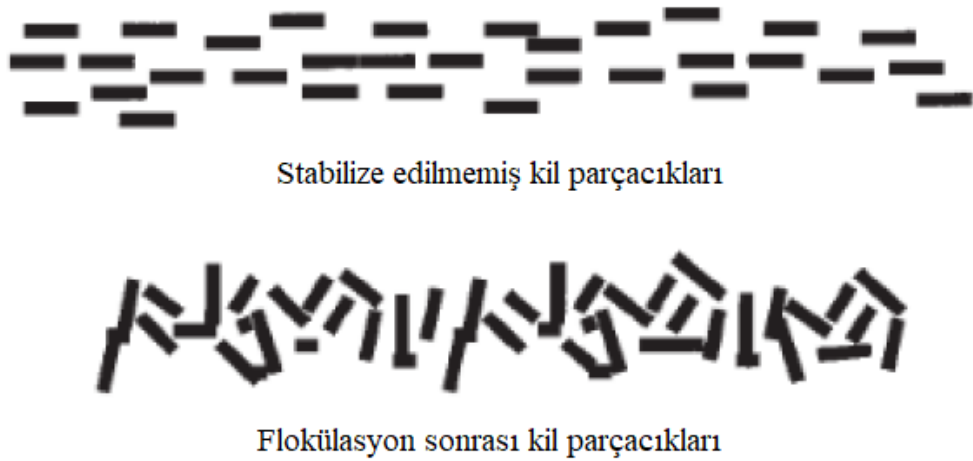
Şişen kil zeminleri stabilize etmek için kullanılan farklı kireç türleri vardır. Bu kireçlerden yüksek kalsiyumlu sönmüş kireç ve sönmemiş kireç uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Şişen kil zeminleri stabilize etmek için gerekli olan kireç miktarının zeminin kuru ağırlığının %2-8'i arasında olduğu belirtilmiştir (Chen, 1988). Sönmemiş kireç (CaO), kalkerin (kireç taşı) yüksek sıcaklıklarda işlenmesiyle elde edilen bir malzemedir. Sönmüş kireç (Ca(OH)₂) ise, sönmemiş kireç ve su arasındaki kimyasal reaksiyonla oluşur.

Zemin içerisine kireç eklendiğinde, kireç ile kil zemin arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşir. Kireç ve kil zemin arasında sırasıyla; katyon değişimi ve flokülasyon, puzolanik reaksiyonlar ve karbonatlaşma olayları gerçekleşir.

Katyon değişimi ve flokülasyon: zemin ve kirecin karışması ile hemen meydana gelen hızlı reaksiyonlardır (Mallela ve ark., 2004). Liyotropik seriler katyonların yer değiştirebilirliğini şu şekilde vermektedir; $Fe^{+++} > Al^{+++} > Cu^{++} > Ba^{++}=Sr^{++} > Ca^{++} > Mg^{++} > Cs^{+} > Rb^{+} > K^{+}=NH_4^{+} > Li^{+} > Na^{+}$ (Cherian ve Arnepalli, 2015). Kireçten salınan Ca^{++} iyonları, zeminde bulunan Na^{+} , K^{+} ve H^{+} iyonları ile yer değiştirir. Tek değerlikli iyonların kalsiyum iyonları ile yer değiştirmesi, zemin parçacıkları arasındaki çekimin artmasına neden olur (Mallela ve ark., 2004). Floklar, çekim ve katyon değişimi sonucunda zemin taneciklerinin birbirine yaklaşmasıyla oluşur. Bu olaya flokülasyon denir (Al-Rawas, 2005). Katyon değişimi ve flokülasyon, daha düşük şişme potansiyeli, plastisite ve daha yüksek geçirgenlik katsayısı ile daha granüler bir yapı ile sonuçlanır (Seco ve ark., 2011). Katyon değişimi ve topaklanma reaksiyonlarının şematik temsilleri sırasıyla Şekil 2.11 ve 2.12'de sunulmaktadır.



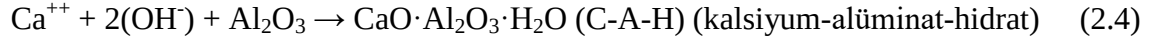
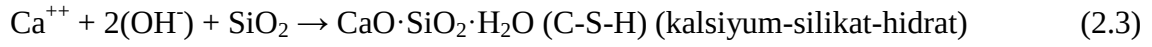
Şekil 2.11. Katyon değişiminin şematik gösterimi (Prusinski ve Bhattacharja, 1999)



Şekil 2.12. Flokülasyonun şematik gösterimi (Prusinski ve Bhattacharja, 1999)

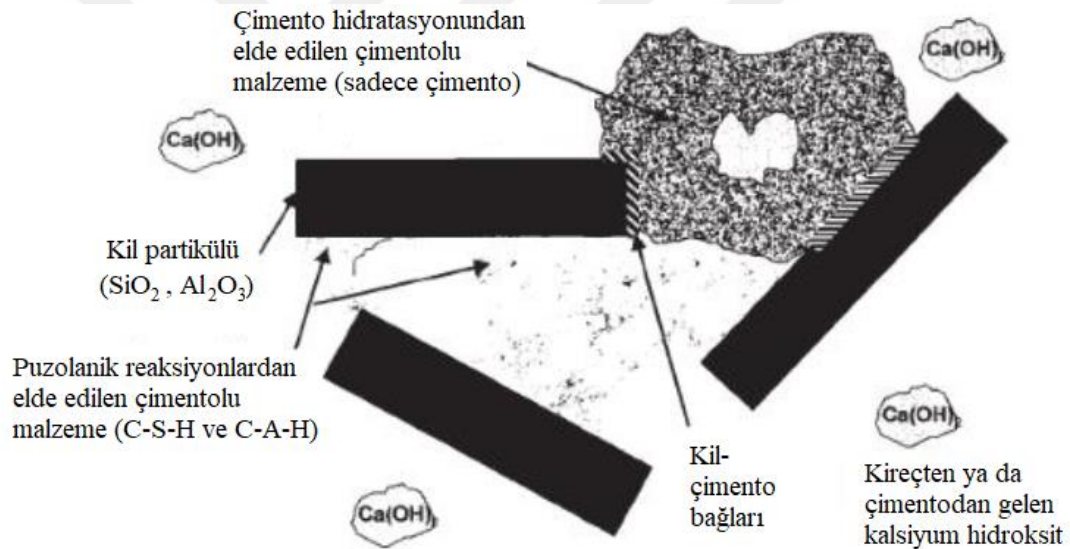
Puzolanik Reaksiyon: zemin, su ve kirecin bir araya gelmesi durumunda farklı çimentolaşmalar oluşur. Zemin içerisindeki kil mineralleri, farklı puzolan maddeleri (silis ve alümina) içerir. Zemine yeterli miktarda kireç eklenmesi, karışımın pH'nın yaklaşık 12.4'e yükselmesine neden olarak kilden silis ve alüminanın çözünmesine neden olur (Seco ve ark., 2011). Oluşan karışımdaki pH değeri oldukça önemlidir. Çünkü puzolan maddeyi oluşturan silika ve alüminanın çözünmesi için pH değerinin yüksek olması gerekir. Kireçten gelen Ca ile zeminden gelen silis veya alümina arasındaki reaksiyona puzolanik reaksiyonlar denir. Puzolanik reaksiyonlar, uzun vadeli mukavemet kazanımı sağlayan ve geoteknik özellikleri iyileştiren kararlı kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidrat üretir.

Bazı temel zemin-kireç puzolanik reaksiyonları aşağıda sunulmuştur (Mallela vd., 2004);



C-S-H ve C-A-H, mekanik özelliklerde (dayanım gibi) iyileşmeye ve şişme özelliklerinde azalmaya neden olur (Seco ve ark., 2011).

Organik içerik, mineraloji, ayrışma derecesi, karbonatların varlığı ve doğal drenaj, alümina ve silika salınımını etkileyen ana zemin özellikleridir. Puzolanik reaksiyonlar, zemin özelliklerinin yanı sıra kür sıcaklığından, kür süresinden ve kireç yüzdesinden de etkilenir. Puzolanik reaksiyonların şematik gösterimi Şekil 2.13'te sunulmaktadır.



Şekil 2.13. Puzolanik reaksiyonların şematik gösterimi (As, 2019)

Karbonatlaşma: Bu reaksiyon kireç ve CO_2 arasında gerçekleşir. Karbonatlaşma reaksiyonu sonucunda C-S-H ve C-A-H yerine CaCO_3 oluşur (Mallela ve ark., 2004). Diğer reaksiyonlarda kullanılacak olan kirecin bir kısmını karbonatlaşmanın tüketmesi ve CaCO_3 'ün zeminin plastisitesini arttıran plastik bir malzeme olması nedeniyle istenmeyen bir reaksiyondur (As, 2019).

2.7.1.2. Uçucu kül

Uçucu kül; silisyum, alüminyum ve çeşitli oksitler ile alkalilerden oluşan puzolanik bir malzemedir. Puzolanik malzemeler, tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ya da çok az olan, ancak su ve kireç ile birleştiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Uçucu küller, bu özellikleri nedeniyle kil ve kireç arasındaki puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla zemine ilave edilir.

Uçucu kül, düşük kalorili linyit kömürünün yakıldığı termik santrallerde ortaya çıkan bir yan üründür. Boyutu 1-150 µm arasında değişmektedir. Baca gazlarıyla birlikte taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanır (Görhan ve ark., 2008).

Uçucu küllerin kimyasal içerikleri termik santralde yakılan kömürün özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Uçucu kül içerisindeki başlıca bileşenler genellikle SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO 'tir. Uçucu külün tipine göre SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranında bulunabilir (Türker ve ark., 2009).

Uçucu küllerin yapısında, yakılan kömürün özelliklerine bağlı olarak farklılıklar olsa da temel bileşenler silis ve alüminadır. Uçucu kül taneleri küresel olup tane boyutu ve yapısı soğutma hızına bağlı olarak değişebilmektedir (Görhan ve ark., 2008).

Uçucu küller, ASTM C618 standardına göre kimyasal bileşenlerine göre sınıflandırılmaktadır. ASTM C618 standardına göre uçucu küller, F ve C sınıfı olmak üzere 2 gruba ayrılır.

F tipi uçucu kül, bitümlü veya taş kömürün yanmasıyla ortaya çıkar. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %70'ten fazla ve CaO miktarı %10'un altındadır. Puzolanik özelliklere sahiptir.

C tipi uçucu kül, linyit veya yarı bitümlü kömürlerin yanmasıyla ortaya çıkar. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla ve %10'dan daha yüksek CaO içerir. Puzolanik özelliklere ek olarak bağlayıcı özelliğe sahiptir (ASTM C 618, 2019).

2.7.1.3. Silis dumanı

Silis dumanı, elektrometalürji sanayisinde silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında bir yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Yapısında % 90 civarında amorf silis içermesi nedeniyle puzolanik özelliği yüksektir. Silis dumanı, kuvarsın açık elektrik arkı fırınlarında yaklaşık 2000 °C'de indirgenmesi ile oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta gaz haline geçen SiO soğutma sırasında yükseltgenerek SiO_2 taneleri

halinde birikmektedir. Ani soğutmadan dolayı kristalleşemeyen SiO_2 çok amorf yapıya sahiptir ve çok küçük tanelerden oluşmaktadır (Yılmaz, 2008).

Silis dumanı, tane çapının çok küçük olması ve yapısında yaklaşık %93 SiO_2 içermesinden dolayı puzolanik özelliği oldukça yüksektir. Yüksek puzolanik özelliği nedeniyle çimento sanayisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Amorf SiO_2 miktarı oldukça yüksek olan silis dumanı gri renge sahip bir tozdur. Silis dumanının ortalama tane çapı çimento taneciklerinden 100 kat daha incedir. Özgül yüzey alanı yaklaşık 20.000 m^2/kg 'dır. Yığın birim hacim ağırlığı ise 150-250 kg/m^3 'tür (Yeğinobalı, 1993). Ayrıca silis dumanı son yıllarda zemin stabilizasyonunda kireç ile beraber sıklıkla kullanılmaktadır.

Silis dumanı, ülkemizde Antalya Elektrometalürji A.Ş.'de bir yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Silis dumanı fabrikanın ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarında özel filtreli toz tutucular ile tutularak depolanmaktadır.

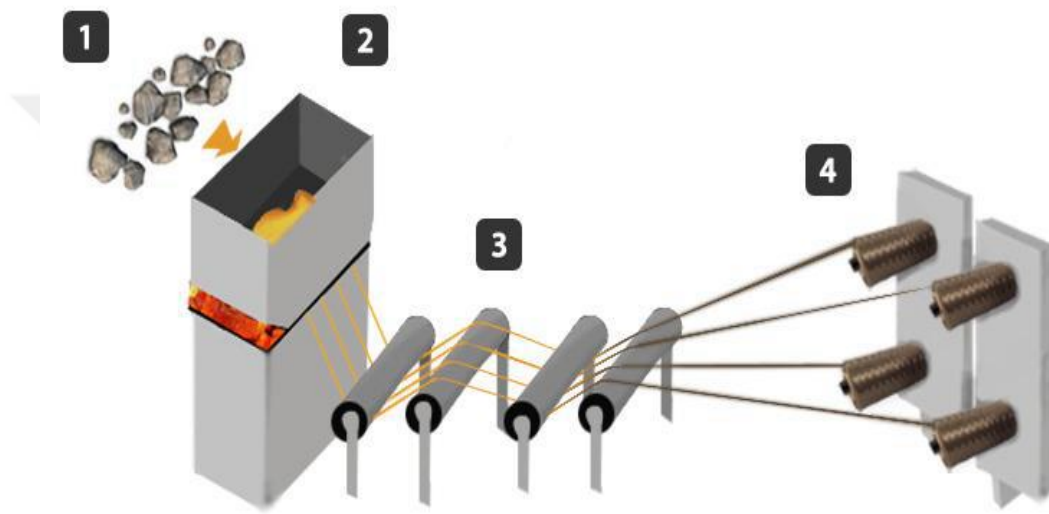
2.8. Bazalt Fiber

Fiberler (ya da lifler), doğal ve yapay fiberler olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır (Aral, 2006). Doğal fiberler; sebze, hayvan ya da minerallerden doğrudan elde edilebilen ve çeşitli işlemlerle fibere dönüştürülen ham maddelerden oluşturulmaktadır. Doğal lifler; bitkisel, hayvansal ve madensel lifler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Yapay lifler ise kullanım alanına göre özellikleri değiştirilerek ve geliştirilerek üretilen malzemelerdir. Doğal ve yapay fiberlerin örnekleri Çizelge 2.6.'da verilmiştir.

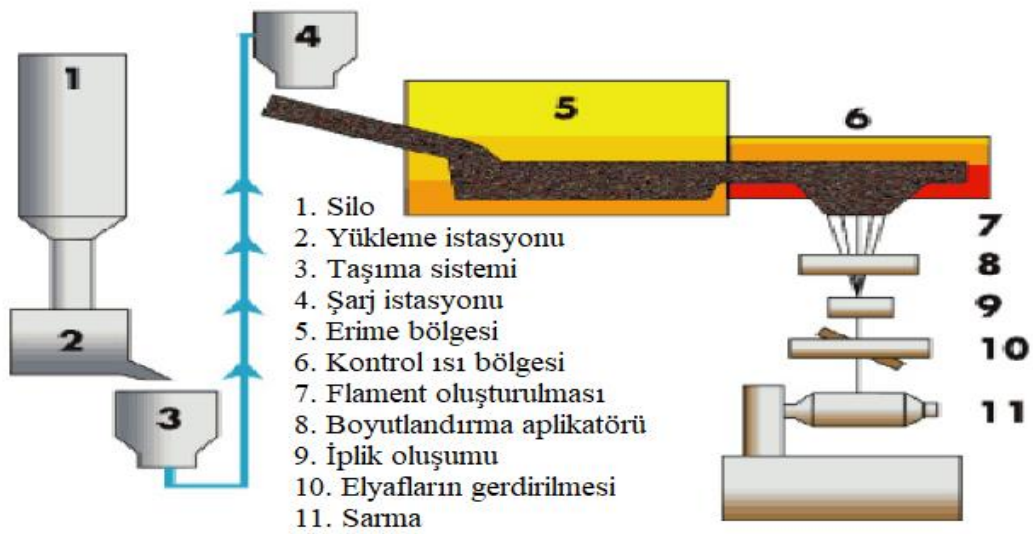
Çizelge 2.6. Doğal ve yapay fiber çeşitleri (Aral, 2006)

Doğal lifler			Yapay lifler
Bitkisel lifler	Hayvansal lifler	Madensel lifler	
Hindistan cevizi kabuğu	Yün	Karbon	Polipropilen
Bambu	Kıl	Bazalt	Polyester
Keten, kenevir	İpek	Asbest	Aramid
Ahşap (Selüloz)		Metal lifler	Cam lifleri
Sisal			Poliüretan
Palm			Polietilen
Şeker kamışı posası			Naylon
Jüt			Kevlar
Akwara			Akrilik

Doğal olarak oluşmuş kayalardan elde edilen fiberler yüksek stabilite sağlamaktadır. Mineral bazlı fiberlerin nihai özellikleri kullanılan mineralin kimyasal kompozisyonu, termal geçmişi, üretim şartları, filament çapları ve uygulanan kimyasal yüzey aprelemesine göre şekillenir. Bazalt fiberler doğal volkanik bazalt kayalarının başka bir katkı olmaksızın 1300-1700 °C'leri bulan sıcaklıklarda eritilmesi ve fiber olarak çekilmesi ile elde edilir (Şekil 2.14 ve 2.15). Elde edilen fiberlerin özellikleri bazaltın alındığı bazalt kayacının kimyasal bileşimine göre değişiklik göstermektedir (Swink ve Sokolinsky, 2002).



Şekil 2.14. Bazalt fiberin üretim aşamaları (Ocakbaşı, 2019).



Şekil 2.15. Bazalt fiberin üretim aşamaları (Singha, 2012).

Kıyılmış bazalt fiberler, Türkiye ve birçok ülkede yaygın olarak kullanılan bir üründür. 7-20 mikron çaplı liflerden meydana gelen ve genellikle 5-100 mm uzunlukta üretilen bazalt fiberler genellikle betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini güçlendirmek için kullanılmaktadır. Bazalt fiberler çok iyi mekanik özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerin takviye malzemesi olarak, mükemmel kimyasal direnç göstermelerinden dolayı korozyona maruz kalan ortam uygulamalarında, yanıcı olmadığı ve yüksek sıcaklıklarda özellikleri değişmediği için yangın güvenliği ve teknolojilerinde, ses ve ısı yalıtımının iyi olması nedeniyle de izolasyon malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bazalt fiberler bu özellikleriyle birçok sektörde hammadde olarak kullanılmaktadır (Gümölcine ve ark., 2013).

Bazalt fiberlerin üretim yöntemi cam fiberlerinkine benzemektedir ancak bazalt fiberlerin üretim aşaması daha az enerji gerektirmektedir. Üretiminde daha az enerji harcanması ve hammaddesinin (bazalt kayalar) dünyanın birçok yerinde bulunmasından dolayı cam fiberlere göre oldukça ekonomiktir (King ve ark., 2014). Son yıllarda cam fiberlere alternatif olarak yer bulan bazalt fiberler, çevre açısından güvenli, toksik olmayan, yüksek stabilite ve yalıtım özelliklerine sahiptir (Gümölcine ve ark., 2013; Kabay, 2014). Bahsedilen özelliklerin yanı sıra bazalt fiberler, diğer yaygın olarak kullanılan fiber katkı türlerinden çok daha yüksek çekme mukavemeti ve korozyon direncine sahiptir (High ve ark., 2015). Ayrıca bazalt fiberler, karbon fiberlere göre zehirli gazlara, kimyasal etkenlere, darbe yüküne ve ateşe karşı daha iyi direnç gösterirler. Bazalt lifleri durabilite, sıcaklığa karşı direnç ve dayanım yönünden güçlü kılan özellik volkanik kayalardan elde edilmesidir. Bazalt fiber, 21. yüzyılda doğal yeşil ve çevre dostu bir mineral katkı olarak kabul edilmiştir (Zuhuang ve Yu, 2015; Wang ve ark., 2020).

Fiberler, zemin türlerinin hepsi için faydalı olup esneklik ve sismik performans gibi özellikleri artırırken aynı zamanda oturmaları azaltır. Kireç, çimento vb. gibi kimyasal katkılara göre hava koşullarından etkilenmezler. Fiber ile güçlendirilmiş zeminler daha çok zemin ve fiberin etkileşim özelliklerinden etkilenir. Zemin içindeki fiber oranı, fiberin yoğunluğu, en boy oranı, fiberin uzunluğu ve zemin ile fiber arasındaki sürtünme fiber-zemin ilişkisi açısından önemlidir (Sridhar, 2017).

2.9. Literatür Özeti

Kate (2005), şişen zeminlerin dayanım ve hacim değişikliği davranışını iyileştirmek için kireçli ve kireçsiz durumlarda uçucu külün kullanımını araştırmıştır. Çalışmada bentonit katkılı kaolin kili üzerinde %0-20 uçucu kül ve %0-3 kireç ilavesinin etkisini belirlemek için kıvam limitleri, standart Proktor, serbest şişme ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Kireç ve uçucu kül ilavesi ile plastisite indisi, maksimum kuru yoğunluk, şişme yüzdesi ve şişme basıncının önemli ölçüde azalırken optimum su içeriği ve serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. En yüksek dayanım değerleri %3 kireç ve %10 uçucu kül katkılı karışımda elde edilmiştir. Uçucu kül-kireç katkılı numunelerin sadece kireç katkılı numunelere göre stabilizasyonda daha etkili olduğu sonucuna varmıştır.

Kumar ve ark. (2007); uçucu kül, kireç ve polyester lif katkılarının şişen kil zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için farklı oranlarda kireç (%1-10), uçucu kül (%1-20) ve polyester lif (%0-2) ilaveli zemin numuneleri üzerinde serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri yapmışlardır. Standart Proktor enerjisinde sıkıştırılan numuneler üzerinde 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonrasında deneyler yapılmıştır. Kireç içeriğinin artmasıyla zeminin maksimum kuru yoğunluğu azalırken optimum su içeriğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Zemin-kireç karışımına uçucu kül ilave edildiğinde maksimum kuru yoğunluk daha da azalırken ve optimum su içeriği artmıştır. Kompaksiyon deneylerinde, %0.5–2 oranındaki sınırlı miktardaki polyester lifinin, uçucu kül-zemin-kireç karışımlarının maksimum kuru yoğunluğu ve optimum su içeriği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Kireç ve uçucu kül ilavesi ile zeminin serbest basınç ve yarmada çekme mukavemetinde önemli ölçüde artış meydana gelmiştir. Uçucu kül ve kireç için optimum katkı yüzdeslerini sırasıyla %8 ve %15 olarak belirlemişlerdir.

Zha ve ark. (2008), şişen kil zeminin stabilizasyonunda uçucu kül ve uçucu kül-kireç katkılarının potansiyel kullanımı ve etkinliğini araştırmışlardır. Deney sonuçları, uçucu kül veya uçucu kül-kireç içeriğindeki artışla plastisite indisi, aktivite, serbest şişme, şişme potansiyeli, şişme basıncı ve eksenel büzülme yüzdesinin azaldığını göstermiştir. Katkılı zemin numuneleri için kür süresinin artmasıyla birlikte şişme potansiyeli ve şişme basıncı azalmıştır. Kür süresine tabi tutulmadan uçucu kül ilave edilen zeminin, serbest basınç dayanımında önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir.

Fakat uçucu kül katkılı zeminin 7 gün kürlenmesinden sonra, serbest basınç dayanımı önemli ölçüde artış olduğu belirlenmiştir.

Phanikumar (2009), kireç ve uçucu külün şişen bir zeminin özelliklerindeki etkisi üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Farklı oranlarda kireç (%0, 2, 4 ve 6) ve uçucu kül (%0, 10, 20) katkılı zeminler üzerinde kıvam limitleri, kompaksiyon ve konsolidasyon deneyleri yapmıştır. Sonuç olarak, hem kil-kireç hem de kil-uçucu kül karışımlarında likit limit azalırken plastik limit artmıştır, bu da artan katkı içeriğiyle birlikte plastisite indisinin düşmesine neden olmuştur. Ayrıca kireç ve uçucu kül ilavesi ile kil zeminin şişme potansiyeli ve şişme basıncı önemli ölçüde azaldığını belirlemiştir.

Sharma ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada, killi bir zeminin uçucu kül ve kireç ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Stabilizasyonun killi bir zeminin geoteknik ve kimyasal özelliklerine etkileri belirlemiştir. Katkılı zeminin serbest basınç dayanımı dikkate alındığında optimum uçucu kül içeriği %20 olarak bulunmuştur. Uçucu kül ilavesi ile zeminin artan mukavemeti, iyi bir temel malzemesi olarak kullanılacak kadar yeterli olmadığından, stabilizasyon için uçucu kül ile birlikte kireç ilavesi benimsenmiştir. pH değeri testi sonucunda zemini stabilize etmek için minimum %8,5 kireç içeriği tavsiye edilmiştir. % 20 uçucu kül ve % 8,5 kireç ilavesiyle UCS ve CBR değerleri en yüksek dayanıma ulaşmıştır. Uçucu kül ilavesi ayrıca zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmiştir.

Zumrawi ve Hamza (2014); kireç, uçucu kül ve kireç+uçucu kül ile stabilize edilmiş şişen zeminlerin şişme ve mukavemet özelliklerini incelemiştir. Bunun katkılı ve katkısız zemin numuneleri için kıvam limitleri, kompaksiyon, CBR, serbest basınç deneyi (28 gün kür), serbest şişme ve şişme basıncı deneylerini yapmışlardır. Şişen zemine sırasıyla %0-15 kireç ve %0-30 uçucu kül ayrı ayrı ilave edilmiştir. Kireç ve uçucu kül ilavesiyle zeminin plastisite indisi ve kuru yoğunluğu azalırken optimum su muhtevası, serbest basınç ve CBR dayanımları artmıştır. Zeminin şişme özelliğini kaybettiği belirlenmiştir. Dayanım deneyleri için optimum katkı içerikleri %8 kireç ve %10 uçucu kül olarak belirlenmiştir.

Singh ve ark. (2015), bentonit-uçucu kül karışımında yüzey çatlakları ve büzülme elde edilen görüntüler, Image J adlı açık kaynak kodlu yazılımda dijital olarak analizler ve hesaplamaların bir arada kullanıldığı Matlab programı ile yapılmıştır. Çalışmada numune kalınlığı, su içeriği ve uçucu kül içeriği gibi değişken parametrelerin sodyum bentonitin yüzey çatlakları ve büzülmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç

olarak, numuneler için uçucu kül içeriğindeki artışla yüzey çatlakları azalırken su içeriği ve numune kalınlığındaki artışla arttığını belirlemiştir.

Cheshomi ve ark. (2017), kireç ve uçucu kül ilavesinin kil zeminin şişme davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Farklı oranlarla kireç (%3, %5 ve %7) ile şişme özellikleri incelenen zemine daha sonra %3, %5 ve %7 oranlarında uçucu kül eklenerek zemin davranışı incelenmiştir. İki durumda da zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncı azalmıştır ancak kireç-uçucu kül katkılı durumda iyileştirmenin daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kireç ve uçucu kül ilavesi ile zeminin plastisite indisi azalmıştır.

Andavan ve Pagadala (2020), kil zeminin kompaksiyon ve serbest basınç parametrelerine uçucu kül ve kireç katkısının etkisini araştırmışlardır. Uçucu kül içeriği %20'de sabit tutularak sırasıyla %3, %5 ve %7 kireç ilavesi yapılmıştır. Uçucu kül ve kireç ilavesi ile katkısız zeminin maksimum kuru yoğunluğu azalırken optimum su muhtevası artmıştır. Kireç ve uçucu kül katkılı zeminlerin 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinde önemli derecede artış meydana gelmiştir.

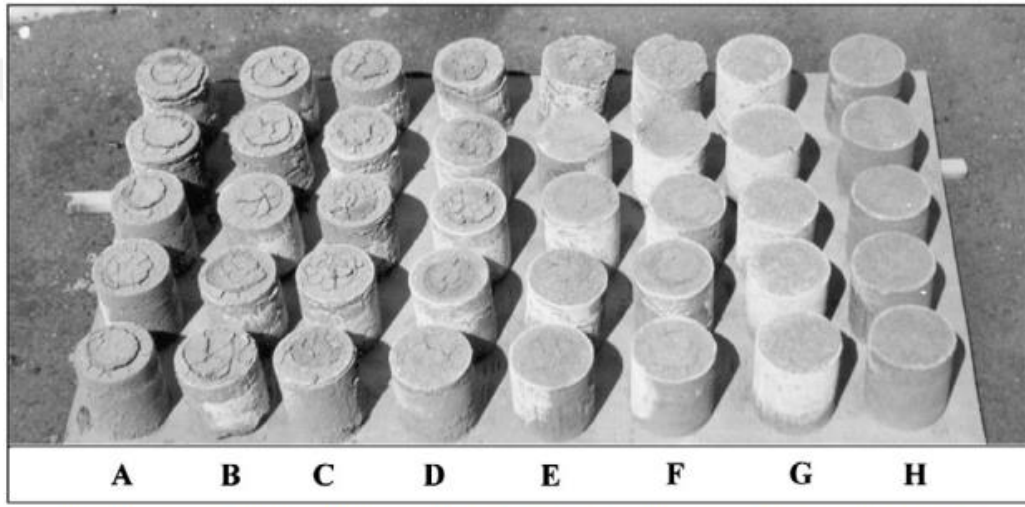
Indiramma ve ark. (2020), kireç ve uçucu kül gibi katkı maddelerinin şişen zeminin geoteknik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. İlk olarak şişen zemine %4 ve %8'lik kireç ve daha sonra ise şişen zemine %10 uçucu kül + %4 kireç ve %10 uçucu kül + %8 kireç karıştırılmıştır. Sonuç olarak, tek başına kireç veya farklı oranlarda kireç ve uçucu kül içeren şişen zeminde; likit limit, plastisite indisi, serbest şişme yüzdesi ve maksimum kuru yoğunluk azalırken plastik limit, optimum su içeriği ve serbest basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir.

Deepak ve ark. (2021), F ve C sınıfı uçucu küllerin kireç ile kombinasyonunun killi zeminin stabilizasyonuna etkisini araştırmışlardır. Stabilizasyon sürecinde uçucu külün etkisini değerlendirmek için farklı karışım oranlarına sahip çeşitli zemin numuneleri üzerinde Atterberg limitleri, standart Proctor ve serbest basınç deneyleri (3, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda) yapılmıştır. Kireç içeren killi zemin karışımına uçucu kül ilavesi, zeminin plastisitesini ve kuru yoğunluğunu azaltırken su içeriğini ve işlenebilirliğini arttırmıştır. Serbest basınç mukavemeti üzerinde, C sınıfı uçucu kül ilavesinin kireçle birlikte ilave edildiğinde F sınıfı uçucu kül ilavesine göre daha etkili olduğunu belirlenmiştir.

Kumar ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada C sınıfı uçucu kül ve kireç katkılarının kil zeminin ıslatma-kurutma çevrimleri sırasındaki hacim değişimine ve kuruma çatlaklarına etkisini incelemişlerdir. Uçucu kül ve kireç ilavesi ile ıslatma-

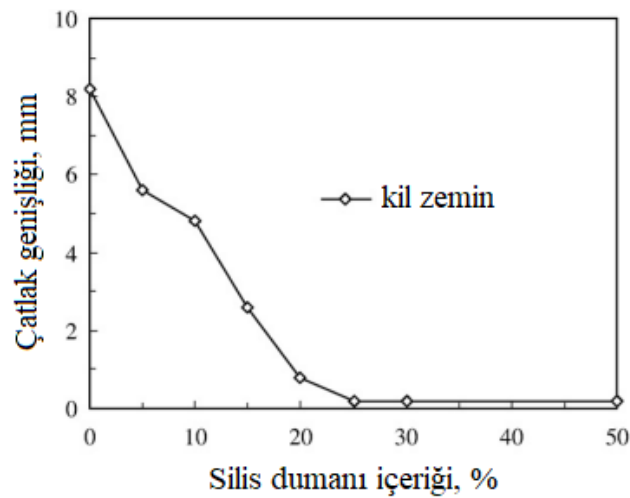
kurutma deneyindeki hacimsel değişimler önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca kuruma çatlaklarının yüzdesi de %29'dan %0.5'e düşmüştür.

Kalkan (2009), yaptıkları çalışmada killi zeminler için silis dumanı atık malzemesinin kuruma çatlakları davranışları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Şişen kil zemin içerisine %0-%50 arasında farklı oranlarda silis dumanı eklenerek deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak; silis dumanı içeriği arttıkça killi zeminin CEC ve SSA değerleri, maksimum kuru yoğunluğu, şişme yüzdesi azalmıştır. Silis dumanı-zemin karışımlarının yüzeyindeki kuruma çatlakları silis dumanı içeriği arttıkça azaltmıştır (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17).



A: %0, B: %5, C: %10, D: %15, E: %20, F: %25, G: %30 ve H: %50 silis dumanı

Şekil 2.16. Silis dumanının killi zeminlerde kuruma çatlaklarının gelişimine etkisi (Kalkan 2009)



Şekil 2.17. Çatlak genişliğinin silis dumanı içeriği ile değişimi (Kalkan 2009)

Azzawi ve ark. (2012), silis dumanı ilavesinin yetersiz doğal stabiliteye sahip zemin alt temellerinin davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Doğal siltli-killi zemin ve siltli-killi zemin-silis dumanı karışımları optimum su içeriğinde sıkıştırılmış ve çeşitli laboratuvar testlerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, silis dumanı ile kompozit numunelerin şişme basıncında ve basınç dayanımında önemli bir gelişme göstermiştir. Silis dumanı içeriği %5'ten %15'e çıkarıldığında şişme basıncı %87 azalmış ve serbest basınç dayanımı önemli derecede artmıştır. Ayrıca sonuçlar, silis dumanının sıkıştırılmış kil numunelerinin çatlak genişliğini %75 oranında azaltarak yüzeydeki çatlak gelişimini azalttığını göstermiştir. Çalışma, silis dumanının, zemin stabilizasyonu için uygun bir malzeme olduğunu göstermiştir.

Goodarzi ve ark. (2015), kireç (%0-15) ve silis dumanı (%0-15) katkılarının şişen kil zeminin kıvam limitleri, şişme yüzdesi ve şişme basıncı, permeabilite ve serbest basınç mukavemetine etkisini incelemişlerdir. Kullanılan katkılar ile şişen kil zeminin plastisite indisi, şişme yüzdesi, şişme basıncı ve permeabilite katsayısı azalmıştır. Serbest basınç mukavemeti ise artmıştır. Kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemeti artmış, kireç ve silis dumanı ilavesi ile zeminin şişme özelliğini kaybettiği belirlenmiştir.

Alrubaye ve ark. (2016), farklı oranlarda kireç ve %4 silis dumanı ile yumuşak killi bir zeminin stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmıştır. Kireç yüzdeleri %3, 5, 7 ve 9 olarak değişirken silis dumanı yüzdesi %4 olarak sabitlenmiştir. Karışımlar üzerinde kompaksiyon, permeabilite ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, kireç ve silis dumanı ilavesiyle kil zeminin maksimum kuru yoğunluğu ve permeabilitesi azalırken, optimum su içeriği ve dayanımı artmıştır. Dayanım deneyi için optimum parametreler %7 kireç ve %4 silis dumanı olarak belirlenmiştir.

Hasan ve ark. (2016), %6 silis dumanı ve çeşitli oranlarda kireç (%3, %5, %7 ve %9) karıştırılmış yumuşak kilin (kaolin) mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. Silis dumanı ve kireç stabilizasyonunun karışımların serbest basınç mukavemeti ve geçirimsizliği üzerindeki etkisini belirlemek için optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta hazırlanan numuneler üzerinde gerekli deneyler yapılmıştır. Kireç ve silis dumanı ilavesi ile zeminin geçirimsizliği ve maksimum kuru yoğunluğu azalırken, optimum su muhtevası ve serbest basınç mukavemeti artmıştır. En iyi dayanım özellikleri %5 kireç ve %6 silis dumanı içeren numunelerde görülmüştür.

Amina ve Rani (2017), kireç ve silis dumanı ilavesinin kil zeminin dağılması üzerindeki etkisini belirlemek için bir çalışma yapmıştır. Hazırladıkları numuneler üzerinde dağılma ve çifte hidrometre deneyi (çifte hidrometre yönteminde standart yöntem ile mekanik karıştırıcı olmaksızın ve kimyasal ayrıştırıcı kullanmaksızın deney yapılır) yapılarak kilin dispersif özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, tek başına kireç ve kireç-silis dumanı katkılarının kil zeminin dispersif özelliklerini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Sadece kireç kullanılan numunelerde %5 kireç içeriği, kireç-silis dumanı beraber kullanıldığı numunelerde ise %2 kireç ve %12 silis dumanı en iyi sonuçları vermiştir.

Sami ve ark. (2018), şişen kil zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kireç (%0-20) ve silis dumanı (%0-20) kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. Çalışmada katkısız ve katkılı zemin numuneleri üzerinde Atterberg limitleri, kompaksiyon, serbest şişme ve serbest basınç deneyleri (7,14 ve 28 gün kür sonrası) yapılmıştır. Kireç ve silis dumanı katkıları ile şişen kil zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncı %95 civarında azalmıştır. Ayrıca zeminin plastisite indisi azalmıştır. Kireç ve silis dumanı katkı içerikleri %10'a kadar serbest basınç mukavemeti artmış %10'dan sonra azaldığı belirtilmiştir. En yüksek dayanımlar kireç ve silis dumanının beraber kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir.

Moayyeri ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada kireç ve silis dumanının ıslatma öncesi ve sonrası yüksek jips içeriğine sahip kil zeminin iyileştirilmesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Jipsli zemin örnekleri, %1, 2 ve 3 oranında kireç ve %1, 3, 5 ve 7 oranında silis dumanı ile karıştırılmıştır. Numuneler optimum su içeriğinde sıkıştırılarak 1, 7 ve 28 gün kür edilmiştir. Mekanik özellikleri ve ıslanma nedeniyle değişimlerini incelemek için farklı sürelerde kürlenmiş numuneler üzerinde serbest basınç dayanımı ve dayanıklılık testleri yapılmıştır. Kireç ve silis dumanı ilavesi ıslatma kurutma çevrimine tabi tutulan numunelerin dağılmasını engellemiştir. Katkılar ve kür süresindeki artış serbest basınç dayanımı oldukça yüksek miktarda arttırmıştır.

Phanikumar ve Ramanjaneya (2020), farklı silis dumanı içerikleri (%0-12) ile stabilize edilmiş şişen bir kilin plastisite, serbest şişme indisi, sıkıştırma ve farklı kür sürelerinde (1, 7, 14 ve 28 gün) dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Silis dumanı içeriği arttıkça zeminin likit limit, plastisite indisi ve serbest şişme indisi azalmış, serbest basınç ve CBR dayanımı artmıştır. Kür süresi arttıkça mukavemet artmaya devam etmiştir.

Singh ve ark. (2020), düşük maliyetli bir atık malzeme olan silis dumanının şişen zeminin mühendislik özelliklerini stabilize etmede kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. Bu amaçla, zemine çeşitli yüzdelerde (%10 ila %100) silis dumanı ilave edilerek katkısız ve katkılı zemin numuneleri üzerinde serbest şişme, Atterberg limitleri, standart Proktor, CBR, serbest basınç ve konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, silis dumanı eklenmesi ile şişme yüzdesi ve şişme basıncı azalmıştır. Kompaksiyon eğrileri, silis dumanı ilavesinin optimum su içeriğinde bir artışa ve maksimum kuru yoğunlukta bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Ayrıca, silis dumanı ilavesinin zeminin kohezyon, içsel sürtünme açısı ve mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir.

Tiwari ve ark. (2020), şişen kil zeminin stabilizasyonunda silis dumanı (%2, %4 ve %8) ve polipropilen liflerin (%0.25, %0.5 ve %1) etkisini incelemiştir. Çalışmada, şişen zeminin mekanik-kimyasal stabilizasyonu, şişen zeminin polipropilen lifle güçlendirilmesi ve silis dumanı ile kimyasal olarak stabilize edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Katkıların zeminin mühendislik özelliklerine etkisini belirlemek için katkısız ve katkılı zemin numuneleri üzerinde kompaksiyon, Atterberg limitleri, serbest şişme yüzdesi, şişme basıncı ve CBR deneyleri yapılmıştır. Görüntü işleme tekniği ile büzülme çatlakları da incelenmiştir. Sonuçlar, silis dumanı ve polipropilen lif ilavesiyle CBR değerinin arttığını ve büzülme çatlak alanının azaldığını ve plastisite indisinde bir azalma meydana geldiğini göstermiştir.

Türköz ve ark. (2021), silis dumanının zemin stabilizasyonunda kullanılması üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada farklı silis dumanı yüzdeleri (%0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30) eklenerek hazırlanan karışımlar üzerinde önce Atterberg limitleri ve standart Proktor kompaksiyon testleri yapılmıştır. Daha sonra optimum su içeriğinde standart Proktor enerjisinde sıkıştırılan numuneler üzerinde dağılıbilirlik ve dinamik özellikleri belirlemek için iğne deliği testleri ve rezonans kolon testleri yapılmıştır. Genel olarak, Silis dumanının katkı yüzdesine bağlı olarak zemin örneğinin dağılıbilirlik ve dinamik özelliklerinde iyileşme ve plastisite indisini düşürerek zemin sınıfında bir değişikliğe katkıda bulunduğu; yüzeysel zemin iyileştirme açısından silis dumanının olumlu etkileri gözlenmiştir.

Gao ve ark. (2015), bazalt fiber takviyeli killi zeminin mekanizmasını ve etkisini incelemek için, optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk koşullarında serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Çalışmada bazalt fiber içeriğinin yanı sıra bazalt fiber uzunluğunun da dayanıma etkisini incelemişlerdir. Bazalt fiber içeriğinin etkisini

belirleyebilmek için 12 mm uzunluğundaki fiberler %0.05, %0.1, %0.15, %0.20, %0.25, %0.30 ve %0.35 gibi farklı içeriklerde killi zemine eklenmiştir. Bazalt fiber uzunluğunun etkisini araştırmak için ise 4 mm, 8 mm, 12 mm ve 15 mm olmak üzere farklı boylardaki bazalt fiberleri %0.05 oranında zemine ilave etmişlerdir. 12 mm ve %0.25 bazalt fiber içeriğinde en yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.

Özdemir ve ark. (2016), bazalt fiber ve kireç ilavesinin kil zeminlerin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 6 mm uzunluğundaki bazalt fiber %0, %0.5 ve %1 oranlarında kirecsiz ve %9 kireç katkılı numuneler standart Proktor enerjisiinde sıkıştırılarak 1,7 ve 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç deneyleri yapılmıştır. %1 bazalt fiber ve %9 kireç katkılı numune en yüksek dayanım değerlerini vermiştir.

Wang ve ark. (2016), kireç (%0-8) ve bazalt fiber (%0-0.5) katkılarının şişen kil zeminin dayanım özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler üzerinde 7 günlük kür süresi sonunda serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Kireç ve bazalt fiber ilavesi ile katkısız zeminin serbest basınç değerlerinde önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır. En yüksek dayanım artışı %6 kireç ve %0.3 bazalt fiber katkısı içeren numunelerde olmuştur. Katkısız zeminin serbest basınç dayanımı 5.7 katına çıkmıştır. Bazalt fiber ilavesi ile zeminin sünekliliğinin arttığı belirlenmiştir.

Aravalli ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan zemin numuneleri üzerinde 12 mm bazalt fiber uzunluğu ve %0.15, %0.20, %0.25 oranlarında bazalt fiber içeriği kullanarak şişen kil zeminin serbest basınç ve CBR özelliklerini incelemişlerdir. Bazalt fiber ilavesi ile zeminin serbest basınç ve CBR dayanımında önemli ölçüde artış gözlemlemişlerdir. En yüksek dayanım değerleri bazalt fiberin %0,25 eklendiği karışımlarda görülmüştür.

Ayothiraman (2017), rastgele dağılmış bazalt fiberin Dhanori kilinin indeks ve mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak ve performansını polipropilen liflerle güçlendirilmiş zeminin özellikleriyle karşılaştırmak için deneysel bir çalışma yapmıştır. %0-1.5 arasında farklı oranlarda zemin ile karıştırılan numuneler optimum su muhtevasında sıkıştırılarak serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, bazalt fiberin Dhanori kiline dâhil edilmesinin dayanımında önemli bir gelişme sağladığını göstermiştir. Polipropilen lif katkılı numuneler daha yüksek dayanım göstermiştir. Ancak bazalt fiberin tipik tasarım hedef değerlerini karşılayabileceğini ve maliyetin sentetik liflerden çok daha düşük olduğunu ve daha da önemlisi, bazalt fiberlerin çevre dostu olduğunu belirtmiştir.

Ndepete ve Sert (2017), bazalt fiber içeriği (%1, %1.5, %2) ve uzunluğunun (6, 12, 24 mm) silt zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Katkısız ve bazalt fiber katkılı zemin numuneleri 100 kPa'lık düşey yük altında konsolide edilerek üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, bazalt fiber içeriğinin zeminin drenajsız kayma direncini arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca en iyi mukavemet özellikleri 24 mm bazalt fiber uzunluğu ve % 1.5 bazalt fiber içeriğinde elde edilmiştir.

Boz ve ark. (2018), farklı fiber türlerinin dâhil edilmesinin kireçle stabilize edilmiş kilin mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek için karşılaştırmalı bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda, Standart Proctor enerjisinde sıkıştırılmış bazalt ve polipropilen fiber içeren numuneler üzerinde bir dizi serbest basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Kürlenme süresinin (1, 7, 28 ve 90 gün), lif tipinin (bazalt ve polipropilen), lif içeriğinin (0, 0.25, 0.5, 0.75, %1), lif uzunluğunun (6, 12 ve 19 mm) etkileri ve kireç içeriğinin (%0 ve %9) dayanım üzerindeki özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, hem bazalt hem de polipropilen liflerin kireç içermeden mukavemeti artırdığını ortaya koymuştur. Kireç içeren numuneler için, polipropilen elyaf takviyeli numunelerin mukavemeti, bazalt fiber ile oluşturulan numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Ancak, en büyük mukavemet artışı, 90 günlük kürlenmeden sonra, %9 kireç içerikli, 19 mm boyunda %0,75 bazalt fiber kullanılarak elde edilmiştir.

Khorram ve Rajabi (2019), bazalt fiberin kil zeminin serbest ve çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla bu çalışmada, ağırlık yüzdeleri 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2 ve 6, 12, 25 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta bazalt fiber takviyeli numuneler üzerinde bir dizi deney yapılmıştır. Bazalt fiber yüzdesinin artmasıyla ve farklı fiber uzunluklarında tüm numunelerde zeminin mukavemetinin arttığını, bazalt fiber içeriği ve uzunluğu arttıkça sünekliğin arttığını gözlemlemişlerdir. Serbest basınç ve çekme dayanımı için optimum fiber içeriği %1 ve uzunluğu 12 mm olarak belirlenmiştir.

Küçükosmanoğlu (2019), yaptığı çalışmada bazalt fiber uzunluğu (6, 12 ve 24 mm) ve içeriğinin (%0.05, %0.1, %0.15, %0.2, %1, %1.5 ve %2) kil zeminin dayanım şişme davranışını incelemek için ıslak CBR deneyleri yapmıştır. Bazalt fiber ilavesiyle CBR dayanımında önemli ölçüde artış meydana geldiğini belirlemiştir. Ayrıca, zeminin şişme yüzdesinde azalma meydana geldiğini belirlemiştir.

Terzi (2021), yüksek lisans tez çalışmasında bazalt fiber uzunluğu (6, 12 ve 24 mm) ve içeriğinin (%0, %1, %1.5, %2 ve %2.5) yüksek plastisiteli kil (CH) zeminin

kayma direnci parametrelerine etkisini incelemiştir. Sonuç olarak, bazalt fiber ilavesiyle zeminin kohezyon ve kayma direncinin arttığını belirlemiştir.

Zhao ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada bazalt fiber içeriği ve uzunluğunun problemli kırmızı kilin dayanım özelliklerine etkisini incelemiştir. Ayrıca, polipropilen lif takviyeli numuneler ile kıyaslamışlardır. Optimum su içeriğinde sıkıştırılan numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bazalt fiber uzunluğunun 10-13 mm aralığında en yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Bazalt fiber ilavesi ile zeminin kohezyon değerinde önemli ölçüde artış olduğunu ve bazalt fiberlerin aynı katkı yüzdesinde polipropilen liflere göre daha yüksek dayanım artışı gösterdiğini belirlemiştir.

Xu ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada bazalt fiber takviyesinin lős zeminin kayma dayanımını iyileştirme mekanizmasını araştırmak için drenajsız, konsolide olmayan koşullar altında üç eksenli kayma testleri, dijital görüntü teknolojisi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) testleri gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, güçlendirilmiş numunenin kayma mukavemetinin, takviye edilmemiş duruma göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu, ancak artan bazalt fiber uzunluğu veya fiber içeriği ile sürekli bir şekilde artmadığını ve %0.6 fiber içeriği ve 12 mm fiber uzunluğunda maksimum bir değerde olduğunu göstermiştir.

Kou ve ark. (2022), Bazalt fiber takviyeli lős zeminin mekanik davranışlarını incelemek için, fiber uzunluğunun (4, 8, 12 ve 16 mm) ve fiber içeriğinin (%0.2, %0.4, %0.6 ve %0.8) kayma mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bazalt fiber içeriği ve uzunluğu arttıkça zemin numunelerinin mukavemetinin arttığı belirlenmiştir.

Mukhtar ve Kumar (2022), bazalt fiberin sıkıştırılmış zemin üzerindeki mekanizmasını ve etkisini ortaya çıkarmak amacıyla serbest basınç ve CBR deneyleri yapmışlardır. Bazalt fiber, 12 mm'lik sabit uzunluk altında %0.15, %0.20, %0.25 ve %0.30 içeriklerinde zemin ile karıştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, bazalt fiberin, serbest basınç ve CBR mukavemetini etkili bir şekilde iyileştirebildiğini göstermiştir. Zemin numunesine %0.30 bazalt fiber karıştırıldığında, zeminin serbest basınç dayanımı %380, CBR dayanımı ise %365 artmıştır.

Altınsoy Bozkurt (2015), yüksek lisans tezi kapsamında yaptığı çalışmada %3-13 arasında farklı oranlarda kireç, uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminlerdeki kuruma çatlaklarına olan etkisini incelemiştir. Likit limit kıvamında hazırlanan karışımlar kurumaya bırakılarak kuruma süreci fotoğraflar çekilmiştir. Görüntü işleme

analizi ile çatlak alanları hesaplanmıştır. Sonuç olarak kullanılan katkılar ile kil zeminlerdeki kuruma çatlaklarının büyük oranda azaldığı belirlenmiştir.

Özsoy (2016), yüksek lisans tez çalışmasında atık lastik parçalarının (%0, %0.15, %0.3, %0.6 ve %1) ve ıslatma-kurutma çevrimlerinin kil zeminlerdeki kuruma çatlaklarına etkisini incelemiştir. Lastik atık içeriği %0.3'e kadar çatlak alanı artarken bu seviyeden sonra çatlak alanları önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca ıslatma-kurutma çevrimleri ile beraber kuruma çatlak alanlarında azalma meydana geldiği gözlenmiştir.

Chaduvula ve ark. (2017), şişen bir kil zemindeki kuruma çatlaklarına 6, 12 ve 18 mm kesme uzunluklarına ve kilin kuru ağırlığına göre %0.5'lik bir lif içeriğine sahip polipropilen liflerin etkisini incelemiştir. Likit limite yakın bir durumda karıştırılan katkısız ve lif takviyeli kil numuneleri sabit bir sıcaklık ve bağıl nemde kurumaya bırakılmıştır. Yüzey çatlak özelliği ölçümlerini ölçmek için dijital görüntü analizi kullanılmıştır. Sonuçlar, polipropilen lif takviyesi ile kil numunelerindeki kuruma çatlakların %75 oranında azaldığını göstermiştir. Ayrıca lif uzunluğu arttıkça kuruma çatlaklarının azaldığı belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Zemin Özellikleri

Çalışmada kullanılan killi zemin, Konya ili, Selçuklu ilçesi, 2. Organize Sanayi bölgesindeki bir alandan temin edilmiştir (Şekil 3.1).



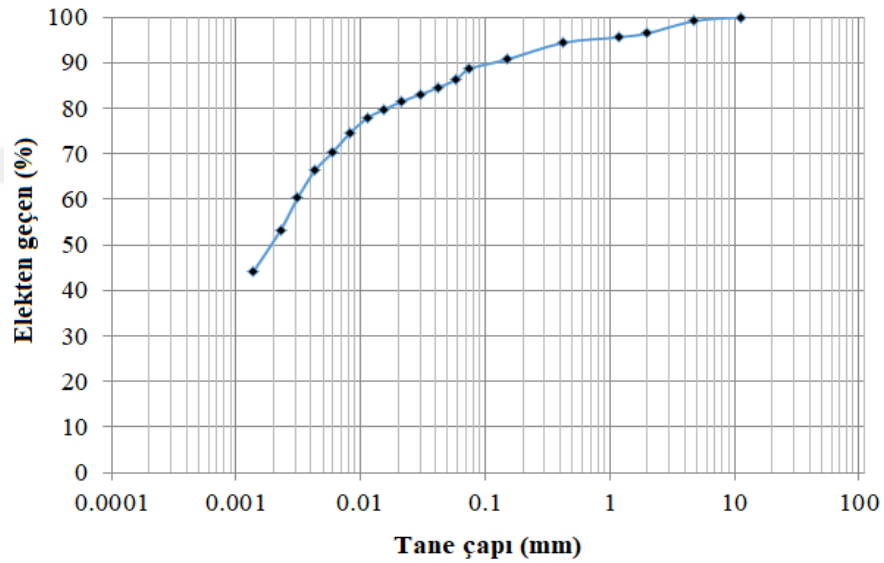
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan kil zeminin görünümü

Kil zemin, zemin mekaniği laboratuvarındaki öğütme cihazı kullanılarak deneysel çalışmalar için uygun hale getirilmiştir (Şekil 3.2). İstenilen zemin özelliklerinin elde edilmesi amacıyla araziden getirilen zemine %30 bentonit ilavesi yapılmıştır. Zemin-bentonit karışımının indeks özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitleri ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.



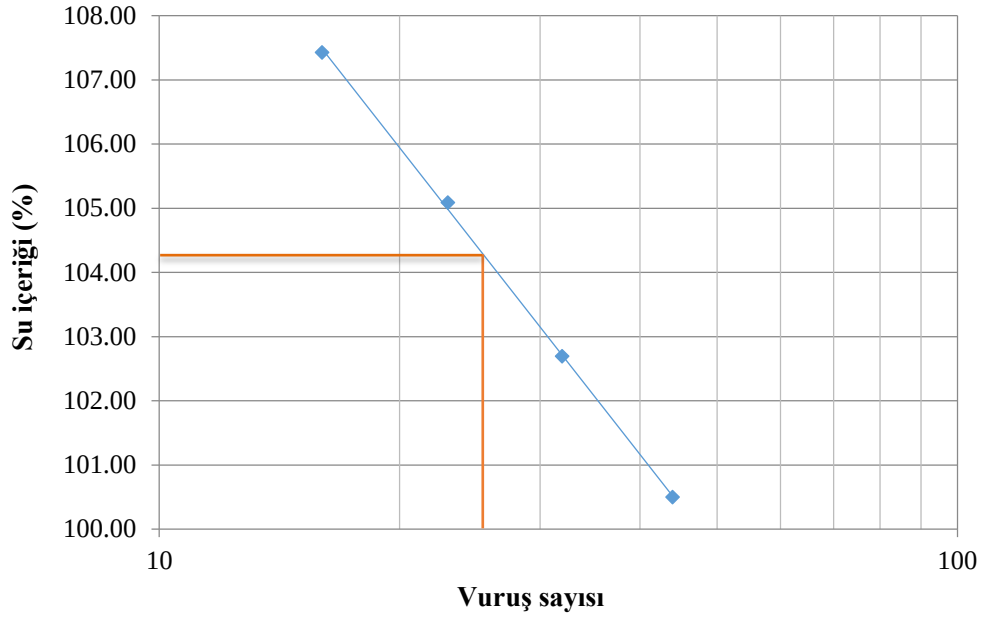
Şekil 3.2. Kil zeminin öğütülmesi

Elek analizi ASTM D1140-17 ve hidrometre deneyi ASTM D422-63 standardına uygun yapılarak granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 3.3). Zemin içerisinde %0.86 çakıl, %10.50 kum, %38.21 silt ve %50.43 oranında kil bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Zeminin tane dağılım eğrisi

İnce tanelerin oranı %50'den fazla olduğu için zemin sınıflandırması yapılırken Casagrande Plastisite kartı kullanılmıştır. ASTM D4318 standardına göre yapılan Atterberg limit deneylerinden zeminin likit limit değeri $w_L = \%104.4$ (Şekil 3.4), plastik limit değeri $w_P = \%30.6$ olarak elde edilmiştir. Likit limit ve plastik limit değerleri kullanılarak zeminin plastisite indisi $PI = \%73.8$ hesaplanmıştır. Ayrıca, zeminin özgül ağırlığı ASTM D 854 standardına göre yapılan piknometre deneyinde 2.65 olarak belirlenmiştir.

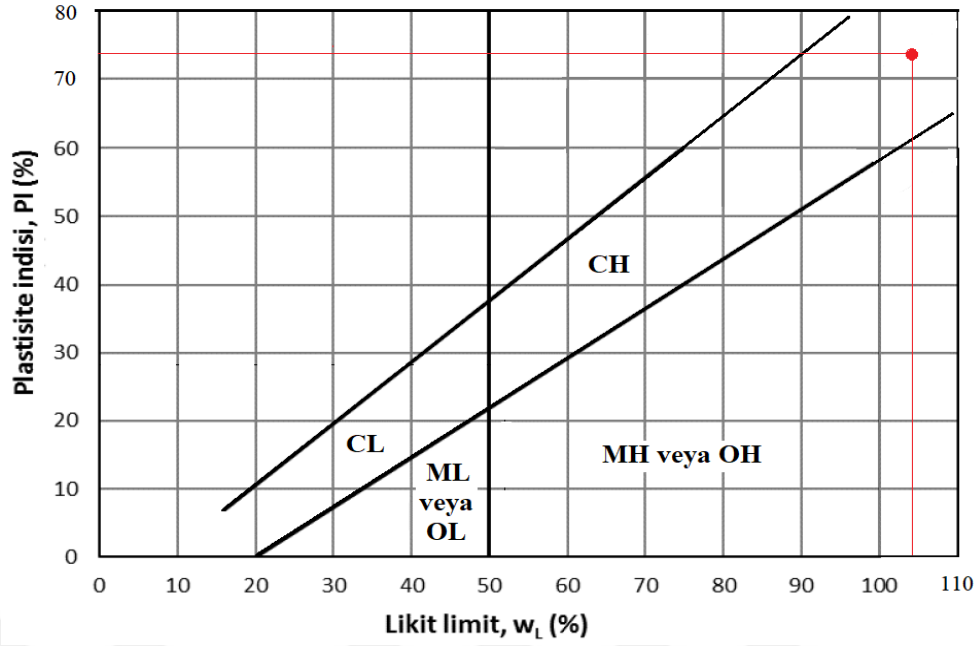


Şekil 3.4. Casagrande yöntemi ile likit limit değerinin belirlenmesi

Çalışmada kullanılan zemin, granülometri eğrisi ve Atterberg limitleri kullanılarak Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre CH (yüksek plastisiteli kil) olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3.5).

Zeminin plastisite indisi %73.8, kil yüzdesi (C) %50.43'tür. Bu bilgilere göre zeminin aktivite değeri (A_c) Skempton (1948) tarafından verilen aşağıdaki bağıntıya göre $A_c=1.46$ olarak hesaplanmaktadır. $A_c>1.25$ olduğu için çalışmada kullanılan kil zemin aktif bir kildir.

$$A_c = \frac{PI}{C} = \frac{73.8}{50.43} = 1.46 \quad (3.1)$$



Şekil 3.5. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre zemin sınıfının belirlenmesi

Zeminin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ayrıca zeminin özgül yüzey alanını belirlemek için Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan BET (yüzey alanı ölçüm cihazı) cihazı kullanılmıştır. Bentonit katkılı zeminin özgül yüzey alanı (ÖYA) 169.23 m²/g olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Zeminin fiziksel özellikleri

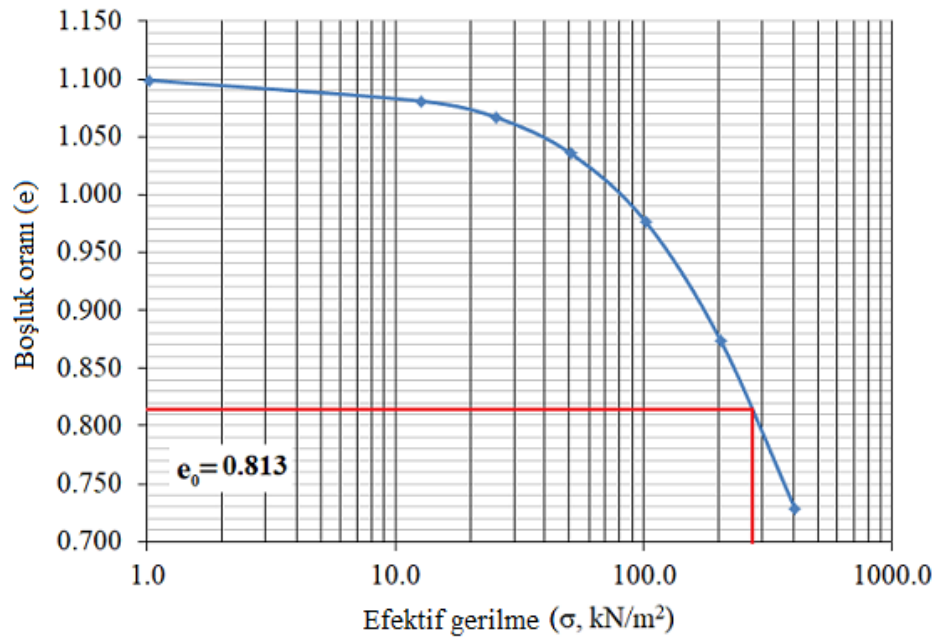
Özellik	Değer	Standart
Özgül ağırlık	2.65	ASTM D 854
Likit limit, w _L (%)	104.4	ASTM D 4318
Plastik limit, w _p (%)	30.6	ASTM D 4318
Plastisite indisi (PI) (%)	73.8	ASTM D 4318
Zemin sınıfı (USCS)	CH	ASTM D 2487
Optimum su muhtevası, w _{opt} (%)	28.5	ASTM D 698
Maksimum kuru yoğunluk, ρ _{kmax} (g/cm ³)	1.45	ASTM D 698

Bentonit katkılı zemin numunesi üzerinde ASTM D4546’da belirtilen A yöntemine göre şişme deneyi yapılarak şişme miktarından zemine ait şişme yüzdesi ve zemin numunesinin başlangıç boşluk oranına geldiği andaki gerilme değerinden de şişme basıncı belirlenmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Zemin+%30 bentonit karışım numunesi için şişme deneyinin yapılması

Şişme deneyine göre zeminin şişme yüzdesi % 14.45 şişme basıncı ise 265 kPa bulunmuştur (Şekil 3.7). Buna göre, çalışmada kullanılan kil yüksek/çok yüksek şişme potansiyeline sahiptir.



Şekil 3.7. %30 bentonit katkılı zemin için e-log σ' grafiği

3.2. Katkı Malzemelerinin Özellikleri

3.2.1. Kireç özellikleri

Çalışmada, Erciyes TS EN 459-1 CL 80-S söndürülmüş kireç kullanılmıştır. Kullanılan kirecin temel fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Kirecin görünümü Şekil 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan kirecin özellikleri

Temel Özellikler	Performans
Tane Büyüklüğü Dağılımı	
0.009 mm	≤ 7
0.2 mm	≤ 2
Kimyasal Yapı	
CaO+MgO	≥ 80
MgO	≤ 5
CO ₂	≤ 7
SO ₃	≤ 2
Serbest kireç	≥ 65



Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan kireç

3.2.2. Uçucu kül özellikleri

Çalışmada kullanılan uçucu kül, Kütahya Seyitömer Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu külün görünümü Şekil 3.9’da, kimyasal yapısı Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Seyitömer uçucu külünün kimyasal yapısı

Oksit (%)	Uçucu Kül	ASTM C 618	
		F	C
SiO ₂	54.49		
Al ₂ O ₃	20.58		
Fe ₂ O ₃	9.27		
S+A+F	84.34	>70.00	>50.00
CaO	4.26	<10.00	>10.00
MgO	4.48		
SO ₃	0.52	<5.00	<5.00
K ₂ O	2.01		
Na ₂ O	0.65		
KK	3.01	<6.00	<6.00
Cl-	0.006		
Serbest CaO	0.26		
Reaktif SiO ₂	39.01		
Reaktif CaO	2.49		

Kütahya Seyitömer Termik santralinden temin edilen uçucu kül ASTM C 618'e göre SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı %84.34 (S+A+F>%70) ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

**Şekil 3.9.** Çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu kül

3.2.3. Silis dumanı özellikleri

Çalışmada kullanılan silis dumanı katkısı, Antalya Elektro metalurji A.Ş.'den temin edilmiştir. Silis dumanının görünümü Şekil 3.10'da, kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'te detaylı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca silis dumanının elek analizi deney sonuçları ve yoğunluk değeri Çizelge 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan silis dumanı

Çizelge 3.4. Silis dumanının kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	%
SiO ₂	79.94
Fe ₂ O ₃	0.41
Al ₂ O ₃	0.83
MgO	7.68
CaO	2.53
Cr ₂ O ₃	0.38
SO ₃	0.83
Na ₂ O	0.55
K ₂ O	2.58
C	1.22
Kızdırma kaybı	2.96

Çizelge 3.5. Silis dumanının fiziksel özellikleri

Elek Analizi (mm)	%
0.250	0.18
0.125	0.73
0.074	0.57
0.044	1.14
Tava	97.38
Yoğunluk (g/cm ³)	0.199

3.2.4. Bazalt fiber özellikleri

Çalışmada kullanılan bazalt fiberler Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş (Denizli/Türkiye) şirketinden tedarik edilmiştir. Bazalt fiber içeriğinin yanı sıra fiber uzunluğunun da zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için 6, 12, 18 ve 24 mm uzunluğunda bazalt fiberler kullanılmıştır. Farklı uzunluktaki bazalt fiberlerin görünümü Şekil 3.11’de verilmiştir. Çizelge 3.6’da deneylerde kullanılan bazalt fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Farklı uzunluktaki bazalt fiberlerin görünümü

Çizelge 3.6. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri

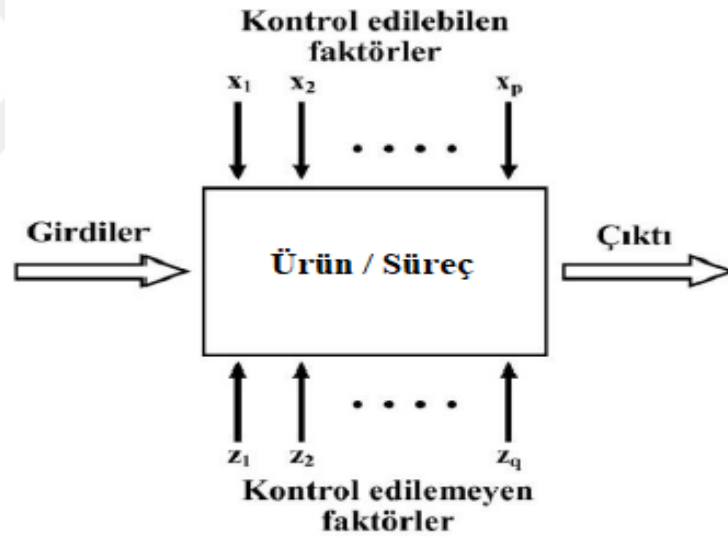
Bazalt Fiber		
Özellik	Değer	Birim
Özgül Ağırlık	2.60 - 2.65	kN/m ³
Elastisite Modülü	70 - 90	GPa
Çekme Dayanımı	2800 - 3300	MPa
Kopma Uzaması	3.1 - 6	%
Çapı	6 - 25	µm
Uygulamanın Sıcaklığı	(-250) - (550)	°C
Erime Sıcaklığı	1350	°C

3.3. Deney Programının Tasarlanması

Tez çalışmasında deney programlarının oluşturulması, araştırılan parametrelerin optimizasyonunun yapılması ve bu parametrelerin sonuçlar üzerindeki etki yüzdelerinin belirlenebilmesi için “Taguchi Yöntemi” kullanılmıştır.

3.3.1. Taguchi yöntemi

1950'li yıllara kadar tarım, kimya ve ilaç sanayisinde kullanılan Taguchi yöntemi, 1950'lerin başında Genichi Taguchi tarafından geliştirilerek mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. 1970'li yıllarda Japon sanayisindeki gelişmenin nedeni Taguchi yönteminin kullanılması olarak düşünülmektedir. Taguchi yöntemi, mühendislik tasarım ve süreçlerinin istatistiksel yöntemlerle geliştirilmesi üzerine bir optimizasyon metodudur. Taguchi, bir ürün veya sürecin kalitesinin değişken sayısında artışa bağlı olarak düştüğünü belirlemiştir. Bu nedenle, kaliteyi arttırmak için faktör olarak da bilinen tasarım parametrelerinin iyi seçilmesinin önemli olduğunu vurgulamıştır (Taguchi, 1987). Bir ürün veya sürece ait genel model Şekil 3.12'de verilmiştir. Taguchi yöntemi; sistem, parametre ve tolerans tasarımı prensibi üstüne kurulan bir deney tasarım ve optimizasyon metodudur. (Okumuş, 2015).



Şekil 3.12. Bir ürün veya sürece ait genel model (Rao ve ark., 2013)

Sistem tasarımı: Yeni bir ürün veya sürecin kavramsal olarak geliştirilmesi aşamasıdır. Bu aşama, normal şartlar altında çalışan sistemlerin teknik bilgiler kullanılarak geliştirilmesi ve müşteri beklentilerinin karşılanmasını amaçlar.

Parametre tasarımı: Sistem tasarımından sonraki aşamadır. Bu aşama, en uygun tasarım parametrelerini belirlemek için kontrol edilebilen faktörlerin en iyi kombinasyonunu seçerek performans ve maliyetin iyileştirilmesine dayanmaktadır. Bu amaçla oluşturulan ürün veya süreç tasarımı, sağlam tasarım (robust design) olarak adlandırılmaktadır. Bu aşamada parametreler bloke edilerek ortogonal dizinler

kullanılmaktadır. Ayrıca, sinyal/gürültü oranı (S/N) (Signal/Noise) analiziyle de hesaplama yapılabilmektedir.

Tolerans tasarımı: Bu çalışma, parametre tasarımından sonra istenen hedefe ulaşılamadığında uygulanmaktadır. Bu aşamada, hedef üzerinde büyük olumsuzluklara neden olan tasarım faktörlerinin tolerans aralıkları daraltılarak kalite arttırılmaya çalışılır. Tolerans tasarımında daha hassas ve pahalı bileşenler kullanılacağı için üretim ve işlem maliyetini arttırmaktadır.

Taguchi yöntemi, daha iyi bir tasarım için kontrol edilebilir faktörlerin kontrol edilemeyen faktörlere göre daha fazla seçildiği bir deneysel tasarımı sunmaktadır. Yöntem, sonucu etkileyen tüm faktörler hakkında en az deney sayısı ile en fazla bilgiyi veren ortogonal dizinler adı verilen özel bir diziye kullanılmaktadır (Rao ve ark., 2013).

Bu yöntem kullanılarak, çalışmadan elde edilen ölçüm sonuçları Sinyal/Gürültü (S/N) oranına dönüştürülür. S/N oranı, sistemden istenen gerçek değer (ortalama), deney planlanırken dikkate alınmayan ancak test sonucuna etkisi olan bir faktöre (standart sapma) oranıdır. Sinyal faktörü S ile gürültü faktörü ise N ile gösterilir. S/N oranı arttıkça nihai ürünün kalitesi artar. Bu nedenle gürültü değerini düşürürken sinyal değerini artırmayı amaçlar. Analizlerinde kullanılan S/N oranı aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (3.2)$$

MSD değeri (ortalama karesel sapma), hedef değer en büyük, en küçük ve belirli bir değer olması durumları için belirlenebilmektedir. Hedef değeri en büyük, en küçük ve istenen değer olması durumları için MSD değerleri sırasıyla Denklem 3.3, Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'teki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$MSD_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3.3)$$

$$MSD_{min} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (3.4)$$

$$y_{beklenen} = \sqrt{\frac{1}{MSD_{ort}}} \quad (3.5)$$

y_i = deney (analiz) sonuçları,

n = bir deneydeki tekrar sayısıdır.

Ek olarak, her deneysel parametrenin çıktı sonucunu etkileme derecesini belirlemek için bu prosedürde varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilir. Her terimin F değeri, Varyans Analizi tablosunda listelenir. F değeri, terimin sonuçla ilişkili olup olmadığını incelemek için kullanılan bir test istatistiğidir. Minitab, kavramların istatistiksel önemine ilişkin bir karar vermek için F-değerine dayalı olarak bir olasılık değeri (p-değeri) hesaplar. Yeterince büyük bir F değeri, terim veya modelin anlamlı olduğunu gösterir.

Tez çalışmasında, istatistiksel analiz sonuçları Minitab 19 Statistical Software yazılımı ile değerlendirilmiştir. Taguchi analizi yapılarak sonuçlar üzerinde etkili olan parametrelerin optimum seviyelerini belirlemek için S/N oranları belirlenmiştir. Daha sonra parametrelerin sonuç üzerindeki etki derecelerini belirlemek amacıyla çok parametrelili varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken tüm parametreler arasında etkileşim olduğu kabul edilmiştir.

3.3.2. Deney programı

Taguchi yöntemi, tasarım için özel olarak geliştirilmiş ortogonal dizi tablolarını kullanır. Bu çalışmada, 4 parametrelili ve 4 seviyeli bir L_{16} ortogonal dizisi kullanılmıştır. Puzolanik etkileşimi arttırmak için tüm karışımlara %3 oranında kireç ilave edilmiştir. Zemine eklenen kireç yüzdesi, zemini stabilize etmek veya işlenebilirliğini arttırmak için kullanımına bağlı olarak değişebilir. İşlenebilirliği arttırmak için küçük miktarlarda kireç gerekirken, stabiliteyi arttırmak için büyük kireç yüzdeleri gerekir. Önceki araştırmalar, yüksek plastisiteli killi zeminin stabilizasyonu için minimum %3 kireç ilavesinin gerekli olduğunu göstermiştir (Sharma ve Hymavathi, 2016; Türköz ve ark., 2018). Bu nedenle bu deneysel çalışmada kireç yüzdesi %3 olarak seçilmiştir. Bazalt fiber-uçucu kül ve bazalt fiber-silis dumanı katkılı zeminlerin mühendislik özelliklerini ayrı ayrı incelemek için iki adet deney tasarım tablosu oluşturulmuştur (Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8).

Çizelge 3.7. Bazalt fiber-uçucu kül katkıli karışımlar için hazırlanan Taguchi L₁₆ Ortogonal deney tablosu

Tasarım No	Parametreler			
	A Bazalt Fiber Uzunluğu (mm)	B Bazalt Fiber (Ağırlıkça, %)	C Kür Süresi (gün)	D Uçucu Kül (Ağırlıkça, %)
1	6	0	1	0
2	6	0.5	7	5
3	6	1	28	10
4	6	1.5	56	15
5	12	0	7	10
6	12	0.5	1	15
7	12	1	56	0
8	12	1.5	28	5
9	18	0	28	15
10	18	0.5	56	10
11	18	1	1	5
12	18	1.5	7	0
13	24	0	56	5
14	24	0.5	28	0
15	24	1	7	15
16	24	1.5	1	10

Çizelge 3.8. Bazalt fiber-silis dumanı katkıli karışımlar için hazırlanan Taguchi L₁₆ Ortogonal deney tablosu

Tasarım No	Parametreler			
	A Bazalt Fiber Uzunluğu (mm)	B Bazalt Fiber (Ağırlıkça, %)	C Kür Süresi (gün)	D Silis Dumanı (Ağırlıkça, %)
1	6	0	1	0
2	6	0.5	7	5
3	6	1	28	10
4	6	1.5	56	15
5	12	0	7	10
6	12	0.5	1	15
7	12	1	56	0
8	12	1.5	28	5
9	18	0	28	15
10	18	0.5	56	10
11	18	1	1	5
12	18	1.5	7	0
13	24	0	56	5
14	24	0.5	28	0
15	24	1	7	15
16	24	1.5	1	10

Oluşturulan tasarım deneyleri için öncelikle kompaksiyon deneyi (Standart Proktor) yapılarak her tasarım için optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen su içeriği ve yoğunluklarda hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi, yarmada çekme, permeabilite ve ıslak CBR deneyleri yapılmıştır.

3.4. Numune Hazırlama

Deneysel çalışmaların yürütülebilmesi için öncelikle deney tablosunda verilen her tasarım için ASTM D698-12e2 standardına göre kompaksiyon deneyi yapılmıştır.

Kompaksiyon enerjisi olarak standart Proktor kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır. Zemin standart Proktor tokmağı (2.5 kg) ile kompaksiyon moldu (kalıp) içerisine, 3 tabaka halinde ve her tabakaya 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır (Şekil 3.13). Deney sonunda, kompaksiyon grafikleri çizilerek her bir tasarım için optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerleri belirlenmiştir.

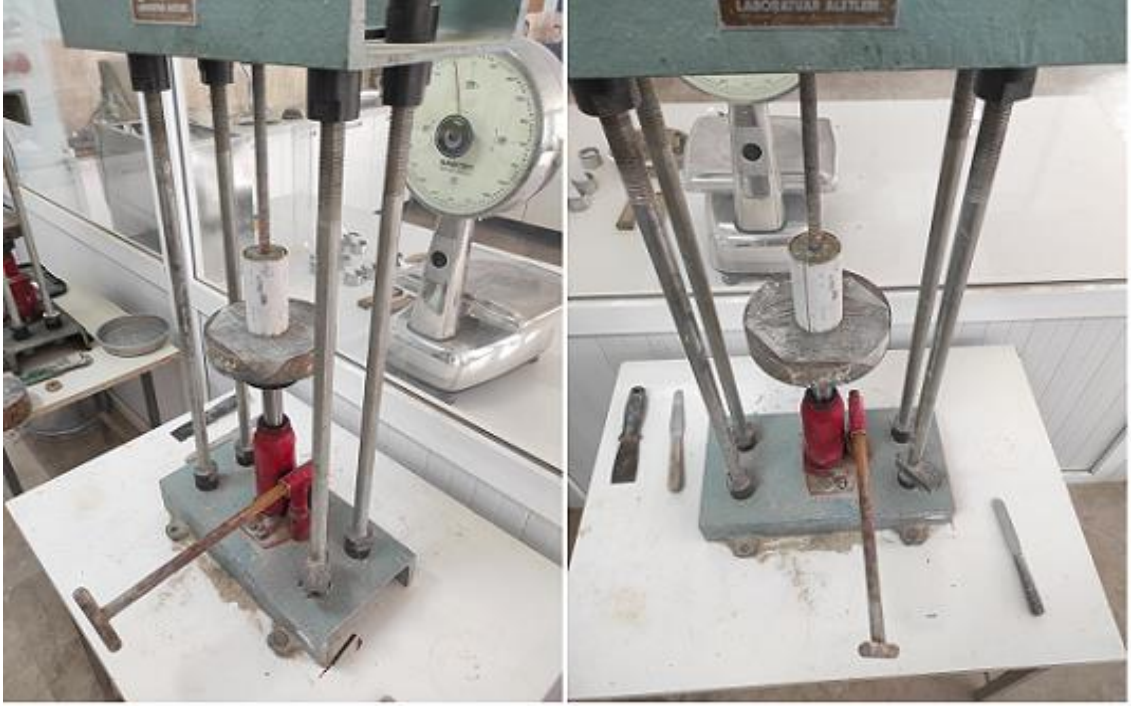


Şekil 3.13. Kompaksiyon deneyinin yapılması

Karışımlar, ilk önce kuru olarak hazırlanıp, iyice karıştırılarak malzemenin homojen dağılması sağlandıktan sonra su ilave edilmiştir. Deneylere % 25 civarında su içeriğiyle başlanıp, her seferinde yaklaşık % 2-3 artırılarak devam edilmiştir. Proktor kalıbı ve sıkıştırılmış zeminin toplam ağırlığı azalana kadar deneye devam edilmiştir.

Kompaksiyon deneyleri sonucunda, her tasarım için optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerleri elde edilmiştir. Belirlenen optimum su

içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta numuneler hazırlamak amacıyla kriko sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Kriko sistemi kullanılarak numune hazırlanması

Serbest basınç, yarmada çekme ve permeabilite numuneleri, tasarıma göre belirlenen miktarlarda alınarak önceden içi yağlanmış 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki plastik kalıplarda hacim kontrollü olarak 3 tabaka halinde kriko sistemi kullanılarak sıkıştırılmıştır (Şekil 3.15). PVC kalıplar deney numunelerinin hazırlanması amacı ile özel olarak tasarlanmıştır. Numuneler, kompaksiyon deneylerindeki yoğunluk değerlerinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Kalıplardan çıkarılan numunelere ait görüntüler Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.15. Numune hazırlama süreci



Şekil 3.16. Kalıptan çıkarılan numunelerin görünümü

Hazırlanan numuneler hava almayacak şekilde poşetlenmiştir. Daha sonra saklama kabı içerisinde oda sıcaklığında güneş ışığı almayan bölmelerde deney tablosunda verilen sürelerde küre bırakılmıştır (Şekil 3.17). Kür süresi sonunda uygun başlıklı krika ile kalıplardan çıkarılan numuneler üzerinde gerekli deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde her tasarım için 3 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 3.17. Numunelerin kür için hazırlanması

3.5. CBR Deneyi

Katkısız ve katkılı zemin numunelerinin düşey yükleme altında gösterdiği yük - deformasyon davranışını tespit etmek amacıyla CBR deneyleri yapılmıştır. Tasarım tablolarında yer alan her tasarım için hazırlanan 3'er numune üzerinde deney tablosundaki kür süreleri sonunda ıslak CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, standart Proktor deneyinden elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde CBR kalıplarında sıkıştırılarak oluşturulmuştur. CBR deneyleri ASTM D1883-16 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, kür süreleri tamamlandıktan sonra şişme yüzdesini belirlemek için 96 saat boyunca 4.6 kg sürşarj yükü altında suda bekletildikten sonra deneyler gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.18). 2.54 mm ve 5.08 mm deformasyonlar için alınan yük okumaları, standart kırma taş malzemesinin 2.54 mm ve 5.08 mm deformasyonları için belirlenmiş olan standart yük okumaları ile orantılanarak iki ayrı CBR değeri elde edilmektedir. Katkısız ve katkılı karışımların CBR değeri, hesaplanan iki değer arasında

büyük olanı seçerek belirlenmektedir. CBR değerleri Denklem 3.6 ile belirlenmekte ve sonuçlar yüzde olarak ifade edilmektedir.

$$\text{CBR (\%)} = \frac{\text{Düzeltilmiş yük}}{\text{Standart yük}} \times 100 \quad (3.6)$$



Şekil 3.18. CBR deney aşamaları.

3.6. Permeabilite Deneyi

Taguchi deney tablosunda yer alan tasarımlar ve katkısız zemin numunesi üzerinde ASTM D5084 standardına göre düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Standart Proktor deneylerinden elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerleri dikkate alınarak hazırlanan numuneler deney sistemine yerleştirilerek her tasarım için permeabilite deneyi yapılmıştır (Şekil 3.19).

Düşen seviyeli permeabilite deneyinde zeminin cinsine göre, uygun enkesitteki (çaplı) saydam bir boru (iç çapları 3-10 mm) zemin örneği üzerine takılır. Su akışı sırasında numune iç yapısında oluşabilecek erozyonu önlemek ve su çıkış deliğinin tıkanmasını önlemek için numunenin alt kısmına filtre kağıdı yerleştirilmektedir. Hazırlanan numuneler deney tablosundaki kür süresinin ardından üstteki boruya doldurulan su, zeminden geçerek dışarı akmaktadır. Kararlı akış elde edildikten sonra; deney başında ve sonundaki su yükseklikleri ile arada geçen zaman ve enkesit alanlarından, zeminin geçirimsizlik katsayısı hesaplanmaktadır. Permeabilite katsayısı Denklem 3.7 kullanılarak elde edilmiştir.

$$k = \frac{aL}{At_1} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.7)$$

Burada;

- A: numunenin en kesit alanı (cm²)
- a: cam borunun en kesit alanı (cm²)
- t₁: deney süresi (s)
- L: numunenin uzunluğu (cm)
- h₁: başlangıçtaki su yüksekliği (cm)
- h₂: t₁ süresi sonundaki su yüksekliğidir (cm).



Şekil 3.19. Permeabilite deneyinin yapılışı

3.7. Kuruma Çatlaklı Deneyi

Şişen zeminler, sıcaklık ve su içeriğine karşı oldukça hassastır ve bunlara maruz kaldıklarında genellikle büyük bir hacim değişikliğine uğrarlar. Su içeriğindeki artış ve sıcaklıktaki azalma ile hacimde önemli bir artış gözlemlenebilir. Aksine, su içeriğinde azalma ve sıcaklıkta artış meydana geldiği durumda hacimde azalma olmaktadır. Bu olay büzülme olarak bilinir. Büzülme, kılcal basınç altında zemini yoğunlaştırma işlemidir. Kılcal kuvvetler zemin tarafından üretilebilen iç gerilmelerden daha büyük olduğu sürece hacim azalması meydana gelir.

Büzülme olayı sırasında zeminde kuruma çatlakları meydana gelir. Yüzey çatlakları, boşluk suyunun zeminden uzaklaşması nedeniyle oluşan büzülmenin sonuçlarıdır. Heterojen ve rijit olmayan zeminlerin çoğunda meydana gelen karmaşık bir olgudur.

Çatlaklar ve büzülme, kil minerallerinin türü, kil yüzdesi, ayrışma derecesi, sıcaklık, başlangıçtaki su içeriği, kil parçacıklarının spesifik yüzey alanı, parçacık dizilimi ve çökelme kalınlığı gibi pek çok faktöre bağlıdır.

Hem yüzey çatlakları hem de yüzey büzülmesi herhangi bir zeminin geoteknik özelliklerini çeşitli şekillerde etkiler. Çatlakların gelişmesi zeminin taşıma kapasitesinin düşmesine ve inşaat yapılarında farklı oturmalara ve zeminin permeabilitesinin önemli ölçüde değişmesine neden olur (Singh ve ark.; 2015). Ayrıca şev duraysızlığına neden olabilir ve engebeli alanlarda heyelanlara katkıda bulunabilirler. Sızıntı sularının yanı sıra, çatlama, düzenli depolama astarlarının ve kapaklarının bütünlüğünü ve stabilitesini etkileyebilir (Yeşiller ve ark., 2000). Toprak barajlarda, çatlaklar mukavemeti azaltır ve sızma ve süzülme sorunlarına yol açar. Bu sorunların üstesinden gelmek ve heterojen ve rijit olmayan zeminlerin doymamış hidrolik özelliklerindeki değişikliklerin anlaşılmasını ve tahmin edilmesini geliştirmek için yüzey çatlakları ve büzülme davranışı bilgisi esastır.

Çalışmada, kullanılan katkı maddelerinin killerdeki kuruma çatlaklarına etkisini belirlemek amacıyla Çizelge 3.9’da verilen deney programı tasarlanmıştır. Karışımların likit limit değerleri Casagrande likit limit deneyi ile belirlenmiştir. Bazalt fiber katkısı, numunelerin likit limit değerini belirlemeye imkân vermediği için fiber katkılı numuneler katkısız zeminin likit limiti dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Çizelge 3.9. Kuruma çatlağı deney tablosu ve likit limit değerleri

Deney No	Karışım	Likit limit (%)
1	Katkısız	104.4
2	Z+%3 Kireç	88.1
3	Z+%3 Kireç+%5 UK	80.6
4	Z+%3 Kireç+%10 UK	78.8
5	Z+%3 Kireç+%15 UK	77.1
6	Z+%3 Kireç+%5 SD	77.5
7	Z+%3 Kireç+%10 SD	75.8
8	Z+%3 Kireç+%15 SD	74.4
9	Z+%0.5 BF (18 mm)	104.4
10	Z+%1.0 BF (18 mm)	104.4
11	Z+%1.5 BF (18 mm)	104.4

Çizelge 3.9’da verilen likit limit değerlerinde suya doyurulan numuneler sert plastik kaplar içerisine boşluk kalmayacak şekilde serilerek kurumaya bırakılmıştır. Kurumaya bırakılan numunelerin, 1.günde ve 1 haftalık arayla 8 hafta boyunca 16 megapiksel (MP) kamera çözünürlüğünde fotoğrafları çekilmiştir. Kuruma süreci

sonunda çekilen bu fotoğraflar ile görüntü işleme analizi yapılarak çatlak alanları belirlenmiştir.

Ayrıca ıslatma-kurutma çevriminin kuruma çatlakları üzerindeki etkisini belirlemek için hazırlanan numuneler üç kere ıslatma-kurutma çevrimine tabi tutulmuştur. Fotoğraflar çekilirken aynı ışık ortamının sağlanması amacıyla yapı laboratuvarındaki özel fotoğraf odası kullanılmıştır. Numune hazırlama süreci ve fotoğraf çekimi Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Kuruma çatlaklı deney numunelerinin hazırlanması ve fotoğraf çekimi

Karışımların 1. Çevrim sonundaki görüntüleri Şekil 3.21-3.31’da verilmiştir. Tamamen kuruyan numuneler daha sonra tekrar ıslatılarak kurumaya bırakılmıştır. Çekilen tüm fotoğraflar üzerinde görüntü işleme analizi yapılarak katkı maddelerinin ve ıslatma-kurutma çevriminin kuruma çatlaklı üzerindeki etkisi belirlenmiştir.



Şekil 3.21. Katkısız numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.22. Zemin+%3 Kireç katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.23. Zemin+%3 Kireç+%5 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.24. Zemin+%3 Kireç+%10 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.25. Zemin+%3 Kireç+%15 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



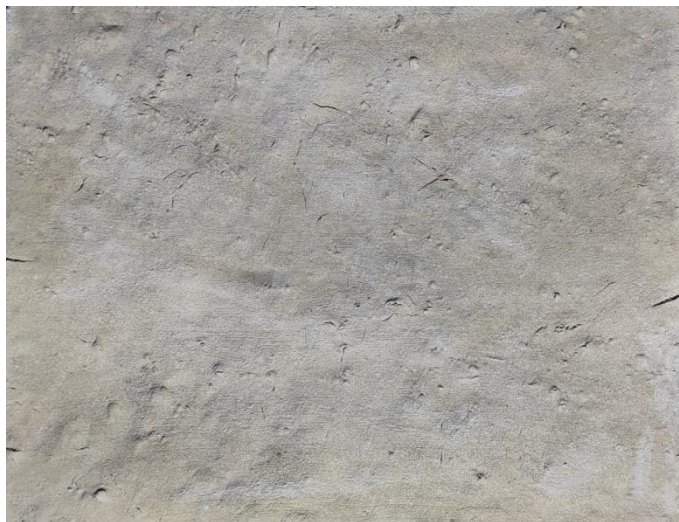
Şekil 3.26. Zemin+%3 Kireç+%5 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.27. Zemin+%3 Kireç+%10 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.28. Zemin+%3 Kireç+%15 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.29. Zemin+%0.5 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.30. Zemin+%1 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı



Şekil 3.31. Zemin+%1.5 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı

3.7.1. Görüntü işleme analizi ile çatlak alanlarının belirlenmesi

Görüntü işleme analizi teknikleri, herhangi bir obje görüntüsünün bilgisayar ortamına aktarılarak belirli amaçlar doğrultusunda bilgisayarla işlenmesini içermektedir. Görüntü işleme analizi, geoteknik mühendisliğinde; deformasyon ölçümü, kayma/kırılma yüzeylerinin belirlenmesi, tane boyutu ve biçiminin belirlenmesi, boşluk analizi vb. gibi birçok amaçla kullanılmaktadır.

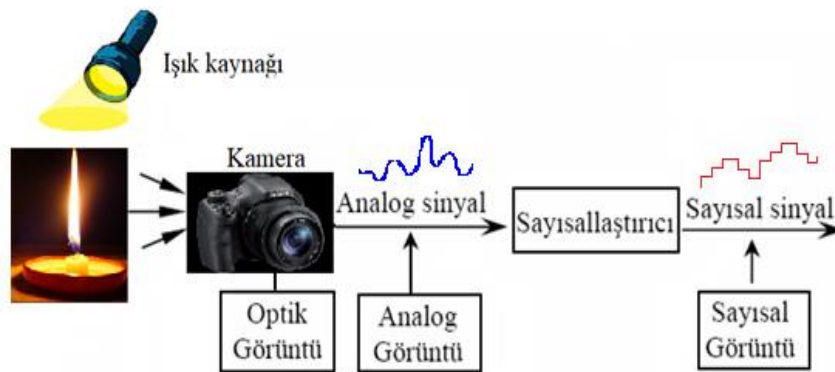
Görüntü analizi tekniği ilk olarak 1960'lı yıllarda bilgisayar ve mikroskop teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak uzay araştırmalarında kullanılmıştır. Daha sonra tıp, mühendislik, biyoloji, diş hekimliği, elektronik, tekstil, endüstri, astronomi, petrol, bilgisayar, fizik ve kimya gibi birçok bilim dalında kullanılmaya başlamıştır.

Görüntü işleme analizi yapılırken çalışmanın amacına göre en uygun yazılımın seçilmesi görüntü işlemedeki en önemli faktörlerdendir. Filtreleme, sınıflama, ölçüm, renk ve kontrast oranlarını ayarlamak için uygun yazılımların kullanılması gerekir. Kısıtlı da olsa Photoshop, Coreldraw ve Image gibi programlar da görüntü işlemeye olanak vermektedir. Görüntü işleme analizinde, görüntü yakalamada kullanılan aygıtın çözünürlüğü, resim özelliklerinin kalitesi ve analizlerin gerçekleştirileceği bilgisayarın özellikleri yapılacak işlemi ve sonuçlarını doğrudan etkiler.

Sayısal görüntü elde edildikten sonra, görüntü analizine geçmeden önce elde edilen görüntünün daha net ve anlaşılır hale getirilmesi gerekmektedir. Böylece görüntü hatasız ve kolay bir şekilde işlenebilir. Bunun için görüntüye ait parlaklık, renk tonu ve zıtlık gibi bilgilerin değiştirilmesi; ayrıntıların belirginleştirilmesi ve manyetik alan ya da görüntüleme esnasında hatalı donanım ayarlarının kullanımı gibi nedenler ile oluşabilecek görüntü kirliliklerin giderilmesi gibi işlemlerle görüntü kalitesi iyileştirilebilir (Dipova, 2018).

3.7.1.1. Sayısal görüntü

Sayısal görüntü, sayılarla ifade edilen ve bilgisayarın temelini oluşturan ikili sayı sistemi kullanılarak tanımlanan bir veri dosyasıdır. Sayısal görüntüler, önce ışığı elektriksel veriye, daha sonra sayısallaştırarak sayısal veriye dönüştüren mikro işlemciler aracılığıyla oluşturulmaktadır (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Sayısal görüntünün elde edilmesi süreci

Günümüzde CCD (şarj eşleştirmeli cihaz) ve CMOS (bütünleyici metal oksit yarı iletken) sensörlü kameralar kullanılarak görüntü alınmaktadır. Görüntüde daha az

geometrik bozulma ve kirliliğin meydana geldiği CCD sensörlü kameralar daha fazla tercih edilmektedir. Kompakt kameralarda mercek, elektronik donanım ile beraber sabit iken SLR (tek lens yansıması) kameralar merceğin değiştirilebilmesine imkân tanımaktadırlar. Böylece, çalışma amacına uygun olacak şekilde yakın çekim (macro), mikroskop ve telefoto gibi lensler kullanılabilir. Görüntü alma sırasında üç boyutlu bir cismin görüntüsü iki boyutlu bir düzleme aktarıldığı için perspektif etkisi meydana gelmektedir. Görüntünün uzaktan ve telefoto lensler kullanılarak alınması bu etkiyi ihmal edilebilir düzeye indirebilir.

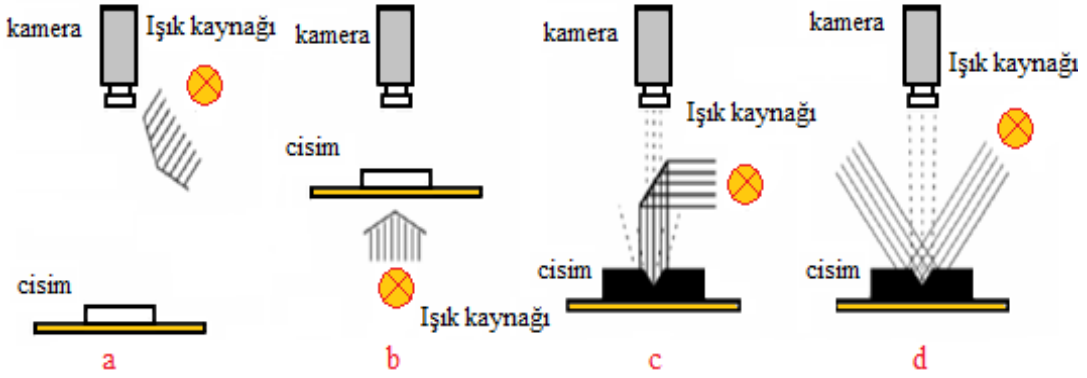
Lens aracılığıyla nesneden yansıyan ışınlar optik formda kameraya aktarılır. Nesneyi tanımlayan bu ışınlar, kamerada analog elektrik sinyallerine ve bir sayısal dönüştürücüde sayısal sinyallere dönüştürülür. Diğer bir deyiş ile sayısal görüntü, iki boyutlu ışık şiddetinin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu fonksiyon $f(x,y)$ olarak gösterilirse burada;

x ve y kartezyen koordinatları,

f 'nin (x,y) noktasındaki sayısal değeri ise parlaklık değerini ya da bu (x, y) noktasındaki gri seviye değerini verir (Şekil 3.33).

256 gri ton seviyesinden oluşan gri seviye ölçeklemesi birçok çalışma için uygundur. Bununla birlikte, bazen 24 milyon renk tonunu içeren renkli ölçek (RGB=kırmızı, yeşil, mavi) de kullanılabilir. Gri ton bir görüntüde her pikselin tek parlaklık değeri vardır. RGB bir görüntüde ise her piksel kırmızı, yeşil ve mavinin bir tonuna sahiptir. Bu üç renk değişkeni farklı yoğunluklarda bir araya gelerek gözün farklı renkler algılamasını sağlar. Sayısal görüntünün en basit hali olan ikili görüntüde ise pikseller 0 ya da 1 olmak üzere sadece 2 değer (siyah ve beyaz) alır.

Çözünürlük, bir görüntünün sahip olduğu dikey ve yatay piksel sayılarının çarpımı olarak tanımlanır. Görüntü işlemede alınan görüntünün çözünürlüğünün yüksek olması analizin başarı oranını artırır. Ancak yüksek çözünürlük, analizlerde kullanılacak donanımın özellikleri açısından problem oluşturabilmektedir.



Şekil 3.34. Çevre aydınlatmasının farklı şekillerde yapılması (Erhart, 2000)

Gün ışığı ya da noktasal ışık kaynağı (ampul) kullanılması durumunda yakında bulunan objeler ve arka plan üzerine düşen ışık, üniform olmayan bir aydınlatma ve gölgelenme meydana getirmektedir. Sonuç olarak, az ışık alan arka plan objeler ile çok ışık alan objeler farklı ortam olarak algılanır ya da arka plan ile aynı renk seviyesine sahip olması durumunda bölümlenme yapılması zorlaşır. Bu durumun önüne geçmek için çok sayıda ışık kaynağı (örneğin LED dizini) kullanılarak üniform bir aydınlatma sağlanabilir (Dipova, 2017).

3.7.1.2. Görüntü analizi yöntemleri

Görüntü işleme analizi; insanın görme sisteminin işleyişini taklit ederek nesnelere ait görüntüler üzerinde hesaplamalar yapar. Analiz süreci; ölçme, değerlendirme ve karar verme aşamalarından oluşur.

Sayısal görüntü analizinde genellikle uygulanan işlemlerle yeni bir görüntü elde edilmez. Alınan görüntüye ait değerlendirmeler yapılır ve görüntü ile ilgili bazı istatistikler çıkarılır. Sayısal görüntü analizinde, nesnelere ait çeşitli parametrelerin (alan, uzunluk, şekil, açı, dokusal yapı, görel konum, RGB renk değerleri ve gri ton değeri vb.) ölçülmesi amaçlanır (Dipova, 2018). Temel görüntü analizi yöntemleri;

- Eşikleme
- Bölümlenme
- Kenar bulma
- Havza ayırma ve
- Kontur bulma (findcontours)'dır.

Bu çalışmada eşikleme ve kontur bulma (findcontours) yöntemleri kullanılarak çatlak alanları belirlenmiştir.

3.7.1.3. Eşikleme

Eşikleme (treshold), görüntü işleme analizlerinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Gri ton eşiklemesinde, bir eşik değeri seçimi yapılarak, açık ton üzerindeki koyu kısımların veya tam tersi olarak koyu zemin üzerindeki parlak kısımların belirlenmesi hedeflenmektedir. Böylece “obje” ve “arka plan” olmak üzere iki kısım belirlenmiş olur. Eşik değerini belirlemek amacıyla görüntüye ait parlaklık histogramı çıkarılır. Yüksek değerdeki kısımlar bu görüntü için arka planı gösterirken daha düşük değere sahip olan kısımlar ise objeleri gösterir.

Renkli görüntüler ise bir pikselde temel olarak üç renk bileşenini içerir (RGB: kırmızı, yeşil, mavi). Bu bileşenlerin her biri, 1 byte ile anlatıldığında her bir piksel $255 \times 255 \times 255$ farklı renk değerine sahip olabilir. Bir piksel, ikili uzaya aktarılırken renk bileşenlerinin tümü 255 veya tümü 0 olur. Bunu yaparken bir eşik değeri belirlenir ve pikselin renk bileşeni bu sınırdan büyükse 255 küçükse 0 alınır.

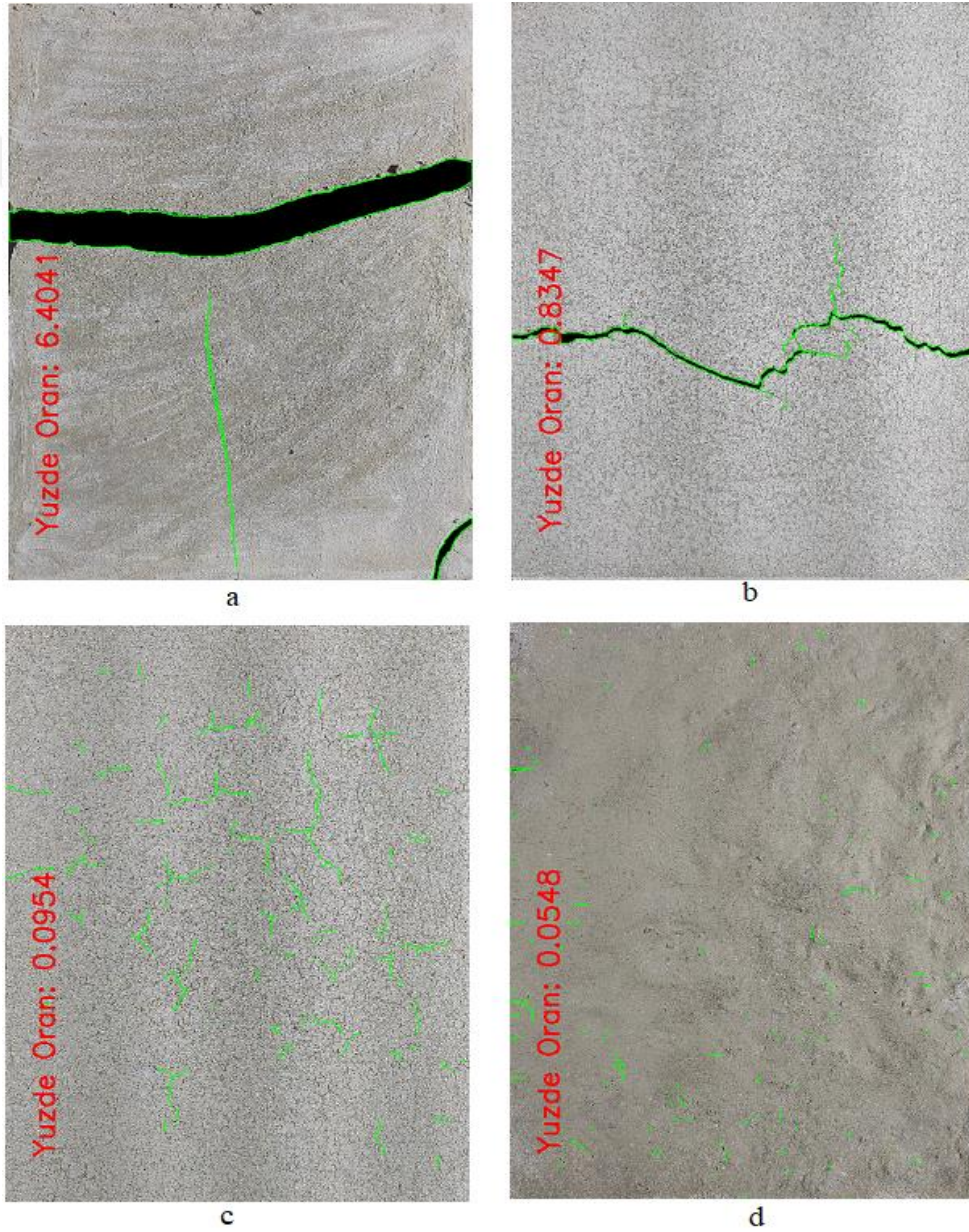
RGB renk uzayında, ışık temel alınarak doğadaki tüm renklerin kodları bu üç temel renge göre belirtilir. HSV (renk, doygunluk, değer) ya da HSB (renk, doygunluk, parlaklık) renk uzayında ise renkler sırasıyla renk özü, doygunluk ve parlaklık olarak tanımlanır. Renk özü, rengin baskın dalga uzunluğunu belirtir. Örneğin mavi, yeşil, sarı, vb. açısal bir değer belirtir (0° - 360°). Doymunluk ise rengin canlılığını belirtir. Düşük doymunluk rengin gri tonlarına neden olurken, yüksek doymunluk canlı renklere neden olur ve 0-100 arasında değişir. Parlaklık ise rengin aydınlığını yani içindeki beyaz oranını belirtir ve doymunluk gibi 0-100 arasında değişir. RGB ve HSV'nin bileşenlerinin histogramları üzerinde seçim yapılarak eşikleme gerçekleştirilir (Dipova 2018).

3.7.1.4. Kontur bulma (findcontours)

Görüntü işlemede kontur denilen kavram, bir rengin veya yoğunluğunun sahip olduğu tüm sürekli noktaları birleştiren kapalı bir eğriyi tanımlamaktadır. Konturlar bir görüntüde bulunan nesnelerin şekillerini temsil eder. Kontur algılama; şekil analizi, nesne algılama ve tanıma için faydalı bir yöntemdir. Kenar tespiti yapılırken, renk

yoğunluğunun önemli ölçüde değiştiği noktalar belirlenir. Ayrıca, konturlar görüntüdeki nesnelerin şekillerine karşılık gelen soyut nokta ve segment koleksiyonlarıdır. Sonuç olarak, herhangi bir görüntüdeki kontur sayısını saymak, bunları nesnelerin şekillerini kategorize etmek için kullanmak, bir görüntüden nesneleri kırmak (görüntü bölümleme) ve çok daha fazlası için kontur bulma (findcontours) yöntemi kullanılabilir.

Eşikleme ve kontur bulma yöntemleri kullanılarak tüm fotoğraflardaki çatlak alanları belirlenmiştir. Çatlak alanı belirlenen numunelerden bazıları Şekil 3.35'te verilmiştir.

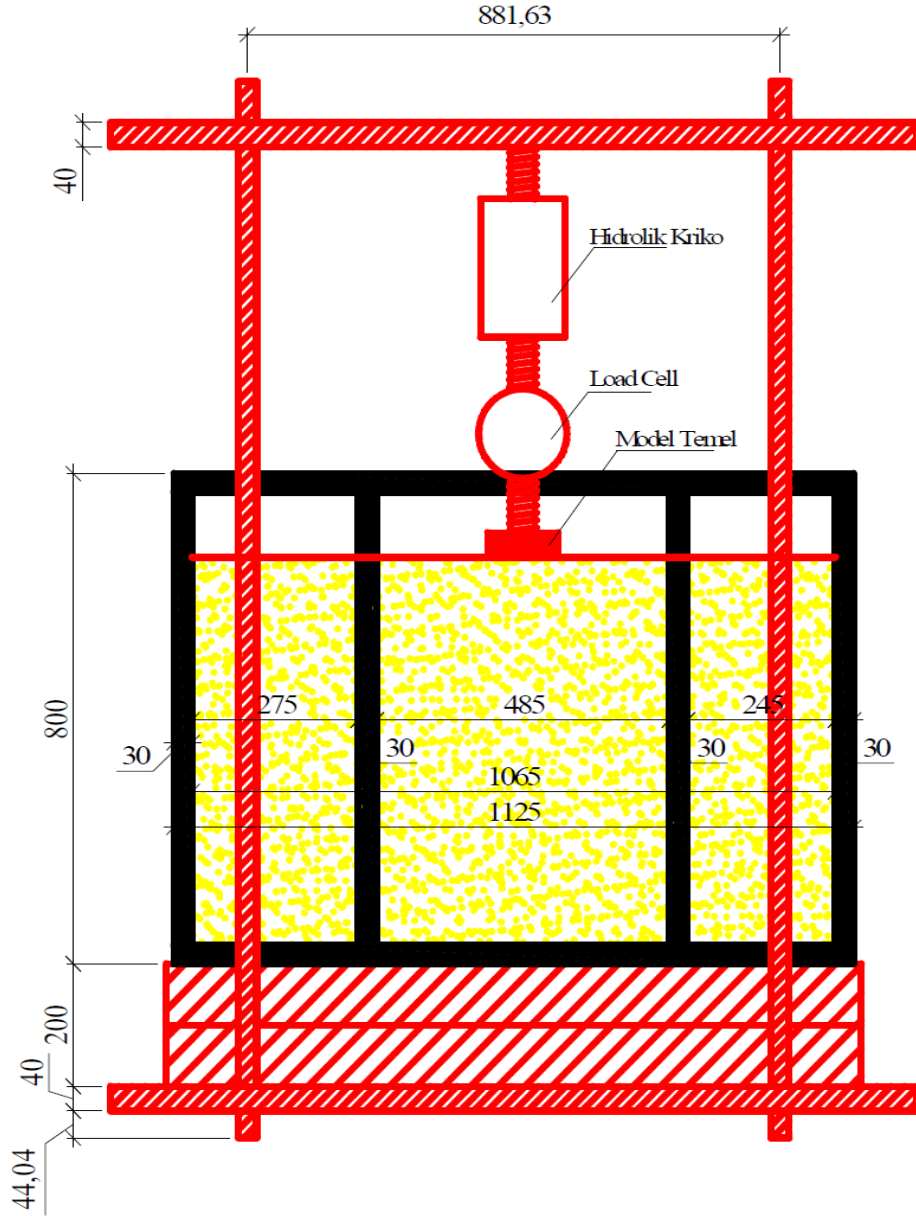


Şekil 3.35. 8. hafta sonunda kuruyan numunelerin çatlak alanlarının belirlenmesi a. Katkısız zemin, b. Zemin+%3K+%10UK, c. Zemin+%3K+%5SD, d. Zemin+%1BF

3.8. Büyük Ölçekli Deneylerin Yapılması

Tez çalışmasının bu kısmında, bazalt fiber ve mineral katkılı zeminlerin taşıma gücü arazi temsiliyeti açısından ve iyileştirilecek olan zemin özellikleri dikkate alınarak büyük ölçekli deneylerle araştırılmıştır. Oluşturulan deney tasarımları üzerinde yapılan dayanım deneylerinde en iyi mukavemet özelliklerinin elde edildiği tasarımlar ve katkısız zemin için model şerit temel yükleme yapılmıştır.

Deneyler için İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında bulunan ve Demiröz (2008) doktora tez çalışması kapsamında imal edilen deney düzeneği kullanılmıştır. Deney tankı 30 cm genişlik, 112.50 cm uzunluk ve 80 cm yüksekliğe sahiptir. Tankın ön ve arka yüzlerinde 15 mm kalınlığında temperli cam plakalar, yan yüzeylerinde ise 3 mm et kalınlığına sahip çelik saç bulunmaktadır. Tankın tüm yüzeyleri 30×30 mm kutu profiller ile desteklenmiştir. Böylece, deney sırasında düşey yüklerden dolayı yan duvarlarda meydana gelebilecek deformasyonların önlenmesi için tankın rijitliği arttırılmıştır. Ayrıca, deney sırasında meydana gelecek deformasyonların sınırlı kalması için tankın üst kısmında 3 mm et kalınlığında, 80 mm genişliğinde dört adet U kesitli çelik profil ile destek yapılmıştır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. Deney düzeneği (ölçüler mm) (Demiröz, 2008)

Deneylerde model temelin sabit bir hızla yüklenebilmesi için yükleme hızı ayarlanabilen Tekno-Dinamik tarafından üretilen 200 kN kapasiteli, hidrolik pres kullanılmıştır. Deneysel çalışmada 100×292 mm boyutlarında şerit temel tipi esas alınmıştır. Temel 40 mm kalınlığında rijit çelik plakalardan oluşturulmuştur (Şekil 3.37). Model temelin tabanına, sürtünme (pürüzlü bir yüzey) sağlamak amacıyla zımpara kâğıdı yapıştırılmıştır.



Şekil 3.37. Deneylerde kullanılan model şerit temelin görünümü

Deney tankı içerisinde 45 cm kum, 30 cm kil zemin (optimum tasarımlar ve katkısız zemin) olacak şekilde deney numuneleri hazırlanmıştır. Yüklemeler sırasında kum zeminde oluşabilecek büyük deformasyonları engellemek için kum zemin, rölatif sıkılığı $D_r = \%70$ (sıkı) olacak şekilde 5 cm'lik tabakalar halinde serilmiştir. Kil zemin ise optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerinde 5 cm'lik tabakalar halinde sıkıştırılmıştır. Zemin tabakaları hacim kontrollü olarak sıkıştırılmıştır. 5 cm kalınlık için gereken zemin miktarı tank içerisine yerleştirildikten sonra üzerine ağırlık düşürülerek istenilen hacime getirilmiştir.

Her tabaka için gereken kum zemin önce %3 su içeriğinde homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra tank içerisine aktarılmıştır (Şekil 3.38). Zemini istenilen sıkılığa getirmek için dikdörtgen taban alanlı ağırlık kullanılmıştır (Şekil 3.39). Kum zeminin indeks özellikleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.10. Kum zeminin indeks özellikleri

Özgül ağırlık (G_s)	2.65
Minimum boşluk oranı (e_{min})	0.37
Maksimum boşluk oranı (e_{max})	0.75
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{k,max}$ (kN/m^3)	1.935
Minimum kuru yoğunluk, $\rho_{k,min}$ (kN/m^3)	1.515

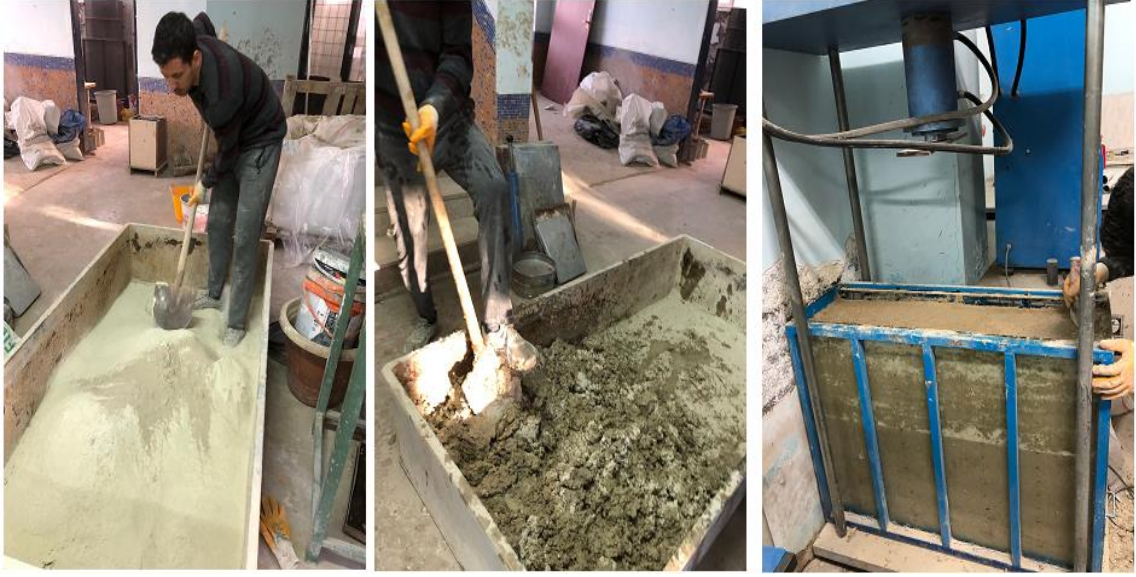


Şekil 3.38. Kum zeminin karıştırılması ve tank içerisine aktarılması



Şekil 3.39. Kum zeminin sıkıştırılmış hali

Kum zemin istenilen sıklıkta serildikten sonra kil zemin optimum su içeriğine getirilerek tank içerisinde 5 cm tabakalar halinde sıkıştırılmıştır (Şekil 3.40). Zemin, su içeriğinin homojen olarak dağılması için üzeri poşetle kapatılarak bekletilmiştir. Deney programındaki optimum parametreler için de benzer şekilde zemin ortamı oluşturulup temel yüklemeleri yapılmıştır.



Şekil 3.40. Kil zeminin optimum su muhtevasına getirildikten sonra sıkıştırılması

3.9. XRD ve SEM Analizlerinin Yapılması

Katkısız ve katkılı zemin numunelerinin mikro yapılarını gözlemlemek ve yorumlayabilmek amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyinden sonra deney numuneleri etüvde kurutulmuştur. Böylece puzolanik reaksiyonların devam etmesi engellenmiştir. Kurutulan numunelerden XRD analizleri için 10-20 gr civarında alınarak toz haline getirilmiştir. Daha sonra Konya Teknik Üniversitesi Merkezi laboratuvarında bulunan XRD cihazında gerekli analizler yapılmıştır (Şekil 3.41). XRD analizleri, toplamda 6 numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.41. XRD cihazı

Elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demeti kullanarak numune yüzeyini tarayarak görüntü elde etmek için kullanılan bir tür mikroskoptur. Yüzeyi taramak için elektron demeti, raster tarama tekniği kullanılır ve demetin konumu, tarama sırasında algılanan sinyallerle eşleştirilerek bir görüntü oluşturulur. SEM, 1 nanometreden daha yüksek bir çözünürlük elde edebilen bir mikroskop türüdür. Çizelge 3.7 ve 3.8’de verilen Taguchi deney tablolarında verilen 6 tasarım numunesi için SEM analizleri yapılarak zemin-kireç-bazalt fiber ve uçucu kül/silis dumanı karışımlarının mikro yapıları, deney sonuçlarıyla ilişkilendirilerek incelenmiştir. SEM analizleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan cihazlarda yapılmıştır (Şekil 3.42).

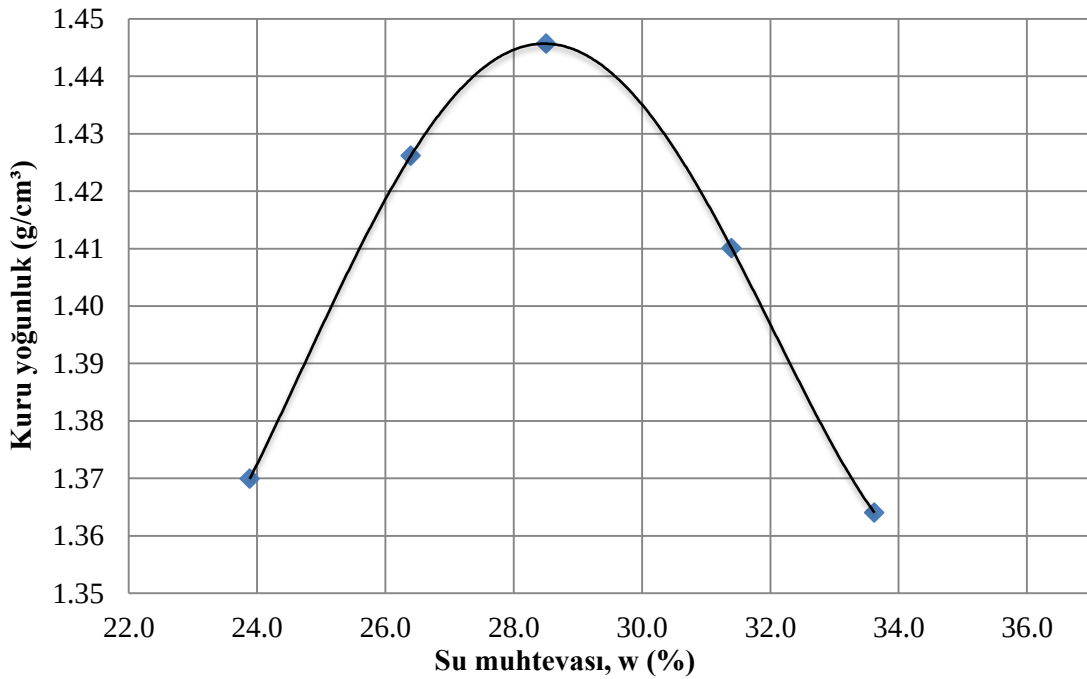


Şekil 3.42. SEM analizlerinin yapılması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Kompaksiyon (Standart Proktor) Deney Sonuçları

Taguchi deney tablolarındaki her tasarım ve katkısız zemin için ASTM D698 standardına göre kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Zemin-bentonit karışımının optimum su muhtevası $w_{opt} = 28.4$ ve maksimum kuru yoğunluğu $\rho_{kmax} = 1.446 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Zemin+%30 bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Bazalt fiber (BF) ve uçucu kül (UK) katkılı tasarımlar (ayrıca sabit %3 kireç katkısı) için elde edilen optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Bazalt fiber (BF) ve silis dumanı (SD) katkılı tasarımlar (ayrıca sabit %3 kireç katkısı) için elde edilen optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Kompaksiyon deneyleri yapılırken kür süreleri dikkate alınmamıştır.

Çizelge 4.1. Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı numunelerin kompaksiyon parametreleri

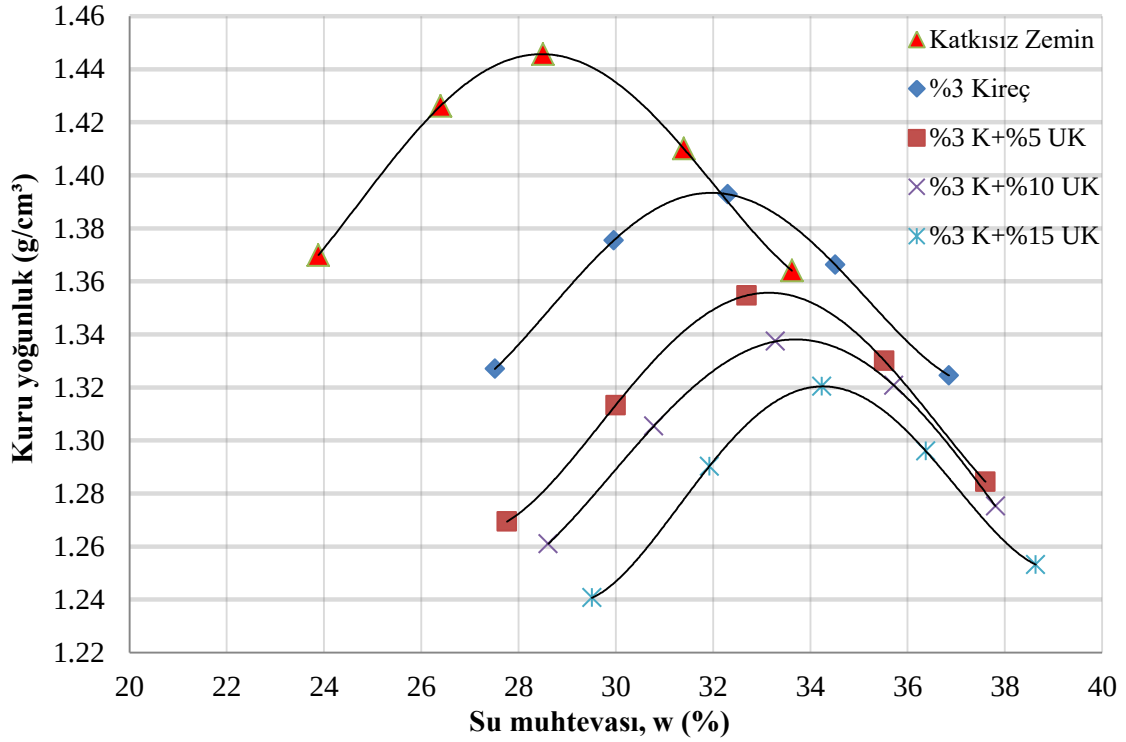
Tasarım no	BF uzunluğu (mm)	BF yüzdesi (%)	Kür süresi (gün)	UK yüzdesi (%)	$\rho_{k,max}$ (g/cm ³)	w_{opt} (%)
1	6	0	1	0	1.394	32.0
2	6	0.5	7	5	1.349	33.0
3	6	1	28	10	1.340	33.5
4	6	1.5	56	15	1.314	34.4
5	12	0	7	10	1.338	33.7
6	12	0.5	1	15	1.311	34.3
7	12	1	56	0	1.386	31.9
8	12	1.5	28	5	1.356	33.1
9	18	0	28	15	1.320	34.3
10	18	0.5	56	10	1.332	33.4
11	18	1	1	5	1.350	33.0
12	18	1.5	7	0	1.379	31.8
13	24	0	56	5	1.356	33.2
14	24	0.5	28	0	1.384	31.9
15	24	1	7	15	1.311	34.4
16	24	1.5	1	10	1.327	33.6

Çizelge 4.2. Bazalt fiber ve silis dumanı katkılı numunelerin kompaksiyon parametreleri

Tasarım No	BF uzunluğu (mm)	BF yüzdesi (%)	Kür süresi (gün)	SD yüzdesi (%)	$\rho_{k,max}$ (g/cm ³)	w_{opt} (%)
1	6	0	1	0	1.394	32.0
2	6	0.5	7	5	1.380	32.6
3	6	1	28	10	1.360	32.7
4	6	1.5	56	15	1.336	33.7
5	12	0	7	10	1.358	33.
6	12	0.5	1	15	1.333	33.5
7	12	1	56	0	1.386	31.9
8	12	1.5	28	5	1.367	32.7
9	18	0	28	15	1.340	33.7
10	18	0.5	56	10	1.351	33.0
11	18	1	1	5	1.375	32.7
12	18	1.5	7	0	1.379	31.8
13	24	0	56	5	1.374	32.7
14	24	0.5	28	0	1.384	31.9
15	24	1	7	15	1.339	33.8
16	24	1.5	1	10	1.352	32.9

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’den anlaşılabacağı gibi kireç, silis dumanı ve uçucu kül ilavesiyle birlikte optimum su içeriği (w_{opt}) değeri artarken maksimum kuru yoğunluk ($\rho_{k,max}$) değeri azalmaktadır.

Şekil 4.2’de zemin+betonit karışımı ile kireç ve uçucu kül katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Kompaksiyon eğrileri incelendiğinde, %3 kireç ilavesiyle optimum su muhtevası (w_{opt}) % 28.4’ten % 32’ye çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk değeri ($\rho_{k,max}$) ise 1.446 g/cm³’ten 1.394 g/cm³’e düşmüştür. Ayrıca %3 kireç oranı sabit tutularak uçucu kül miktarının artmasıyla optimum su muhtevası (w_{opt}) artarken, maksimum kuru yoğunluk değeri ($\rho_{k,max}$) düşüş göstermiştir.

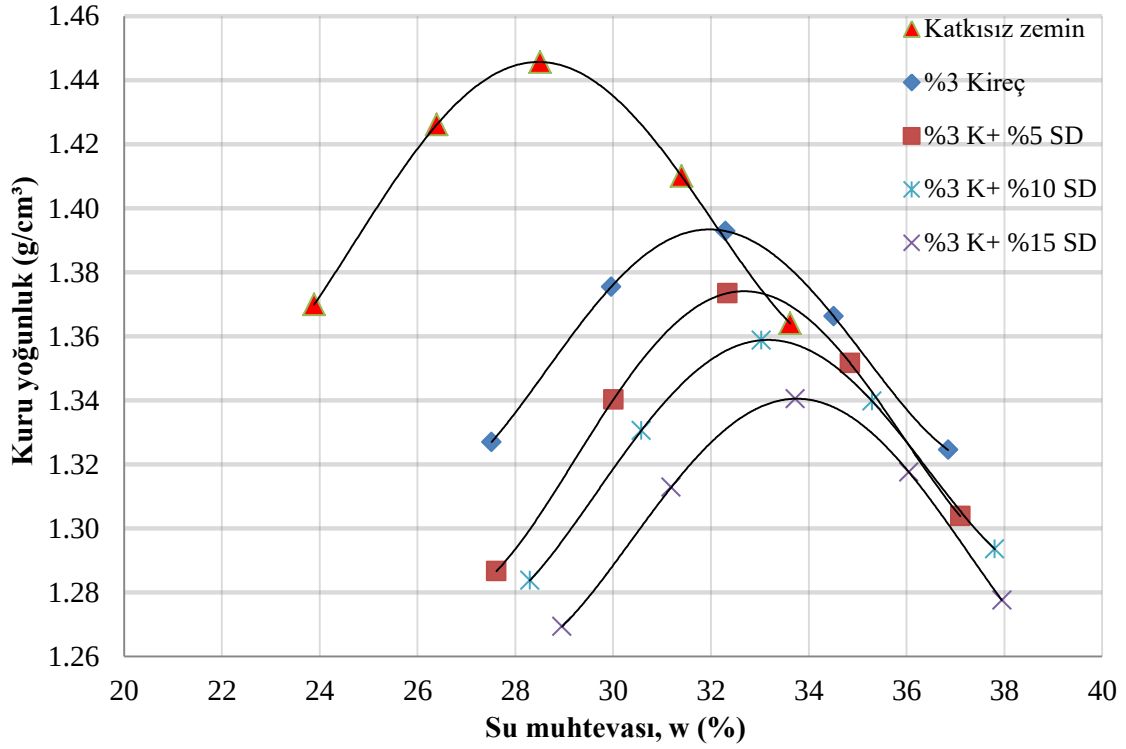


Şekil 4.2. Katkısız ve katkılı (kireç+uçucu kül) numunelerin kompaksiyon eğrileri

Şekil 4.3'te zemin+betonit karışımı ile kireç ve silis dumanı katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Kompaksiyon eğrileri incelendiğinde, %3 kireç oranı sabit tutularak silis dumanı miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının (w_{opt}) arttığı, maksimum kuru yoğunluk değerinin (ρ_{kmax}) ise düştüğü görülmektedir.

Optimum su muhtevasındaki artış, puzolanik reaksiyonların zeminin daha fazla su emmesine neden olması ve geniş yüzey alanları nedeniyle daha yüksek su içeriği gerektiren ince tanelerin artan miktarından kaynaklanmaktadır. Maksimum kuru yoğunluktaki azalmanın nedeni, zemine göre daha düşük bir özgül ağırlığa sahip olan silis dumanı ve uçucu külün varlığı ve artan su içeriği ile kompaksiyon kalıbı içerisinde daha fazla suyun olmasıdır. Literatürde yapılan diğer çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kumar ve ark., 2007; Savaş ve ark., 2018; Turan ve ark., 2022). Dahale ve ark. (2017), maksimum kuru yoğunluktaki azalmanın nedeninin stabilize edilen zemin numunelerinde katyon değiştirme ve flokülasyon olayları sonucunda meydana gelen gradasyon değişikliği olduğunu bildirmiştir.

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde, BF içeriğinin kompaksiyon parametreleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, bazalt fiberin zemininkine yakın bir yoğunluğa sahip olması ve suyu emmemesidir. Tüm tasarımların kompaksiyon grafikleri Ek-17'de verilmiştir.



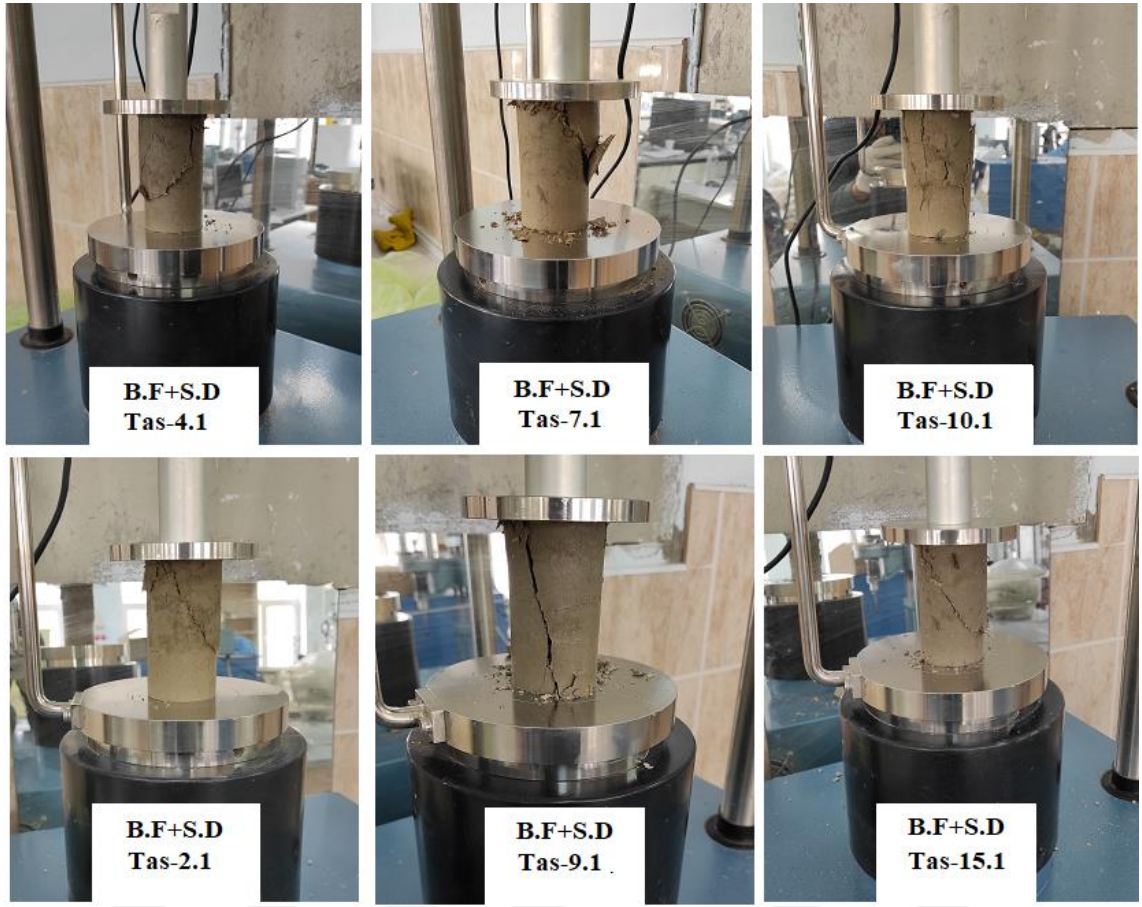
Şekil 4.3. Katkısız ve katkılı (kireç+silis dumanı) numunelerin kompaksiyon eğrileri

4.2. Serbest Basınç Deney Sonuçları

4.2.1. BF+SD katkılı karışımların serbest basınç deney sonuçları

Deney programında yer alan 16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM D2166 standardına göre serbest basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 4.4). Her tasarım için 3'er deney numunesi üzerinde yapılan deneylerden elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti (SBM) ve numunelerin kırılma anındaki birim deformasyon (ϵ) değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 incelendiğinde en büyük dayanım 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan değer, katkısız zeminin serbest basınç mukavemetinin 9.76 katıdır. Birim deformasyon değerleri (ϵ) incelendiğinde, 1 günlük kür süresine sahip numunelerde, puzolanik aktivitelerin tamamen gerçekleşmemesi nedeniyle daha sünek bir davranış gözlenmiştir. Ayrıca, birim deformasyon değerlerine bakıldığında bazalt fiber içeriği arttıkça süneklik artmıştır.

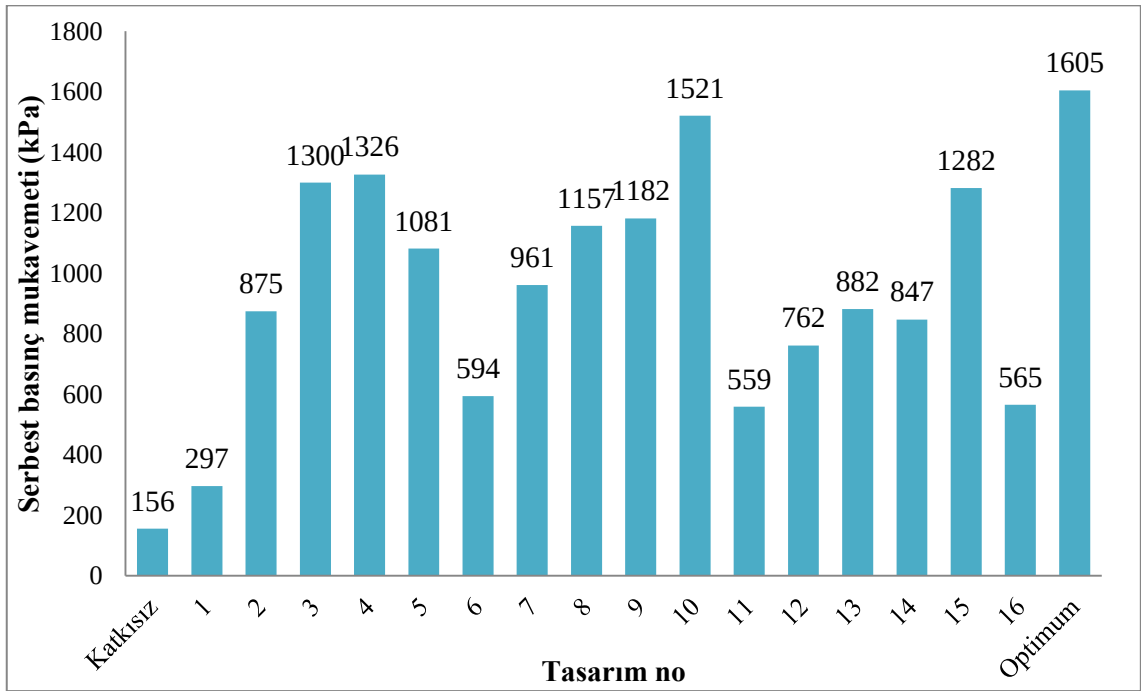


Şekil 4.4. Serbest basınç deney numuneleri (BF+SD)

Çizelge 4.3. Serbest basınç deney sonuçları (BF+SD)

Deney No	q_u (kPa)	ϵ (%)
Katkısız	155.8	4.91
1	296.7	3.23
2	874.9	2.54
3	1299.9	2.51
4	1326.5	2.55
5	1081.4	1.97
6	593.6	3.75
7	961.3	2.71
8	1157	2.62
9	1181.6	1.98
10	1521.3	2.43
11	558.5	3.89
12	761.6	2.73
13	881.5	2.04
14	847.3	2.58
15	1282.4	2.62
16	565.4	4.01

Katkısız ve katkılı zemin numuneleri ile optimum tasarım numunesinin serbest basınç mukavemetleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

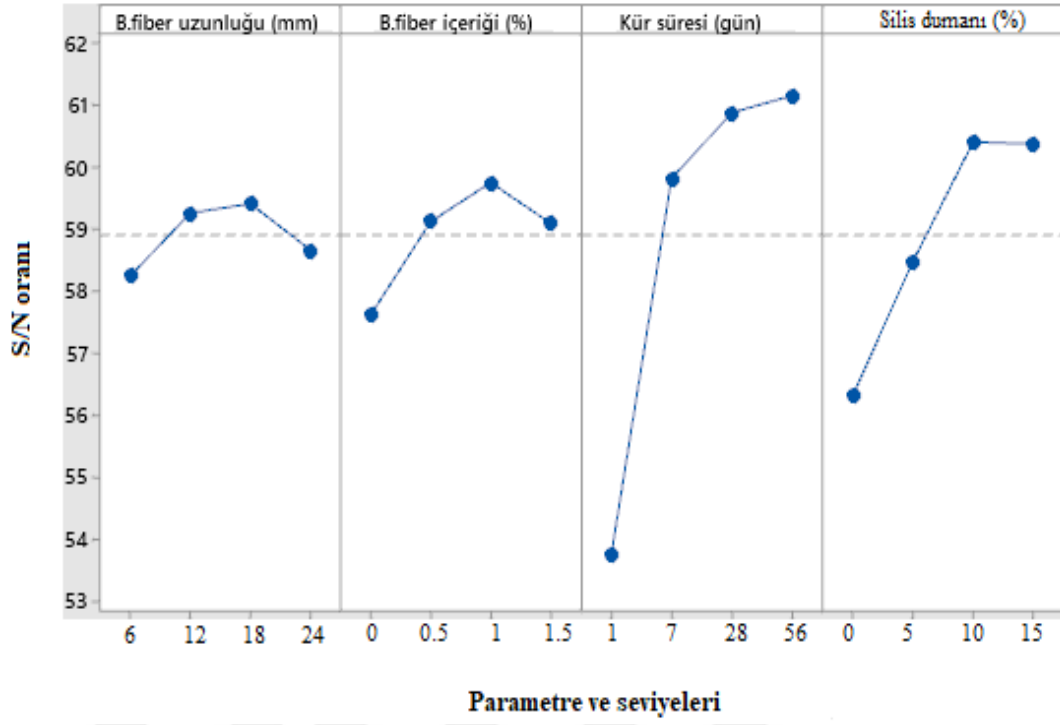


Şekil 4.5. Katkısız, katkılı ve optimum tasarım numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (BF+SD)

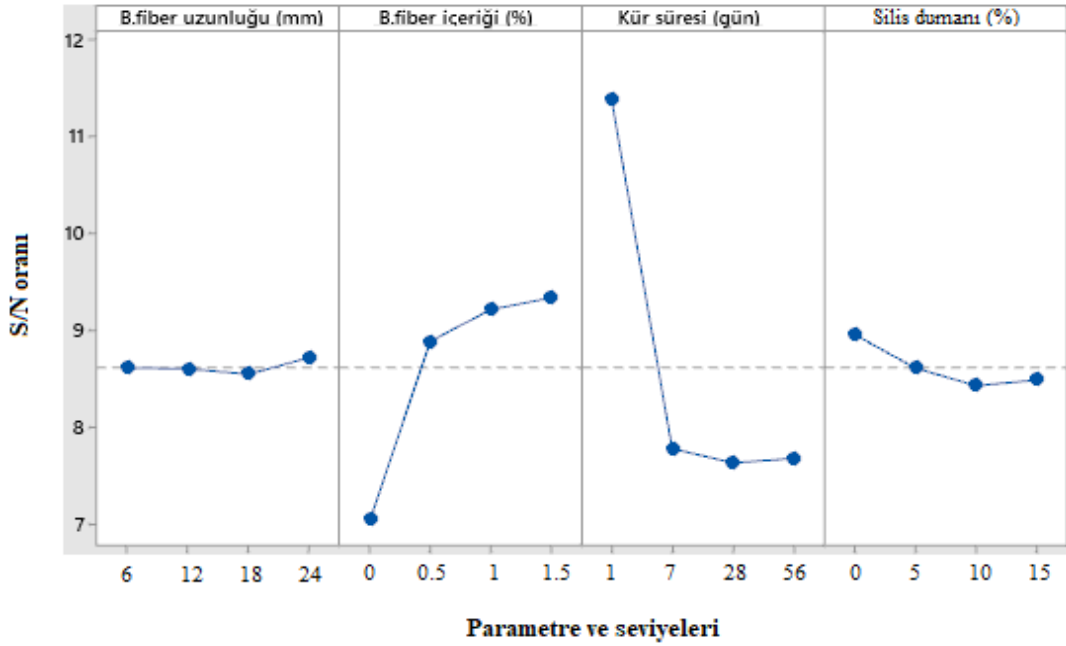
S/N analizi yapılırken ‘en yüksek en iyi’ durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir. Buna göre, serbest basınç mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve silis dumanı içeriği %10’a kadar artmakta bu seviyelerden sonra ise azalmaya başlamaktadır. Kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmüştür.

Bazalt fiber ve silis dumanı katkılı numuneler için oluşturulan Taguchi modelinde optimum tasarım için tahmin edilen serbest basınç mukavemeti 1472.6 kPa olarak hesaplanmıştır. Laboratuvarında optimum parametre seviyeleri ile hazırlanan numunenin serbest basınç mukavemeti 1605.1 kPa olarak belirlenmiştir. Laboratuvarında hazırlanan numunenin dayanımı, tahmin edilen tasarımla %91.7 oranında tutarlılık göstermiştir.

Birim deformasyon değerleri için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber içeriği arttıkça süneklik artarken silis dumanı içeriği arttıkça süneklik azalmaktadır. 1 günlük kür süresine sahip numuneler daha yüksek birim deformasyon değerlerine sahiptir.



Şekil 4.6. Serbest basınç mukavemeti S/N grafiği (BF+SD)



Şekil 4.7. Serbest basınç deneyi birim deformasyon değerleri S/N grafiği (BF+SD)

Varyans analizi yapılırken serbest basınç mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.51, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.57 ve R-kare (tahmini) değeri %86.19 olarak belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.004 < 0.05$ olup model anlamlıdır

(Çizelge 4.4). Serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra silis dumanı ve bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber uzunluğu için p değeri 0.05'ten büyük olduğu için bu parametrenin deney sonucu üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.

Çizelge 4.4. Serbest basınç mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+SD)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	205.401	205.401	17.1167	51.24	0.004
BF uzunluğu	3	3.495	3.495	1.1651	3.49	0.166
BF içeriği	3	9.874	9.874	3.2914	9.85	0.046
Kür süresi	3	146.869	146.869	48.9562	146.55	0.001
Silis dumanı	3	45.163	45.163	15.0543	45.06	0.005
Hata	3	1.002	1.002	0.3341		
Toplam	15	206.403				

Birim deformasyon (ϵ) değerleri için geliştirilen modelde $p < 0.05$ olup model %95 güven aralığı içerisindedir (Çizelge 4.5). ϵ değerleri üzerinde etkili olan parametreler sırasıyla kür süresi, bazalt fiber içeriği, silis dumanı içeriğidir. Bazalt fiber uzunluğunun birim deformasyon değerleri üzerinde anlamlı bir etkisi olmamıştır.

Çizelge 4.5. Serbest basınç deneyi ϵ değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+SD)

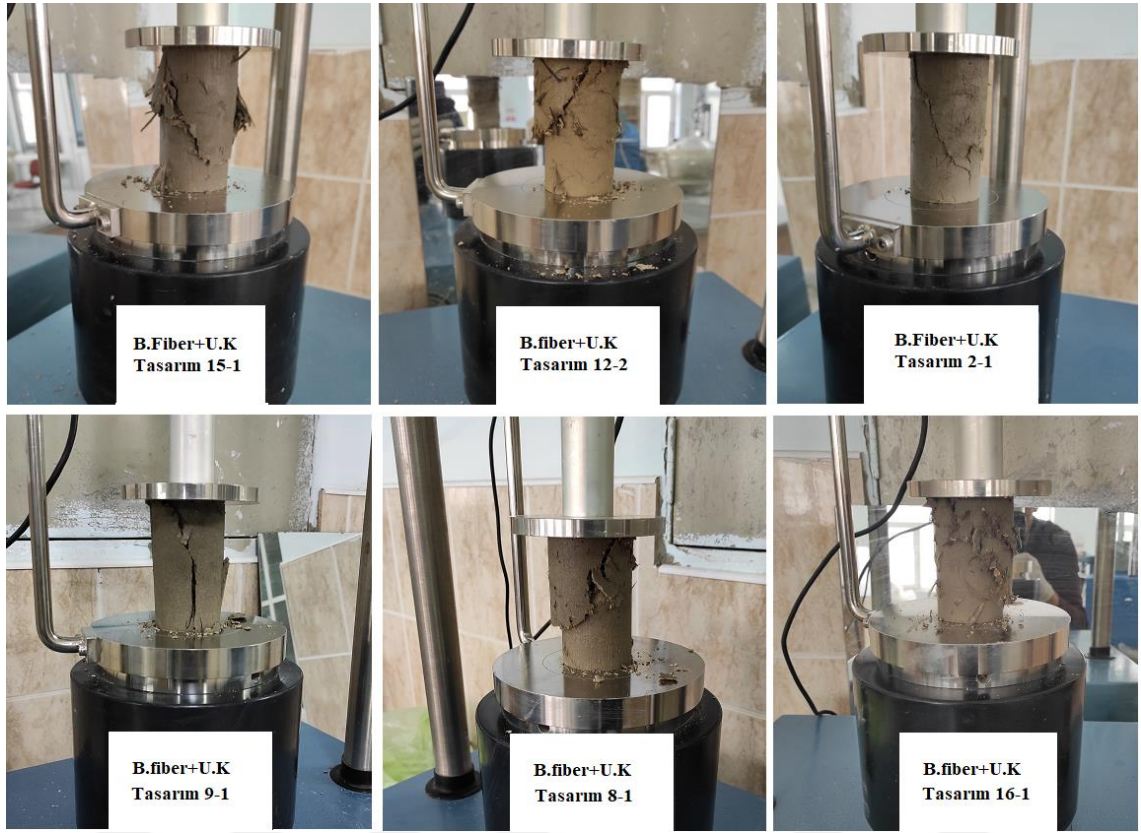
Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	55.2853	55.2853	4.6071	200.28	0.001
BF uzunluğu	3	0.0628	0.0628	0.0209	0.91	0.530
BF içeriği	3	13.6112	13.6112	4.5371	197.24	0.001
Kür süresi	3	40.9397	40.9397	13.6466	593.26	0.000
Silis dumanı	3	0.6715	0.6715	0.2238	9.73	0.047
Hata	3	0.0690	0.0690	0.0230		
Toplam	15	55.3543				

4.2.2. BF+UK katkılı karışımların serbest basınç deney sonuçları

Deney tasarım tablosunda yer alan bazalt fiber (BF) ve uçucu kül (UK) katkılı zemin numuneleri üzerinde ASTM D2166 standardına göre serbest basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 4.8). Bu deneylerden elde edilen serbest basınç mukavemeti (SBM) ve birim deformasyon (ϵ) değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 incelendiğinde en büyük dayanım 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan değer, katkısız zeminin serbest basınç mukavemetinin 8.69 katıdır. Birim deformasyon değerleri (ϵ) incelendiğinde, 1 günlük kür süresine sahip numunelerde, puzolanik aktivitelerin tamamen gerçekleşmemesi nedeniyle daha

sünek bir davranış gözlenmiştir. Ayrıca, birim deformasyon değerlerine bakıldığında bazalt fiber içeriği arttıkça süneklik artmıştır.

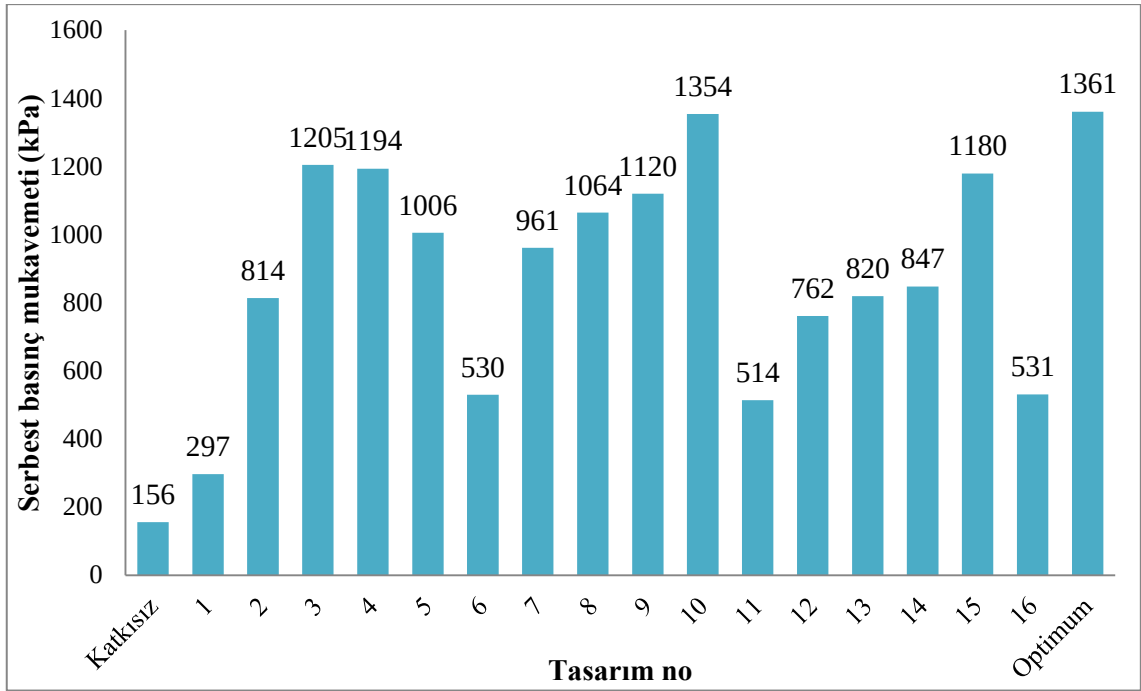


Şekil 4.8. Serbest basınç deney numuneleri (BF+UK)

Çizelge 4.6. Serbest basınç deney sonuçları (BF+UK)

Deney No	q_u (kPa)	ε (%)
Katkısız	155.8	4.91
1	296.7	3.23
2	813.7	2.49
3	1205.1	2.79
4	1194.0	2.81
5	1005.7	2.42
6	529.7	3.99
7	961.3	2.71
8	1064.4	2.79
9	1119.7	2.51
10	1354.0	2.62
11	513.8	3.97
12	761.6	2.73
13	819.8	2.29
14	847.3	2.58
15	1179.8	2.94
16	531.1	4.33

Katkısız ve katkılı zemin numuneleri ile optimum tasarım numunesinin serbest basınç mukavemetleri Şekil 4.9’da verilmiştir.

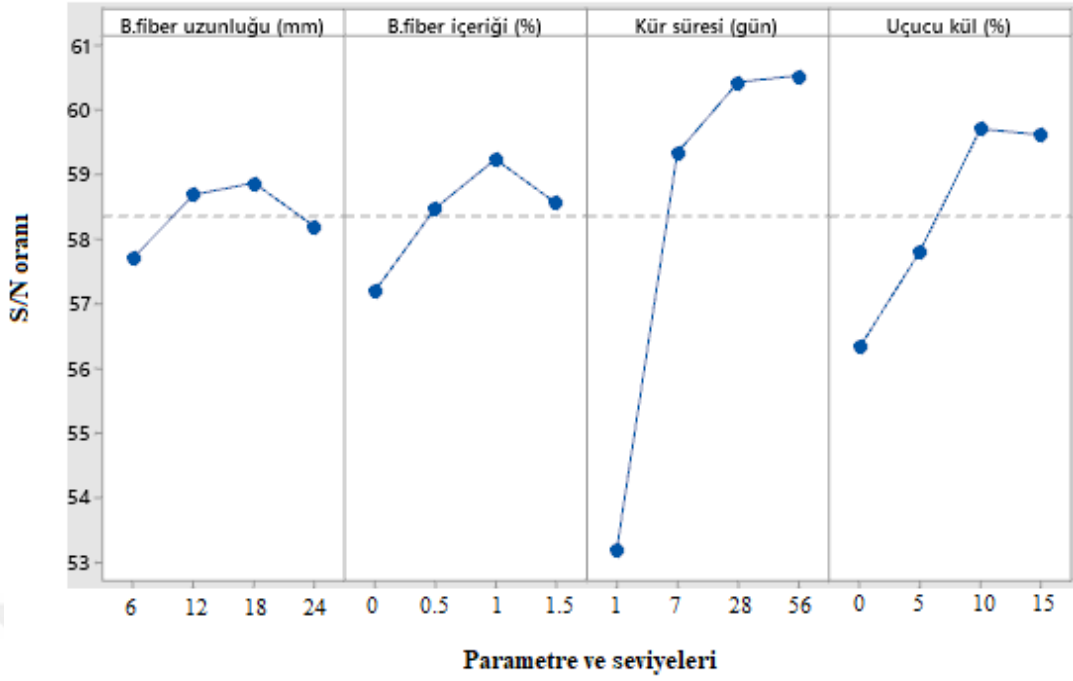


Şekil 4.9. Katkısız, katkılı ve optimum tasarım numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (BF+UK)

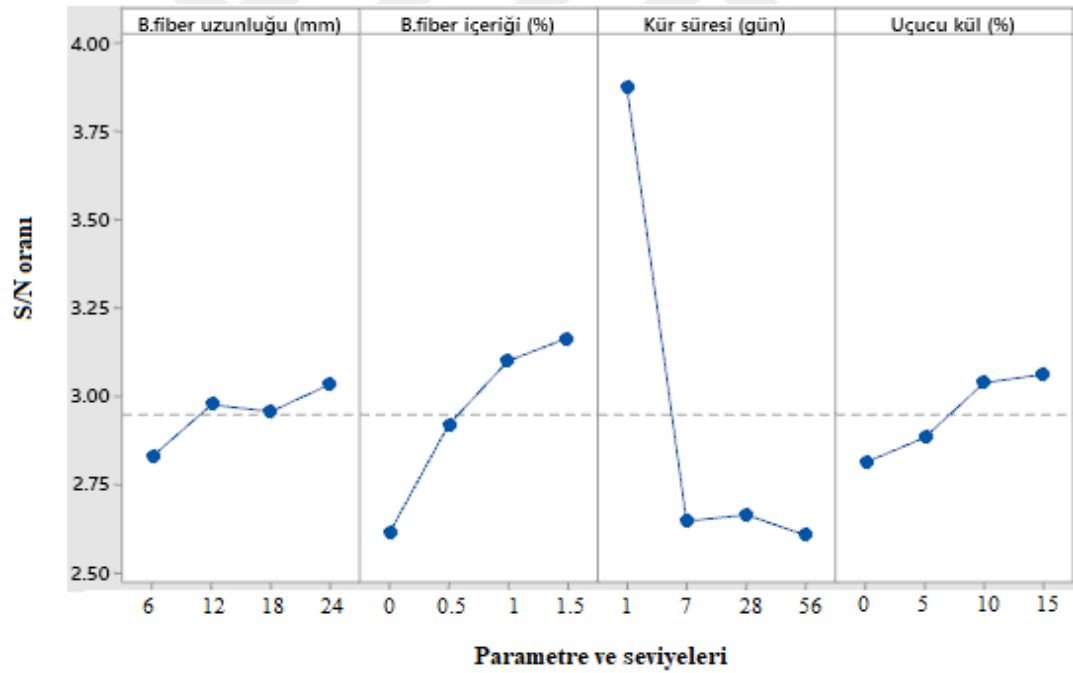
Serbest basınç mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Buna göre, serbest basınç mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar artmakta bu seviyelerden sonra ise azaldığı görülmüştür. Kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemeti artmıştır.

Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı numuneler için oluşturulan Taguchi modelinde optimum tasarım için tahmin edilen serbest basınç mukavemeti 1346.4 kPa olarak hesaplanmıştır. Laboratuvarında optimum parametre seviyeleri ile hazırlanan numunenin serbest basınç mukavemeti 1361.0 kPa olarak belirlenmiştir. Laboratuvarında hazırlanan numunenin dayanımı, tahmin edilen tasarımla %98.9 oranında tutarlılık göstermiştir.

Şekil 4.11'de birim deformasyon değerleri için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve uçucu kül içeriği arttıkça süneklilik artmaktadır. 1 günlük kür süresine sahip numuneler daha yüksek birim deformasyon değerlerine sahiptir.



Şekil 4.10. Serbest basınç mukavemeti S/N grafiği (BF+UK)



Şekil 4.11. Serbest basınç deneyi birim deformasyon değerleri S/N grafiği (BF+UK)

Varyans analizi yapılırken serbest basınç mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.57, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.86 ve R-kare (tahmini) değeri %87.81 olarak belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.003 < 0.05$ olup bu değer 0.05'ten küçük olması, model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. (Çizelge

4.7). Serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra uçucu kül ve bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber uzunluğu için P değeri 0.05'ten büyük olduğu için bu parametrenin deney sonucu üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.

Çizelge 4.7. Serbest basınç mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+UK)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	190.948	190.948	15.9124	58.06	0.003
BF uzunluğu	3	3.272	3.272	1.0906	3.98	0.143
BF içeriği	3	8.739	8.739	2.9129	10.63	0.042
Kür süresi	3	147.710	147.710	49.2367	179.66	0.001
Uçucu kül	3	31.228	31.228	10.4093	37.98	0.007
Hata	3	0.822	0.822	0.2741		
Toplam	15	191.771				

Birim deformasyon (ϵ) değerleri için geliştirilen modelde $p < 0.05$ olup model %95 güven aralığı içerisindedir (Çizelge 4.8). ϵ değerleri üzerinde etkili olan parametreler sırasıyla kür süresi, bazalt fiber içeriği, uçucu kül içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur.

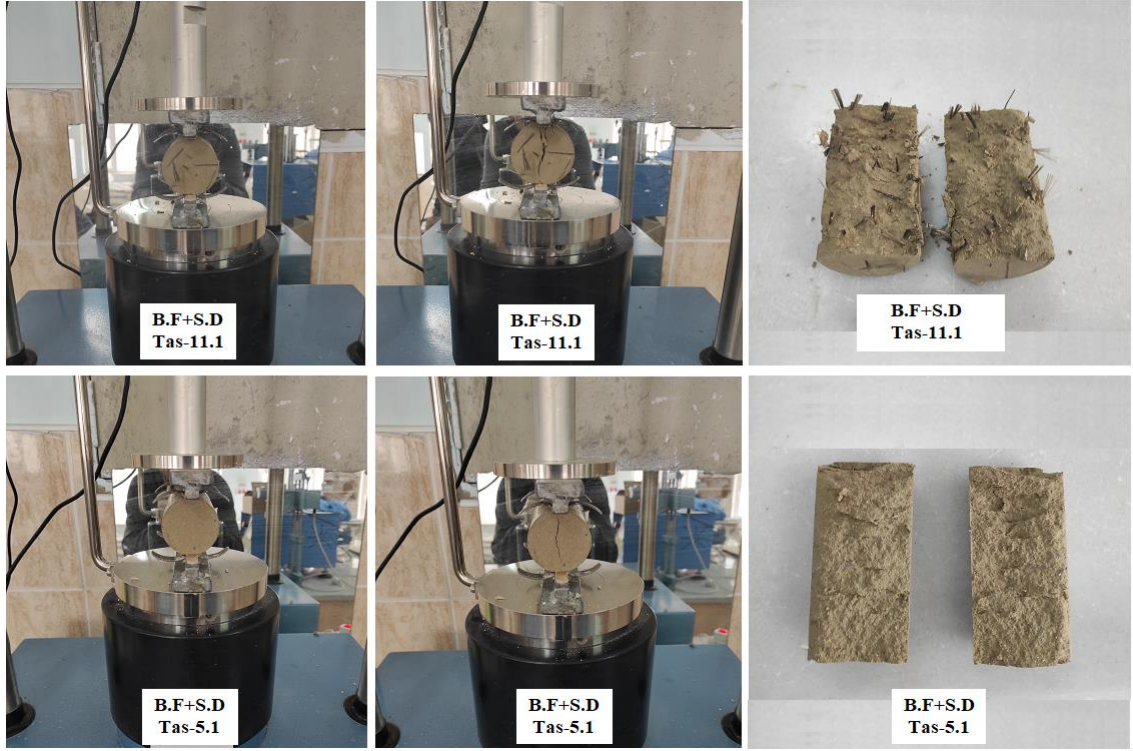
Çizelge 4.8. Serbest basınç deneyi ϵ değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+UK)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	40.7093	40.7093	3.39240	288.68	0.000
BF uzunluğu	3	0.33710	0.33710	0.11240	9.56	0.048
BF içeriği	3	6.18190	6.18190	2.06060	175.35	0.001
Kür süresi	3	33.0179	33.0179	11.0060	936.55	0.000
Uçucu kül	3	1.17240	1.17240	0.39080	33.25	0.008
Hata	3	0.03530	0.03530	0.01180		
Toplam	15	40.7446				

4.3. Yarmada Çekme Deney Sonuçları

4.3.1. BF+SD katkılı karışımların yarmada çekme deney sonuçları

Deney programında yer alan 16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM C496 standardına göre yarmada çekme deneyi yapılmış (Şekil 4.12), yarmada çekme mukavemeti (σ_t) ve birim deformasyon (ϵ) değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



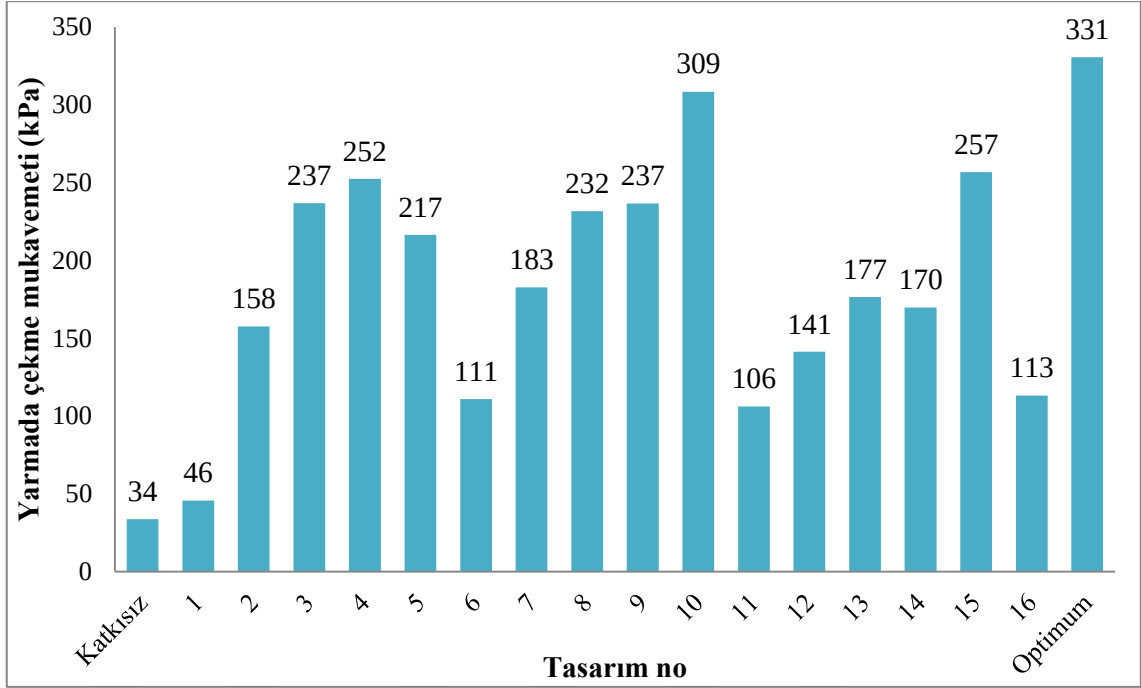
Şekil 4.12. Yarmada çekme deney numuneleri (BF+SD)

Çizelge 4.9 incelendiğinde en büyük yarmada çekme mukavemeti 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan yarmada çekme mukavemeti katkısız zeminin yarmada çekme mukavemetinin 9.16 katıdır.

Çizelge 4.9. Yarmada çekme deney sonuçları (BF+SD)

Deney No	σ_t (kPa)	ε (%)
Katkısız	33.70	2.94
1	45.71	1.94
2	157.73	2.16
3	236.96	2.44
4	252.45	2.57
5	216.62	1.89
6	110.87	2.37
7	182.73	2.59
8	231.76	2.73
9	236.69	1.85
10	308.60	2.19
11	106.28	2.64
12	141.42	2.87
13	176.58	1.87
14	169.73	2.48
15	256.88	2.72
16	113.24	3.01

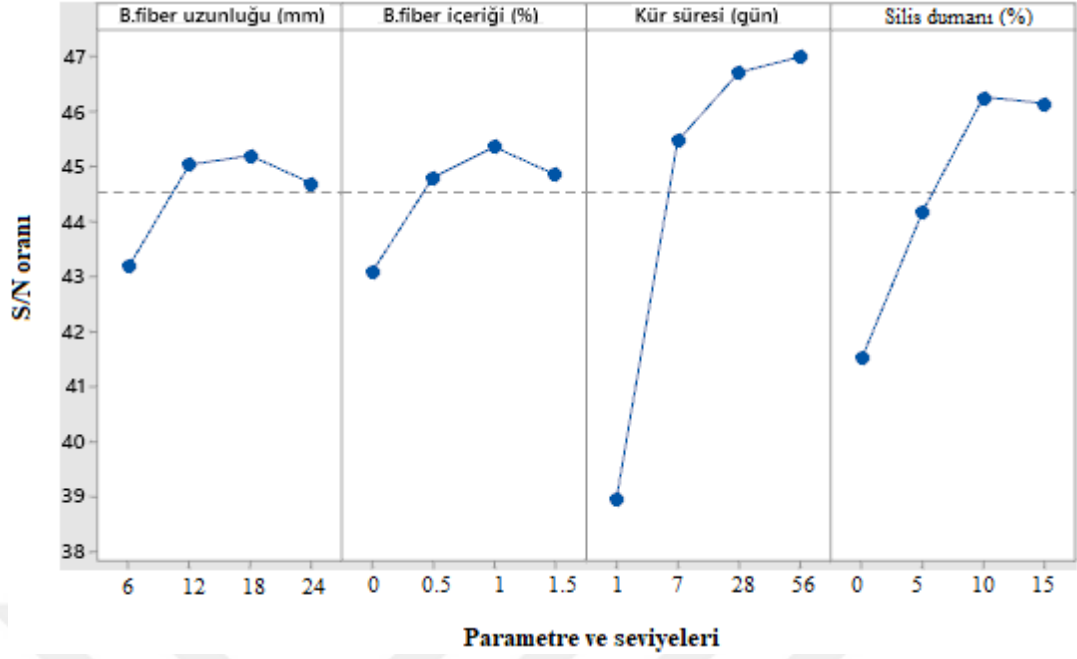
Katkısız ve katkılı zemin numuneleri ile optimum tasarım numunesinin yarmada çekme mukavemetleri Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Katkısız, katkılı ve optimum tasarım numunelerinin yarmada çekme dayanımları (BF+SD)

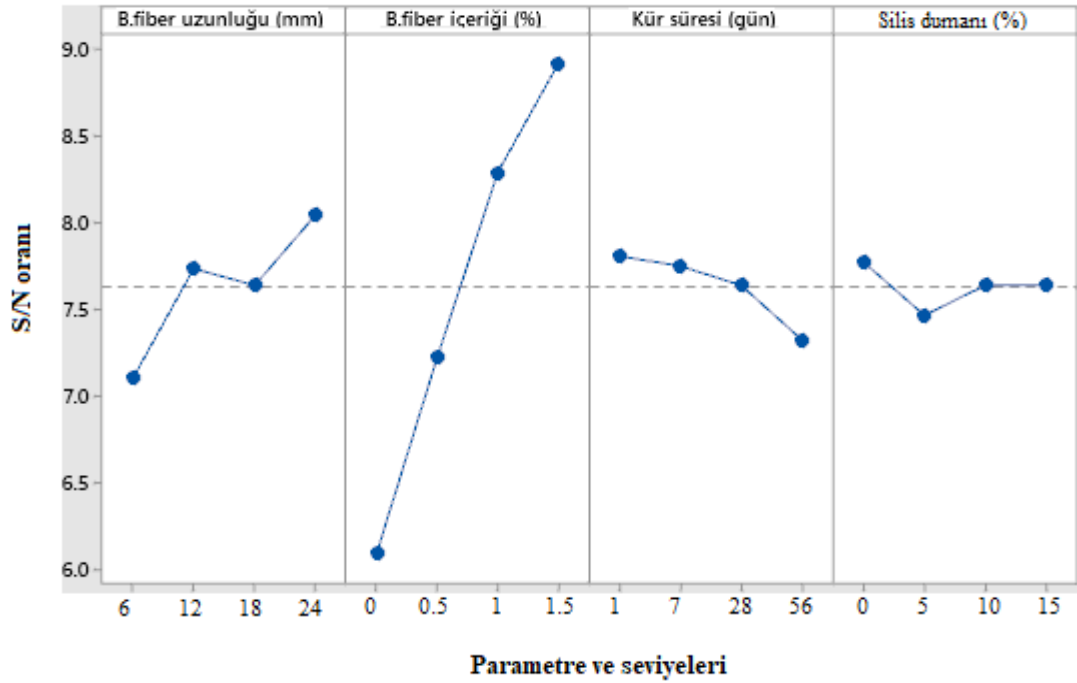
S/N analizi yapılırken ‘en yüksek en iyi’ durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yarmada çekme mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.14’te verilmiştir. Buna göre, yarmada çekme mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve silis dumanı içeriği %10’a kadar artmakta bundan sonra ise azalmakta, kür süresi arttıkça yarmada çekme mukavemeti arttığı gözlenmiştir.

Bazalt fiber ve silis dumanı katkılı numuneler için oluşturulan Taguchi modelinde optimum tasarım için tahmin edilen yarmada çekme mukavemeti 290.9 kPa olarak hesaplanmıştır. Laboratuvarda optimum parametre seviyeleri ile hazırlanan numunenin yarmada çekme mukavemeti 330.8 kPa olarak belirlenmiştir. Laboratuvarda hazırlanan numunenin dayanımı, tahmin edilen tasarımla %87.9 oranında tutarlılık göstermiştir.



Şekil 4.14. Yarmada çekme mukavemeti S/N grafiği (BF+SD)

Birim deformasyon (ϵ) değerleri incelendiğinde bazalt fiber içeriğinin yüksek olduğu tasarımlarda numunelerin daha sünek bir davranış gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Yarmada çekme birim deformasyon değerleri S/N grafiği (BF+SD)

Varyans analizi yapılırken yarmada çekme mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.36, R-kare (düzeltilmiş) değeri

%96.81 ve R-kare (tahmini) değeri %81.85 olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.006 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 4.10). Yarmada çekme mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra silis dumanı içeriği, bazalt fiber içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur.

Çizelge 4.10. Yarmada çekme mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+SD)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	254.523	254.523	21.2102	38.92	0.006
BF uzunluğu	3	10.312	10.312	3.4374	6.31	0.082
BF içeriği	3	11.884	11.884	3.9613	7.27	0.069
Kür süresi	3	172.720	172.720	57.5735	105.65	0.002
Silis dumanı	3	59.606	59.606	19.8687	36.46	0.007
Hata	3	1.635	1.635	0.5449		
Toplam	15	256.157				

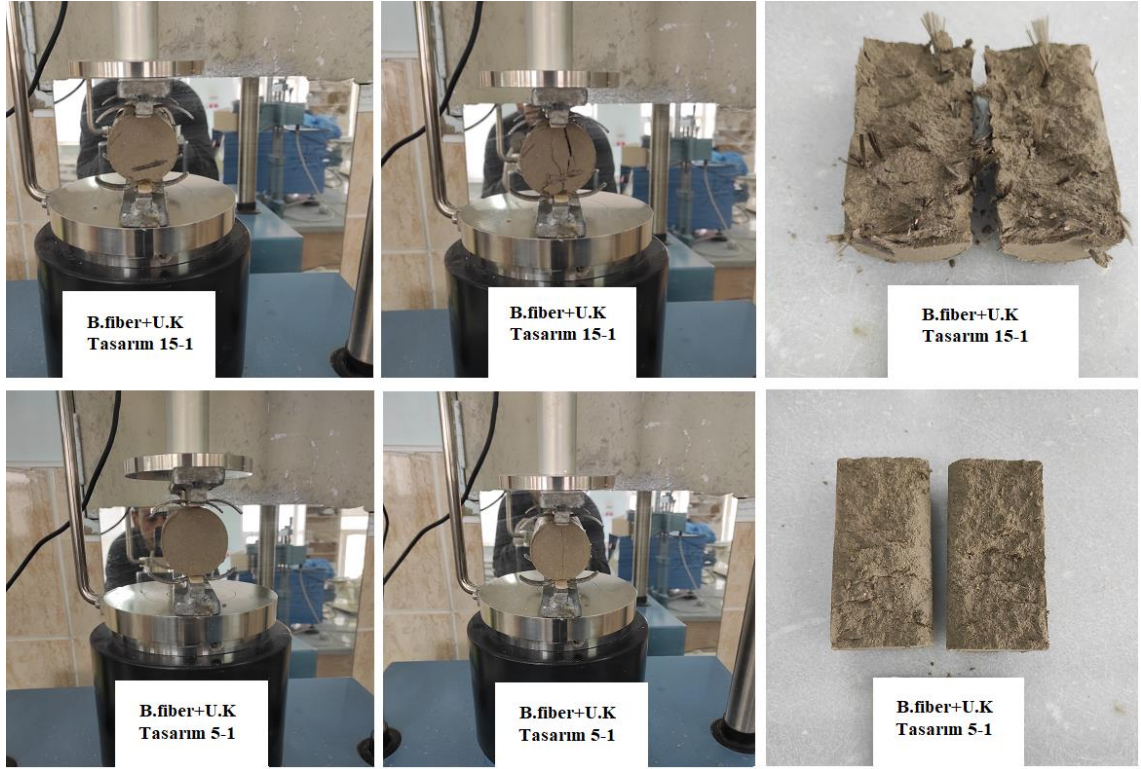
ε değerleri için geliştirilen modelde $p<0.05$ olup model %95 güven aralığı içerisinde (Çizelge 7.3). ε değerleri üzerinde en çok etkisi olan parametre bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber içeriği arttıkça numunelerin sünekliliği artmıştır.

Çizelge 4.11. Yarmada çekme deneyi ε değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+SD)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	21.1464	21.1464	1.76220	42.29	0.005
BF uzunluğu	3	1.8625	1.8625	0.62084	14.90	0.026
BF içeriği	3	18.5299	18.5299	6.17663	148.21	0.001
Kür süresi	3	0.5629	0.5629	0.18764	4.50	0.124
Silis dumanı	3	0.1911	0.1911	0.06369	1.53	0.368
Hata	3	0.1250	0.1250	0.04167		
Toplam	15	21.2714				

4.3.2. BF+UK katkılı karışımların yarmada çekme deney sonuçları

Deney programında yer alan 16 farklı tasarım için ASTM C496 standardına göre yarmada çekme deneyi yapılmış (Şekil 4.16), yarmada çekme mukavemeti (σ_t) ve birim deformasyon (ε) değerleri Çizelge 4.12’de verilmiştir.



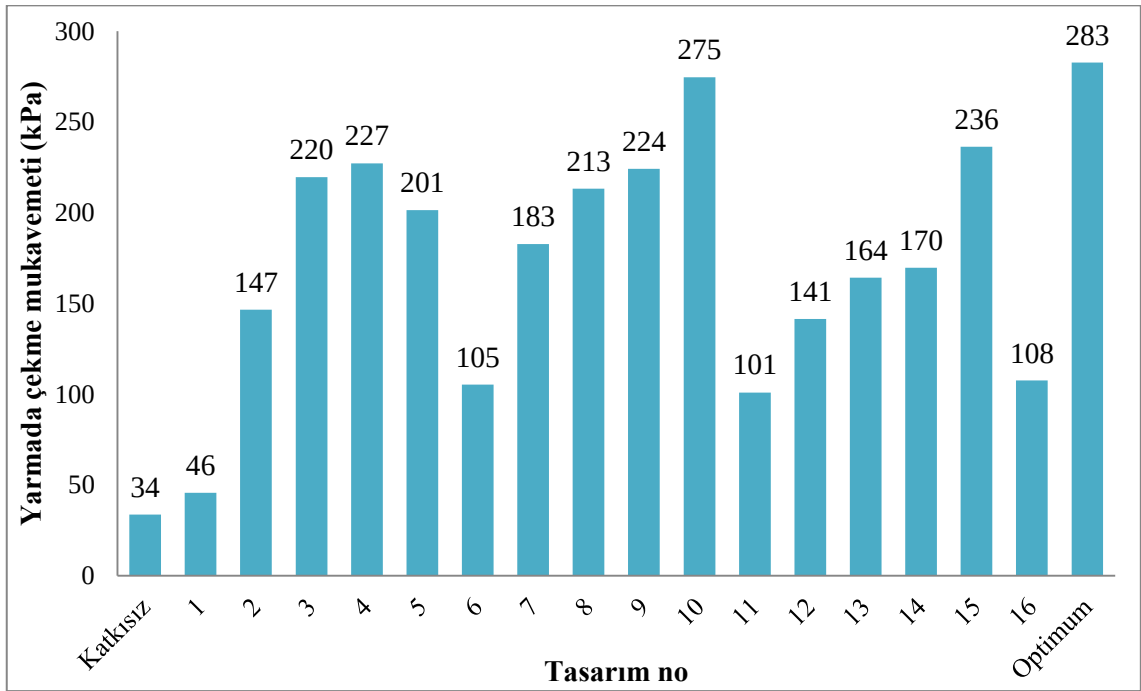
Şekil 4.16. Yarmada çekme deney numuneleri (BF+UK)

Çizelge 4.12 incelendiğinde en büyük yarmada çekme mukavemeti 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan yarmada çekme mukavemeti katkısız zeminin yarmada çekme mukavemetinin 8.15 katıdır.

Çizelge 4.12. Yarmada çekme deney sonuçları (BF+UK)

Deney No	σ_t (kPa)	ε (%)
Katkısız	33.7	2.94
1	45.71	1.94
2	146.69	2.25
3	219.67	2.46
4	227.21	2.52
5	201.46	2.12
6	105.32	2.22
7	182.73	2.59
8	213.22	2.73
9	224.29	2.04
10	274.65	2.23
11	100.96	2.61
12	141.42	2.87
13	164.22	1.91
14	169.73	2.48
15	236.33	2.78
16	107.58	3.01

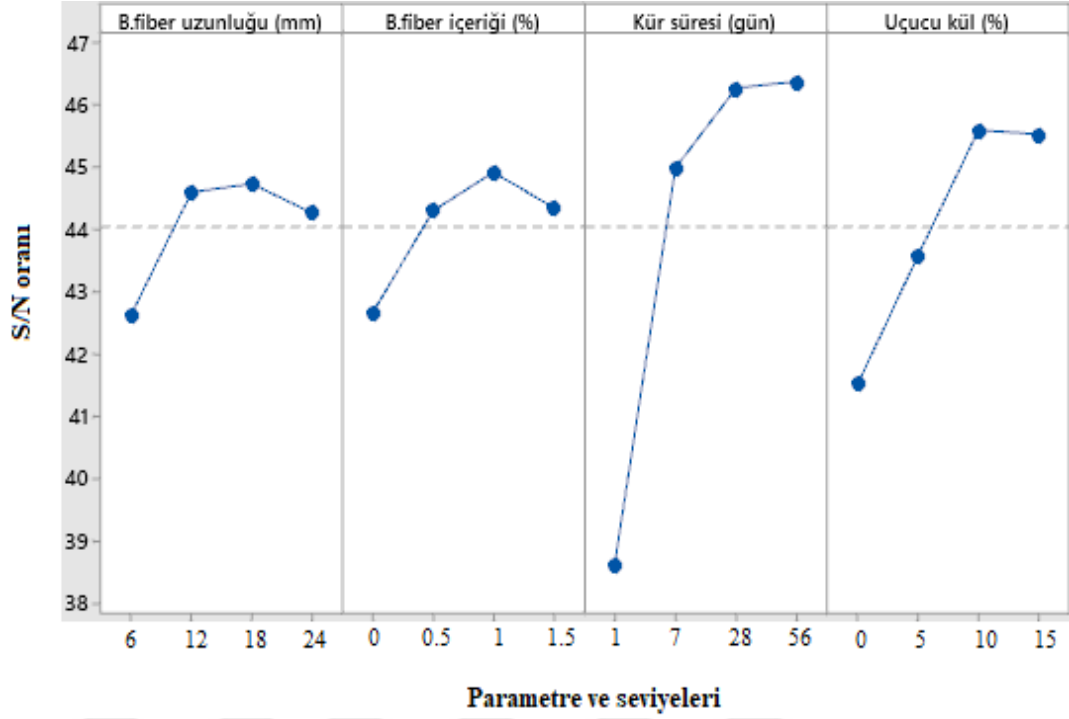
Katkısız ve katkılı zemin numuneleri ile optimum tasarım numunesinin yarmada çekme mukavemetleri Şekil 4.17’de verilmiştir.



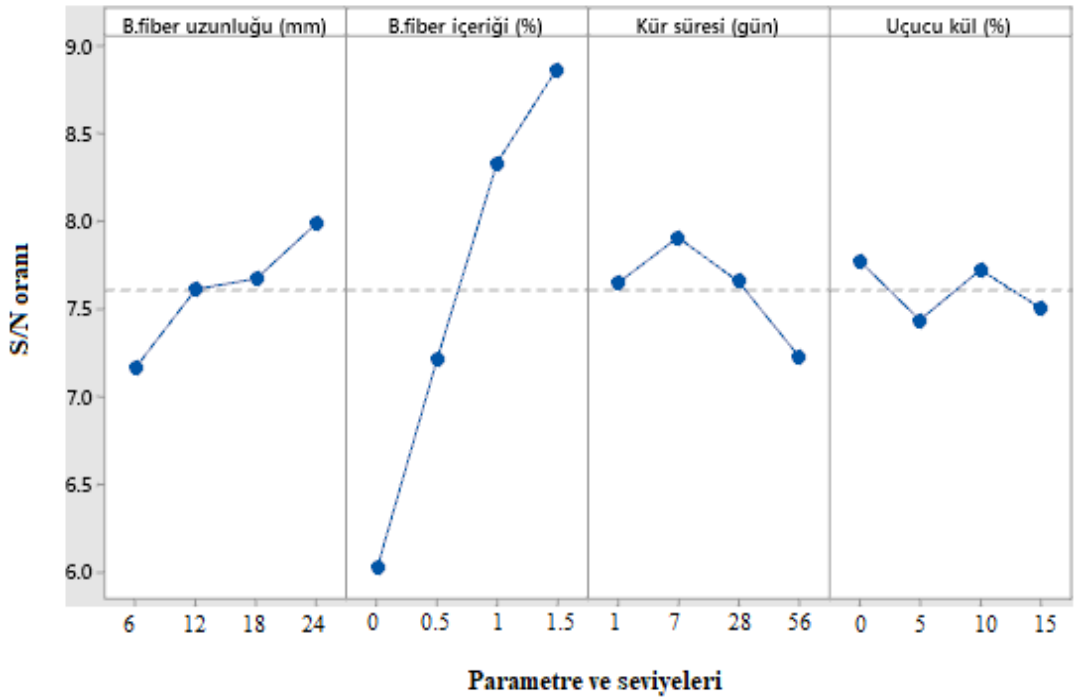
Şekil 4.17. Katkısız, katkılı ve optimum tasarım numunelerinin yarmada çekme dayanımları (BF+UK)

Yarmada çekme mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.18’te verilmiştir. Buna göre, yarmada çekme mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10’a kadar artmakta bundan sonra ise azalmakta, kür süresi arttıkça yarmada çekme mukavemeti arttığı gözlenmiştir. Birim deformasyon (ϵ) değerleri incelendiğinde bazalt fiber içeriğinin yüksek olduğu tasarımlarda numunelerin daha sünek bir davranış gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.19).

Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı numuneler için oluşturulan Taguchi modelinde optimum tasarım için tahmin edilen yarmada çekme mukavemeti 265.6 kPa iken laboratuvarında optimum parametre seviyeleri ile hazırlanan numunenin yarmada çekme mukavemeti 282.7 kPa olarak belirlenmiştir. Laboratuvarında hazırlanan numunenin dayanımı, tahmin edilen tasarımla %93.9 oranında tutarlılık göstermiştir.



Şekil 4.18. Yarmada çekme mukavemeti S/N grafiği (BF+UK)



Şekil 4.19. Yarmada çekme birim deformasyon S/N grafiği (BF+UK)

Varyans analizi yapılırken yarmada çekme mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.41, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.07 ve R-kare (tahmini) değeri %83.35 olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.005 < 0.05$ olup model anlamlıdır.

(Çizelge 4.13). Yarmada çekme mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra uçucu kül içeriği, bazalt fiber içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur.

Çizelge 4.13. Yarmada çekme mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+UK)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	230.677	230.677	19.2231	42.45	0.005
BF uzunluğu	3	11.262	11.262	3.7541	8.29	0.058
BF yüzdesi	3	11.304	11.304	3.7679	8.32	0.058
Kür süresi	3	163.415	163.415	54.4716	120.28	0.001
Uçucu kül	3	44.696	44.696	14.8987	32.90	0.009
Hata	3	1.359	1.359	0.4529		
Toplam	15	232.036				

ε değerleri için geliştirilen modelde $p < 0.022$ olup model %95 güven aralığı içerisinde (Çizelge 4.14). ε değerleri üzerinde en çok etkisi olan parametre bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber içeriği arttıkça numunelerin sünekliliği artmıştır.

Çizelge 4.14. Yarmada çekme deneyi ε değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+UK)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	21.8236	21.8236	1.8186	15.62	0.022
BF uzunluğu	3	1.3881	1.3881	0.4627	3.97	0.143
BF içeriği	3	19.1648	19.1648	6.3883	54.87	0.004
Kür Süresi	3	0.9460	0.9460	0.3153	2.71	0.217
Uçucu Kül	3	0.3247	0.3247	0.1082	0.93	0.523
Hata	3	0.3493	0.3493	0.1164		
Toplam	15	22.1729				

4.4. Islak CBR (Kaliforniya Taşıma Gücü) Deney Sonuçları

4.4.1. BF+SD katkılı karışımların ıslak CBR deney sonuçları

Deney tasarım tablolarında yer alan her tasarım ve katkısız zemin için ASTM 1883 standardına göre ıslak CBR deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. CBR deney numuneleri.

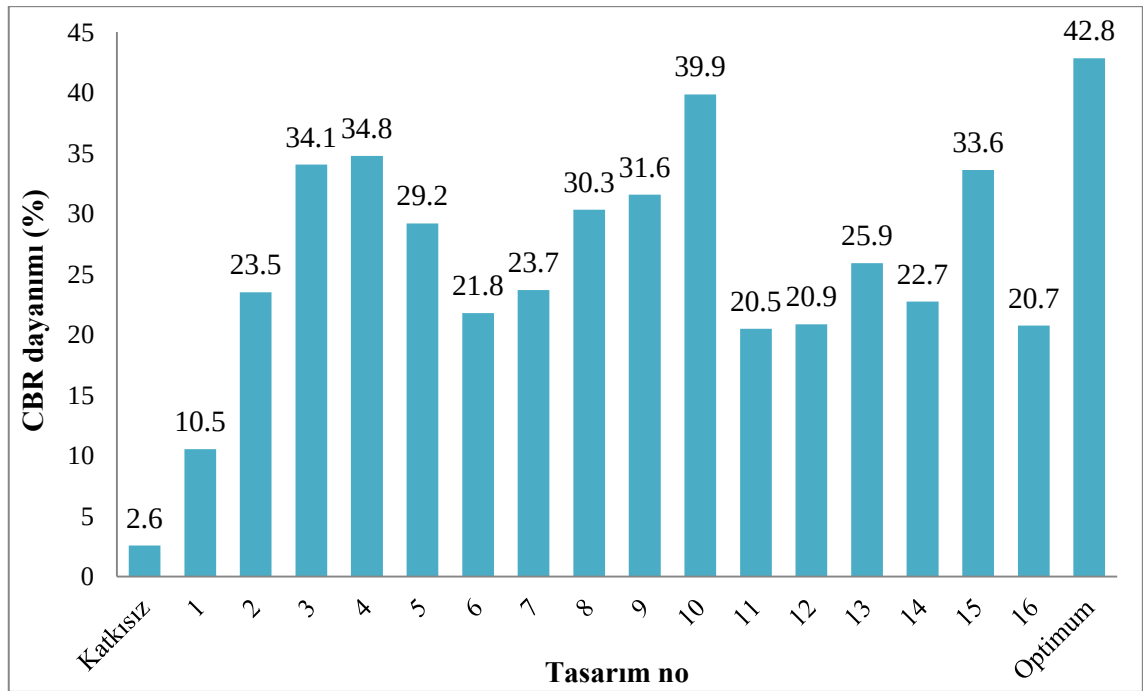
Katkısız numune ve BF+SD katkılı numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen CBR dayanımları ve şişme yüzdesi değerleri Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Islak CBR deney sonuçları (BF+SD)

Deney No	CBR (%)	Şişme (%)
Katkısız	2.56	8.017
1	10.54	0.534
2	23.50	0.103
3	34.06	0.043
4	34.76	0.022
5	29.19	0.121
6	21.77	0.388
7	23.68	0.030
8	30.32	0.034
9	31.58	0.060
10	39.86	0.026
11	20.49	0.345
12	20.86	0.022
13	25.91	0.034
14	22.72	0.052
15	33.60	0.086
16	20.74	0.302

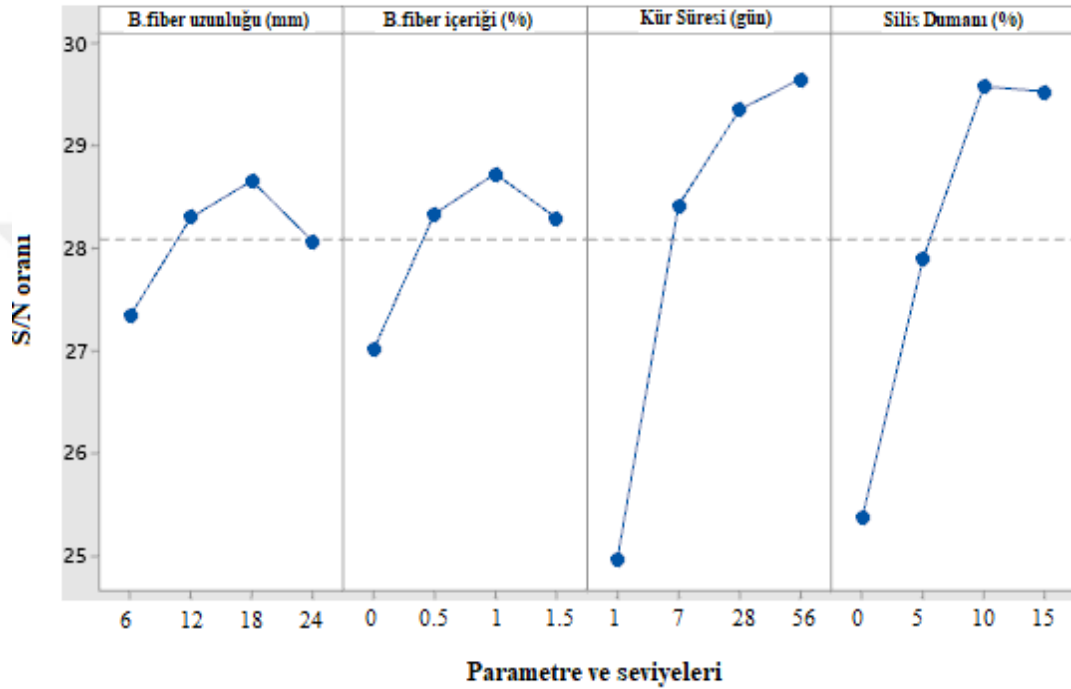
Çizelge 4.16 incelendiğinde en büyük CBR dayanımı 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Kullanılan katkılar ile katkısız zeminin CBR dayanımı %2.56'dan %39.86'ya çıkmıştır. Ayrıca zeminin şişme özelliğini kaybettiği gözlenmiştir.

Katkısız ve katkılı zemin numuneleri ile optimum tasarım numunesinin CBR dayanımları Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Katkısız, katkılı ve optimum tasarım numunelerinin CBR dayanımları (BF+SD)

S/N analizlerinde ‘en yüksek en iyi’ durumu seçilerek optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. CBR dayanımı için gerçekleştirilen analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve silis dumanı içeriği %10’a kadar CBR dayanımı artarken bu seviyelerden sonra CBR dayanımı azalmaktadır. Kür süresi arttıkça CBR dayanımının arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.22. CBR dayanımları için S/N grafiği (BF+SD)

Bazalt fiber ve silis dumanı katkılı numuneler için oluşturulan Taguchi modelinde optimum tasarım için tahmin edilen CBR dayanımı %38.8 olarak hesaplanmıştır. Laboratuvarında optimum parametre seviyeleri ile hazırlanan numunenin CBR dayanımı %42.8 olarak belirlenmiştir. Laboratuvarında hazırlanan numunenin dayanımı, tahmin edilen tasarımla %90.5 oranında tutarlılık göstermiştir.

Varyans analizleri sonucunda, CBR dayanımı ile tasarım parametreleri arasında oluşturulan modelde, R-kare değeri %99.45, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.05 ve R-kare (tahmini) değeri %83.22 olarak elde edilmiştir. CBR dayanım değerleri için geliştirilen bu model istatistiksel olarak anlamlıdır ($p=0.005 < 0.05$) (Çizelge 4.17). CBR dayanımı üzerindeki en etkili parametreler sırasıyla kür süresi, silis dumanı içeriği, bazalt fiber içeriği olarak belirlenmiştir. Bazalt fiber uzunluğunun, CBR dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür ($p=0.097 > 0.05$).

Çizelge 4.17. CBR dayanımı için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+SD)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	113.292	113.292	9.4410	42.13	0.005
BF uzunluğu	3	3.716	3.716	1.2388	5.53	0.097
BF içeriği	3	6.710	6.710	2.2366	9.98	0.045
Kür süresi	3	55.980	55.980	18.6600	83.27	0.002
Silis dumanı	3	46.886	46.886	15.6287	69.74	0.003
Hata	3	0.672	0.672	0.2241		
Toplam	15	113.965				

4.4.2. BF+UK katkılı karışımların ıslak CBR deney sonuçları

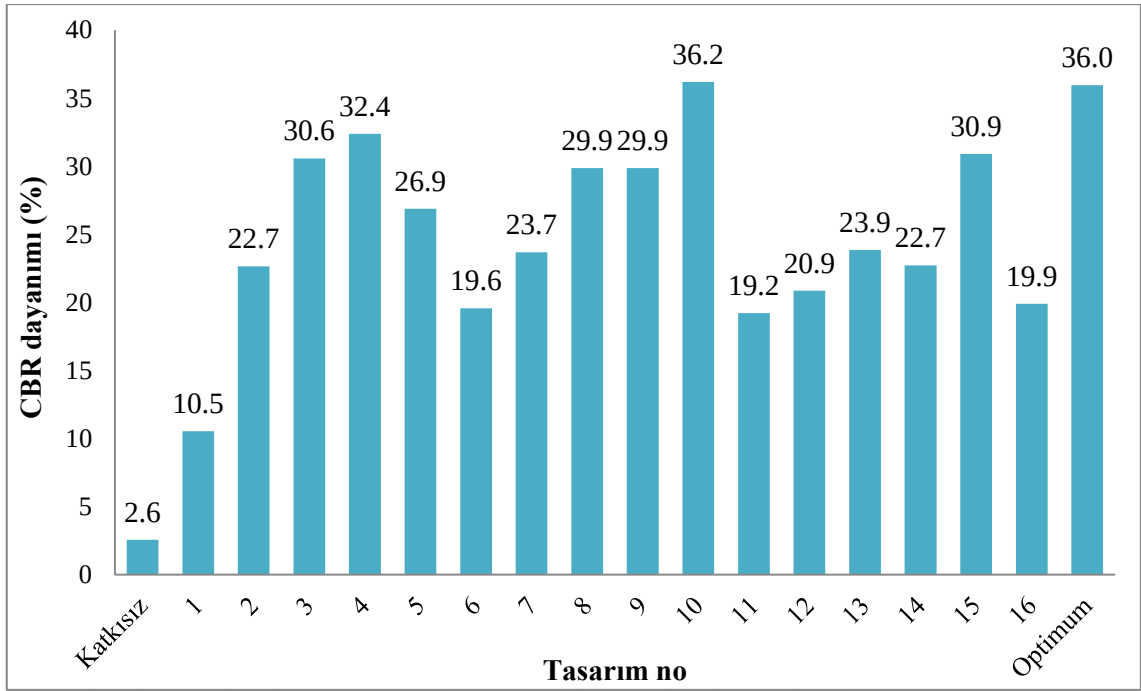
Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı karışımlar için oluşturulan deney tablosundaki tasarımlar için belirlenen CBR dayanımları ve şişme yüzdeleri Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Islak CBR deney sonuçları (BF+UK)

Deney No	CBR (%)	Şişme (%)
Katkısız	2.56	8.017
1	10.54	0.534
2	22.65	0.129
3	30.59	0.052
4	32.39	0.030
5	26.88	0.147
6	19.56	0.431
7	23.68	0.030
8	29.87	0.034
9	29.87	0.069
10	36.19	0.043
11	19.23	0.052
12	20.86	0.022
13	23.85	0.039
14	22.72	0.052
15	30.90	0.129
16	19.89	0.353

Çizelge 4.18 incelendiğinde en büyük CBR dayanımı 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Kullanılan katkılar ile katkısız zeminin CBR dayanımı %2.56’dan %36.19’a çıkmıştır. Kireç, uçucu kül ve bazalt fiber ilavesi ile zeminin şişme özelliğini kaybettiği belirlenmiştir.

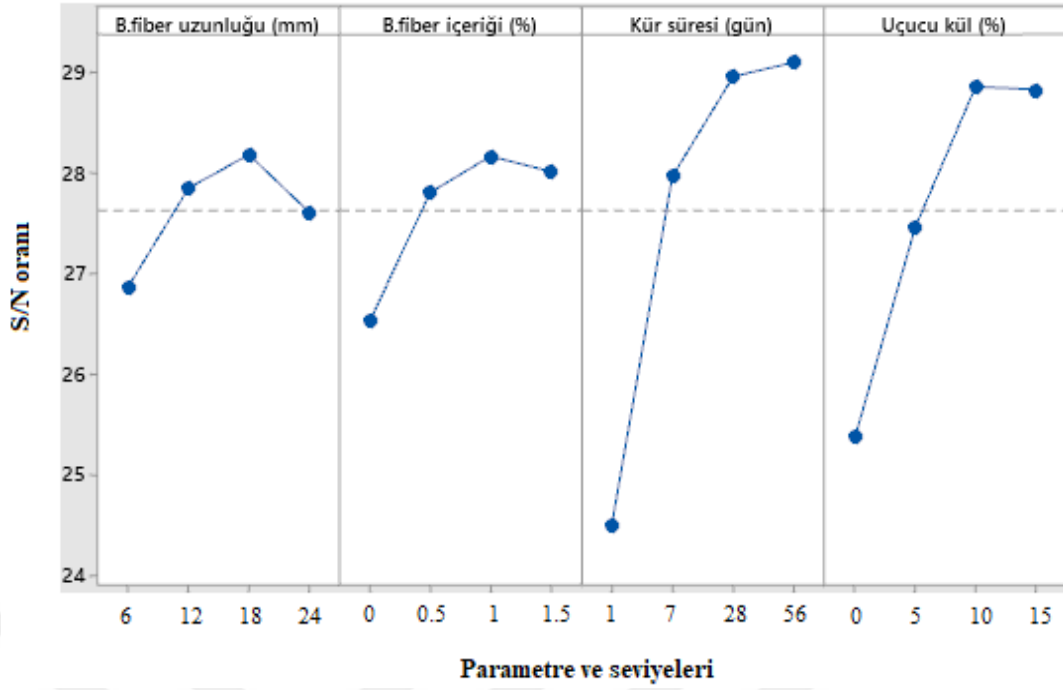
Katkısız ve katkılı zemin numuneleri ile optimum tasarım numunesinin CBR dayanımları Şekil 4.23’te verilmiştir.



Şekil 4.23. Katkısız, katkılı ve optimum tasarım numunelerinin CBR dayanımları (BF+UK)

CBR dayanımı için gerçekleştirilen analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.24'te verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar CBR dayanımı artarken bu seviyelerden sonra CBR dayanımı azalmaktadır. Kür süresi arttıkça CBR dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı numuneler için oluşturulan Taguchi modelinde optimum tasarım için tahmin edilen CBR dayanımı %35.1 iken laboratuvarında optimum parametre seviyeleri ile hazırlanan numunenin CBR dayanımı %35.97 olarak belirlenmiştir. Laboratuvarında hazırlanan numunenin dayanımı, tahmin edilen tasarımla %97.6 oranında tutarlılık göstermiştir.



Şekil 4.24. CBR dayanımları için S/N grafiği (BF+UK)

Varyans analizleri sonucunda, CBR dayanımı ile tasarım parametreleri arasında oluşturulan modelde, R-kare değeri %99.34, R-kare (düzeltilmiş) değeri %96.70 ve R-kare (tahmini) değeri %81.20 olarak elde edilmiştir. CBR dayanım değerleri için geliştirilen bu model istatistiksel olarak anlamlıdır ($p=0.006 < 0.05$) (Çizelge 4.19). CBR dayanımı üzerindeki en etkili parametreler sırasıyla kür süresi, uçucu kül içeriği, bazalt fiber içeriği olarak belirlenmiştir. Bazalt fiber uzunluğunun, CBR dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür ($p=0.094 > 0.05$).

Çizelge 4.19. CBR dayanımı için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+UK)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	98.8550	98.8550	8.2379	37.58	0.006
BF uzunluğu	3	3.7402	3.7402	1.2467	5.69	0.094
BF içeriği	3	6.7654	6.7654	2.2551	10.29	0.044
Kür süresi	3	55.8523	55.8523	18.6174	84.93	0.002
Uçucu kül	3	32.4971	32.4971	10.8324	49.42	0.005
Hata	3	0.6576	0.6576	0.2192		
Toplam	15	99.5126				

4.5. Tasarım Parametrelerinin Dayanım Deneylerine Etkisi

Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8’de verilen deney tasarım tablolarındaki her karışım için 3 numune hazırlanarak serbest basınç, yarmada çekme ve CBR deneyleri yapılmıştır. Çalışmada iki tasarım tablosu için de dayanım deneylerinde bulunan optimum parametre seviyeleri aynı çıkmıştır. Kireç içeriğinin %3’te sabit tutulduğu deneylerde optimum parametreler; bazalt fiber uzunluğu için 18 mm, bazalt fiber içeriği için %1, uçucu kül ve silis dumanı içeriği de %10 olarak belirlenmiştir. Bu seviyelerden sonra dayanımda düşüş meydana gelmiştir. Kür süresi arttıkça dayanımlar artmaya devam etmiştir.

Kullanılan katkılar ile katkısız zemin numunesinin dayanımında önemli ölçüde artış meydana gelmiştir. Bu dayanım artışının en önemli sebebi kireç-uçucu kül ve kireç-silis dumanı ile zemin arasında meydana gelen kısa (katyon değişimi ve flokülasyon) ve uzun vadeli (puzolanik reaksiyon) reaksiyonlardır.

Katyon değişimi, tek değerlikli iyonların kalsiyum iyonları ile yer değiştirmesi ile zemin parçacıkları arasındaki çekimin artmasına neden olur (Mallela ve ark., 2004). Floklar, çekim ve katyon değişimi sonucunda zemin taneciklerinin birbirine yaklaşmasıyla oluşur (Al-Rawas, 2005).

Katkılı numunelerde meydana gelen katyon değiştirme ve flokülasyon olayları zemin numunelerinde daha düşük şişme potansiyeli, plastisite ve daha yüksek geçirgenlik katsayısı ile daha granüler bir yapı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca puzolanik reaksiyonlar sonucunda, uzun vadeli mukavemet kazanımı sağlayan ve geoteknik özellikleri iyileştiren kararlı kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) jelleri oluşmuştur. Bu nedenle, kürlenme süresi uzadıkça, katkı maddeleri ve kil mineralleri arasındaki reaksiyon süresi arttığı için dayanım artmaya devam etmiştir.

Uçucu kül ve silis dumanı içeriği belli bir seviyeden sonra dayanımda düşüşe neden olmuştur. Bunun temel sebebinin belli bir orandan sonra ortamdaki fazla uçucu kül ya da silis dumanının kireç ve zemin ile reaksiyona girmemesidir. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur. Kate (2005), uçucu kül-kireç karışımının genel eğilimi, %10 ila %15 arasında uçucu kül yüzdesi (optimum) için sergilenen maksimum UCS değerleri ile değişmediğini belirtmiştir. Uçucu kül içeriğinin optimum yüzdeye kadar sadece puzolanik bir reaksiyon oluşturarak mukavemeti artırmak için çimentolu malzeme oluşturduğunu, ilave uçucu kül miktarının ise silt malzemesi gibi davranarak mukavemetin azalmasına neden olduğunu belirtmiştir. Zha ve ark. (2008), kil

zeminlerin kayma mukavemetini iyileştirmek için optimum uçucu kül içeriğinin %9-12 arasında olduğunu belirtmiştir. Optimum içeriğe kadar olan uçucu kül miktarının pozolanik reaksiyonu arttıracak ve çimentolu malzemelerin kesme dayanımı artışına etkili bir şekilde katkıda bulunabileceğini gösterirken, ilave uçucu kül miktarının, kayda değer sürtünme veya kohezyona sahip olmayan silt parçacıkları gibi davranarak dayanımın azalmasına neden olacağını bildirmiştir. Bilici ve ark. (2020), %3 kireç ve değişen oranlarda uçucu kül (%3, 6, 9, 12, 15) katkılı numuneler üzerinde yaptığı çalışmada uçucu külün optimum seviyesinin %12 olduğunu bildirmiştir. % 12'den fazla uçucu kül katkısı, dayanım değerlerinde bir azalmaya yol açmıştır. Bu durumun, % 12'dan fazla uçucu külün zemindeki kil mineralleri ile yeterince reaksiyona girmemesinden kaynaklandığını belirtmiştir.

Abd El-Aziz ve ark. (2004), kireç ve silis dumanının birlikte eklenmesinin killi zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Kireç ve silis dumanı katkılı zeminde (%5, 10, 15) % 5-9 aralığında kireç ve % 10 silis dumanı ilave edilerek zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirildiği belirtmiştir. Silis dumanı oranı bu seviyeden sonra dayanımda azalmaya neden olmuştur. Taşçı (2011), %3 kireç ve farklı oranlarda silis dumanı (%1, 3, 5, 10, 15, 20) ilavesinin şişen kil zeminin dayanımına etkisini incelediği çalışmada %3 kireç ve %10 silis dumanı katkılı numunelerin en iyi dayanım özelliklerini verdiğini belirlemiştir. %10'dan fazla silis dumanının reaksiyona girmediği için dayanımı düşürdüğünü bildirmiştir. Türköz ve ark. (2018), %3 sabit kireç ve farklı oranlarda silis dumanı (%1, 3, 5, 10, 15, 20) ilavesinin kil zeminin mühendislik özelliklerine etkisini incelediği çalışmada özellikle %3 kireç + %10 Silis dumanı katkı seviyesinde zeminin mühendislik özelliklerinde önemli iyileşme olduğunu belirtmişlerdir. %10'un üzerindeki silis dumanı katkı yüzdelerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Bu durumun nedeni, silis dumanının pozolanik bir madde olması ve artan silis dumanı yüzdeleri ile silisyumun bağlayıcı özelliğini aktive edecek yeterli kirecin bulunmaması şeklinde değerlendirilmiştir. Türköz ve ark. (2021), belli bir silis dumanı içeriğine kadar zemin özelliklerinin iyileştiğini %15 silis dumanı içeriğinden sonra numunelerde reaksiyona girmemiş silis dumanından dolayı süreksizlik meydana geldiğini belirtmiştir.

Yapılan deneylerde silis dumanı katkılı karışımların serbest basınç, yarmada çekme ve CBR dayanımları, uçucu kül katkılı karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, silis dumanının daha ince taneli olması ve bu nedenle daha yüksek pozolanik aktivite göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Bazalt fiber içeriği için optimum seviye %1 olarak belirlenmiştir. Bu seviyeden sonra fiber içeriğindeki artış dayanımda düşüş meydana getirmiştir. Bazalt fiber az iken lifler arasındaki boşluklar geniştir. Bu durumda zemin ve lifler etkili bir fiber-zemin ağı oluşturamamıştır. Zemin lifi kolonları ve zemin taneleri arasındaki kohezyon kuvvetleri, zemine uygulanan kuvvetin çoğunu taşıyan kuvvetlerdir. Bazalt fiber içeriği sürekli bir şekilde arttıkça, elyaflar arasındaki boşluk küçülür, bu da yakındaki elyaf zemin kolonlarının etkileşime girmesini ve kullanışlı bir ağ oluşturmasını kolaylaştırır. Ayrıca, lif ve zemin parçacıkları arasındaki sürtünmenin gelişmesi, numunenin basınç dayanımını artırarak yanal deformasyonunu sınırlamıştır. Daha yüksek lif içeriği, lif ve zemin parçacıkları arasındaki teması artırdığı için daha yüksek sürtünme yüzeyleri meydana gelmektedir. Bu yüzden fiber içeriği belli bir optimum değere (%1) kadar arttıkça dayanımda artış meydana gelmiştir. Bazalt fiber içeriği çok yüksek olduğunda ise elektrostatik etkileşim nedeniyle zemin numunesinde kümeler halinde toplanmıştır ve zemin içerisinde homojen dağılmamıştır. Bu yüzden, %1.5 bazalt fiber içeriğinde dayanım azalmıştır.

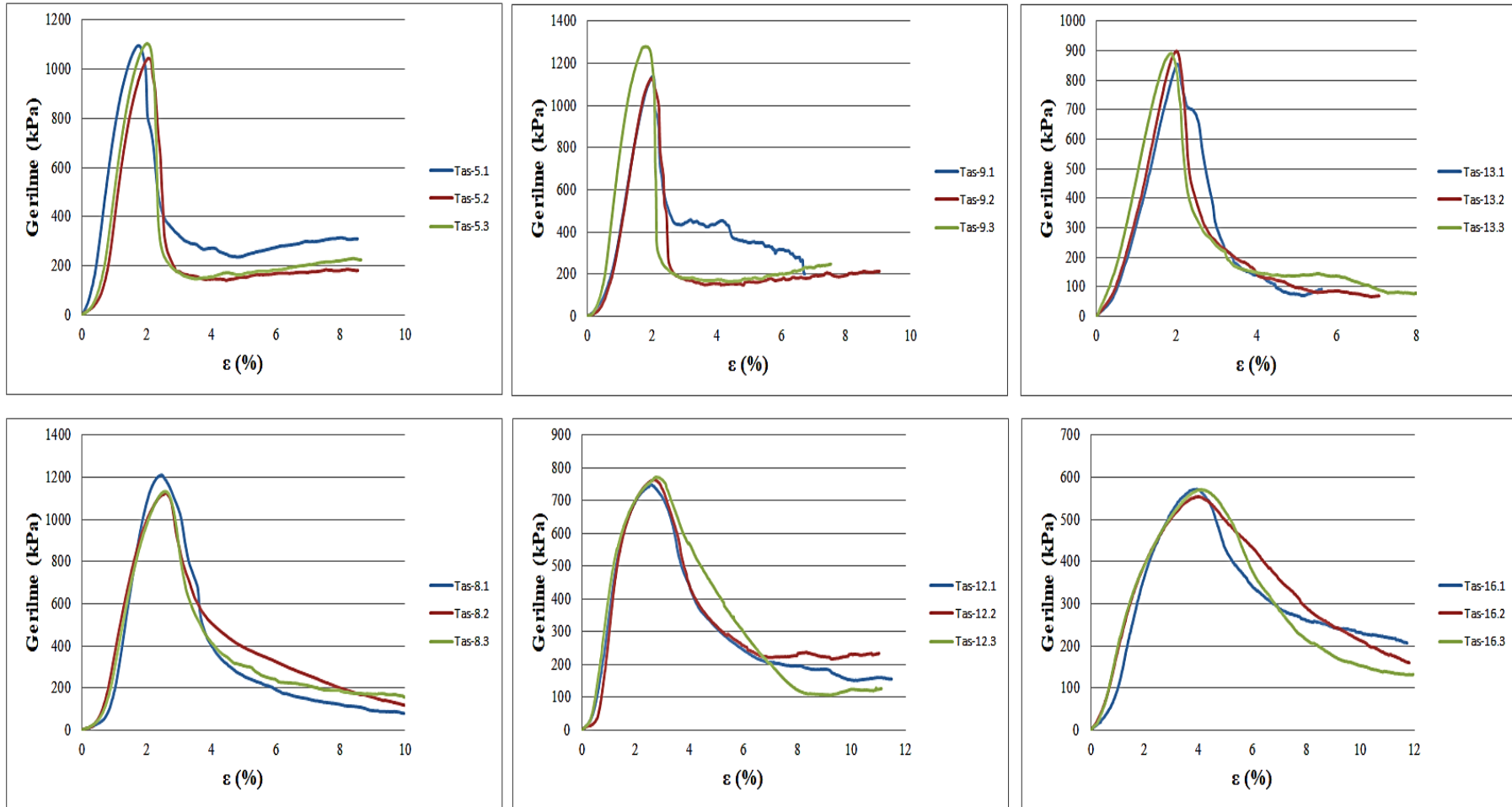
Benzer durum fiber uzunluğu için de gözlenmiştir. Fiber uzunluğu çok arttığında liflerin bir araya toplandığı gözlenmiştir. Bu durum arayüz sürtünmesini ve kohezyonu büyük ölçüde azaltır. Bu yüzden fiber uzunluğu belli bir optimum seviyeyi geçtikten sonra dayanımda düşüş meydana gelmiştir. Benzer sonuçlar Cai ve ark. (2006), Tang ve ark. (2007), Jiang ve ark. (2010), Gao ve ark. (2015), Xu ve ark. (2021) tarafından da elde edilmiştir.

Khorram ve Rajabi (2021), düşük lif içeriklerinde (optimal ağırlık yüzdesinden daha az), lif aralıklarının fazla olduğunu ve bu yüzden lifler ile zemin arasında bütünleşik bir kütle oluşmadığını belirtmiştir. Lif içeriğinin optimal yüzdeden daha fazla olması durumunda, ek lifler zeminde devamlılık yerine birbirleriyle ayrı bir kütle oluşturur. Bu nedenle zemin-lif yüzeyi azalır ve zeminin mukavemeti azalır. Uzunluğu 6 mm veya daha az olan liflerde, lif aralığı yüksektir ve zemin tanecikleri arasındaki gerilimlerin transferi zordur ve optimum uzunluğa (12 mm) kıyasla, güçlendirilmiş zeminin dayanım üzerindeki etkisinin daha az olduğu bildirilmiştir.

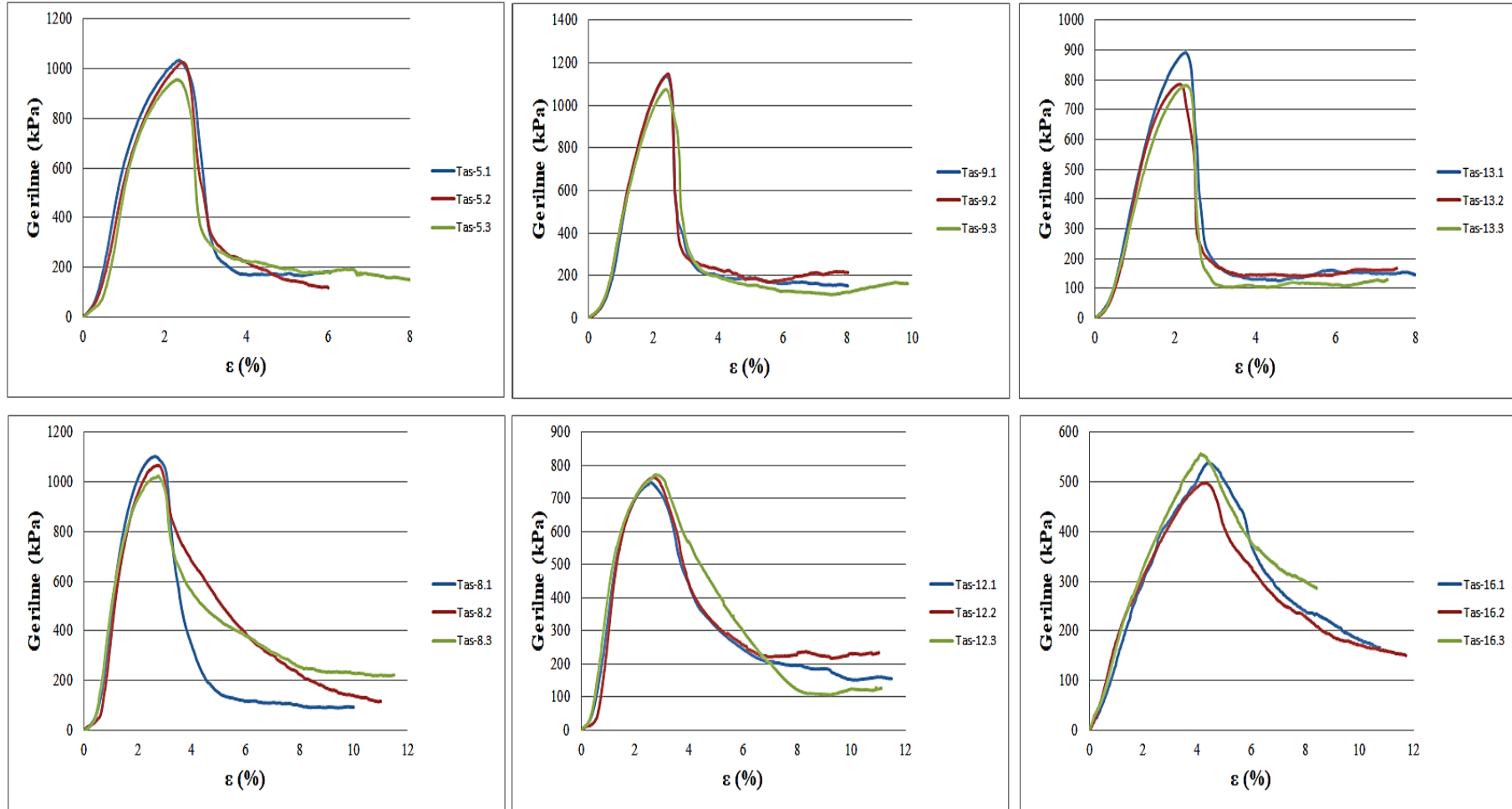
Serbest basınç ve yarmada çekme deneylerinde bazalt fiber içeriği ve uzunluğu arttıkça numunelerin daha sünek davranış gösterdiği gözlenmiştir. Bazalt fiberin kil parçacıkları arasındaki köprüleme etkisi ve katkılı numunelerde meydana gelen çimento hidrasyon ürünleri (C-S-H), zemindeki boşlukları azaltarak daha kararlı ve birbirine bağlı bir yapı oluşturmuştur. Deney numuneleri yüklemeye tabi tutulduğunda, liflerin

köprölleme etkisi ve hidrasyon ürünlerinin boşluk doldurma etkisi, çekme çatlaklarının daha fazla gelişmesini ve zemin numunelerinin yüklemeye bağlı deformasyonunu etkili bir şekilde azaltmıştır. Bu yüzden, fiber katkılı deney numunelerinde kırılmadan sonra dayanımdaki düşüşler fiber ilavesiz numunelere göre daha yavaş olmuştur ve büyük deformasyon değerlerinde numuneler yük taşımaya devam etmiştir. Literatürde yapılan diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Tang ve ark., 2016; Ma ve ark., 2018; Wang ve ark., 2019; Wang ve ark., 2020).

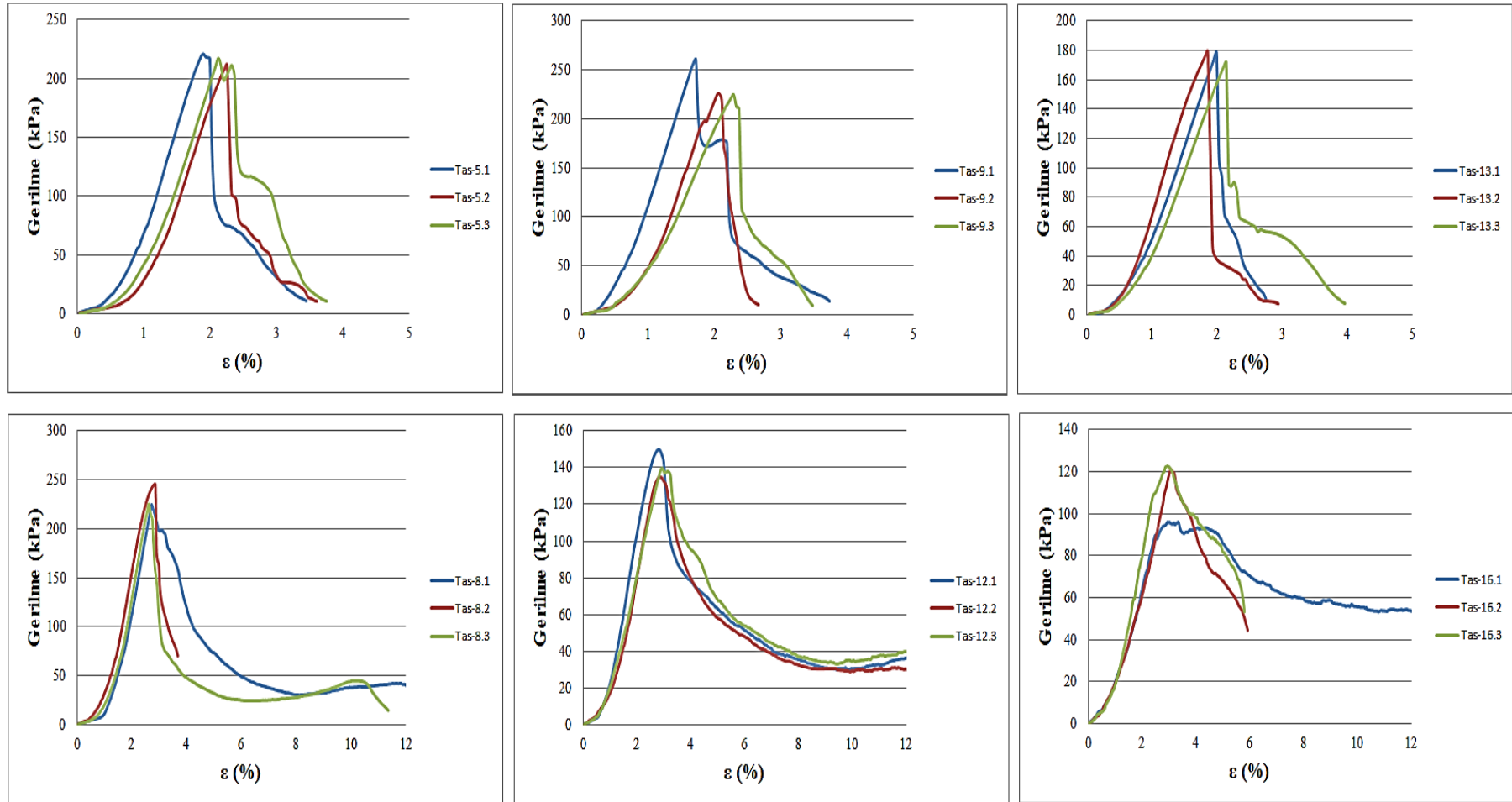
Bazalt fiber ve silis dumanı/ uçucu kül katkılı zemin numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney grafikleri Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da, yarmada çekme deney grafikleri ise Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir. Şekillerde bazalt fiber katkısız (Tasarım 5, 9, 13) ve bazalt fiber katkılı (Tasarım 8, 12, 16) numunelerin grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde hem serbest basınç hem de yarmada çekme deneylerinde fiber katkılı numunelerin daha sünek bir davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Özellikle yarmada çekme deneyinde fiber katkısız numuneler kırıldıktan sonra iki parçaya ayrılarak yük taşımamıştır. Fiber katkılı numuneler ise büyük deformasyon değerlerine kadar yük taşımaya devam etmiştir.



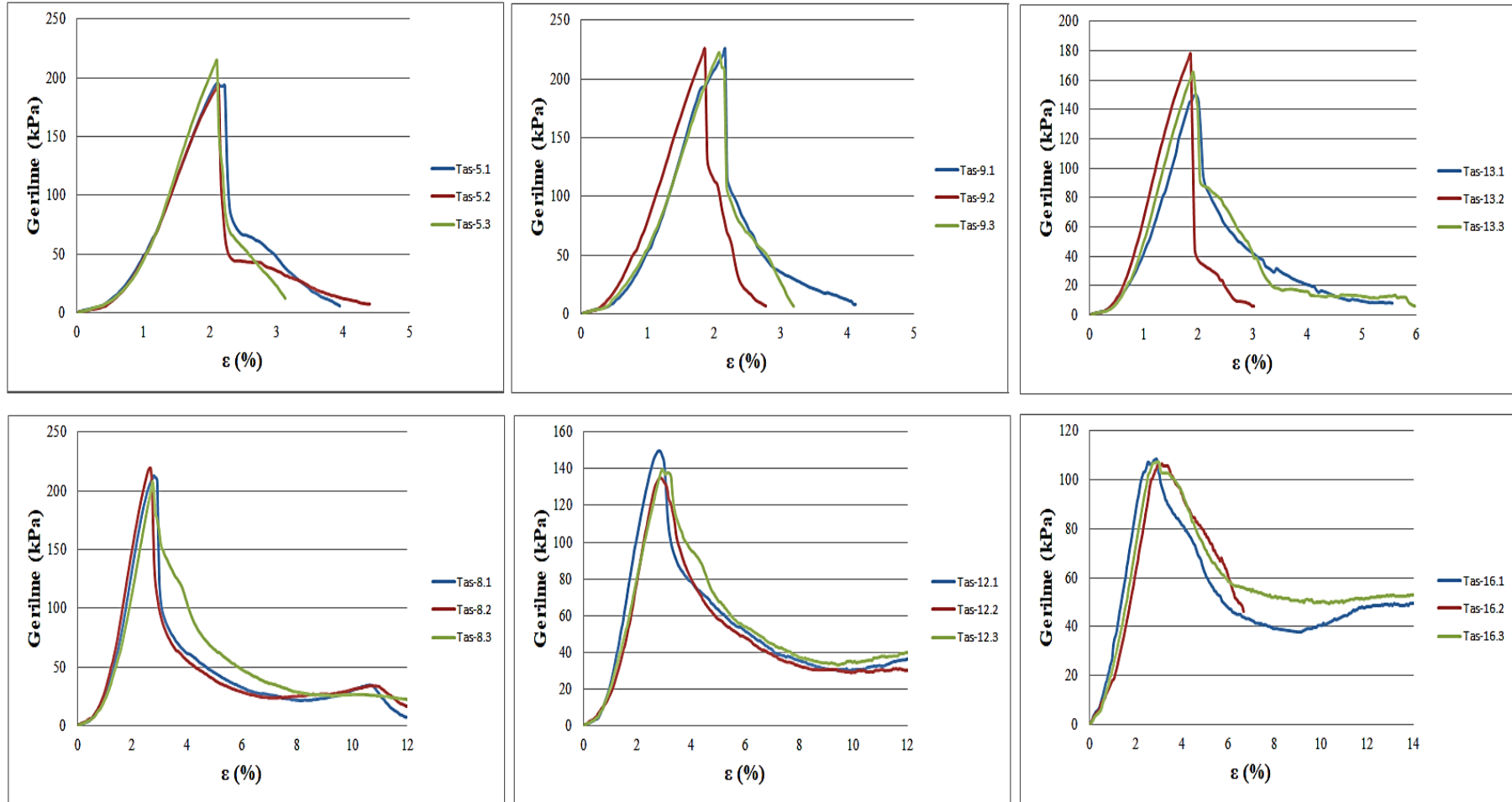
Şekil 4.25. Bazalt fiber katkısız (Tasarım 5, 9, 13) ve katkılı (Tasarım 8, 12, 16) numunelerin serbest basınç deney grafikleri (BF+SD)



Şekil 4.26. Bazalt fiber katkısız (Tasarım 5, 9, 13) ve katkılı (Tasarım 8, 12, 16) numunelerin serbest basınç deney grafikleri (BF+UK)



Şekil 4.27. Bazalt fiber katkısız (Tasarım 5, 9, 13) ve katkılı (Tasarım 8, 12, 16) numunelerin yarmada çekme deney grafikleri (BF+SD)



Şekil 4.28. Bazalt fiber katkısız (Tasarım 5, 9, 13) ve katkılı (Tasarım 8, 12, 16) numunelerin yarmada çekme deney grafikleri (BF+UK)

4.6. Permeabilite Deney Sonuçları

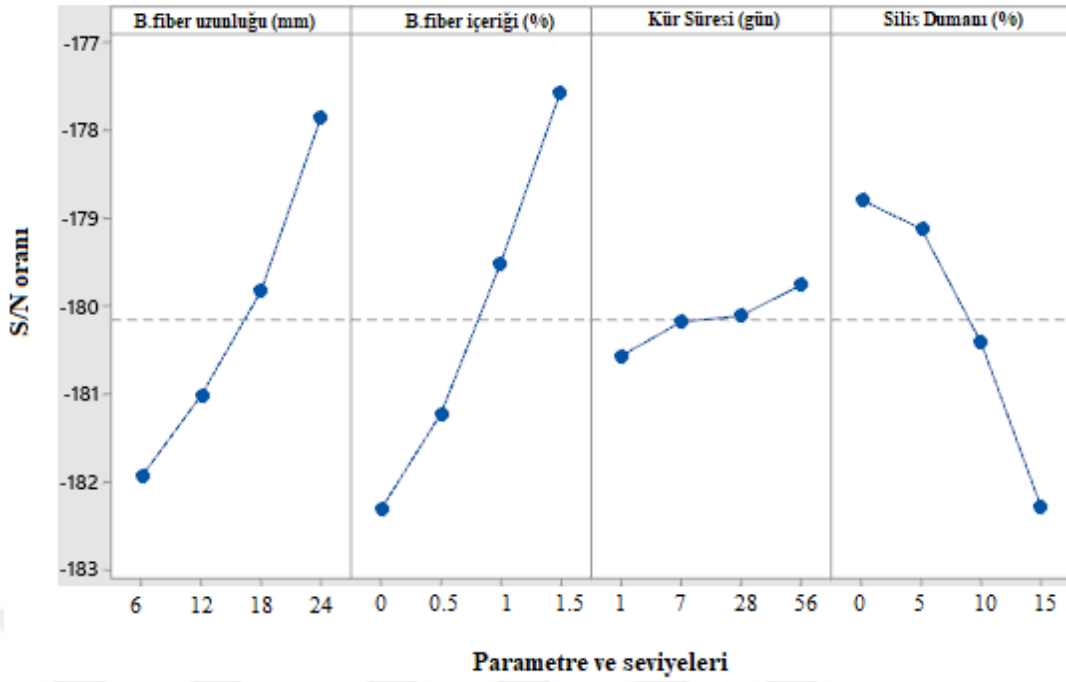
4.6.1. BF+SD katkılı karışımların permeabilite deney sonuçları

Taguchi deney tablosunda yer alan tasarımlar ve katkısız zemin numunesi üzerinde ASTM D5084 standardına göre düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Katkısız ve katkılı (BF+SD) karışımlar üzerinde yapılan Permeabilite deneyi sonuçları Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. Permeabilite deney sonuçları (BF+SD)

Deney No	k (m/s)
Katkısız	2.06E-10
1	7.24E-10
2	7.86E-10
3	8.28E-10
4	8.69E-10
5	6.61E-10
6	5.78E-10
7	1.16E-09
8	1.41E-09
9	6.20E-10
10	9.53E-10
11	1.16E-09
12	1.58E-09
13	1.16E-09
14	1.31E-09
15	1.12E-09
16	1.58E-09

Permeabilite deney sonuçları için S/N analizi yapılırken ‘en yüksek en iyi’ durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.29’da verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve kür süresi arttıkça permeabilite katsayısı artarken, silis dumanı içeriğinin artması ile permeabilite katsayısı azalmıştır.



Şekil 4.29. Permeabilite deneyi S/N grafiği (BF+SD)

Varyans analizlerinde permeabilite katsayısı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.48, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.39 ve R-kare (tahmini) değeri %85.15 olarak belirlenmiştir. Permeabilite katsayısı değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.004 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 4.21). Permeabilite katsayısı üzerinde en etkili parametre bazalt fiber içeriği, daha sonra bazalt fiber uzunluğu ve silis dumanı içeriğidir. Kür süresinin permeabilite katsayısı üzerindeki etkisi anlamlı bulunmamıştır ($p>0.05$).

Çizelge 4.21. Permeabilite katsayıları için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+SD)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	120.836	120.836	10.0697	47.62	0.004
B.Fiber uzunluğu	3	37.518	37.518	12.5060	59.14	0.004
B.Fiber içeriği	3	51.800	51.800	17.2667	81.66	0.002
Kür süresi	3	1.332	1.332	0.4441	2.10	0.279
Silis dumanı	3	30.186	30.186	10.0619	47.58	0.005
Hata	3	0.634	0.634	0.2115		
Toplam	15	121.470				

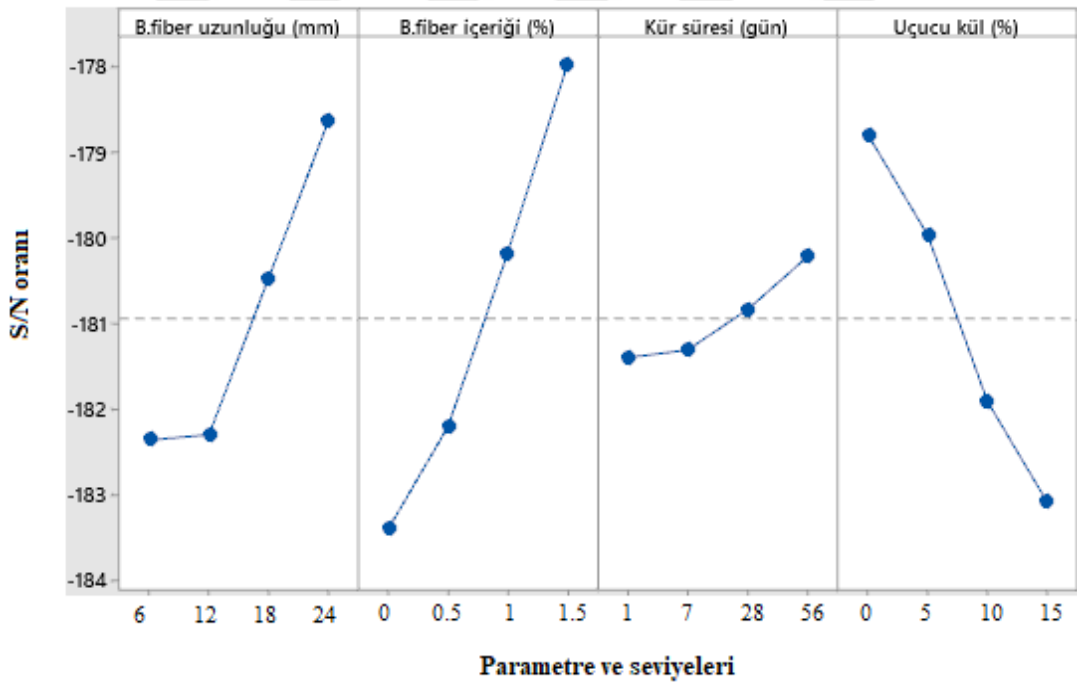
4.6.2. BF+UK katkılı karışımların permeabilite deney sonuçları

Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı zemin numuneleri üzerinde yapılan Permeabilite deneyi sonuçları Çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Permeabilite deney sonuçları (BF+UK)

Deney No	k (m/s)
Katkısız	2.06E-10
1	7.24E-10
2	7.03E-10
3	7.28E-10
4	9.11E-10
5	4.95E-10
6	4.75E-10
7	1.16E-09
8	1.27E-09
9	5.62E-10
10	8.28E-10
11	1.10E-09
12	1.58E-09
13	1.04E-09
14	1.31E-09
15	9.94E-10
16	1.39E-09

Yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 4.30'da verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve kür süresi arttıkça permeabilite katsayısı artarken, uçucu kül içeriğinin artması ile permeabilite katsayısı azalmıştır.



Şekil 4.30. Permeabilite deneyi S/N grafiği (BF+UK)

Varyans analizlerinde permeabilite katsayısı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.48, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.41 ve R-kare (tahmini) değeri %85.28 olarak belirlenmiştir. Permeabilite katsayısı değerleri

için geliştirilen bu modelde $p=0.004 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 4.23). Permeabilite katsayısı üzerinde en etkili parametre bazalt fiber içeriği, daha sonra uçucu kül içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur. Kür süresinin geçirimsizlik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.23. Permeabilite katsayıları için varyans analizi sonuçları (ANOVA) (BF+UK)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	154.188	154.188	12.8490	48.04	0.004
B.Fiber uzunluğu	3	37.8010	37.801	12.6004	47.11	0.005
B.Fiber içeriği	3	68.3760	68.376	22.7919	85.22	0.002
Kür süresi	3	3.55300	3.5530	1.1844	4.43	0.127
Uçucu kül	3	44.4580	44.458	14.8193	55.41	0.004
Hata	3	0.80200	0.8020	0.2674		
Toplam	15	154.990				

4.7. Tasarım Parametrelerinin Geçirimsizliğe Etkisi

Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8’de verilen deney tasarım tablolarındaki her karışım için üç numune hazırlanarak düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde uçucu kül ve silis dumanı ilavesiyle zeminin geçirimsizliği azalırken bazalt fiber uzunluğu ve içeriği arttıkça geçirimsizlik artmıştır.

Kür süresinin tasarım numunelerinin geçirimsizliği üzerindeki etkisi az olmasına rağmen kürlenme ile permeabilite katsayısında artış meydana gelmiştir. Kür süresi arttıkça permeabilite katsayısının arttığı bazı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Yıldız ve Soğancı, 2012; Vakili ve ark., 2015).

Uçucu kül ve silis dumanı çok ince taneli olduğu için zemin içerisindeki boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasına neden olmuştur. Sonuçlar literatür ile uyumlu olarak bulunmuştur. Goodarzi ve ark. (2015), silis dumanı katkılı kil numunelerinin geçirimsizliğinin artan katkı içeriği ile azaldığını belirtmiştir. Silis dumanının ultra ince parçacıklarının, fiziksel bir etki yoluyla, yani zemin gözeneklerini doldurarak geçirgenliğin azalmasıyla sonuçlanan boşluk oranının azalmasına yol açabileceğini bildirmiştir. Kalkan ve Akbulut (2004), yüksek plastisiteli kil zemine %5, 10, 15, 20, 25, 30 ve %50 silis dumanı ilavesinin zeminin mühendislik özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada silis dumanı içeriğinin %30’a kadar zeminin geçirimsizliğini azalttığını bu seviyeden sonra ise zeminin geçirimsizliğine etkisinin azaldığını belirtmiştir. Goodarzi ve ark. (2016), silis dumanının düşük tane boyutundan dolayı yüksek plastisiteli killerde permeabiliteyi azaltıcı yönde etki ettiğini belirtmiştir.

Hussain ve ark. (2021), kil zemine %5 ve %10 silis dumanı ilavesinin zeminin geçirimliliğini önemli ölçüde azalttığı sonucuna varmışlardır. Zemin-silis dumanı karışımının geçirgenlik değerlerindeki bu önemli azalmanın, silis dumanı ilavesinden kaynaklanan boşlukları dolduran daha yoğun matrizen kaynaklandığını söylemiştir.

Cömert (2005), %5 kireç içeriğinin sabit tutulduğu çalışmada kil zemine %5, %10 ve %15 uçucu kül ilavesinin zeminin permeabilite katsayısına etkisini incelemiştir. Kireç ilavesi ile zeminin permeabilite değerleri artarken uçucu kül ilavesi ile zeminin permeabilite katsayısı düşüş göstermiştir. Uçucu kül içeriği arttıkça permeabilite katsayısının azaldığı gözlenmiştir. Geçirimlilikteki azalmanın nedeni uçucu kül ilavesi ile oluşan C–S–H veya C–A–H jellerinin gözenekleri doldurulmasıyla zemin parçacıkları arasındaki bağların oluşumu ve boşluk alanının daralmasıdır (İslam ve ark., 2020; İslam ve ark., 2021). Lekha ve ark. (2015), uçucu kül katkısının yüksek plastisiteli kilin geçirimliliğini azalttığını belirtmiştir.

Liflerin varlığı, suyun lifler ve zemin arayüzü boyunca akmasına izin verdiği için lif içeriğinde bir artış zeminin geçirimliliğini arttırmıştır. Benzer şekilde fiber uzunluğundaki artış ile zemin içerisinde daha uzun akış kanalları oluştuğu için geçirimlilik artmıştır. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da bulunmuştur (Ayothireman, 2017). Yang ve ark. (2018), kil zemindeki bazalt fiber katkısının geçirimliliği arttırdığını belirtmiştir. Bunun nedenini, bazalt lifinin geçirgenlik oluşturmaya ve eklenen lifin, zemin parçacıkları arasında sızıntı kanalları sağlaması olarak açıklamıştır. Su, fiber kanalları boyunca akabilir, böylece geçirgenlik katsayısı artar. İsfahani ve Azhari (2021), yaptıkları çalışmada bazalt fiber içeriği arttıkça yüksek plastisiteli kil zeminin permeabilite katsayısının doğrusal olarak arttığını belirtmiştir. Ancak bu artışın oranı farklı bazalt fiber yüzdeleri arasında değişmektedir. Bu değişim, karışıma önce fiber eklendiğinde, numuneler boyunca bir homojensizlik geliştirilerek hidrolik geçirgenliği hafifçe arttırması ve ardından daha fazla fiber ilave edilerek, kanallar oluşturulması gerçeğiyle açıklanabilir. Numune boyunca su geçirgenliğini kolaylaştıran bazalt lifleri ve bu kanallar, hidrolik iletkenliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Abdi ve ark. (2008), fiber katkılı yüksek plastisiteli kil zeminin permeabilite katsayısının hem lif içeriğine hem de uzunluğuna bağlı olduğunu ve bu parametrelerdeki artışla arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca sabit lif içerikleri için lif uzunluğunun artmasıyla hidrolik iletkenliklerin arttığı belirtmiştir. Lif uzunluğunun artması durumunda, suyun daha hızlı akması için daha uzun yollar sağlayarak numunelerin hidrolik iletkenliğini arttıracağını belirtmiştir.

4.8. Büyük Ölçekli Deney Sonuçları

Tez çalışmasının bu kısmında, bazalt fiber ve silis dumanı/ uçucu kül (ayrıca %3 kireç) katkılı zeminlerin taşıma gücü arazi temsiliyeti açısından ve iyileştirilecek olan zemin özellikleri dikkate alınarak büyük ölçekli deneylerle araştırılmıştır. Oluşturulan deney tasarımları (Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8) üzerinde yapılan dayanım deneylerinde en iyi mukavemet özelliklerinin elde edildiği tasarımlar ve katkısız zemin için temel yüklemesi yapılmıştır. Deney numuneleri, kompaksiyon deneyinde elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde hacim kontrollü olarak sıkıştırılmıştır. İlk olarak katkısız zemin üzerinde deney yapılmıştır. Tank içerisinde sıkıştırılan zemin üzerine model şerit temel yerleştirilerek yüklenmiştir (Şekil 4.31). Deney sırasında yük ve deformasyon değerleri ölçülmüştür. Taban basıncı-oturma eğrisi çizilerek taşıma gücü belirlenmiştir.



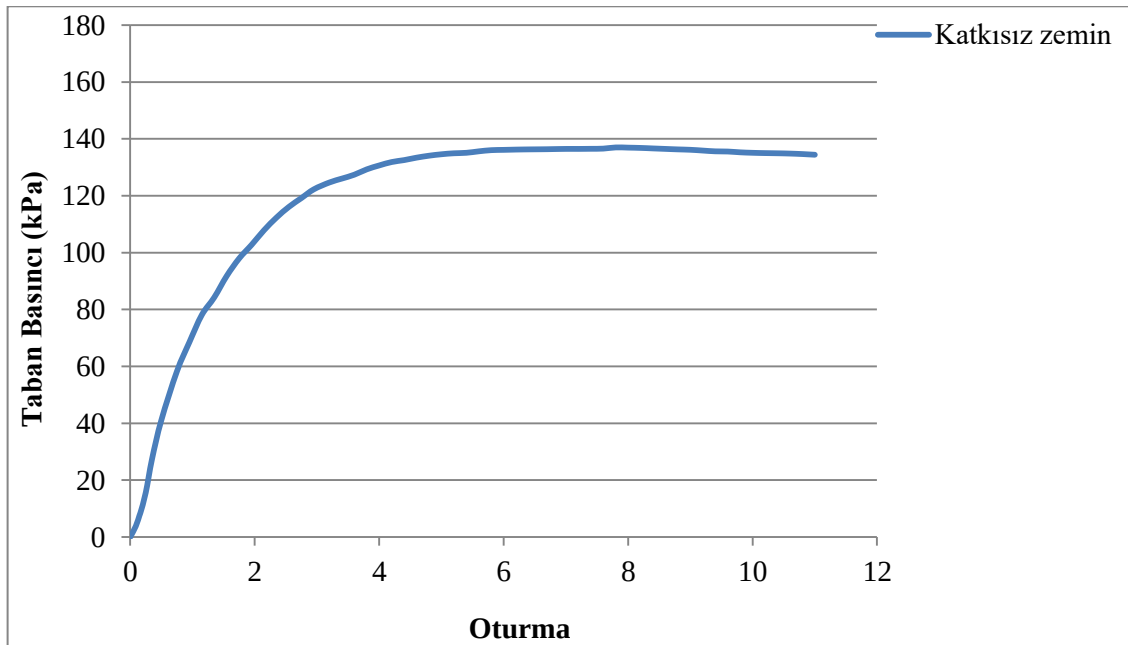
Şekil 4.31. Katkısız zemin üzerine yerleştirilen temelin yüklenmesi

Deney sırasında tankın yanal yüzeylerinde oluşan deformasyonları ölçmek için kısa ve uzun kenarlarına deformasyon saatleri yerleştirilmiştir (Şekil 4.32). Deney sırasında düşey yüklerden dolayı yan duvarlarda meydana gelen deformasyonların ihmal edilebilir seviyelerde ($<0.2\%$) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.32. Tankın yanal yüzeylerindeki deformasyonların ölçülmesi

Katkısız zemin üzerinde gerçekleştirilen deneyin taban basıncı-oturma grafiği Şekil 4.33'te verilmiştir. Katkısız zemin üzerine yerleştirilen temelin taşıma gücü 136.99 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda oluşan kayma yüzeyi Şekil 4.34'te görülmektedir. Taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgin değildir.

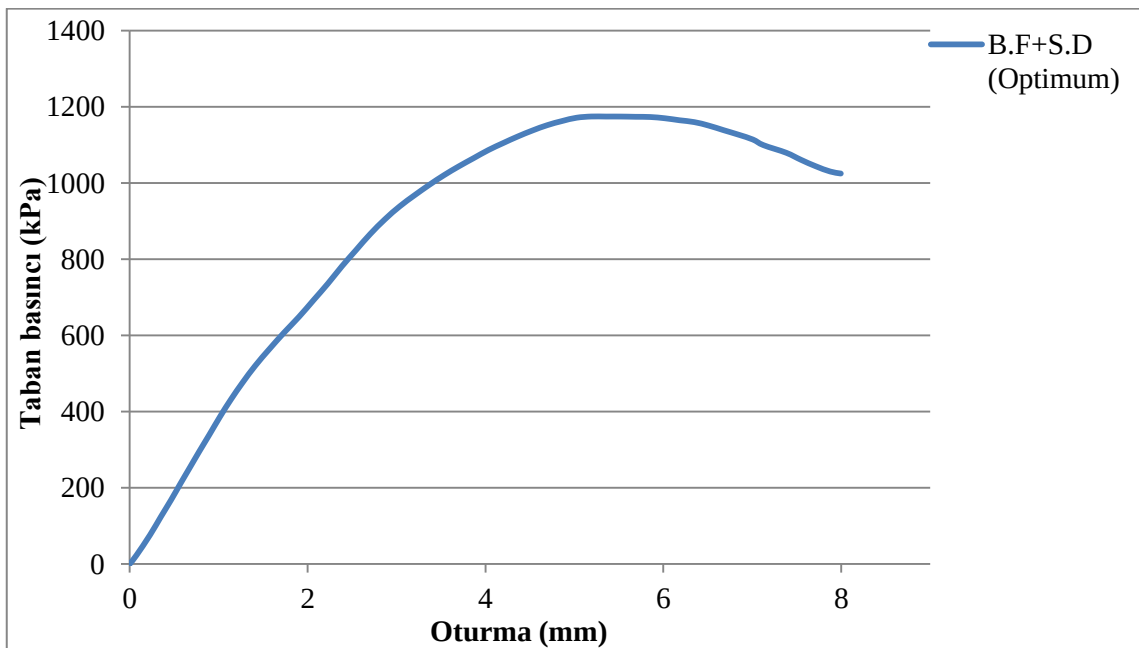


Şekil 4.33. Katkısız zemin üzerinde gerçekleştirilen deneyin taban basıncı-oturma grafiği



Şekil 4.34. Yükleme sonrası zeminin görünümü

Bazalt fiber ve silis dumanı katkılı (ayrıca %3 kireç) karışımlar için yapılan dayanım deneylerinde optimum parametreler ve seviyeleri bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1, kür süresi 56 gün ve silis dumanı %10 olarak belirlenmiştir. Bu parametre seviyeleri için tank içerisinde hazırlanan karışım üzerinde yapılan deneyde temelin taşıma gücü 1174.82 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.35). Deney sonunda katkısız zemine göre daha net kayma yüzeyleri oluşmuştur (Şekil 4.36). Ayrıca taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgindir.

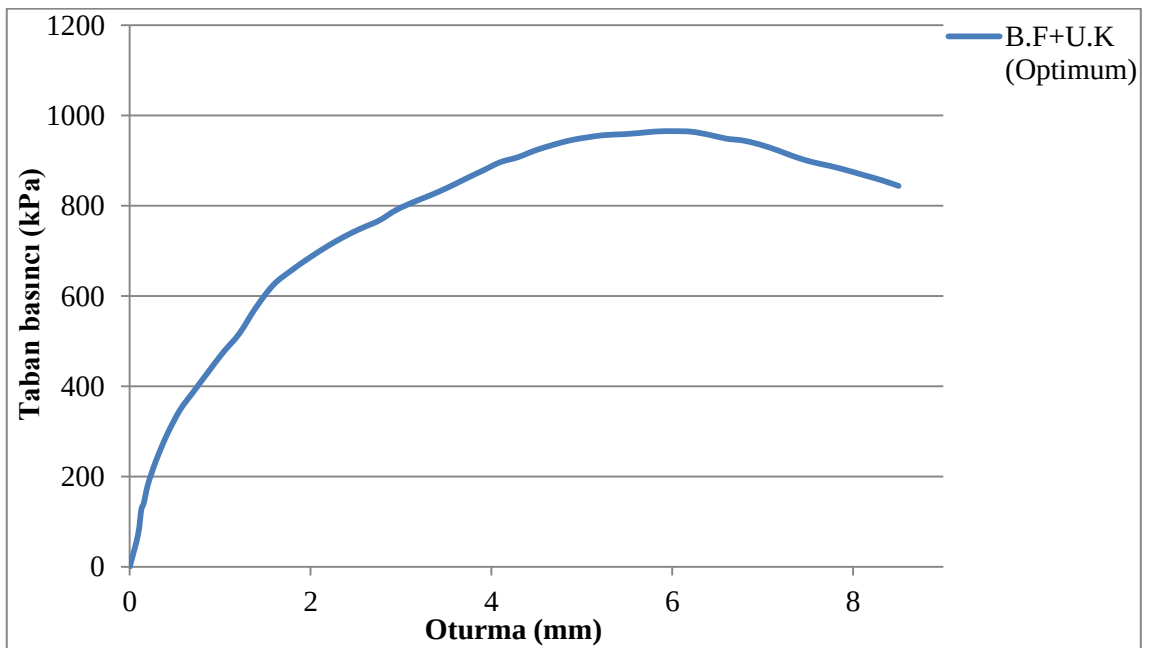


Şekil 4.35. BF+SD katkılı zemin üzerinde gerçekleştirilen deneyin taban basıncı-oturma grafiği



Şekil 4.36. BF+SD katkılı zeminin yükleme sonrası görünümü

Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı (ayrıca %3 kireç) karışımlar için yapılan dayanım deneylerinde optimum parametreler ve seviyeleri bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1, kür süresi 56 gün ve uçucu kül %10 olarak belirlenmiştir. Bu parametre seviyeleri için tank içerisinde hazırlanan karışım üzerinde yapılan deneyde ise temelin taşıma gücü 965.42 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.37). BF+SD katkılı zemine benzer şekilde deney sonunda katkısız zemine göre kayma yüzeyleri daha net ve taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgindir (Şekil 4.38).

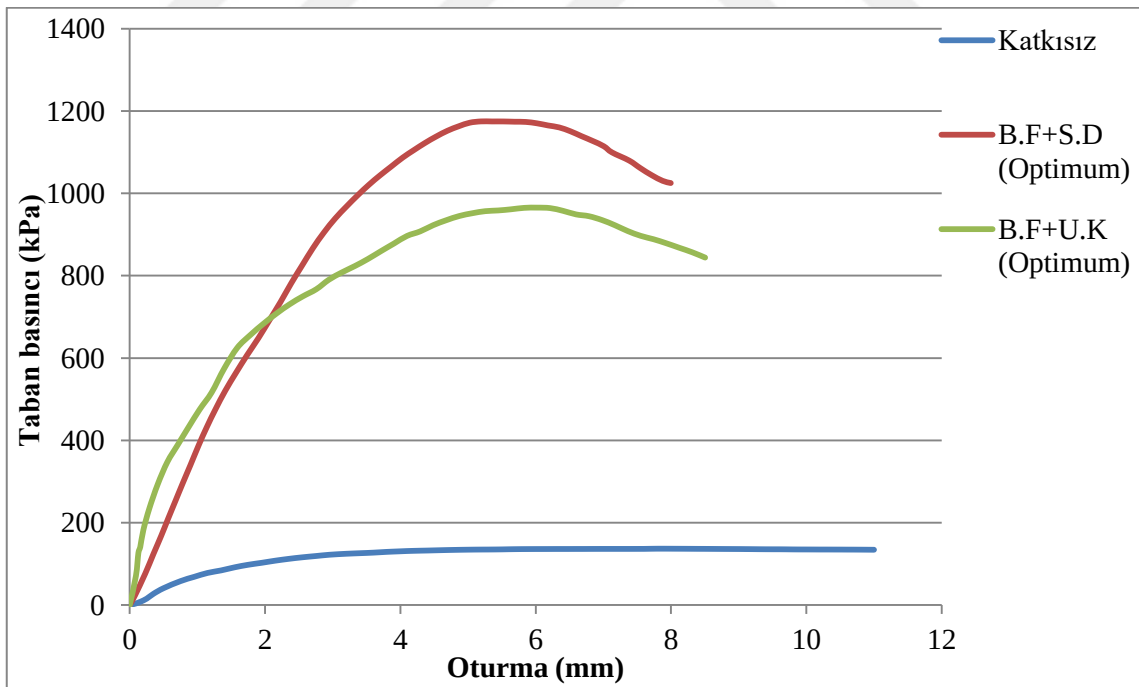


Şekil 4.37. BF+UK katkılı zemin üzerinde gerçekleştirilen deneyin taban basıncı-oturma grafiği



Şekil 4.38. BF+UK katkıli zeminin yükleme sonrası görünümü

Katkısız ve katkıli numunelerin yükleme grafikleri Şekil 4.39’da verilmiştir. Katkısız zeminde elde edilen taşıma gücü, BF+SD katkıli zeminde 8.58 katına, BF+UK katkıli zeminde ise 7.05 katına çıkmıştır.



Şekil 4.39. Katkısız ve katkıli numunelerin yükleme grafikleri

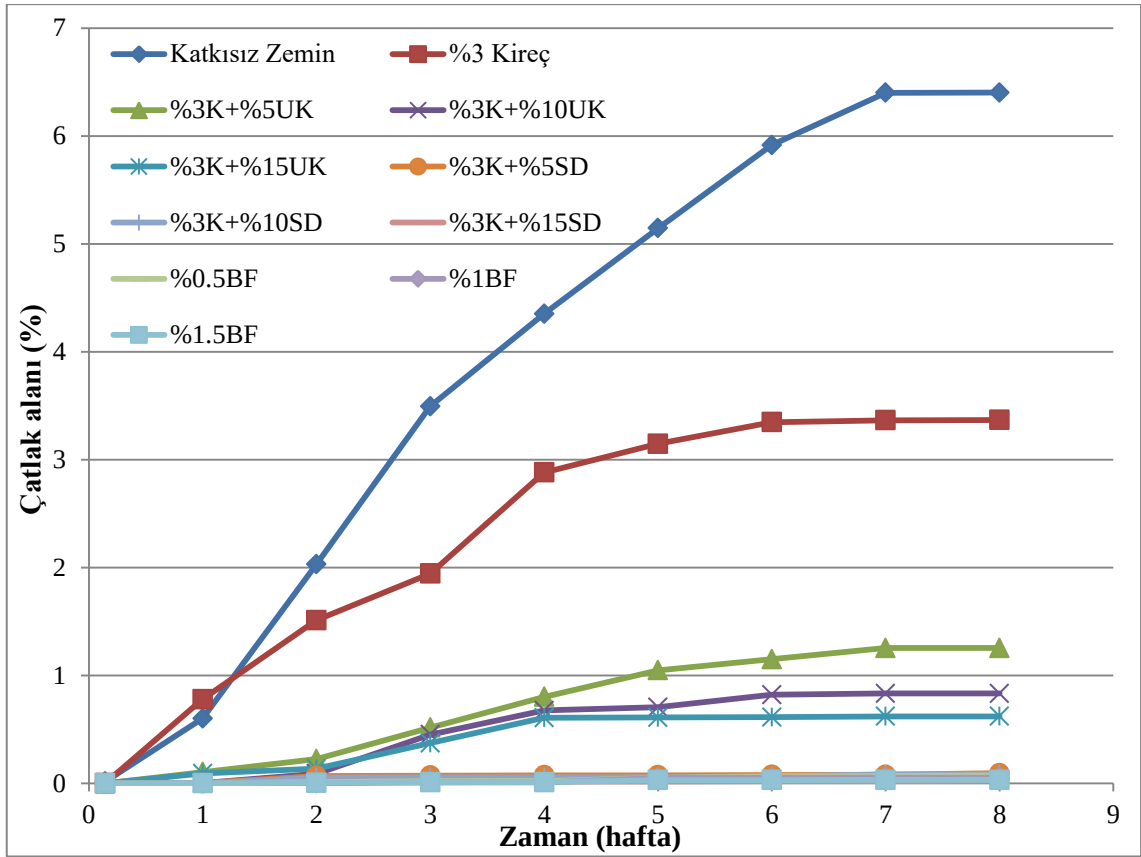
4.9. Kuruma Çatlağı Deney Sonuçları

Kullanılan katkıların kil zeminlerdeki kuruma çatlağına etkisini belirlemek için görüntü işleme analizi kullanılarak çekilen fotoğraflardaki çatlak alanları belirlenmiştir. Birinci çevrim sonunda elde edilen çatlak alanları Çizelge 4.24'te verilmiştir. Ayrıca çatlak alanlarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.40'ta verilmiştir.

Çizelge 4.24. Katkısız ve katkılı numunelerin çatlak alanları

Karışım	Çatlak alanları (%)								
	1.gün	1.hafta	2.hafta	3.hafta	4.hafta	5.hafta	6.hafta	7.hafta	8.hafta
Katkısız	0.0173	0.603	2.0329	3.4953	4.3441	5.1472	5.9177	6.4024	6.4041
%3 Kireç	0.0016	0.7813	1.5133	1.9458	2.8828	3.149	3.3495	3.3672	3.3692
%3 K+ %5 UK	0	0.1059	0.2265	0.5188	0.8023	1.0499	1.1516	1.2552	1.2552
%3 K+ %10 UK	0	0.0049	0.0902	0.4526	0.6765	0.7063	0.8227	0.8347	0.8347
%3 K+ %15 UK	0	0.0925	0.1375	0.3745	0.608	0.6123	0.6151	0.6223	0.6223
%3 K+ %5 SD	0	0.0039	0.0702	0.0732	0.0754	0.0761	0.0787	0.0797	0.0954
%3 K+ %10 SD	0	0	0.0551	0.0569	0.0581	0.0584	0.0672	0.0839	0.0849
%3 K+ %15 SD	0	0	0.0183	0.019	0.0196	0.0199	0.0219	0.0228	0.0261
% 0.5 BF (18 mm)	0.001	0.0049	0.012	0.0208	0.0215	0.0515	0.0665	0.0698	0.0744
% 1 BF (18 mm)	0	0	0.0007	0.0104	0.0111	0.0528	0.0531	0.0548	0.0548
% 1.5 BF (18 mm)	0.002	0.002	0.0065	0.0111	0.0117	0.0313	0.0319	0.0329	0.0329

Deney sonuçları, kullanılan katkıların katkısız (kil+%30 bentonit) zemin numunelerinin yüzeyindeki kuruma çatlaklarının gelişimini azalttığını göstermiştir. Yapılan testler sonucunda doğal killi zemin numunelerinin yüzeyinde geniş ve derin çatlaklar meydana gelmiştir. Ancak killi zemine; kireç+silis dumanı, kireç+uçucu kül ve bazalt fiber ilavesi ile daha küçük ve yüzeysel çatlaklar oluşmuştur. Katkısız zemine %3 kireç ilave edildiğinde çatlak alanı azalmıştır. Kireç ile beraber uçucu kül ya da silis dumanı eklendiğinde çatlakların azalmaya devam ettiği belirlenmiştir.



Şekil 4.40. Katkısız ve katkılı numunelerin zamana bağlı çatlak alanları

Şekil 4.40, kompozit numunelerin artan silis dumanı, uçucu kül ve bazalt fiber içeriği ile çatlak alanlarının azaldığını göstermektedir. Deney sonuçları; kireç, uçucu kül, silis dumanı ve bazalt fiberin katkısız kil zemin numunesinde meydana gelen kuruma çatlağının miktarını azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle kireç+silis dumanı ve bazalt fiber katkılı numunelerde katkısız killi zemin numunelerine göre küçük çatlak ağlarının oluştuğu tespit edilmiştir.

Çatlak başlangıcı, kuruma çatlağı analizinde önemli bir husustur. Genel olarak bir çatlağın çekme kırılmasının bir sonucu olarak başladığı kabul edilmektedir. Kısıtlanmış sınır koşulları altında, nem kaybının neden olduğu büzülme, zemin kütlesi içinde çekme gerilmeleri oluşturur. Oluşan çekme gerilmesi çekme mukavemetini aştığında, malzemede çatlak meydana gelir (Xie ve ark., 2020).

Daha yüksek kil içeriğine ve daha yüksek plastisite indislerine sahip zeminler genellikle daha fazla su hacmine sahiptir ve bu nedenle büyük hacimsel büzülme şekil değiştirmelerine daha yatkındır (Haines, 1923; Albrecht ve Benson, 2001). Kuruma sırasında doğal killi zeminlerde meydana gelen hacimsel büzülme gerilmesi, zemin

doygun hale geldiği durumdaki su/hacim oranının doğrudan bir fonksiyonu olduğu için ciddi biçimde çatlamıştır (Şekil 3.21).

Katkısız zeminin ciddi şekilde çatladığı; kireç+silis dumanı ve kireç+uçucu kül katkılı zemin karışımlarının ise çok az veya hiç çatlama oluşmadığı görülmüştür. Kireç, uçucu kül ve silis dumanı ilavesi, hacimsel büzülme gerilmesinin etkilerini en aza indirmiştir. Bu durum, katkılı zemin numunelerinin, katkısız kil zemine göre daha düşük plastisiteye sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Katkısız zemin içerisine eklenen kireç, uçucu kül ve silis dumanı katkıları zeminin plastisite indisini önemli ölçüde düşürmüştür. Bunun nedeni; kireç, uçucu kül ve silis dumanı ile kil zemin arasında meydana gelen reaksiyonlardır. Katyon değiştirme kapasitesi (CEC) ve spesifik yüzey alanındaki azalma, düşük su tutma kapasitelerine ve hacimsel büzülme gerilmelerine neden olur. Bu nedenle kireç, uçucu kül ve silis dumanı katkılı numunelerin yüzeyinde meydana gelen kuruma çatlaklarının gelişimi azalmıştır.

Kireç-uçucu kül ve kireç-silis dumanı ile zemin arasında kısa (katyon değişimi ve flokülasyon) ve uzun vadeli (puzolanik reaksiyon) reaksiyonlar meydana gelmektedir. Katyon değişimi ve flokülasyon; özgül yüzey alanında azalma ve daha düşük şişme potansiyeli ve plastisite ile zemine daha granüler bir yapı kazandırır. Bu durum, zeminin hacimsel büzülme geriliminin ve dolayısıyla çatlak alanlarının azalmasına neden olmuştur. Benzer sonuçlar; Kalkan ve Akbulut (2004) ve Kumar ve ark. (2022) tarafından bulunmuştur.

Fiber takviyeli zemin numunelerinde, bazalt fiberin köprüleme etkisi nedeniyle daha ince, daha kısa ve düzensiz çatlaklar oluşmuştur ve buda daha düşük çatlak alanına neden olmuştur. Liflerin varlığı, çatlak genişliğini ve çatlakların yüzeysel alanını azaltmada etkili olmuştur. Miller ve Rifai (2004), Harianto ve ark. (2008), Olgun (2013), Qiang ve ark. (2014) tarafından benzer gözlemler tespit edilmiştir.

Lif içeriğinin artmasıyla birlikte çekme mukavemetindeki artış (veya çatlamanın başladığı su içeriğinin azalması) nedeniyle, zemin kütlelerinde depolanan gerinim enerjisi çatlamının başlangıcında artmaktadır (Costa ve ark., 2013). Çatlaklar, bitişik zemin hacminden ayrılmak için enerji aldığından ve yalnızca çatlak yüzey alanları oluşturmaya ihtiyaç duyduğundan, çatlak oluşumunda kırılma enerjisi optimize edildiğinde daha küçük çatlak aralığına yol açar (Costa ve ark., 2013; Chaduvula ve ark., 2017).

Tang ve ark. (2016), fiber takviyeli zeminlerde çatlağın azalması, çatlamadan sonra liflerin köprüleme etkisi ile birlikte lif ilavesinin bir sonucu olarak zeminin artan gerilme mukavemetinden kaynaklandığını belirtmiştir.

Bazalt fiberin çekme mukavemeti zemininkinden çok daha fazladır. İlk çatlakların oluşumundan sonra, çatlak bölgesindeki lifler çekme gerilimini taşır ve bu da çatlakların yakınındaki gerilim konsantrasyonunu azaltır. Bu nedenle, zemin matrisi ve lifler arasındaki etkileşim, kuruma çatlamasını azaltmada etkili olmuştur.

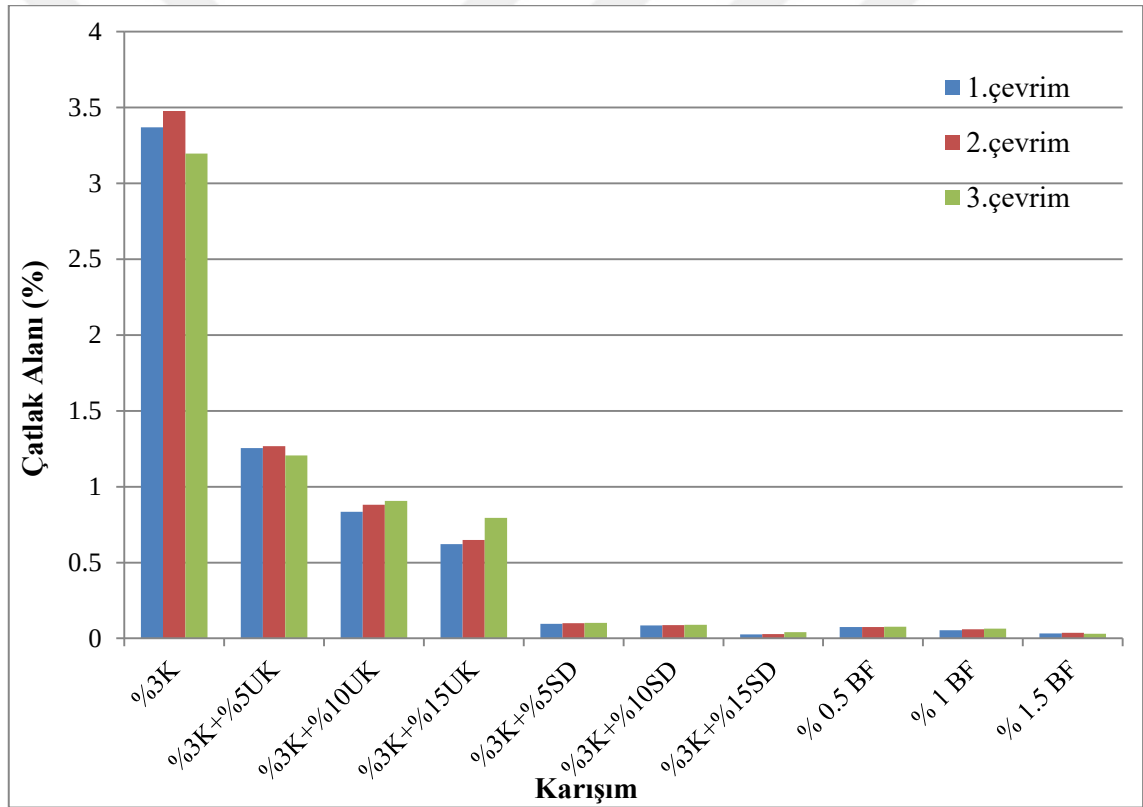
Xu ve ark. (2021), zemin matrisinde çekme çatlakları görüldüğünde, liflerin çatlaklar boyunca bir köprü etkisi sağlayarak zemin matrisinin gerilim alanını iyileştirdiğini, bu da çatlakların genişliğinin, alanının ve yayılmasının gelişimini azalttığını belirtmiştir. Böylece daha az ama daha geniş çatlaklar yerine daha ince çatlaklar ortaya çıkar. Tang ve ark. (2011), bir zemin matrisine gömülmüş tek bir lif üzerinde bir test yapmışlar ve ara yüzey kayma direncinin su içeriğinin azalmasıyla arttığını bulmuşlardır. Ara yüzey kayma mukavemetindeki artış, fiberin, çatlaklar başladığında ayrılan zemin kümelerinin hareketini sınırlamasına yardımcı olur ve fiber ilavesinin neden olduğu köprüleme etkisini artırır. Benzer şekilde, Chaduvula ve ark. (2017), fiber-zemin arasındaki temas alanı ve normal gerilimin; nemdeki azalma (kuruma) ile beraber arttığını ve buna bağlı olarak ara yüzey mukavemetinin artarak liflerin çatlak başlangıcında zemin kütesinin bir bütün olarak tutulmasına yardımcı olduğunu belirtmiştir.

Çalışmada ıslatma-kurutma çevrimlerinin kuruma çatlakları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla çevrim sonunda kuruyan numuneler tekrar ıslatılarak kurumaya bırakılmıştır. 3 çevrim yapılarak çatlak alanları belirlenmiştir. 3 çevrim sonunda oluşan çatlak alanları Çizelge 4.25 ve Şekil 4.41’de verilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde karışımların büyük çoğunluğunda çevrim sayısı arttıkça çatlak alanları artmıştır. Bazı tasarımlarda ise 2.çevrimde çatlak alanı artarken 3.çevrimde çatlak alanı azalmıştır.

Çizelge 4.25. Islatma-kurutma çevrimleri sonunda oluşan çatlak alanları

Karışım	Çatlak Alanları		
	1.çevrim	2.çevrim	3.çevrim
%3K	3.3692	3.4779	3.1967
%3K+%5UK	1.2552	1.2682	1.2071
%3K+%10UK	0.8347	0.8810	0.9075
%3K+%15UK	0.6223	0.6480	0.7953
%3K+%5SD	0.0954	0.0996	0.1019
%3K+%10SD	0.0849	0.0865	0.0898
%3K+%15SD	0.0261	0.0280	0.0405
% 0.5 BF	0.0744	0.0750	0.0766
% 1 BF	0.0548	0.0603	0.0639
% 1.5 BF	0.0329	0.0362	0.0313

**Şekil 4.41.** Islatma-kurutma çevrimi ile çatlak alanlarının değişimi

Sonuçlar literatürle uyumlu bulunmuştur. He ve ark. (2020) ve Tian ve ark. (2022), her numunenin yüzeyinde oluşan çatlak alanının toplam alana oranının, ıslatma-kurutma döngüleri ile ilişkisini inceledikleri çalışmada çatlak alanlarının ilk üç döngüde arttığını ve artan döngü sayısı ile sabit hale geldiğini belirlemişlerdir. Tang ve ark. (2011) ve Tang ve ark. (2020), ikinci döngüde çatlak alanının arttığını daha sonra artan çevrimle çatlak alanının azaldığını belirtmiştir.

İlk kurutma döngüsünden sonra, zemindeki çatlak desenleri, sonraki ıslatma-kurutma döngüsünde yüksek oranda tekrarlanmıştır. İlk kurutma döngüsündeki büzülme gerilmeleri, geri dönüşü olmayan yapısal değişikliklere neden olur ve zeminin daha önce çatlamış olduğu partiküller arasındaki bağ kuvveti zayıflar. Daha önce çatlamış olan bölgeler, yenilme bölgeleri olarak kalır ve sonraki kuruma döngüleri, tanecikler arasındaki bağların nispeten güçlü olduğu iç agregasyonlar dışında, zeminleri bu bölgelerde önemli ölçüde çatlamaya yatkın hale getirir. Daha önceki çatlama bölgelerindeki zemin parçacıkları arasındaki kohezyon kuvvetleri, çatlakların oluşmadığı matris içindeki kuvvetlerden daha kırılğan olduğu için zemin daha fazla kuruma olayına maruz kaldığında tekrarlanabilir çatlaklara yol açmıştır. Bu yüzden ıslatma-kurutma döngüleri sonunda benzer çatlak desenleri elde edilmiştir. Yeşiller ve ark. (2000), Li ve Zhang (2011) ve Wang ve ark. (2017)'de yaptıkları çalışmalarda ıslatma-kurutma döngüsünde çatlak desenlerinin yüksek oranda tekrarlandığını belirlemişlerdir. Bu benzerliğin, artan ıslatma-kurutma çevrimi ile hafif bir azalma eğilimi gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Tekrarlanan ıslatma-kurutma döngülerine maruz kalan zeminde, içyapı içerisinde kümülatif yorgunluk ve hasar meydana gelmektedir. Zeminlerin büzülme ve şişme özellikleri, bir dizi ıslatma-kurutma döngüsünden geçtikten sonra dengelenme eğilimindedir (Wang ve ark., 2017). Özellikle, büzülme ve şişme davranışının neden olduğu zemin yapısının tahribi ve yön değiştirme olgusu, ilk ıslatma kurutma çevriminde büyük oranda meydana gelir (Basma ve diğerleri, 1996). İlk çatlatma işleminden sonra kil tabakası nemlendirilip homojen hale gelinceye kadar karıştırılırsa, sonraki çatlak desenleri ile orijinal arasında doğrudan bir ilişki gözlenmemektedir (Goehring ve diğerleri, 2010).

4.10. XRD ve SEM Analizi Sonuçları

Zeminin mekanik özellikleri mikro özellikleriyle ilişkilidir. Örneğin, stabilize edilmiş zemin için, daha yoğun bir yapıya sahip stabilize edilmiş zemin genellikle daha yüksek bir dayanıma sahiptir. Ayrıca, stabilize edilmiş zeminin mukavemeti, zeminde oluşan hidratlarla yakından ilişkilidir. Bu nedenle, stabilize edilmiş zeminlerin mekanik özellikleri, zeminlerin bileşimi ve mikro yapısı analiz edilerek daha iyi tanımlanabilir. XRD ve SEM analizleri, malzemelerin mikro yapısını ve bileşimini incelemek için etkili araçlardır.

4.10.1. XRD analiz sonuçları

Katkısız ve katkılı zemin numunelerinin mekanik özelliklerini açıklamak ve meydana gelen değişimleri yorumlayabilmek için X-ışını kırınım (XRD) analizleri yapılmıştır. XRD kırınım desenleri, $5^{\circ} - 70^{\circ}$ açıları (2θ tarama açısı için) arasında dakikada bir derecelik bir tarama hızı ile elde edilmiştir.

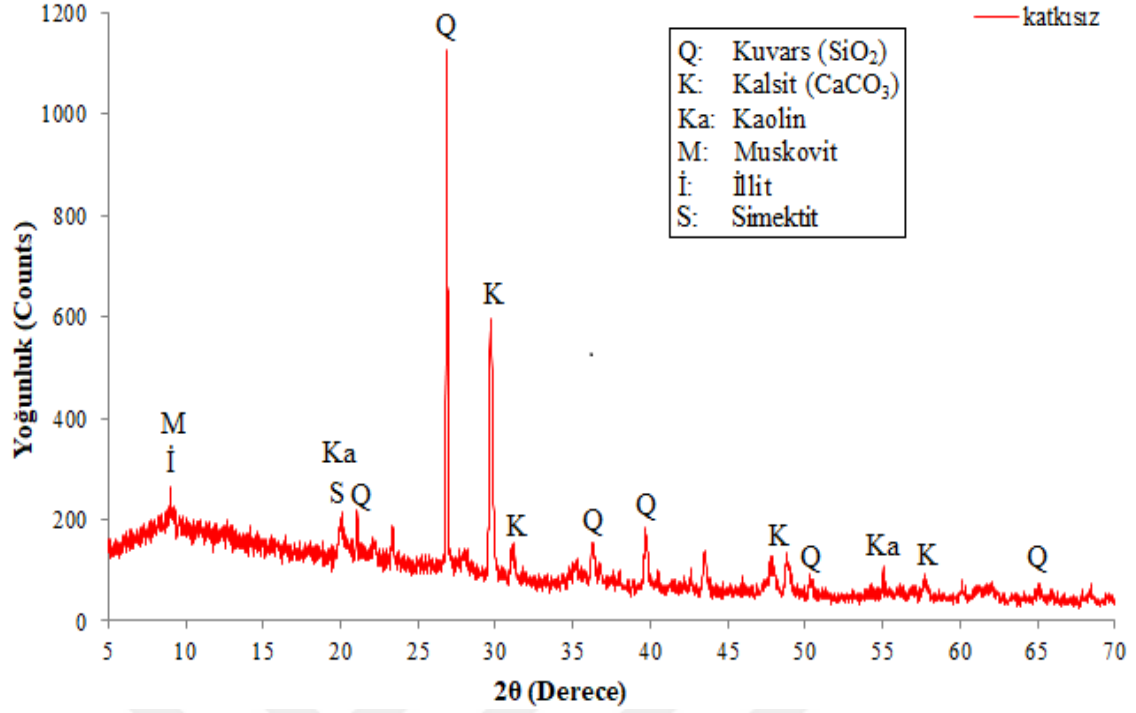
Dayanım deneyleri sonrasında kurutulan numunelerden 10-15 gr toz numune alınarak XRD analizleri yapılmıştır. Bazalt fiber takviye malzemesi olarak kullanıldığından ve stabilize edilmiş zeminin kimyasal yapısına herhangi bir etkisi olmadığından, XRD analizleri için alınan numunelerdeki fiberler ayıklanmıştır.

Deney tablolarında yer alan farklı karışımlar ve katkısız zemin numunesi için X ışını kırınımı (XRD) analizi ile belirlenen kristal fazlar, Şekil 4.42-4.47'de verilmiştir.

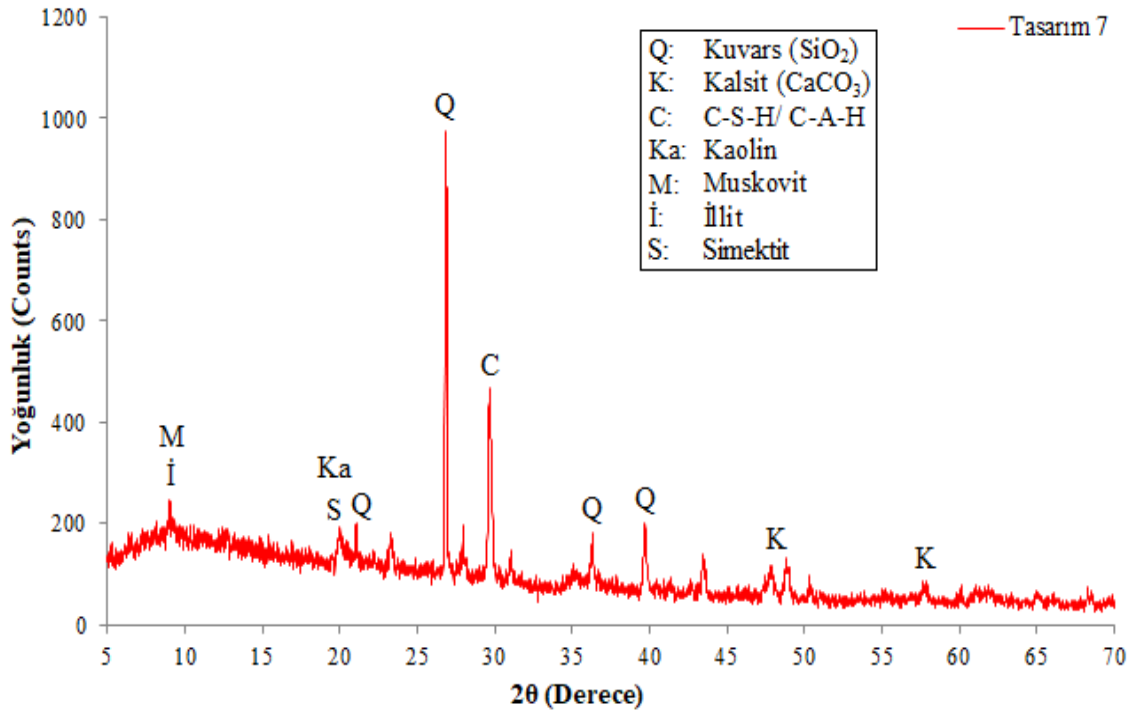
XRD analiz sonuçları; kireç, uçucu kül ve silis dumanı katkılarının pozolanik reaksiyonu nedeniyle Tobermorit (kalsiyum silika/alümina hidrat (C-S-H)) mineralinin oluştuğunu göstermiştir.

Kalsiyum silika hidrat zirvesi yaklaşık olarak 29.7° 'de oluşmuştur. Ayrıca analiz sonuçları incelendiğinde numunelerde kuvarsın (quartz (SiO_2)) varlığı görülmüştür. Kuvars yoğunluğu, katkı maddelerinin pozolanik reaksiyonuna bağlı olarak azalmıştır. Tiwari ve ark. (2020), bu durumun C-S-H oluşumu sırasında kuvars minerallerinin tüketilmesinden kaynaklandığını belirtmiştir.

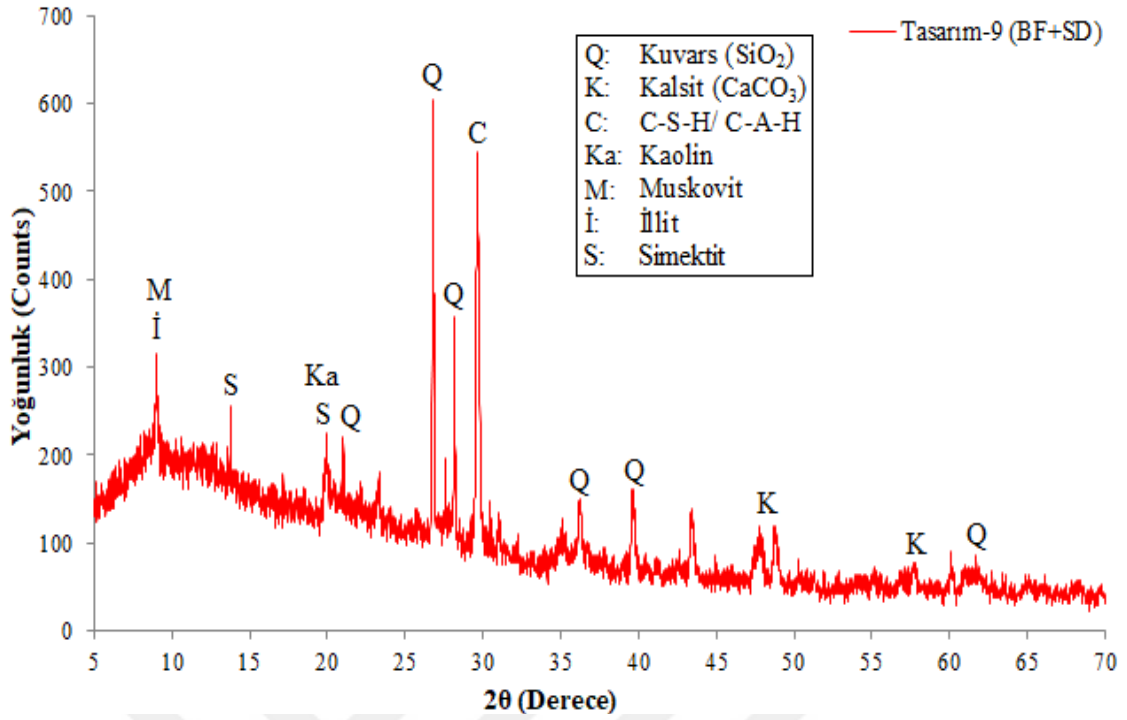
Kalsiyum silika/alümina hidrat mineralinin yoğunluğu, dayanımın en yüksek olduğu tasarımlarda (10 nolu tasarım) daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, kür süresindeki artış ve dayanım için optimum parametre seviyelerinin kullanımı ile kür sırasında hidratlı jel oluşumunun daha yüksek konsantrasyonlarda gerçekleştiğini göstermektedir. 56 gün kür süresindeki Tasarım-7 (%3 kireç ve bazalt fiber katkılı numune) ve Tasarım-10 (%3 kireç, %10 uçucu kül/silis dumanı ve bazalt fiber katkılı numuneler) XRD analiz sonuçları incelendiğinde kireç katkısına ilave olarak uçucu kül veya silis dumanı katkısı ile C-S-H mineralinin yoğunluğunun arttığı gözlenmektedir. 9 ve 10 nolu tasarımlar için SD katkılı numunelerde UK katkılı numunelere göre C-S-H mineral yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum, dayanım deneylerinde silis dumanı katkılı karışımların daha yüksek dayanıma sahip olmasının nedenini açıklamaktadır.



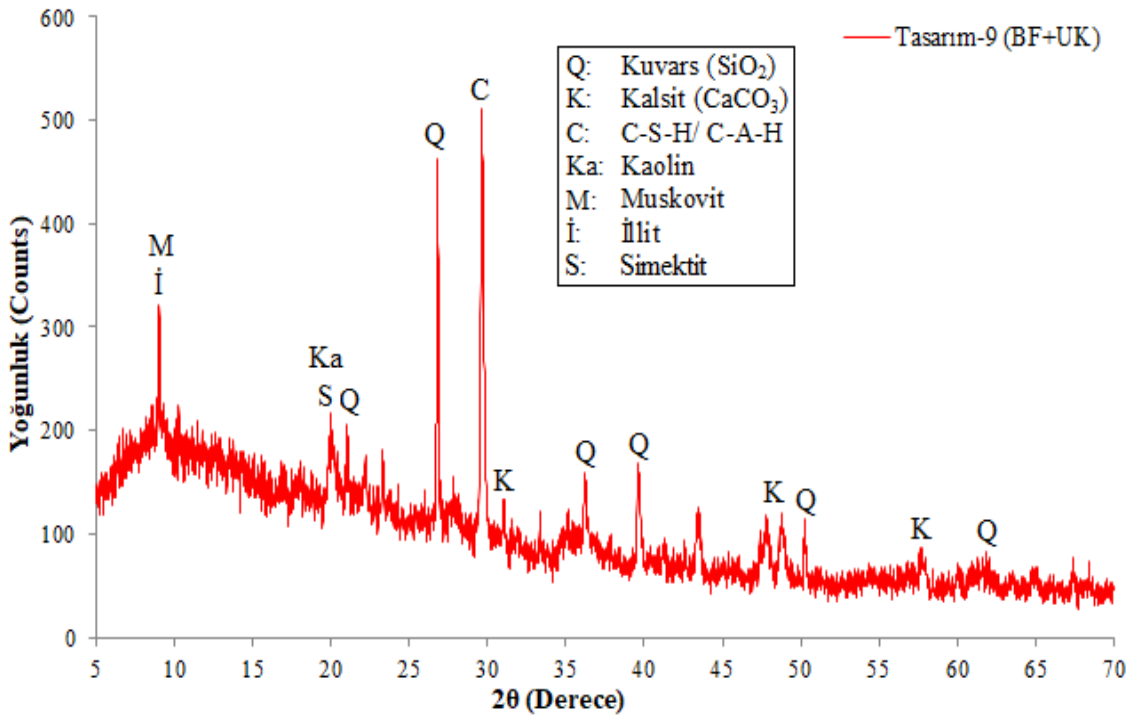
Şekil 4.42. Katkısız zemine ait XRD kırınım grafiği



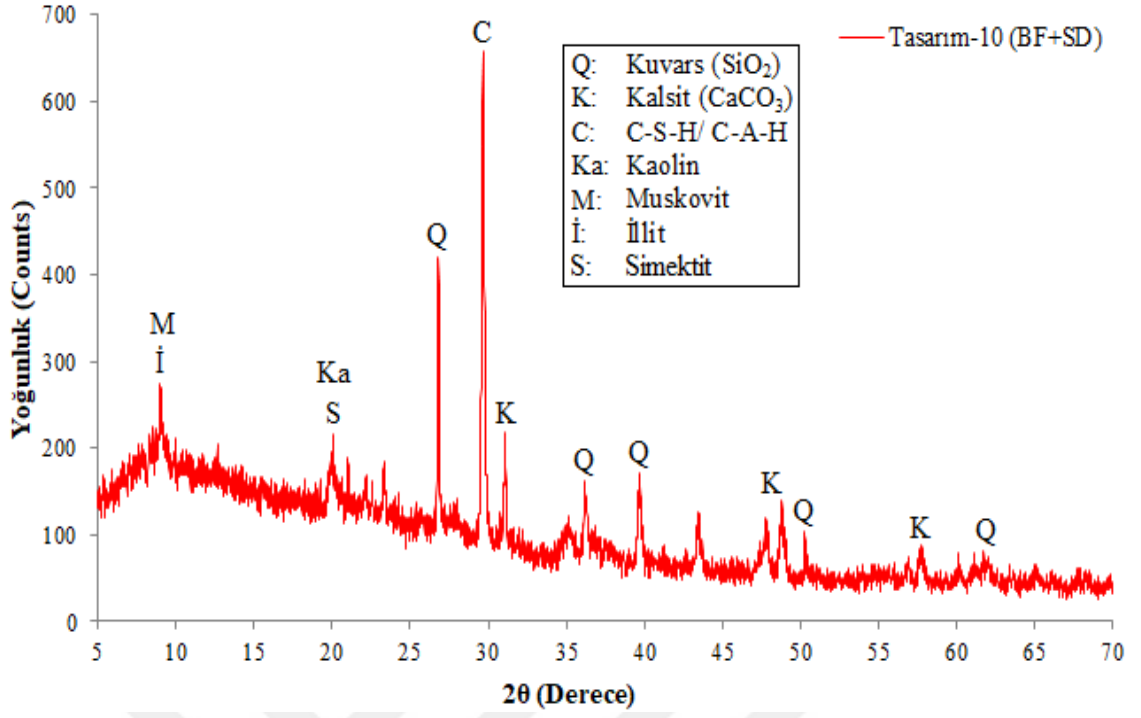
Şekil 4.43. Tasarım 7 (%3 kireç+%1 bazalt fiber (12 mm)) XRD kırınım grafiği



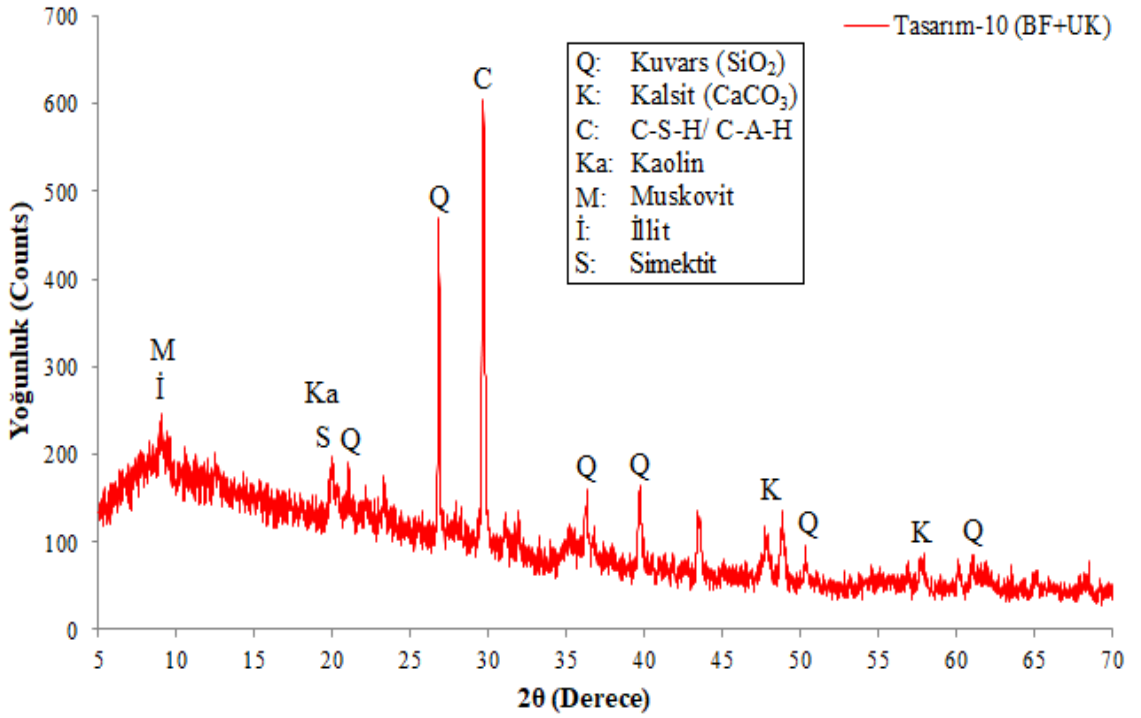
Şekil 4.44. Tasarım 9 (%3 kireç+%15 silis dumanı) XRD kırınım grafiği



Şekil 4.45. Tasarım 9 (%3 kireç+%15 uçucu kül) XRD kırınım grafiği



Şekil 4.46. Tasarım 10 (%3 kireç+%0.5 bazalt fiber (18 mm)+%10 silis dumani) XRD kırınım grafiği



Şekil 4.47. Tasarım 10 (%3 kireç+%0.5 bazalt fiber (18 mm)+%10 uçucu kül) XRD kırınım grafiği

4.10.1. SEM (Scanning Electron Microscope) analizi sonuçları

Taguchi tasarım tablolarına göre yapılan dayanım deneylerinden sonra katkısız zemin, en yüksek dayanımı veren karışım (Tasarım 10) ve bazalt fiber, kireç, uçucu kül ve silis dumanı katkılarının etkisinin belirlenebileceği daha düşük dayanımlı karışımlar (Tasarım 7 ve Tasarım 9) üzerinde SEM analizleri yapılmıştır.

SEM analizi sırasında numuneler üzerindeki şarj etkisini (görüntü alma sırasında parlama olması) azaltmak için zemin numuneleri altın malzeme ile kaplanmıştır. Su ve organik kirlenmeyi azaltmak için zemin örneği vakumda kurutulmuştur. İstenilen miktarda numune karbon bandın üzerine yapıştırılarak altın malzeme ile yüzeyi kaplanmıştır.

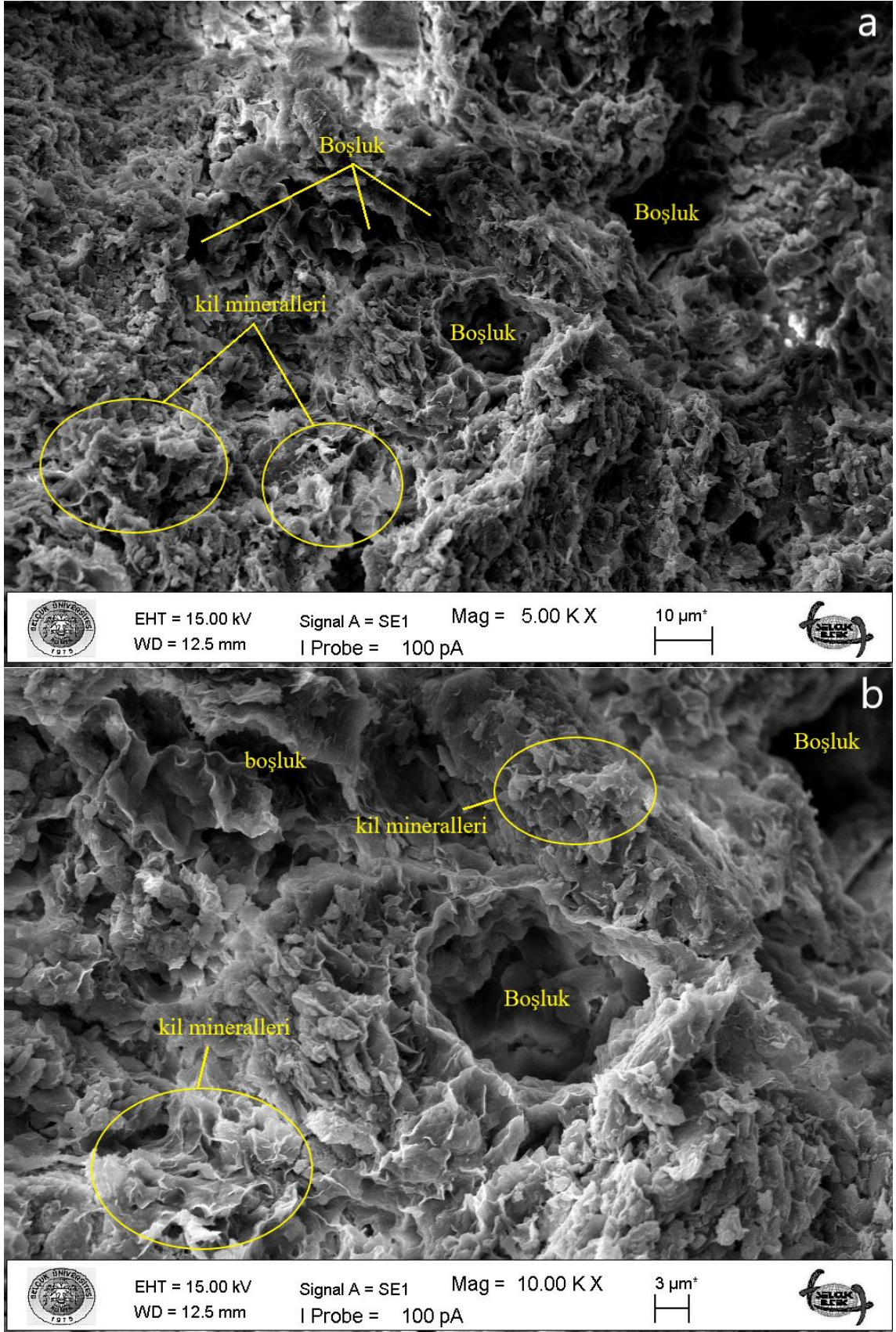
Mikroyapı analizi, farklı katkı maddelerinin eklenmesi nedeniyle karışımların mukavemet ve deformasyon özelliklerini analiz etmeye yardımcı olabilir. Belirtilen numunelerden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.48-4.54'te verilmiştir.

Elde edilen SEM görüntülerine göre katkısız zemin numunesi daha dağınık ve boşluklu bir yapı göstermektedir (Şekil 4.48). Kireçle ikame edildiğinde, killer, puzolanik reaksiyon ve katyon değişim reaksiyonları nedeniyle daha tutarlı bir kütle oluşturmak için bir araya gelir. Kil zemin, %3 kireç katkısı ile daha granüler bir yapı sergilemiştir (Şekil 4.49). Kireç katkısına ek olarak uçucu kül ve silis dumanı ilavesi partiküllerin yeniden organize olmasına ve yapısal bütünlüğün artmasına neden olmuştur (Şekil 4.50-4.53). Bu bulgu, uçucu kül veya silis dumanı eklenmesinin neden olduğu artan silika konsantrasyonu ve ardından parçacıkların hızlı topaklaşması nedeniyle parçacık boyutunun artmasıyla açıklanabilir. Uçucu kül/silis dumanı ilavesi ile kil taneciklerinin dizilimi dağılmış bir yapıdan topaklaşmış bir yapıya dönüşmüş ve bazı yeni çimentomsu bileşikler oluşmuştur. Parçacıkların yüzeyleri genellikle hidrasyon jelleri ile kaplanmıştır ve zemin gözenekleri büyük ölçüde doldurulmuştur. Bu durum; kireç+uçucu kül ya da kireç+silis dumanı katkılarının ek çimentolaşma fazı oluşumu üzerindeki yararlı etkilerinden kaynaklanmaktadır.

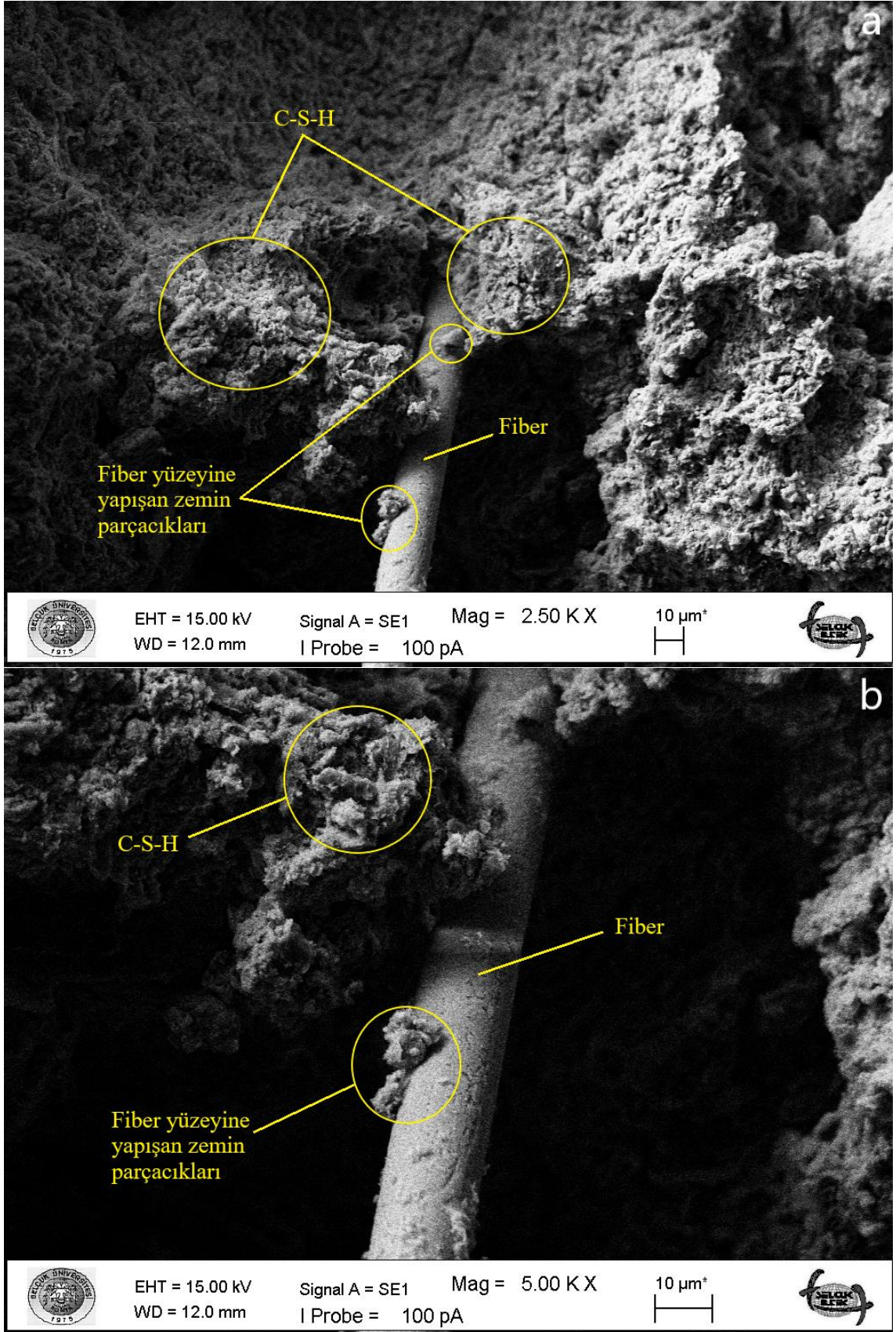
Zemin özelliklerindeki bu iyileşme, silikat jelin ani büyümesine ve temel olarak kirecin Ca^{+2} 'si ve silis dumanının SiO_2 'sinden oluşan yeni çimentomsu bileşiğin (yani CSH) sentezinin artmasından kaynaklanmaktadır (Wang ve ark., 2013; Goodarzi ve Salimi, 2015; Türköz ve ark., 2018). Bu, zemin boşluklarını hızla doldurabilir ve kil parçacıklarını büyük ölçüde birbirine kenetleyebilir. Bu yüzden katkı içeriğindeki artışa bağlı olarak zeminin geoteknik özellikleri gelişmiştir. Artan tane boyutu ve agregasyon

boyutlarına bağılı olarak kireç+silis dumanı ve kireç+uçucu kül katkılı karışımlarda, dayanım deneylerinde %3 kireç katkılı karışımlara göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Ancak uçucu kül ve silis miktarı fazla ise zemin partikülleri ile tam olarak reaksiyona giremez. Uçucu kül ve silis dumanı, yapışmaz bir malzeme olduğundan, zemin numunelerinin içinde kalan reaksiyona girmemiş uçucu kül ve silis dumanı tanecikleri, zemin partikülleri arasındaki bağlanma kuvvetini azaltır. Bu yüzden belli bir optimum değerden sonra uçucu kül ve silis dumanı ilavesi dayanımda azalmaya neden olmuştur (Ma ve ark., 2018).

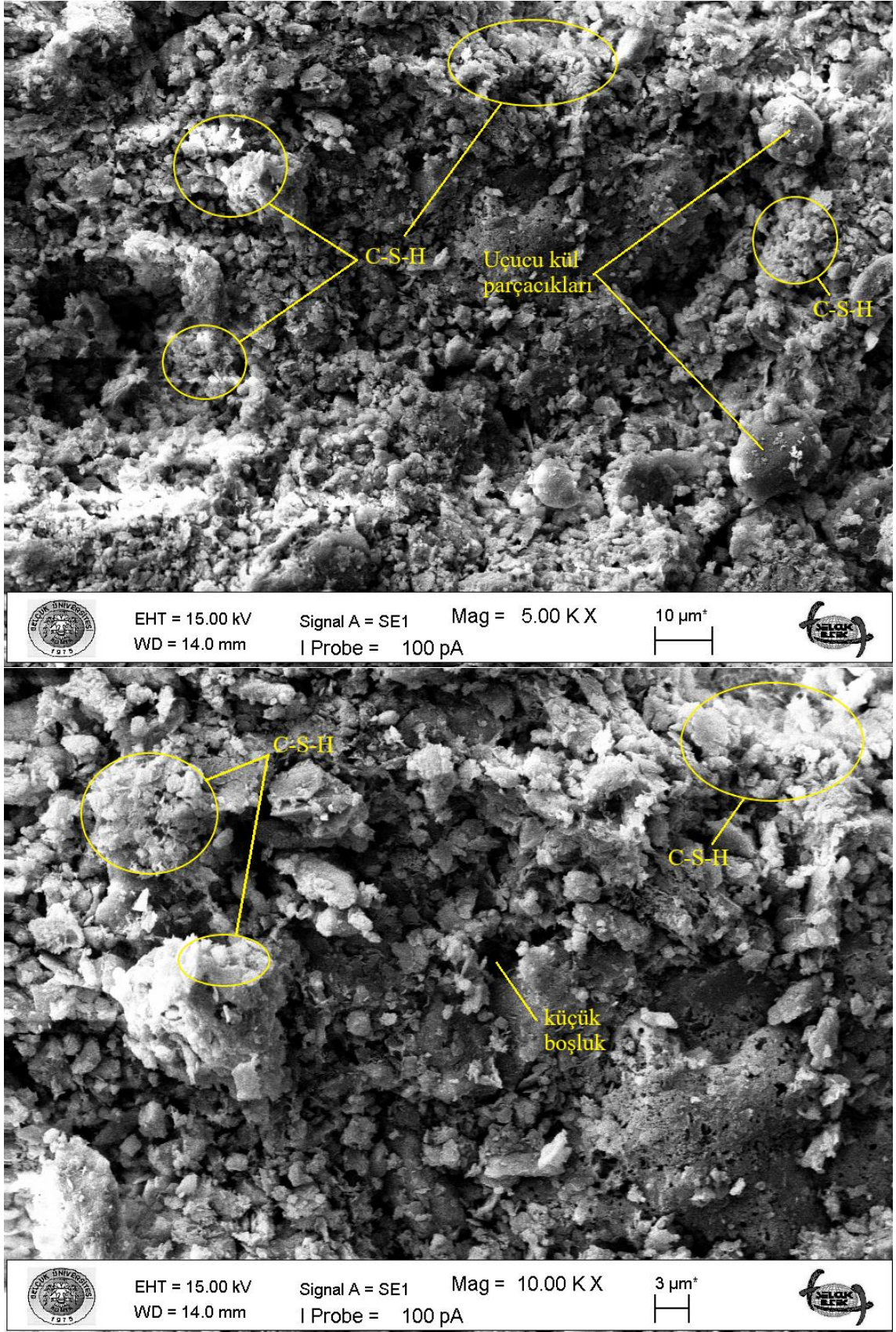
Amina ve Rani (2017) ve Ma ve ark. (2018), kireçle birlikte silis dumanı kullanılmasının uzun süreli kürlerde, çimentolu bileşiklerin (C-S-H) oluştuğunu ve silis dumanı ilavesi ile zemin özelliklerinin iyileşerek daha az gözenekli bir yapı oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu tür bir agregasyon ve gözeneklilikte iyileşme, zeminin mühendislik özelliklerinde istenen iyileşmeyi sağlamaktadır.



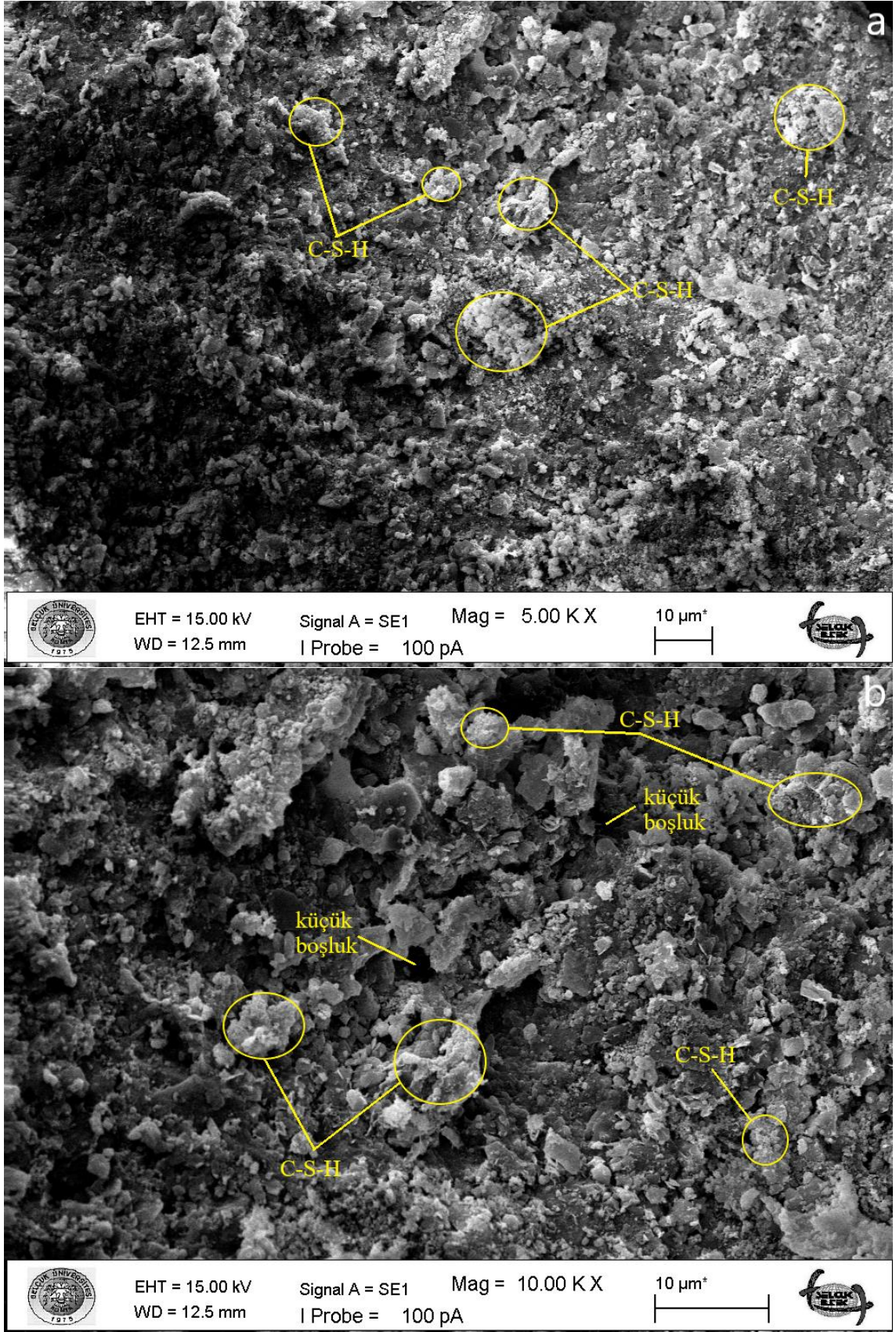
Şekil 4.48. Katkısız zemine ait SEM görüntüsü a.5000 X büyütme b. 10000 X büyütme



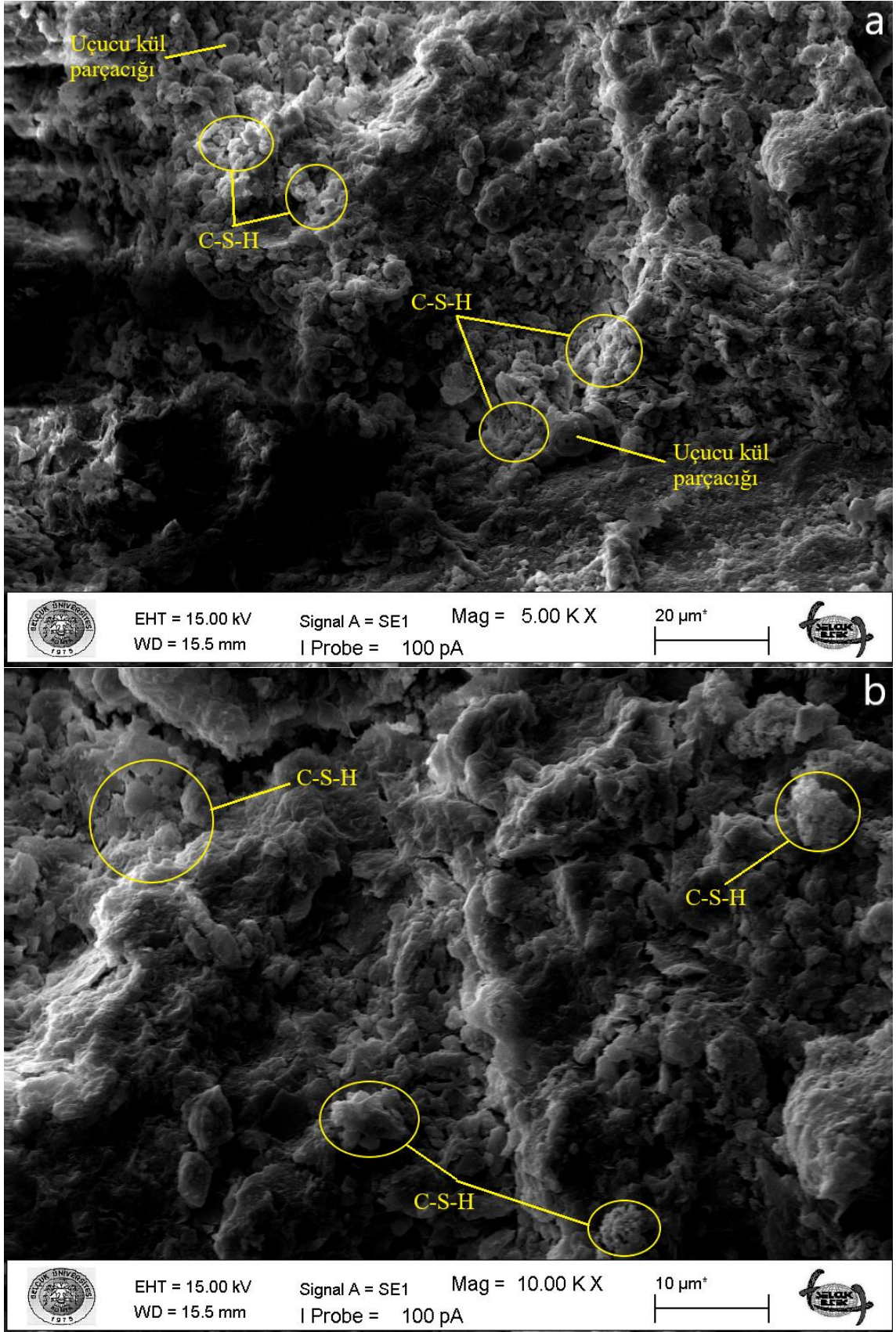
Şekil 4.49. Tasarım-7 (%3K+%1BF katkılı) SEM görüntüsü a.2500 X büyütme b. 5000 X büyütme



Şekil 4.50. Tasarım-9 (%3K+%15UK katkılı) SEM görüntüsü a.5000 X büyütme b. 10000 X büyütme



Şekil 4.51. Tasarım-9 (%3K+%15SD katkı) SEM görüntüsü a.5000 X büyütme b. 10000 X büyütme



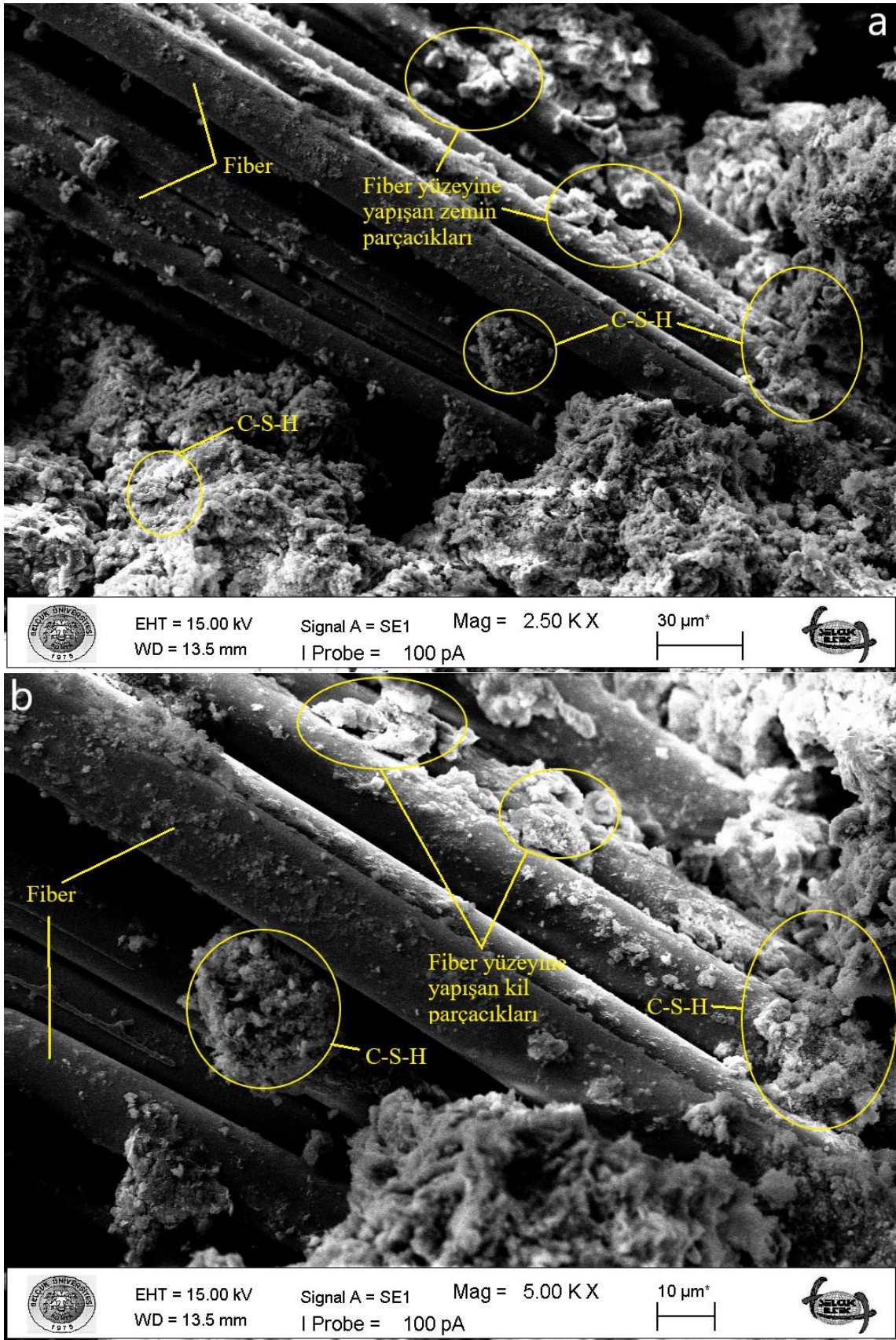
Şekil 4.52. Tasarım-10 (%3K+%0.5BF+10UK katkılı) SEM görüntüsü a.5000 X büyütme b. 10000 X büyütme

Fiber takviyeli numunelerin mekanik özellikleri, özellikle mikroskobik ölçeklerde, doğal zeminden daha karmaşıktır. SEM analizlerinde görüldüğü gibi, bazı zemin parçacıkları lif yüzeyine yapışarak lif ile zemin parçacıkları arasındaki etkileşimi geliştirmiştir. SEM fotoğrafları, zemin parçacıklarının bazalt fiber yüzeyine yapıştığını ve bunun da zemin parçacıkları ile bazalt fiber arasındaki kuvvete ve sürtünmeye katkıda bulunduğunu göstermektedir (Şekil 4.53).

Tang ve ark. (2007), liflerin temas alanı ve yüzey pürüzlülüğünün, lif-kil ara yüzünün mikromekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Liflerin yüzeyine yapışan zemin parçacıklarının ara yüzey bağını iyileştirdiğini belirtmiştir.

Şekil 4.53'te gösterilen alanda, kil partikülleri ve bazalt lifleri arasında iyi bir bağın göstergesi olan bazalt lif yüzeyinin birçok kil minerali tarafından tutulduğu gözlenmektedir. Bazalt lifleri ve kil parçacıkları arasındaki sıkıca güçlendirilmiş etkileşim nedeniyle, bunlar dış yükleri ortaklaşa taşıyabilirler ve kil parçacıkları ile bazalt lifleri arasındaki ara yüzey kuvveti, katkılı deney numunelerine uygulanan dış yüke direnmek için kademeli olarak artar (Ma ve ark., 2018; Wang ve ark., 2020). Bu durumda, fiberin yüzey pürüzlülüğü; fiber ve kil partikülleri arasındaki ara yüzey sürtünmesinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar ve dış yüklemeye karşı direnci artırır. Ayrıca, puzolanik reaksiyonlar sonucunda oluşan ana hidrasyon ürünleri (C-S-H jelleri), ince taneleri çimentolayarak ve gözenek boşluklarını doldurarak kil parçacıklarının kendi arasındaki fiziksel bağlanma mukavemetini arttırmaktadır. Hidrasyon ürünleri aynı zamanda bazalt fiberin çimentolu zemin matrisi ile daha iyi yapışmasını sağlamaktadır.

Kil zemine kireç eklendiğinde, kalsiyum iyonları kil mineralleri ile reaksiyona girerek silikat jel oluşturur. C-S-H'ların boşluk doldurma etkisi aynı zamanda elyaf ve kompozit malzeme arasındaki bağı güçlendirerek daha kararlı bir arayüz oluşumuna yol açmıştır. Şekil 4.53'te lif üzerinde çimentomsu ürünlerin varlığı belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Bu durum takviye sisteminin etkinliğini göstermiştir. Benzer sonuçlar, Boz ve ark. (2018) tarafından bildirilmiştir.



Şekil 4.53. Tasarım-10 (%3K+%0.5BF+%10SD katkılı) SEM görüntüsü a.2500 X büyütme b. 5000 X büyütme

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışmasında, bazalt fiber ve uçucu kül/silis dumanı ile güçlendirilmiş problemlili kil zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirmek amacıyla deneysel ve istatistiksel bir çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber yüzdesi, kür süresi ve uçucu kül/silis dumanı (2 ayrı tasarım deney tablosu) yüzdesinin değişken olduğu 4 parametrelili ve 4 seviyelili Taguchi L_{16} ortogonal dizin tablosu kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Puzolanik etkileşimi arttırmak amacıyla her tasarıma %3 kireç ilavesi yapılmıştır. Çalışmada varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kompaksiyon deneylerine göre kireç, silis dumanı ve uçucu kül ilavesiyle birlikte optimum su içeriği (w_{opt}) değeri artarken maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değeri azalmaktadır. Katkısız zemine, %3 kireç ilavesiyle optimum su muhtevası (w_{opt}) %28.4'ten %32'ye çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk değeri (ρ_{kmax}) ise 1.446 g/cm³'ten 1.394 g/cm³'e düşmüştür. Ayrıca %3 kireç oranı sabit tutularak uçucu kül ve silis dumanı miktarının artmasıyla optimum su muhtevası (w_{opt}) artarken, maksimum kuru yoğunluk değeri (ρ_{kmax}) düşüş göstermiştir.

Bazalt fiber içeriğinin kompaksiyon parametreleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan katkıları; zeminin serbest basınç, yarmada çekme dayanımlarında önemli ölçüde artış meydana getirmiştir. Bazalt fiber+silis dumanı katkılı karışımlarda, katkısız zemine göre serbest basınç dayanımı 9.76, yarmada çekme dayanımı 9.16 katına çıkmıştır. Bazalt fiber+uçucu kül katkılı karışımlarda ise katkısız zemine göre serbest basınç dayanımı 8.69, yarmada çekme dayanımı ise 8.15 katına çıkmıştır.

Bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve uçucu kül içeriği arttıkça süneklilik artarken silis dumanı ilavesi sünekliliğin azalmasına neden olmuştur.

Islak CBR deney sonuçları değerlendirildiğinde bazalt fiber+silis dumanı (BF+SD) katkılı karışımlarda katkısız zeminin CBR dayanımı %2.56'dan %39.86'ya çıkmıştır. Bazalt fiber+uçucu kül (BF+UK) katkılı karışımlarda ise katkısız zeminin CBR dayanımı %2.56'dan %36.19'a çıkmıştır. Ayrıca zeminin şişme özelliğini kaybettiği belirlenmiştir.

Dayanım deneylerinde, ‘en yüksek en iyi’ durumu seçilerek yapılan S/N analizlerinde aynı optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Buna göre; serbest basınç, yarmada çekme ve CBR deneyleri için optimum parametre seviyeleri bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1, uçucu kül ve silis dumanı içeriği için %10 olarak belirlenmiştir. Bu seviyelerden sonra dayanım azalmıştır. Kür süresi arttıkça dayanımlarda artış meydana gelmiştir.

Serbest basınç, yarmada çekme ve CBR dayanımı üzerindeki en etkili parametreler sırasıyla kür süresi, silis dumanı/uçucu kül içeriği ve bazalt fiber içeriği olarak belirlenmiştir. Bazalt fiber uzunluğunun, dayanım üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir ($p>0.05$).

Silis dumanı katkılı karışımların serbest basınç, yarmada çekme ve CBR dayanımları, uçucu kül katkılı karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır.

Permeabilite deney sonuçları incelendiğinde; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve kür süresi arttıkça permeabilite katsayısı artmıştır. Silis dumanı ve uçucu kül içeriğinin artması ile geçirimsizlik azalmıştır. Analiz sonuçlarına göre permeabilite katsayısı üzerinde en etkili parametre bazalt fiber içeriği, daha sonra bazalt fiber uzunluğu ve silis dumanı/uçucu kül içeriği olarak bulunmuştur. Kür süresi az da olsa permeabilite katsayısını etkilemektedir.

Uçucu kül ve silis dumanı çok ince taneli olduğu için zemin içerisindeki boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasına neden olmuştur. Bazalt fiberin varlığı suyun lifler ve zemin arayüzü boyunca akmasına izin verdiği için fiber içeriğindeki artışa bağlı olarak zeminin geçirimsizliği artmıştır.

Çalışmada uygulanan zemin stabilizasyonunu arazi temsiliyeti açısından değerlendirmek için model şerit temel ile katkısız ve katkılı (optimum parametre seviyeleri kullanılarak) numuneler üzerinde yapılan büyük ölçekli deneylerde, katkısız zeminin taşıma gücünde önemli ölçüde artış meydana gelmiştir. Bazalt fiber+silis dumanı katkılı karışımda, katkısız zeminin taşıma gücü 136.99 kPa’dan 1174.82 kPa’a, bazalt fiber+uçucu kül katkılı karışımda ise 965.42 kPa’a yükselmiştir. Katkılı numunelerde, katkısız zemine göre daha net kayma yüzeyleri oluşmuştur. Ayrıca taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgindir. Katkısız zeminde elde edilen taşıma gücü, bazalt fiber+silis dumanı katkılı karışımda 8.58 katına, bazalt fiber+uçucu katkılı karışımda ise 7.05 katına çıkmıştır.

Kuruma çatlağı deneyinde, kullanılan katkıların katkısız zemin numunelerinin yüzeyindeki kuruma çatlaklarının gelişimini azalttığı görülmüştür. Doğal killi zemin

numunesinin yüzeyinde geniş ve derin çatlaklar meydana gelirken katkılı zemin numunelerinde daha küçük ve yüzeysel çatlaklar oluşmuştur. Kireç-uçucu kül ve kireç-silis dumanı ile zemin arasında kısa (katyon değişimi ve flokülasyon) ve uzun vadeli (puzolanik reaksiyon) reaksiyonlar zeminin şişme ve büzülme özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu durum, zeminin hacimsel büzülme gerinimini azaltmıştır.

Katkısız zemine %3 kireç ilave edildiğinde çatlak alanı azalmıştır. Kireç ile beraber uçucu kül ya da silis dumanı eklendiğinde çatlakların azalmaya devam ettiği belirlenmiştir.

Bazalt fiber takviyeli zeminde ince, kısa ve düzensiz çatlaklar meydana gelmiştir. Liflerin varlığı, çatlak genişliğini ve çatlakların yüzeysel alanını azaltmıştır.

Katkısız ve katkılı deney numuneleri ıslatma-kurutma çevrimine tabi tutularak ıslatma-kurutma çevriminin çatlak alanına etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde karışımların büyük çoğunluğunda çevrim sayısı arttıkça çatlak alanları artmıştır. Bazı tasarımlarda ise 2.çevrimde çatlak alanı artarken 3.çevrimde çatlak alanı azalmıştır.

İlk kurutma döngüsünden sonra, zemindeki çatlak desenleri, sonraki ıslatma-kurutma döngüsünde yüksek oranda tekrarlanmıştır. İlk kurutma döngüsü sonrasında zeminde geri dönüşü olmayan yapısal hasarlar meydana gelmiş ve çatlayan bölgelerdeki kohezyon kuvvetleri azalmıştır. Bu yüzden ıslatma-kurutma döngüleri sonundaki çatlak desenlerinin birbirine benzediği görülmüştür.

SEM görüntülerine göre katkısız zemin numunesi katkılı karışımlara göre daha dağınık ve boşluklu bir yapı göstermiştir. Kireç, kireç+uçucu kül ve kireç+silis dumanı katkılı numunelerde puzolanik reaksiyon ve katyon değişim reaksiyonları nedeniyle daha kompakt ve yoğun bir matris yapısı gözlenmiştir. Parçacıkların yüzeyleri genellikle hidrasyon jelleri ile kaplanmıştır ve zemin gözenekleri büyük ölçüde dolmuştur. Elde edilen görüntüler dayanım deneylerinin sonuçlarını doğrulayıcı yönde olmuştur.

SEM görüntüleri, zemin parçacıklarının bazalt fiber yüzeyine yapıştığını ve bunun da zemin parçacıkları ile bazalt fiber arasındaki kuvvete ve sürtünmeye katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu durum, bazalt fiber ilavesi ile zeminin taşıma gücü ve sünekliğinde meydana gelen artışı açıklamaktadır.

XRD analizleri; kireç, uçucu kül ve silis dumanı katkılarının puzolanik reaksiyonu nedeniyle kalsiyum silika/alümina hidrat (C-S-H) mineralinin oluşumunu göstermiştir. Ayrıca analiz sonuçları numunelerde kuvarsın (quartz (SiO_2)) varlığını

göstermiştir. Kuvars yoğunluğu, katkı maddelerinin puzolanik reaksiyonuna bağlı olarak azalmaktadır.

Kalsiyum silika/alümina hidrat mineralinin yoğunluğu, dayanımın en yüksek olduğu tasarımlarda daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, kür süresindeki artış ve dayanım için optimum parametre seviyelerinin kullanımı ile kür sırasında hidratlı jel oluşumunun daha yüksek konsantrasyonlarda gerçekleştiğini göstermiştir.

Silis dumanı katkılı numunelerde uçucu kül katkılı numunelere göre C-S-H mineral yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum, dayanım deneylerinde silis dumanı katkılı karışımların daha yüksek dayanıma sahip olmasının nedenini açıklamaktadır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada, çevre dostu ve biyolojik olarak inaktif bir malzeme olan bazalt fiberin, kireç ve silis dumanı/uçucu kül ile kombinasyonu, geoteknik mühendisliğinde şişen killi zeminlerin iyileştirilmesi için etkili bir yöntem olarak önerilmiştir.

Killi zeminlerin; kireç, silis dumanı ve uçucu kül katkı maddeleri ile modifikasyonu, sıkıştırılmış killi astar ve örtü sistemlerinde kuruma çatlaklarının gelişimini azaltmak için geçerli ve yenilikçi bir yöntem olabilir. Bu bulgular, diğer tüm faktörlerin eşit olması durumunda, katkılı zemin karışımlarından yapılan astar ve örtü sistemlerinin, doğal killi zeminden inşa edilen astar ve örtü sistemlerinden daha az çatladığını ortaya koymaktadır.

Ayrıca bu çalışma, atık depolama sahalarında geçirimsizlik sağlamak amacıyla kullanılan kil örtülerin yüzey çatlamasında büyük önem taşıyan kuruma çatlağına direnç göstermede ve bunları azaltmada rastgele lif eklemenin etkinliğini açıkça göstermektedir. Bu nedenle, rastgele lif ilavesinin, killi zeminlerin hacimsel değişimlere direnmek için çekme dayanımını artırmanın pratik ve etkili bir yöntemi olduğu sonucuna varılabilir.

KAYNAKLAR

- Abd El-Aziz, M. A., Abo-Hashema, M. A. and El-Shourbagy, M., 2004, The effect of lime-silica fume stabilizer on engineering properties of clayey subgrade, *Engineering Conference*, Mansoura University, 96, 1-18.
- Abdi, M. R., Parsapazhouh, A. and Arjmand, M., 2008, Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays, *International Journal of Civil Engineering*, 6(4), 284-292.
- Adil, G., Kevern, J. T. and Mann, D., 2020, Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 247, 118453.
- Aksoy, H. S., 2010, Silis dumanının killi bir zemin üzerindeki stabilizasyon etkisi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 9(1), 74-78.
- Al-Azzawi, A. A., Daud, K. A. and Sattar, M. A. A., 2012, Effect of silica fume addition on the behavior of silty-clayey soils, *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 16(1), 92-105.
- Alkaya, D., 2009, Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 61-72.
- Al-Rawas, A. A., Hago, A. W. and Al-Sarmi, H., 2005, Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman, *Building and Environment*, 40(5), 681-687.
- Alrubaye, A. J., Hasan, M. and Fattah, M. Y., 2017, Stabilization of soft kaolin clay with silica fume and lime, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1), 90-96.
- Altınsoy Bozkurt, R., 2015, Katkı malzemelerinin killerdeki kuruma çatlakları davranışına etkisi, Yüksek Lisans tezi, *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray.
- Amina, S. M. and Rani, V., 2017, Control of dispersivity of soil using lime and silica fume, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5(5), 386-391.
- Andavan, S. and Pagadala, V. K., 2020, Experimental study on addition of lime and fly ash for the soil stabilization, *Materials Today: Proceedings*, 22, 1065-1069.
- Aral, M., 2006, Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım, Doktora tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Aravalli, A. B., Hulagabali, A. M., Solanki, C. H. and Dodagoudar, G. R., 2017, Enhancement of index and engineering properties of expansive soil using chopped basalt fibers, *Indian Geotechnical Conference (GeoNEs)*, IIT Guwahati, India, 1-4.
- Archibong, G. A., Sunday, E. U., Akudike, J. C., Okeke, O. C. and Amadi, C., 2020, A review of the principles and methods of soil stabilization, *International Journal of Advanced Academic Research Sciences*, 6(3), 2488-9849.
- As, M., 2019, Evaluation of effect of sulfate on class c fly ash and lime stabilized expansive soil, Doktora tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- Ashok Kumar, T., Thyagaraj, T. and Robinson, R. G., 2022, Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2022, 1-12.
- ASTM C618-19, 2019, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C496-96, 2017, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1140-17, 2017, Standard test methods for determining the amount of material finer than 75- μm (No. 200) sieve in soils by washing, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1883-07, 2009, Standard test methods for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166/D2166M-16, 2016, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487-11, 2011, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D422-63, 2002, Standard test method for particle-size analysis of soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318-17e1, 2017, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4546-21, 2003, Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5084-10, 2010, Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698-12e2, 2012, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Ayothiraman, R. and Singh, A., 2017, Improvement of soil properties by basalt fibre reinforcement, *DFI-PFSF 2017 Conference*, Melbourne, 404-412.
- Barton, C. D. and Karathanasis, A. D., 2002, Clay minerals, *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York, USA, 187–192.
- Basma, A. A., Al-Homoud, A. S., Malkawi, A. I. H. and Al-Bashabsheh, M. A., 1996, Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays, *Applied Clay Science*, 11(2-4), 211-227.
- Bell, F. G., 1996, Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42(4), 223-237.

- Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M. ve Savaş, H., 2020, Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 910-919.
- Boz, A., Sezer, A., Özdemir, T., Hızal, G. E. and Azdeniz Dolmacı, Ö., 2018, Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers, *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-14.
- Cai, Y., Shi, B., Ng, C. W. and Tang, C. S., 2006, Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil, *Engineering geology*, 87(3-4), 230-240.
- Cao, Z., Ma, Q. and Wang, H., 2019, Effect of basalt fiber addition on static-dynamic mechanical behaviors and microstructure of stabilized soil compositing cement and fly Ash, *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-20.
- Castleman, K. R., 1996, Digital image processing. *Prentice Hall Press*.
- Chaduvula, U., Viswanadham, B. V. S. and Kodikara, J., 2017, A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay, *Applied Clay Science*, 142, 163-172.
- Chaduvula, U., Manogaran, I., Viswanadham, B. V. S. and Kodikara, J., 2018, Some studies on desiccation cracking of fiber-reinforced expansive clay subjected to drying and wetting cycles, *Panam Unsaturated Soils*, 2017, 361-370.
- Charlie, W. A., Osman, M. A. and Ali, E. M., 1984, Construction on expansive soils in Sudan, *Journal of Construction Engineering and Management*, 110(3), 359-374.
- Chaudhary, S.K., 2003, Utilization of fly ash for the stabilization of swelling soil, *2nd International Conference-Fly Ash Disposal and Utilization*, New Delhi, Vol.2, 51-57.
- Chen, F.H., 1988, Foundation on expansive soil, *Elsevier Science*, New York.
- Cherian, C. and Arnepalli, D. N., 2015, A critical appraisal of the role of clay mineralogy in lime stabilization, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1, 1-20.
- Coduto, D.P., 2001, Foundation design: principles and practices, 2nd Edition, *Prentice Hall*, U.S.A.
- Costa, S., Kodikara, J. K. and Shannon, B., 2013, Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments, *Géotechnique*, 63(1), 18-29.
- Cömert, A. T., 2005, Uçucu küllerin zemin stabilizasyonuna etkileri, Doktora tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Çimen, Ö. ve Keleş, E., 2020, Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kireç katkılarının etkisi, *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 80-90.
- Dahale, P. P., Nagarnaik, P. B. and Gajbhiye, A. Y., 2017, Engineering behavior of remolded expansive soil with lime and fly ash, *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 10581-10585.

- Das, B. M., 2008, Advanced soil mechanics, 3rd edition, *Taylor and Francis Group*, London and Newyork.
- Deepak, M. S., Rohini, S., Harini, B. S. and Ananthi, G. B. G., 2021, Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil, *Materials today: proceedings*, 37, 2014-2018.
- Dehghanian, K., 2021, Killi zeminlerin özelliklerinin uçucu kül kullanarak iyileştirilmesi, *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 66-72.
- Demiröz, A., 1996, Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanımı, Yüksek Lisans semineri, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Demiröz, A., 2008, Geogrid donatılı kum üzerine oturan sürekli temellerde taşıma gücünü etkileyen tasarım faktörlerinin deneysel olarak araştırılması, Doktora tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Di Ludovico, M., Prota, A. and Manfredi, G., 2010, Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement, *Journal of Composites for Construction*, 14(5), 541-552.
- Dipova, N., 2017, Determining the grain size distribution of granular soils using image analysis, *Acta Geotechnica Slovenica*, 14(1), 29-37.
- Dipova, N., 2018, Görüntü analizi yöntemlerinin geoteknik mühendisliğinde kullanımı, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 33-44.
- Erhardt-Ferron, A., 2000, Theory and applications of digital image processing, *University of Applied Sciences Offenburg*, 1(2), 3.
- Foster, M. D., 1954, The relation between composition and swelling in clays, *Clays and Clay Minerals*, 3, 205-220.
- Gao, L., Hu, G., Xu, N., Fu, J., Xiang, C. and Yang, C., 2015, Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-9.
- Geçkil, T., Sarıcı, T. ve Yıldırım, E. S., 2019, Kireç katkısı ile kil bir zeminin dayanımının iyileştirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 171-180.
- Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H. and Nejad, F. M., 2021, The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer, *Construction and Building Materials*, 285, 122918.
- Goehring, L., Conroy, R., Akhter, A., Clegg, W. J. and Routh, A. F., 2010, Evolution of mud-crack patterns during repeated drying cycles, *Soft Matter*, 6(15), 3562-3567.
- Goodarzi, A. R., Goodarzi, S. H. and Akbari, H. R., 2015, Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 39(C2), 333-350.
- Goodarzi, A. R. and Salimi, M., 2015, Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag, *Applied Clay Science*, 108, 61-69.

- Goodarzi, A. R., Akbari, H. R. and Salimi, M., 2016, Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume, *Applied Clay Science*, 132, 675-684.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S. ve Demir, İ., 2009, Uçucu kül bölüm II: kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 33-42.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H., 2005, Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları, *Türkiye*, 19, 419-423.
- Gümölcine, T., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z. ve Ünal, A., 2013, İzotalik polyester matrisli sürekli e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 104-115.
- Gündüz, Z. ve Dağdeviren, U., 2009, Zeminlerin kıvam limitlerinin ölçümünde ortamdaki kumların değerlendirmeye etkileri, *Teknik Dergi*, 20(97), 4701-4715.
- Hasan, M., Alrubaye, A. J., Seng, L. K., Ideris, M. S. and Marto, A., 2016, Undrained shear strength of soft clay mixed with different percentages of lime and silica fume, *Jurnal Teknologi*, 78(8-5).
- He, L. P., Yu, J. Y., Hu, Q. J., Cai, Q. J., Qu, M. F. and He, T. J., 2020, Study on crack propagation and shear behavior of weak muddy intercalations submitted to wetting-drying cycles, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 4873-4889.
- High, C., Seliem, H. M., El-Safty, A. and Rizkalla, S. H., 2015, Use of basalt fibers for concrete structures, *Construction and Building Materials*, 96, 37-46.
- Huang, R. and Lizhou, W. U., 2007, Stability analysis of unsaturated expansive soil slope, *Earth Science Frontiers*, 14(6), 129-133.
- Hussain, E. K. and Al-Ameen, J., 2021, Surface soil enhancement for MSW lining by silica fume, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 1895(1), 012046.
- Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, Engineering properties of expansive clays, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121(1), 641-663.
- İndiramma, P., Sudharani, C. and Needhidasan, S., 2020, Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—an experimental study, *Materials Today: Proceedings*, 22, 694-700.
- İslam, M. S., Elahi, T. E., Shahriar, A. R. and Mumtaz, N., 2020, Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction, *Construction and Building Materials*, 255, 119392.
- İslam, M. S., İslam, T. and Khatun, N., 2021, Permeability alteration of low plastic clay and poorly graded sand using lime and fly ash, *Indian Geotechnical Journal*, 1-12.
- İsfahani, H. S. and Azhari, A., 2021, Investigating the effect of basalt fiber additive on the performance of clay barriers for radioactive waste disposals, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 2461-2472.
- Jayalath, C. P. G., Gallage, C. and Miguntanna, N. S., 2016, Factors affecting the swelling pressure measured by the oedometer method, *GEOMATE Journal*, 11(24), 2397-2402.

- Jiang, H., Cai, Y. and Liu, J., 2010, Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(12), 1315-1322.
- Jones, R. C. and Bish, D. L., 1991, Quantitative X-ray diffraction analysis of soils: Rietveld full-pattern mineral concentrations and pattern curve fitting vs. P sorption of bauxite soils, *Clay Minerals Society 28th Annual Meeting*, 773, 84.
- Kabay, N., 2014, Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber, *Construction and Building Materials*, 50, 95-101.
- Kalkan, E. and Akbulut, S., 2004, The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners, *Engineering Geology*, 73(1-2), 145-156.
- Kalkan, E., 2009, Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils, *Applied Clay Science*, 43(3-4), 296-302.
- Kate, J. M., 2005, Strength and volume change behavior of expansive soils treated with fly ash, *Innovations in Grouting and Soil Improvement*, 2005, 1-15.
- Kenan, A., 2018, Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direnci parametrelerine etkisi, Yüksek Lisans tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Khorram, N. And Rajabi, A. M., 2020, Effect of natural basalt fibers on mechanical properties of clay Rey town, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(10), 2471-2486.
- King, M. F. L., Srinivasan, V., and Purushothaman, T., 2014, Basalt fiber: an ancient material for innovative and modern application, *Middle-East Journal of Scientific Research*, 22 (2), 308-312, ISSN: 1990-9233.
- Knappett, J. A. and Craig, R. F., 2012, Craig's soil mechanics, 8th Edition, *Spon Press*, London and Newyork.
- Kou, H., Ma, Q. and Han, S., 2022, Experimental study on the mechanical behaviors of loess reinforced with randomly distributed basalt fiber, *Applied Sciences*, 12(19), 9744.
- Küçükosmanoğlu, M., 2019, Bazalt fiberin zemin iyileştirilmesinde kullanımı, Yüksek lisans tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Ashok Kumar, T., Thyagaraj, T. and Robinson, R. G., 2022, Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 1-12.
- Lekha, B. M., Sarang, G. and Shankar, A. R., 2015, Effect of electrolyte lignin and fly ash in stabilizing black cotton soil, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2, 87-101.
- Li, J. H. and Zhang, L. M., 2011, Study of desiccation crack initiation and development at ground surface, *Engineering Geology*, 123(4), 347-358.
- Ma, Q. Y., Cao, Z. M. and Yuan, P., 2018, Experimental research on microstructure and physical-mechanical properties of expansive soil stabilized with fly ash, sand, and basalt fiber, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018
- Ma, Q. and Gao, C., 2018, Effect of basalt fiber on the dynamic mechanical properties of cement-soil in SHPB test, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018185.

- Malikzada, A., Pulat, H. F. and Develioğlu, İ., 2021, Effect of fly ash on compaction behavior of alluvial soil, *5th International Students Science Congress Proceedings Book*, 126-135.
- Mallela, J., Quintus, H. V. and Smith, K., 2004, Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design, *The National Lime Association*, 200(1), 1-40.
- Mitchell, J.K., 1993, Fundamentals of soil behavior, 2nd Edition, *John Wiley&Sons*, U.S.A.
- Moayyeri, N., Oulapour, M. and Haghighi, A., 2019, Study of geotechnical properties of a gypsiferous soil treated with lime and silica fume, *Geomechanics and Engineering*, 17(2), 195-206.
- Mukhtar, M. and Kumar, E. A., 2022, To study the behavior of compacted soil using basalt fibers, *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)* ISSN: 2350-0557, 9(2), 360-366.
- Murray, H. H., 2007, Applied clay mineralogy: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays, 1st edition, *Elsevier*, Amsterdam.
- Ndepete, C. P. ve Sert, S., 2017, Bazalt fiberle güçlendirilmiş doymuş silt zeminin mekanik davranışının deneysel incelemesi, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 341-348.
- Nelson, J.D. and Miller, D.J., 1992, Expansive soils, problems and practice in foundation and pavement engineering, 1st edition, *John Wiley and Sons Inc.*, U.S.A.
- Nelson, J.D., Chao, K.C., Overton D.D. and Nelson, E.J., 2015, Foundation engineering for expansive soils, *John Wiley&Sons*, U.S.A.
- Nezhad, M. G., Tabarsa, A. and Latifi, N., 2021, Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3), 626-642.
- Ocakbaşı, P., 2019, Bazalt fiber katkısının killi zeminlerin drenajsız kayma direncine etkisi, Yüksek Lisans tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Okumuş, F., 2015, Taşyünü üretim tesisinde hata türü ve etkileri analizi ile Taguchi deney tasarımının birlikte uygulanması, Yüksek Lisans tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- 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.
- Oweis, I. S. and Khera, R. P., 1998, Geotechnology of waste management, 2nd Edition, *PWS Publishing Company*, Boston.
- Özdemir, T., Polat, G. E., Azdeniz, Ö., Boz, A. ve Sezer, A., 2016, Bazalt fiber ve kireç ile güçlendirilmiş kil zeminin dayanım özellikleri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği*, 16, 1025-1034.
- Öztürk, O. and Türkoğlu, M., 2022, Effect of silica fume on the undrained strength parameters of dispersive soils, *Turkish Journal of Engineering*, 6(4), 293-299.

- Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thornburn, T.H., 1974, Foundation engineering. *John Wiley&Sons*, U.S.A.
- Phanikumar, B. R., 2009, Effect of lime and fly ash on swell, consolidation and shear strength characteristics of expansive clays: a comparative study, *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4(2), 175-181.
- Phanikumar, B. R. and Ramanjaneya Raju, E., 2020, Silica fume stabilization of an expansive clay subgrade and the effect of silica fume-stabilised soil cushion on its CBR, *Geomechanics and Geoengineering*, 15(1), 64-77.
- Prusinski, J. R. and Bhattacharja, S., 1999, Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils, *Transportation Research Record*, 1652(1), 215-227.
- Qiang, X., Hai-jun, L., Zhen-ze, L. and Lei, L., 2014, Cracking, water permeability and deformation of compacted clay liners improved by straw fiber, *Engineering Geology*, 178, 82-90.
- Rao, S., Samant, P., Kadampatta, A. and Shenoy, R., 2013, An overview of Taguchi method: evolution, concept and interdisciplinary applications, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(10), 621-626.
- Savaş, H., Türköz, M., Seyrek, E. and Ünver, E., 2018, Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils, *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-13.
- Sami, A., Rashid, I. and Bilal, M., 2018 Improvement in behaviour of expansive soil by adding lime and silica fume, *NED University Journal of Research*, 15(3).
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L. and García, B., 2011, Stabilization of expansive soils for use in construction, *Applied Clay Science*, 51(3), 348-352.
- Seed, H. B., Woodward Jr, R. J. and Lundgren, R., 1962, Prediction of swelling potential for compacted clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(3), 53-87.
- Sharma, N. K., Swain, S. K. and Sahoo, U. C., 2012, Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 1197-1205.
- Sharma, R. K. and Hymavathi, J., 2016, Effect of fly ash, construction demolition waste and lime on geotechnical characteristics of a clayey soil: a comparative study, *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-11.
- Singha, K., 2012, A short review on basalt fiber, *International Journal of Textile Science*, 1(4), 19-28.
- Singh, P., Dash, H. K. and Samantaray, S., 2020, Effect of silica fume on engineering properties of expansive soil, *Materials Today: Proceedings*, 33, 5035-5040.
- Singh, S. P., Tiwari, A. and Rout, S., 2015, Quantification of surface cracks and surface shrinkage using image analysis technique, *50th Indian Geotechnical Conference*, Pune, Maharashtra, India.
- Skempton, A. W., 1953, The colloidal activity of clays, *Selected papers on soil mechanics*, 1, 57-61.

- Sridhar, R., 2017, A review on performance of coir fiber reinforced sand, *International Journal of Engineering and Technology*, 9(1), 249-256.
- Swink, M. and Sokolinsky, M., 2002, Continuous filament basalt fiber shows promise in high-temperature applications, *International Fiber Journal*, 17(4), 52-56.
- Taguchi, G. J. Q. R., 1987, Taguchi techniques for quality engineering, *Quality Resources*, New York.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y., 2007, Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- Tang, C. S., Wang, D. Y., Cui, Y. J., Shi, B. and Li, J., 2016, Tensile strength of fiber-reinforced soil, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016031.
- Tang, C. S., Cui, Y. J., Shi, B., Tang, A. M. and Liu, C., 2011, Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles, *Geoderma*, 166(1), 111-118.
- Tang, C. S., Cheng, Q., Leng, T., Shi, B., Zeng, H. and Inyang, H. I., 2020, Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil, *Catena*, 194, 104721.
- Taşcı, G., 2011, Problemlili kil zeminin geoteknik özelliklerine silis dumanı ve kireç katkısının etkisi, Yüksek Lisans tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Terzi, S., 2021, Killi zeminlerin kayma direncine bazalt fiberin katkısı, Yüksek lisans tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Tian, B. G., Cheng, Q., Tang, C. S., Zeng, H., Xu, J. J. and Shi, B., 2022, Effects of compaction state on desiccation cracking behaviour of a clayey soil subjected to wetting-drying cycles, *Engineering Geology*, 302, 106650.
- Tiwari, N., Satyam, N. and Patva, J., 2020, Engineering characteristics and performance of polypropylene fibre and silica fume treated expansive soil subgrade, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(2), 18.
- Turan, C., Javadi, A. A. and Vinai, R., 2022, Effects of class C and class F fly ash on mechanical and microstructural behavior of clay soil-a comparative study, *Materials*, 15(5), 1845.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., 2009, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *TÇMB*, Ankara.
- Türköz, M., Savaş, H. and Tasci, G., 2018, The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil showing both swelling and dispersive features, *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-14.
- Türköz, M., Umu, S. U. and Öztürk, O., 2021, Effect of silica fume as a waste material for sustainable environment on the stabilization and dynamic behavior of dispersive soil, *Sustainability*, 13(8), 4321.
- Uzuner, B. A., 2000, Temel mühendisliğine giriş, *Derya Kitabevi*, Trabzon.

- Uzuner, B. A., 2013, Temel zemin mekaniği, *Derya Kitabevi*, Trabzon
- Ünlü Özsoy, M., 2016, Killi zeminlerde ortaya çıkan kuruma çatlaklarının atık lastik parçaları kullanılarak engellenmesinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray.
- Vakili, A. H., Davoodi, S., Arab, A. and Selamat, M. R., 2015, Use of artificial neural network in predicting permeability of dispersive clay treated with lime and pozzolan, *Ijsres*, 3(1), 23-37.
- Van der Merwe, D. H., 1964, The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils, *Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese*, 1964(6), 103-107.
- Van Olphen, H., 1977, An introduction to clay colloid chemistry, 2nd Edition, *Wiley Interscience*, New York, U.S.A.
- Verruijt, A., 2001, Soil mechanics, 1st edition, *Delf University of Technology*, Hollanda.
- Yang, H., Zhang, D., Rao, Z., Yang, S. and Chen, L., 2018, Research on shear strength and permeability characteristics of basalt fiber-reinforced tailings, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 170(2), 022048.
- Yeğinoğlu, M. A., 1993, Silis dumanının betonda katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, *Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, 18-19.
- Yesiller, N., Miller, C. J., Inci, G. and Yaldo, K., 2000, Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils, *Engineering Geology*, 57(1-2), 105-121.
- Yıldız, M. ve Soğancı, A. S., 2012, Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays, *Scientia Iranica*, 19(4), 1013-1017.
- Yılmaz, A., 2008, Ferrokrom ve Silikoferrokrom cürufları ile silis dumanının yol üstyapısında kullanımının incelenmesi, Doktora tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Yong, R. N. and Warkentin, B.P., 1975, Soil properties and behavior, 1st edition, *Elsevier Scientific Publishing Company*, Amsterdam.
- Yong, R. N., Nakano, M. and Pusch, R., 2012, Environmental soil properties and behavior, 1st edition, *CRC Press*.
- Zapata, C. E., Houston, S. L., Houston, W. N. and Dye, H., 2006, Expansion index and its relationship with other index properties, *Unsaturated Soils 2006*, 2133-2137.
- Zha, F., Liu, S., Du, Y. and Cui, K., 2008, Behavior of expansive soils stabilized with fly ash, *Natural hazards*, 47, 509-523.
- Zhao, N., Wu, H. and Huang, Z., 2021, Strength behavior of red clay reinforced by basalt chopped fiber, *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-9.
- Zhuang, X. S. and Yu, X. Y., 2015, Experimental study on strength characteristics of lime-basalt fiber reinforced expansive soil, *Applied Mechanics and Materials*, 744, 495-498.

- Zumrawi, M. M. and Hamza, O. S., 2014, Improving the characteristics of expansive subgrade soils using lime and fly ash, *International Journal of Science and Research*, 3(12), 1124-1129.
- Wang, C., Zhang, Z. Y., Liu, Y. and Fan, S. M., 2017, Geometric and fractal analysis of dynamic cracking patterns subjected to wetting-drying cycles, *Soil and Tillage Research*, 170, 1-13.
- Wang, D., Abriak, N. E. and Zentar, R., 2013, Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash, *Engineering Geology*, 166, 90-99.
- Wang, D., Wang, H., Larsson, S., Benzerzour, M., Maherzi, W. and Amar, M., 2020, Effect of basalt fiber inclusion on the mechanical properties and microstructure of cement-solidified kaolinite, *Construction and Building Materials*, 241, 118085.
- Wang, S., Chen, F., Xue, Q. and Zhang, P., 2020, Splitting tensile strength of cement soil reinforced with basalt fibers, *Materials*, 13(14), 3110.
- Wang, Y., Guo, P., Li, X., Lin, H., Liu, Y. and Yuan, H., 2019, Behavior of fiber-reinforced and lime-stabilized clayey soil in triaxial tests, *Applied Sciences*, 9(5), 900.
- Wang, Y., Sun, S., Ye, W., Li, F. and Ding, H., 2018, Laboratory test of expansive soil improved by lime-basalt fiber reinforcement, *Transportation Research Congress 2016: Innovations in Transportation Research Infrastructure*, Reston, American Society of Civil Engineers, 120-126.
- Wu, Z., Khayat, K. H. and Shi, C., 2019, Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content, *Cement and Concrete Research*, 123, 105786.
- Xie, J., Zhang, Z., Lu, Z. and Sun, M., 2018, Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 184, 752-764.
- Xie, Y., Costa, S., Zhou, L. and Kandra, H., 2020, Mitigation of desiccation cracks in clay using fibre and enzyme, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 4429-4440.
- Xu, J., Wu, Z., Chen, H., Shao, L., Zhou, X. and Wang, S., 2021, Study on strength behavior of basalt fiber-reinforced loess by digital image technology (DIT) and scanning electron microscope (SEM), *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(11), 11319-11338.
- Xu, Y., Yao, X., Zhuang, Y., Duan, W., Zhang, X., Hu, S. and Dong, X., 2021, The effects of fiber inclusion on the evolution of desiccation cracking in soil-cement, *Materials*, 14(17), 4974.

EKLER**EK-1: Zemin-Bentonit Karışımının İndeks Özellikleri****Çizelge Ek 1.1. Islak elek analizi deney verileri**

ELEK ANALİZİ DENEYİ						
Elek açıklığı (mm)	Elek Ağırlığı (g)	Elek+zemin (g)	Kalan	Top. Kalan	Geçen	%Geçen
11.2	478.90	478.90	0.00	0.00	204.54	100.00
4.75	455.42	457.18	1.76	1.76	202.78	99.14
2	413.34	418.89	5.55	7.31	197.23	96.43
1.18	383.46	385.21	1.75	9.06	195.48	95.57
0.425	335.43	337.91	2.48	11.54	193.00	94.36
0.15	306.12	313.56	7.44	18.98	185.56	90.72
0.075	292.75	296.99	4.24	23.22	181.32	88.65
Tava	266.74					
Toplam Zemin (g)	204.54					

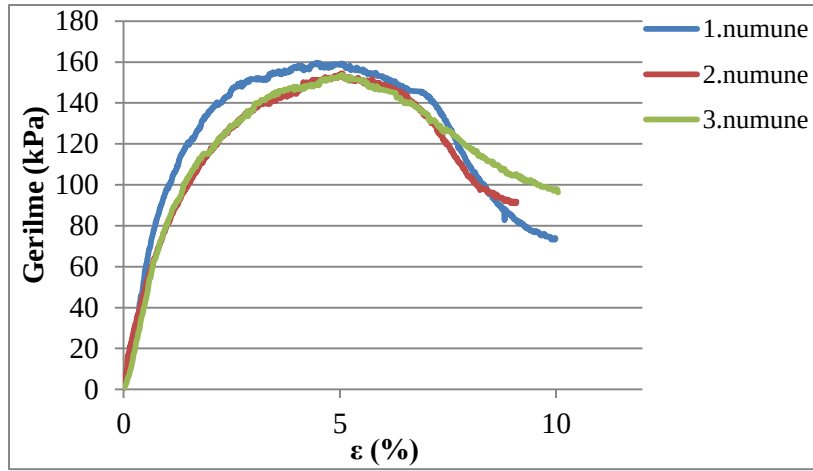
Çizelge Ek 1.2. Hidrometre deney verileri

HİDROMETRE DENEYİ											
t	t (sn)	R _h	Sıcaklık	C _t	C _d	C _m	R	H _e	D	%P'	%P
30 sn	30	32.5	18.0	-0.4	4	0.4	28.5	90.0	0.058563	0.973888	86.33291
1 dk	60	31.9	18.0	-0.4	4	0.4	27.9	92.4	0.041959	0.953385	84.51538
2 dk	120	31.4	18.0	-0.4	4	0.4	27.4	94.4	0.029989	0.936299	83.00076
4 dk	240	30.9	18.0	-0.4	4	0.4	26.9	96.4	0.021429	0.919213	81.48615
8 dk	480	30.3	18.0	-0.4	4	0.4	26.3	98.8	0.01534	0.898711	79.66862
15 dk	900	29.7	18.0	-0.4	4	0.4	25.7	101.2	0.011338	0.878208	77.85108
30 dk	1800	28.6	18.0	-0.4	4	0.4	24.6	105.6	0.008189	0.840619	74.51893
60 dk	3600	27.2	18.0	-0.4	4	0.4	23.2	111.2	0.005942	0.792779	70.27802
2 saat	7200	25.9	18.0	-0.4	4	0.4	21.9	116.4	0.004299	0.748356	66.34003
4 saat	14400	23.7	19.0	-0.21	4	0.4	19.9	125.2	0.003114	0.679671	60.25128
8 saat	28800	21.4	19.0	-0.21	4	0.4	17.6	134.4	0.002281	0.601077	53.28407
24 saat	86400	18.6	18.0	-0.4	4	0.4	14.6	145.6	0.001388	0.498904	44.22668

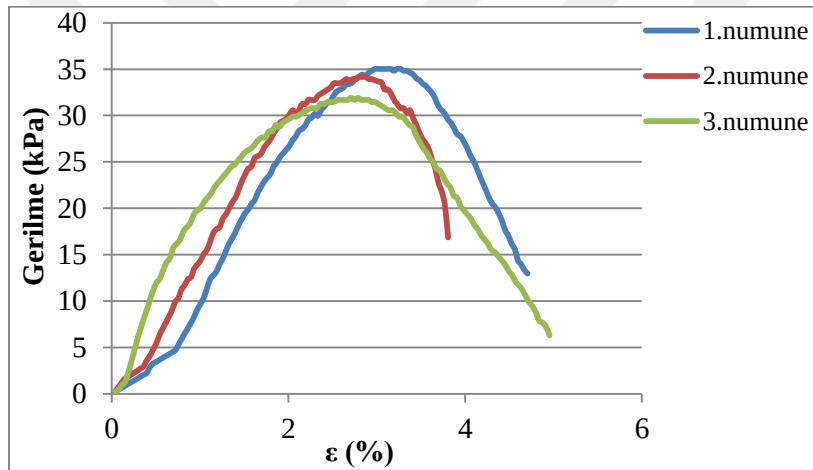
Çizelge Ek 1.3. Atterberg (kıvam) limitleri deney verileri

Casagrande Likit Limit Deneyi					Plastik Limit Deneyi		
	1.Deney	2.Deney	3.Deney	4.Deney		1.Deney	2.Deney
Vuruş Sayısı (N)	44	32	23	16	Kap Ağırlığı (g)	14.08	16.78
Kap Ağırlığı (g)	87.38	82.96	66.2	83	Kap+Yaş Zemin (g)	20.53	22.9
Kap+Yaş Zemin (g)	103.48	101.02	84.35	100.32	Kap+Kuru Zemin (g)	18.98	21.5
Kap+Kuru Zemin (g)	95.41	91.87	75.05	91.35	Yaş Zemin (g)	6.45	6.12
Yaş Zemin (g)	16.1	18.06	18.15	17.32	Kuru Zemin (g)	4.9	4.72
Kuru Zemin (g)	8.03	8.91	8.85	8.35	Su muhtevası (%)	31.63	29.66
Su muhtevası (%)	100.50	102.69	105.08	107.43	Ortalama	30.6	

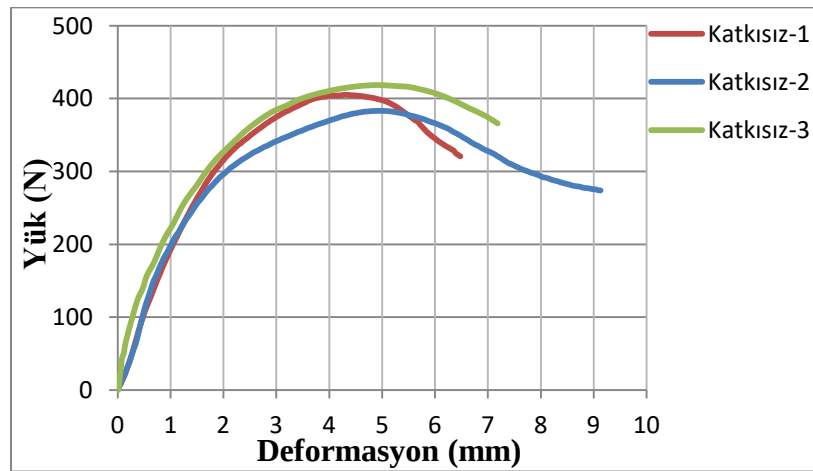
EK-2: Zemin-Bentonit Karışımının Serbest Basınç, Yarmada Çekme ve CBR grafikleri



Şekil Ek 2.1. Zemin-Bentonit (Katkısız Zemin) karışımına ait serbest basınç deney grafiği



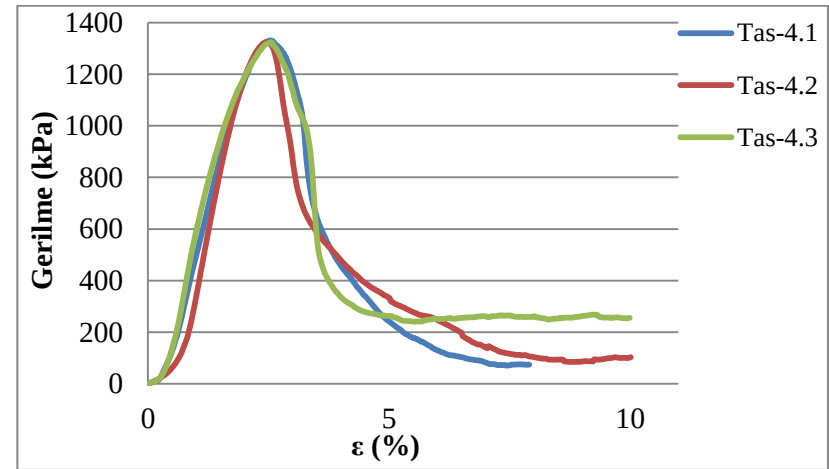
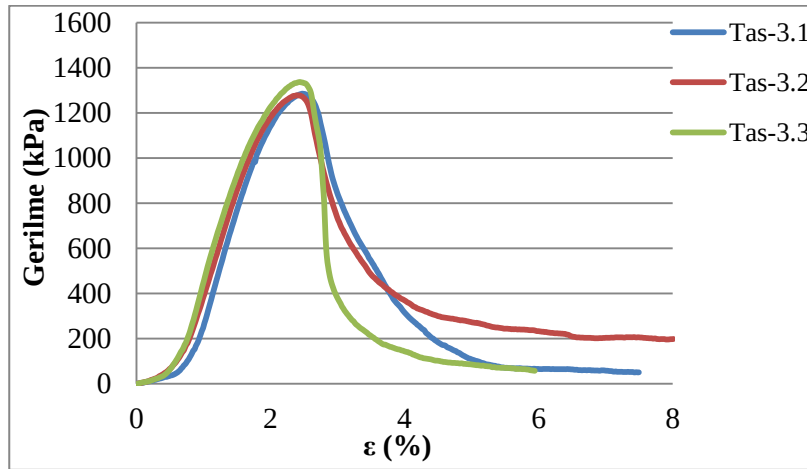
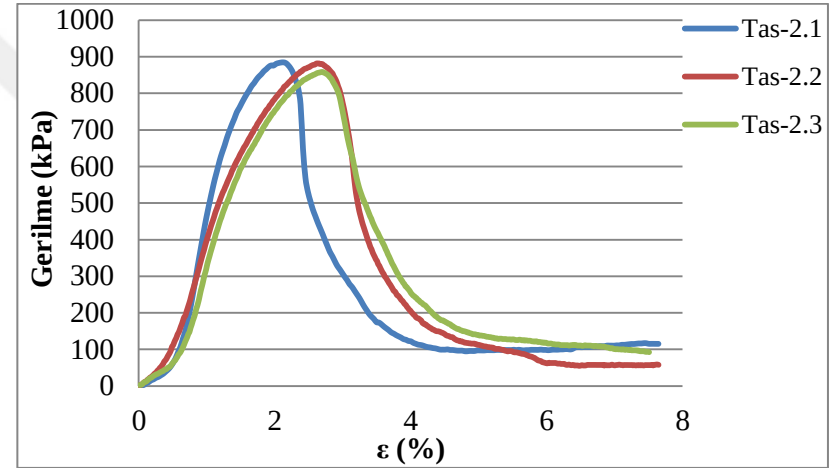
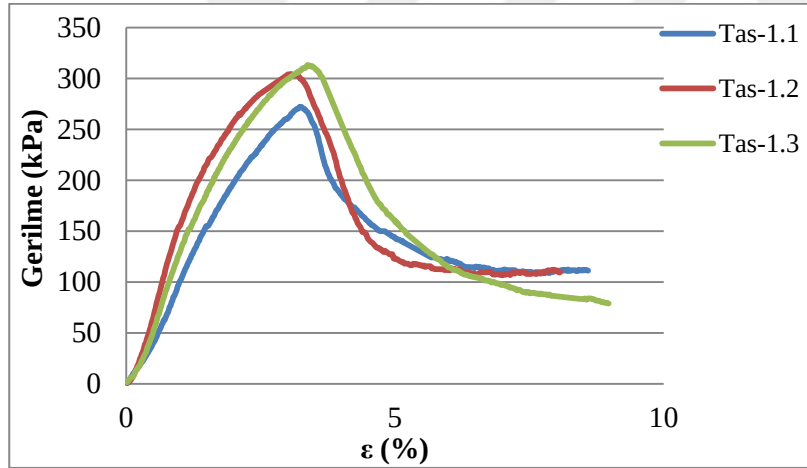
Şekil Ek 2.1. Zemin-Bentonit (Katkısız Zemin) karışımına ait yarmada çekme deney grafiği

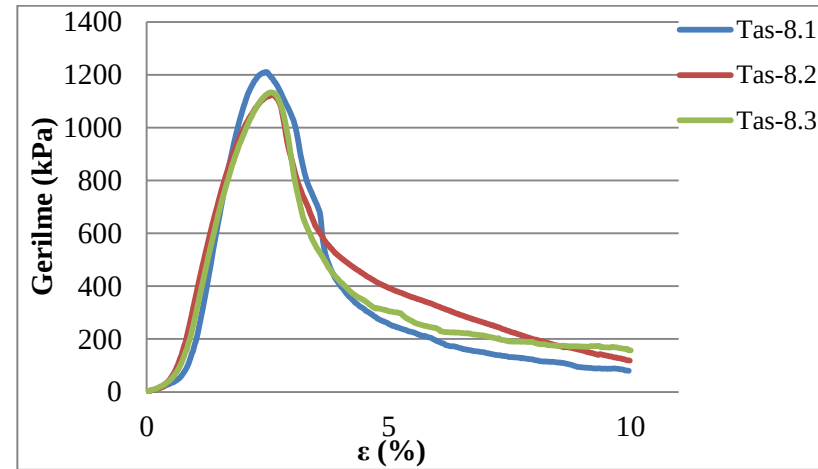
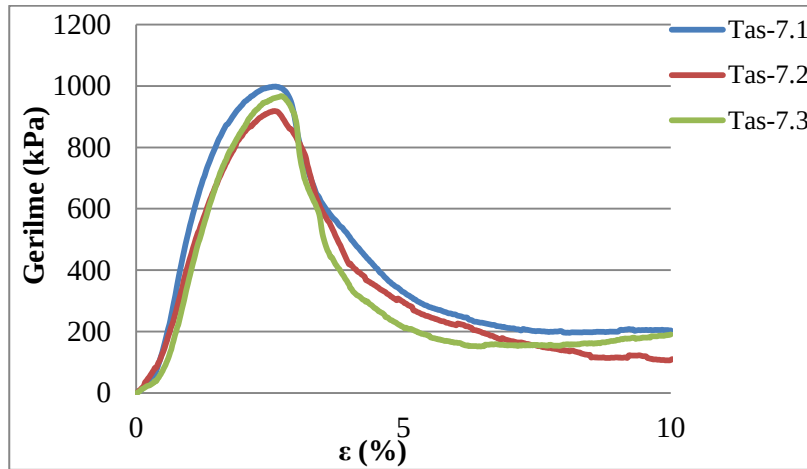
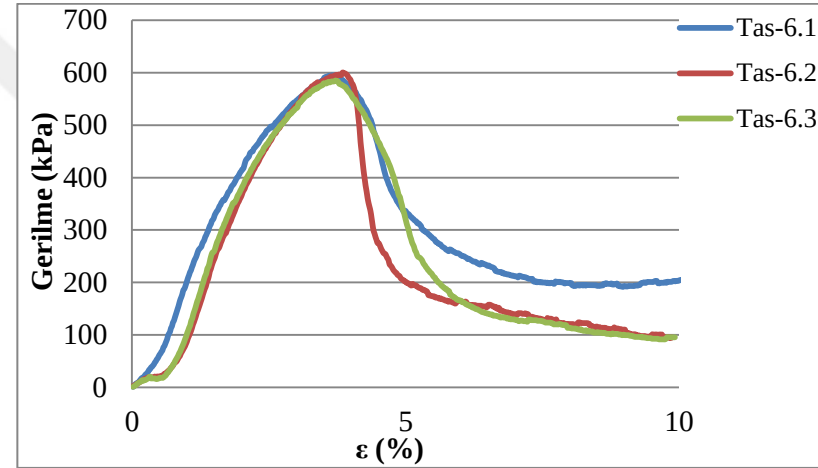
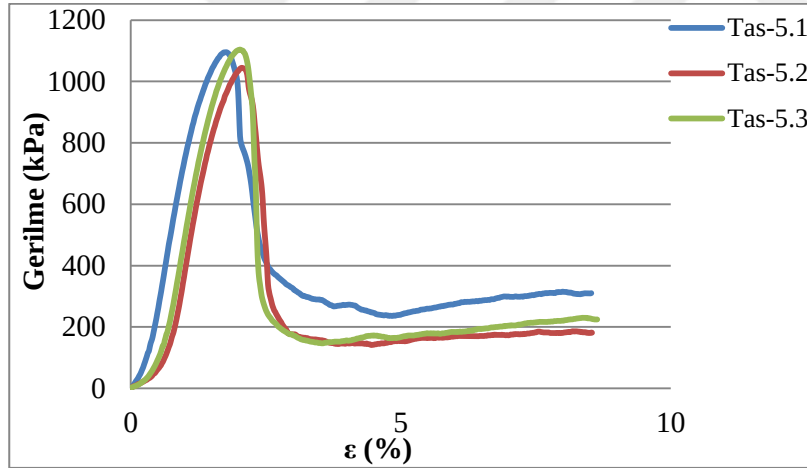


Şekil Ek 2.1. Zemin-Bentonit (Katkısız Zemin) karışımına ait CBR deney grafiği

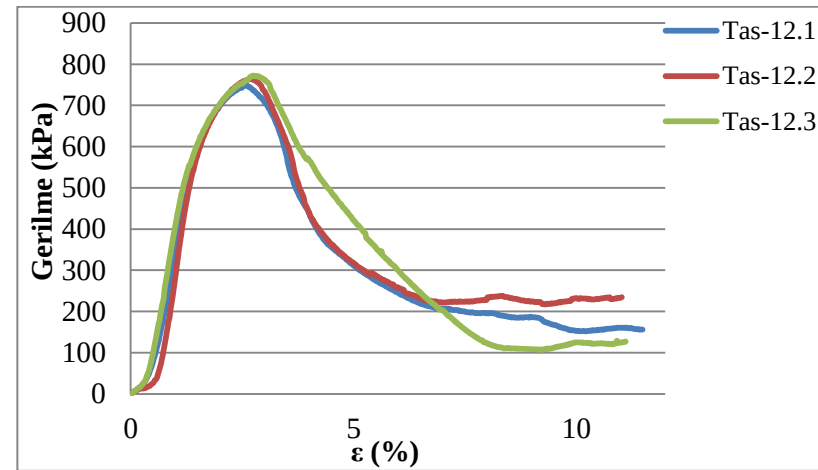
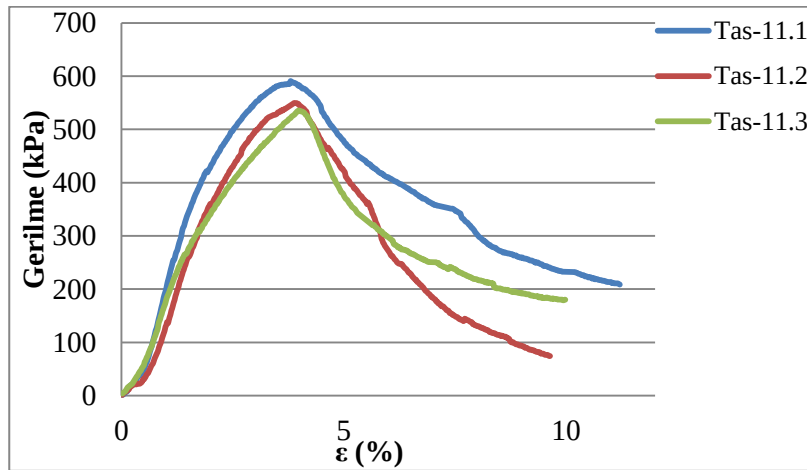
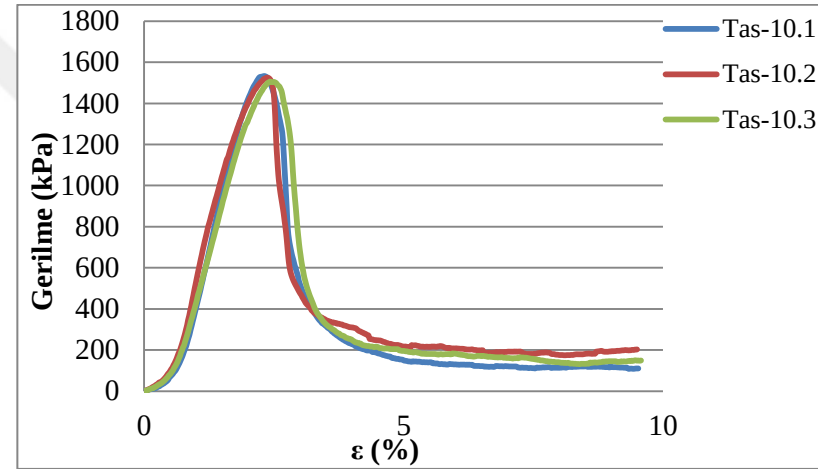
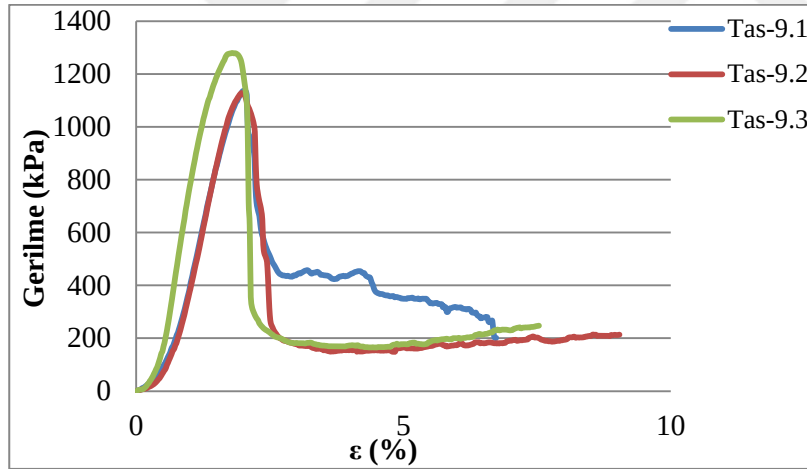
EK-3: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Verileri

Numune No	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	A_0 (m ²)	ΔH (mm)	A_f (m ²)	P_{max} (N)	q_u (kN/m ²)	q_u (ort)
Katkısız-1	46.5	89.0	0.001698	4.472	0.00179	284.8	159.3	
Katkısız-2	46.5	90.0	0.001698	4.528	0.00179	276.2	154.5	155.8
Katkısız-3	46.5	90.0	0.001698	4.560	0.00179	274.8	153.6	
Tasarım-1.1	46.5	92.5	0.001698	3.015	0.00176	477.8	272.2	
Tasarım-1.2	46.5	92.0	0.001698	2.822	0.00175	533.7	304.6	296.7
Tasarım-1.3	46.5	91.0	0.001698	3.085	0.00176	550.7	313.3	
Tasarım-2.1	46.5	91.5	0.001698	1.947	0.00174	1535.0	884.7	
Tasarım-2.2	46.5	92.0	0.001698	2.415	0.00174	1537.8	881.7	874.9
Tasarım-2.3	46.5	92.5	0.001698	2.490	0.00175	1497.9	858.3	
Tasarım-3.1	46.5	92.5	0.001698	2.288	0.00174	2238.1	1285.3	
Tasarım-3.2	46.5	92.0	0.001698	2.240	0.00174	2223.6	1277.5	1299.9
Tasarım-3.3	46.5	92.5	0.001698	2.258	0.00174	2327.0	1336.8	
Tasarım-4.1	46.5	92.0	0.001698	2.337	0.00174	2319.1	1330.9	
Tasarım-4.2	46.5	92.0	0.001698	2.261	0.00174	2306.1	1324.6	1326.5
Tasarım-4.3	46.5	90.5	0.001698	2.299	0.00174	2307.0	1324.0	
Tasarım-5.1	46.5	91.0	0.001698	1.600	0.00173	1893.8	1095.5	
Tasarım-5.2	46.5	91.5	0.001698	1.875	0.00173	1811.1	1044.6	1081.4
Tasarım-5.3	46.5	91.0	0.001698	1.845	0.00173	1914.0	1104.2	
Tasarım-6.1	46.5	92.0	0.001698	3.440	0.00176	1050.4	595.4	
Tasarım-6.2	46.5	91.5	0.001698	3.524	0.00177	1060.3	600.3	593.6
Tasarım-6.3	46.5	91.0	0.001698	3.390	0.00176	1032.0	585.1	
Tasarım-7.1	46.5	92.0	0.001698	2.400	0.00174	1740.7	998.2	
Tasarım-7.2	46.5	92.0	0.001698	2.375	0.00174	1601.7	918.8	961.3
Tasarım-7.3	46.5	93.0	0.001698	2.533	0.00175	1687.8	966.8	
Tasarım-8.1	46.5	91.5	0.001698	2.261	0.00174	2108.0	1210.6	
Tasarım-8.2	46.5	92.5	0.001698	2.415	0.00174	1965.8	1127.3	1157.0
Tasarım-8.3	46.5	92.5	0.001698	2.398	0.00174	1975.5	1133.1	
Tasarım-9.1	46.5	92.0	0.001698	1.870	0.00173	1971.6	1137.4	
Tasarım-9.2	46.5	91.5	0.001698	1.808	0.00173	1954.3	1128.1	1181.6
Tasarım-9.3	46.5	91.5	0.001698	1.656	0.00173	2212.4	1279.2	
Tasarım-10.1	46.5	91.5	0.001698	2.126	0.00174	2665.1	1532.9	
Tasarım-10.2	46.5	91.5	0.001698	2.183	0.00174	2652.5	1524.7	1521.3
Tasarım-10.3	46.5	93.0	0.001698	2.261	0.00174	2622.1	1506.5	
Tasarım-11.1	46.5	91.0	0.001698	3.460	0.00177	1043.0	590.8	
Tasarım-11.2	46.5	91.0	0.001698	3.587	0.00177	971.2	549.3	558.5
Tasarım-11.3	46.5	92.0	0.001698	3.680	0.00177	947.2	535.4	
Tasarım-12.1	46.5	91.5	0.001698	2.376	0.00174	1305.9	749.0	
Tasarım-12.2	46.5	90.5	0.001698	2.468	0.00175	1332.5	763.2	761.6
Tasarım-12.3	46.5	92.0	0.001698	2.538	0.00175	1349.0	772.4	
Tasarım-13.1	46.5	92.5	0.001698	1.876	0.00173	1481.3	854.6	
Tasarım-13.2	46.5	93.0	0.001698	1.862	0.00173	1558.0	899.1	881.5
Tasarım-13.3	46.5	93.5	0.001698	1.760	0.00173	1542.2	891.0	
Tasarım-14.1	46.5	91.5	0.001698	2.220	0.00174	1498.1	860.8	
Tasarım-14.2	46.5	91.5	0.001698	2.310	0.00174	1476.0	847.2	847.3
Tasarım-14.3	46.5	92.0	0.001698	2.433	0.00174	1454.5	833.8	
Tasarım-15.1	46.5	91.0	0.001698	2.356	0.00174	2314.8	1327.8	
Tasarım-15.2	46.5	91.0	0.001698	2.375	0.00174	2214.3	1269.9	1282.4
Tasarım-15.3	46.5	92.0	0.001698	2.356	0.00174	2177.6	1249.4	
Tasarım-16.1	46.5	92.0	0.001698	3.629	0.00177	1010.8	571.7	
Tasarım-16.2	46.5	91.0	0.001698	3.705	0.00177	979.7	553.4	565.4
Tasarım-16.3	46.5	91.0	0.001698	3.744	0.00177	1011.4	571.1	
Optimum-1	46.5	92.0	0.001698	2.331	0.00174	2850.7	1636.1	
Optimum-2	46.5	92.0	0.001698	2.275	0.00174	2797.8	1606.7	1605.1
Optimum-3	46.5	91.5	0.001698	2.328	0.00174	2740.0	1572.4	

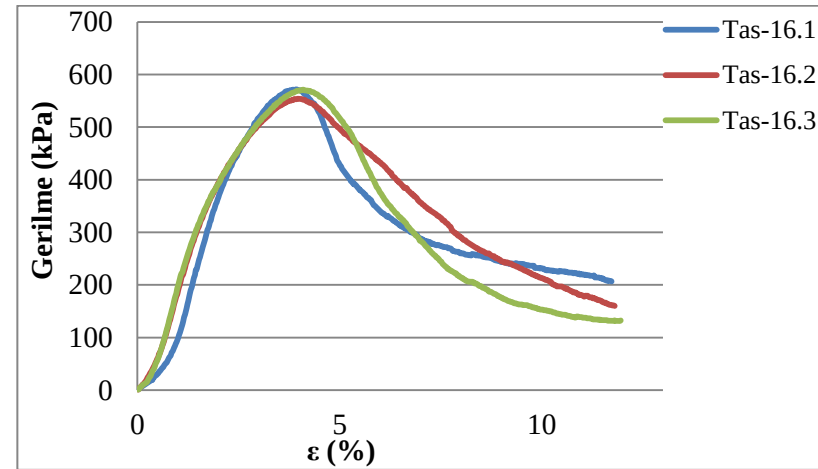
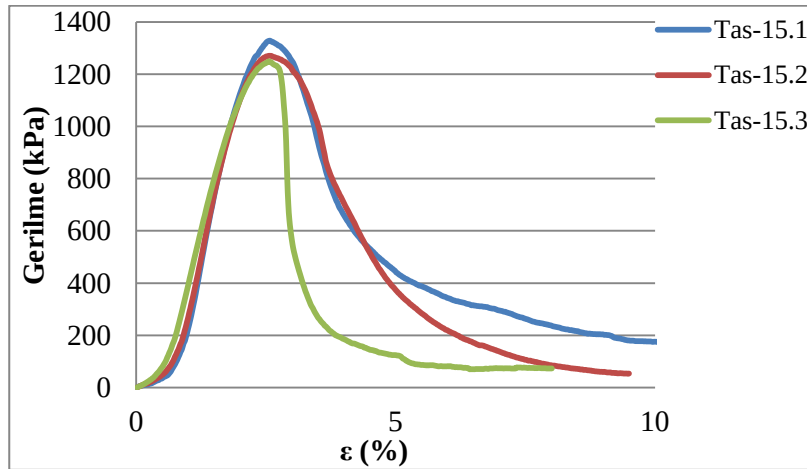
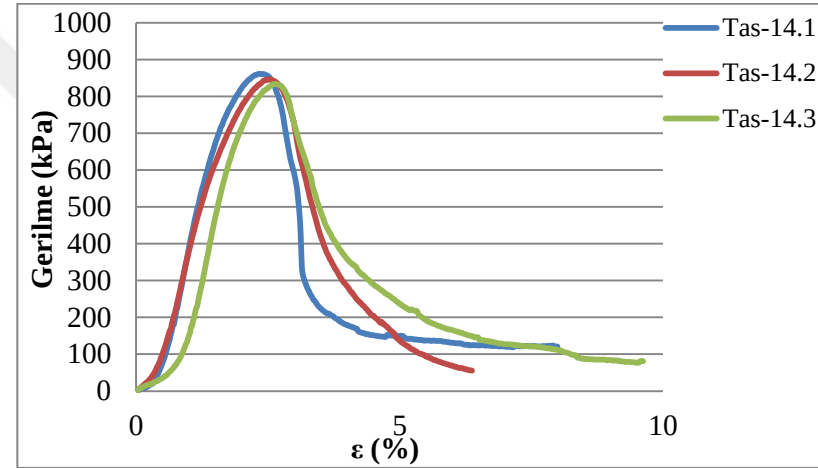
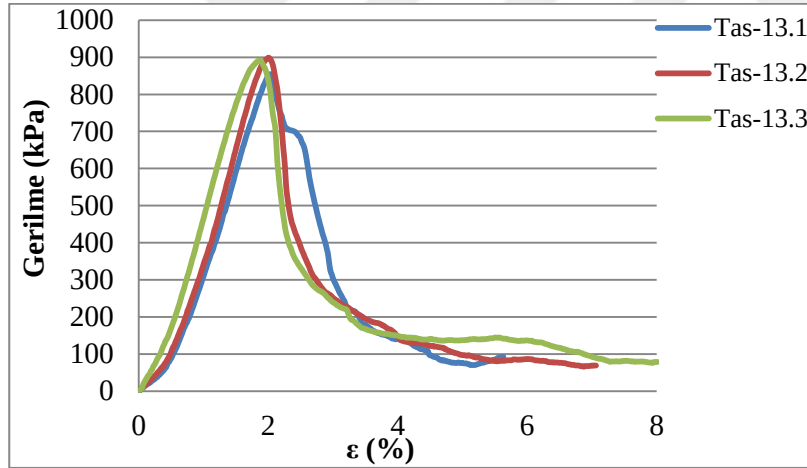
EK-4a: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Grafikleri (Tasarım 1-4)

EK-4b: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Grafikleri (Tasarım 5-8)

EK-4c: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Grafikleri (Tasarım 9-12)

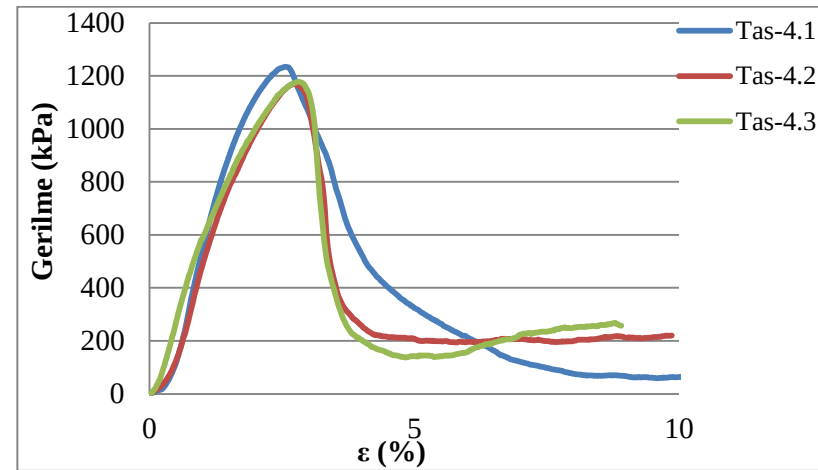
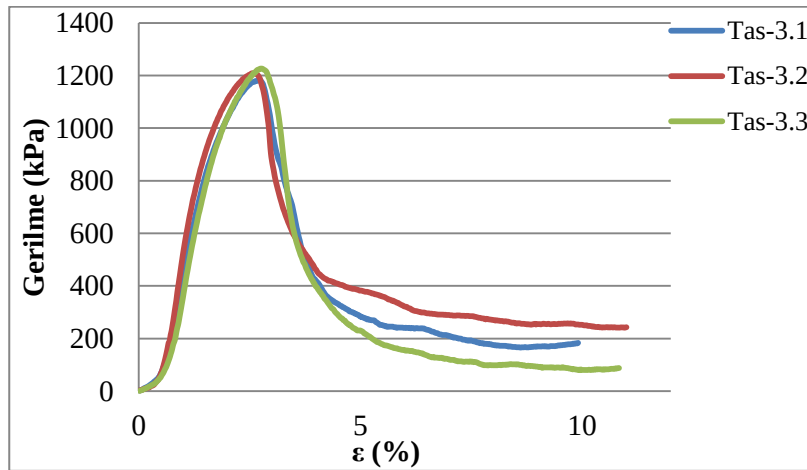
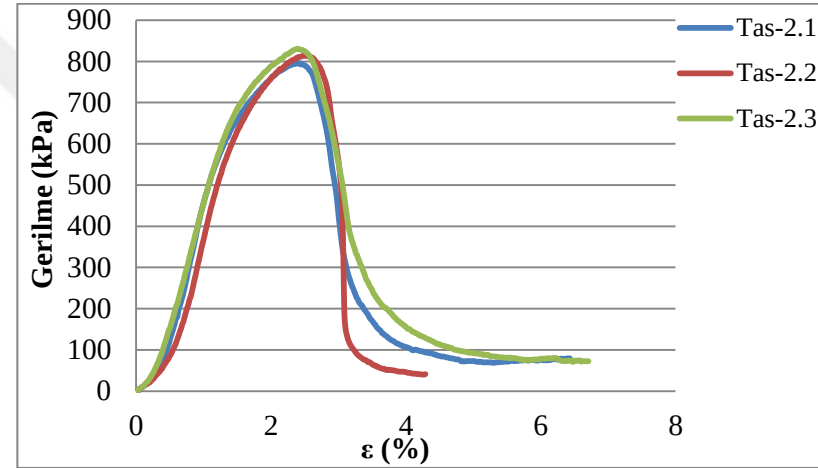
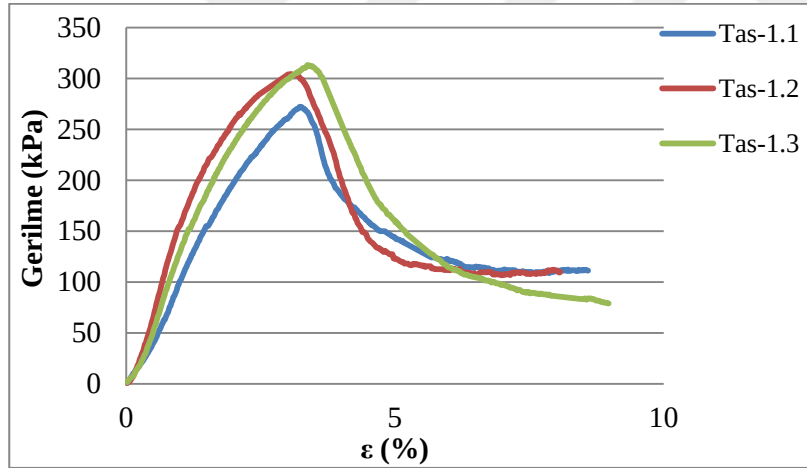


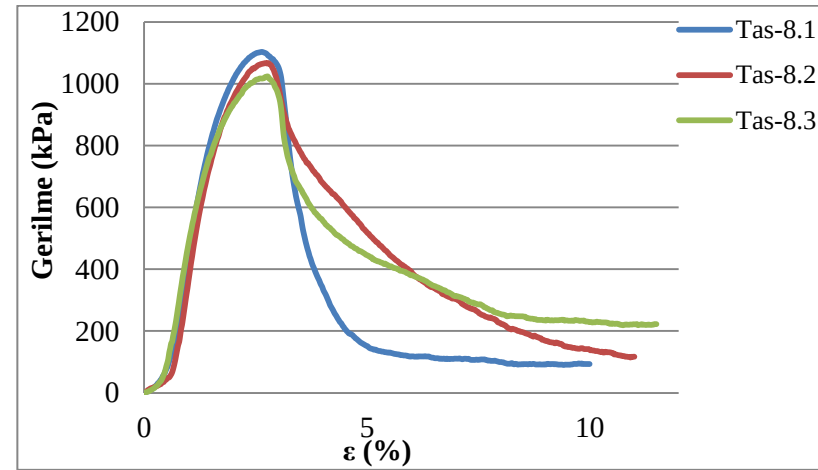
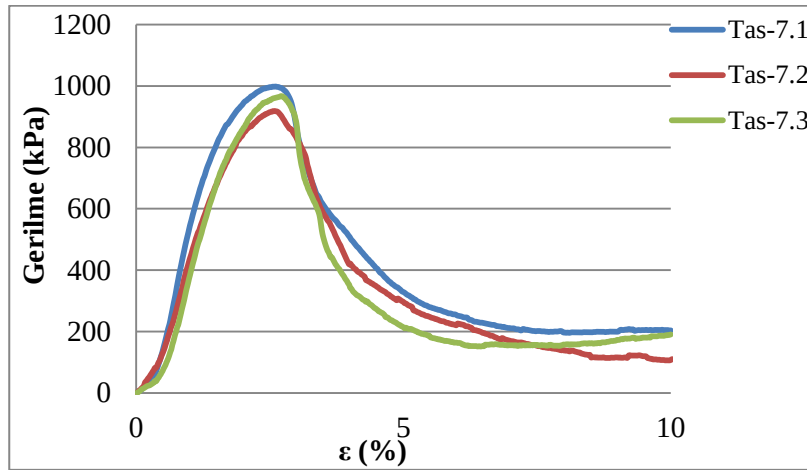
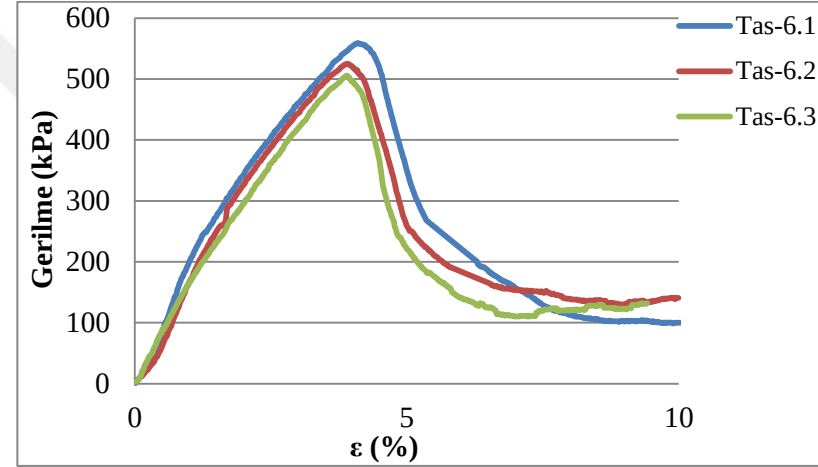
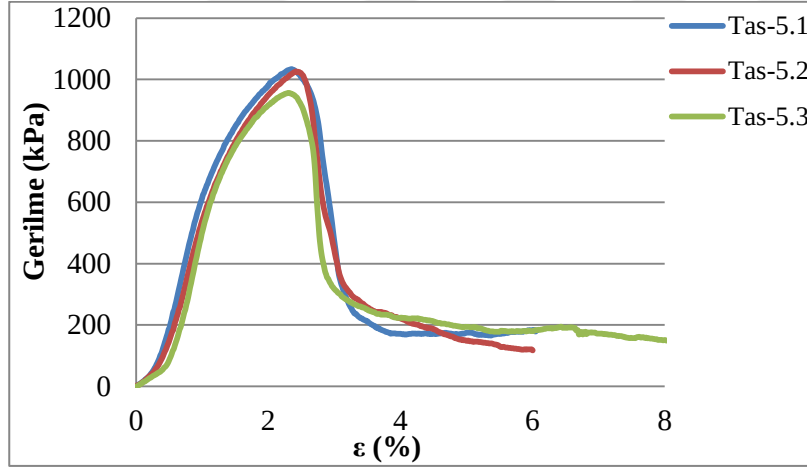
EK-4d: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Grafikleri (Tasarım 13-16)

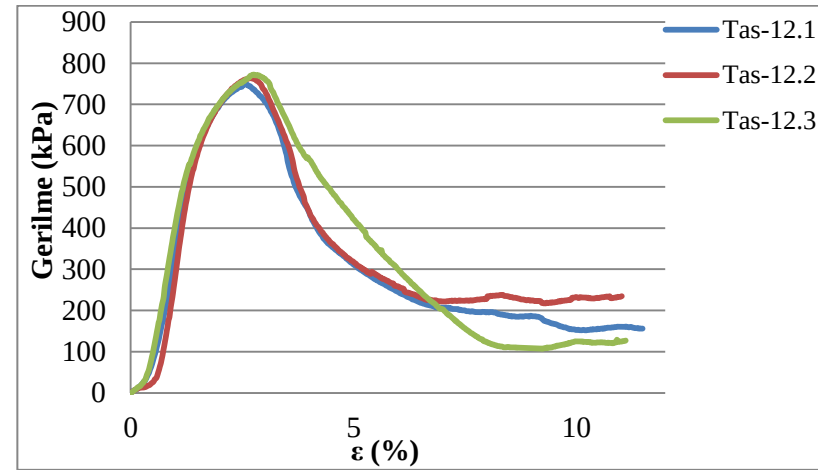
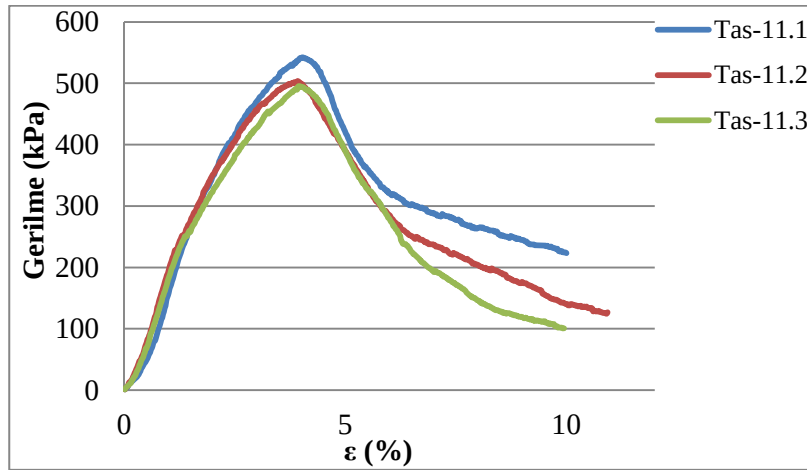
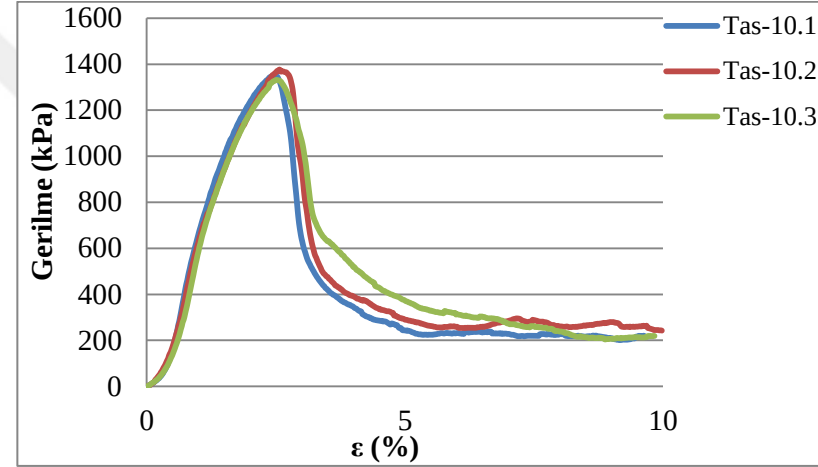
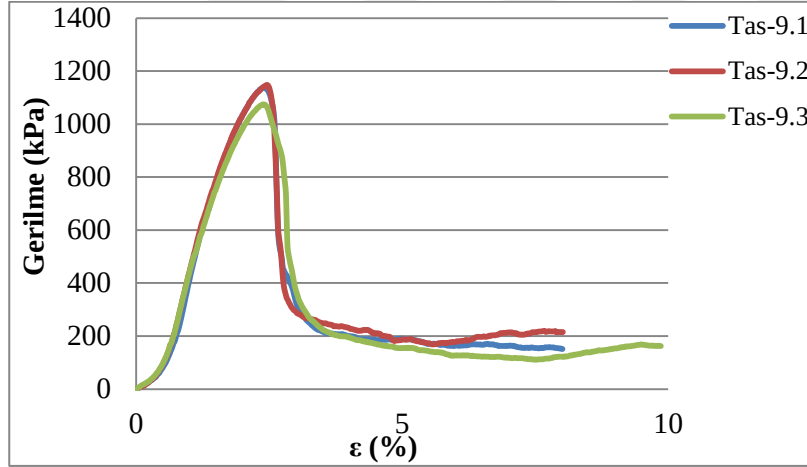


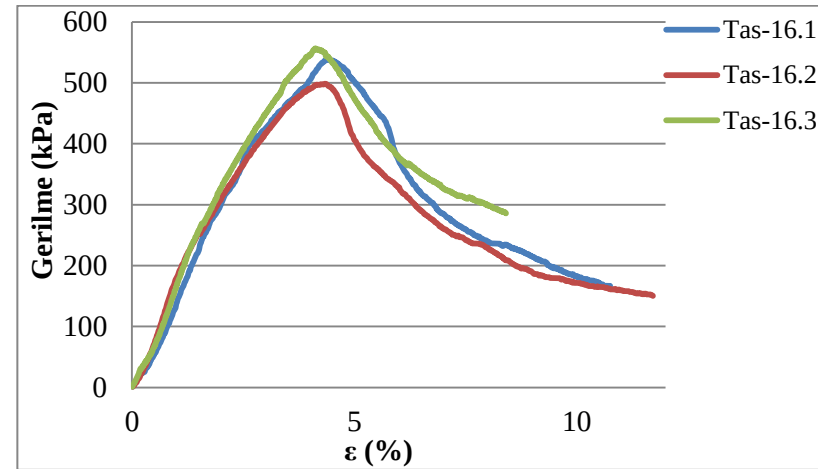
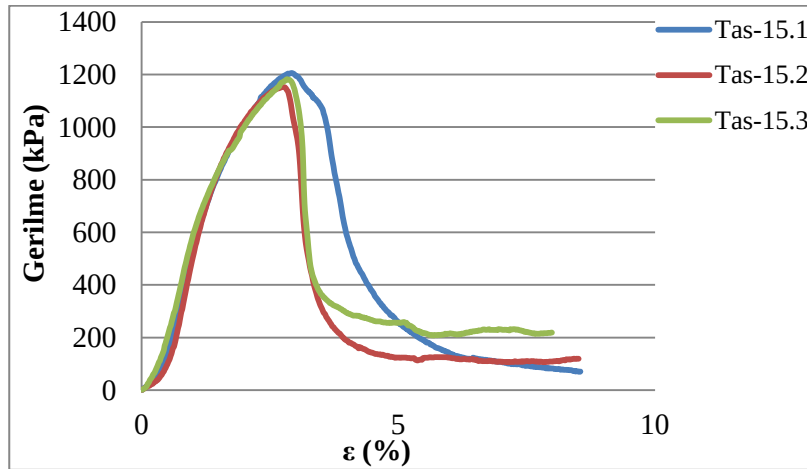
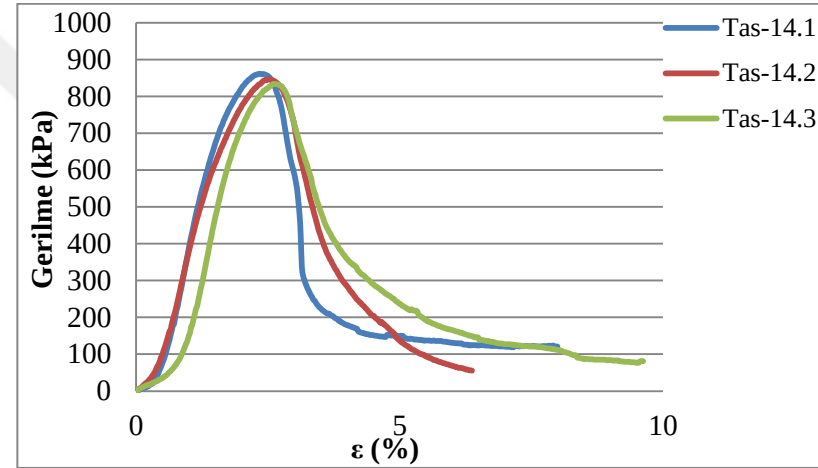
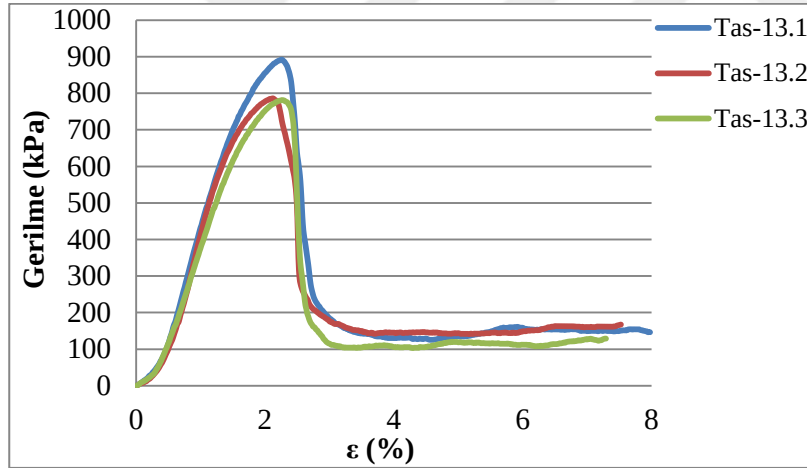
EK-5: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Verileri

Numune No	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	A ₀ (m ²)	ΔH (mm)	A _f (m ²)	P _{max} (N)	q _u (kN/m ²)	q _u (ort)
Katkısız-1	46.5	89.0	0.001698	4.472	0.00179	284.8	159.3	
Katkısız-2	46.5	90.0	0.001698	4.528	0.00179	276.2	154.5	155.8
Katkısız-3	46.5	90.0	0.001698	4.560	0.00179	274.8	153.6	
Tasarım-1.1	46.5	92.5	0.001698	3.015	0.00176	477.8	272.2	
Tasarım-1.2	46.5	92.0	0.001698	2.822	0.00175	533.7	304.6	296.7
Tasarım-1.3	46.5	91.0	0.001698	3.085	0.00176	550.7	313.3	
Tasarım-2.1	46.5	91.5	0.001698	2.208	0.00174	1385.4	796.1	
Tasarım-2.2	46.5	92.0	0.001698	2.296	0.00174	1418.4	814.4	813.7
Tasarım-2.3	46.5	92.0	0.001698	2.219	0.00174	1445.6	830.7	
Tasarım-3.1	46.5	93.0	0.001698	2.528	0.00175	2061.6	1181.0	
Tasarım-3.2	46.5	92.0	0.001698	2.420	0.00174	2106.8	1208.0	1205.1
Tasarım-3.3	46.5	92.5	0.001698	2.572	0.00175	2142.0	1226.2	
Tasarım-4.1	46.5	94.0	0.001698	2.430	0.00174	2151.7	1234.2	
Tasarım-4.2	46.5	93.0	0.001698	2.542	0.00175	2042.1	1169.6	1194.0
Tasarım-4.3	46.5	93.0	0.001698	2.618	0.00175	2058.5	1178.0	
Tasarım-5.1	46.5	92.5	0.001698	2.171	0.00174	1797.8	1033.8	
Tasarım-5.2	46.5	92.5	0.001698	2.236	0.00174	1786.5	1026.5	1005.7
Tasarım-5.3	46.5	92.5	0.001698	2.133	0.00174	1663.0	956.7	
Tasarım-6.1	46.5	91.5	0.001698	3.765	0.00177	990.0	559.0	
Tasarım-6.2	46.5	92.0	0.001698	3.615	0.00177	927.7	524.8	529.7
Tasarım-6.3	46.5	93.0	0.001698	3.627	0.00177	893.1	505.4	
Tasarım-7.1	46.5	92.0	0.001698	2.400	0.00174	1740.7	998.2	
Tasarım-7.2	46.5	92.0	0.001698	2.375	0.00174	1601.7	918.8	961.3
Tasarım-7.3	46.5	93.0	0.001698	2.533	0.00175	1687.8	966.8	
Tasarım-8.1	46.5	91.0	0.001698	2.420	0.00174	1923.9	1102.8	
Tasarım-8.2	46.5	91.5	0.001698	2.546	0.00175	1863.9	1067.0	1064.4
Tasarım-8.3	46.5	92.0	0.001698	2.560	0.00175	1787.5	1023.3	
Tasarım-9.1	46.5	93.5	0.001698	2.240	0.00174	1977.8	1136.7	
Tasarım-9.2	46.5	93.5	0.001698	2.291	0.00174	1998.3	1147.9	1119.7
Tasarım-9.3	46.5	94.0	0.001698	2.240	0.00174	1869.5	1074.6	
Tasarım-10.1	46.5	93.5	0.001698	2.320	0.00174	2356.7	1353.3	
Tasarım-10.2	46.5	92.5	0.001698	2.384	0.00174	2399.8	1376.7	1354.0
Tasarım-10.3	46.5	94.0	0.001698	2.368	0.00174	2320.2	1331.8	
Tasarım-11.1	46.5	92.0	0.001698	3.691	0.00177	959.4	542.3	
Tasarım-11.2	46.5	91.5	0.001698	3.591	0.00177	890.6	503.9	513.8
Tasarım-11.3	46.5	92.0	0.001698	3.664	0.00177	875.9	495.2	
Tasarım-12.1	46.5	91.5	0.001698	2.376	0.00174	1305.9	749.0	
Tasarım-12.2	46.5	90.5	0.001698	2.468	0.00175	1332.5	763.2	761.6
Tasarım-12.3	46.5	92.0	0.001698	2.538	0.00175	1349.0	772.4	
Tasarım-13.1	46.5	92.5	0.001698	2.086	0.00174	1549.4	891.8	
Tasarım-13.2	46.5	93.5	0.001698	1.980	0.00173	1364.1	786.2	819.8
Tasarım-13.3	46.5	93.5	0.001698	2.120	0.00174	1358.0	781.5	
Tasarım-14.1	46.5	91.5	0.001698	2.220	0.00174	1498.1	860.8	
Tasarım-14.2	46.5	91.5	0.001698	2.310	0.00174	1476.0	847.2	847.3
Tasarım-14.3	46.5	92.0	0.001698	2.433	0.00174	1454.5	833.8	
Tasarım-15.1	46.5	93.0	0.001698	2.715	0.00175	2109.2	1205.8	
Tasarım-15.2	46.5	92.5	0.001698	2.580	0.00175	2012.2	1151.8	1179.8
Tasarım-15.3	46.5	93.0	0.001698	2.646	0.00175	2066.0	1181.9	
Tasarım-16.1	46.5	91.5	0.001698	4.056	0.00178	956.7	538.4	
Tasarım-16.2	46.5	92.5	0.001698	4.041	0.00178	884.9	498.3	531.1
Tasarım-16.3	46.5	93.0	0.001698	3.840	0.00177	986.0	556.6	
Optimum-1	46.5	93.0	0.001698	2.448	0.00174	2448.7	1404.0	
Optimum-2	46.5	92.0	0.001698	2.520	0.00175	2296.2	1315.1	1361.0
Optimum-3	46.5	92.0	0.001698	2.376	0.00174	2377.5	1363.8	

EK-6a: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Serbest Basıncı Deney Grafikleri (Tasarım 1-4)

EK-6b: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Grafikleri (Tasarım 5-8)

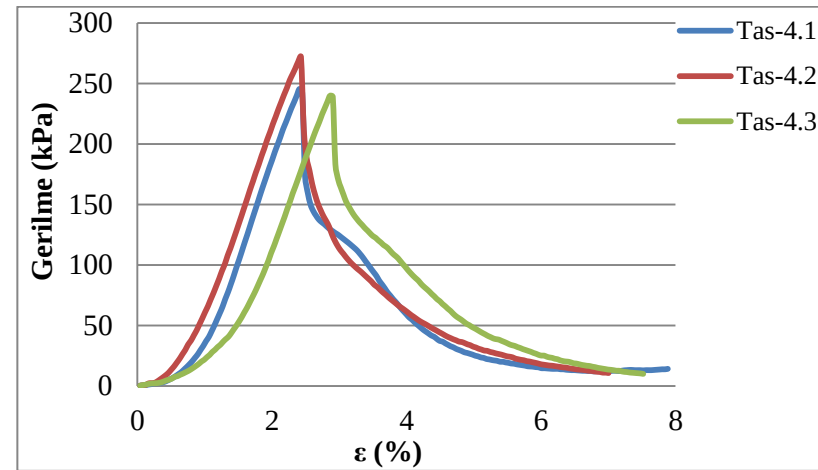
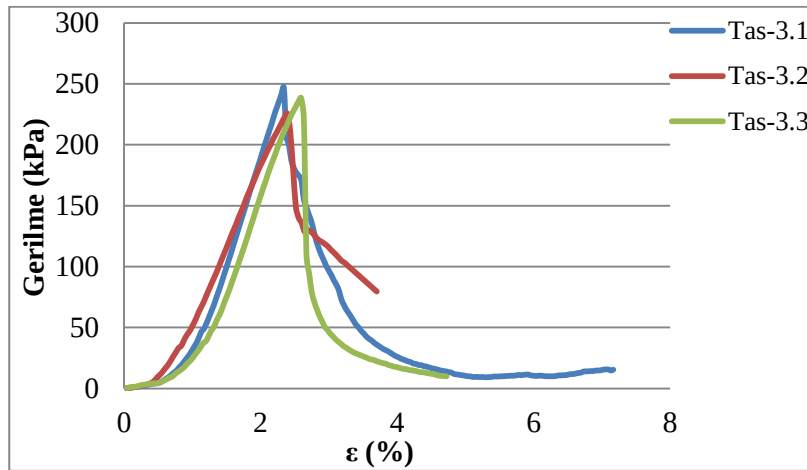
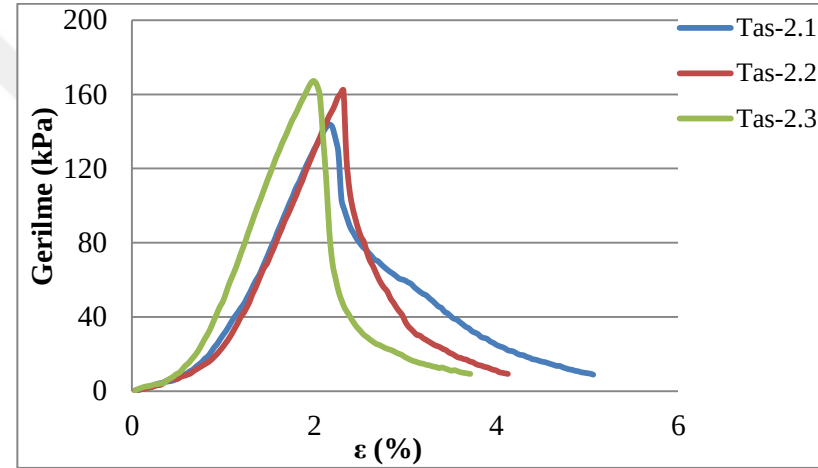
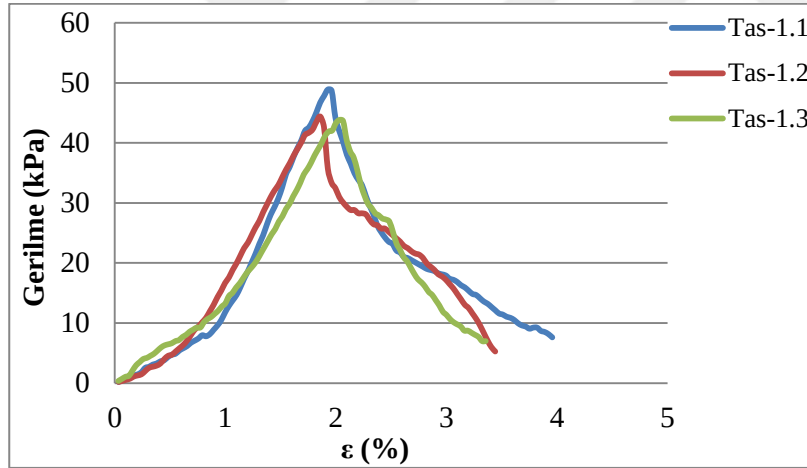
EK-6c: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Grafikleri (Tasarım 9-12)

EK-6d: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Deney Grafikleri (Tasarım 13-16)

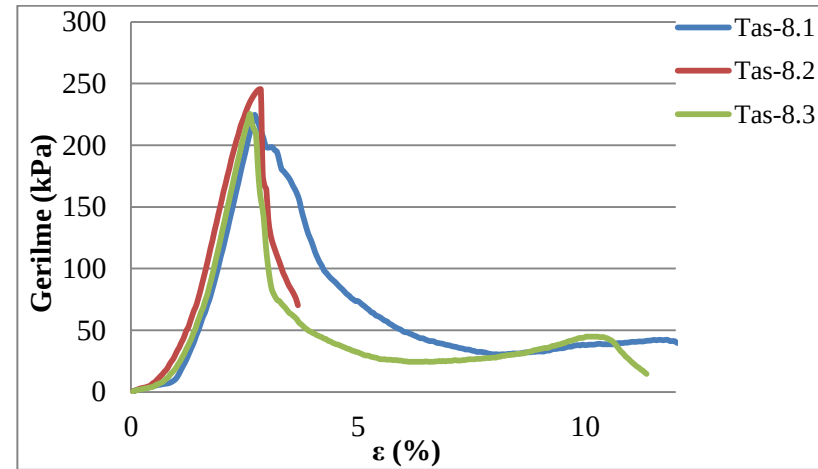
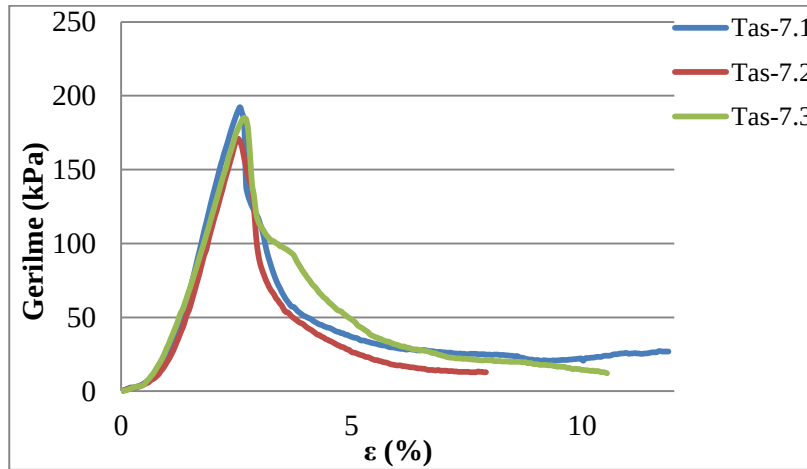
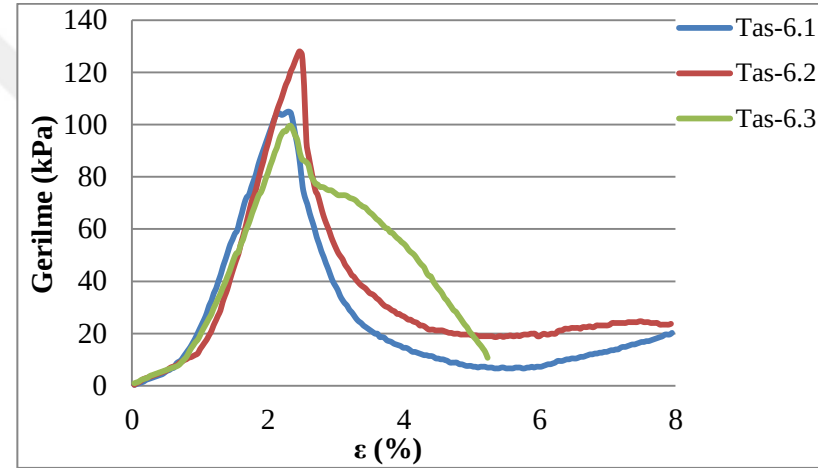
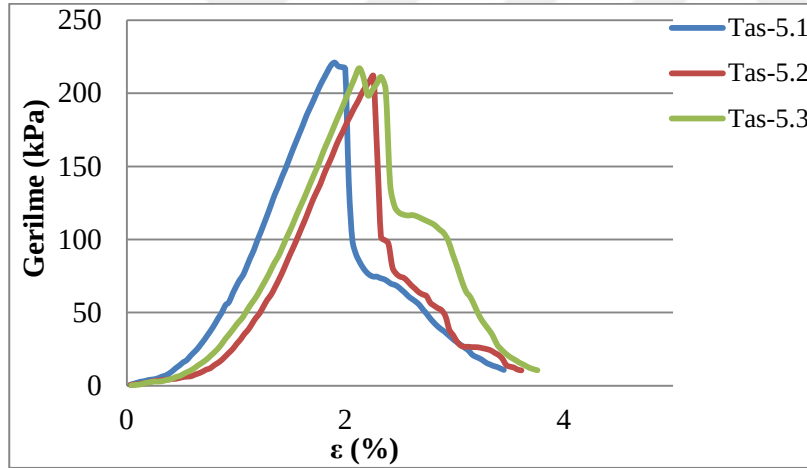
EK-7: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Verileri

Numune No	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Yanal alan	P _{max} (N)	2P _{max} (N)	q _u (kN/m ²)	q _u (ort)
Katkısız-1	46.5	89.0	0.0130	227.7	455.4	35.0	33.7
Katkısız-2	46.5	90.0	0.0131	224.5	449.1	34.2	
Katkısız-3	46.5	90.0	0.0131	209.8	419.5	31.9	
Tasarım-1.1	46.5	91.0	0.0133	325.0	649.9	48.9	45.7
Tasarım-1.2	46.5	91.5	0.0134	296.8	593.6	44.4	
Tasarım-1.3	46.5	91.5	0.0134	292.9	585.8	43.8	
Tasarım-2.1	46.5	91.5	0.0134	960.9	1921.9	143.8	157.7
Tasarım-2.2	46.5	91.5	0.0133	1078.1	2156.3	162.2	
Tasarım-2.3	46.5	90.5	0.0133	1111.5	2222.9	167.2	
Tasarım-3.1	46.5	91.5	0.0134	1650.7	3301.3	247.0	236.96
Tasarım-3.2	46.5	92.0	0.0133	1499.4	2998.8	225.6	
Tasarım-3.3	46.5	92.0	0.0135	1610.1	3220.2	238.3	
Tasarım-4.1	46.5	91.5	0.0134	1649.6	3299.1	245.5	252.46
Tasarım-4.2	46.5	91.0	0.0133	1807.8	3615.7	272.0	
Tasarım-4.3	46.5	91.0	0.0134	1603.4	3206.8	239.9	
Tasarım-5.1	46.5	91.5	0.0134	1476.8	2953.7	221.0	216.61
Tasarım-5.2	46.5	91.5	0.0134	1422.6	2845.2	211.7	
Tasarım-5.3	46.5	91.0	0.0134	1451.2	2902.4	217.1	
Tasarım-6.1	46.5	91.5	0.0134	701.6	1403.2	105.0	110.87
Tasarım-6.2	46.5	92.0	0.0134	855.9	1711.7	128.1	
Tasarım-6.3	46.5	91.0	0.0134	669.1	1338.2	99.6	
Tasarım-7.1	46.5	91.5	0.0134	1285.0	2569.9	192.3	182.75
Tasarım-7.2	46.5	92.0	0.0134	1148.7	2297.4	170.9	
Tasarım-7.3	46.5	91.5	0.0134	1236.7	2473.3	185.0	
Tasarım-8.1	46.5	92.0	0.0135	1517.7	3035.3	224.6	231.76
Tasarım-8.2	46.5	92.0	0.0135	1657.2	3314.4	245.3	
Tasarım-8.3	46.5	91.0	0.0134	1514.5	3029.0	225.4	
Tasarım-9.1	46.5	91.0	0.0134	1740.7	3481.3	260.4	236.7
Tasarım-9.2	46.5	92.0	0.0135	1521.6	3043.2	225.2	
Tasarım-9.3	46.5	92.0	0.0134	1508.1	3016.1	224.4	
Tasarım-10.1	46.5	91.0	0.0134	2023.8	4047.5	302.8	308.6
Tasarım-10.2	46.5	91.5	0.0134	2075.0	4150.0	310.5	
Tasarım-10.3	46.5	91.5	0.0134	2100.0	4200.0	312.5	
Tasarım-11.1	46.5	91.0	0.0133	642.5	1285.1	96.7	106.3
Tasarım-11.2	46.5	91.0	0.0134	690.4	1380.7	103.3	
Tasarım-11.3	46.5	92.0	0.0134	798.5	1597.0	118.8	
Tasarım-12.1	46.5	91.0	0.0133	994.9	1989.9	149.7	141.43
Tasarım-12.2	46.5	91.0	0.0133	897.5	1794.9	135.0	
Tasarım-12.3	46.5	91.0	0.0133	927.7	1855.4	139.6	
Tasarım-13.1	46.5	92.0	0.0134	1199.3	2398.6	178.5	176.55
Tasarım-13.2	46.5	92.0	0.0135	1211.9	2423.8	179.4	
Tasarım-13.3	46.5	92.5	0.0137	1179.6	2359.1	171.8	
Tasarım-14.1	46.5	92.5	0.0135	1092.3	2184.6	161.7	169.72
Tasarım-14.2	46.5	91.5	0.0134	1159.6	2319.2	173.5	
Tasarım-14.3	46.5	92.5	0.0135	1175.5	2350.9	174.0	
Tasarım-15.1	46.5	91.0	0.0133	1703.6	3407.2	256.3	256.88
Tasarım-15.2	46.5	91.0	0.0133	1714.7	3429.4	258.0	
Tasarım-15.3	46.5	91.0	0.0134	1713.4	3426.8	256.4	
Tasarım-16.1	46.5	91.0	0.0134	641.6	1283.2	96.0	113.24
Tasarım-16.2	46.5	91.5	0.0134	813.1	1626.2	121.0	
Tasarım-16.3	46.5	91.0	0.0133	815.7	1631.4	122.7	
Optimum-1	46.5	91.0	0.0133	2178.6	4357.2	327.8	330.8
Optimum-2	46.5	92.0	0.0134	2140.7	4281.4	318.6	
Optimum-3	46.5	91.0	0.0133	2299.8	4599.6	346.0	

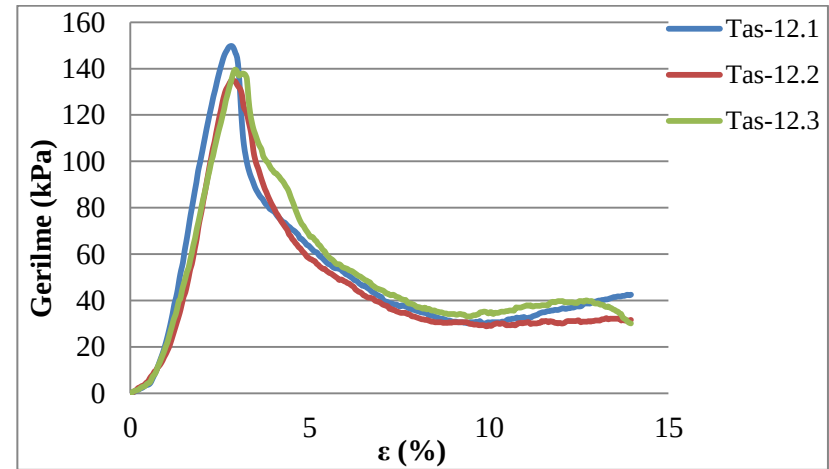
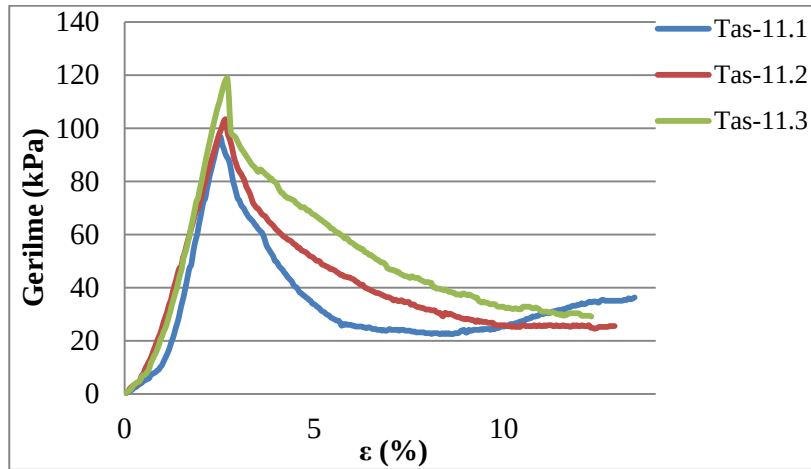
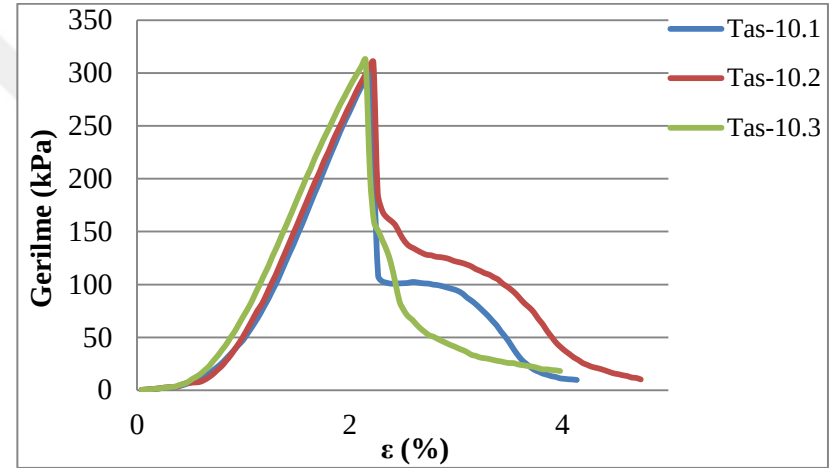
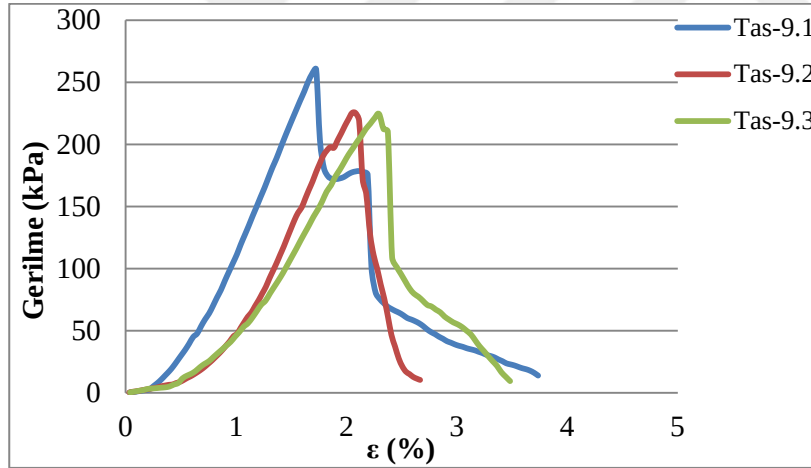
EK-8a: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 1-4)

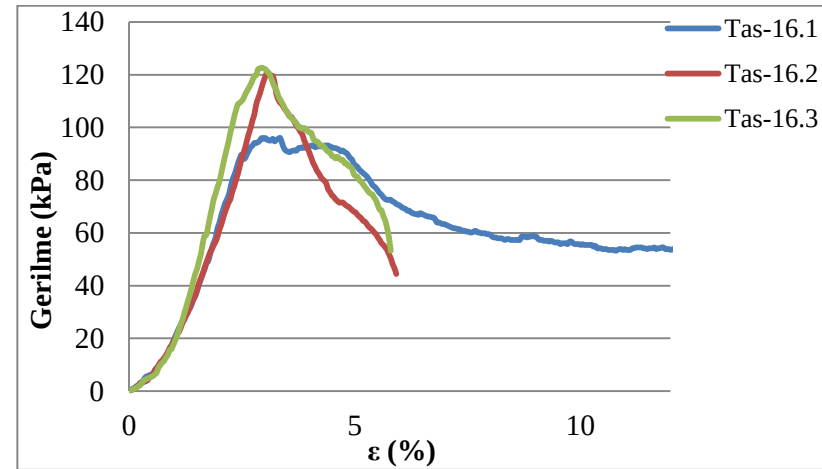
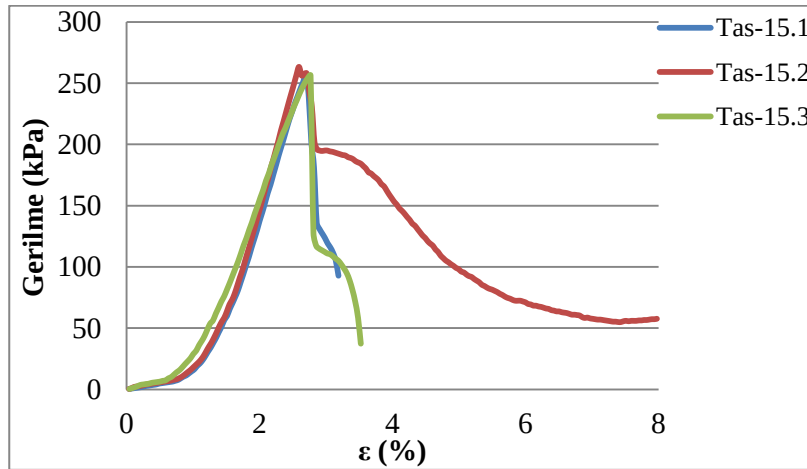
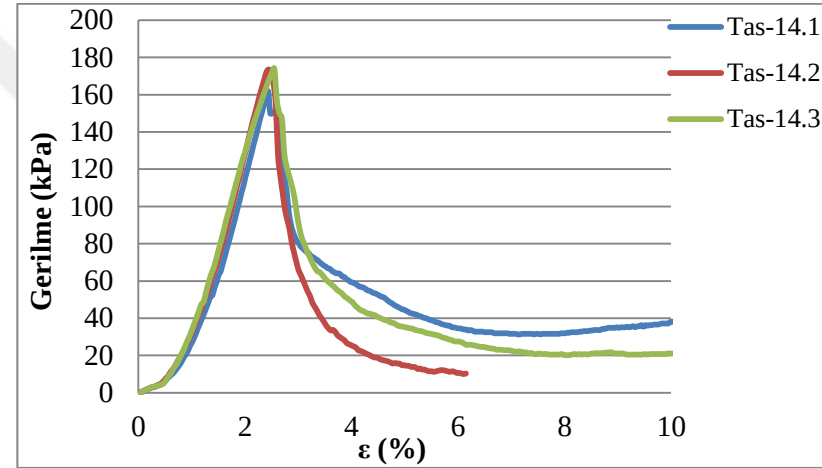
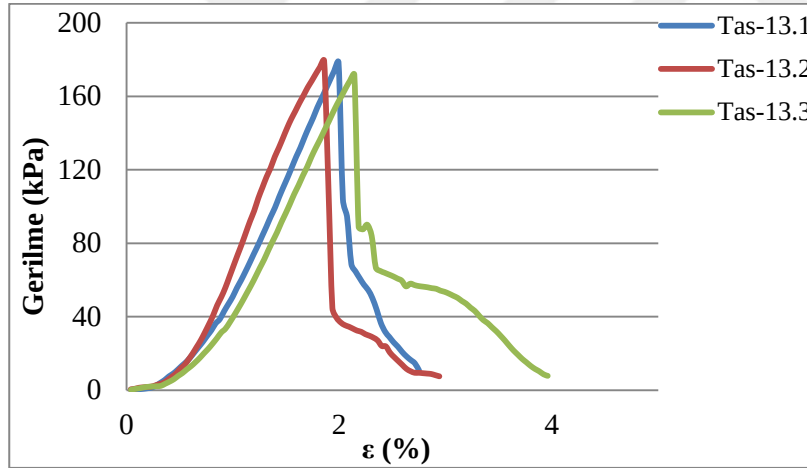


EK-8b: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 5-8)



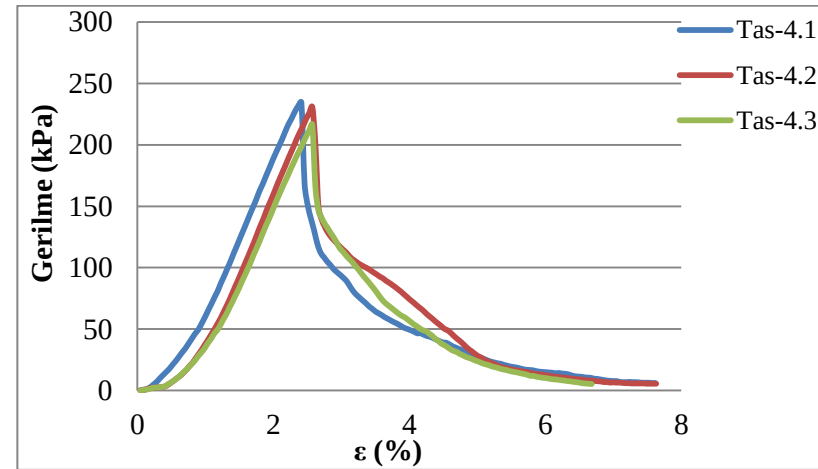
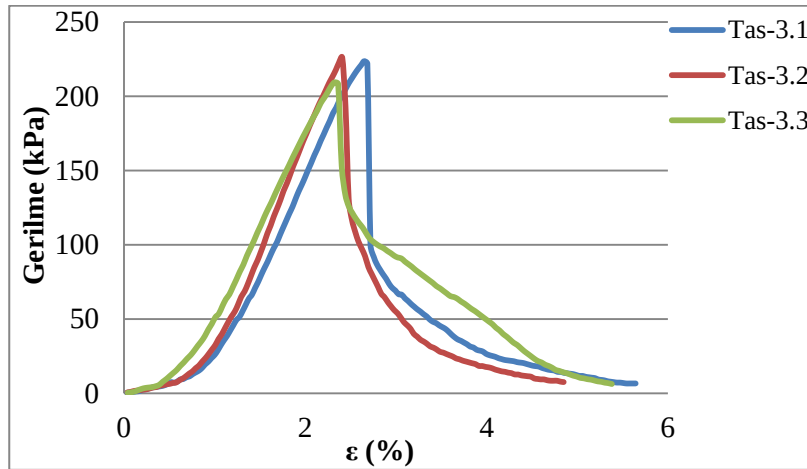
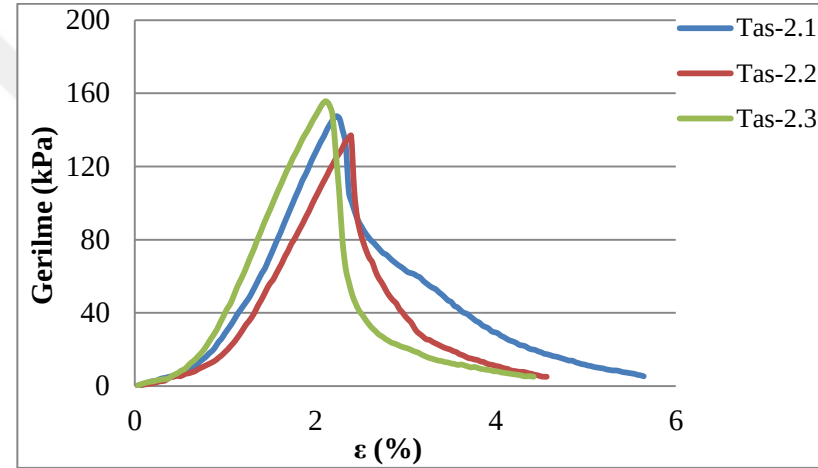
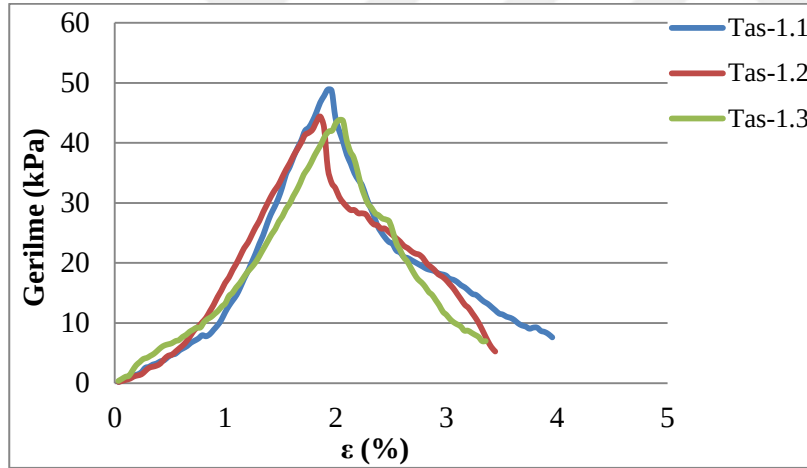
EK-8c: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 9-12)

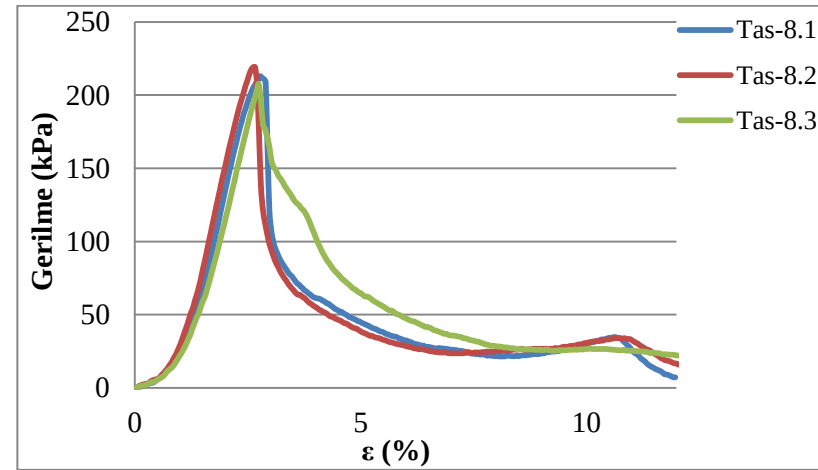
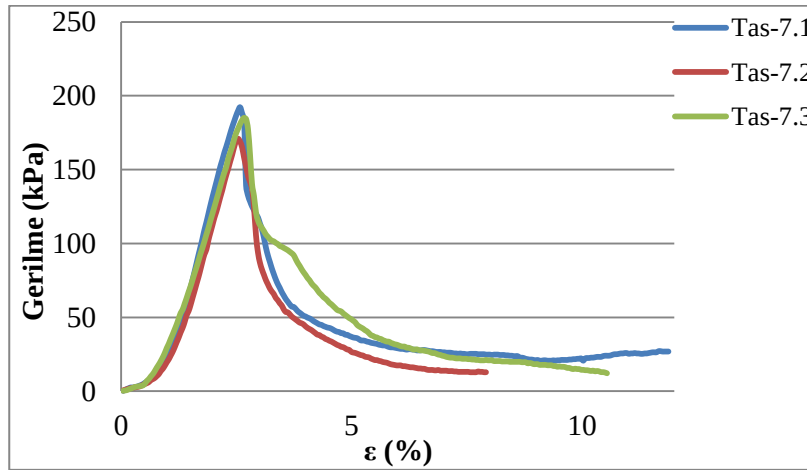
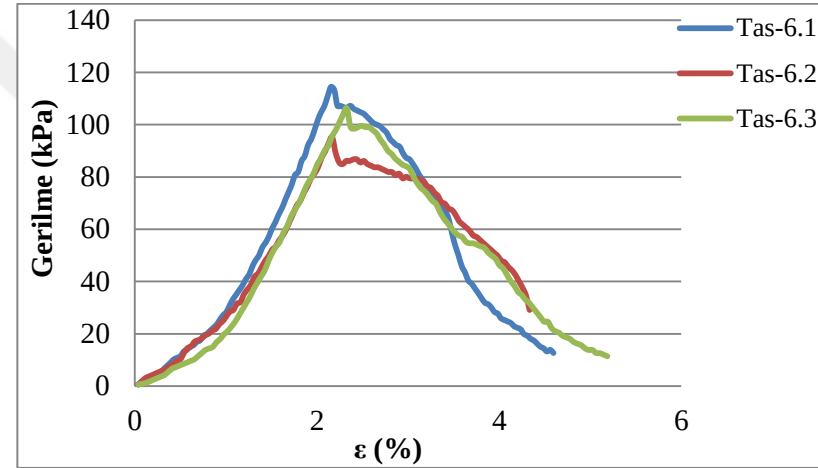
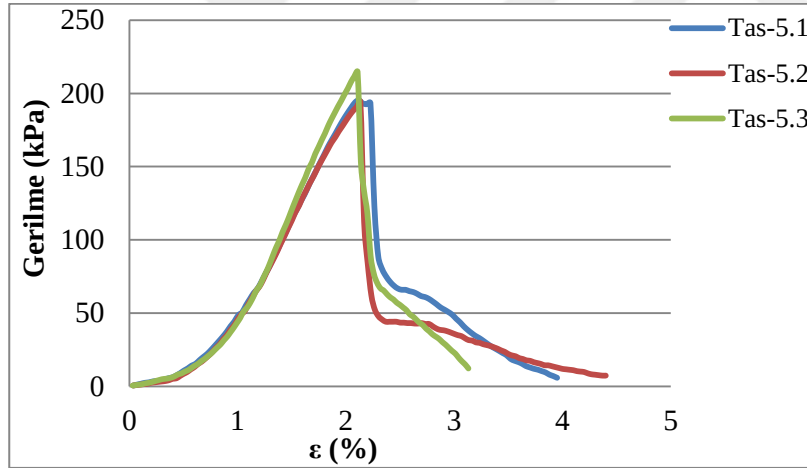


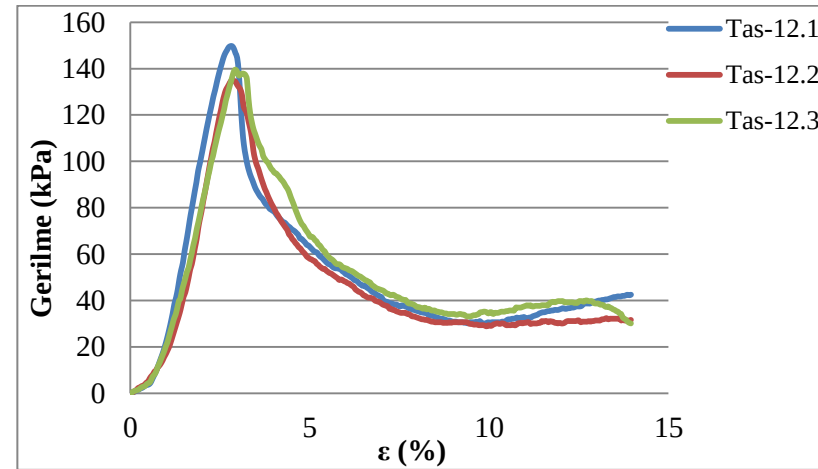
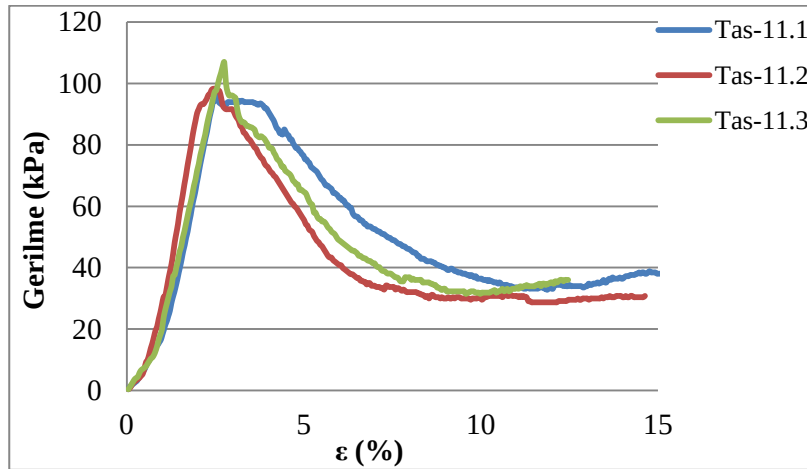
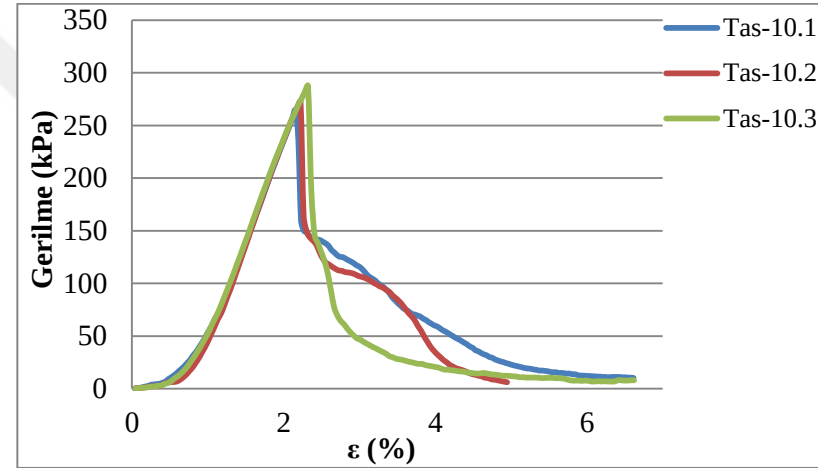
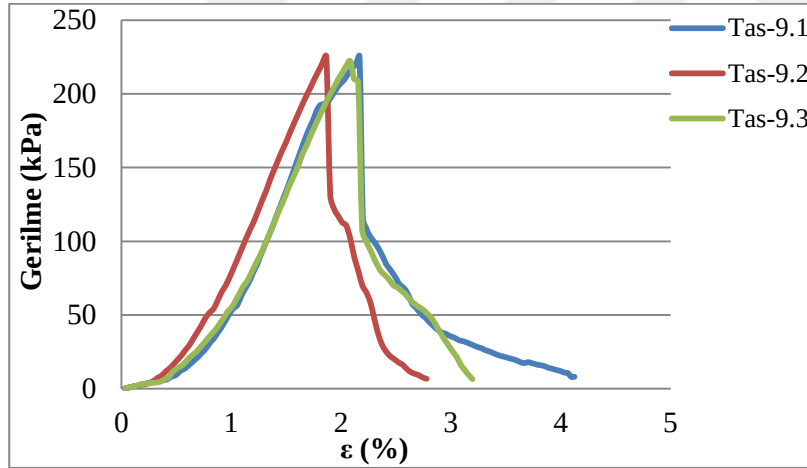
EK-8d: B.F+S.D Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 12-16)

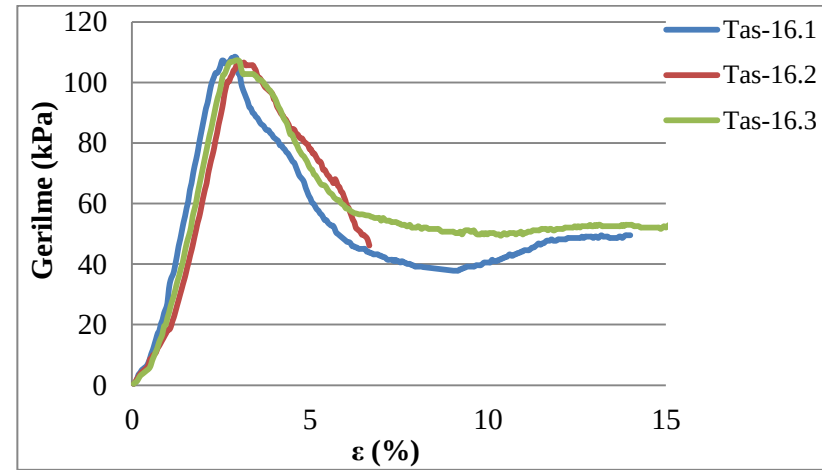
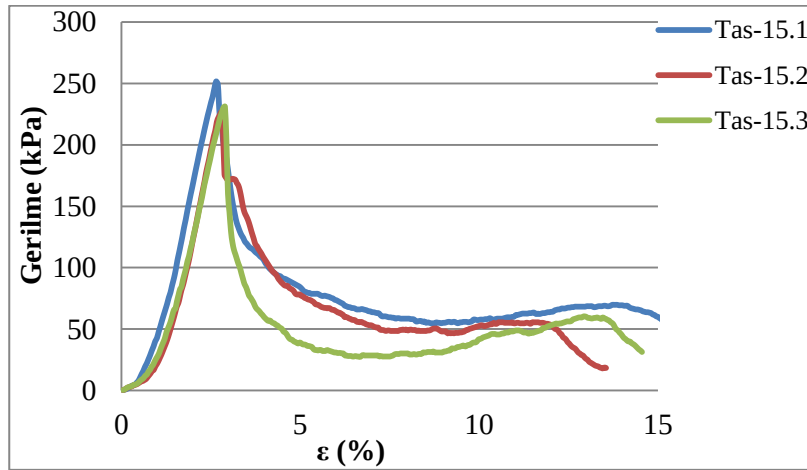
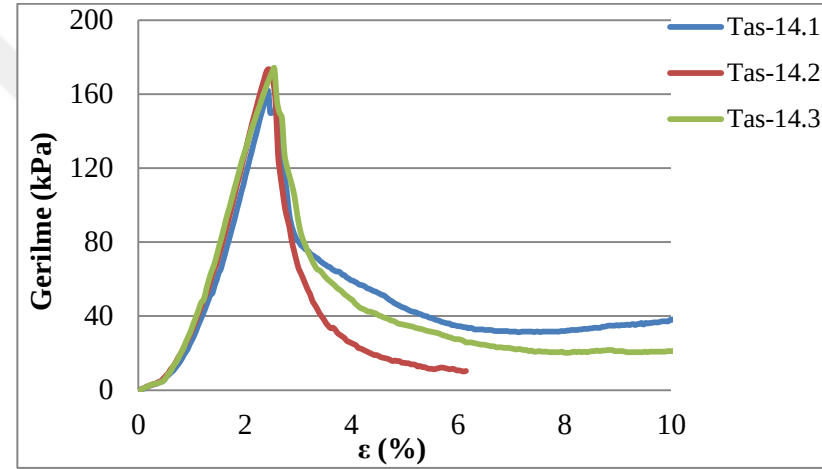
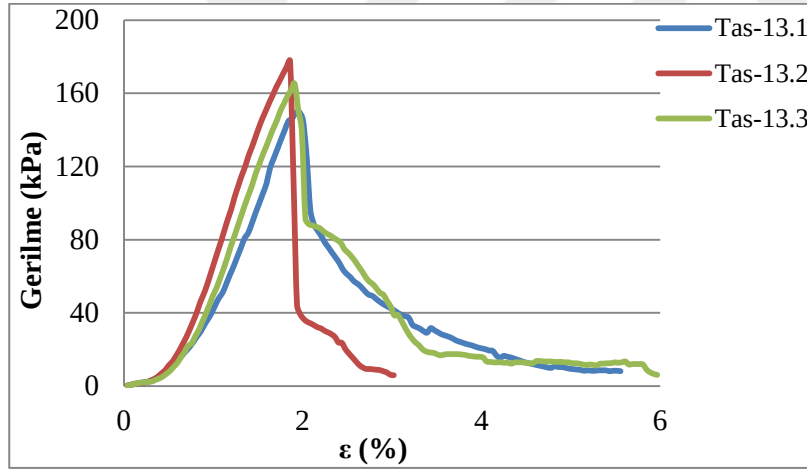
EK-9: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Verileri

Numune No	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Yanal alan	P _{max} (N)	2P _{max} (N)	q _u (kN/m ²)	q _u (ort)
Katkısız-1	46.5	89.0	0.0130	227.7	455.4	35.0	33.7
Katkısız-2	46.5	90.0	0.0131	224.5	449.1	34.2	
Katkısız-3	46.5	90.0	0.0131	209.8	419.5	31.9	
Tasarım-1.1	46.5	91.0	0.0133	325.0	649.9	48.9	45.7
Tasarım-1.2	46.5	91.5	0.0134	296.8	593.6	44.4	
Tasarım-1.3	46.5	91.5	0.0134	292.9	585.8	43.8	
Tasarım-2.1	46.5	91.5	0.0134	986.1	1972.2	147.5	146.67
Tasarım-2.2	46.5	91.0	0.0133	909.3	1818.6	136.8	
Tasarım-2.3	46.5	91.0	0.0133	1034.7	2069.4	155.7	
Tasarım-3.1	46.5	91.5	0.0134	1494.6	2989.2	223.6	219.69
Tasarım-3.2	46.5	91.0	0.0133	1502.6	3005.2	226.1	
Tasarım-3.3	46.5	92.5	0.0135	1414.7	2829.3	209.4	
Tasarım-4.1	46.5	92.0	0.0134	1576.2	3152.3	234.6	227.21
Tasarım-4.2	46.5	91.0	0.0133	1533.3	3066.7	230.7	
Tasarım-4.3	46.5	91.5	0.0134	1446.2	2892.4	216.4	
Tasarım-5.1	46.5	91.5	0.0134	1305.7	2611.4	195.4	201.46
Tasarım-5.2	46.5	92.0	0.0134	1305.7	2611.4	194.3	
Tasarım-5.3	46.5	91.5	0.0134	1435.0	2870.0	214.7	
Tasarım-6.1	46.5	91.5	0.0134	765.0	1530.0	114.5	105.32
Tasarım-6.2	46.5	91.5	0.0134	636.5	1273.0	95.2	
Tasarım-6.3	46.5	92.0	0.0134	714.0	1428.0	106.3	
Tasarım-7.1	46.5	91.5	0.0134	1285.0	2569.9	192.3	182.75
Tasarım-7.2	46.5	92.0	0.0134	1148.7	2297.4	170.9	
Tasarım-7.3	46.5	91.5	0.0134	1236.7	2473.3	185.0	
Tasarım-8.1	46.5	92.5	0.0135	1438.7	2877.4	212.9	213.2
Tasarım-8.2	46.5	92.5	0.0135	1480.0	2959.9	219.0	
Tasarım-8.3	46.5	92.0	0.0134	1395.5	2791.0	207.7	
Tasarım-9.1	46.5	91.5	0.0134	1506.8	3013.5	225.5	224.33
Tasarım-9.2	46.5	92.5	0.0135	1523.4	3046.8	225.5	
Tasarım-9.3	46.5	92.0	0.0134	1492.2	2984.4	222.1	
Tasarım-10.1	46.5	91.5	0.0134	1765.0	3529.9	264.1	274.65
Tasarım-10.2	46.5	91.5	0.0134	1820.7	3641.4	272.4	
Tasarım-10.3	46.5	92.0	0.0134	1931.6	3863.3	287.5	
Tasarım-11.1	46.5	91.0	0.0133	648.4	1296.7	97.5	100.87
Tasarım-11.2	46.5	91.5	0.0134	656.7	1313.3	98.3	
Tasarım-11.3	46.5	92.0	0.0134	717.8	1435.7	106.8	
Tasarım-12.1	46.5	91.0	0.0133	994.9	1989.9	149.7	141.43
Tasarım-12.2	46.5	91.0	0.0133	897.5	1794.9	135.0	
Tasarım-12.3	46.5	91.0	0.0133	927.7	1855.4	139.6	
Tasarım-13.1	46.5	92.0	0.0134	1006.2	2012.4	149.7	164.22
Tasarım-13.2	46.5	92.5	0.0135	1201.0	2401.9	177.8	
Tasarım-13.3	46.5	94.0	0.0137	1134.0	2268.0	165.2	
Tasarım-14.1	46.5	92.5	0.0135	1092.3	2184.6	161.7	169.72
Tasarım-14.2	46.5	91.5	0.0134	1159.6	2319.2	173.5	
Tasarım-14.3	46.5	92.5	0.0135	1175.5	2350.9	174.0	
Tasarım-15.1	46.5	91.0	0.0133	1672.7	3345.3	251.6	236.36
Tasarım-15.2	46.5	91.0	0.0133	1504.5	3009.0	226.4	
Tasarım-15.3	46.5	91.5	0.0134	1544.3	3088.6	231.1	
Tasarım-16.1	46.5	91.5	0.0134	725.4	1450.7	108.5	107.5
Tasarım-16.2	46.5	92.0	0.0134	716.3	1432.6	106.6	
Tasarım-16.3	46.5	91.0	0.0133	713.3	1426.7	107.3	
Optimum-1	46.5	92.0	0.0134	1822.2	3644.4	271.2	282.7
Optimum-2	46.5	91.5	0.0134	1901.8	3803.6	284.6	
Optimum-3	46.5	91.5	0.0134	1954.7	3909.4	292.5	

EK-10a: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 1-4)

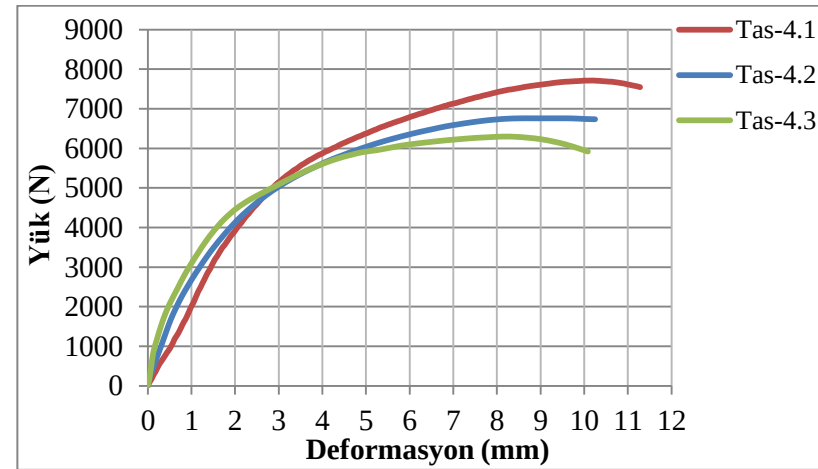
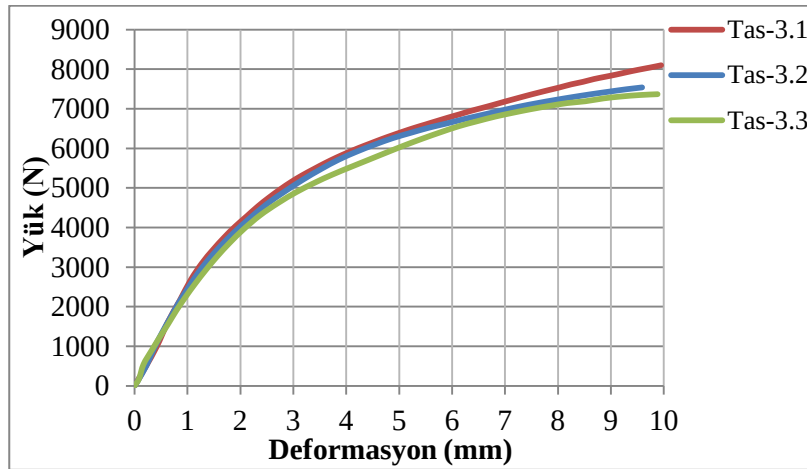
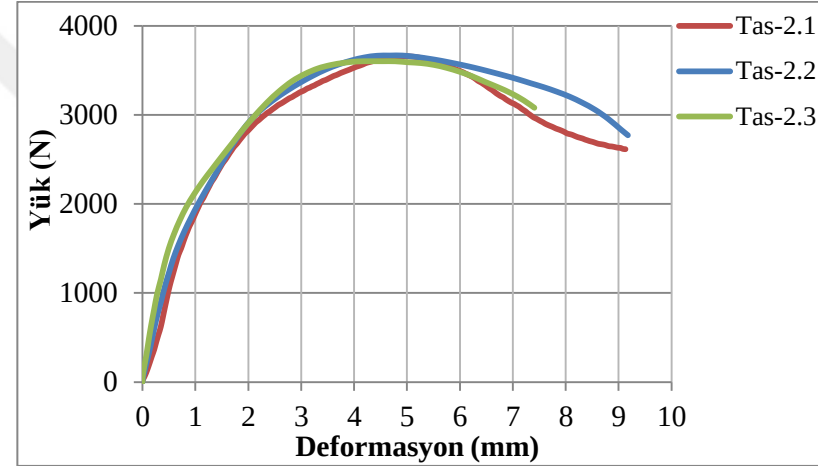
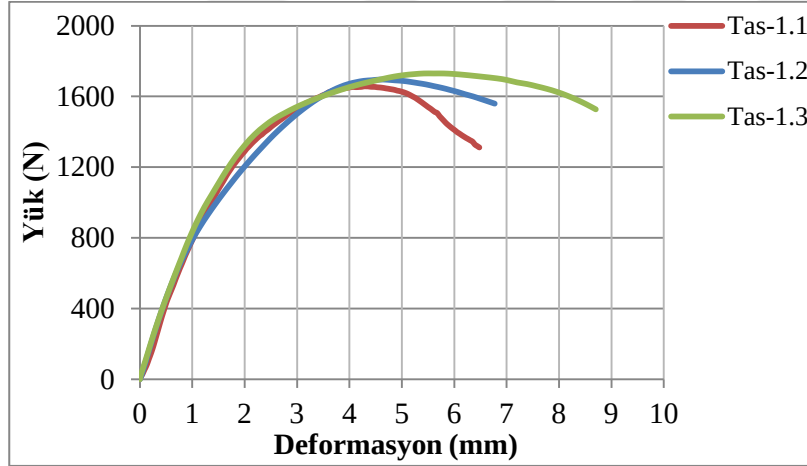
EK-10b: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 5-8)

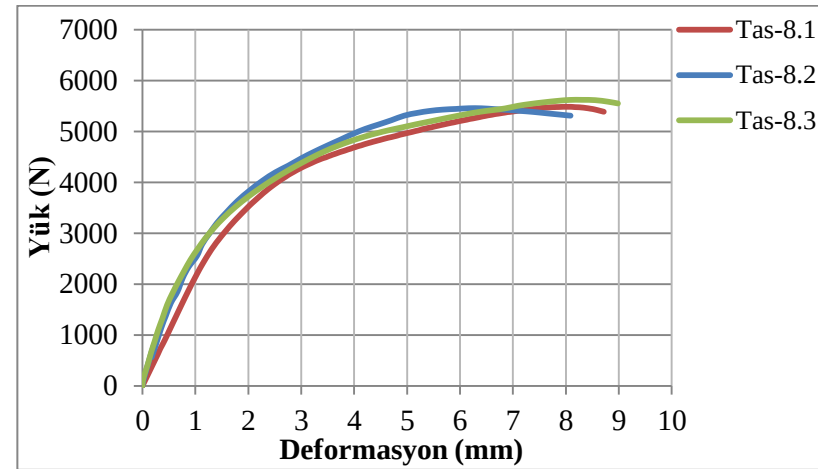
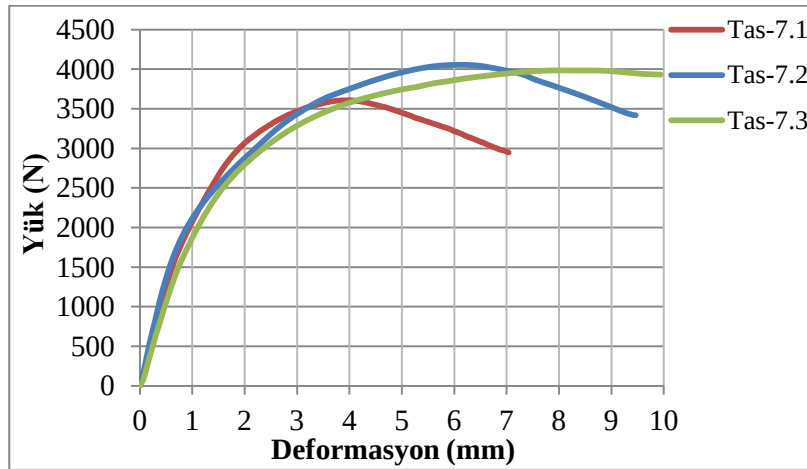
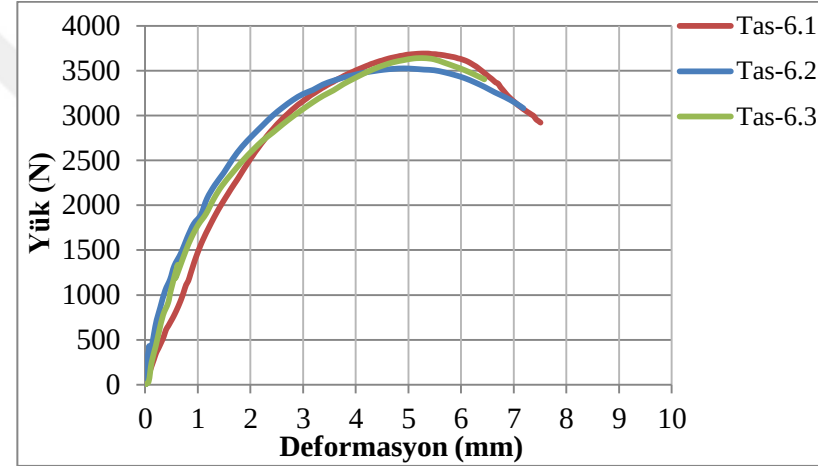
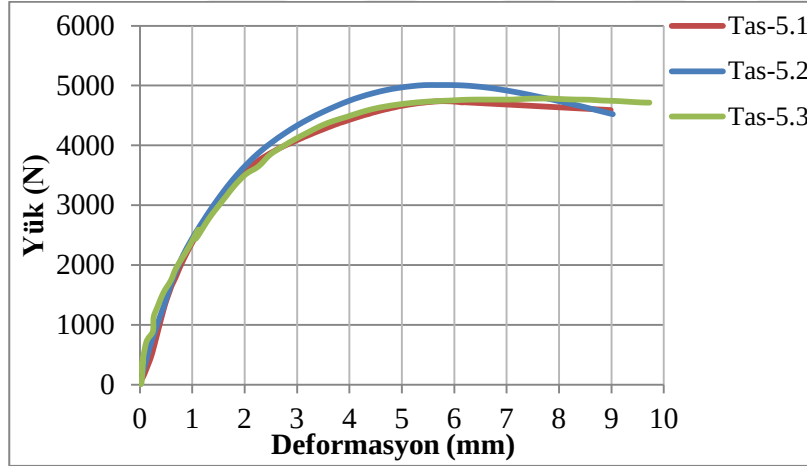
EK-10c: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 9-12)

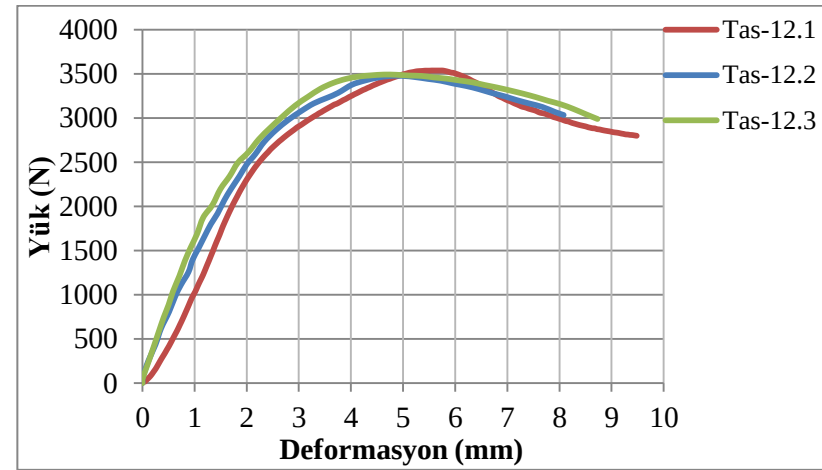
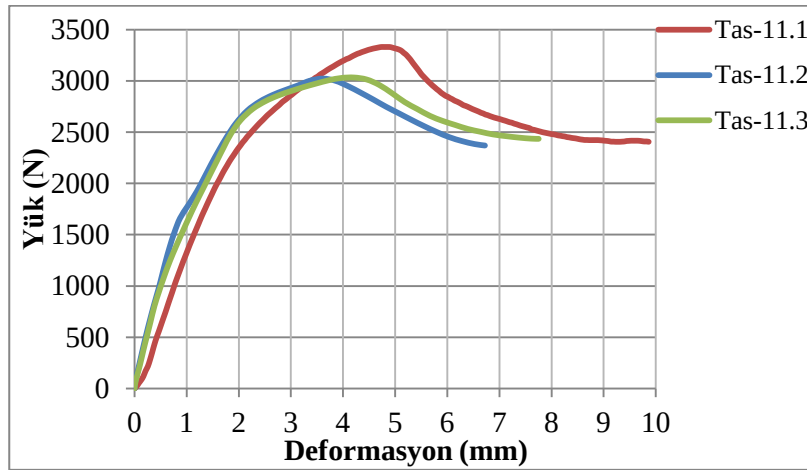
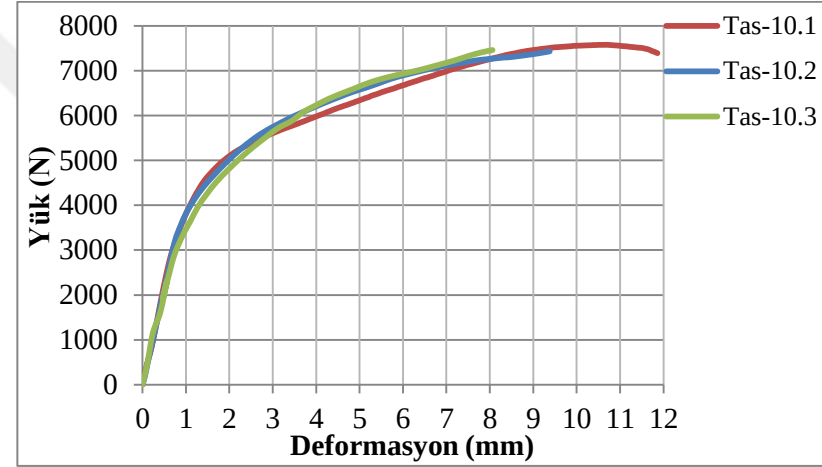
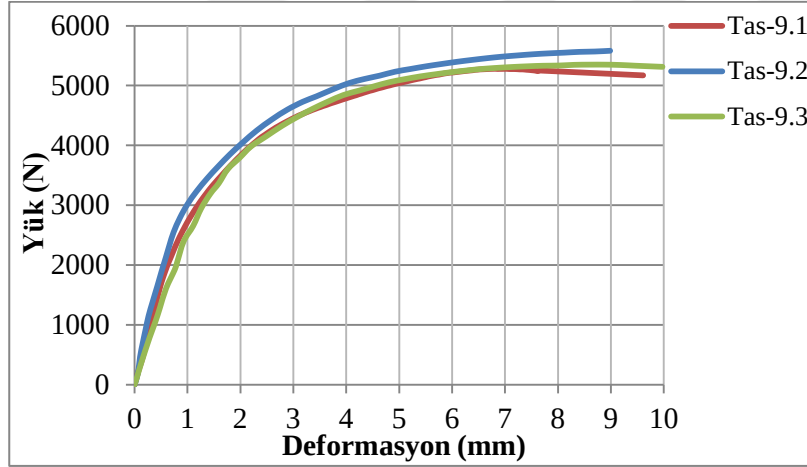
EK-10d: B.F+U.K Katkılı Numunelerin Yarmada Çekme Deney Grafikleri (Tasarım 12-16)

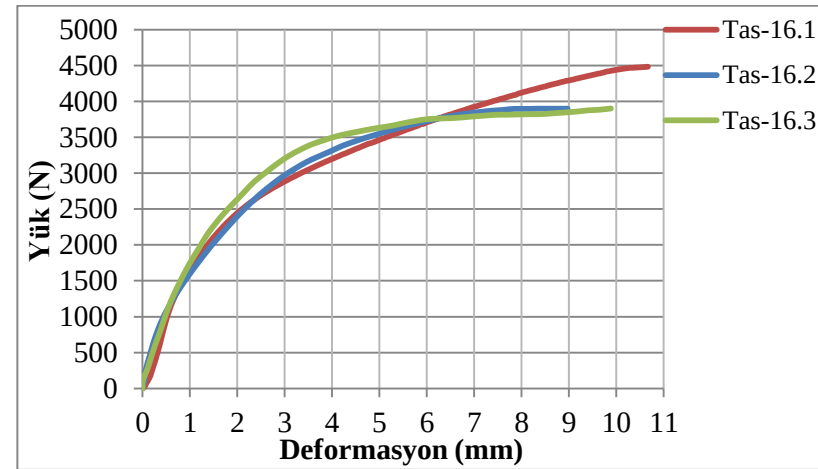
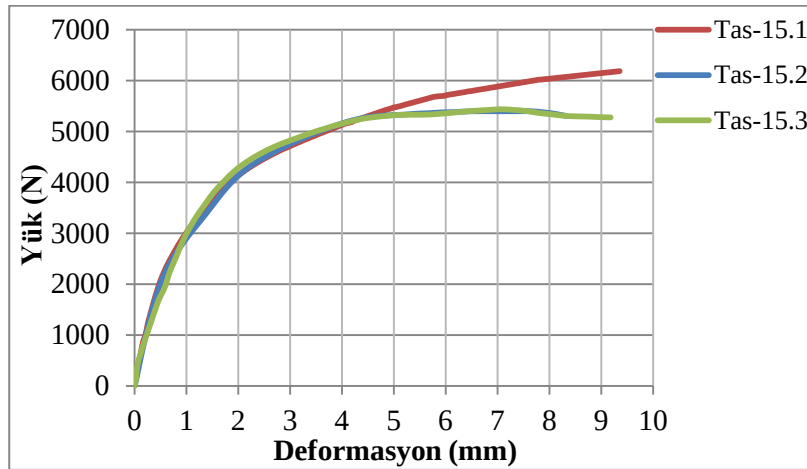
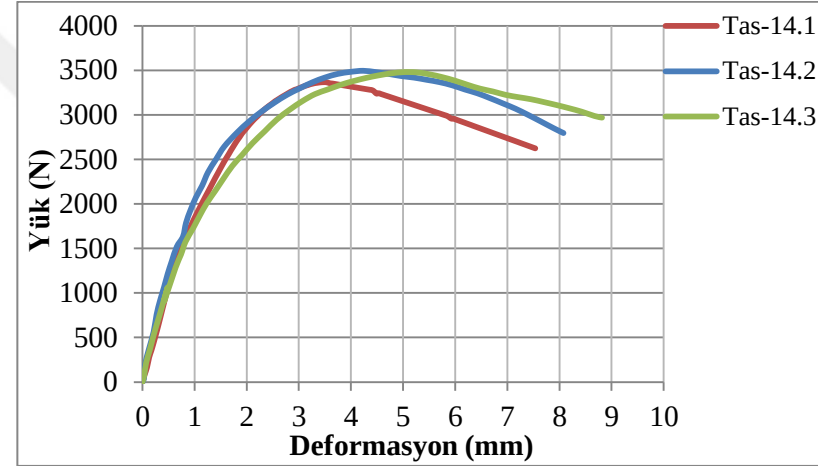
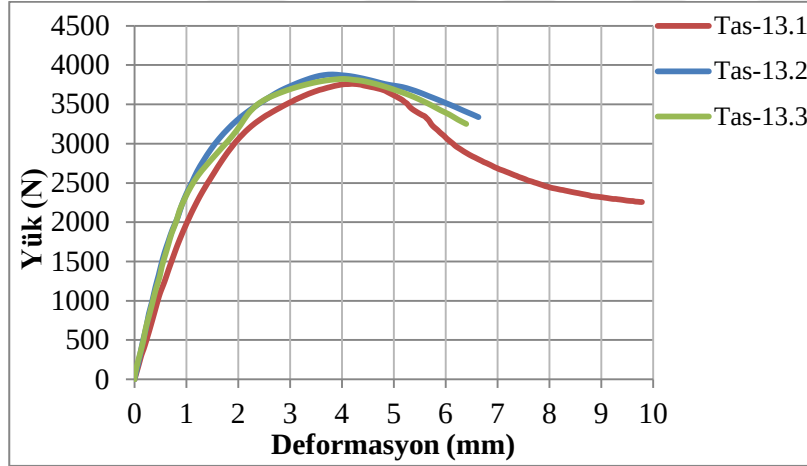
EK-11: B.F+S.D Katkılı Numunelerin CBR Deney Verileri

Numune No	Yük (N) 2.5 mm	Yük (N) 5 mm	Standart Yük 2.5 mm	Standart Yük 5 mm	CBR (%) (2.5 mm)	CBR (%) (5 mm)	Ort
Katkısız-1	349	398	13440	20060	2.596	2.0	2.560
Katkısız-2	323	383	13440	20060	2.402	1.9	
Katkısız-3	360	418	13440	20060	2.682	2.1	
Tasarım-1.1	1427	1627	13440	20060	10.618	8.1	10.542
Tasarım-1.2	1365	1689	13440	20060	10.156	8.4	
Tasarım-1.3	1459	1608	13440	20060	10.852	8.0	
Tasarım-2.1	3080	3656	13440	20060	22.920	18.2	23.499
Tasarım-2.2	3176	3661	13440	20060	23.633	18.2	
Tasarım-2.3	3218	3591	13440	20060	23.943	17.9	
Tasarım-3.1	4715	6389	13440	20060	35.079	31.9	34.058
Tasarım-3.2	4592	6305	13440	20060	34.170	31.4	
Tasarım-3.3	4425	6021	13440	20060	32.925	30.0	
Tasarım-4.1	4589	6365	13440	20060	34.142	31.7	34.756
Tasarım-4.2	4627	6037	13440	20060	34.424	30.1	
Tasarım-4.3	4798	5915	13440	20060	35.700	29.5	
Tasarım-5.1	3875	4663	13440	20060	28.829	23.2	29.185
Tasarım-5.2	4039	4969	13440	20060	30.049	24.8	
Tasarım-5.3	3854	4691	13440	20060	28.677	23.4	
Tasarım-6.1	2897	3679	13440	20060	21.558	18.3	21.774
Tasarım-6.2	3035	3522	13440	20060	22.583	17.6	
Tasarım-6.3	2847	3625	13440	20060	21.180	18.1	
Tasarım-7.1	3302	3448	13440	20060	24.568	17.2	23.684
Tasarım-7.2	3179	3958	13440	20060	23.656	19.7	
Tasarım-7.3	3068	3743	13440	20060	22.826	18.7	
Tasarım-8.1	3964	4965	13440	20060	29.491	24.8	30.315
Tasarım-8.2	4186	5320	13440	20060	31.148	26.5	
Tasarım-8.3	4073	6000	13440	20060	30.307	29.9	
Tasarım-9.1	4200	5041	13440	20060	31.248	25.1	31.577
Tasarım-9.2	4372	5244	13440	20060	32.531	26.1	
Tasarım-9.3	4160	5089	13440	20060	30.952	25.4	
Tasarım-10.1	5381	6339	13440	20060	40.038	31.6	39.861
Tasarım-10.2	5437	6574	13440	20060	40.450	32.8	
Tasarım-10.3	5254	6648	13440	20060	39.094	33.1	
Tasarım-11.1	2638	3318	13440	20060	19.631	16.5	20.488
Tasarım-11.2	2824	2702	13440	20060	21.010	13.5	
Tasarım-11.3	2799	2858	13440	20060	20.823	14.2	
Tasarım-12.1	2669	3494	13440	20060	19.857	17.4	20.859
Tasarım-12.2	2828	3474	13440	20060	21.039	17.3	
Tasarım-12.3	2914	3483	13440	20060	21.682	17.4	
Tasarım-13.1	3343	3614	13440	20060	24.872	18.0	25.907
Tasarım-13.2	3550	3738	13440	20060	26.414	18.6	
Tasarım-13.3	3553	3688	13440	20060	26.435	18.4	
Tasarım-14.1	3132	3151	13440	20060	23.302	15.7	22.716
Tasarım-14.2	3124	3433	13440	20060	23.245	17.1	
Tasarım-14.3	2903	3479	13440	20060	21.603	17.3	
Tasarım-15.1	4463	5471	13440	20060	33.203	27.3	33.599
Tasarım-15.2	4486	5321	13440	20060	33.378	26.5	
Tasarım-15.3	4599	5315	13440	20060	34.217	26.5	
Tasarım-16.1	2691	3462	13440	20060	20.024	17.3	20.739
Tasarım-16.2	2716	3549	13440	20060	20.208	17.7	
Tasarım-16.3	2955	3633	13440	20060	21.986	18.1	

EK-12a: B.F+S.D Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 1-4)

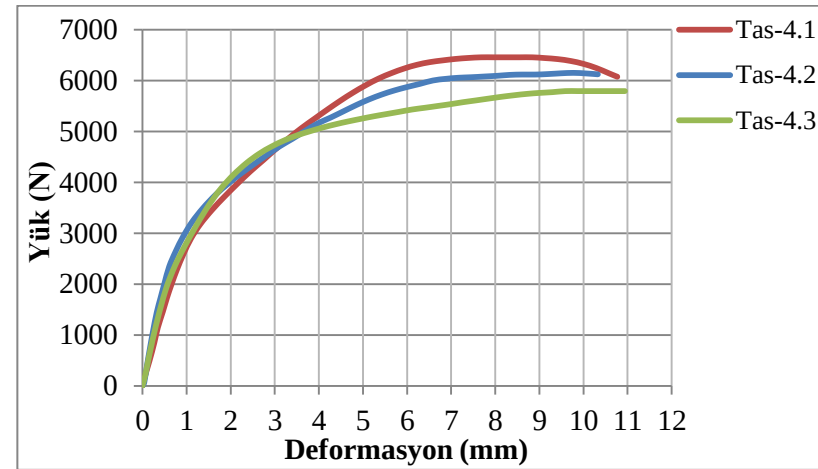
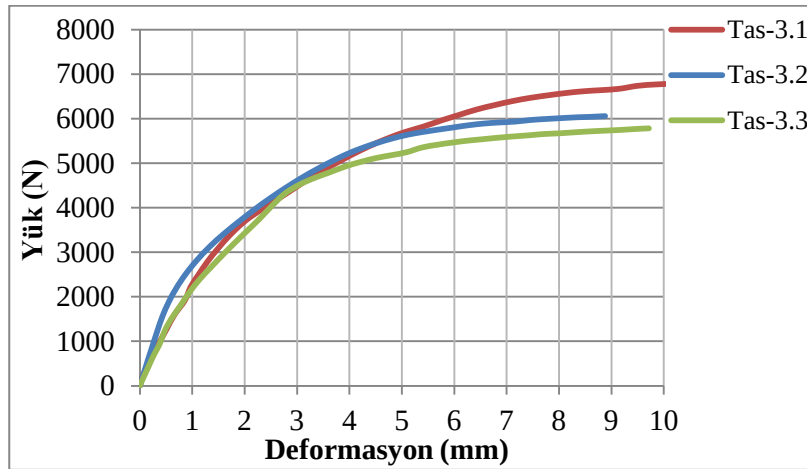
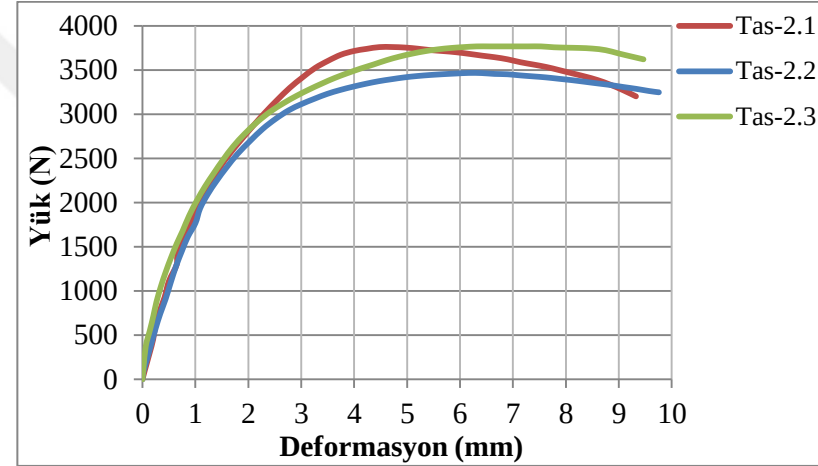
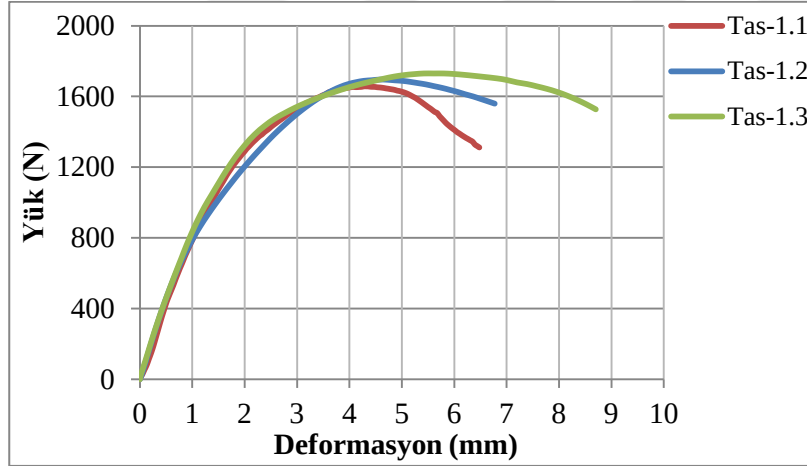
EK-12b: B.F+S.D Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 5-8)

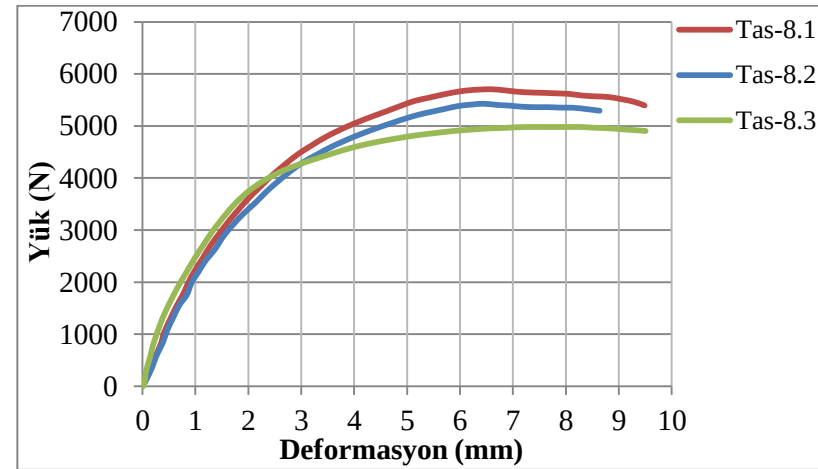
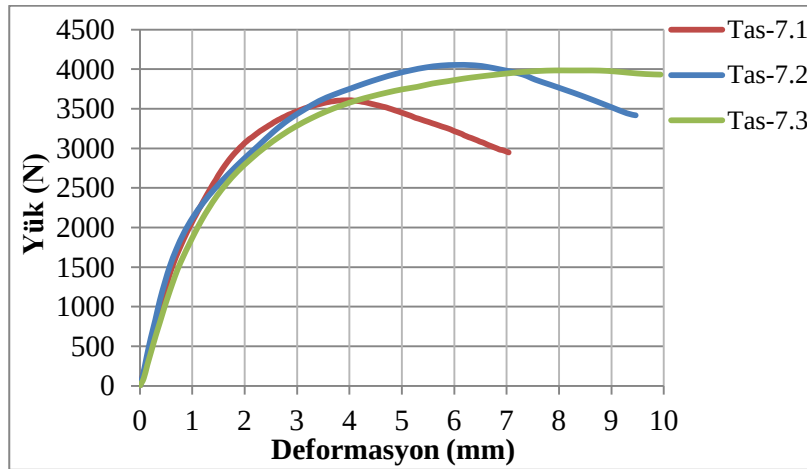
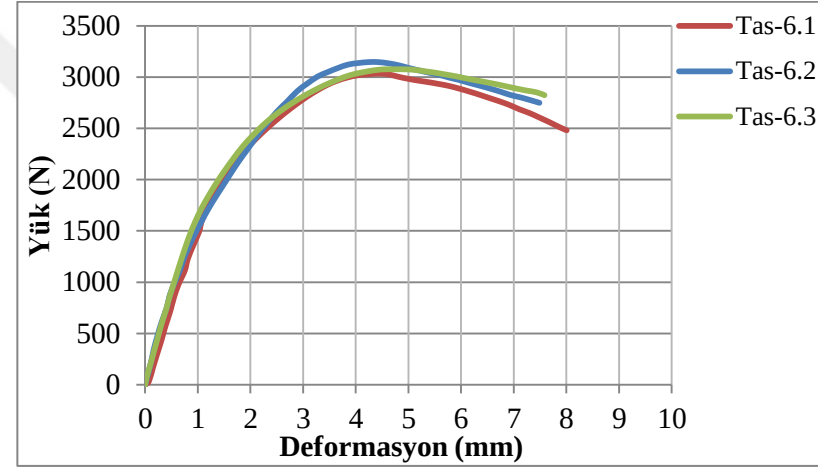
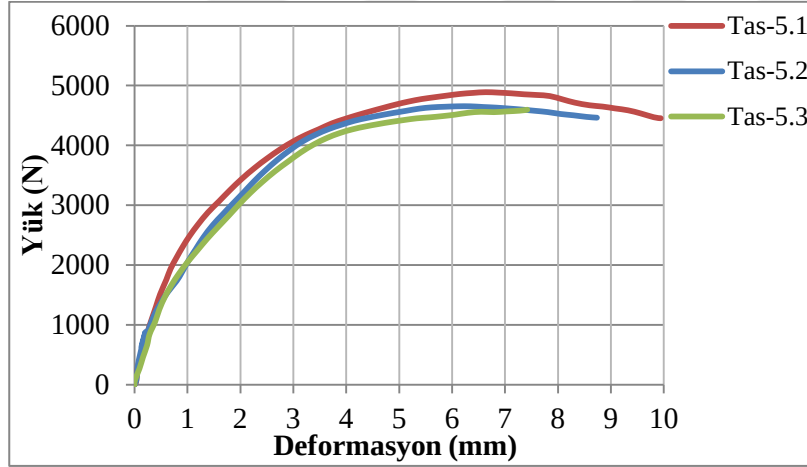
EK-12c: B.F+S.D Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 9-12)

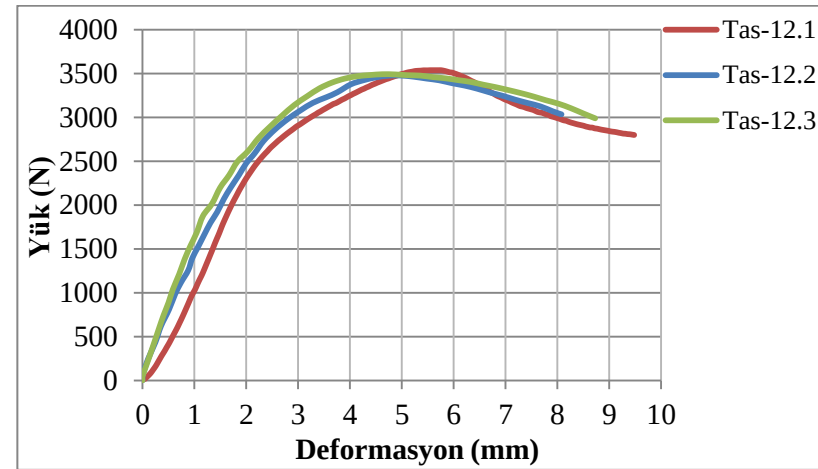
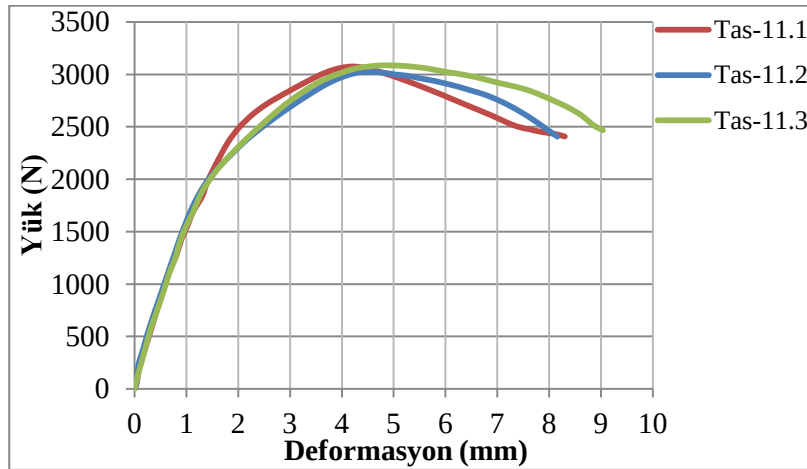
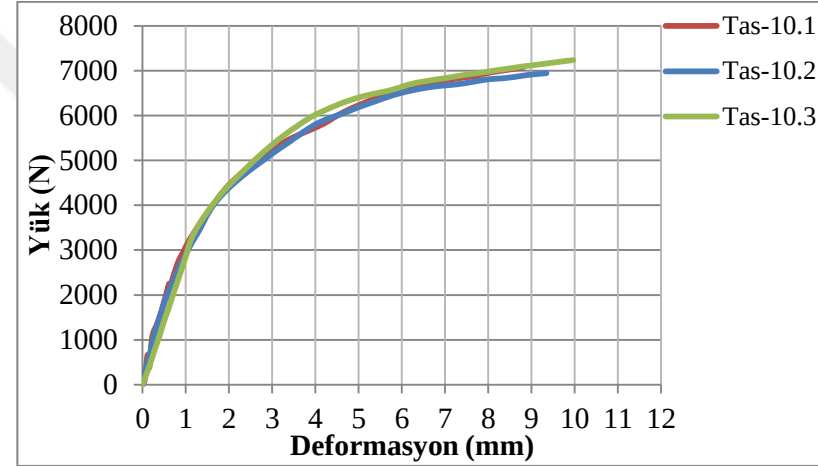
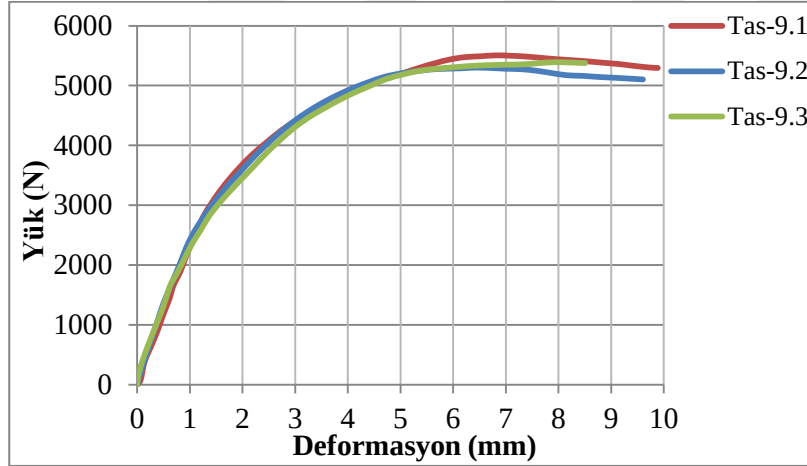
EK-12d: B.F+S.D Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 12-16)

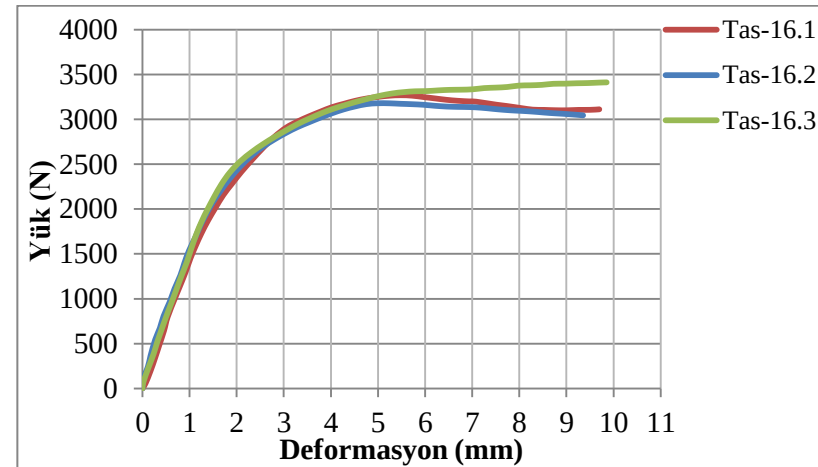
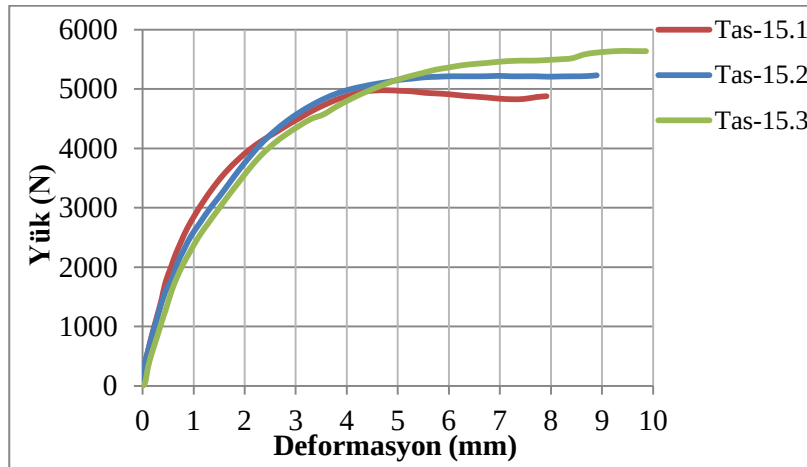
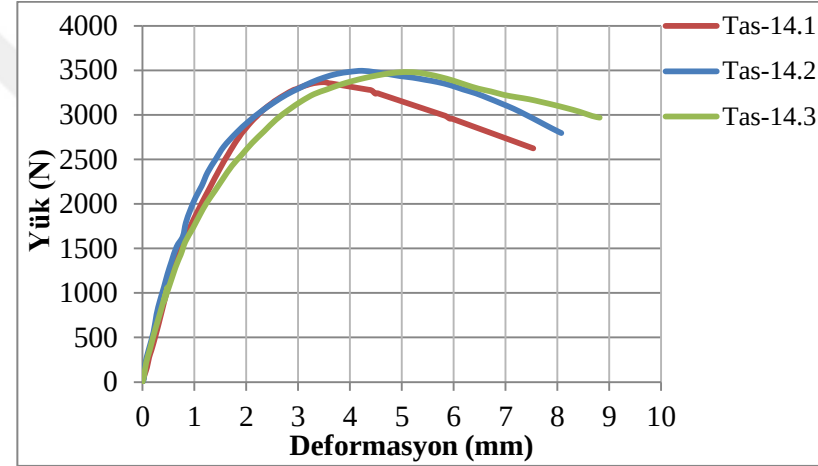
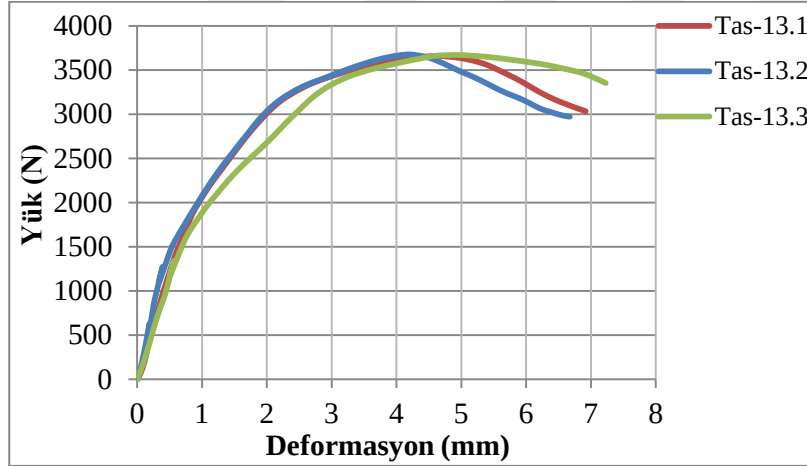
EK-13: B.F+U.K Katkılı Numunelerin CBR Deney Verileri

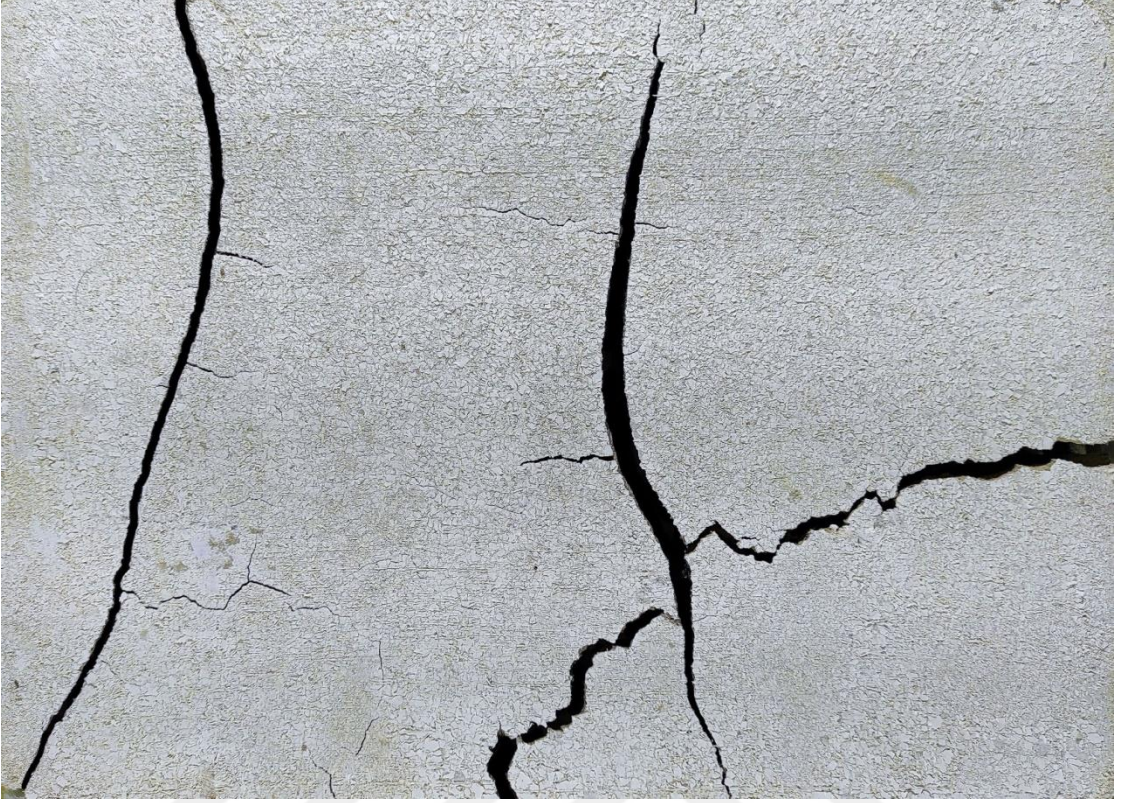
Numune No	Yük (N) 2.5 mm	Yük (N) 5 mm	Standart Yük 2.5 mm	Standart Yük 5 mm	CBR (%) (2.5 mm)	CBR (%) (5 mm)	Ort
Katkısız-1	348	397.84874	13440	20060	2.596	2.0	2.560
Katkısız-2	323	383	13440	20060	2.402	1.9	
Katkısız-3	360	418	13440	20060	2.682	2.1	
Tasarım-1.1	1427	1627	13440	20060	10.618	8.1	10.542
Tasarım-1.2	1365	1689	13440	20060	10.156	8.4	
Tasarım-1.3	1459	1608	13440	20060	10.852	8.0	
Tasarım-2.1	3132	3752	13440	20060	23.305	18.7	22.650
Tasarım-2.2	2939	3419	13440	20060	21.869	17.0	
Tasarım-2.3	3061	3672	13440	20060	22.776	18.3	
Tasarım-3.1	4094	5673	13440	20060	30.465	28.3	30.593
Tasarım-3.2	4224	5607	13440	20060	31.425	28.0	
Tasarım-3.3	4017	5224	13440	20060	29.889	26.0	
Tasarım-4.1	4254	5874	13440	20060	31.653	29.3	32.387
Tasarım-4.2	4338	5678	13440	20060	32.280	28.3	
Tasarım-4.3	4466	5254	13440	20060	33.229	26.2	
Tasarım-5.1	3779	4696	13440	20060	28.118	23.4	26.879
Tasarım-5.2	3605	4559	13440	20060	26.825	22.7	
Tasarım-5.3	3453	4412	13440	20060	25.692	22.0	
Tasarım-6.1	2584	2982	13440	20060	19.224	14.9	19.560
Tasarım-6.2	2662	3088	13440	20060	19.807	15.4	
Tasarım-6.3	2641	3073	13440	20060	19.648	15.3	
Tasarım-7.1	3302	3448	13440	20060	24.568	17.2	23.684
Tasarım-7.2	3179	3958	13440	20060	23.656	19.7	
Tasarım-7.3	3068	3743	13440	20060	22.826	18.7	
Tasarım-8.1	4096	5431	13440	20060	30.479	27.1	29.866
Tasarım-8.2	3881	5154	13440	20060	28.880	25.7	
Tasarım-8.3	4064	4794	13440	20060	30.238	23.9	
Tasarım-9.1	4083	4329	13440	20060	30.377	21.6	29.870
Tasarım-9.2	4048	4503	13440	20060	30.121	22.4	
Tasarım-9.3	3913	4370	13440	20060	29.112	21.8	
Tasarım-10.1	4881	6227	13440	20060	36.318	31.0	36.186
Tasarım-10.2	4793	6183	13440	20060	35.661	30.8	
Tasarım-10.3	4916	6398	13440	20060	36.579	31.9	
Tasarım-11.1	2701	2981	13440	20060	20.098	14.9	19.226
Tasarım-11.2	2510	3001	13440	20060	18.675	15.0	
Tasarım-11.3	2541	3085	13440	20060	18.905	15.4	
Tasarım-12.1	2669	3494	13440	20060	19.857	17.4	20.859
Tasarım-12.2	2828	3474	13440	20060	21.039	17.3	
Tasarım-12.3	2914	3483	13440	20060	21.682	17.4	
Tasarım-13.1	3278	3631	13440	20060	24.392	18.1	23.854
Tasarım-13.2	3292	3479	13440	20060	24.492	17.3	
Tasarım-13.3	3048	3668	13440	20060	22.678	18.3	
Tasarım-14.1	3132	3151	13440	20060	23.302	15.7	22.716
Tasarım-14.2	3124	3433	13440	20060	23.245	17.1	
Tasarım-14.3	2903	3479	13440	20060	21.603	17.3	
Tasarım-15.1	4213	4970	13440	20060	31.345	24.8	30.898
Tasarım-15.2	4222	5148	13440	20060	31.412	25.7	
Tasarım-15.3	4023	5157	13440	20060	29.936	25.7	
Tasarım-16.1	2647	3249	13440	20060	19.696	16.2	19.885
Tasarım-16.2	2669	3178	13440	20060	19.860	15.8	
Tasarım-16.3	2701	3259	13440	20060	20.099	16.2	

EK-14a: B.F+U.K Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 1-4)

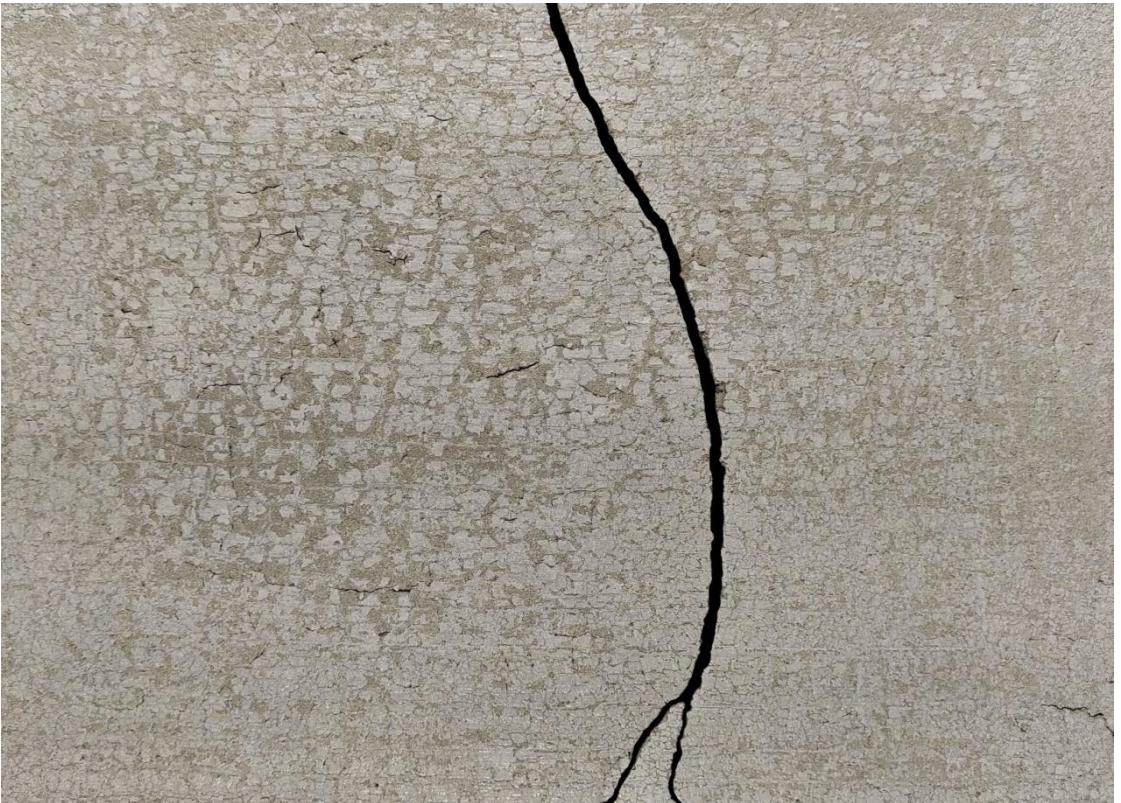
EK-14b: B.F+U.K Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 5-8)

EK-14c: B.F+U.K Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 9-12)

EK-14d: B.F+U.K Katkılı Numunelerin CBR Deney Grafikleri (Tasarım 12-16)

EK-15: Kuruma Çatlağı Deneyi 2.Çevrim Sonunda Çekilen Fotoğraflar

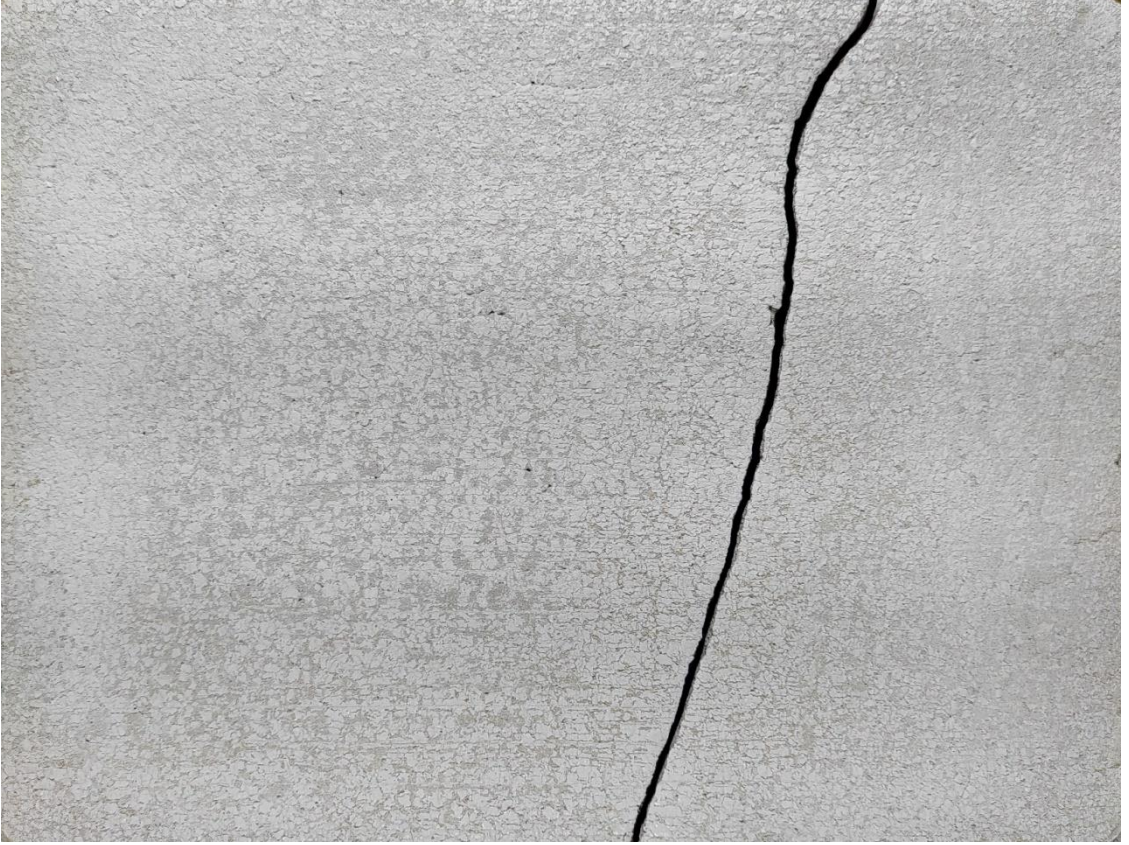
Şekil Ek 15.1. Zemin+%3 Kireç katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.2. Zemin+%3 Kireç+%5 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.3. Zemin+%3 Kireç+%10 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.4. Zemin+%3 Kireç+%15 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.5. Zemin+%3 Kireç+%5 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.6. Zemin+%3 Kireç+%10 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.7. Zemin+%3 Kireç+%15 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



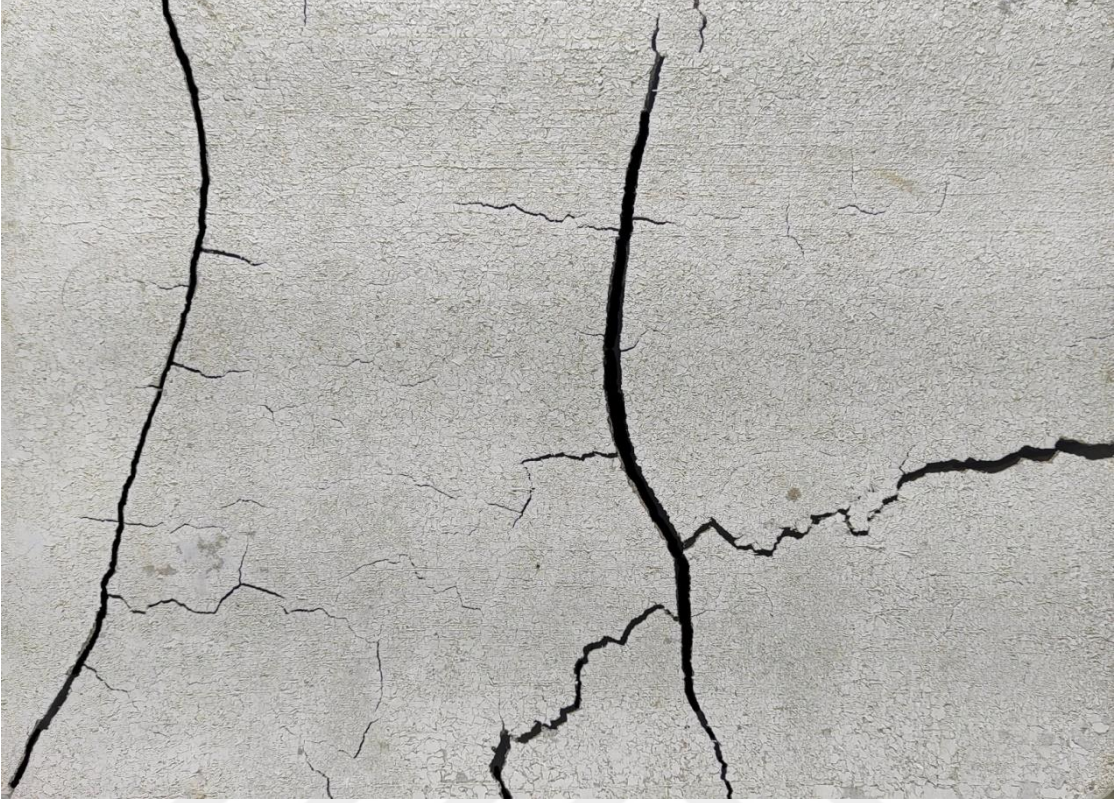
Şekil Ek 15.8. Zemin+%0.5 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.9. Zemin+%1 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)



Şekil Ek 15.10. Zemin+%1.5 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (2.Çevrim)

EK-16: Kuruma Çatlağı Deneyi 3.Çevrim Sonunda Çekilen Fotoğraflar

Şekil Ek 16.1. Zemin+%3 Kireç katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)



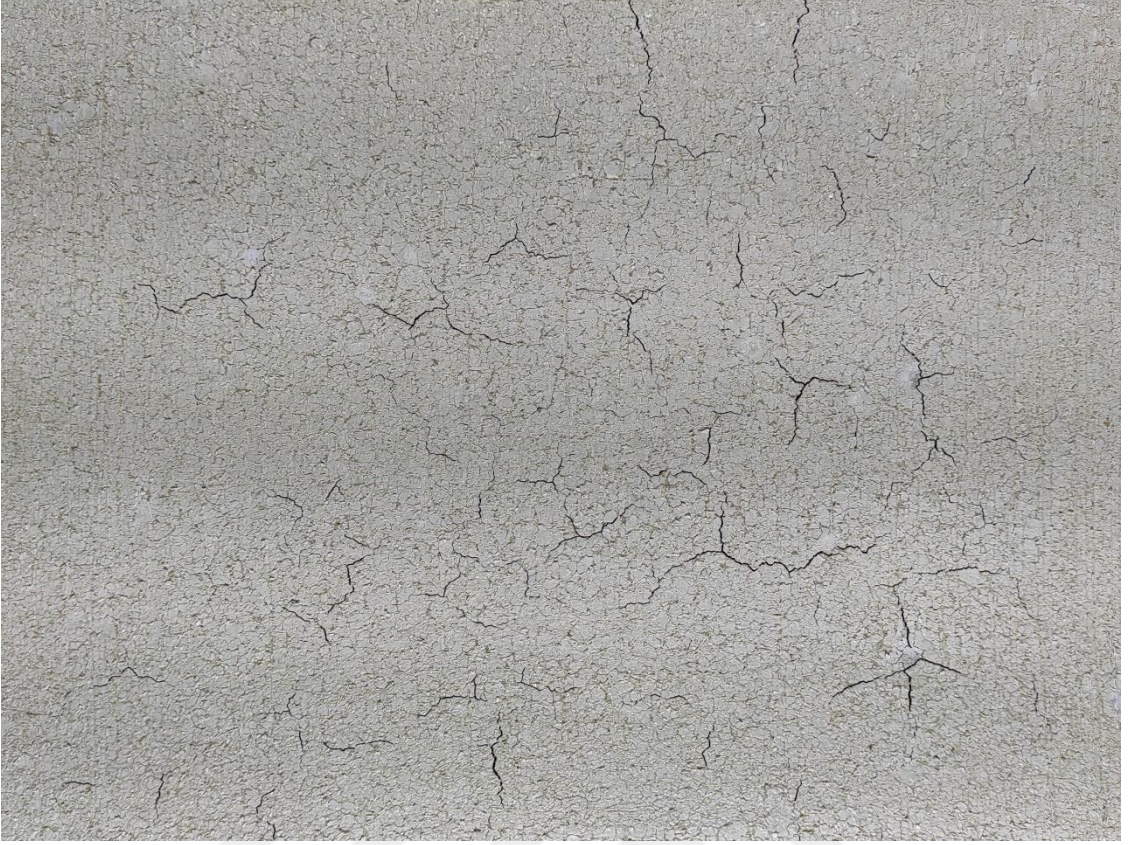
Şekil Ek 16.2. Zemin+%3 Kireç+%5 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)



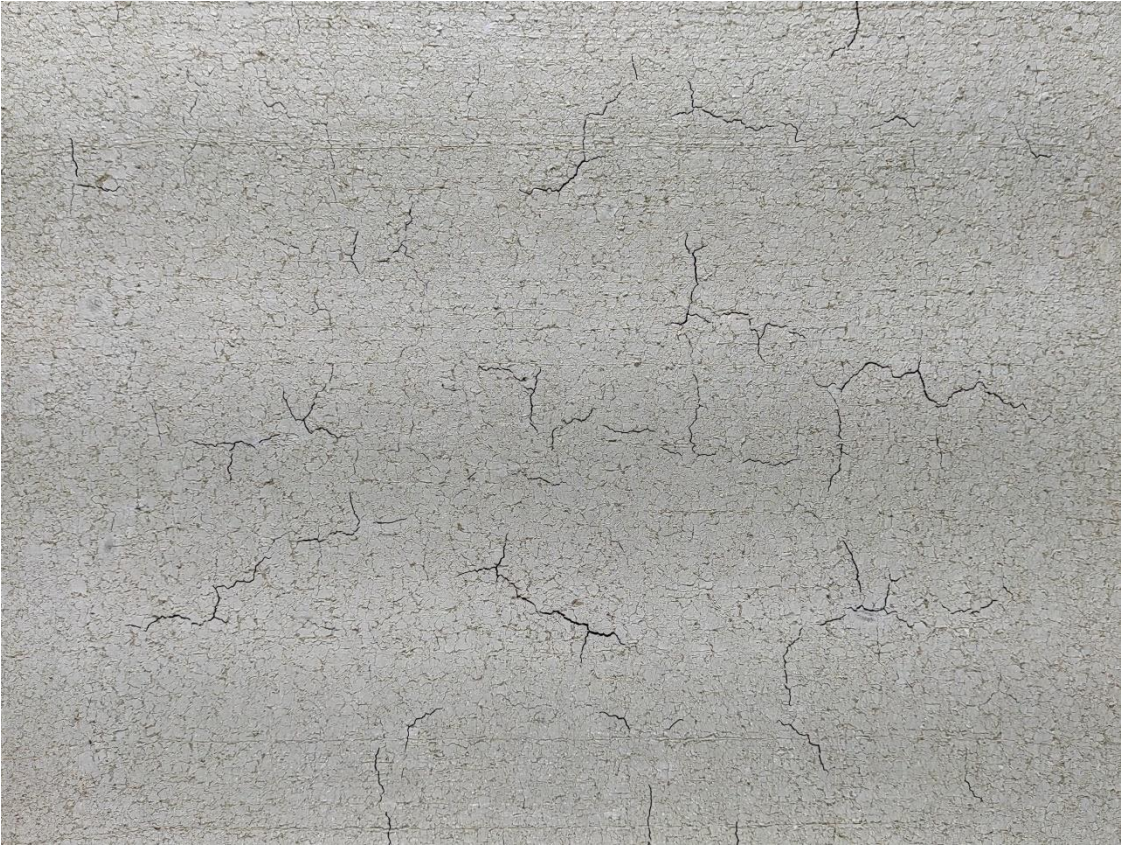
Şekil Ek 16.3. Zemin+%3 Kireç+%10 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)



Şekil Ek 16.4. Zemin+%3 Kireç+%15 UK katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)



Şekil Ek 16.5. Zemin+%3 Kireç+%5 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)



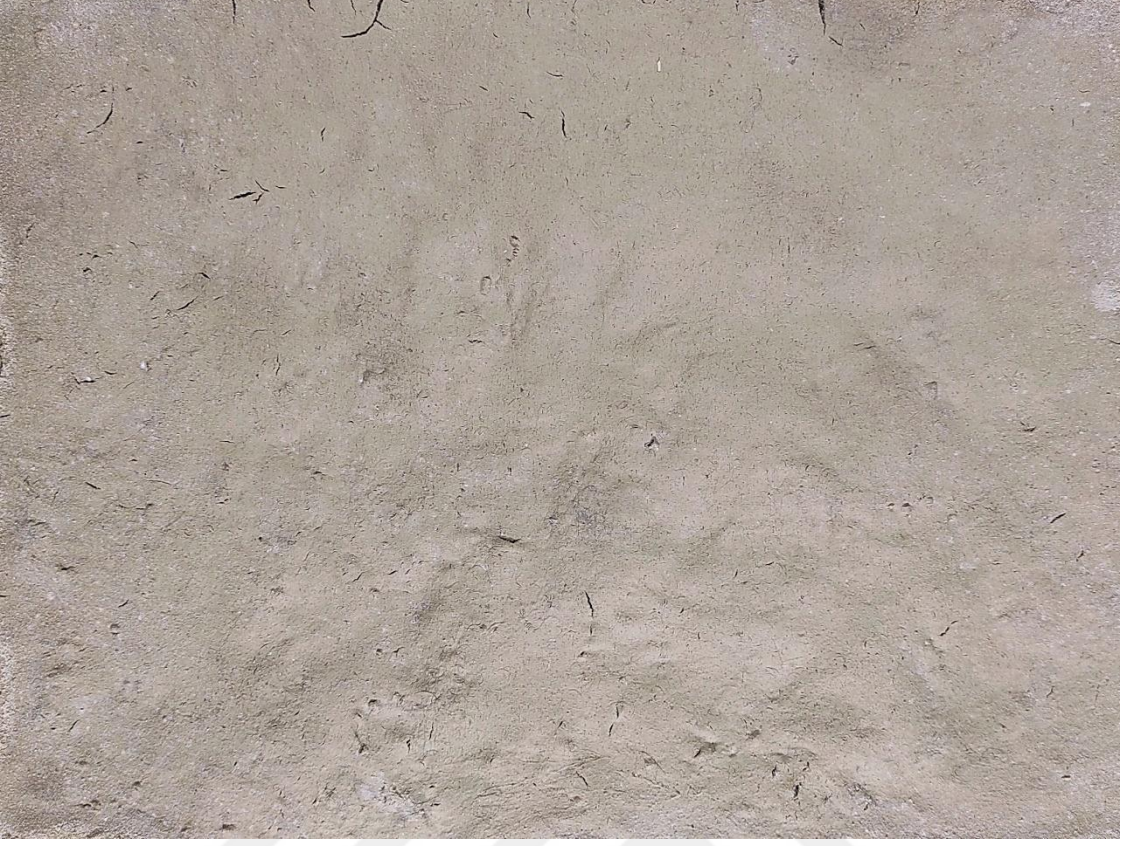
Şekil Ek 16.6. Zemin+%3 Kireç+%10 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)



Şekil Ek 16.7. Zemin+%3 Kireç+%15 SD katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)



Şekil Ek 16.8. Zemin+%0.5 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)

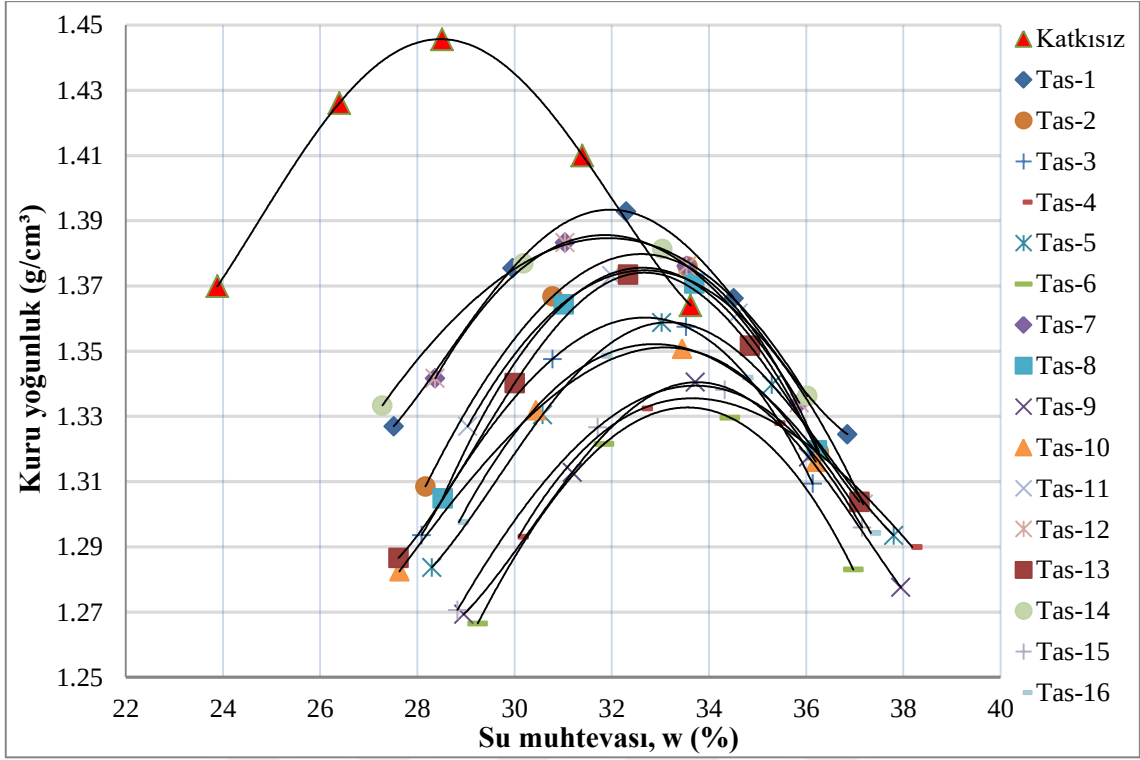


Şekil Ek 16.9. Zemin+%1 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)

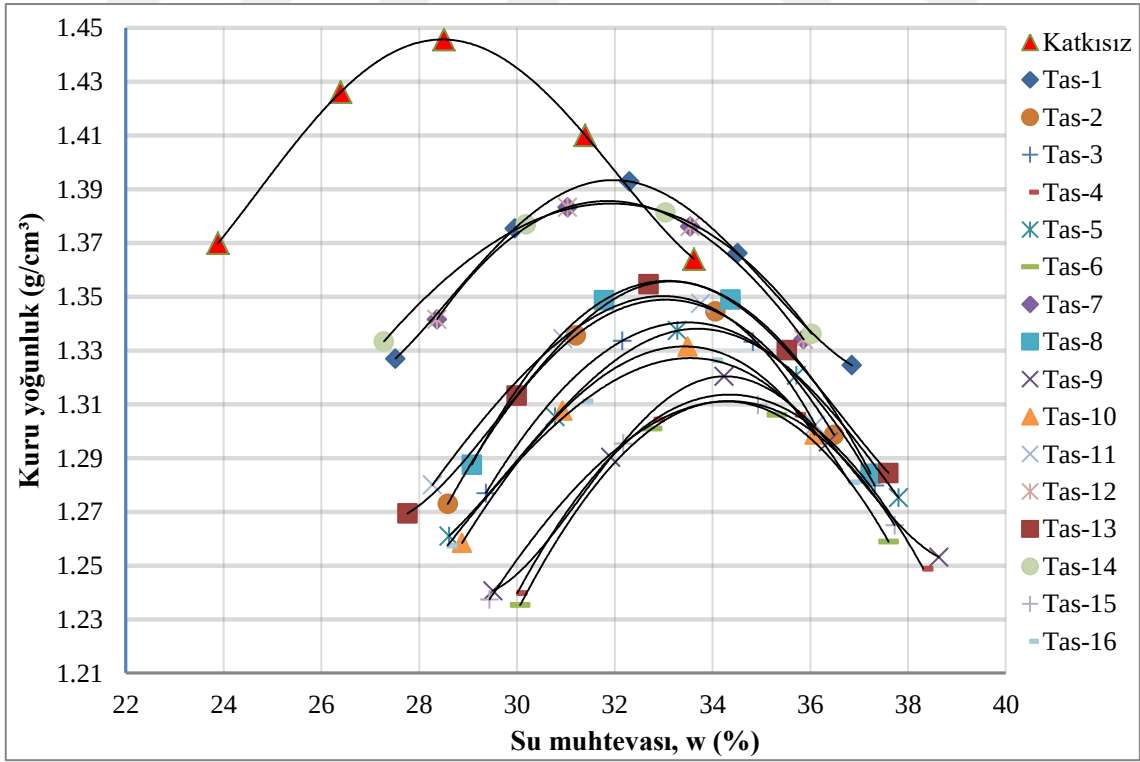


Şekil Ek 16.10. Zemin+%1.5 BF (18 mm) katkılı numunenin 8.hafta fotoğrafı (3.Çevrim)

EK-17: Tüm Karışımların Kompaksiyon Eğrileri



Şekil Ek 17.1. Katkısız ve katkılı numunelere ait kompaksiyon eğrileri (BF+SD)



Şekil Ek 17.2. Katkısız ve katkılı numunelere ait kompaksiyon eğrileri (BF+UK)