



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÜVYAL ZEMİNLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE
İYİLEŞTİRİLMESİNDE TÜF VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

OĞULCAN BARTU ÇETİN

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ERMEDİN TOTİÇ**

BARTIN-2022



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALÜVYAL ZEMİNLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE
İYİLEŞTİRİLMESİNDE TÜF VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğulcan Bartu ÇETİN

BARTIN-2022

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ danışmanlığında hazırlamış olduğum “ALÜVYAL ZEMİNLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE TÜF VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı Yüksek Lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

21/11/2022

Oğulcan Bartu ÇETİN

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Şahsım üzerindeki emeklerinin tartışılmaz olduğu annem Vecihe ÇETİN'e ve babam Ali Jeyan ÇETİN'e, gerçekleştirdiğimiz tüm çalışmalarda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Ermedin TOTİÇ'e, deneysel çalışmaların gerçekleşmesi için olanak sağlayan İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve çalışmanın gerçekleşmesi için maddi destek veren (2021-FEN-CY-007 nolu BAP) Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi nezdinde Bartın Üniversitesi Rektörlüğüne, teşekkürlerimi sunarım.

Oğulcan Bartu ÇETİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜVYAL ZEMİNLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE TÜF VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Oğulcan Bartu ÇETİN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ

Bartın-2022, sayfa: 65

Düşük ile orta yüklere maruz kalan yapılar için zemin iyileştirme projelerinde derin karıştırma yönteminin kullanımı, uygulama kolaylığı ve ekonomik olmasından dolayı son yıllarda artmıştır. Derin karıştırma yöntemi için Portland Çimentosu ve kireç en popüler bağlayıcılardır. Bu bağlayıcıların üretim maliyetleri ve üretimi sırasında çevrede oluşturdukları tahribatlar nedeniyle, karbondioksit emisyonu düşük, çevre dostu alternatif bağlayıcıların üretimi için arayışlar hız kazanmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar endüstriyel atık malzemeler üzerinde odaklanırken atık zemin durumundaki volkanik tüf gibi malzemelerin kullanılabilirliği üzerine çalışma yapılmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmada Bartın zayıf alüvyal zeminlerin derin karıştırma yöntemi uygulanarak iyileştirilmesinde atık durumundaki volkanik tüf ile yüksek fırın cürufunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Üretilen volkanik tüf ve yüksek fırın cürufu esaslı bağlayıcı, Bartın alüvyal zeminine kütlece %10, %20 ve %30 oranında karıştırılarak deney numuneler oluşturulmuştur. Zeminin arazideki durumu göz önüne alınarak numunelerin su içeriği likit limit değerinin %75, %100 ve %125'i olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan numuneler 7, 28, 56 ve 90 gün süresince hem $23\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki nemli ortamda hem de su içerisinde olmak üzere iki farklı koşulda kür edilmiştir. Numunelerin mühendislik

davranışındaki ve mikro yapısındaki değışiklikleri değlendirmek için eğilme dayanımı deneyi ve serbest basınç dayanımı deneyi ile SEM, XRD ve DTA-TG analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aynı şartlarda hazırlanmış geleneksel bağlayıcı içeriğine sahip referans numuneleri ile karşılaştırılarak değlendirilmiştir. Sonuçlar, volkanik tuf ile yüksek fırın cürufu içerikli numunelerin aynı şartlarda hazırlanmış çimento katkılı numunelere kıyasla daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek fırın cürufu, Alkali aktivatör, Tuf, Düşük plastisiteli kil, Zemin iyileştirilme, Derin karıştırma

Bilim Alanı Kodu: 91105



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

RESEARCH ON THE USE OF STUFF AND BAKERY SLAG IN IMPROVEMENT OF ALLUVIAL FLOORS BY DEEP BLENDING PROCESSES

Oğulcan Bartu ÇETİN

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Ermedin TOTİÇ

Bartın-2022, pp: 65

The use of deep mixing method in soil improvement projects for structures exposed to low to medium loads has increased in recent years due to its ease of application and economy. Portland Cement and lime are the most popular binders for the deep mixing method. Due to the production costs of these binders and the damage they cause to the environment during production, the search for the production of environmentally friendly alternative binders with low carbon dioxide emissions has accelerated. While the studies conducted in this direction focus on industrial waste materials, it has been observed that no study has been carried out on the usability of materials such as volcanic tuff in the waste ground state. In this study, the usability of waste volcanic tuff and blast furnace slag in the improvement of Bartın weak alluvial soils by applying deep mixing method was investigated. The test samples were formed by mixing the produced binder based on volcanic tuff and blast furnace slag on the Bartın alluvial ground at the rate of 10%, 20% and 30% by mass. Considering the condition of the soil in the field, the water content of the samples was adjusted to be 75%, 100% and 125% of the liquid limit value. The prepared samples were cured for 7, 28, 56 and 90 days in two different conditions, both in a humid environment at $23\pm1^{\circ}\text{C}$ and in water. In order to evaluate the changes in the engineering behavior and microstructure of the samples, flexural strength test and

unconfined compressive strength test and SEM, XRD and DTA-TG analyzes were performed. The results obtained were evaluated by comparing them with reference samples with conventional binder content prepared under the same conditions. The results showed that samples containing volcanic tuff and blast furnace slag outperformed samples with cement additive prepared under the same conditions.

Keywords: Blast furnace slag, Alkaline activator, Tuff, Low plasticity clay, Soil improvement, Deep mixing

Scientific Field Code: 91105



İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. ZEMİN İYİLEŞTİRME	7
3.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	8
3.1.1 Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri	8
3.1.1.1 Önyükleme Yöntemi.....	8
3.1.1.2 Kum Drenleri Yöntemi	9
3.1.1.3 Dinamik Kompaksiyon Yöntemi.....	9
3.1.1.4 Vibrokompaksiyon Yöntemi	9
3.1.1.5 Taş Kolonlar	10
3.1.1.6 Enjeksiyon Teknikleri.....	10
3.1.2 Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	11
3.1.2.1 Drenaj Yöntemi	11
3.1.2.2 Kompaksiyon Yöntemi.....	13
3.1.2.3 Çimento ile Stabilizasyon.....	13
3.1.2.4 Kireç ile Stabilizasyon.....	14
3.1.2.5 Bitüm ile Stabilizasyon.....	14
4. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ	15
4.1 Tarihsel Gelişimi	16
4.2 Uygulama Şekilleri ve Alanları.....	17
4.3 Avantajları ve Dezavantajları.....	18
4.4 Bağlayıcı Türleri	19
4.4.1 Kireç	19
4.4.2 Çimento	20
4.5. Mühendislik Özellikleri.....	20

4.5.1 Mukavemet	20
4.5.2 Elastisite Modülü.....	22
4.5.3 Poisson Oranı.....	22
4.5.4 Permeabilite	23
5. MATERYAL VE YÖNTEM	24
5.1 Kullanılan Malzemeler	24
5.1.1 Kil (K).....	24
5.1.2 Volkanik Tüf (VT)	25
5.1.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	26
5.1.4 Çimento (PÇ)	28
5.1.5 Sodyum Hidroksit (SH)	29
5.1.6 Sodyum Silikat (SS)	30
5.1.7 Karışım Suyu (W)	30
5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Deneysel Çalışmalar	30
5.2.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	31
5.2.1.1 Bağlayıcı Harcın İçeriğinin Belirlenmesi	31
5.2.1.2 Deney Numunelerinin Üretilmesi.....	33
5.2.2 Serbest Basınç Deneyi.....	35
5.2.3 Eğilme Deneyi.....	35
5.2.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemesi.....	36
5.2.5 X-Işını Difraktometrisi (XRD) Analizi.....	37
5.2.6 DTA-TG Analizi.....	38
6. BULGULAR	40
6.1 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	40
6.2 Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	46
6.3 Serbest Basınç ve Eğilme Dayanımı Deney Sonuçlarının İlişkisi	49
6.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemeleri	49
6.4. X-Işını Difraktometrisi (XRD) Analizi Sonuçları.....	54
6.5 Termogravimetrik (DTA-TG) Analizi Sonuçları.....	55
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
4.1: Derin karıştırma yöntemi uygulaması.....	15
4.2: Derin karıştırma sistemi	15
4.3: Derin karıştırma uygulama şekilleri.....	17
5.1: Çalışmada kullanılan zemine ait a) genel görünümü b) SEM görünümü	25
5.2: Çalışmada kullanılan VT ait a) genel görünümü b) SEM görünümü	26
5.3: Çalışmada kullanılan YFC ait a) genel görünümü b) SEM Görünümü	27
5.4: Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin tane dağılım eğrileri.....	28
5.5: Çalışmada kullanılan sodyum hidroksite ait genel görünüm	30
5.6: Karışım hazırlama sırasında a) kullanılan ekipmanlar b) harcın hazırlanması c) 24 saat bekleme d) numunelerin kür hazırlığı e) kür ortamı	32
5.7: a) Laboratuvar tipi mikser b) deney karışımı c) basınç deneyi numunesinin kalıba yerleştirilmesi d) eğilme deneyi numunelerinin kalıplara yerleştirilmesi e) deney numunelerinin su kaybının engellenmesi için plastik film ile sarılması f) nemli kür ortamı g) sualtı kür ortamı.....	34
5.8: a) Serbest basınç deneyi b) deney sonucu kırılan bir numune örneği.....	35
5.9: a) Eğilme dayanımı deneyi b) deney sonucu kırılan bir numune örneği	36
5.10: SEM analizi cihazı	37
5.11: XRD analizi cihazı	38
5.12: DTA-TG analizi cihazı.....	39
6.1: a) 0.75 LL, b) 1.0 LL, c) 1.25 LL' lik su içerikleri ile d) sualtında kürlen numunelerin kür süresi-serbest basınç dayanımı ilişkisi (10, 20, 30 katkı oranı, R referans numunelerini ifade etmektedir).	43
6.2: VT+YFC bazlı ile referans numunelerine ait serbest basınç dayanımları ve elastisite modülü arasındaki ilişki	45
6.3: a) 0.75 LL, b) 1.0 LL, c) 1.25 LL'lik su içerikleri ile d) sualtında kürlen numunelerin kür süresi-eğilme dayanımı ilişkisi.	47
6.4: Serbest basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi.....	49
6.5: 28 ile 90 günlük karışım numunelere ait SEM görüntüleri.....	51
6.6: 28 günlük karışım numunelere ait XRD desenleri	54
6.7: 28 ile 90 günlük karışım numunelere ait XRD desenleri	55
6.8: DTA-TG deney sonuçları a) LL0.75, b) LL1.00 c) LL1.25 su içeriği.....	56

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
4.1: Derin karıştırılmış zeminin dayanımını etkileyen faktörler	21
4.2: Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin özellikleri	22
5.1: Deneysel çalışmada kullanılan zemin örneğinin (K) fiziksel özellikleri	24
5.2: Kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	29
5.3: Ön karışım içeriği ve oranları	31
5.4: Deney numuneleri ve referans numuneleri içeriği ve oranları	33



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: mesnet silindirleri arasındaki uzaklık
b	: numune genişliği
CL	: düşük plastisteli kil
D	: numune yüksekliği
E ₅₀	: sekant 50 elastisite modülü
F	: kırılma anındaki kuvvet
G	: özgül ağırlık
LL	: likit limit
m	: metre
mm	: milimetre
MPa	: megapaskal
N	: newton
PI	: plastisite indisi
PL	: plastik limit
q _u	: serbest basınç dayanımı
σ _e	: eğilme dayanımı

KISALTMALAR

K	: Kil
L	: Alkali Aktivatörler
PÇ	: CEM I 42.5R Portland Çimentosu
S	: Puzolanik Malzemeler
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SH	: Sodyum Hidroksit
SS	: Sodyum Silikat
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
VT	: Volkanik Tüf
W	: Karışım Suyu
XRD	: X Işını Kristalografisi
XRF	: X Işını Floresansı
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Yüksek su içerikli yumuşak killerden oluşan geniş tortular, yetersiz taşıma kapasiteleri ve doğal olarak büyük şişme ve büzülme yetenekleri nedeniyle mühendislik projelerinin yapımı için uygun değildir. Zeminin taşıma gücü yetersizliği, oturma, şişme ve büzülme gibi zemin problemleri genellikle zeminin su içeriğindeki değişim ve yeraltı suyunun varlığı ile ilgilidir. Bu özelliklerin yapılacak proje ihtiyaçlarına uygun hale getirilebilmesi için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır. Zemin iyileştirme yönteminin seçiminde, maliyet, amaca uygunluk, zemin özellikleri gibi faktörler göz önünde bulundurularak en uygun zemin iyileştirme yöntemine karar verilmektedir. Derin zemin karıştırma yöntemi ekonomik ve pratik uygulama avantajları nedeniyle son zamanlarda tercih edilen zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Derin karıştırma yönteminde zemin burgulu bir karıştırma aleti yardımıyla projede tasarlanmış derinliğe kadar delinir ve yerinde zemine bir bağlayıcı enjekte edilerek karıştırılır. Zemin yüzeyinin altında, zemin ile bağlayıcı arasındaki kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak mühendislik özellikleri iyileştirilecek olan stabilize zeminden dairesel kolonlar oluşturulur (Porbaha, 1998; Kitazume ve Terashi, 2013; Puppala ve Pedarla, 2017). Yöntemde bağlayıcı harç olarak çimento ve/veya kireç geleneksel bağlayıcı olarak kabul edilmektedir (Shen vd., 2003; Horpibulsuk vd., 2011; Bruce vd., 2013). Ancak çimento ve kirecin üretim maliyeti ve üretimi sırasında açığa çıkan sera gazlarının yanı sıra kullanılan hammaddelerin doğal kökenli olmasının ekolojik denge tahribatlarına sebep olduğu bilinen bir gerçektir. Çimento üretimi sırasında 1 ton ürün için yaklaşık 700-760 kg CO₂ ortaya çıkmaktadır (Aliusta ve Yılmaz, 2020). Bu bağlamda son yıllarda inşaat mühendisliği uygulamalarında düşük CO₂ emisyonlu, çevre dostu, sürdürülebilir, ucuz ve kolay ulaşılabılır alternatif bağlayıcı malzeme arayışı hız kazanmıştır.

Bu çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) (SH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) (SS) ile aktive edilen volkanik tüf (VT) ve yüksek fırın cürufunun (YFC), Bartın alüvyal zeminlerin derin karıştırma yöntemi uygulanarak iyileştirilmesinde çimento yerine kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşamada Karabük Kardemir Demir Çelik Fabrikasından temin edilen öğütülmüş YFC ile Isparta volkanik tüfünün farklı oranlardaki karışımları SH ve SS ile aktive edilerek 28 gün kürlenmiş ve serbest basınç dayanım deneyi sonucu en yüksek dayanımı veren optimum bağlayıcı içeriği belirlenmiştir.

İkinci aşamada ise elde edilen optimum bağlayıcı harç Bartın alüvyal zeminine, zeminin kuru ağırlığının %10'u, %20'si ve %30'u oranında ilave edilerek deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numunelere doğal zemindeki yeraltı suyu değişimini temsil etmesi için likit limiti (LL) değerinin 0.75, 1.00 ve 1.25 kadar karışım suyu eklenmiştir.

Hazırlanan numuneler 7, 28, 56 ve 90 gün süreyle hem $23\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki nemli ortamda hem de su içerisinde olmak üzere iki farklı koşulda kür edilmiştir. Kür süresi sonunda numuneler üzerinde eğilme dayanımı ve serbest basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Bunun yanında CEM I 42.5R Portland Çimentosu (PÇ) kullanılarak referans numuneleri de hazırlanmıştır. Referans numuneleri deney numuneleri ile aynı oran (%10, %20 ve %30) ve su içeriklerinde (0.75LL, 1.00LL, 1.25LL) üretilmiş ve aynı şartlar altında kürlendikten sonra serbest basınç ve eğilme dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Üretilen iki farklı bağlayıcı harç içerikli numunelerin deney sonuçları birbiriyle karşılaştırılarak VT+YFC bazlı bağlayıcı harcın zemin iyileştirilmesinde kullanıp kullanılmayacağı tartışılmıştır. Ayrıca VT+YFC içerikli numunelerin 28 ve 90 gün kürlendikten sonra mikro yapısındaki değişiklikleri değerlendirmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemesi, X-ışını kırınım analizi (XRD) ve Termogravimetrik analizi (DTA-TG) uygulanmış ve karışımlardaki dayanım gelişimi analizler ile belirlenmiş olan mikro yapıdaki değişimlerle ilişkilendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Alternatif bağlayıcılar üretmek için amorf formda yüksek silika ve alümina içeriklerine sahip olan yüksek fırın cürufu, uçucu kül, metakaolin, volkanik tüf gibi atık malzemeler kullanılabilir. Bu malzemeler bir alkali ile aktive edilmesi sonucu puzolanik reaksiyon meydana getirmektedir (Xu ve Van Deventer, 2002; Gao vd., 2013; Pourakbar, 2016). Reaksiyonun sonucunda çimento ile su arasında meydana gelen reaksiyon ürünlerine benzer ürünler (sodyum alüminosilikat jelleri) ortaya çıkmakta ve mukavemet kazanımı sağlanmaktadır. Bu özellik, endüstriyel atık malzemelerin inşaat mühendisliği uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımaktadır.

Alkali aktivatör olarak genellikle sodyum silikat ve sodyum hidroksitin kullanımı tercih edilmektedir (Shen vd., 2013; Phoongernkham vd., 2015; Singhi vd., 2017; Arulrajah vd., 2018). Ancak sodyum silikat kullanımı, yüksek üretim maliyeti ve olumsuz çevresel etkileri gibi dezavantajlara da sahiptir. 1 ton sodyum silikat üretmek için atmosfere 1.514 ton CO₂ salınmaktadır (Turner ve Collins, 2013).

Atık malzeme esaslı alternatif bağlayıcı harçların tasarımı ile ilgili birçok araştırma yapılmasına rağmen, bu bağlayıcıların derin karıştırma yönteminde kullanımı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar bağlayıcı olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, mermer tozu gibi endüstriyel atıklara yoğunlaşmışken doğal puzolan olarak bilinen, dünyada ve ülkemizde bol miktarda bulunan VT ile ilgili şimdiye kadar bir çalışma yapılmamıştır. Bununla birlikte, VT içerikli bağlayıcı harç üretimi üzerine yapılan çalışmalar (Dirikolu, 2019; Çimen ve Çoşan, 2019; Lemougna vd., 2020) volkanik tüf kullanımının basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir.

Alkali ile aktif edilmiş yüksek fırın cürufu ile birlikte Sargent vd. (2012), uçucu kül ve kırmızı alçı taşı, Arulrajah vd. (2018) uçucu kül esaslı bağlayıcıların derin karıştırma yönteminde sürdürülebilir bağlayıcı olarak yumuşak zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabilirliğini araştırmıştır. Her iki çalışmada bu bağlayıcıların zeminin dayanımının iyileştirilmesinde yüksek performans gösterdiğini belirtmiştir.

Wahidy, (2019), gerçekleştirdiği çalışma ile kil zeminin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesi sırasında farklı çimento türlerinin, oluşturulan kolonlar üzerindeki performansını araştırmıştır. Araştırma kapsamında 4 farklı çimento tipi (CEM I 42.5 R, DMFC-800 ince taneli Portland Çimentosu, CEM II / A-M (P-L) puzolan katkılı çimento, CEM III / A 42.5 N yüksek fırın cürufu çimento) kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda su/çimento oranı 0.9 olarak seçilmiştir. Tüm çimento tiplerinden zemin kuru ağırlığının %6, %9, %12 ve %15'i kullanılarak deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler 7, 14 ve 28 gün kürlendikten sonra serbest basınç ve permeabilite deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen verilere göre çimento oranının ve kür süresinin artması ile dayanımın artmakta olduğu ve en yüksek dayanımın CEM II / A-M (P-L) puzolan katkılı çimento kullanılan deney numunelerinden elde edildiği ifade edilmiştir.

Yalçınıyigit, (2019) yapmış olduğu çalışmada bağlayıcı harç içerisinde yer alan çimento kullanımını azaltmak için çimentonun kuru ağırlıkça belirli oranında yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Hazırlanan numuneler sertleşinceye kadar hava ile temas halinde bekletilmiş ardından kalıplardan çıkartılarak poşetler içinde nemli ortamda kürlenmeye devam edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yüksek fırın cürufu ikamesinin oranı arttıkça dayanımlarda artış gözlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında yüksek fırın cürufunun olumlu etkisini gösteren bir çalışma yapmış olsa da araştırmacı numune hazırlama ve kürlenme şeklinin arazi koşullarını uygun yapılması gerekliliğine vurgu yapmıştır.

Çanakcı vd., (2019), yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu ile birlikte çeşitli yan ürünleri (uçucu kül, cam tozu, metakaolin, mermer tozu, taban külü, pirinç kabuğu külü, silis dumanı) kullanılarak elde edilen bir bağlayıcı harcın derin karıştırma tekniğinde potansiyel kullanımını deneysel olarak araştırmışlardır. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin kürlenme sürelerine bağlı olarak gelişen dayanımlarını, Portland çimentosu ile karşılaştırılarak serbest basınç dayanımı deneyleri ile belirlemişlerdir. Araştırmacılar, deney sonuçları F sınıfı uçucu kül, cam tozu, metakaolin taban külü ve mermer tozu esaslı bağlayıcılarda serbest basınç dayanımında azalma, C sınıfı uçucu kül ve cam kombinasyonları esaslı bağlayıcılar için serbest basınç dayanımında artış gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte görülen azalmalara rağmen, çoğu serbest basınç değerinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu vurgulamışlardır.

Bagherinia, (2019), tarafından gerçekleştirilen çalışmada likit limit değerinde su kullanılarak doygun hale getirilmiş düşük plastisiteli kil zeminin derin karıştırma yönteminde potasyum hidroksit, sodyum aljinat ve sodyum hidroksit kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Zeminin kuru ağırlığınca farklı oranlarda karıştırılan katkı maddeleri ile likit limit miktarında suyun eklenmesi ile elde edilen numunelere kür süresi sonunda serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre kür süresi ve katkı miktarının artmasıyla serbest basınç dayanımı artış göstermektedir.

Ahnberg, (2006), yaptığı çalışma ile laboratuvar ortamında kil ve organik zemin üzerinde derin karıştırma yöntemi ile zemin iyileştirmesinde çimento, yüksek fırın cürufu, kireç ve uçucu kül katkı maddelerinin tek başına ya da farklı oranlarda karışımlarının performansını incelemiştir. Ürettiği numuneleri 28 gün kürlemiş ve serbest basınç deneyi ile üç eksenli basınç deneyi uygulayarak dayanım gelişimini değerlendirmiştir. Çalışma sonunda araştırmacı tarafından kür süresinin uzaması ile su muhtevasının azaldığı, doygunluk derecesinin ve geçirimsizliğin azaldığı raporlanmıştır.

Dias vd., (2012), tarafından yürütülen araştırmada laboratuvar ortamında yumuşak kil zeminlere plastik limit su içeriğinde kuru derin karıştırma yöntemi uygulanarak oluşturulan kolonlarda yüksek fırın cürufu katkılı çimentonun performansı değerlendirilmiştir. Zeminin kuru ağırlığının %4 ve %8 kadar bağlayıcı kullanılarak üretilen numuneler 7, 28 ve 90 gün süre boyunca kür edilmiştir. Kür süresi sonunda numunelere serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Araştırmacılar çimento oranının ve kür süresinin artması ile serbest basınç dayanımının arttığını tespit etmişlerdir.

Pakbaz ve Alipour, (2012), yaptıkları çalışmada derin karıştırma yöntemi kullanılarak iyileştirilen zeminlerde kil-çimento bileşiminin geoteknik parametreler üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Numuneler hazırlanırken zeminin kuru ağırlığının %4, %6, %8, %10 oranında çimento ve su muhtevasının %30, %48 ve %70 kadar karışım suyu kullanılmıştır. Üretilen numunelere 14 ve 28 gün süre ile kür uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar çimento oranının artması ve su içeriğinin azalması ile dayanımın arttığını göstermiştir.

Yi vd., (2013), tarafından gerçekleştirilen çalışmada reaktif magnezyumun ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun derin zemin karıştırma yönteminde bağlayıcı harç olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Numune üretimi için killi-siltli ve kum olmak üzere iki

çeşit zemin değerlendirilmiştir. Numune üretimi derin karıştırma yöntemi prensiplerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler 7, 28 ve 90 gün süresince $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve $\%95 \pm 3$ nemli ortamda kür edilmiştir. Kür süresi sonunda numunelere permeabilite ve serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre reaktif magnezyum ile kireç karşılaştırıldığında zeminlerde kısa sürede fazla bir dayanım kazandırdıkları görülmüştür.

Bagherpour ve Choobbasti, (2003), gerçekleştirdikleri laboratuvar çalışmasında killi zeminlerin çimento+silis dumanı ve kireç+silis dumanı karışımlarının kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Ürettikleri numuneleri 28 gün boyunca kürlemiş ve ardından serbest basınç deneyi uygulamışlardır. Karışımlar içinde yer alan silis dumanının artması ile dayanımın arttığı ve kireç+silis dumanının daha yüksek dayanımlara ulaştığını ifade etmişlerdir.

Rahman ve Ali, (2017), tarafından laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmada yol yapımında temel olarak kullanılan kum zeminin iyileştirilmesi sırasında çimento ve silis dumanının kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışmada çimento oranları $\%0$, $\%6$, $\%9$, $\%12$ ve silis dumanı/çimento oranları $\%0$, $\%0.2$, $\%0.4$ ve $\%0.6$ olarak seçilmiştir. Hazırlanan numuneler 7, 28 ve 56 gün boyunca kür edilmiştir. Karışımda yer alan çimento ve silis dumanının oranının artması ile dayanımın arttığı ifade edilmiştir.

Alkaya, (2009), tarafından yapılan araştırma sonucunda yan ürün olarak depo edilen uçucu küllerin zemin iyileştirmesi, dolgu vb. işlemlerde değerlendirilerek hem ekonomik hem de doğal kaynakların korunması yönünden olumlu sonuçlar doğuracağı kanaatine varılmıştır.

Bunlarla birlikte, zemindeki derin karıştırma kolonlarının fiziksel ve sayısal modellemeleri, kolonlarındaki eğilme dayanımının da kritik bir parametre olduğunu ve değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir (Larsson vd., 2012; Jamsawang vd., 2016). Bu nedenle, stabilize edilmiş zeminlerin bükülme davranışını değerlendirmek için eğilme dayanımının da araştırılması gerektiği araştırmacılar tarafından önerilmiştir.

3. ZEMİN İYİLEŞTİRME

Dünya genelinde hızlı bir artış içerisinde bulunan nüfusun sosyal ve ekonomik ihtiyaçlarını karşılayabilmek için gelişmiş yerleşim alanlarına ve endüstriyel bölgelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak adına gerçekleştirilecek inşaa faaliyetlerinde yapı güvenliğinin sağlanabileceğı zeminler tercih edilmektedir. Ancak imar alanlarındaki genişleme, dayanımı düşük zeminlerin de kullanıma açılması ihtiyacını doğurmuştur. Taşıma gücü düşük zeminler üzerinde yürütülecek inşaat uygulamaları öncesinde yapılacak proje ihtiyaçları gereğince zeminlerin çeşitli uygulamalar ile iyileştirilerek güvenilir hale getirilmesi gerekmektedir.

Güvenilir zeminlere olan ihtiyaç son yıllarda yaşanan gelişmelerin bir sonucu olarak artış göstermiş olsa da eski zamanlarda da bu ihtiyacın var olduğu bilinmektedir. Örneğın güvenilir yapıların oluşturulması için Osmanlı Devleti döneminde İstanbul'daki Yeni Cami ve Haydarpasa Tren İstasyonu gibi yapıların inşasından önce zemin iyileştirilerek yapı güvenliğinin sağlanabilmesi için ahşap kazıkların zemine yerleştirildiğı bilinmektedir. Killi zeminlerin Çin'de M.Ö.600'lu yıllarda sönmemiş kireç doldurularak kapatılan kuyularla ve antik Roma'da zeminlerin yine kireç ile karıştırılarak iyileştirilmesi sonrası yolların inşaa edildiğıne rastlanmaktadır. Anlaşılacağı gibi yapı temellerinin üzerine etkiyen yükleri zemine güvenli şekilde aktarması ve zeminin bu yükleri taşıyabilmesi her dönemde duyulan bir ihtiyaçtır.

Zemin iyileştirme uygulamalarında amaç, var olan zeminin çeşitli uygulamalar ile parametrelerinin iyileştirilerek proje ihtiyaçlarını karşılayacak zeminlerin elde edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda yapılan zemin iyileştirme uygulamalarından sonra güçlendirilmiş zemin üzerinde deneysel olarak bir değerlendirme yapılarak proje ihtiyaçlarına ve ilgili standartlara uygunluğundan emin olunmalıdır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinin çok çeşitli olması ve her geçen gün yeni araştırmalar yapılarak yeni yöntemlerin geliştiriyor olmasından dolayı mühendisler tarafından tercih yapılmakta zorlanılmaktadır. Bunun yanında zemin iyileştirme yöntemlerinin neredeyse her birinin farklı birkaç zemin parametresine etki ettiğı düşünülürse yöntem seçiminin çok önemli olduğu da anlaşılmaktadır. Bu sebeple uygulama sonrası değişimi beklenen

parametrelerin, zeminin türünün, uygulama derinliğinin, uygulama alanının, maliyetinin, avantaj ve dezavantajlarının, deprem etkisi altındaki performanslarının, ekipman ve nitelikli personele ulaşılabilir olunması gibi faktörlerin bir arada değerlendirilerek seçimin yapılması gerekmektedir. Bu sayede hatasız, en yüksek performansın alındığı ve en ekonomik biçimde yürütülmüş bir zemin iyileştirme uygulaması gerçekleştirilmiş olacaktır.

3.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Mühendislik tüm bilim dallarında olduğu gibi tecrübe ve birikimler ile gelişen bir alandır. Bu durumun bir sonucu olarak pek çok zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Bu başlık altında uygulamada sıklıkla tercih edilmekte olan ve uzun yıllardır kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri derin ve yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri olarak iki başlık altında incelenmiştir.

3.1.1 Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin yüzeyinden ya da yüzeyden derin noktalara uygulanarak bir ya da birkaç zemin tabakasının parametrelerinin iyileştirildiği yöntemler bu başlık altında incelenmiştir. Derin zemin iyileştirme yöntemlerine ön yükleme, kum drenleri, dinamik kompaksiyon ve vibrokompaksiyon yöntemi, taş kolonlar, enjeksiyon teknikleri örnek verilebilir.

3.1.1.1 Önyükleme Yöntemi

Önyükleme yöntemi yumuşak kil içerikli zeminlerin dayanımını arttırmak ve yapılaşma sonrasında üzerine gelecek yükler altında oturmaların azaltılması için tercih edilen yöntemler arasındadır. Bu yöntemde inşaat faaliyetleri öncesinde zemin geçici olarak kum ve çakıl dolgusu ile yüklenir. Yumuşak zeminin bu dolgu ağırlığı ile konsolide olması sağlanarak dayanımı artırılır. Konsolidasyon işlemi tamamlandıktan ya da planlanan ölçüde uygulandıktan sonra dolgu kaldırılarak inşaa faaliyetine geçilir. Ancak bu yöntem yumuşak ve permeabilitesi düşük zeminlerde tercih edildiği için kaymaya bağlı göçmeleri engellemek ve konsolidasyonun tamamlanması için uzun bir süre beklemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Konsolidasyon süresini kısaltmak için düşey kum drenleri veya yapay drenaj şeritleri uygulanabilmektedir. Bu uygulama sayesinde yeraltı suyu sadece düşey

olarak değil yatay olarak da hareket ettirilerek zeminden uzaklaştırılabilmekte, konsolidasyon süresi kısaltılmaktadır (Bilal ve Talib, 2016).

3.1.1.2 Kum Drenleri Yöntemi

Kum dreni yöntemi ilk olarak 1925 yılında ABD’de uygulanmıştır. Yumuşak ve orta sertlikteki killerde, organik silt tabakalarında ve turba zeminlerde uygulanabilen bir yöntemdir. Kum dreni yöntemi konsolidasyon hızının, zeminin uygun derinliğe kadar bir kazık çakılarak ya da delinerek boşaltması ve boşluğun kum ile doldurularak kil içindeki drenaj yolunun kısaltılması ile arttırılmasıdır. Bu yöntemde düşey drenajın bir etkisi olmamakta daha çok oluşturulan kum drenleri sayesinde fazla boşluk suyunun yatay olarak hızla dağılması etkin rol oynamaktadır. Kum drenleri kullanılarak yapılacak iyileştirme faaliyetleri sırasında konsolidasyonun hızlanması için ek dolgu yapılarak zemin yüzeyinde ağırlık oluşturulabilir. Dolgunun oluşturacağı maliyet, konsolidasyonun hızlanması ve elde edilecek mukavemet artışı ile telafi edilebilmektedir. İstenilen oturma değerlerine ulaşılması durumunda ek dolgular kaldırılarak zemin iyileştirme faaliyeti sonlandırılabilir (Menard ve Boise, 1975).

3.1.1.3 Dinamik Kompaksiyon Yöntemi

Kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin tiplerinde uygulanabilen dinamik kompaksiyon yönteminde zemin üzerine ağırlıkların düşülmesi ile ortaya çıkan şok dalgaları sayesinde zemin sıvılaşması ihtimali azaltılmakta ve sıkıştırılarak yoğunluğun arttırılması amaçlanmaktadır. Dolgularda ve iri taneli zemin tabakalarında iyi sonuçlar vermektedir. Bu yöntem kullanılarak derinliği 20 m’ye ulaşan gevşek iri taneli zeminler %70-80 sıklığa kadar iyileştirebilmektedir. Yöntem kapsamında 10 ile 40 tonluk ağırlıklar, 40 m kadarki yüksekliklerden zemin yüzeyine düşürülmekte ve düşme noktası etrafında yer alan zemin sıkılaştırılmaktadır. İstenilen iyileştirme düzeyinin sağlanabilmesi için zemine uygulanan enerji miktarı, düşme sayısı kontrol altında tutulmalıdır (Impe, 1989).

3.1.1.4 Vibrokompaksiyon Yöntemi

Kohezyonsuz, gevşek ve iri taneli derin tabakaların iyileştirilmesinde kullanılan bu yöntemde zemin bir sondanın yüksek enerjili bir biçimde titreşimi sayesinde sıkıştırılarak

iyileştirilmektedir. Yöntemde 40 cm çapındaki silindir biçimli sonda, titreşim ve sonda ucundaki delikten basınçlı su zerk edilerek zemin yüzeyinden uygun derinliğe kadar indirilir. Uygun derinliğe ulaşıldıktan sonra sonda ucunda zerk edilen basınçlı suyun yönü değiştirilerek sondanın baş kısmında uygulanmaya başlanır ve sonda titreşime devam ederek zemin yüzeyine doğru çekilir. Basınçlı suyun yukarı yönlü uygulanması sayesinde dolgu malzemesinin uygun derinliğe kadar inmesi sağlanmaktadır. Bu yöntemle 10-15 metre derinliğinde ve sonda çevresindeki 2.5-3 metrelik bölgenin sıkıştırılması gerçekleştirilmektedir. Siltli malzemenin fazla olduğu, çakıllı veya çimentolanmış kumun var olduğu zeminlerde kompaksiyon etkisi azalmakta ve yöntemin ekonomikliği ortadan kalkmaktadır (Kirsch ve Bell, 2013).

3.1.1.5 Taş Kolonlar

Bu yöntem foraj ile delinen zeminde oluşturulan boşluğun agrega (20-75 mm çaplı kırmataş ve çakıl) ile doldurularak sıkıştırılmasıyla uygulanmaktadır. Ancak yöntemin başarısı uygulayıcıların beceresi ve tecrübesine göre değişebilmektedir. Taş kolonlar genelde yumuşak ve orta yumuşak durumdaki zeminlerde tercih edilmektedir. Bu yöntem sayesinde taşıma gücü artmakta, oturma azalmakta ve düşey dren gibi çalışabilme kabiliyeti nedeniyle oturmalar hızlanmaktadır. Gevşek ve ince taneli kum zeminlerde kullanıldığında zemin sıvılaşması ihtimali de azaltmaktadır. Taş kolonlar zemin üzerine gelen yükleri zeminle birlikte taşıyabilecek bir yapıya da sahiptir. Gevşek ve kohezyonsuz zeminlerin üzerine yapılacak inşaat yükü altında üniform bir davranış sergilemeyeceği ve farklı oturmalar yaşanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Taş kolon uygulaması sayesinde bu tip zeminlerin yapı ağırlığı etkisinde davranışları iyileştirilerek zeminden yaşanacak olumsuzluklar ortadan kaldırılacaktır (Gaafer vd., 2015).

3.1.1.6 Enjeksiyon Teknikleri

Kayma dayanımını arttırmak ve permeabiliteyi düşürmek için zemine yüksek basınç uygulanarak zerk edilen bağlayıcı harçların kullanıldığı bir yöntemdir. Bu yöntem ile oturmalar ve su kaçaqları engellenmekte, zemin içerisinde var olan boşluklar doldurulmakta, patlatmalar veya kazı işleri sonrası gevşeyen zeminler güçlendirilmekte, gevşek kum zeminlerin sıvılaşması önlenmekte, bazen de düzensiz zemin oturması yaşanan hafif yapıya ait temelin düzeltilmesinde kullanılmaktadır.

Genel olarak tercih edilen enjeksiyon harcı çimento ve sudan oluşmaktadır. Çimento içerikli harçların verimliliğinde çimento/su ağırlığının oranı belirleyici parametrelerden biridir. Enjeksiyon harç karışımının içeriği iyileştirilecek olan zeminin tane çapı ile ilgili bir seçimdir. Çimento içerikli harçlar büyük boşluklar bulunan iri taneli ve gevşek zeminler için ideal bir seçimdir. Çimento, kireç, bentonit vb. malzemeler çakıl tane boyutundan orta kum tane boyutuna kadar olan zeminlerde kullanılmaktadır. Ancak daha ince zeminler için kimyasal eriyiklerin tercih edilmesi daha doğru olacaktır.

Enjeksiyon uygulamalarının zemine uygulanışı ve zeminde değiştireceği parametreler göz önünde bulundurularak sızdırma enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu, konsolidasyon enjeksiyonu, kontak enjeksiyonu, kaya enjeksiyonu, çatlatma enjeksiyonu ve perde enjeksiyonu olarak çeşitleri bulunmaktadır (Gaafer vd., 2015).

3.1.2 Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri

Yüzeysel zemin iyileştirmesi, zemin tabakalarının derinlerine uygulanmayan ve yüzeye yakın kısımların ince katmanlar halinde tatbik edilen katkılı veya katkısız kompaksiyon malzemeleri ile ya da drenaj uygulamaları ile iyileştirildiği yöntemlerdir. Zemin yüzeyine serilen çimento, kireç, uçucu kül, bitüm vb. malzemelerin kompaksiyon uygulaması ile zeminle karıştırılması sonucu sıkıştırılması prensibine dayanır. Drenaj uygulamaları sayesinde zemin içerisinde var olan su seviyesi azaltılarak zemin parametrelerinin iyileştirilmesi sağlanır.

3.1.2.1 Drenaj Yöntemi

Zeminlerin içinde var olan yeraltı suyunun azaltılması zeminin parametrelerinde iyileşmeye ve faydalı özelliklerin ortaya çıkmasına etken bir sebeptir. Kohezyonlu zeminlerde su içeriğindeki artış taşıma gücünde ciddi azalmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle zeminlerin dayanıklılığı ve stabil davranışı bünyesinde bulunan suyun uzaklaştırılması ve yeraltı suyu seviyesinin kontrol altında tutulmasına bağlı olarak değişebilmektedir. Yapılacak drenaj sistemleri ile altyapının olabildiğince üniform bir su içeriğinde tutulması amaçlanmaktadır (Uzuner, 1995).

Yeraltı suyunun drene edilerek zemin iyileştirmesinde Fransız drenleri, çevre drenleri, köstebek drenleri, kuyu drenleri gibi çeşitli uygulama yöntemleri mevcuttur.

Fransız Drenleri: Zemine açılan hendeklerin içlerine künklerin konulması yoluyla uygulanan bir sistemdir. Hendek taban genişliklerinin kullanılacak künkten geniş olması gerekmektedir. Hendek içine yerleştirilen künklerin ek yerlerinde boşluklar bırakılmalıdır. Künkler arasında bırakılan boşluklar, künklerin içinin zemin ve ince filtre malzemesi ile dolmaması için uygun ölçüde derecelendirilmiş filtre malzemesi ile kaplanması gerekmektedir. Kalın malzemelerin künk çevresine ve ince malzemenin zemine doğru yerleştirilmesi uygulamanın verimliliği için önem taşımaktadır. Bu dren sistemi açık drenlerin ya da hendeklerin trafik ve çevre açısından tehlike oluşturduğu durumlarda tercih edilmektedir (Önalp, 1983).

Çevre Drenleri: Çevre hendekleri tesviye eğrileri boyunca ya da birikmenin en yüksek olduğu noktaları takip ederek alanı çevreler ve çok uzun olabilir. Çevre hendekleri sayesinde suyun sahaya gelmesi engellenir ve drenaj masrafı azaltılmış olur. Ayrıca oluşturulan dren ağları sayesinde su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerde su miktarı azaltılarak temel imalatlarının kuru bir zeminde yapılması sağlanabilmektedir (Önalp, 1983).

Köstebek Drenler: Killi zeminlerde var olan suyun büyük bölümü kapiler kuvvetler etkisinde tutulmakta olduğundan yeraltı suyu serbest bir biçimde hareket edemez. Bu yüzden killi zeminler drenaj için uygun bir zemin tipi değildir. Köstebek sapanı mermi biçiminde bir geometriye sahip olup düşey eksenli bir kola montajlıdır. Bu kol sayesinde köstebek sapanı zemin yüzeyinden aşağıda tutulabilmektedir. Mekanik bir araç yardımı ile sapanın çekilmesi ile zemin içinde silindirik şekilli bir kanal oluşur. Kanallar üzerine ağır bir yükün uygulanmaması durumunda bu kanal şekli bozulmaz ve yıllarca korunur. Oluşturulan bu kanallar sayesinde killi zemin içerisinde yer alan fazla su drene edilir. Köstebek drenleri zeminin eğimi yönünde olmalı ve en fazla 5 m ara ile oluşturularak bir ana drenaj kanalına bağlanmalıdır (Önalp, 1983).

Kuyu Drenler: Kuyu drenleri geçirimli zemin tabakasına kadar açılan ve fay hatları tarafından getirilen memba sularının geçirimli tabakaya ulaşmasını sağlayarak drene eden sistemlerdir. Kuyu drenlerinin bir diğer kullanım yöntemi ise yeraltı su seviyesinin altında

bir noktaya inşa edilecek olan temel sisteminin imalatı sırasında yeraltı su seviyesinin hızlı bir şekilde düşürülerek geçici olarak azaltılmasının sağlanmasıdır. Bu sistemde açılan kuyulardan su çekilerek yeraltı su seviyesi düşürülür. Bu yöntem pompalar çalıştırıldığı sürece su seviyesinde azalmaya yada düşürülen su seviyesinin korunmasına fayda sağlayacaktır (Önalp, 1983).

3.1.2.2 Kompaksiyon Yöntemi

Mekanik araçlar kullanılarak uygulanan bu yöntemde zemin içerisinde yer alan hava boşluklar azaltılmakta, tanecikler birbirine yaklaşmakta ve bu sayede sıkı bir zemin formu elde edilmektedir. Zeminin mekanik araçlar kullanılarak sıkıştırılması işlemi olarak da açıklanabilir. Uygulama sonrasında sıkışan zeminlerin birim hacim ağırlığı artmakta ve zemin parametreleri istenilen seviyelere getirilebilmektedir.

Yöntemde uygulanan statik veya dinamik yükler yardımı ile zemindeki tanecikler birbirlerine yaklaşmaktadır. Ancak zemindeki taneciklerin hareketleri uygulanan kompaksiyon enerjisine ve zemin içerisindeki su miktarına bağlı olarak değişebilmektedir.

Kompaksiyon yönteminin başarılı olması ölçütü kuru birim hacim ağırlıkta yaşanan değişimle alakalıdır. Sıkıştırma işlemi sırasında zemin tanelerinin daha iyi hareket ederek sıkışmasının sağlanması için zemine su verilmektedir. Su miktarının çok olması durumunda zeminde yer alan boşlukların su ile dolmasına sebep olunmakta ve birim hacim ağırlıkta düşüş gözlenmektedir. Bu yüzden doymuş durumdaki zeminlerde kompaksiyon uygulamasının yapılması mümkün değildir. Yöntemin en iyi şekilde uygulanabileceği ve en yüksek birim hacim ağırlığın elde edilebileceği bir optimum su muhtevası vardır. Zemin tiplerine göre değişiklik gösteren optimum su muhtevası aynı zamanda kompaksiyon uygulamalarında elde edilen enerjiye göre de değişebilmektedir (Liu ve Evett, 2008).

3.1.2.3 Çimento ile Stabilizasyon

Bu yöntemin 1920'li yıllarda ABD'de eyalet kara yollarının yapımı sırasında zeminin iyileştirilmesi için kullanıldığı bilinmektedir. Günümüzde artan trafik yükü nedeniyle pek çok ulaşım yolunun temel iyileştirmesinde kullanılmaktadır. Çimentonun kullanımı ile gerçekleşen reaksiyonlar sonucu zemin yüzeyinde güçlü bağlar oluşmaktadır. Bu

reaksiyonların verimliliğinde kil minerallerinin yapısının ve amorf malzemelerinde tepkimelere girerek yeni ve dayanımı yüksek ürünler oluşturması da etkili olmaktadır. Organik zeminlerin iyileştirilmesi dışında tüm zeminlerde etkili bir yöntem olarak ifade edilmektedir. Çimentonun arazi ortamında ve zemin tiplerine göre yaşayacağı performans azalması göz önüne alınarak laboratuvar ortamında uygun değerlendirmelerin yapılması ve kullanılacak çimento miktarının tespit edilmesi gerekmektedir. Çimento kullanımı ile iyileştirilecek zeminlerde parametrelerin farklı tepkiler verebildiği görülmüştür. Kum ve çakıllı zeminlerde çimento ile yapılan iyileştirmeler sonucunda zeminin permeabilitesi azalmış ancak silt ve kil zeminlerde permeabilitenin arttığı deneysel veriler sonucunda tespit edilmiştir (Uzuner, 1995).

3.1.2.4 Kireç ile Stabilizasyon

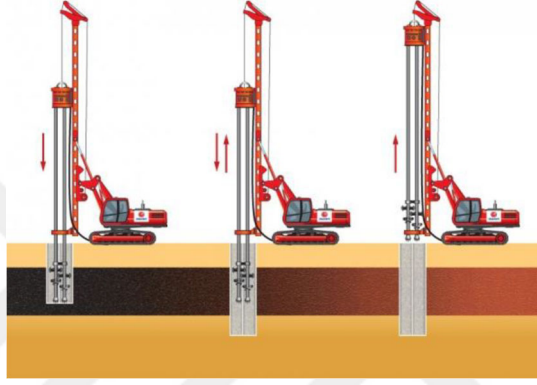
Kireç tarihte bilinen en eski zemin iyileştirme malzemelerinden birisidir. Killi zeminlerin iyileştirilmesinde etkin bir yöntemdir. Kireç ve kil mineralleri içinde yer alan silis reaksiyona girerek silikat jeli üretmektedir bu sebeple kil içeriğinin yüksek olduğu zeminlerde kireç, zemin iyileştirme için çok uygun bir malzemedir. Bu jel kil mineralleri arasında bulunan boşlukları doldurmakta ve zamanla hidratlı silise dönüşmektedir. Kullanılan kireç miktarının artışına bağlı olarak zeminin serbest basınç dayanımı da artmaktadır. İnce kumlarda ve löslü tabakalarda sönmemiş kireç çok daha verimlidir. Çünkü hidratasyon sırasında suyu emerek tepkimeye girer ve açığa ısı çıkarır. Bu ısı zeminin kurummasına ve su içeriğinin azalmasına yardımcı olur. Kil içeriğinin %10'u kadar kireç ilavesinin iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir (Özaydın, 1997).

3.1.2.5 Bitüm ile Stabilizasyon

Kireç ve çimento katkısına göre pahalı bulunması sebebiyle çok tercih edilmeyen bu yöntem yolların inşası sırasında temel malzemesine uygulanmaktadır. Bitümlü maddenin uygulanması ile iri taneli zemin yapısında kohezyon sağlanmaktadır. Bitümün tane yüzeyini kaplaması sonucu ince tanelerin sudan yumuşaması engellenmekte ve su, rüzgâr gibi etkenlerin temel yapısında oluşturacağı erozyonun önüne geçilmektedir. Bitümle iyileştirilmiş yol yapısı genelde kuru iklimlerde kaplamasız olan silt ve kil yoğunluklu zeminlerde trafik yüklerinin taşınabilmesi için tercih edilmektedir (Uzuner, 1995).

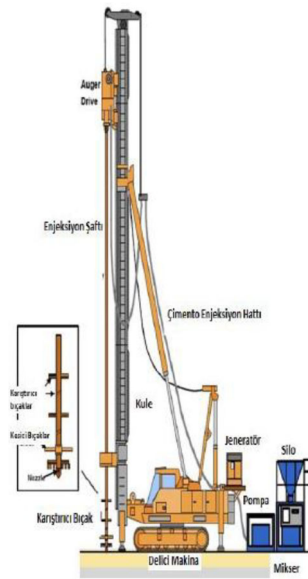
4. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ

Derin karıştırma yöntemi uygulaması bağlayıcı bir harç ile zeminin makineler kullanılarak uygun derinliğe kadar karıştırılması ile elde edilen kolonların dayanım kazandığı bir sistemdir. Delici bir makine üretilecek kolonun bulunduğu noktaya konumlandırılır. Karıştırıcı şaft projede uygun görülen derinliğe kadar zemin içine indirilir. İndirilme sırasında ya da yukarıya çekilmesi esnasında veya her iki işlemde de zemine bağlayıcı harç enjekte edilerek zemin ile karışması sağlanır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Derin karıştırma yöntemi uygulaması

Derin karıştırma yöntemi enjeksiyon ağızlıkları olan, kesme ve karıştırma bıçakları bulunan bir şaft, mikser, pompa, çimento ve su tanklarına ihtiyaç duyan bir sistemdir (Onur vd., 2016). Derin karıştırma yönteminin genel şeması Şekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.2: Derin karıştırma sistemi (Kılıç, 2013)

4.1 Tarihsel Gelişimi

Ülkemizde 2006 yılında standardı oluşturulan ve kullanılmaya başlanılan derin karıştırma yöntemi dünyanın pek çok ülkesinde ilgi gören ve tarihçesi 1960'lara dayanan bir zemin iyileştirme yöntemidir (Kaya, 2016).

Derin karıştırma yöntemi dünyada ilk olarak 1956 yılında ABD'de Instrusion Prepakt firması tarafından tek burgu kullanımı ile uygulanmıştır. Ancak 1956 ile 1980 yılları arasında bir daha ABD'de derin karıştırma uygulamasına rastlanmamıştır. Japonya'da yürütülen çalışmalar ve bunların başarılı sonuçları üzerine ABD'nin yeniden dikkatini çeken derin karıştırma yöntemi zemin sıvılaşmasının önlenmesi amacıyla uygulanmaya başlamıştır. Daha sonrasında baraj yapılarındaki uygulama verimliliğinin görülmesi üzerine pek çok uygulamada tercih edilmiştir.

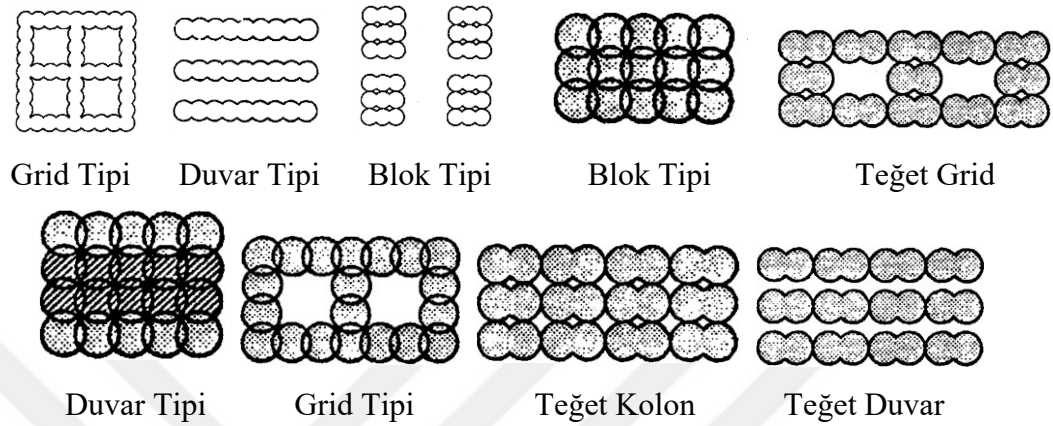
Derin karıştırma yöntemi 1960'lı yıllardan bu yana PHRI (Port and Harbour Research Institute) tarafından Japonya'nın önderliğinde araştırılmış, denenmiş ve geliştirilmiştir. Derin karıştırma yöntemi üzerine yapılan araştırmaların ilk yıllarında kireç kolonları üzerine yoğunlaşmıştır. Uygulamalarda kullanılacak olan kireç miktarını belirlemek ve zemin tiplerine göre performansın tespit edilebilmesi için farklı bölgelerden deniz killeri alınmış ve deneyler yapılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda 1974 yılında Japonya ve Güneydoğu Asya'da kireç kolonları pratikte uygulanmaya başlanmıştır. 1978 yılına gelindiğinde ise neredeyse zemin iyileştirme ihtiyacı olan tüm yapılarda uygulanabilir bir yöntem olmuştur.

İyileştirilmesi gereken zeminin içerdiği şartlara bağlı olarak, yürütülen çalışmalar kapsamında 1975 yılında ıslak derin karıştırma ve 1980 yılına gelindiğindeyse kuru derin karıştırma sistemi geliştirilmiştir.

Japonya ve Güney Asya ülkelerinin derin karıştırma yöntemi üzerine yaptıkları çalışmalara paralel olarak Avrupa'da bu yöntem İsveç ve Finlandiya önderliğinde gelişmiştir. İsveç geoteknik enstitüsü tarafından 1967 yılında İsveç kireç kolonları geliştirilmiştir.

4.2 Uygulama Şekilleri ve Alanları

Derin karıştırma yöntemi çeşitli uygulama ekipmanları ve teknikleri sayesinde pek çok projede kullanılabilmektedir. Uygulama biçimleri Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Derin karıştırma uygulama şekilleri (Yang, 1997)

Derin karıştırma kolonları pek çok farklı amaç için kullanılmaktadır. Bu amaçlardan hidrolik ayırıcı duvarı, kazı destek duvarları, zemin sıvılaşmasının azaltılması, ağırlık duvarları ve zemin iyileştirilmesi örnek olarak verilebilir. Derin karıştırma yöntemi kullanılarak oluşturulacak kolonların projedeki amacı ve sınırlarına bağlı olarak yöntemin uygulanma tekniğine karar verilmektedir.

Hidrolik kesici duvarlar iri taneli yapıya sahip zeminlerde su geçişini engellemek amacıyla kullanılan yapılardır. Geçirimsizliği yüksek olan yüzey tabakasından derinde yer alan geçirimsiz tabakaya ulaşıncaya kadar oluşturulurlar. Bu yapılar yeraltı suyu akışının önlenmesi için kesişen ya da temas eden kolonlar halinde veya paneller biçiminde imal edilirler. Atık depolama alanlarında bentonit kullanılarak yapılan panel biçimli duvarların çevre kirliliğinin önlenmesi amacı da bulunmaktadır.

Derin zemin karıştırma yöntemi kullanılarak kazı destek duvarları oluşturulabilmekte ve kazı işleri sonrası zeminin yanal hareketini en aza indirerek yarma ve şev güvenliğini artırılmaktadır. Bu sebeple kazı işleri sonrasında yüzeylerinin kaymasını önlemek, gevşek zeminleri sıkılaştırarak mukavemetini arttırmak ve yeraltı suyunun geçişini önlemek

amacıyla kullanılan elik elemanların yerine uygulandığında aynı performansı sağlamakta ve çeliğin yüksek maliyeti azaltılmaktadır (Bruce, 2000).

Zemin sıvılaşmasının önüne geçilmesi amacıyla derin karıştırma yönteminin kullanımı ekonomik bulunması ve derinlik etkenleri nedeniyle pek çok projenin uygulanmasında geleneksel bir yöntem olarak kabul görmüştür. Derin karıştırma yönteminin uygulanması ile stabilize edilen zeminde boşluk suyu basıncının düşürülmesi, zeminin güçlendirilmesi ve sıvılaşmanın engellenmesi sağlanabilmektedir. Uygulama sonrası oluşturulan kolonlar ile imento enjeksiyonuna bağlı olarak basınç dayanımı artmakta bu sayede sıvılaşma sonucunda ortaya çıkacak kuvvetlere karşı direnç sağlanabilmektedir. Sıvılaşmanın engellenmesi için derin karıştırma kolonları ızgara, duvar veya blok biçiminde uygulanmaktadır.

Derin karıştırma yönteminin zemin iyileştirilmesinde kullanılması ile projeye uygun nitelikte bulunmayan zeminlerin dayanımın arttırılması ve oturmaların azaltılması sağlanmaktadır. Bununla birlikte zeminde oluşacak hareketlerin denetim altında tutulması istenilen metro ve tünel gibi yeraltı inşaatlarında da kullanılmaktadır.

4.3 Avantajları ve Dezavantajları

Derin karıştırma yönteminin de diğer tüm yöntemlerde olduğu gibi olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Topolnicki, (2004) yaptığı çalışmada derin karıştırma yönteminin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralamıştır;

- Geniş zemin iyileştirme alanına sahip projelerde ekonomik ve verimli bir sistemdir.
- Pek çok zemin tipi için uygulanabilir bir sistemdir.
- Uygulama yerine göre tercih edilebilecek birçok uygulama çeşidi bulunmaktadır.
- Stabilize edilen zeminin mühendislik özelliklerindeki gelişim güvenilir bir biçimde tahmin edilebilmektedir.
- Kısıtlı alanlarda uygulanması sırasında komşu yapılara çok düşük oranda zarar vermektedir.
- Kuru derin karıştırma sırasında oluşturduğu gürültü düzeyi düşük olmakla birlikte titreşim oluşurmamaktadır. Zeminde fazla bir tahribat oluşurmamaktadır.
- Çok çeşitli proje alanlarında uygulanabilmektedir (kara, deniz, kıyı ve liman).

- Çeşitli laboratuvar ve arazi deneyleri ile uygulamanın yeterliliği ve kalitesi kanıtlanabilmektedir.
- Çevreye diğer yöntemlere kıyasla daha az zarar vermektedir.

Topolnicki, (2004) aynı çalışmasında derin karıştırma yönteminin dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralamıştır;

- Uygulama yöntemine bağlı olarak derinlik sınırları vardır.
- Kaya vb. çok sert zeminlerde, aşırı gevşek zeminlerde uygulanabilmesi mümkün değildir.
- Uygulama sırasında tercih edilen ekipmanlara bağlı olarak eğik kolonların oluşturulmasına olanak tanımaz.
- Mevcut yapılara belirli bir mesafeden yakın uygulanamaz.
- Bazı durumlarda karıştırılacak zeminin üniform dağılımı ve zeminin kalitesi değişebilmektedir.
- Islak derin karıştırma uygulamalarında donma ve çözülme deformasyonları görülebilmektedir.
- Uygulanan yöntemle göre zayıf zeminler üzerinde ekipman ağırlığı sorun teşkil edebilmektedir.
- Zemin enjeksiyonuna veya hava basıncına bağlı olarak zemin kabarmaları görülebilmektedir.
- Uygulama derinliği arttıkça geçirimsizliği azalabilmektedir.

4.4 Bağlayıcı Türleri

4.4.1 Kireç

Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi için bağlayıcı harç kullanımında akla gelen ilk malzemelerden birisi kireçtir. Kireç kullanılarak iyileştirilen zeminlerde su içeriği ve deformasyon azalmakta, kayma mukavemeti artmaktadır (Tran vd., 2014).

Uygulamalar sırasında kireç hem sönmemiş hem de sönmüş olarak kullanılabilir. Kireçtaşına uygulanan kalsinasyon işlemi sonucu elde edilen CaO sönmemiş kireç olarak

ifade edilmektedir. Sönmemiş kirecin ıslak zemin ile karıştırılması sonucu hidrasyon gerçekleşmekte, buharlaşma olmakta zeminin içerdiği su azalmaktadır (Nicholson, 2014).

4.4.2 Çimento

Çimento kullanılarak her türlü zemin iyileştirilebilmekte ve projeye uygun hale getirilebilmektedir. Zemin iyileştirilmesi sırasında kullanılan çimento miktarı zeminin kuru ağırlığının %6-15 arasında değişmektedir. Çimento yüksek neme sahip ve içerisinde organik malzeme fazla olan zeminlerin iyileştirilmesinde ekonomik bir malzeme olarak görülmemektedir (Nicholson, 2014). Bu tip zeminlerin iyileştirilmesinde cürufu çimento kullanımının daha iyi performans oluşturduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışmalarda ince taneli killi zeminlerin dayanımının ve rijitliğinin artırılması için iri taneli zeminlere göre daha fazla çimento kullanımına gereksinim olduğu da belirtmişlerdir (Farouk ve Shahien, 2013).

Çimentonun su ile buluşması ile başlayan hidrasyon reaksiyonu neticesinde ısı açığa çıkmaktadır. Reaksiyon sonucunda oluşan hidratların zeminin içindeki boşlukları ve kil yüzeylerini doldurması sonucu zeminin mukavemeti artmaktadır (Ouhadi vd., 2014).

4.5. Mühendislik Özellikleri

Derin karıştırma yöntemi kullanılarak iyileştirilen zeminlerin dayanım, elastisite modülü, birim hacim ağırlık, poisson oranı ve permeabilite değerleri değiştiği bilinmektedir. Güvenilirlik verilerinin bilinmesi ve değerlendirilmesi kompleks projelerin tasarımı sırasında önem taşımaktadır (Bruce vd., 2013). Bu başlık altında güvenilirlik özellikleri incelenmiş ve literatürde sunulmuş olunan veriler ile ifade edilmiştir.

4.5.1 Mukavemet

Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlerin dayanım kazanımı yapılacak olan projeler için çok önemli bir faktördür. Ancak iyileştirilmiş zeminin dayanımını etkileyen pek çok parametre söz konusudur. Bu parametreleri Terashi (1997), gerçekleştirdiği çalışma ile Tablo 4.1'deki gibi özetlenmiştir.

Tablo 4.1: Derin karıştırılmış zeminin dayanımını etkileyen faktörler (Terashi, 1997)

Kategori	Faktörler
Bağlayıcıların özellikleri	- Bağlayıcının türü - Kalite - Su ve katkı maddelerini karıştırma
Zemin koşulları ve özellikleri (özellikle killer için önemlidir)	- Zeminin fiziksel, kimyasal, mineralojik özellikleri - Organik içerik - Boşluk suyu pH'ı - Su muhtevası
Karıştırma koşulları	- Bağlayıcı miktarı - Karıştırma verimi - Karıştırma/yeniden karıştırma zamanlaması
Kür koşulları	- Sıcaklık - Kür süresi - Nem oranı - Islatma ve kurutma/donma ve çözülme, vb.
Yükleme koşulları	- Yükleme hızı - Yanal çevresel basınç - Gerilme izi (örneğin; sıkıştırma, çekme ve basit kesme)

Tablo 4.1 incelendiğinde görülmektedir ki laboratuvar ortamında arazi koşullarının doğrudan oluşturulabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle sadece laboratuvar ortamında yürütülen çalışmaların kesin bir öngörü olarak kabul edilmesi yerine gerçek dayanıma bir indeks sağlayıcısı olduğuna dikkat edilmelidir (Terashi, 1997).

Arazide uygulanan oranlar ve malzemeler kullanılarak hazırlanan laboratuvar ortamındaki numunelerin dayanımının arazidekine göre daha yüksek olabileceği ifade edilmiş ve bu yüzden arazi deneylerinin de gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Bruce vd., 2013). Arazide hazırlanan numunelerin laboratuvar ortamında hazırlananlara göre %20-50 arasında bir dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir (Stab, 2002). Benzer bir çalışmada CDIT (2002), bu değer %20-100 arasında değişmekte olduğunu ifade etmiştir. Bu oranın gerçek değeri karıştırma donanımlarının türünün, zeminin cinsinin, arazi kür koşullarının ve laboratuvar numunelerinin hazırlanmasının aynı şartlara bağlı olması halinde belirlenebileceği de görüş olarak bildirilmektedir (Bruce vd., 2013).

Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş bir zemin için mühendislik özellikleri Tablo 4.2 ile sunulmaktadır (Bruce, 2000).

Tablo 4.2: Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin özellikleri

Serbest basınç mukavemeti (q_u)	0.2-5.0 MPa (0.5-5 MPa granüler zeminlerde) (0.2-2 MPa kohezyonlu zeminlerde)
Permeabilite, k	10^{-6} - 10^{-9} m/s (bentonit kullanılması durumunda daha düşük olur)
Elastisite modül değeri, E_{50}	Laboratuvar numuneleri için $(350-1000)*q_u$ Arazi numuneleri için $(150-500)*q_u$
Kayma mukavemeti (direkt basit kesmeden elde edilen)	q_u değeri <1 MPa durumunda % (40-50) q_u , fakat bu oranı q_u arttığında kademeli olarak artar.
Çekme dayanımı	Genellikle % (8-14) q_u
28 günlük q_u	Silt ve killeri için 7 günlük dayanımın 1.4-1.5 katı Kumlar için 7 günlük dayanımın 2 katı
60 günlük q_u	28 günlük dayanımın 1.5 katı olarak kabul edilebilir. Ancak genelde yüksek su/bağlayıcı oranlı harçların 28 günden sonra ulaşılan uzun vadeli dayanımı çok daha azdır.

İyileştirilmiş zeminin serbest basınç dayanımının 1.00 MPa'dan az olmamasını tavsiye edilmiştir (Bruce vd., 2013).

4.5.2 Elastisite Modülü

Elastisite modülünün (E_{50}) %50'sine eşit olan sekant modülü ile serbest basınç dayanımı (q_u) arasındaki ilişkiler pek çok çalışma ile incelemiştir. Kuru derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminler için araştırmacılar $50 \leq E_{50} \times q_u \leq 250$ eşitliğinin uygun bir aralık olduğunu ifade etmiştir (Jacobson vd., 2005; Baker, 2000; Broms, 2003).

Islak derin karıştırma yöntemi içinse killi ve kumlu zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda Navin ve Filz (2006), E_{50} değerini $300q_u$ olarak hesaplamışlardır. Terashi vd. (1997), E_{50} değerinin $75 \leq E_{50} \times q_u \leq 1000$ arasında değiştiğini belirtmiştir. Bu çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda Our vd. (1996), da ifade ettiği gibi E_{50} değerleri q_u değerinin 75-1000 katı arasında değişiklik gösterebileceğini anlaşılmaktadır.

4.5.3 Poisson Oranı

Derin karıştırma yönteminde poisson oranı üzerine sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalara göre zeminin serbest basınç dayanımından bağımsız olarak poisson oranının 0.25 – 0.5 arasında olduğu ifade edilmektedir (Hirade vd., 1995).

4.5.4 Permeabilite

Çimento ve kireç kullanılarak uygulanan kuru derin karıştırma yöntemi ile iyileştirme sonucunda zeminin permeabilitesinin 200-600 katına ulaştığı ifade edilmiştir (Stab, 2002). Yine bir başka çalışmada kuru derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş killi zeminin permeabilitesinin 10-100 katı kadar arttığı belirtilmiştir (Baker, 2000). Sonuç olarak kuru derin karıştırma yöntemi uygulanarak elde edilen kolonlar sınırlı olarak da olsa düşey drenler olarak çalışabilmektedir (Bruce vd., 2013).

Kumlu zeminlere uygulanan ıslak derin karıştırma yönteminde bağlayıcı miktarının artırılması ve bentonitin eklenmesiyle oluşturulan kolonların geçirgenliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu sebeple ıslak derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonların düşey drenler olarak çalışamayacağı düşünülmektedir (Bruce vd., 2013).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Kullanılan Malzemeler

Çalışmada kullanılan malzemeler ve malzemelere ait tüm bilgiler bu başlık altında incelenmiştir.

5.1.1 Kil (K)

Bartın Çayı etrafında yayılım gösteren alüvyon, çevredeki daha yaşlı kayaçların ayrışması ve taşınması sonucu oluşan killi malzemeden meydana gelmektedir. Bartın yerleşim alanının önemli bir bölümünde yer alan bu genç alüvyal zeminler, yüksek su içeriği ve düşük mekanik dayanımları nedeniyle deneysel çalışmalar için özel olarak seçilmiştir.

Çalışma da kullanılan yumuşak killi zemin örneği Bartın ili Çatmaca Mevkii 3-5 m derinlikten elde edilmiştir. Zemin örneği üzerinde, Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında elek ve hidrometre analizi, kıvam limitleri, tane birim hacim ağırlığı deneyleri yapılarak zeminin fiziksel özellikleri belirlenmiş ve Tablo 5.1’de sunulmuştur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre zemin düşük plastisteli kil (CL) olarak tayin edilmiştir.

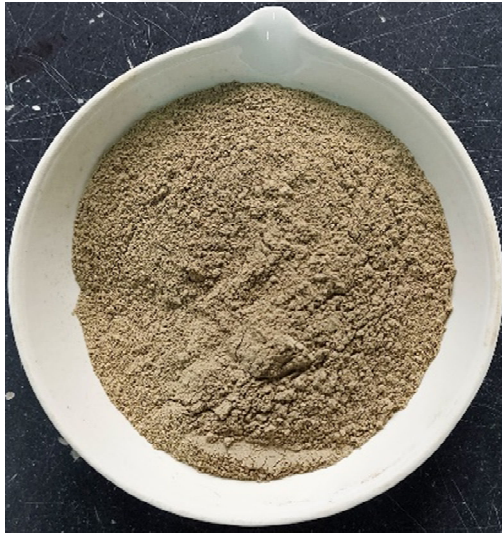
Tablo 5.1: Deneysel çalışmada kullanılan zemin örneğinin (K) fiziksel özellikleri

Parametre	Değer
Kum (>0.75 mm) (%)	2
Silt ($0.75-0.002$ mm) (%)	47
Kil (<0.002 mm) (%)	49
Likit limit (LL) (%)	49
Plastik Limit (PL) (%)	26
Plastiste İndisi (PI) (%)	23
Özgül Ağırlık (G)	2.67
Zemin Grup Sembolü	CL

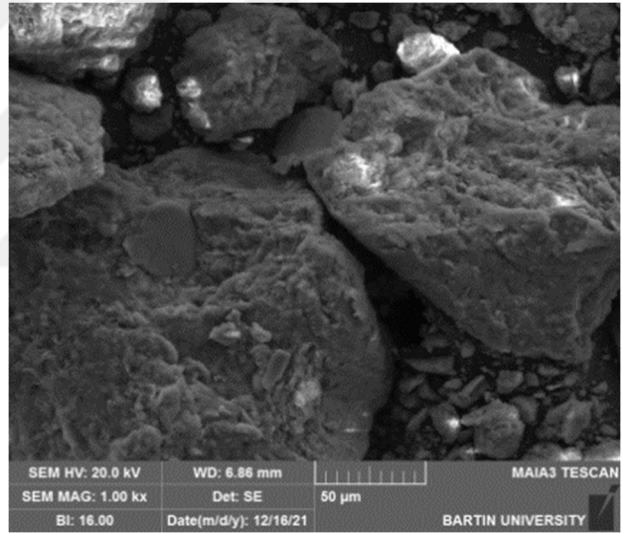
Zemin örneğinin kimyasal içeriğinin belirlenmesi için X ışını floresansı (XRF) ve X ışını kristalografisi (XRD) analizi uygulanmıştır. XRD analizi sonuçlarına göre %20.8 Kuvars, %17.2 Kalsit, %15.5 Montmorilonit, %33.5 İllit ve %7.5 Plajiyoklaz içerdiği belirlenmiştir.

Araziden alınan düşük plastisteli kil zemin deney numunelerinde kullanılmak üzere öncelikle etüvde 50°C sıcaklığında 24 saat süre ile kurutulmuş ardından laboratuvar tipi bilyeli değirmende öğütülmüştür. Öğütülen zemin 100 numaralı (150µm) elekten elenmiş ve elek altında kalan kısım numunelerde kullanılmıştır.

Zemin örneğinin genel görünümü Şekil 5.1a'da ve SEM görüntüsü Şekil 5.1b'de, XRF analizi sonuçları Tablo 5.2'de ve elek analizi sonuçları Şekil 5.4'de sunulmuştur.



a)



b)

Şekil 5.1: Çalışmada kullanılan zemine ait a) genel görünümü b) SEM görünümü

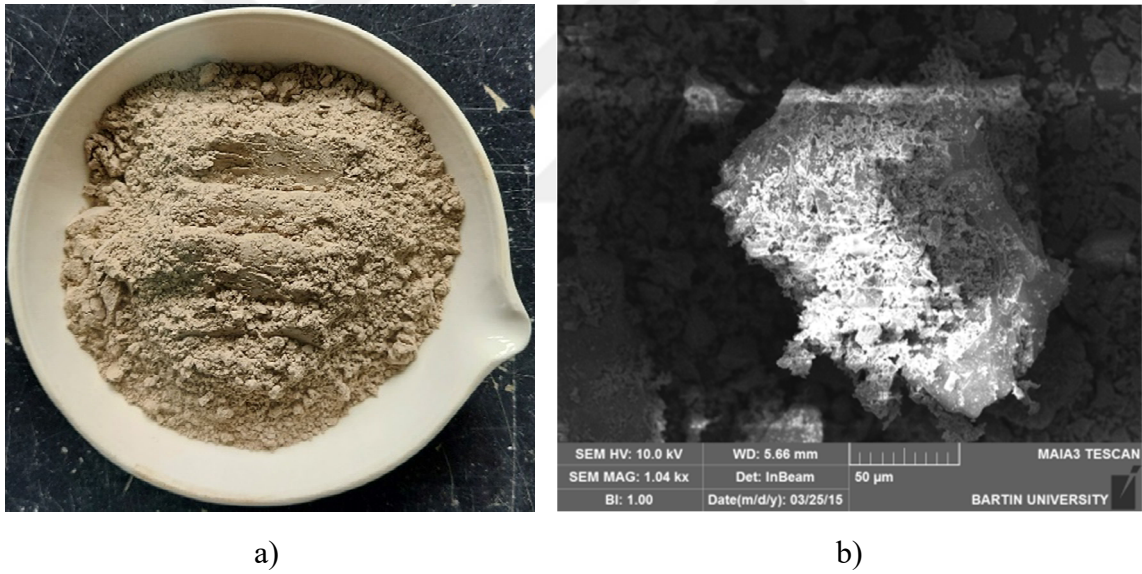
5.1.2 Volkanik Tüf (VT)

Volkanik tüfler, volkanizma esnasında silika ve alüminyum oksit içerikli bileşiklerden oluşan magmanın yer yüzüne çıkarak ani bir şekilde soğuması sonucu oluşan camsı bir malzemedir. İçinde yer alan gazların atmosfere dağılması ile gözenekli bir yapıya ve büyük yüzey alanlarına sahiptir (Erdoğan vd., 2003). Volkanik tüfler farklı silikat minerallerinin bileşiminden oluşmaktadırlar. İyi bir puzolanik tüf, yüksek düzeyde zeolit mineralleri ve

volkanik cam içerirken az miktarda kil ve alkali feldspat içermelidir (Türkmenoğlu ve Tankut, 2001).

Çalışmada kullanılan VT Isparta yerleşim alanı temel kazılarından alınmıştır. Doğal olarak tutturulmamış durumunda olan bu tüfler 200 numaralı (75 µm) elekten elenerek kullanılmıştır. VT kimyasal içeriğinin belirlenmesi için X-ışını floresansı analizi uygulanmıştır. Sonuçlara göre çalışmada kullanılan VT, silika ve alüminyum oksit açısından zengin ancak kalsiyum oksit açısından düşük bir içeriğe sahip malzeme olduğu tespit edilmiştir.

VT fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi sırasıyla Tablo 5.2’de, genel görünümü Şekil 5.2a’da, SEM görüntüsü Şekil 5.2b’de ve tane boyu analizi sonuçları Şekil 5.4’de sunulmuştur.



Şekil 5.2: Çalışmada kullanılan VT ait a) genel görünümü b) SEM görünümü

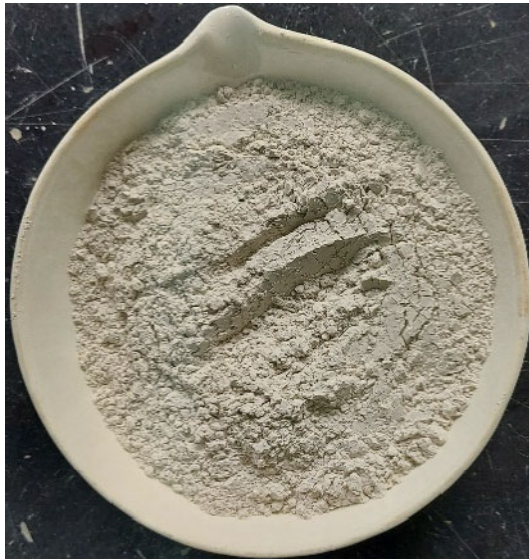
5.1.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Demir çelik üretimi sırasında kullanılan demir cevheri, demir oksit bileşenleri haricinde silis, alüminyum, kükürt, fosfor, mangan vb. yabancı maddelerde içermektedir. Demir cevherinin içindeki bu malzemeleri ve oksijeni uzaklaştırmak için yüksek fırın adı verilen sistemler kullanılmaktadır. Demir cevheri bu fırınlarda 1400-1600°C’ye kadar ısıtılmaktadır. Yüksek fırınlarda yakıt olarak yaygın kullanılan kok kömürünün içinde

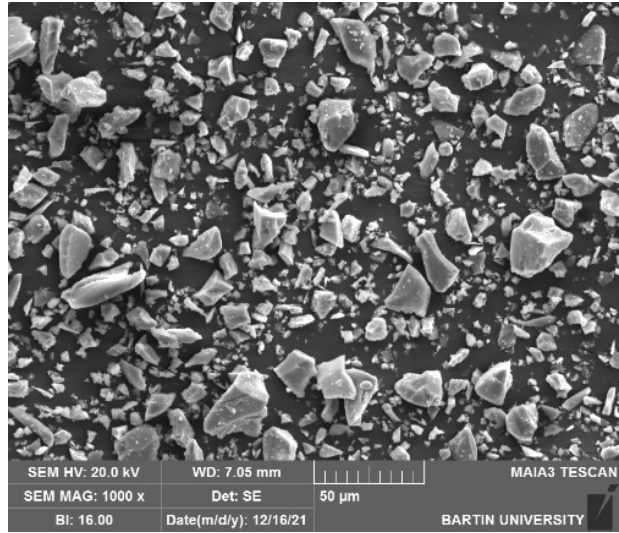
barındırdığı karbon ile cevher içinde yer alan oksijen saf demir üretimi sırasında birleşerek gaz halinde (CO ve CO_2) fırından çıkmaktadır. Geride, sahip olduğu yoğunluk sebebiyle altta eriyik halde demir ve üstte yine eriyik halde demir içinde yer almaması istenilen yabancı maddeler kalmaktadır. Bu eriyik haldeki yabancı maddelere yüksek fırın cürufu adı verilmektedir. Eriyik demir ve eriyik haldeki YFC fırından farklı noktalardan tahliye edilmektedir (Onat, 1998).

Fırından çıkarılan $1400-1600^\circ\text{C}$ 'deki eriyik cürufun bağlayıcı özelliğe sahip olabilmesi için hızlı bir biçimde soğutulması gerekmektedir. YFC'nin kimyasal içeriği yüksek fırına ve kullanılan hammaddeye bağlı olarak değişse de bünyesinde kireç, silisyum dioksit, alüminyum oksit ve az miktarlarda da demir, magnezyum ve kükürt yer almaktadır (Onat, 1998).

Çalışmada kullanılan YFC Kardemir Karabük Demir Çelik fabrikasından temin edilmiştir. YFC'nin kimyasal içeriğinin belirlenmesi için XRF analizi uygulanmış ve sonuçları Tablo 5.2'de, genel görünümü Şekil 5.3a'da, SEM görüntüsü Şekil 5.3b'de ve tane boyu analizi sonuçları Şekil 5.4'de sunulmuştur.

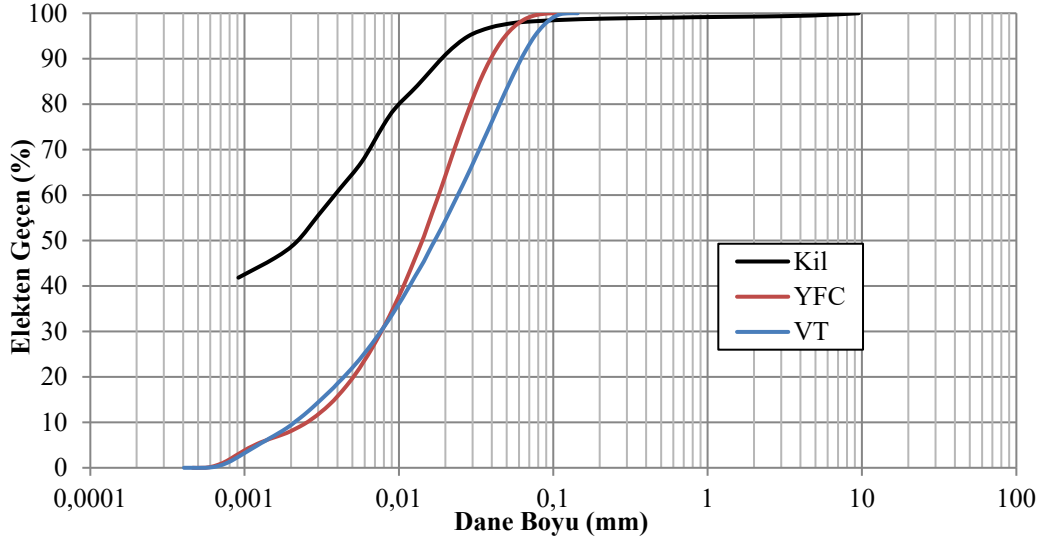


a)



b)

Şekil 5.3: Çalışmada kullanılan YFC ait a) genel görünümü b) SEM Görünümü



Şekil 5.4: Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin tane dağılım eğrileri

5.1.4 Çimento (PÇ)

Portland Çimentosu, kil ve kalkerin uygun oranlarda karıştırılarak 1400-1500 °C sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilen klinkere, %3-5 oranında alçıtaşı eklenmesi ve bu karışımın öğütülmesi sonucunda üretilen hidrolik bir bağlayıcıdır (Neville, 1995).

Yapılan çalışmada referans numunelerinin üretilmesi için TS EN 197-1 standardına uygun Sanko Bartın Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş tarafından üretilen CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanılmıştır. Okyay ve Dias (2010), yumuşak killi zeminlerin derin zemin iyileştirmesinde sadece çimento kullanımının, çimento + kireç ve sadece kireç kullanımından daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Bu nedenle referans numunelerinde sadece çimento kullanımı tercih edilmiştir.

CEM I 42.5R Portland Çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özelliklerse Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.2: Kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

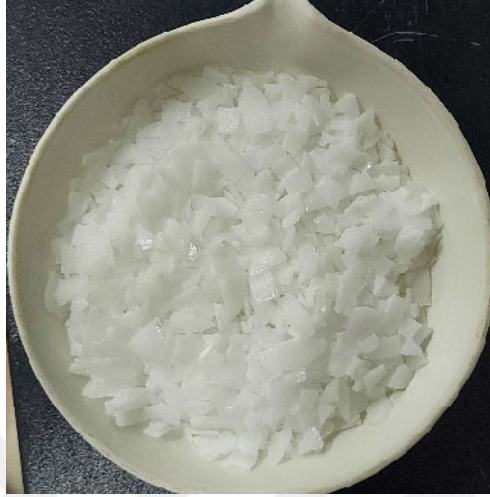
Parametre	Birim	K	YFC	VT	PÇ
SO ₃	%	0.075	0.5	0.43	3.45
Al ₂ O ₃	%	13.79	12.55	16.51	5.41
CaO	%	9.90	32.25	4.30	60.45
MgO	%	1.52	7.61	1.70	2.64
Fe ₂ O ₃	%	5.60	1.41	4.08	3.77
Na ₂ O	%	0.54	0.36	4.72	0.42
SiO ₂	%	52.81	37.6	56.32	-
SrO	%	0.032	-	0.47	-
BaO	%	0.076	-	0.32	-
Cr ₂ O ₃	%	0.026	-	<0.010	-
K ₂ O	%	2.18	0.68	6.38	0.86
MnO	%	0.091	-	0.12	-
P ₂ O ₅	%	0.13	-	1.28	-
TiO ₂	%	0.76	1.31	0.47	-
Na ₂ O	%	-	-	-	0.42
K ₂ O	%	-	-	-	0.86
Mn ₂ O ₃	%	-	-	-	0.218
Kızdırma Kaybı	%	12.40	-	2.07	2.49
Özgöl Ağırlık	gr/cm ³	2.69	2.89	2.48	3.12
Özgöl Yüzey	m ² /kg	1004	1031	1020	3947
D ₅₀	mm	0.0141	0.0171	0.0022	-
Priz Başlangıç (dak.)	-	-	-	-	280
Priz Sonu (dak.)	-	-	-	-	340
7 Günlük Basınç Dayanımı	-	-	-	-	44.9
28 Günlük Basınç Dayanımı	-	-	-	-	54.2

5.1.5 Sodyum Hidroksit (SH)

Alkali aktivatör olarak kullanılan pelet haldeki SH yer yüzündeki en bazik kimyasal olarak bilinmektedir. SH su ile çok kolay ve ısı veren tepkimeye girmektedir. SH boya, yapay ipek imalatı, petrol rafineleri, sabun ve deterjan endüstrisi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Çalışmada yerel tedarikçilerden temin edilen %97 saflıkta ve pelet halinde bulunan SH kullanılmıştır. Yapılan araştırmalarda SH için uygun konsantrasyonun 4,5 ile 18 M arasında olması gerektiği bildirilmiştir (Andini vd., 2008; Rattanasak ve Chindaprasirt,

2009; Somna vd., 2011; Hanjitsuwan vd., 2014). Bu çalışmada kullanılmak üzere 12 M konsantrasyonlu SH çözeltisi hazırlanmıştır. Hızlı sertleşmeyi önlemek için çözelti kullanılmadan önce 24 saat soğumaya bırakılmıştır. Çalışmada kullanılan SH'ın genel görünümü Şekil 5.5' de sunulmuştur.



Şekil 5.5: Çalışmada kullanılan sodyum hidroksite ait genel görünüm

5.1.6 Sodyum Silikat (SS)

Pek çok endüstride kullanılan bu kimyasal SH ile birlikte jeopolimer üretiminde alkali aktivatör olarak da kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan SS sıvı bir malzemedir. ÖZKİMSAN firmasından temin edilen SS, 3 Modül SS olarak geçmektedir. $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 3.10 ile 3.60 arasındadır.

5.1.7 Karışım Suyu (W)

Çalışmada yer altı suyunu temsil etmesi için kullanılacak karışım suyu şebeke hattından sağlanmıştır.

5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Deneysel Çalışmalar

Çalışmada sırasında üretilen bağlayıcı harç, deney numuneleri ve numuneler üzerinde yapılan deney ve analizler bu başlık altında incelenmiştir.

5.2.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

5.2.1.1 Bağlayıcı Harcın İçeriğinin Belirlenmesi

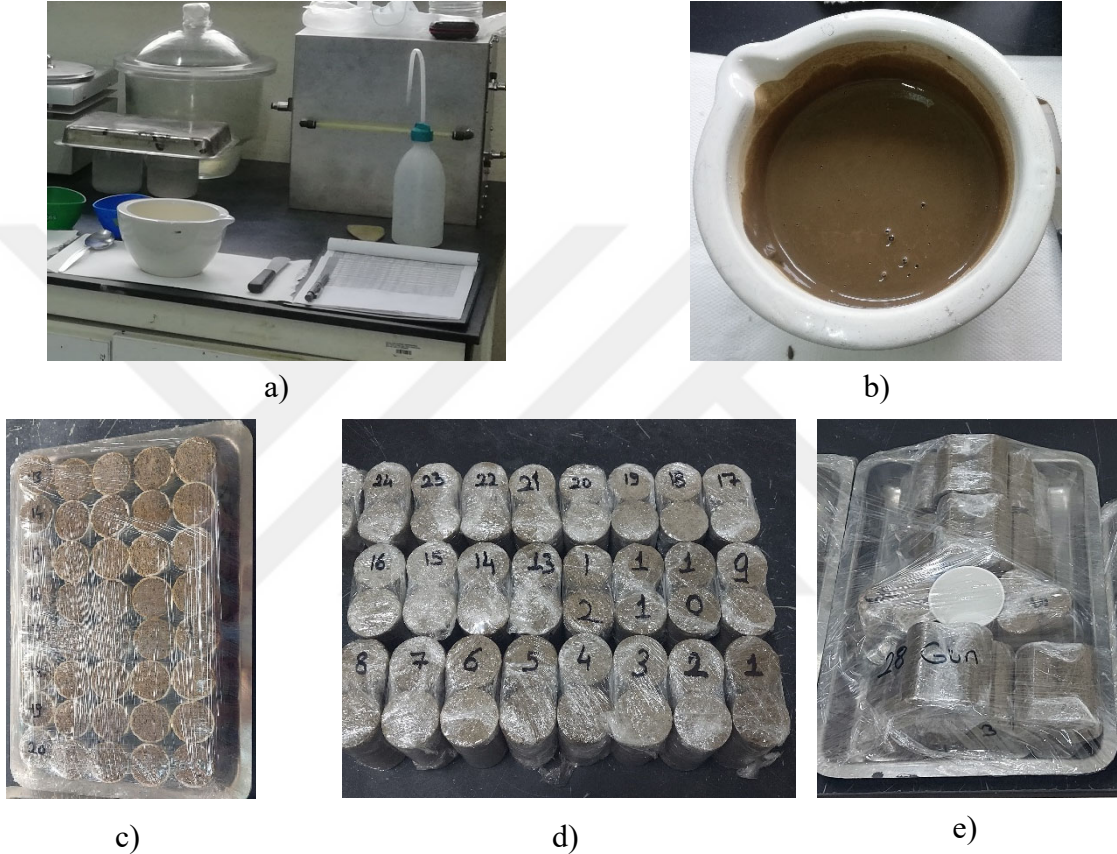
Deneyisel çalışmalarda kullanılacak bağlayıcı harcın içeriğini belirlemek için 48 farklı karışımdan toplam 96 numune üretilmiştir. Üretilen ön numuneler VT / YFC / SS / SH bileşenlerini kuru ağırlıkça farklı oranlarda içermekte olup, denenen içerikler Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3: Ön karışım içeriği ve oranları

Parametre	Bağlayıcı Harç
S (Puzolanik Malzeme)	VT, YFC
L (Alkali Aktivatörler)	SH, SS
VT içeriği (%)	100, 80, 70, 50
YFC içeriği (%)	0, 20, 30, 50
VT / YFC	100:0, 80:20, 70:30, 50:50
L / S	0.45, 0.65, 1.00
SH içeriği (%)	100, 70, 50, 30
SS içeriği (%)	0, 30, 50, 70
SH / SS	100:0, 70:30, 50:50, 30:70
Kürleme Süresi	28 Gün

Karışımında kullanılacak olan YFC ve VT 24 saat süre ile 50°C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş istenilen oranlarda tartıldıktan sonra kuru halde bir kaptan (Şekil 5.6a) 3 dakika boyunca karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Ardından içerisine alkali aktivatörler eklenmiş ve 5 dakika süre ile karıştırılmıştır (Şekil 5.6b). Hazırlanan bağlayıcı harç 38 mm çapında 76 mm yüksekliğindeki silindirik kalıplara 3 seferde doldurulmuştur. Her seferinde doldurulan malzeme 25 kez sert zemine vurulmuş ardından kalan kısım doldurulmuştur. Bu sayede karışımın kalıp içerisinde hava boşluğu kalmaksızın yerleşmesi amaçlanmıştır. Kalıplanan karışımlar su kaybetmemesi için hemen plastik poşetlere sarılmış (Şekil 5.6c) ve 24 saat süre sonundan kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler tekrar plastik poşetlere sarılarak (Şekil 5.6d) 28 gün boyunca 23±1°C'deki nemli bir ortamda kür edilmiştir (Şekil 5.6e). Kür süresi sonunda numunelere serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonunda

optimumum bağlayıcı içeriği 56 MPa dayanım ile %34,5 YFC, %34,5 VT, %9,3 SH ve %21,7 SS olarak belirlenmiştir. Ancak belirlenen bağlayıcı harç, doğal zemin ile karıştırılarak deney numuneleri oluşturulduğunda aynı performansı sergilememiş, tam tersine 28 gün kürden sonra plastik bir kıvama sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle en uygun bağlayıcı harç bileşimini belirlemek için doğal zemine farklı kombinasyonlarda katkı malzemeleri eklenerek ikinci bir deneme çalışması yapılmıştır.



Şekil 5.6: Karışım hazırlama sırasında a) kullanılan ekipmanlar b) harcın hazırlanması c) 24 saat bekleme d) numunelerin kür hazırlığı e) kür ortamı

İkinci defa hazırlanan numunelerde ilk denemedeki VT / YFC / SH / SS'in birbirlerine olan oranlarına (Tablo 5.3) bağlı kalınmış, VT ve YFC toplamı ise zemin örneğinin kuru ağırlığının %20'si kadar kullanılmıştır. Tüm karışımların, doğal zeminin LL değerinin %100 kadar su içermesi sağlanmıştır.

Birinci denemede uygulanan yöntemle hazırlanan ön karışım numuneleri 28 gün boyunca $23\pm1^{\circ}\text{C}$ 'deki nemli bir ortamda kür edilmiştir. Kür süresi sonunda numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre %25 VT, %25 YFC ve %50

SH'ten oluşan karışım en yüksek dayanımı göstermiş ve deneysel çalışmalar için bağlayıcı harç olarak kullanılmıştır.

5.2.1.2 Deney Numunelerinin Üretilmesi

Deney numunelerinin üretiminde ön denemede tespit edilen optimum bağlayıcı harç kullanılmıştır. Deney numuneleri K / W / VT / YFC / SH'dan oluşacak şekilde dizayn edilmiş ve oranlar Tablo 5.4'te sunulmuştur. Numunelerin üretilmesi sırasında doğal zemine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranında bağlayıcı harç ilave edilmiş ve arazi koşullarında değişkenlik gösteren su içeriğini temsilen zeminin LL değerinin 0.75, 1.00 ve 1.25 kadar karışım suyu eklenmiştir.

Tablo 5.4: Deney numuneleri ve referans numuneleri içeriği ve oranları

Parametre	Deney Numuneleri	Referans Numuneleri
Zemin	K	K
S (Puzolanik Malzeme)	VT, YFC	PÇ
Karışım Suyu (W) (LL)	0.75, 1.00, 1.25	0.75, 1.00, 1.25
L (Alkali Aktivatör)	SH	W
S / K (%)	10, 20, 30	10, 20, 30
VT içeriği (%)	50	-
YFC içeriği (%)	50	-
VT / YFC	50:50	-
L / S	1.00	0.75, 1.00, 1.25
SH içeriği (%)	100, 70, 50, 30	-
Kürleme Süresi	7, 28, 56, 90 Gün	
Kür Ortamı	23±1°C' deki nemli ortam ve sualtı	

Kullanılacak olan tüm katı malzemeler ilk olarak kurutulmuştur. Kurutulan malzemeler önceden hesaplanmış olunan miktarlarda laboratuvar tipi mikser ile 5 dakika süre ile karıştırılmış ve homojen hale getirilmiştir (Şekil 5.7a). Ardından karışıma yer altı suyunu temsil edecek olan su ve alkali aktivatörler ilave edilmiş ve yine 5 dakika süre ile karıştırılmıştır (Şekil 5.7b). Elde edilen karışımlar serbest basınç deneyi için 38 mm çapında 76 mm yüksekliğindeki silindirik PVC kalıplara (Şekil 5.7c) ve eğilme dayanımı deneyi için 160 mm uzunluğunda 40 mm genişliğinde ve 40 mm yüksekliğindeki çelik kalıplara (Şekil 5.7d) doldurulmuştur. Karışımlar kalıplara 3 eşit parçada doldurulmuş olup

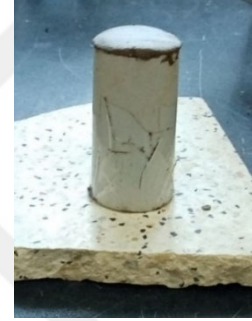
her seferinde 25 kez sert zemine vurularak içerisinde hava boşluğunun kalması ve katmanların oluşumu engellenmiştir. Hazırlanan numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra su kaybetmemeleri için plastik filmlere sarılmış ve 24 saat süre ile kalıp içerisinde bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler kür süresince su kaybının takip edilebilmesi için tartıldıktan sonra tekrar plastik filmlere ve poşetlere sarılmıştır (Şekil 5.7e). Numunelerin bir bölümü 7, 28, 56 ve 90 gün boyunca $23\pm1^{\circ}\text{C}$ 'deki nemli bir ortamda (Şekil 5.7f) ve bir bölümü ise su içindeki dayanım kazanımının incelenebilmesi için su altında kür edilmiştir (Şekil 5.7g). Kür süresi sonunda numuneler su kaybının olup olmadığının görülmesi için tartılmış ardından da serbest basınç ve eğilme dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.



a)



b)



c)



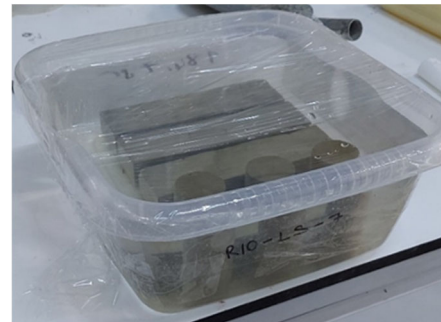
d)



e)



f)



g)

Şekil 5.7: a) Laboratuvar tipi mikser b) deney karışımı c) basınç deneyi numunesinin kalıba yerleştirilmesi d) eğilme deneyi numunelerinin kalıplara yerleştirilmesi e) deney numunelerinin su kaybının engellenmesi için plastik film ile sarılması f) nemli kür ortamı g) sualtı kür ortamı

5.2.2 Serbest Basınç Deneyi

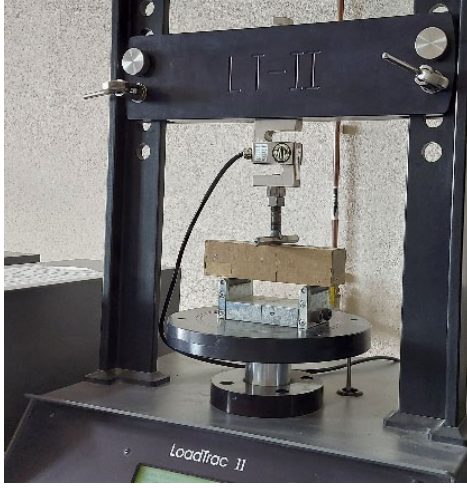
Üretilen deney numuneleri uygun ortamda 7, 28, 56 ve 90 gün kür edildikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyleri Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarındaki bilgisayar kontrollü GEOKOMP marka serbest basınç deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8). Deney sırasında uygulama parametreleri TS1900-2 standardına uygun olarak yükleme hızı numune boyunun %1 (0,76 mm/dak) olarak seçilmiş, deney süresi 10 dakikayla, boy kısalmasıysa yine aynı standartta belirtildiği gibi numune boyunun %20'si ile sınırlandırılmıştır. Deney sırasındaki gerilme değişimi her %0.1 deformasyon için bilgisayar tarafından otomatik olarak kayıt edilmiştir. Numunenin serbest basınç mukavemeti deney süresince uygulanan en yüksek kuvvetin en kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır.



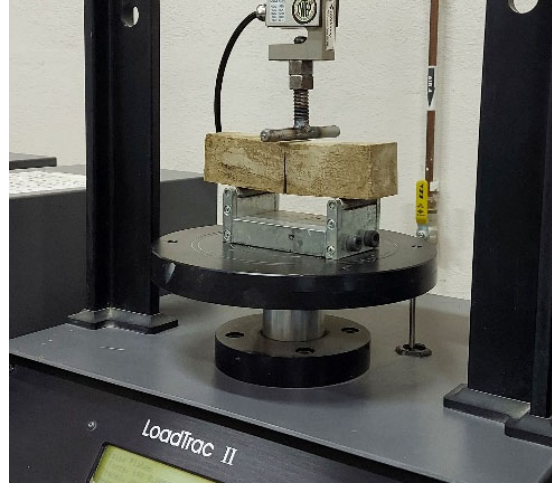
Şekil 5.8: a) Serbest basınç deneyi b) deney sonucu kırılan bir numune örneği

5.2.3 Eğilme Deneyi

Üretilen deney numuneleri uygun ortamda 7, 28, 56 ve 90 gün kür edildikten sonra eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme dayanımı deneyi için Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarındaki bilgisayar kontrollü serbest basınç deney cihazı kullanılmıştır. Kullanılan deney cihazında eğilme dayanımı ekipmanı bulunmadığı için bu çalışmada TS EN196-1 standardına uygun, özel olarak tasarlanmış üç noktalı eğilme deney düzeneği cihaza monte edilmiştir (Şekil 5.9). Deney sırasında numuneye 0.5 mm/dak. yükleme hızı ile kuvvet uygulanmıştır. Numunelerin yenilmesi tamamlanıncaya kadar deneye devam edilmiştir (Şekil 5.9b). Elde edilen verileri her %0,1 deformasyon için bilgisayara kayıt edilmiştir. Deney sonucunda numunenin eğilme dayanımı 5.1 denkleminde hesaplanmıştır.



a)



b)

Şekil 5.9: a) Eğilme dayanımı deneyi b) deney sonucu kırılan bir numune örneği

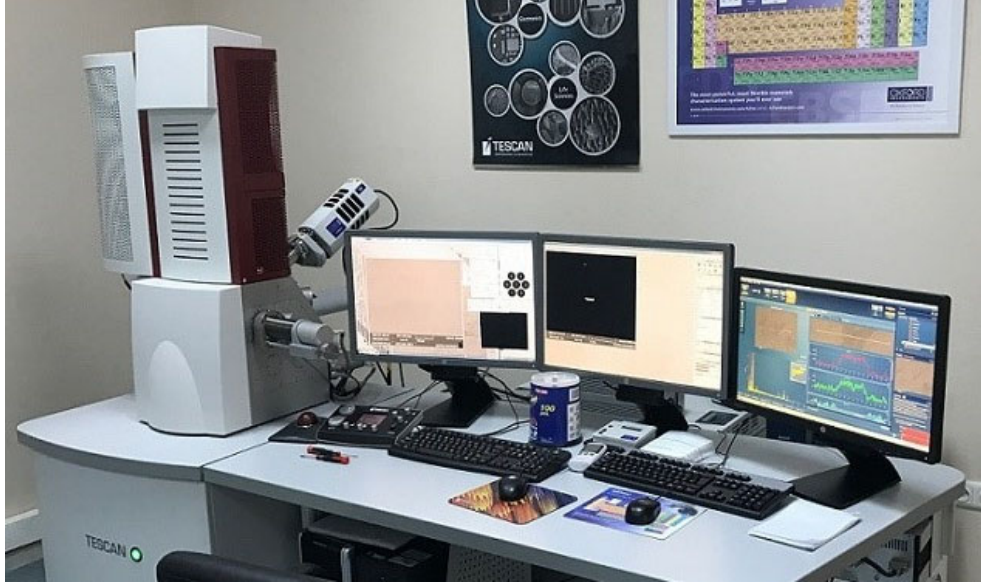
$$\sigma_e = \frac{3Fa}{2bd^2} \quad (5.1)$$

Burada, F (N) kırılma anında numune ortasına uygulanan kuvvet, a (mm) mesnet silindirleri arasındaki uzaklık, b (mm) numune genişliği ve d (mm) numune yüksekliğini ifade etmektedir.

5.2.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemesi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak numune yüzeyine elektron demetleri gönderilmekte gönderilen elektronlar numunelerin içermiş olduğu atomlar ile etkileşimde bulunmakta ve bu sayede saçılmaktadır. Saçılan elektronların detektörler aracılığıyla analiz edilmesiyle numunelerin nano ve mikro düzeyde görüntüleri elde edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında SEM analizleri Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında TESCAN marka MAIA3XMU model cihaz kullanılarak yaptırılmıştır (Şekil 5.10). Analizde kullanılacak örnekler serbest basınç deneyi sonrasında kalan 28 ve 90 günlük parçalardan seçilmiştir. Seçilen örnekler 10 x 10 x 5 mm'yi geçmeyecek şekilde alınmış ve etüvde 24 saat 45°C sıcaklıkta kurutulduktan sonra tekrar nem almayacak biçimde poşetlenerek SEM analiz birimine teslim edilmiştir.



Şekil 5.10: SEM analizi cihazı

5.2.5 X-Işını Difraktometrisi (XRD) Analizi

X ışını kırınım analizi aynı düzeyde dalga boyuna sahip olan X ışınlarının toz numune üzerine farklı açılar ile düşürülmesi sonrası her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilime sahip olmasına bağlı olarak ışınların kırılması yöntemine dayanır. Bu yöntem ile ince taneli zeminin mineral yapısının ve iyileştirilmiş zeminde gerçekleşen tepkimeler sonucu oluşan bileşenlerin incelenmesi sağlanmaktadır.

Çalışma kapsamında XRD analizleri Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında, RIGAKU marka SmartLab model X-Işını Difraktometresi cihazında yaptırılmıştır (Şekil 5.11). Analizde kullanılacak örnekler 28 ve 90 günlük kür sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulan numunelerden elde edilmiştir. Örnekler önce etüvde 24 saat 45°C sıcaklıkta kurutulmuş sonrasında toz haline getirilmiş ve nem almayacak bir şekilde poşetlenerek analiz birimine teslim edilmiştir. X ışını 3°/dakika hızla numuneye 5 ile 70 derece arasında uygulanmıştır.



Şekil 5.11: XRD analizi cihazı

5.2.6 DTA-TG Analizi

Termal gravimetri (TG) analiz yöntemi termal analiz tekniklerinden biri olup bu yöntem ile önceden programlanmış ısıtma şartlarında numunede meydana gelen ağırlık değişimleri ölçülebilmektedir. Diferansiyel termal analiz (DTA) yöntemi ile malzemede gelişen hal değişimi ve kimyasal reaksiyon sonrası oluşan enerji değişimlerinin tespiti sağlanabilmektedir.

Çalışma kapsamında DTA-TG analizi Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında, HITACHI marka STA 7300 model DTA-TG cihazında yaptırılmıştır (Şekil 5.12). Analizde kullanılacak örnekler 90 günlük kür sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulan numunelerden elde edilmiştir. Örnekler önce etüvde 24 saat 45°C sıcaklıkta kurutulmuş sonrasında toz haline getirilmiş ve nem almayacak bir şekilde poşetlenerek analiz birimine teslim edilmiştir. Analiz azotlu ortamda 10°C/dakika hızla 1000°C dereceye kadar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.12: DTA-TG analizi cihazı

6. BULGULAR

6.1 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında zemin numunesinin kuru ağırlığının %10, %20 ve %30 oranında VT + YFC içeren, farklı su içeriklerine sahip ve 2 farklı ortamda, 4 farklı kür süresinde incelenmek üzere toplam 144 adet serbest basınç deney numunesi üretilmiştir. VT ve YFC katkılı numunelerin performansının incelenebilmesi için PÇ kullanılarak aynı oranlara sahip, aynı süre ve koşullarda kür edilmiş 144 adet referans numunesi de çalışma kapsamında üretilmiştir. Kür süreleri sonunda uygulanan serbest basınç deneyi ile elde edilen veriler Şekil 6.1’de sunulmuştur. Grafiklerde daha önce yapılmış olunan ve araştırmacılar tarafından derin karıştırma yöntemi için tavsiye edilen en az 1 MPa’lık dayanım değeri de gösterilmiştir (Bruce vd., 2013).

Grafikler incelendiğinde bağlayıcı malzeme miktarının ve kür süresinin artması ile birlikte dayanım hem deney numunelerinde hem de referans numunelerine artmakta ancak karışım suyunun artması ile dayanım azalmaktadır. Sualtında kür edilen numunelerin ise en düşük dayanıma sahip oldukları görülmektedir. Bu durumun sebebinin artan su miktarının bağlayıcı harçta bulunan alkali aktivatör konsantrasyonunu azaltarak çözünmüş silisyum ve alüminyum iyonunun miktarının azalmasına sebep olması ve yüksek su içeriğinin zemin içinde var olan boşlukları doldurması nedeniyle bağlayıcının zemin partiküllerine yeterince bağlanamıyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bağlayıcı malzeme oranının %10 olduğu VT ve YFC içerikli numunelerde düşük su içeriklerinde (0.75LL ve 1.00LL) tavsiye edilen 1 MPa’lık en az dayanım değerini 28. günden sonra aşılabilmekte olmasına rağmen yüksek su içeriğinde (1.25LL ve sualtında) kür edilen numunelerde bu değer aşılamamaktadır. Su içeriğinin 0.75LL olduğu numunenin 7 günlük kür sonunda 90 günlük kür sonundaki serbest basınç dayanımının %33’ünü, 1.00LL su içeriğinde kür edildiğinde %30’ini, 1.25LL su içeriğinde %48’ini aldığı tespit edilmiştir. Şekil 6.1 incelendiğinde VT+YFC içerikli deney numunelerinin düşük su içeriklerinde (0.75LL ve 1.00LL) referans numunelerine yakın dayanım değerlerine ulaştığı tespit edilmiş olsa da yüksek su içeriklerinde (1.25LL ve sualtında) VT+YFC referans numunelerine göre daha düşük performans sergilediği tespit edilmiştir.

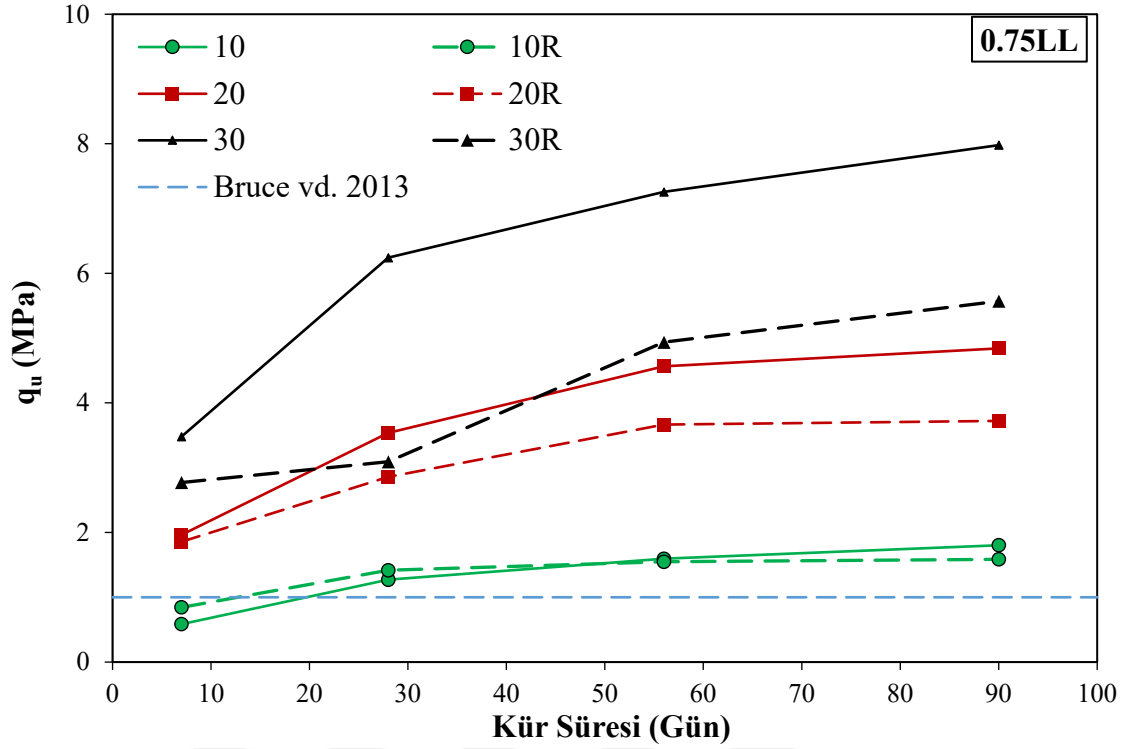
Ancak deney numunelerinde olduğu gibi referans numunelerinde de düşük su içeriklerinde (0.75LL ve 1.00LL) tavsiye edilen 1 MPa'lık en düşük dayanım değerini 28. günden sonra aşılabilmekte olduğu, yüksek su içeriğinde (1.25LL ve su altında) kür edilen numunelerde bu değer aşılamadığını ifade etmek gerekir. VT ve YFC içerikli numunelerin 7 günlük kür sonunda aynı şartlardaki referans numunelerine göre dayanımı 0.75LL su içeriğinde %31, 1.00LL su içeriğinde %51, 1.25LL su içeriğinde %51 daha azdır. Ancak 90 günlük kür sonrasında serbest basınç değerleri 0.75LL su içeriği için %13 fazlayken, 1.00LL su içeriğinde %4, 1.25LL su içeriğinde %47 daha azdır.

Bağlayıcı malzeme oranının %20 olduğu VT+YFC içerikli numuneler düşük su içeriklerinde (0.75LL ve 1.00LL) tavsiye edilen 1 MPa'lık en az dayanım değerini 7. gün itibariyle aşılabılmışken 1.25LL su içeriğinde kür edilen numunelerde bu değer 28. günde aşılmış, su altında kür edilen numunelerde aşılamamıştır. Su içeriğinin 0.75LL olduğu numunenin 7 günlük kür sonunda 90 günlük kür sonundaki serbest basınç dayanımının %40'ini, 1.00LL su içeriğinde kür edildiğinde %37'sini, 1.25LL su içeriğinde %29'unu ve su altında kür edildiğinde %15'ini aldığı tespit edilmiştir. VT+YFC içerikli numuneler ve referans numuneleri karşılaştırıldığında düşük su içeriklerinde (0.75LL ve 1.00LL) kür edildiğinde daha iyi dayanım değerleri elde edilmiş olsa da yüksek su içeriklerinde (1.25LL ve su altında) kür edildiğinde referans numunelerine göre düşük performans sergilediği görülmektedir. VT+YFC içerikli numunelerin 7 günlük kür sonunda aynı şartlardaki referans numunelerine göre dayanımı 0.75LL su içeriğinde %5 fazla, 1.00LL su içeriğinde %12, 1.25LL su içeriğinde %44 ve su altında kür edildiğinde %69 daha azdır. Ancak 90 günlük kür sonrasında serbest basınç değerleri 0.75LL su içeriği için %30 ve 1.00LL su içeriğinde %41 fazlayken, 1.25LL su içeriğinde %18 ve su altında kür edildiğinde %11 daha azdır.

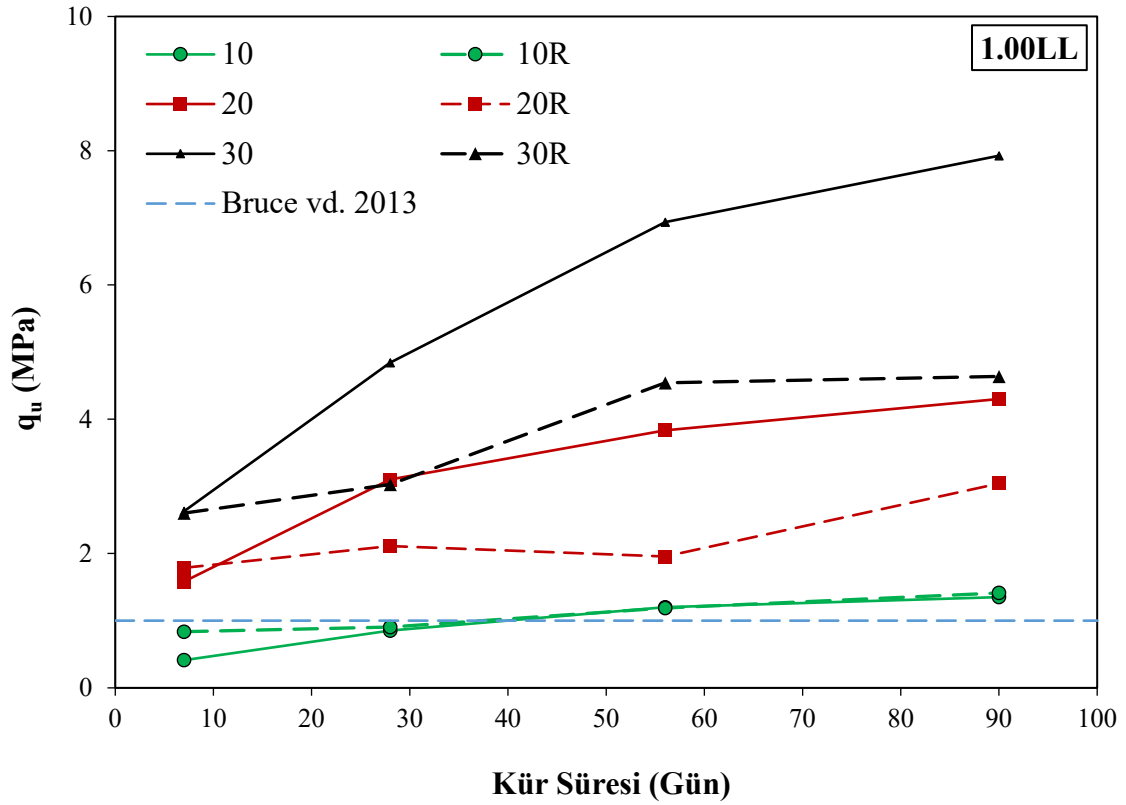
Bağlayıcı malzeme oranının %30 olduğu VT+YFC içerikli numuneler 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonunda kazandıkları basınç dayanımları tüm su içeriklerinde tavsiye edilen 1 MPa'lık en az dayanım değerine 7. gün itibariyle ulaşmıştır. Su içeriğinin 0.75LL olduğu numunenin 7 günlük kür sonunda 90 günlük kür sonundaki serbest basınç dayanımının %44'ünü, 1.00LL su içeriğinde kür edildiğinde %33'ünü, 1.25LL su içeriğinde %39'unu ve su altında kür edildiğinde %36'sını aldığı tespit edilmiştir. Deney numuneleri ile referans numunelerinin serbest basınç sonuçları karşılaştırıldığında tüm su içeriklerinde VT+YFC içerikli numunelerin referans numunelerine göre daha iyi

performans gösterdiği görülmektedir. VT+YFC içerikli numunelerin 7 günlük kür sonunda aynı şartlardaki referans numunelerinin dayanımına göre 0.75LL su içeriğinde %26, 1.00LL su içeriğinde %1 fazlayken 1.25LL su içeriğinde %19 ve su altında kür edildiğinde %9 daha azdır. Ancak 90 günlük kür sonrasında serbest basınç değerleri 0.75LL su içeriği için %43, 1.00LL su içeriğinde %71, 1.25LL su içeriğinde %4 ve su altında kür edildiğinde %47 daha fazla dayanım elde edilmiştir.

Tüm deney ve referans numunelerinin dayanım kazanma hızlarının 28. günden sonra azaldığı ve bu süre içerisinde nihai dayanımlarının en az %60'ına ulaştıkları ifade edilebilir. Referans numunelerinin dayanımı 56. günden sonra ciddi bir artış göstermezken, VT+YFC içerikli deney numunelerinin dayanım artışının devam etmekte olduğu Şekil 6.1'de görülmektedir. Bununla birlikte 0,75LL su içeriğindeki taze karışımların yarı plastik bir kıvamda olmaları nedeniyle pratik uygulamalar için elverişli olmayacağı, bunun yerine 1.00LL su içeriğine sahip olan karışımların uygulama açısından daha elverişli olduğu düşünülmektedir.

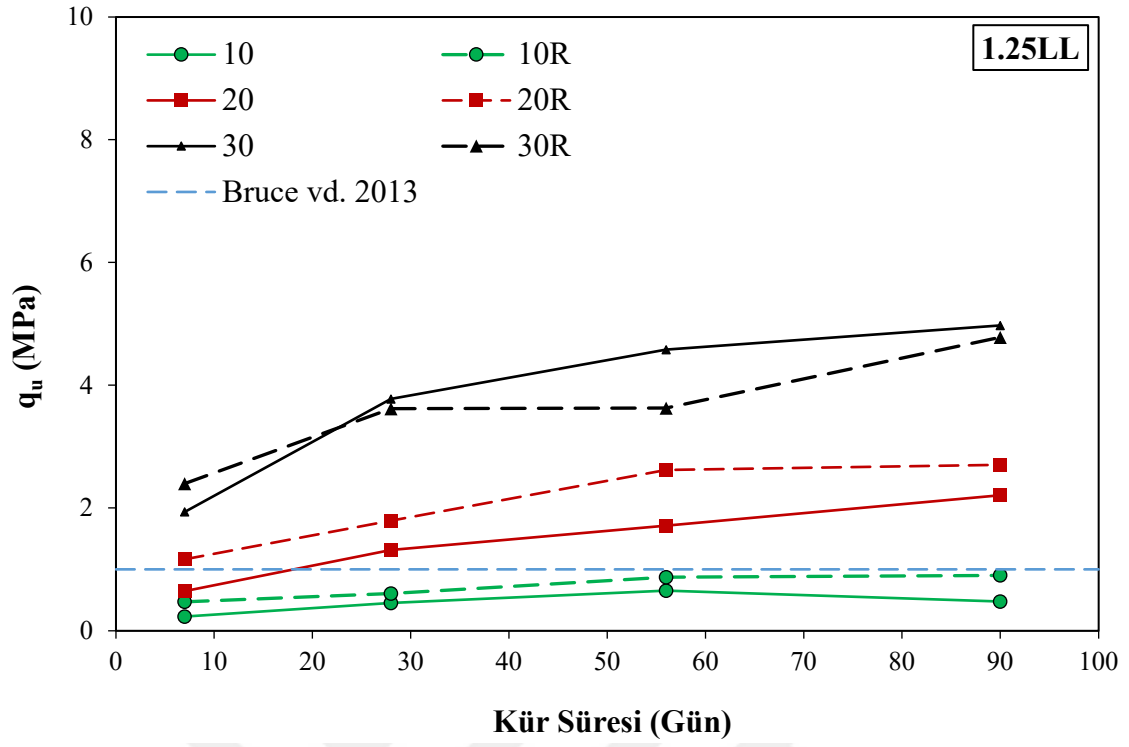


a)

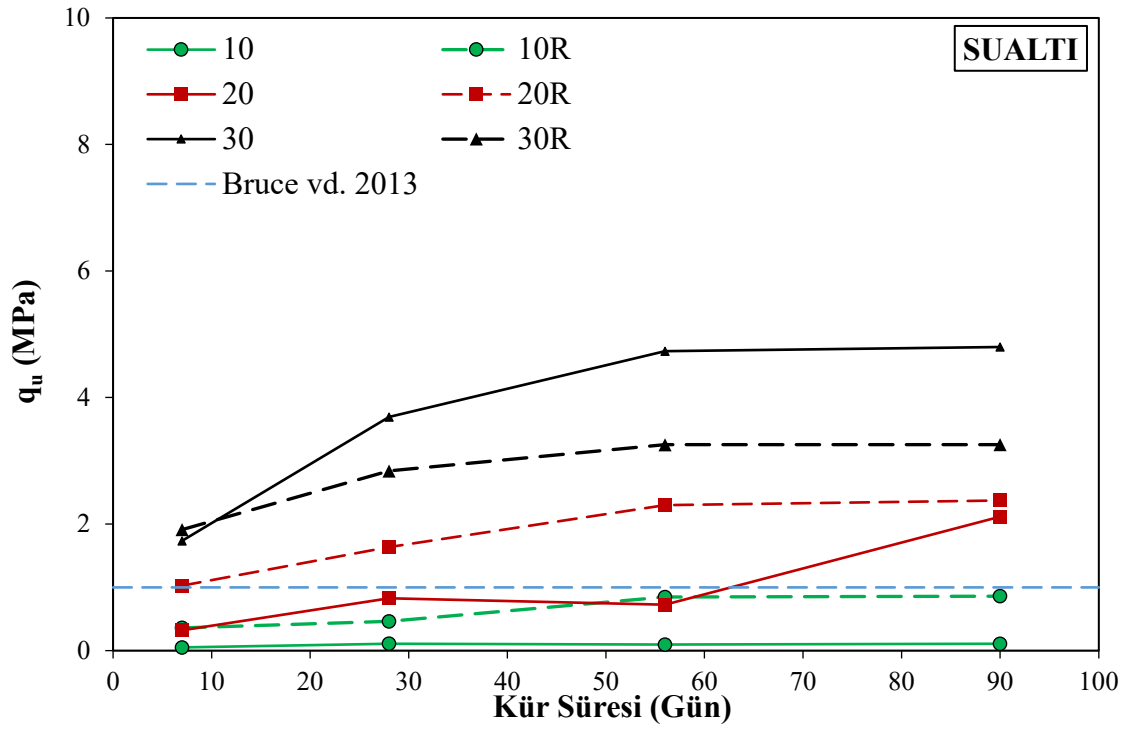


b)

Şekil 6.1: a) 0.75 LL, b) 1.0 LL, c) 1.25 LL' lik su içerikleri ile d) sualtında kürlenmiş numunelerin kür süresi-serbest basınç dayanımı ilişkisi (10, 20, 30 katkı oranı, R referans numunelerini ifade etmektedir).



c)

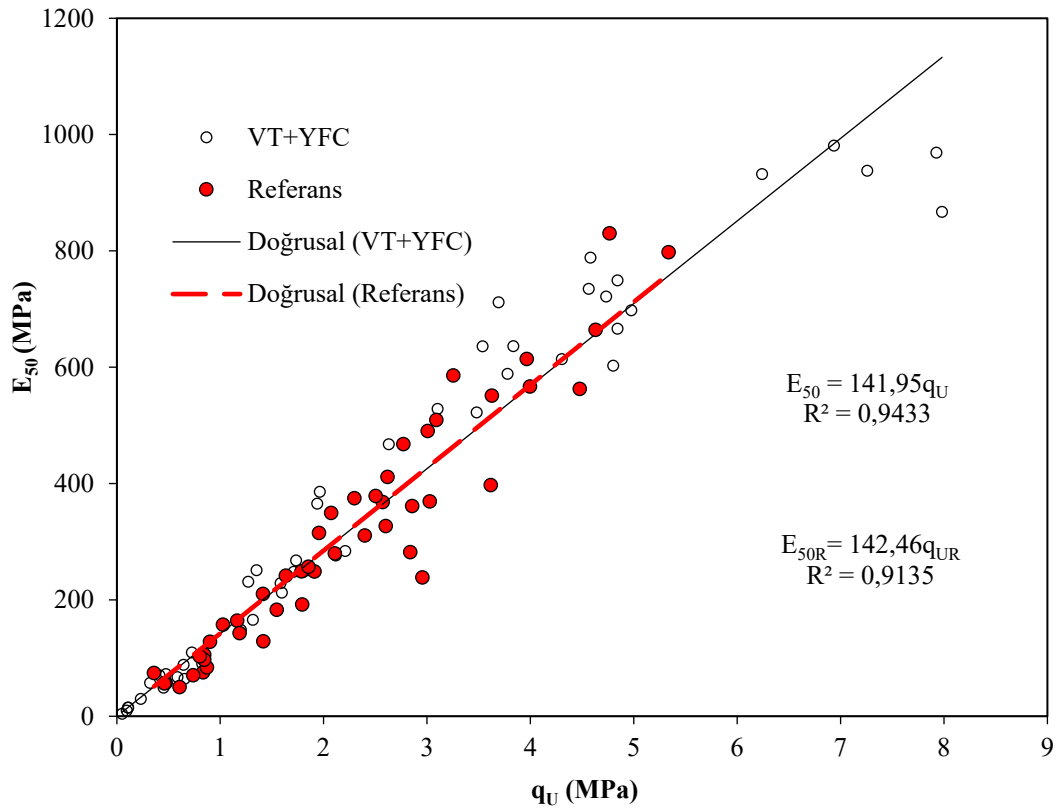


d)

Şekil 6.1: (devam ediyor)

Zemin iyileştirme uygulaması sonunda zeminin rijitliğini değerlendirmek için tüm karışımların $0,5q_u$ karşılık gelen gerinim oranı sekant elastisite modülü (E_{50}) hesaplanmıştır. Sonuçlar, Şekil 6.2'de görüldüğü gibi, numunelerin elastisite modülünün, serbest basınç dayanımı ile benzer eğilimlerle arttığını ve VT+YFC içerikli numunelerin referans numunelerle aynı değere sahip olduğunu göstermektedir. VT+YFC katkılı numunelerin elastisite modülü $E_{50} = 141,95q_u$, referans numunelerinin ise $E_{50} = 142,46q_u$ olarak bulunmuş ve regrasyon değerlerinin çok yüksek olduğu görülmüştür.

Kuru derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminler için araştırmacılar $50 \leq E_{50} \times q_u \leq 250$ eşitliğinin uygun bir aralık olduğunu ifade etmişlerdir (Jacobson vd., 2005; Baker, 2000; Broms, 2003). Our vd. (1996), ıslak karıştırma için E_{50} değerinin q_u 75 ile 1.000 aralığında olabileceğini ifade etmiştir. Şekil 6.2'de sunulan E_{50} değerlerinin derin karıştırma yöntemi ile stabilize edilmek istenen malzemelerin ön tasarımında veya sayısal analizinde araştırmacılara ve mühendislere benzer şekilde fayda sağlayabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.2: VT+YFC bazlı ile referans numunelerine ait serbest basınç dayanımları ve elastisite modülü arasındaki ilişki

6.2 Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında zemin numunesinin kuru ağırlığının %10, %20 ve %30 oranında VT + YFC içeren, farklı su içeriklerine sahip ve 2 farklı ortamda, 4 farklı kür süresinde incelenmek üzere toplam 144 adet 40x40x160 mm'lik eğilme dayanımı deney numunesi üretilmiştir. Alternatif bağlayıcı içerikli numunelerin performansının incelenebilmesi için aynı oranlar ve koşullarda PÇ kullanılarak 144 adet referans numunesi de çalışma kapsamında üretilmiştir. Kür süreleri sonunda yapılan eğilme dayanımı deneyi sonuçları Şekil 6.3'de sunulmuştur.

Numuneler eğilme testine tabi tutulduğunda, üst ve alt yarıları sırasıyla basınç ve çekme gerilimine maruz kalmış ve hem basma hem de çekme gerilimleri kırış kırılmasına etki etmiştir. Ancak çekme gerilimi kırışın kırılması üzerinde daha büyük bir etki oluşturmuştur (Mbaraga vd., 2014; Nath ve Sarker, 2017).

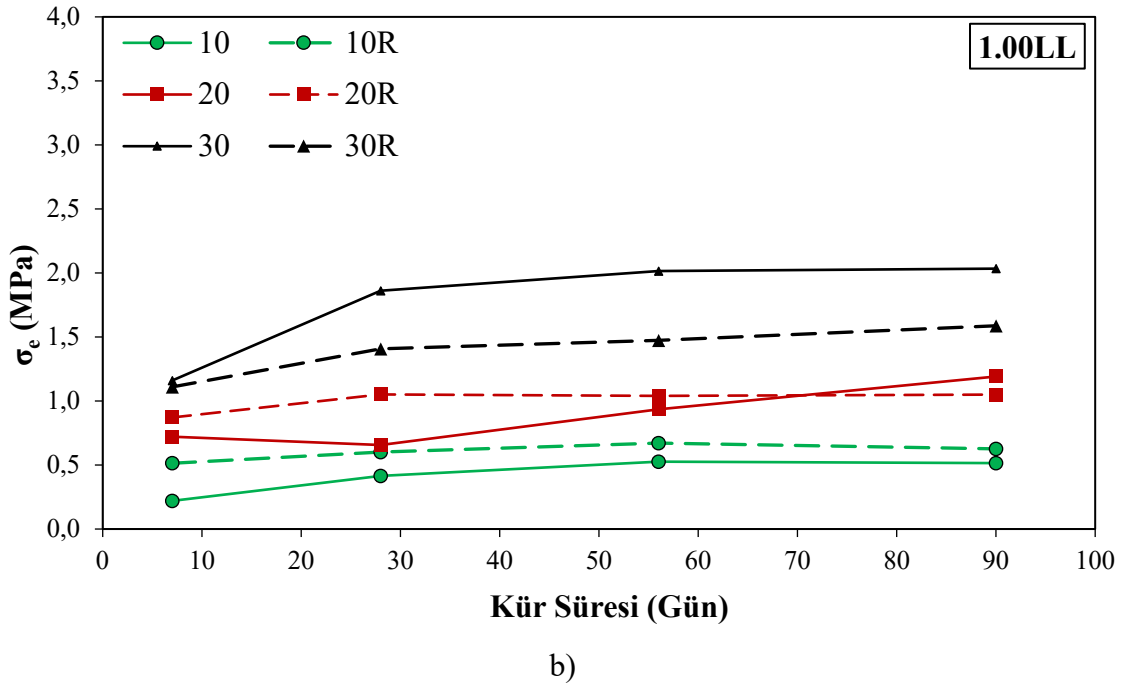
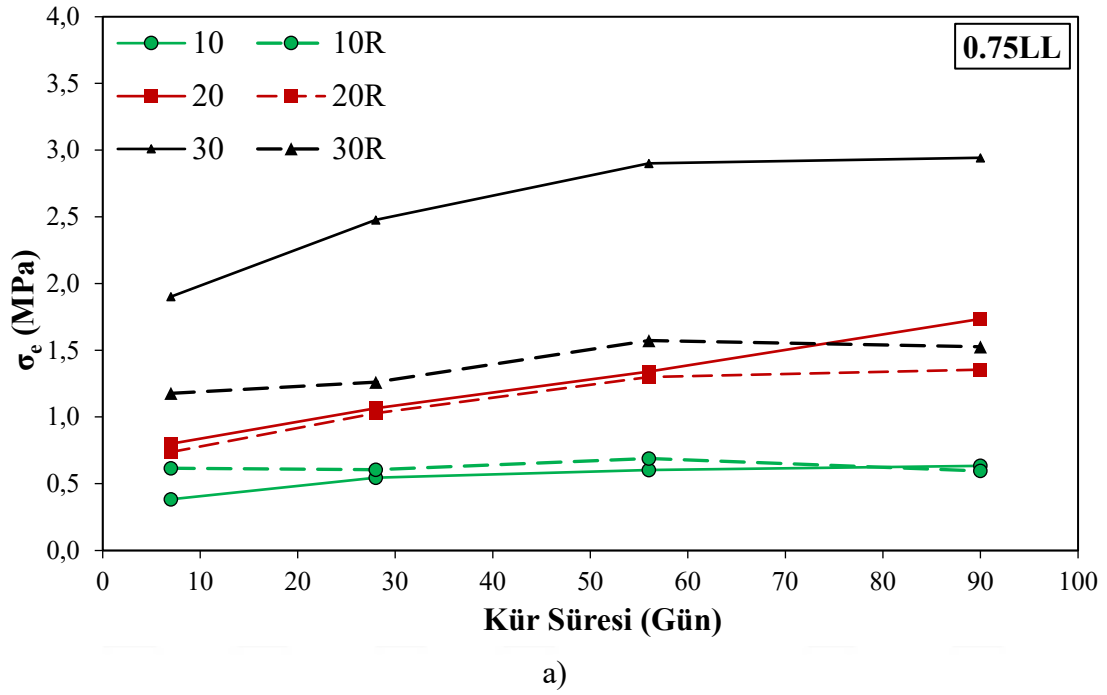
Şekil 6.3'de yer alan grafiklere göre katkı oranının ve kür süresinin artmasıyla tüm karışımlarda eğilme dayanımının arttığı, su içeriğinin artmasıyla bu değerlerin azaldığı görülmüştür. Serbest basınç dayanımı sonuçlarının aksine, %30 bağlayıcı içeriğine sahip karışımlar haricinde VT+YFC içerikli numuneler PÇ ile stabilize edilen numunelere göre daha düşük eğilme dayanımına sahiptir.

Bağlayıcı içeriğinin %10 olduğu numuneler tüm kür sürelerinde ve su içeriklerinde referans numunelerinden düşük eğilme dayanımı göstermiştir.

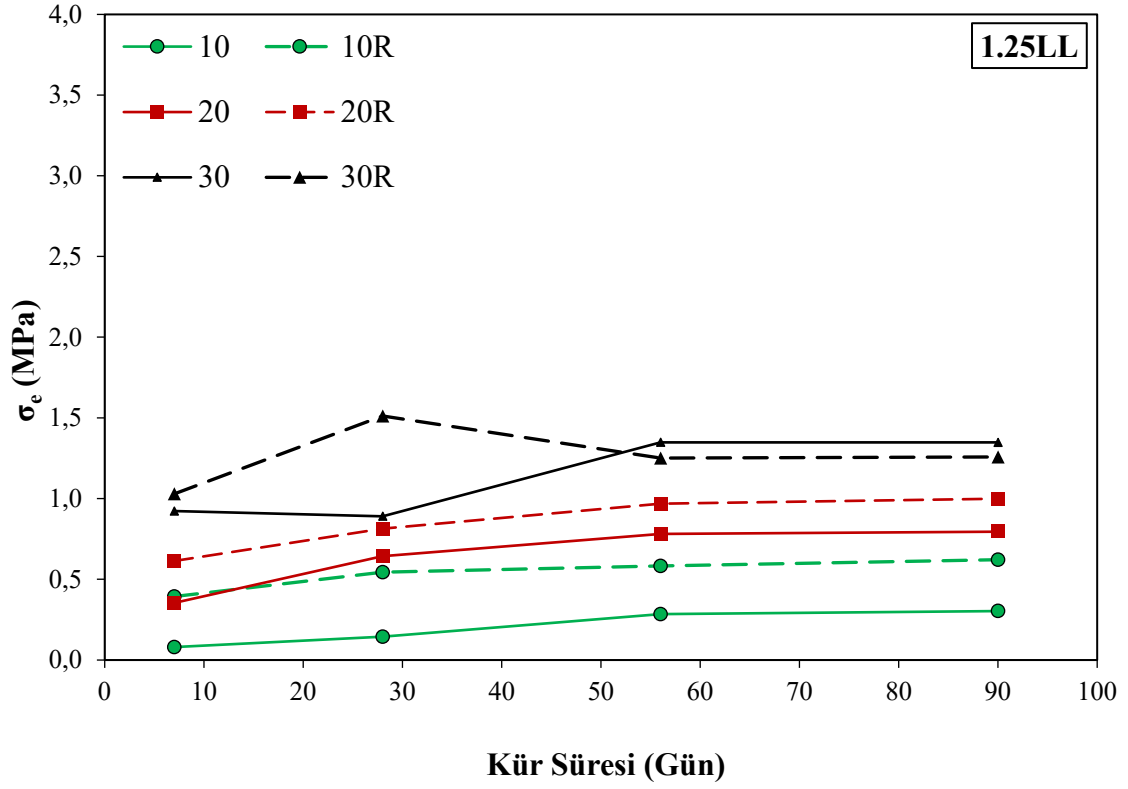
Bağlayıcı içeriğinin %20 olduğu VT ve YFC içerikli deney numunelerinde 0.75LL su içeriğinde ve 90 günlük kür sonunda 1.74 MPa, 1.00LL su içeriğinde 1.19 MPa, 1.25LL su içeriğinde 0.80 MPa ve sualtında 0.69 MPa eğilme mukavemeti ölçülmüştür. Değerler kıyaslandığında görülmektedir ki VT ve YFC içerikli numuneler 0.75LL ve 1.00LL su içeriğinde referans numunelerine kıyasla eğilmeye karşı daha dayanıklıdır. Ancak 1.25LL ve sualtında su içeriğinde referans numunelerine göre daha düşük eğilme dayanımına sahiptir.

Bağlayıcı içeriğinin %30 olduğu 0.75LL su içeriğindeki 90 günlük numune 2,94 MPa ile en yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Bununla birlikte 1.00LL su içeriğinde bu değer

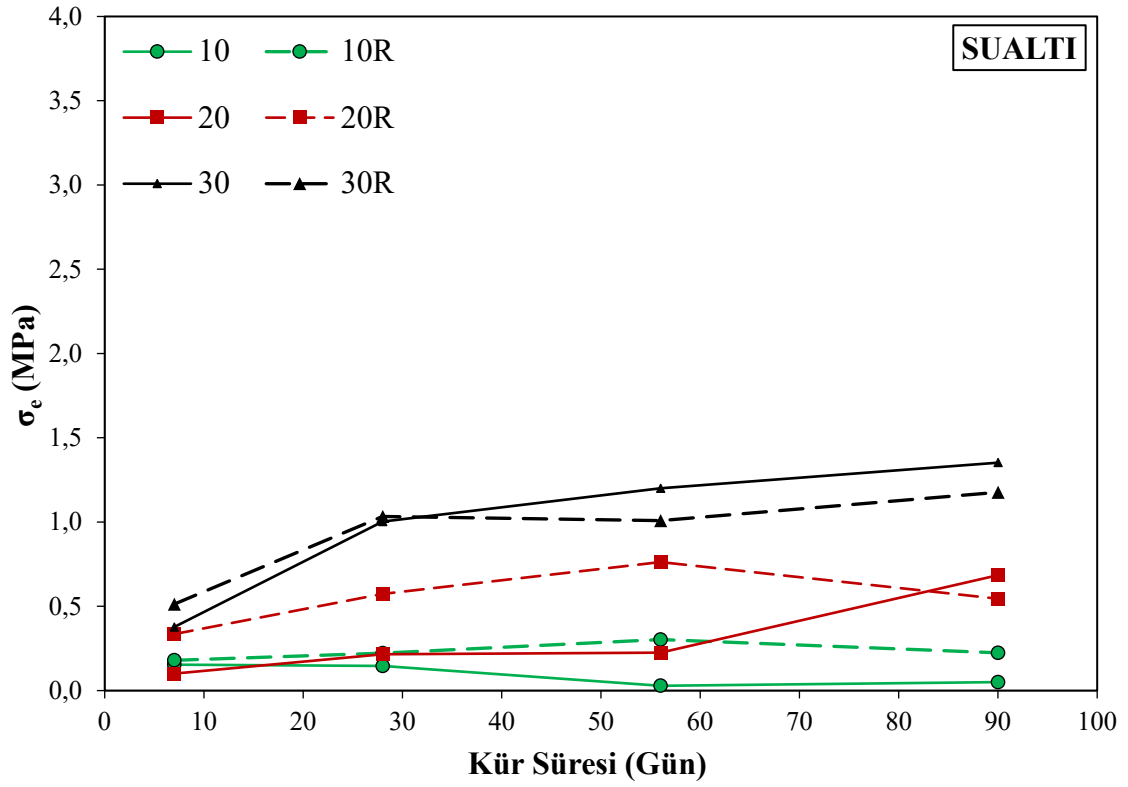
2.03 MPa, 1.25LL su içeriğinde 1.35 MPa ve su altında 1.35 MPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar referans numuneleri ile kıyaslandığında VT ve YFC içerikli numuneler referans numunelerine göre 0.75LL su içeriğinde %92, 1.00LL su içeriğinde %28, 1.25LL su içeriğinde %7 ve su altında kür edildiğinde %14 daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir.



Şekil 6.3: a) 0.75 LL, b) 1.0 LL, c) 1.25 LL'lik su içerikleri ile d) su altında kürlenen numunelerin kür süresi-eğilme dayanımı ilişkisi (10, 20, 30 katkı oranı, R referans numunelerini ifade etmektedir).



c)



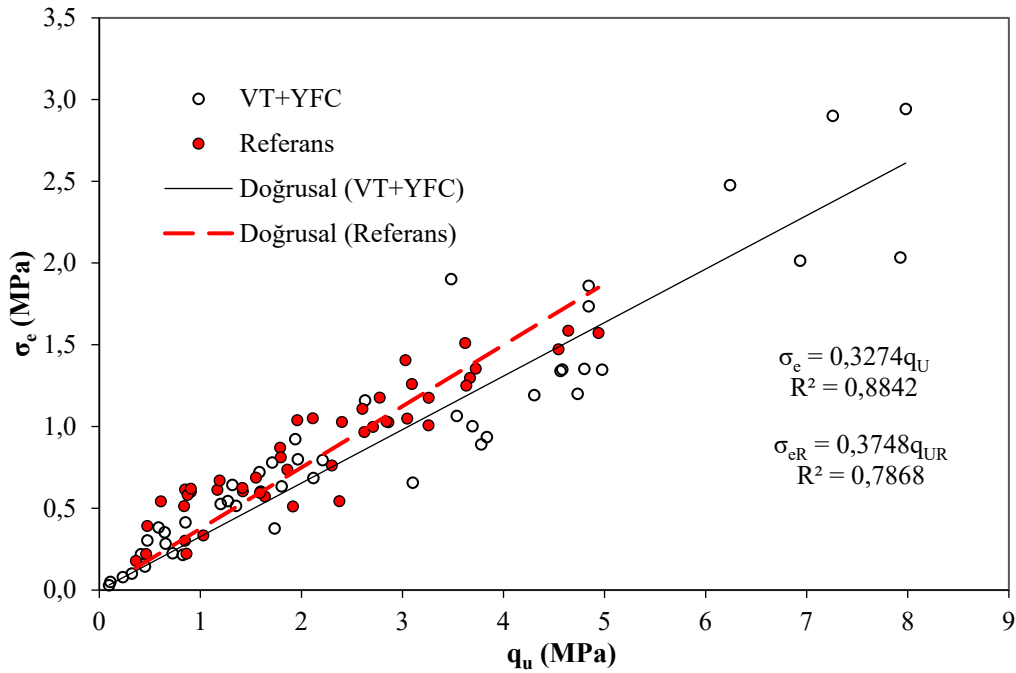
d)

Şekil 6.3: (devam ediyor)

6.3 Serbest Basınç ve Eğilme Dayanımı Deney Sonuçlarının İlişkisi

Serbest basınç deneyi yaygın olarak tercih edilen bir test yöntemidir. Bu nedenle eğilme dayanımı değerlerinin tahmini için serbest basınç – eğilme dayanımı sonuçları arasında bir ilişkinin geliştirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Tüm kür günleri sonunda gerçekleştirilen serbest basınç ve eğilme dayanımı deneyi sonuçları Şekil 6.4’de sunulmuştur. Hem VT+YFC içeren hem de PÇ içerikli bağlayıcılar kullanılarak üretilen numuneler için, bağlayıcı içeriği ve sertleşme süresinden bağımsız olarak yüksek doğrusal korelasyonlar elde edilmiştir.

Şekil 6.4’de görüldüğü gibi serbest basınç dayanımı değerindeki artış ile birlikte eğilme dayanımı değerinde de artış gözlenmektedir. Hesaplanan bu korelasyonların ilerleyen süreçte derin zemin karıştırma yönteminin sayısal modellemelerinde faydalı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 6.4: Serbest basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi

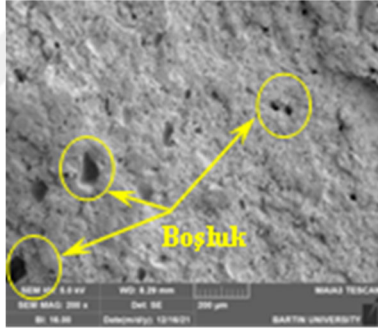
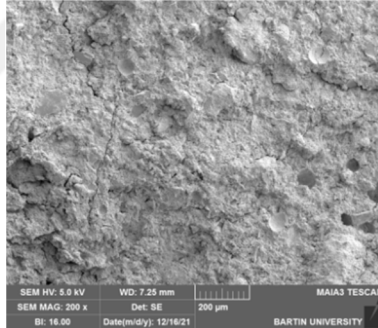
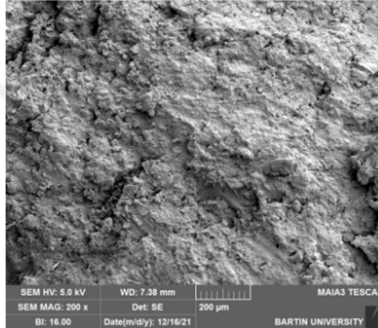
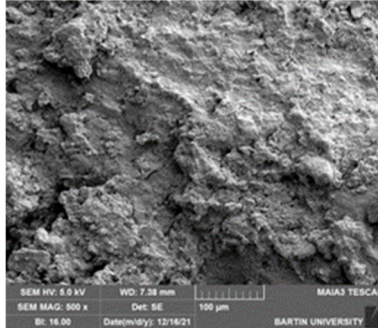
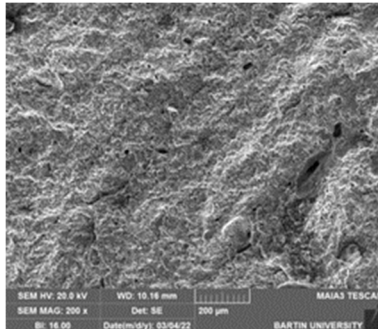
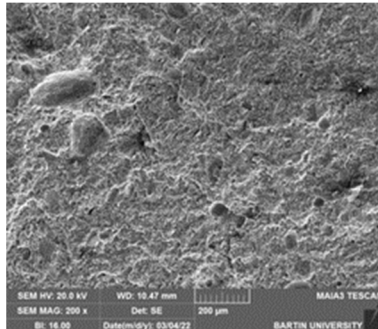
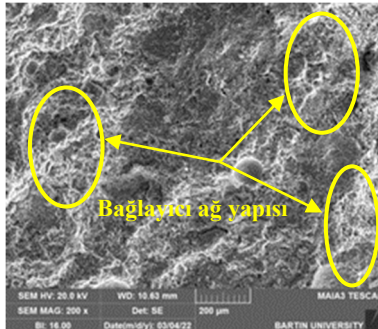
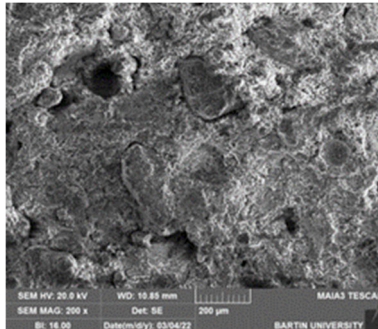
6.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemeleri

Serbest basınç deneyi sonrasında kırılan numunelerinden seçilen örnekler üzerinde mikro boyutlu görüntü elde edebilmek için SEM görüntülemesi uygulanmıştır. Örnekler

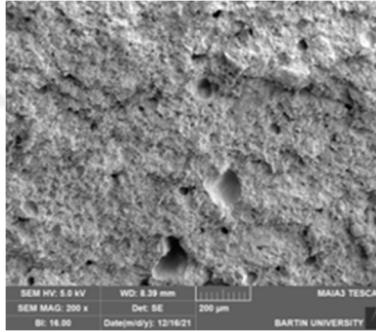
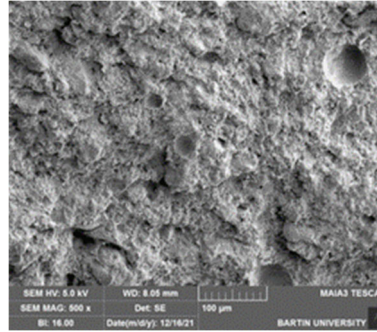
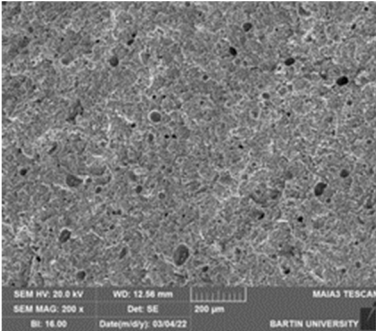
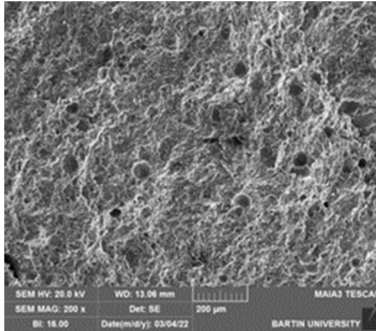
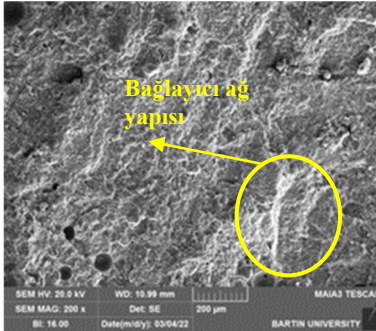
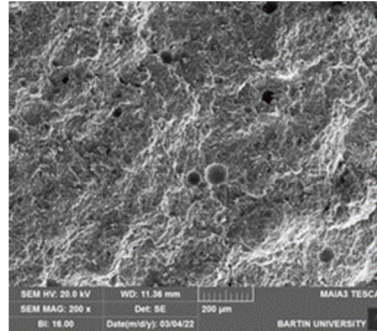
seçilirken tüm karışım oranlarından ve tüm su içeriklerinden olmasına dikkat edilmiştir. Örneklerin mikro yapısındaki değişiklikleri gözlemleyebilmek için 28 ve 90 gün süresince kürlenen numuneler kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler Şekil 6.5’de sunulmuştur.

28 günlük 0.75LL su içeriğindeki karışımın numuneleri incelendiğinde boşluklu ve porozlu içyapıya sahip oldukları görülmektedir. Buna rağmen yüksek dayanım sergilemelerinin düşük su içeriğine bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu karışımlar 1.00LL su içeriğinde daha masif yapıya sahip olmalarına karşın daha düşük dayanım göstermeleri su içeriğinin korumasından ileri gelmektedir. Su içeriğinin artması karışımelerde taneler arası bağları zayıflatarak daha gevşek bir yapı meydana gelmesine neden olmuştur. Diğer yanda artan bağlayıcı harç içeriği zemin boşluklarını doldurarak daha sıkı bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Bağlayıcı esas olarak yapışma, sarma, doldurma yoluyla zemin bünyesini güçlendirmiştir.

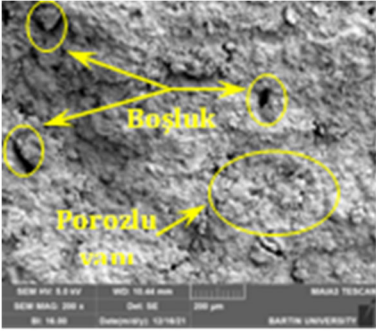
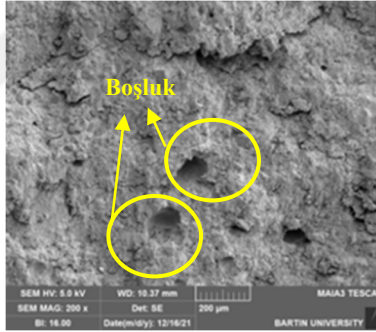
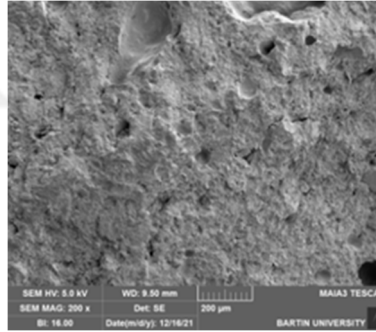
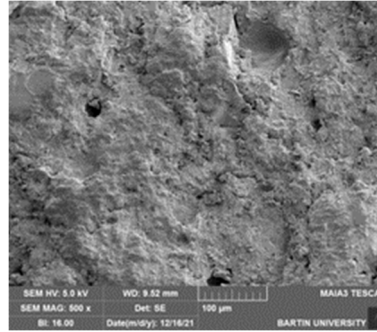
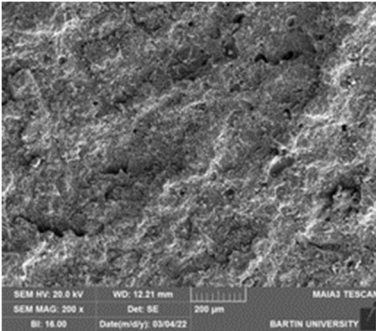
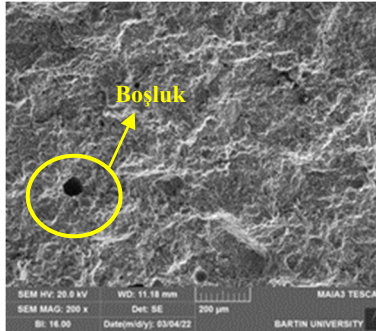
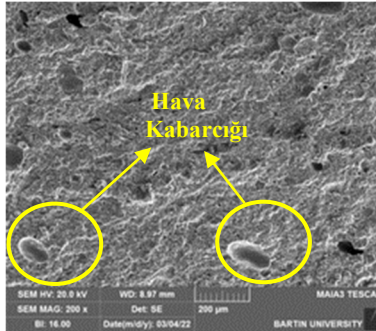
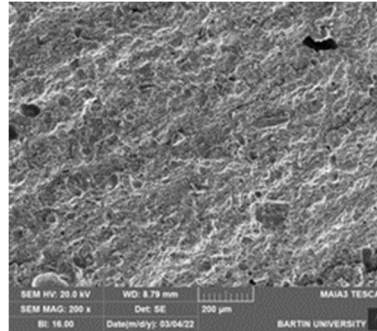
90 günlük numunelere bakıldığında yapıda boşluklar olmasına rağmen genellikle bağlayıcı harcın boşlukları doldurduğu, zemin parçacıklarının yüzeyine yapıştığı ve matriste bir aę oluşturarak kompaktlığı arttırdığı görülmektedir. Karışımelerin kompakt içyapı ve yüksek mukavemeti puzolanik reaksiyon sonuçları oluşan jellerin açığa çıkmasından ileri gelebileceği düşünülmektedir.

		K.S Gün	Su İçeriği			
			0.75LL	1.00LL	1.25LL	Doygun (Sualtı)
Bağlayıcı İçeriği (%)	10	28				
	90					

Şekil 6.5: 28 ile 90 günlük karışım numunelere ait SEM görüntüleri

		K.S Gün	Su İçeriği			
			0.75LL	1.00LL	1.25LL	Doygun (Sualtı)
Bağlayıcı İçeriği (%)	20	28				
	90					

Şekil 6.5: (devam ediyor)

		K.S Gün	Su İçeriği			
			0.75LL	1.00LL	1.25LL	Doygun (Sualtı)
Bağlayıcı İçeriği (%)	30	28				
	90					

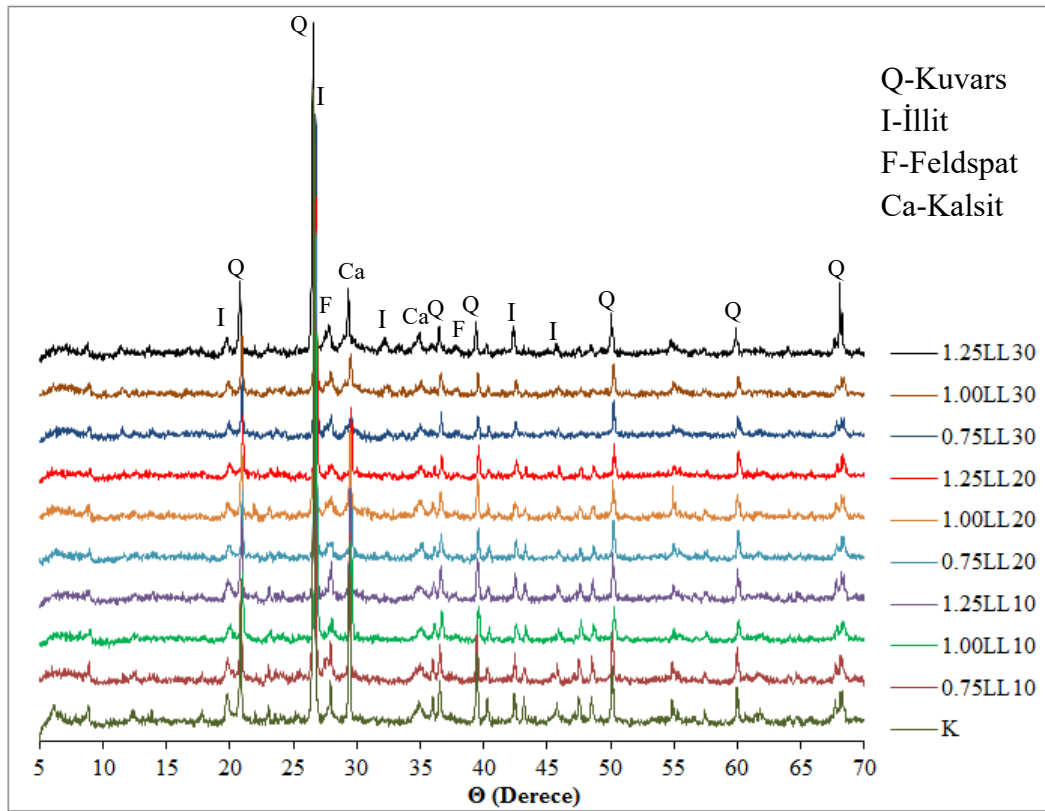
Şekil 6.5: (devam ediyor)

6.4. X-Işını Difraktometrisi (XRD) Analizi Sonuçları

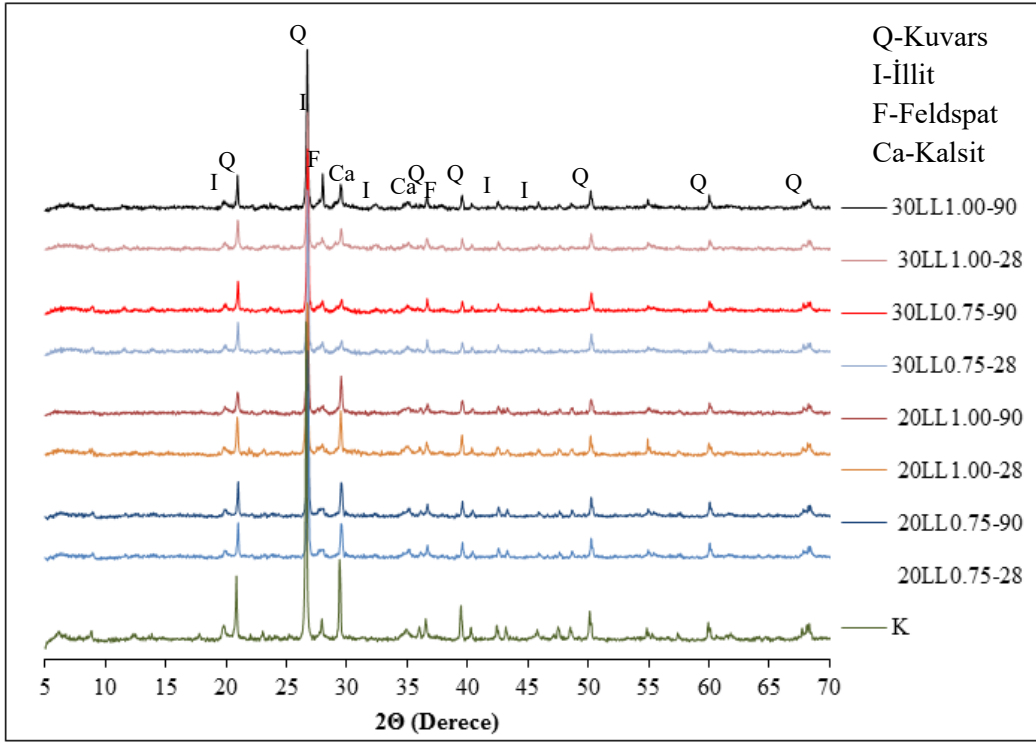
Karışım numunelerinde oluşan fazların belirlenmesi için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.6'de doğal zemin örneği ile 28 günlük karışım örneklerinin XRD analizini verilerini içermektedir. Zemin örneğinin (K) XRD analizi sonuçlarını incelendiğinde genel olarak kuvars, kalsit, illit ve feldspat minerallerinin belirlendiği görülmektedir. 28 günlük karışım numuneleri incelendiğinde elde edilen sonuçların doğal zemin numunesi ile aynı olduğu görülmüş ve yeni faz oluşmadığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.7'de seçilen serilerden karşılıklı olarak 28 ile 90 günlük XRD analiz sonuçları gösterilmiştir. Her iki örnek grubu incelendiğinde bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Ancak XRD desenlerinde yeni faz görülmemesine rağmen oluşan jellerin amorf olabileceği veya oluşan fazların diğer fazların arkasına gizlenmiş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.6: 28 günlük karışım numunelere ait XRD desenleri

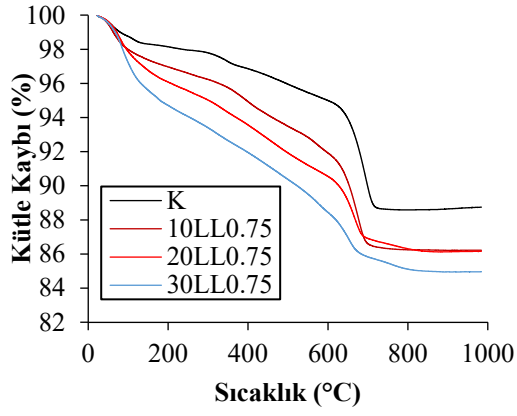


Şekil 6.7: 28 ile 90 günlük karışım numunelere ait XRD desenleri

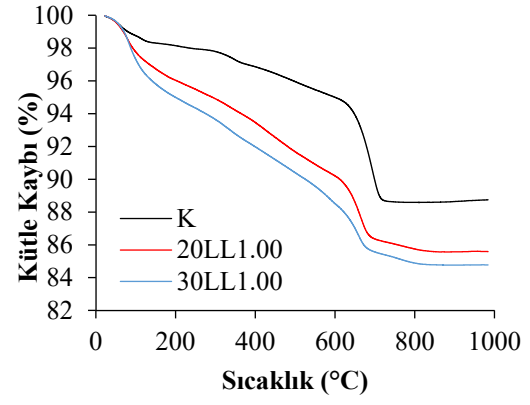
6.5 Termogravimetrik (DTA-TG) Analizi Sonuçları

Şekil 6.8 90 günlük örneklerin DTA - TG analizlerinden oluşan kütle kaybı değerlerini göstermektedir. Analizler için doğal zemin örneği ile %10, %20 ve %30 bağlanıcı harç içeren farklı su içeriğindeki numuneler seçilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, su içeriğinden bağımsız olarak artan bağlayıcı harç oranı ile kütle kaybı da artmaktadır. 60 ile 150 °C sıcaklık aralığında tüm numunelerde küçük bir kütle kaybı görünmektedir. Doğal zemin örneğinin kütle kaybı bu sıcaklık aralığında %2 iken katkılı karışımlarda harç miktarının artmasıyla bu değer artmakta, %30 katkılı karışımlarda ise %5'e ulaşmaktadır. CSH jelinin dehidroksilasyonu bu sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bu aralıkta karışımlarda meydana gelen kütle kaybı jellerin varlığını işaret etmektedir.

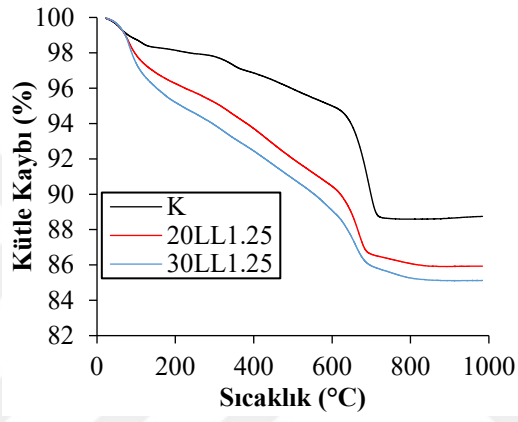
Bununla birlikte 630- 710 °C aralıkta ikinci bir kütle kaybı göze çarpmaktadır. Bu kütle kaybının doğal zeminde daha belirgin olması zemin bileşimindeki illit dihidroksilasyonu ile ilgili kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Şekil 6.8'daki grafiklerden elde edilen bulgular, daha önceki bölümlerde elde edilen sonuçlar ile uygunluk göstermektedir.



a)



b)



c)

Şekil 6.8: DTA-TG deney sonuçları a) LL0.75, b) LL1.00 c) LL1.25 su içeriği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, alkali ile aktifleştirilmiş VT ve YFC esaslı bağlayıcıların Bartın ili zayıf alüvyal zeminlerin derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesinde geleneksel bağlayıcıların yerine kullanılabilirliğini araştırılmıştır. Çalışmada VT Isparta yerleşim alanı temel kazılarından alınmış, YFC ise Kardemir Karabük Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Deneysel olarak yürütülen bu çalışmada arazi koşullardaki yeraltı su seviyesi değişimi dikkate alınarak farklı su içeriklerindeki VT+YFC esaslı deney numuneleri hazırlanmış, mekanik davranışları serbest basınç ve eğilme dayanımı deneyleriyle ölçülmüştür. Aynı koşullarda hazırlanan PÇ esaslı numunelerle karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında alkali aktivatör olarak SH ve SS karışımının kullanılması öngörülmüştür. Bu kapsamda deneysel çalışmalarda kullanılacak en uygun bağlayıcı harç bileşimini belirlemek için farklı VT / YFC / SH / SS karışımı hazırlanmış ve 28 gün kürden sonra ağırlıkça %34.5 VT, %34.5 YFC, %9.3 SH ve %21.7 SS oranında hazırlanan karışımın serbest basınç dayanımı 56 MPa ile en yüksek performansı göstermiştir. Ancak bu karışım doğal zemine eklendiğinde aynı performansı sergilememiştir. Bu nedenle en uygun bağlayıcı harç bileşimi, doğal zemine farklı oranlarda VT / YFC / SH / SS eklenerek deneme yanılma yoluyla yeniden belirlenmiştir. Tekrarlanan bağlayıcı harç içeriği tespiti için yapılan çalışma sonuçları SS'nin Bartın alüvyal zeminlerinin iyileştirilmesinde etkisiz olduğunu göstermiştir. En yüksek dayanımı %25 VT, %25 YFC ve %50 SH'ten oluşan karışım göstermiş ve deneysel çalışmalar için bağlayıcı harç olarak kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen serbest basınç ve eğilme dayanımı deneyleri sonuçlarına göre bağlayıcı içeriği ve kür süresi arttıkça dayanım artmakta ancak numunelerin su içeriği arttıkça dayanım azalmaktadır. Bu durumun sebebinin artan su miktarının bağlayıcı harçta bulunan alkali aktivatör derişimini azaltarak çözünmüş silikat ve alüminyum iyonu konsantrasyonunun azalmasına sebep olması ve yüksek su içeriğinin zemin içinde var olan boşlukları doldurması nedeniyle bağlayıcının zemin partiküllerine yeterince bağlanamıyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bağlayıcı içeriğinin %10 olduğu deney numuneleri ile referans numuneleri kıyaslandığında aynı kür süresinde birbirine yakın basınç ve eğilme dayanımı değerleri elde edilmektedir.

Ayrıca düşük su içeriklerinde (0.75LL ve 1.00LL) 1 MPa'lık tavsiye edilen (Bruce vd., 2013) en az basınç dayanım değerini sağlayabildiği ancak yüksek su içeriklerinde (1.25LL ve sualtında) kürlendiğinde bu değeri sağlayamadıkları görülmüştür. Deney sonuçlarına göre 90 günlük kür süresi sonunda %10 bağlayıcı içeriğine sahip VT+YFC içerikli numunelerin yanı sıra referans numunelerinin de derin karıştırma yöntemi uygulanarak gerçekleştirilecek zemin iyileştirmesi sırasında tavsiye edilen en düşük dayanım değerini alamayacağı ve uygulamalarda kullanımının güvenli olmadığı düşünülmektedir.

Su içeriğinin 0.75LL olduğu ve %30 bağlayıcı içeriğine sahip VT+YFC içerikli deney numunesinin 90 günlük kür süresi sonunda serbest basınç dayanımı 7.98 MPa ve eğilme dayanımı 2.94 MPa ile çalışma kapsamında alınan en yüksek dayanım değerlerini vermektedir ve referans numunelerine göre daha yüksek sonuç elde edilmektedir. Aynı su içeriğine sahip %20 bağlayıcı içeren deney numuneleri de referans numunelerinden daha iyi sonuçlar vermekte ve tavsiye edilen en düşük dayanım değerlerini sağlamaktadır. Bununla birlikte 0,75LL su içeriğindeki taze karışımların yarı plastik bir kıvamda olmaları nedeniyle pratik uygulamalar için elverişli olmadığı düşünülmektedir. Karışımların hazırlanması sırasında, 1.00 LL su içeriğine sahip numunelerin taze halindeki kıvamının uygulama için daha elverişli olduğu görülmüştür.

Su içeriğinin 1.00LL olduğu numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre 90 günlük kür sonunda %30 VT+YFC içeren numunenin serbest basınç dayanımı 7.93 MPa ve eğilme dayanımı ise 1.59 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı su içeriğinde hazırlanmış olan %20 bağlayıcı içeriğine sahip numunelerde ise bu değerler sırasıyla 4.30 MPa ve 1.05 MPa olarak ölçülmüştür.

Su içeriğinin 1.25LL olduğu numuneler üzerinde 90 günlük kür sonunda yapılan deney sonuçlarına göre %30 VT+YFC içeren numunenin serbest basınç dayanımı 4.97 MPa ve eğilme dayanımı 1.35 MPa olarak belirlenmiştir. Su içeriğinin aynı olduğu %20 bağlayıcı içeriğine sahip numunelerde ise bu değerler sırasıyla 2.21 MPa ve 0.80 MPa olarak ölçülmüştür.

Su altında kür edilen numunelerin 90 günlük kür süresi sonundaki değerleri incelendiğinde %30 ve %20 bağlayıcı harç içeriğine sahip deney numunelerinin referans numunelerine kıyasla yüksek serbest basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Elde

edilen sonuçlara göre VT+YFC içerikli numunelerin su altında kür edilmesi sırasında dayanım performansı düşüyor olsa da kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

İyileştirilmiş zeminin elastisite modülünün, serbest basınç dayanımı ile benzer eğilimlerle arttığını ve VT+YFC içerikli numunelerin referans numunelerle aynı değere sahip olduğunu belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda VT+YFC içerikli bağlayıcının %20-30 oranında derin karıştırma yöntemi ile Bartın alüvyal zeminlerin iyileştirilmesinde çimentonun yerine kullanılabileceği görülmüştür.

SS'nin bu çalışmada kullanılan zemin türü ile uyumsuzluğu bu araştırmanın kapsamı dışında olmakla birlikte yapılacak başka bir çalışma ile araştırılması gereken bir konudur. SS kullanımının yüksek üretim maliyetleri ve olumsuz çevresel etkiler gibi dezavantajları göz önüne alındığında, bu çalışma, çimento ile rekabet edebilecek daha ucuz ve çevre dostu bir bağlayıcı elde edilmesiyle sonuçlanmıştır. Ancak bu karışımın arazi uygulamalarında ve uzun vadedeki davranışının da araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahnberg, H. (2006). Strength of stabilized soils-a laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder. Docotral Thesis, Lund University, Sweden.
- Aliusta, H. ve Yılmaz, B., (2020). Karbon Maliyetlerinin Muhasebeleştirilmesi: Çimento Sektörü Uygulaması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi, 15 (1).
- Alkaya, D., (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5: 61-72.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F. ve Santoro, L. (2008). Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. J. Waste Manag., 28 (2): 416-423.
- Arulrajah, A., Yaghoubi, M., Disfani M.M., Horpibulsuk, S., Bo, M.W. ve Leong M. (2018). Evaluation of fly ash and slag based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. Soils and Foundations, 58: 1358-1370.
- Bagherinia, M., (2019). Derin Karıştırma Yöntemi ile Düşük Plastisiteli Kil Zeminin Biyopolimer ve Bazik Kimyasallar Kullanılarak İyileştirilmesi. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.
- Bagherpour, I. ve Choobbasti, A.J., (2003). Stabilization of fine-grained soils by adding microsilica and lime or microsilica and cement. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 8.
- Baker, S., (2000). Deformation behaviour of lime/cement column stabilized clay. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Rapport 7, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Bilal, M. ve Talib, A., (2016). A Study on Advances in Ground Improvement Techniques. National Conference on Advances in Geotechnical Engineering, At Aligarh, India.
- Broms, B.B., (2003). Deep soil stabilization: design and construction of lime and lime/cement columns. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Bruce, D.A., (2000). An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications. U.S Federal Highway Administration.
- Bruce, M.E.C., Berg, R.R., Collin, J.G., Filz, G.M., Terashi, M. ve Yang, D.S., (2013). Federal highway administration design manual: deep mixing for embankment and foundation support (fhwa-hrt-13-046). Federal Highway Administration, Washington, DC.
- CDIT (Coastal Development Institute of Technology), (2002). The deep mixing method: principle, design, and construction. Balkema, Lisse, Netherlands.

- Çanakcı, H., Güllü, H. ve Alhashemy, A. (2019). Performances of Using Geopolymers Made with Various Stabilizers for Deep Mixing. *Materials*, 12 (16).
- Çimen, Ö. ve Coşan, F. Ş., (2019). Volkanik tüf ve amorf silikanın kilin mühendislik özelliklerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3): 459 – 466.
- Dias, D.R., Camarini, G. ve Miguel, M.G., (2012). Preliminary laboratory tests to study the increase of strength in samples of soft soils with cement, for treatments using Dry-Mix System. *Grouting and Deep Mixing. Geotechnical Special Publication*.
- Dirikolu, İ., (2019). Volkanik Tüf Esaslı Alkalilerle Aktive Edilmiş Bağlayıcıların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bayburt.
- Du, Y.J., Yu, B.W., Liu, K., Jiang, N.J. ve Liu, M.D., (2017). Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer. *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(2).
- Erdoğan, K., Tokyay, M. ve Türker, P., (2003). Traslar ve traslı çimentolar. TÇMB/ARGE/Y99-2, Ankara.
- Farouk, A. ve Shahien, M.M., (2013). Ground improvement using soil-cement columns: experimental investigation. *Alexandria Engineering Journal*, 52 (4): 733-740.
- Gaafer, M., Bassioni, H. ve Mostafa, T., (2015). Soil Improvement Techniques, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6 (12): 217-222.
- Gao, K., Lin, K.L., Wang, D., Hwang, C.L., Tuan, B.L.A., Shiu, H.S. ve Cheng, T.W., (2013). Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. *Constr. Build. Mater.*, 48: 441-447.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V. ve Chindaprasirt, P., (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement Concr. Compos.*, 45: 9-14.
- Hirade, T., Futaki, M., Nakano, K. ve Kobayashi, K., (1995). The study on the ground improved with cement as the foundation ground for buildings. Unconfined compression test of large scale column and sampling core in several fields. *Proc. Of the Annual Conference of Architectural Institute of Japan*, 861-862.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R. ve Suddeepong, A., (2011). Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. *Constr. Build. Mater.*, 25 (4): 1521-1531.
- Impe, W.F.V., (1989). *Soil Improvement Technique and their Evolution*, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Jacobson, J.R., Filz, G.M. ve Mitchell, J.K., (2005). Factors affecting strength of lime cement columns based on a laboratory study of three organic soils. *Proceedings of the International Conference on Deep Mixing-Best Practice and Recent Advances. Deep Mixing*, 5: 87-94.

- Jamsawang, P., Yoobanpot, N., Thanasisathit, N., Voottipruex, P. ve Jongpradist, P., (2016). Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment. *Comput. Geotechn.*, 72: 42-56.
- Japanese Geotechnical Society, (2000). Practice for making and curing stabilized soil specimens without compaction, Vol. 5.
- Kaya, Z., (2016). Derin Karıştırma Kolonlarının Ölçülen ve Hesaplanan Kapasitelerinin Tam Ölçekli Yükleme Deneyleri ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Kılıç, O. (2013). Derin Karıştırma Yöntemi Tasarım ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Kirsch, K. ve Bell A., (2013). Ground Improvement, third edition. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. Boca Raton.
- Kitazume, M. ve Terashi, M., (2013). The deep mixing method. CRC Press. Boca Raton.
- Larsson, S., Malm, R., Charbit, B. ve Ansell, A., (2012). Finite element modelling of laterally loaded lime-cement columns using a damage plasticity model. *Comput. Geotechn.*, 44: 48-57
- Lemougna, P.N., Nzeukou, A., Aziwo, B., Tchamba, A., Wang, K., Melo, U.C. ve Cui, X., (2020). Effect of slag on the improvement of setting time and compressive strength of low reactive volcanic ash geopolymers synthesized at room temperature. *Mater. Chem. Phys.*, 239.
- Liu, C. ve Evett, J.B., (2008). Soils And Foundations, Seventh Edition. Pearson Prentice Hall, New Jersey Columbus, Ohio.
- Mbaraga, A., Jenkins, K. ve van de Ven, M., (2014). Influence of beam geometry and aggregate size on the flexural strength and elastic moduli of cement-stabilized materials. *Transp. Res. Rec., J. Transp. Res. Board* 2401: 22-29.
- Menard, L. ve Boise, Y., (1975). Theoretical and Practical Aspects of Dynamics Consolidation. *Geot.*, 25 (1): 3-18.
- Nath, P. ve Sarker, P.K., (2017). Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.*, 130: 22-31.
- Navin, M.P. ve Filz, G.M., (2006). Simplified reliability-based procedures for design and construction quality assurance of foundations improved by the deep mixing method. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Neville, A.M., (1995). Properties of the concrete. Longman Group Limited, England.
- Nicholson, P.G., (2014). Admixture Soil Improvement. Ed. Butterworth- Heinemann, Elsevier, 231-288.

- Okyay, U. ve Dias, D., (2010). Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform. Eng. Geol., 114 (1): 34-44.
- Onat, O. B., (1998). Türkiye'de Üretilen Yüksek Fırın Cürufalarının Çimento Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Onur, İ., Tuncan, M., Kılıç, O. ve Tuncan, A., (2016). Yeni Bir Derin Zemin Karıştırma Sistemi Tasarımı ve Arazi Uygulamaları. Araştırma Makalesi.
- Ouhadi V.R., Yong R.N., Amiri M. ve Ouhadi M.H. (2014). Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. Applied Clay Science, 95: 111-118.
- Our, C., Wu, T. ve Hsieh, H., (1996). Analysis of deep excavation with column type of ground improvement in soft clay. Journal of Geotechnical Engineering, 122 (9): 709-716.
- Önalp, A., (1983). Geoteknik Bilgisi, Cilt 2, K.T.Ü., Trabzon.
- Özaydın, K., (1997). Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Pakbaz, M.S. ve Alipour, R., (2012). Influence Of Cement Addition On The Geotechnical Properties Of An Iranian Clay. Department of Civil Engineering, Shahid Chamran Univ., Ahvaz, Iran.
- Phoongernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S. ve Chindaprasirt, P., (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer. Constr. Build. Mater., 91: 1-8.
- Porbaha, A., (1998). State of the art in deep mixing technology: Part I. Basic concepts and overview. Ground Improv, 2: 81-92.
- Pourakbar, S., Huat, B.B., Asadi, A. ve Fasihnikoutalab, M.H., (2016). Model study of alkali-activated waste binder for soil stabilization. Int. J. Geosyn. Ground Eng., 2 (4).
- Puppala, A. J. ve Pedarla, A., (2017). Innovative ground improvement techniques for expansive soils. Innov Infrastruct Solut, 2 (1).
- Rahman, M. A. ve Ali, A., (2017). Use of Silica Fume in Stabilizing Cement-Dune Sand for Highway Materials. American Journal of Civil Engineering., 5 (1): 41-49.
- Rattanasak, U. ve Chindaprasirt, P., (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. Miner. Eng., 22 (12): 1073-1078.
- Sağlam, A., (1985). Zemin Islah Metotları, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri. DSİ Genel Müdürlüğü, Adana.
- Sargent, P., Hughes, P.N., Rouainia, M. ve White, M.L., (2012). The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. School of Civil Engineering and Geosciences, Drummond Building, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, Tyne and Wear.

- Shen, S.L., Huang, X.C., Du, S.J. ve Han, J., (2003). Laboratory studies on property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns. Mar. Georesour. Geotechnol., 21 (1): 15-35.
- Shen, S.L., Wang, Z.F., Horpibulsuk, S. ve Kim, Y.H., (2013). Jet grouting with a newly developed technology: the twin-jet method. Eng. Geol., 152 (1): 87-95.
- Singhi, B., Laskar, A. I. ve Ahmed, M.A., (2017). Mechanical behavior and sulfate resistance of alkali activated stabilized clayey soil. Geotechnical and Geological Engineering, 35 (5): 1907-1920.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. ve Chindaprasirt P., (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. Fuel, 90 (6): 2118-2124.
- Stab, E.S., (2002). Development Of Design And Construction Methods To Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide Soft Soil Stabilization. Industrial And Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III), European Commission.
- Terashi, M., (1997). Deep mixing method - brief state-of-the-art. Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 2475-2478.
- Topolnicki, M., (2004). In situ soil mixing. Ground Improvement, 2: 331-428.
- Tran, T.D., Cui, Y.J., Tang, A.M., Audiguier, M. ve Cojean, R., (2014). Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of h ricourt clay. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (5): 399-404.
- TS 1900-2, (2006). İn aat M hendisli inde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 2: Mekanik  zelliklerin Tayini. T rk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN196-1, (2016).  imento harcının basınç ve e ilme dayanımı tayini metodu. T rk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turner, L.K. ve Collins, F.G., (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction and building materials, 43: 125-130.
- T rkmeno lu, A.G. ve Tankut, A., (2001). Use of tuffs from central turkey as admixture in pozzolanic cements assessment of their petrographical properties. Cement and Concrete Research, 32: 629-637.
- Uzuner, B.A., (1995). Temel M hendisli ine Giriş. Derya kitabevi, Trabzon.
- Wahidy, M., (2019). Derin Karıştırma Kolonlarının Performansı  zerinde Farklı özellikteki  imentoların Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Xu, H. ve Van Deventer, J.S., (2002). Geopolymerisation of multiple minerals. Min. Eng., 15 (12): 1131-1139.

- Yalçınıyğit, G., (2019). Yüksek Fırın Cüruf Katkılı Derin Karıştırma Kolonu Davranışlarının DeneySEL Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Yang, D.S., (1997). In situ ground improvement, reinforcement and treatment: a twenty year update and a vision for the 21st century. Ground Reinforcement Committee, American Society of Civil Engineers, Geo-Institute Conference. Logan, UT.
- Yi, Y., Liska, M. ve Al-Tabbaa, A., (2013). Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(2), pp.267-274.
- Yip, C.K., Lukey, G. ve Van Deventer, J., (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. Cem. Concr. Res., 35 (9): 1688-1697.

