



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK FIRIN CÜRUF KATKILI DERİN
KARIŞTIRMA KOLONU DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Gülsüm YALÇINYİĞİT
YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül - 2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Gülsüm YALÇINYİĞİT tarafından hazırlanan “Yüksek Fırın Cüruf Katkılı Derin Karıştırma Kolonu Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması” adlı tez çalışması 05/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

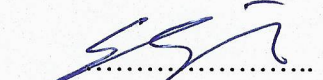
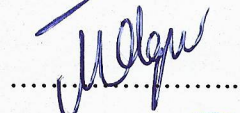
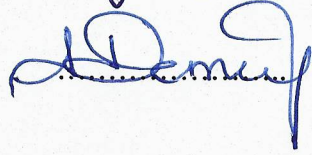
Jüri Üyeleri

Başkan
Doç. Dr. Erdal UNCUOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Murat OLGUN

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

İmza


.....

.....


Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
LEE Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 191004004 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Gülsüm YALÇINYİĞİT

Tarih: 05/09/2019



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK FIRIN CÜRUF KATKILI DERİN KARIŞTIRMA KOLONU DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Gülsüm YALÇINYİĞİT

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Murat OLGUN

2019, 104 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Murat OLGUN
Doç. Dr. Erdal UNCUOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ**

Bu tez çalışması kapsamında killi bir zemin içerisinde; yüksek fırın cürufunun (YFC), çimento yerine belli oranlarda ikame edilmesiyle oluşturulan derin karıştırma kolonlarının performansı üzerine bir deneysel çalışma yürütülmüştür. Çalışmada, düşük plastisiteli killi zemin (CL), normal portland çimentosu (CEM I 42.5 R) ve YFC kullanılmıştır.

Tez çalışmasında öncelikle farklı oranlardaki CEM I 42.5 R çimentosuna, farklı oranlardaki YFC ikameleri için reolojik özellik deneylerinden; sedimantasyon ve Marsh hunisi deneyleri yapılmıştır. Reolojik deney sonuçlarına göre su/bağlayıcı (W/C) oranı 1 olarak seçilmiştir. Zeminin su muhtevası, plastik limit-likit limit değerleri arasında olmak üzere %27 olarak belirlenmiştir. YFC ikame oranlarının, derin karıştırma kolonlarına etkilerini araştırmak amacıyla çimento oranı, kuru kil ağırlığının %15 ve %20 oranlarında seçilmiş, ayrıca bu her iki orana çimentonun kuru ağırlıkça yüzdesinin 5 farklı oranda (%0, %10, %20, %35, %50) YFC ikamesi ile küçük ölçekli derin karıştırma kolonları imal edilmiştir. Küçük ölçekli derin karıştırma kolonu (DKK) 7, 28 ve 56 günlük farklı kür sürelerinde bekletildikten sonra numuneler üzerinde; serbest basınç deneyi, yarmada çekme dayanım deneyi, permeabilite deneyleri yapılmıştır. Küçük ölçekli derin karıştırma kolonlarına uygulanan deney sonuçlarının ortak değerlendirilmesi sonucunda, büyük ölçekli derin karıştırma kolonları % 20 çimento oranına; %0, %20, %35,%50 oranlarında YFC ikamesi yapılarak oluşturulmuştur. Toplamda 4 adet büyük ölçekli DKK imal edilmiş ve 28 günlük kürde bekletilmişlerdir. Büyük ölçekli DKK karot numunelerinden alınan örnekler üzerinde kimyasal yapı içerisinde oluşan bağlayıcı bileşenlerin belirlenmesi için XRD analizi ve SEM görüntü analizi yapılmıştır.

Küçük ölçekli DKK numunelerinde 7 günlük kür süresi sonrasında YFC ikameli numunelerde, YFC ikamesi bulunmayan (%0 YFC) numunelere göre serbest basınç dayanımında azalma gözlenmiştir. Ancak kür süresi arttıkça dayanımda artışlar görülmüş ve YFC ikame oranı arttıkça dayanımda artışlar görülmüştür. Küçük ölçekli DKK numuneleri geçirimsizlik deneyinde, kür süresi ve çimento oranı arttıkça numunelerin geçirimsizliği azalmıştır. Geçirimsizliği en az olan numune %20 çimento - %50 YFC ikameli numune olmuştur.

XRD analizi sonucunda kullanılan saf kilin içerisinde kaolinit minerali tespit edilmiştir. Ayrıca, C-H, etrenjit ve C-S-H yapıları tespit edilmiştir. Ancak büyük ölçekli DKK numunelerinde dayanım, küçük ölçekli numunelere göre daha küçük değerler almıştır. Büyük ölçekli DKK numunelerinin dayanımı, küçük ölçekli DKK numunelerinin % 60-%85 oranı arasında değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Derin karıştırma kolonu, killi zemin, SEM analizi, Serbest basınç deneyi, Yüksek fırın cürufu



ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DEEP MIXING COLUMN BEHAVIOR WITH BLAST FURNACE SLAG ADDITIVE

Gülsüm YALÇINYİĞİT

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat OLGUN

2019, 104 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Murat OLGUN
Assoc. Prof. Dr. Erdal UNCÜOĞLU
Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ**

Within the scope of this study; The effects of blast furnace slag (BFS) on the performance of deep mixing columns formed by replacing cement in certain ratios were investigated experimentally. In this study, low plasticity clayey soil (CL), normal portland cement (CEM I 42.5 R) and blast furnace slag were used. In the thesis, firstly, different ratios of CEM I 42.5 R cement were determined from rheological property tests for BFS substitutes; sedimentation and Marsh cone experiments were performed.

According to rheological test results, water / binder (W / C) ratio was chosen as the water content of the soil is 27%, which is between the plastic limit-liquid limit values. In order to investigate the effects of BFS on deep mixing columns, the cement ratio was chosen at 15% and 20% of dry weight of clay. Furthermore, small scale deep mixing columns were produced with BFS substitution in 5 different ratios (0%, 10%, 20%, 35%, 50%) of dry weight percentage of cement in both ratios. Unconfined compressive strength, splitting tensile strength, permeability tests were carried out on soilcrete samples after 7, 28 and 56 days curing time respectively. As a result of the common evaluation of the experimental results applied to the small-scale deep mixing columns, A total of 4 large scale Deep Mixing Columns at a cement ratio 20% of dry weight of clay were manufactured by replacing 0%, 20%, 35%, 50% of cement with blast furnace slag and they were cured for 28 days.

XRD analysis and SEM image analysis were performed to determine the binding components formed in the chemical structure from core samples. After 7 days curing time, the small-scale samples of deep mixing column that content BFS as a replacement material with cement show a decrease in unconfined compressive strength compared to samples without BFS (0% BFS). However, as the curing time increased, it has been observed that the increment in BFS as a replacement ratio increase the strength of the samples.

The least permeable sample is 20% cement and 50% BFS replacement sample. As a result of XRD analysis, kaolinite mineral was found in pure clay. In addition, C-H, etrenite and C-S-H structures were determined. However, the strength of large-scale DMC samples is smaller than that of small-scale samples. The strength of large scale DMC samples ranges from 60% to 85% of small scale DMC samples.

Keywords: Deep mixing column, clayey soil, SEM analysis, Unconfined compressive strength test, Blast furnace slag



ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca bana her konuda yardımcı olan, yol gösteren, yardımlarını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat Olgun'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarımda yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen öğretim görevlisi Alican ŞENKAYA ve Mustafa Abdalwahid Noori'ye teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan ve desteklerini hiç şekilde esirgemeyen çok değerli annem, babam, ablam, abim ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Gülsüm YALÇINYİĞİT
KONYA- 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Literatür Özeti	3
2.2. Zeminlerin Stabilizasyonu	6
2.2.1. Derin karıştırma yöntemi.....	7
2.2.2. Derin karıştırma yönteminin dünya üzerindeki gelişimi	8
2.2.3. Derin karıştırma yöntemi uygulama aşamaları.....	9
2.2.4. Derin karıştırma uygulama yöntemleri ve ekipmanları	9
2.2.5. Derin karıştırma yönteminin uygulama şekilleri ve uygulama alanları	15
2.2.6. Derin karıştırma yöntemi uygulanan zeminlerin mekanik özellikleri	17
2.2.7. Derin karıştırma yönteminin avantaj ve dezavantajları	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	21
3.1.1. Çimento	21
3.1.2. Zemin	22
3.1.3. Yüksek fırın cürufu (YFC)	23
3.1.4. Küçük ve büyük ölçekli DKK imalatında kullanılan ekipmanlar	31
3.2. Enjeksiyon Hazırlanması	36
3.3. DDK' nin Hazırlanmasında Kullanılacak Enjeksiyonların Reolojik Özellikleri	36
3.3.1. Marsh hunisi deneyi	36
3.3.2. Sedimentasyon deneyi.....	38
3.4. DDK Numuneleri Üzerinde Yapılan Laboratuar Deneyleri	40
3.4.1. Tek eksenli (serbest basınç) deneyi	40
3.4.2. Permeabilite deneyi.....	41
3.4.3. Yarmada çekme (STS) deneyi	43
3.5. SEM Analizi.....	44
3.6. XRD Analizi.....	44
3.7. Küçük Ölçekli DKK Numunelerinin Hazırlanması ve Deneysel Tasarımı ...	45
3.8. Büyük Ölçekli DKK Hazırlanması ve Deneysel Tasarımı	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	50

4.1. Reolojik Özellik Deneyleri	50
4.1.1. Marsh hunisi deneyleri.....	50
4.1.2. Sedimentasyon deneyleri.....	51
4.2. Küçük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları.....	55
4.2.1. Serbest basınç deney sonuçları	55
4.2.2. Permeabilite deneyi.....	65
4.2.3. Yarmada çekme (STS) deneyi.....	66
4.3. Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları.....	74
4.3.1. Büyük ölçekli derin karıştırma kolonları deney sonuçları	74
4.4. DKK Numunelerinde Yapılan SEM ve XRD Analiz Sonuçları	84
5. SONUÇLAR	96
5.1. Sonuçlar	96
5.2. Öneriler	99
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Numune kesit alanı
A_f	: Düzeltilmemiş alan değeri
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$: Kaolinite
CaO	: Kalsiyum Oksit
$Ca_3Al_2O_6 (C_3A)$: Trikalsiyum Alüminat, Alüminat
$Ca_2SiO_4 (C_2S)$: Dikalsiyum Silikat, Belit
$Ca_3SiO_5 (C_3S)$: Trikalsiyum Silikat, Alit
CL	: Düşük plastisiteli kil
cm	: santimetre
cm^2	: Santimetre
cm^3	: Santimetreküp
dak	: Dakika
ϵ	: Birim deformasyon değeri
Fe_2O_3	: Demir Oksit
σ_1	: Serbest Basınç Gerilmesi
H_0	: Başlangıç yüksekliği
Δh	: Basınç yüksekliği (cm)
ΔH	: Toplam boy kısalma
k	: Permeabilite katsayısı
kg	: Kilogram
kPa	: Kilopaskal
L	: Numune boyu
L	: Litre
ΔL	: Toplam deformasyon değeri
LL	: Likit limit
m	: Metre
mm	: Milimetre
m^3	: Metreküp
ml	: Mili litre
MgO	: Magnezyum Oksit
MPa	: Megapaskal
ρ	: Su birim hacim ağırlığı
PL	: Plastik limit
Q	: Numuneden çıkan su (m^3)
q_u	: Serbest basınç direnci
sn	: Saniye
SiO_2	: Silisyum Dioksit, Silika
t	: Numuneden su çıkışına izin verilen süre (s)

V_1	: Deneyin başlangıcında numunenin hacmi
V_w	: Sedimente olan su hacmi
W/C	: su/çimento
W_n	: Doğal su muhtevası
W_L	: Likit limiti su muhtevası

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CSH	: Kalsiyum-Silika-Hidrate
DKY	: Derin Karıştırma Yöntemi
DKK	: Derin Karıştırma Kolonu
UCS	: Tek Eksenli Basınç
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
XRD	: X-Işını Difraktometresi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Son yıllarda, nüfus artışı ve şehirleşmenin hızlı bir şekilde gelişmesi, büyük projelerin artmasına ve beraberinde ise inşaat alanlarının gittikçe azalmasına neden olmuştur. Yapıları, inşa edecek sağlam zemin bulmanın zorlaşması ile yapılması düşünülen yapıdan vazgeçilememesi gibi sebeplerden dolayı zeminlerin iyileştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Zeminlerde iyileştirme yapılmasına, yapı ve zemin özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi sonucu karar verilmelidir.

Yapı temelini; taşıma gücü, oturma ve sıvılaşma gibi koşullarından birini ya da birkaçını sağlayamadığı durumlarda zemin iyileştirme yapılmaktadır. Yüzeysel ve derin iyileştirme tekniği olmak üzere çok sayıda zemin iyileştirme yöntemi bulunmaktadır. İyileştirilecek olan zeminin özellikleri, iyileştirme yönteminin maliyeti, iyileştirme yönteminin istenilen amaca uygun olup-olmadığı ve zemin iyileştirme yönteminin süresi gibi koşullar göz önünde bulundurularak en uygun yöntem seçilmelidir.

Derin karıştırma yöntemi (DKY), zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerdendir. DKY, mekanik delme işleminin yapılabildiği her türlü sıklıktaki zemine uygulanabilen, eklenen bağlayıcı malzemenin (çimento, kireç, yüksek fırın cürufu vb.) ortası delik burgular ya da kanatlı karıştırıcılar aracılığıyla zeminle birlikte yerinde karıştırılarak, kolon oluşturulması esasına dayanan bir iyileştirme yöntemidir. Zemin içerisinde rijit kolonların oluşmasını sağlayan bu yöntem, farklı oturmaların kontrol edilmesi, zemin taşıma kapasitesinin ve zemin sıvılaşma direncinin artırılması, sıvılaşma sonrasında oluşan dinamik oturmaların kontrol edilmesi, dolgu ve şevlerin stabilitesinin sağlanması gibi durumlarda etkili olmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, killi bir zemin içerisinde oluşturulacak olan derin karıştırma kolonlarının (DKK) oluşturulmasında çimento yerine belli oranlarda yüksek fırın cürufunun (YFC) ikame edilmesiyle kolonların performansında oluşan değişiklikler deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, düşük plastisiteli killi zemin (CL), normal portland çimentosu (CEM I 42.5 R) ve YFC kullanılmıştır. Öncelikle farklı oranlardaki CEM I 42.5 R çimentosuna, farklı oranlardaki YFC ikameleri için reolojik özellik deneylerinden; sedimentasyon ve Marsh hunisi deneyleri yapılmıştır. Reolojik deney sonuçlarına göre su/bağlayıcı (W/C) oranı 1 olarak seçilmiştir. Zeminin su muhtevası, plastik limit-likit limit değerleri arasında olmak üzere %27 olarak belirlenmiştir. YFC ikame oranlarının, derin karıştırma kolonlarına etkilerini araştırmak

amacıyla çimento oranı, kuru kil ağırlığının %15 ve %20 oranlarında seçilmiş, ayrıca bu her iki orana çimentonun kuru ağırlıkça yüzdesinin 5 farklı oranda (%0, %10, %20, %35, %50) YFC ikamesi ile küçük ölçekli derin karıştırma kolonları imal edilmiştir. Küçük ölçekli DKK 7, 28 ve 56 günlük farklı kür sürelerinde bekletildikten sonra numuneler üzerinde; serbest basınç deneyi, yarmada çekme dayanım deneyi, permeabilite deneyleri yapılmıştır. Küçük ölçekli derin karıştırma kolonlarına uygulanan deney sonuçlarının ortak değerlendirilmesi sonucunda, büyük ölçekli derin karıştırma kolonları % 20 çimento oranına; %0, %20, %35,%50 oranlarında YFC ikamesi yapılarak toplamda 4 adet büyük ölçekli DKK imal edilmiş ve 28 günlük kürde bekletilmişlerdir. Karot numunelerinden kimyasal yapı içerisinde oluşan bağlayıcı bileşenlerin belirlenebilmesi için XRD analizi ve SEM görüntü analizi için numuneler alınmış ve gerekli incelemeler yapılmıştır.

Tez çalışması genel olarak 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tez çalışmasının amacı ve kapsamını içeren genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde, derin karıştırma yönteminin dünya üzerindeki gelişimi, uygulama aşamaları, derin karıştırma yöntemi ve ekipmanları, bu yöntemle ilgili daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, tez çalışması aşamasında kullanılan materyaller ve deneysel çalışma için yapılan deneysel çalışmaya yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, deney sonuçları değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Son bölüm ise çalışmanın sonuçları ve öneriler kısmını kapsamaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Özeti

Günümüzde, zemin stabilizasyonunda kullanımı ve uygulama alanı hızla artan derin karıştırma yönteminde, homojen ve sürekli derin karıştırma kolonu oluşturmak için derin karıştırma kolonunun performansını etkileyen; derin karıştırma aletinin özellikleri, bağlayıcı malzemenin türü, miktarı, kıvamı gibi faktörlerin belirlenmesi için bir takım çalışmalar ve araştırmalar yapılmaktadır.

Şengör (2011) doktora tez çalışmasında, iyileştirilmiş zeminlerden alınan örnekler üzerinde dört farklı (7, 28, 90, 365 günlük) kür süreleri sonunda tek eksenli basınç deneyleri yaparak yumuşak kil zeminler için (kaolen ve Eymir gölü kili) etkili karışım oranları ve karışım tiplerini araştırmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, büyük ölçekli konsolidasyon tankları içerisinde dört farklı yerleşimde ve üç tip karışım oranında model derin karıştırma kolonları (DKK) oluşturmuş ve DKK ile iyileştirilmiş kil zeminin konsolidasyon özelliklerini araştırmıştır. Araştırma sonucunda; iyileştirilmiş kil zeminin sıkışma özelliklerinin karışım malzemesi miktarına, kolon parametrelerine, özellikle de etkili alan oranına bağlı olduğunu; iyileştirme açısından kolonun çimento miktarının en etkili parametre olduğunu ve iyileştirilmiş zeminin sıkışma modülünün tespitinde zeminin ve kolon malzemesinin sıkışma modüllerinin kullanılmasının daha etkili sonuç vereceği belirtilmiştir.

Wahidy (2019) yüksek lisans tez çalışmasında; killi bir zeminde derin karıştırma yöntemini (DKY) uygulamış, bağlayıcı malzeme olarak kullandığı farklı çimento tiplerinin derin karıştırma kolonlarının performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Araştırmacı; CEM I 42.5 R Normal portland çimentosu, CEM II / A-M (P-L) pozzolan katkılı çimento, CEM III / A 42.5 N yüksek fırın cürufu çimento ve DMFC-800 ince taneli portland çimentosu olmak üzere dört farklı çimento kullanmıştır. Reolojik özellik deneyleri, marsh hunisi, sedimentasyon ve vicat iğnesi deneyleri yapılmış çimento tiplerinin reolojik deneylerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda hazırlanacak derin karıştırma kolonlarının oluşturulmasında su/çimento oranını 0.9 olarak seçilmiştir. Her çimento türü için kil kuru ağırlığının %6, %9, %12 ve %15'i olacak şekilde çimento ilave edilerek, küçük ölçekli deneyler için örnekler hazırlanmış 7, 14, 28 günlük kürlerden sonra örnekler üzerinde serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. 28 günlük kür süresi için %12 çimento oranında her çimento tipinden birer

adet olmak üzere toplamda 5 adet büyük ölçekli DKK imal edilmiştir. Kür süresi sonunda derin karıştırma kolonlarından alınan karotlar üzerinde permeabilite ve serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda; DKK örneklerinde kür süresi ve çimento oranı arttıkça örneklerin serbest basınç mukavemeti değerleri artmıştır. Dayanımlar her çimento oranında farklılık gösterse de en yüksek dayanımlı örneklerin CEM II çimento ile hazırlanmış örneklerde olduğu, en düşük dayanımlı örneklerin DMFC-800 çimento ile hazırlanmış örneklerde olduğu görülmüştür. Permeabilite deneylerinde, kür süresi ve çimento oranı arttıkça örneklerin geçirimsizliği azalmaktadır. En yüksek geçirimsizliğe sahip örneklerin CEM III çimento ile hazırlanmış örnekler olduğu, en düşük geçirimsizliğe sahip örneklerin ise DMFC-800 ince taneli çimento ile hazırlanmış örnekler olduğu belirtilmiştir.

Bagherinia (2019) tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında, düşük plastisiteli kilin, kendi likit limit miktarında su ile karıştırılarak suya doymuş kil haline getirilmiş ve bu kilin potasyum hidroksit, sodyum aljinat, sodyum hidroksit katkı maddeleri kullanılarak DKY ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmanın birinci aşamasında, kilin toplam kuru ağırlığının farklı oranlarında potasyum hidroksit, sodyum aljinat, sodyum hidroksit katkı maddeleri eklenerek kilin likit limit miktarında su ile karıştırılarak hazırlanan örnekler üzerinde farklı kür sürelerinde serbest basınç mukavemet (UCS) deneyleri uygulanmıştır. Her bir örneğe ait serbest basınç mukavemeti (q_u) - kür süresi - katkı oranı ilişkilerine ait grafikler çizilmiş ve katkı maddesi oranları arttıkça q_u değerlerinin de arttığı görülmüştür. İkinci aşamada her bir katkı maddesinin belirli oranlarına göre 30 mm çapında kolonlar imal edilmiş ve imal edilen her bir kolonun kür süreleri sonunda, drenajsız kayma mukavemeti (c_u), pH, su muhtevası ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri belirlenmiş ve bu değerler sonucunda her kolonun maksimum etki yarıçapları tespit edilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında; büyük ölçekli silindirik tankta tekli, üçlü ve yedili kolon grupları imal edilmiş ve deneyler yapılmıştır. Yükleme sırasında boşluk suyu basıncındaki değişiklikleri izlemek amacıyla tankın en altına piyezometreler yerleştirilmiş ve boşluk suyu basıncı değişiminin yalnızca yedili kolon grubu yüklemesinde gözlemlendiği belirtilmiştir.

Ahnberg (2006) yaptığı çalışmada, laboratuvar ortamında kil ve organik zemin üzerinde DKY kullanılarak zemin iyileştirilmesi yöntemini araştırmıştır. Deneysel çalışmada bağlayıcı madde olarak çimento, yüksek fırın cürufu, kireç ve uçucu kül katkı maddeleri olarak farklı oranlarda tek başına ve farklı karışımlarda kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde 28 günlük kür süresi sonrası mukavemet özelliklerinin

belirlenmesi için serbest basınç mukavemeti ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Mukavemet özelliklerinin yanı sıra; permeabilite, kompaksiyon, birim hacim ağırlık, su muhtevası, doygunluk derecesi deneyleri de yapılmıştır. Araştırmacı, çalışma sonucunda, katkı maddesi kuru halde kullanılırken su muhtevası azalmış, kür süresinin artmasıyla doygunluk derecesi ve geçirimsizliğin azaldığını belirtmiştir.

Siva (2005) laboratuvar çalışmasında; şişme ve büzülme potansiyeline sahip orta ve yüksek plastisiteli killer üzerinde derin karıştırma yöntemini uygulamıştır. Çalışmada, bağlayıcı madde olarak farklı oranlarda kireç ve çimento kullanılmış ve bağlayıcı dozajı $100-200 \text{ kg/m}^3$ arasında seçilmiştir. 7 ve 14 günlük kürde bekletilen örnekler üzerinde serbest basınç mukavemeti, şişme ve büzülme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak; en etkili su/çimento oranlarının 0.8 ve 1.3 olduğunu belirtmiştir.

Dias ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada; laboratuvar ortamında yumuşak zeminde plastik limit kıvamında derin karıştırma yöntemini uygulamışlardır. Yüksek fırın cüruf katkılı çimento yüzdesi; zemin kuru kütlelerinin %4 ve %8'i kadar olup, çimento dozajı ise $100-200 \text{ kg/m}^3$ olarak seçilmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda numuneler serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulmuşlardır. Çalışmanın amacı farklı çimento oranları kullanarak kuru yöntemle oluşturulan derin karıştırma kolonlarının dayanımını belirlemektir. Çalışma sonucunda bağlayıcı madde oranı ve kür süresi arttıkça q_u değerinin arttığı belirlenmiştir.

Pakbaz and Alipour (2012) yaptıkları çalışmada, kil-çimento karışımının geoteknik özelliklerini DKY kullanarak araştırmışlardır. Numunelerin hazırlanmasında; çimento miktarı, kilin kuru ağırlığının %4, %6, %8, %10 oranlarında ve su muhtevası değerleri %30, %48 ve %70 olarak seçilmiştir. Numuneler 7, 14 ve 28 günlük kürlere tabi tutulmuştur. Sonuç olarak çimento karıştırılan kil zemin mukavemetinin, çimento oranının artması ve su muhtevasının azalmasıyla arttığı bulunmuştur. Ayrıca, ön konsolidasyon basıncı ve sıkışma indisinin çimento miktarının artmasıyla arttığı belirtilmiştir.

Ye ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada; yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde, düşey drenler ile ön yükleme ve derin karıştırma yöntemini incelemişlerdir. Sığ kısımları iyileştirmek için kısa DKK kullanılmış ve dolgu yükü altında oturmaları hızlandırmak için DKK arasına uzun düşey drenler yerleştirilmiştir. Sonuç olarak; derin karıştırma yönteminin hem taşıma kapasitesinde artış sağlaması hem düşük maliyeti hem de zaman tasarrufu açısından daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Madhyannapu ve ark. (2009) yapmış oldukları çalışmada, laboratuvar ortamında şişme potansiyeline sahip zeminlerin DKY ile iyileştirilmesini araştırmışlardır. Laboratuvarda kireç ve çimento içeren karışımlar hazırlanarak derin karıştırma kolonları oluşturulmuş ve iki yıl boyunca derin karıştırma kolonlarını gözlemişlerdir. Gözlemler sonucunda, DKK ile iyileştirilmiş zeminde, hem düşey hem de yatay doğrultularda şişmeye ve büzülmeye bağlı hareketlerin daha az olduğu tespit edilmiştir.

Yi ve ark. (2013), reaktif magnezyumun (MgO) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun, zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini DKY ile araştırmışlardır. Deneylerde; killi siltli kum ve killi silt olmak üzere iki farklı zemin kullanılmıştır. Numuneler, derin karıştırma yöntemine uygun olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler; $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve $\%95 \pm 3$ nem bulunan kür odasında 7, 28 ve 90 gün bekletilmiştir. Numunelere, permeabilite ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre; reaktif MgO ile kireç karşılaştırıldığında her ikisinin de yüksek oranda reaksiyona girerek zeminlere erken yaşlarda fazla dayanım kazandırdıkları tespit edilmiştir. Fakat kür süresi arttıkça reaktif MgO ve kirecin dayanımlarının hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir.

Shrestha (2008) yaptığı laboratuvar çalışmasında; kum zeminde yüksek fırın cürufu ve portland çimentosu klinkerini bağlayıcı madde olarak kullanmıştır. Laboratuvarda, kum zemin ile bağlayıcı miktarı 200 kg/m^3 , 300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 , 600 kg/m^3 ve 700 kg/m^3 olan kolonlar imal edilmiştir. Hazırlanan kolonlar; 3, 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. 7 günlük kür süresi için bekletilen kolonların dayanımlarının bağlayıcı maddenin artmasıyla lineer olarak arttığı görülmüştür. Serbest basınç deneyinde, bağlayıcı miktarının 600 kg/m^3 olduğu kolonlarda en yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Ayrıca toplam su muhtevasının dayanıma etkisi de araştırılmıştır.

2.2. Zeminlerin Stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonu, bir alan altındaki zeminin yapılması düşünülen üst yapı inşası için uygun olmadığı durumlarda, zemin özelliklerinin çeşitli yöntemler kullanılarak mühendislik açısından istenilen seviyeye getirilmesi durumudur.

Zemin stabilizasyon yöntemleri şunlardır:

- Jet grouting uygulaması
- Derin karıştırma yöntemi

- Taş kolon uygulaması
- Zemin çivisi
- Zemin ankraji
- Donatılı zeminler
- Ön yükleme
- Jet grouting uygulaması
- Yüzeysel kompaksiyon
- Derin kompaksiyon
- Kompaksiyon enjeksiyonu
- Yüksek fırın cürufu vb. puzzolanla stabilizasyon
- Çimento enjeksiyonu
- Kireçle stabilizasyon

Zemin stabilizasyon yöntemleri ile;

- Zeminin sıvılaşma özellikleri azaltılır.
- Temelin oturma miktarı azaltılır.
- Üst yapıdaki deformasyonlar azaltılır.
- Zemin geçirimliliği kontrol altına alınır.
- Zeminlerin şişme ve büzülme kapasitesi azaltılır.
- Yamaçların ve toprak dolgu barajların güvenliği artırılır.
- Zeminin kayma direnci dolayısıyla taşıma gücü artırılır.

2.2.1. Derin karıştırma yöntemi

Derin karıştırma yöntemi; zayıf zeminin çimento, kireç gibi bağlayıcılarla kanatlı karıştırıcı veya ortası delik burgular kullanılarak yerinde karıştırılarak zemin özelliklerinin yerinde iyileştirilmesi amacıyla uygulanan bir zemin stabilizasyon tekniğidir.

Zemin içerisine ilave edilen bağlayıcılarla zeminin katılaşmasını sağlayarak zeminin dayanım, permeabilite, hacim değişim potansiyeli vb. mühendislik özelliklerini iyileştirmek için inşaat mühendisliği projelerinde en çok uygulanmakta olan zemin stabilizasyon tekniklerindedir. Bu nedenle en çok kullanılan katkı maddeleri çimento, kireç, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ya da bunların kombinasyonlarıdır. Bu katılaştırma

işleminin temel işlevi, katkı maddesinin zemine enjekte edilmesiyle enjeksiyon malzemesinin zemindeki boşlukları doldurmasıdır. Bu durumda, zemine göre daha rijit yapıda bir taşıyıcı eleman elde edilmektedir (Pathivada, 2005).

Derin karıştırma yöntemini doğru bir şekilde uygulamak için tasarım süreci şu aşamalara göre uygulanmalıdır:

- Derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilecek zemin için uygun olan uygulama yönteminin seçilmesi (ıslak ya da kuru yöntem) ve yapım yönteminin belirlenmesi
- İyileştirilecek zeminin taşıma gücünün belirlenmesi (Karıştırma tasarımı)
- İyileştirilecek zeminin uygulama şeklinin tespit edilmesi (Geoteknik tasarımı) (Topolnicki, 2003)

Bu aşamalar tespit edilirken arazi ve laboratuvar deneyleriyle uygulanan derin karıştırma yönteminin doğruluğu kontrol edilmektedir.

2.2.2. Derin karıştırma yönteminin dünya üzerindeki gelişimi

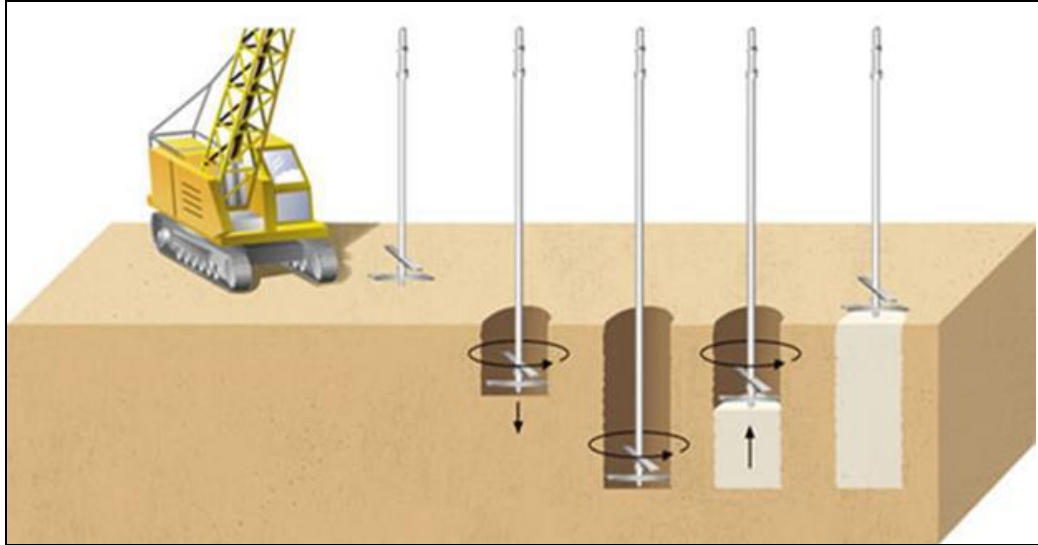
1960'lı yılların başlarından itibaren derin karıştırma kolonları, Japonya' nın önderliğinde araştırılıp geliştirilmiştir. Araştırmaların ilk safhalarında PHRI (Port and Harbour Research Institute) liderliğinde kireç kolonları geliştirilmiştir. 1974 yılında Japonya ve Güneydoğu Asya'da kireç kolonları uygulaması yapılmıştır. 1975 yılında ıslak yöntemle uygulaması yapılan DKK; 1980 yılında kuru yöntemle uygulanmıştır. Japonya'da bir taraftan uygulamalar gerçekleştirilirken, bir taraftan da derin karıştırma yönteminin depreme dayanımı ve sıvılaşma üzerine olan etkilerinin araştırıldığı çok sayıda uygulanmış örnekler bulunmaktadır. 1970'li yılların sonlarından itibaren Çin'de de uygulamalar yapılmış, 1978 yılında birçok yapıda uygulanabilir hale gelmiştir.

Japonya'nın derin karıştırma kolonlarının araştırılmasına ve geliştirilmesine önderlik etmiş olsa da ilk DKK uygulaması, 1956 yılının başlarında Amerika'da Instrusion Prepakt firması tarafından tekli burgu kullanılarak uygulanmıştır. İlk uygulamadan sonra, 1980 yıllarına kadar Amerika'da DKY uygulamasına rastlanılmamıştır. 1980 yılında, DKK deprem anında zeminde oluşabilecek sıvılaşma durumunu önlemek nedeniyle bir projede uygulanmıştır. Daha sonrasında derin karıştırma yöntemi Amerika' da baraj yapılarında uygulanmıştır. Amerika, baraj yapılarında derin karıştırma yöntemi uygulamalarının geliştirilmesine öncülük etmiştir.

1960'lı yıllardan itibaren birçok ülkede uygulanan DKY ülkemizde 2006 yılında TS-EN14679 numarası ile Türk Standartlarına girmiştir (TSE, 2006).

2.2.3. Derin karıştırma yöntemi uygulama aşamaları

- Karıştırıcı şaft ile zemin parçalanarak istenilen derinliğe kadar inilir.
- Bağlayıcı malzeme olarak çimento şerbeti veya kombinasyonlarını ya şaft ile istenilen derinliğe inilirken ya şaft geri çekilirken ya da her iki durumda da zemine enjekte edilerek zeminle karışması sağlanır.
- Daha sonra karıştırıcı şaft yukarı çekilir ve böylece derin karıştırma kolonu elde edilmiş olur (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Derin karıştırma uygulamasının aşamaları (Anonim, 2006)

2.2.4. Derin karıştırma uygulama yöntemleri ve ekipmanları

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte birçok ülkede, çeşitli kurum ve firmalar tarafından farklı tiplerde derin karıştırma yöntemleri tasarlanmıştır. Yapılan bir araştırmada dünya üzerinde 24 farklı derin karıştırma yöntemi tespit edilmiştir. Derin karıştırma yöntemindeki farklılıklar genellikle zemine enjekte edilen bağlayıcının şekli, nozulların yeri ve mesafesi, bıçağın zemine batırılma yöntemine (düşük basınçla enjeksiyon, yalnızca dönerek batırma, dönerek batırmaya ilave olarak yüksek basınçla

enjeksiyon) göre değişiklik gösterir. Tek şaftlı ve çok şaftlı sistemlerde de bu yöntemler kullanılmaktadır (Şekil 2.2.).

Derin karıştırma yöntemi genel olarak; zemine enjekte edilen bağlayıcının şekline göre kuru yöntem ve ıslak yöntem olarak ikiye ayrılmaktadır.

Derin karıştırma yöntemlerinin uygulanmasında hepsinin ortak amacı; zemin içerisinde topaklanmayı ve tam olarak karışmamış bağlayıcı ya da zeminin oluşmasını önleyerek zeminde üniform bir alan oluşturmak, sabit bir su muhtevası ve bağlayıcı malzemenin zemin içerisinde üniform dağılımını sağlamaktır. Bunların sağlanabilmesi için uygun su/çimento oranının belirlenmesi, uygun enjeksiyon miktarının tespit edilmesi ve düzenli bir karıştırma işleminin yapılması gerekmektedir.

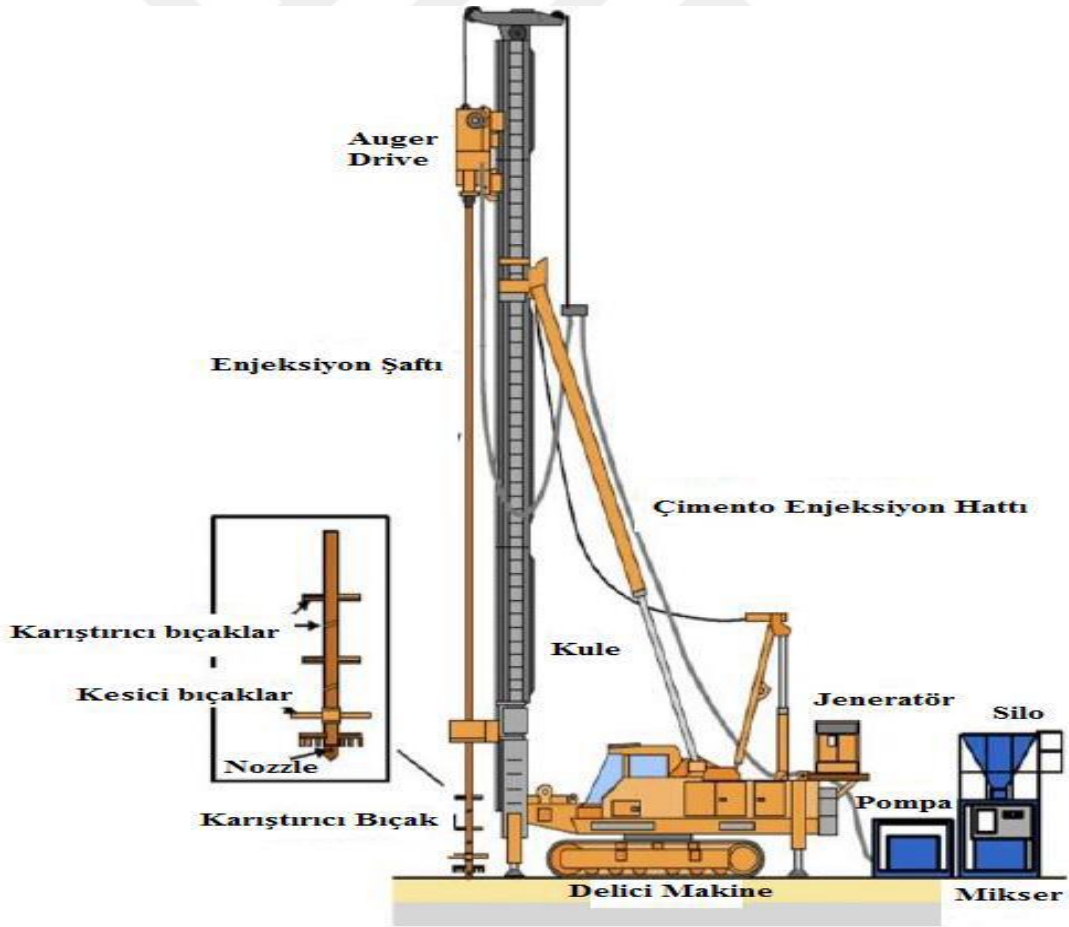


Şekil 2.2. Derin karıştırma uygulamasında kullanılan şaft sistemleri

2.2.4.1. Derin karıştırmada uygulanan ıslak ve kuru yöntem

Islak derin karıştırma yöntemi; imento veya imento-kireç karışımı bağlayıcı malzemelerinin şerbet halinde zeminde en fazla 50 m derinliğe kadar uygulandığı bir yöntemdir. şerbet halindeki karışım dönme enerjisiyle birlikte şafttan yüksek oranlarda verilerek bağlayıcı malzemenin zeminle karışması sağlanmaktadır. Bağlayıcı malzeme, zemine kesme bıçakları üzerinde bulunan deliklerden enjekte edilir. Karıştırma şaftları kolon çapıyla aynı ebattaki kesme bıçaklarından, süreksiz burgulardan ya da karıştırma bıçaklarından oluşmaktadır (şekil 2.3.).

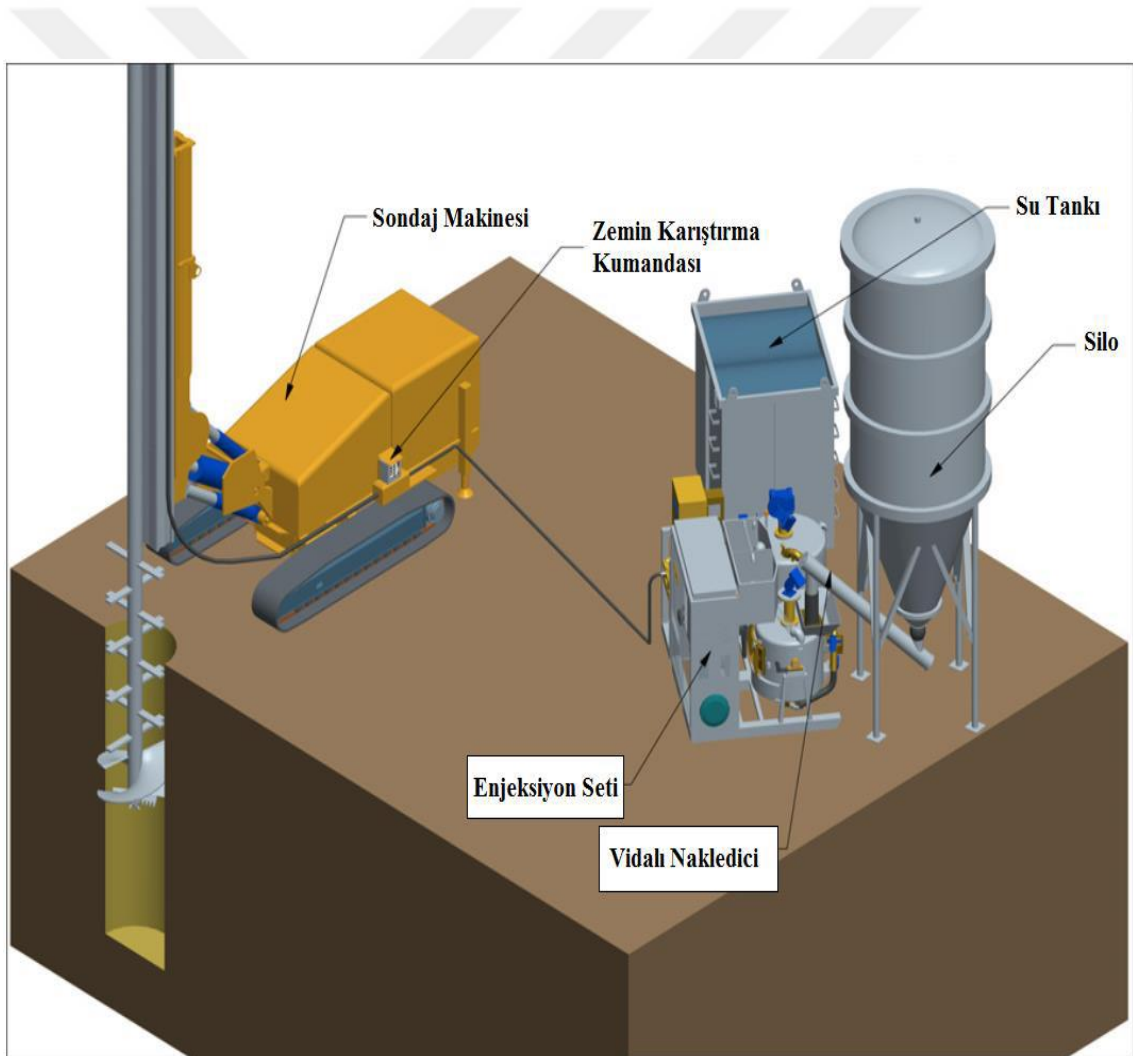
Islak derin karıştırma yöntemi; siltler, ince taneli kumlar, yumuşak kil ve organik zeminlerde uygulanmaktadır. Bu yöntem daha çok kurak ortamlar ve yeraltı su seviyesinin düşük olduğu ortamlarda tercih edilmektedir.



Şekil 2.3. Şematik olarak ıslak derin karıştırma sisteminin şematik olarak gösterimi (Kılıç, 2013)

Islak derin karıştırma yönteminin uygulanmasında; bağlayıcı malzemenin temini için bir karıştırma tesisi ve zemin ile bağlayıcı malzemeyi karıştırmak için bir karıştırma makinesi gerekmektedir. Karıştırma tesisi; silo, depolama sistemi, su deposu, geçici depolama tankı, güç kaynağı ve çamur pompası birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.4.). Karıştırma makinesi; sabit bulunan 1-4 mil üzerindeki karıştırma araçlarından oluşmaktadır (Kaya, 2016).

Zemine aynı miktarda enjeksiyon verilmesi ve karıştırıcı aparatın üzerinde bulunan gözeneklerin yerleşimi, kolonun homojen olmasında büyük bir etkiye sahiptir. Çizelge 2.1. ve Çizelge 2.2.'de EN14679:2005 standardına göre ıslak derin karıştırma yönteminde kullanılan ekipmanların genel olarak karakteristik özellikleri tanımlanmıştır (Anonim, 2006).



Şekil 2.4. Islak derin karıştırma yöntemi (MODEL&CO, 2019)

Çizelge 2.1. Islak karıştırma yöntemi için kapasite değerleri

Ekipman	Detay	Karada (Avrupa)	Karada (Japonya)	Denizde (Japonya)
Karıştırma makinesi	Karıştırma mili sayısı	1-3	1-4	2-8
	Karıştırıcı çapı	0.4-0.9m	1.0-1.6m	1.0-1.6m
	Maksimum iyileştirme derinliği	25m	48m	70m
	Nozulun yeri	Mil üzeri	Mil ve bıçak üzeri	Mil ve bıçak üzeri
	Enjeksiyon basıncı	500-1000kPa	300-600kPa	500-800kPa
Enjeksiyon tesisi	Depolanan karışım miktarı	3-6 m ³	3 m ³	3 m ³ -20 m ³
	Üretim kapasitesi	0.08 -0.25 m ³ /dak	0.25 -1 m ³ /dak	0.5 - 2 m ³ /dak
Bağlayıcı Depolama tankı	Maksimum kapasite	-	30 ton	50-1600 ton

Çizelge 2.2. Islak karıştırma yöntemi için uygulama değerleri

Karıştırma makinesi	Karada (Avrupa)	Karada (Japonya)	Denizde (Japonya)
Karıştırma şaftının batma hızı	0.5-1.5m/dak	1.0m/dak	1.m/da
Karıştırıcı şaftının geri çekme hızı	3.0-5.0m/dak	0.7-1.0m/dak	1.0m/dak
Karıştırıcı bıçakların dönme hızı	25-50devir/dak	20-40devir/dak	20-60devir/dak
Bıçak döme sayısı	Auger ile birlikte	350devir/m	350devir/m
Bağlayıcı enjeksiyon miktarı	80-450kg/ m ³	70-300kg/ m ³	70-300kg/ m ³
Enjeksiyon aşaması	Batma ve/veya geri çekme sırasında		

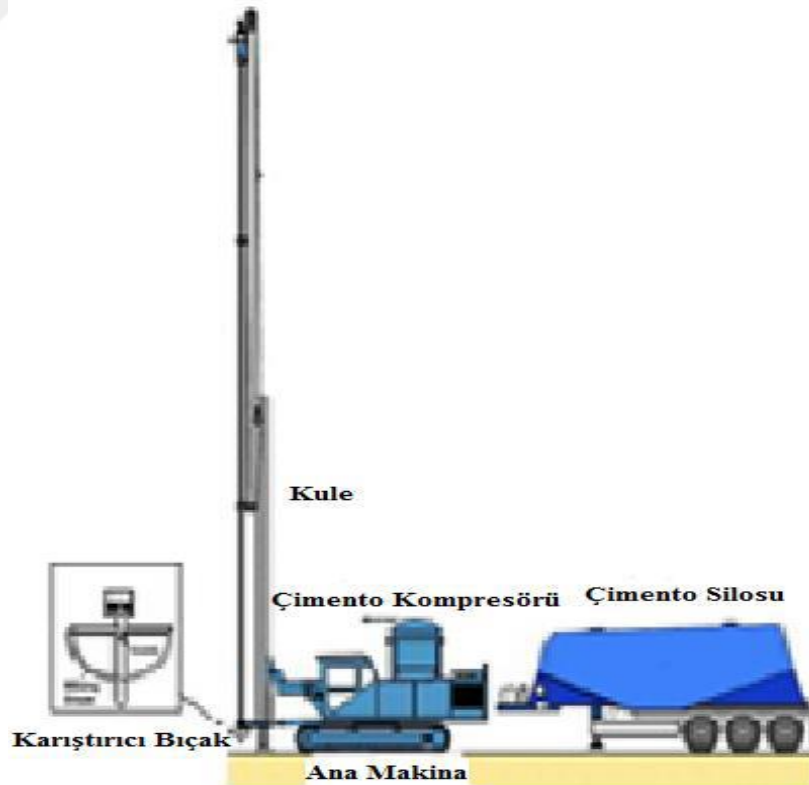
Kuru derin karıştırma yönteminde uygulanan sistem, İsveç ve Japonya'da 1960 yıllarında aynı zamanda geliştirilmiştir. Bu yöntemde uygulamanın ilk aşamalarında bağlayıcı malzeme olarak kireç kullanılmış olup sonraki uygulamalarda bağlayıcı malzeme olarak çimento da kullanılmıştır. Kuru derin karıştırma yönteminde, yumuşak zemin içerisinde karıştırma aracı ile kolon derinliğince inilerek bir boşluk oluşturulur.

Kireç, çimento ya da kireç- çimento karışımı açılmış olan boşluğun içerisine, karıştırma aracının üstündeki kolon çapıyla aynı çapta olan karıştırma araçlarıyla basınçlı hava ile enjekte edilir ve aynı şekilde karıştırma aracı basınçlı hava ile yavaşça geri çekilir. Bu yöntemde bağlayıcı malzeme karıştırıcının ucundan kompresör yardımıyla kuru olarak enjekte edilir. Böylece her yerinde aynı çapa sahip homojen kolon oluşturulur. Bu yöntem, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu ortamlarda önerilmektedir.

Kuru derin karıştırma yönteminde genel olarak;

- 1 ya da 2 delgili sistem uygulanabilmekte,
- Kolon oluştururken, 16-33 m arasında maksimum derinlik değişmektedir.
- Zemin iyileştirilmesinde kullanılan bağlayıcı dozajı 80-240 m³ aralığındadır.
- Bu yöntemle 0.5- 1.2 m aralığındaki çaplarda kolonlar imal edilmektedir (Holm, 1999).

Kuru derin karıştırma yönteminin ekipman sistemini (Şekil 2.5.); içerisinde bağlayıcı malzemelerin bulunduğu silolar, yüksek kapasiteli hava kompresörü, bağlayıcı besleme sistemini içeren basınçlı depo, hava kurutucu, jeneratör, filtre ünitesi, kontrol ünitesi ve bağlantı hortumlarından oluşmaktadır (Topolnicki, 2004).



Şekil 2.5. Şematik olarak kuru derin karıştırma sisteminin şematik olarak gösterimi (Kılıç, 2013)

Aynı miktarda bağlayıcı malzeme kullanılan kuru derin karıştırma yöntemi ile ıslak derin karıştırma yöntemi kıyaslandığında; ıslak yöntemde karıştırma sırasında su verilmesi nedeniyle kuru yöntemde daha yüksek mukavemet sağlandığı gözlenmiştir. Başka bir çalışma da ise, ıslak derin karıştırma yerine kuru derin karıştırma yöntemi uygulandığında siltli kilden oluşan zemin mukavemetinin 1.7 - 3.2 kat arttığı görülmüştür (Bunawan ve ark., 2017).

2.2.5. Derin karıştırma yönteminin uygulama şekilleri ve uygulama alanları

Derin karıştırma yöntemi, zemin iyileştirilmesinde çok geniş ve farklı alanlara uygulanabilmektedir. Derin karıştırma yönteminde; tekil kolon, ızgara tipi, duvar tipi, blok tipi gibi farklı sistemler uygulanmaktadır (Şekil 2.6. ve Çizelge 2.3.).



Şekil 2.6. Derin karıştırma yönteminin uygulama şekilleri (Kılıç, 2013)

Derin karıştırma yöntemi uygulama şekli; projenin özelliğine, limitlerine, yapılacak üst yapının önemine, iyileştirmenin amacına, iyileştirme yapılacak olan alandaki zeminin özellikleri ve geometrisine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Derin karıştırma yöntemi uygulamasının amaçları genel olarak; zeminde iyileştirme yapılarak zeminin taşıma kapasitesini arttırmak, zeminde oturmayı azaltmak, hidrolikcut-off duvarlar ya da paneller şeklinde inşa edilen yapılar ile yeraltı suyu akışını önlemek, yumuşak zeminlere uygulanarak inşa edilen tünellerin stabilitesini arttırmak, zeminde sıvılaşmaya karşı direnci arttırarak sıvılaşmayı önlemek, şev stabilitesini sağlamak, ayrıca derin karıştırma kolonları imal ederek kazı çevresindeki yapıların korunması şeklinde ifade edilebilir.

Çizelge 2.3. Derin karıştırma yöntemini uygulama şekillerinin özellikleri (Bunawan ve ark., 2017)

Tipi	Stabilite	Maliyet	Kurulum	Tasarım Hesabı	Uygulama
Blok	Oldukça stabil olup; büyük sert blok dış kuvvetlere karşı dayanıklıdır.	Maliyeti yüksek olup, iyileştirme hacmi diğerlerinden daha fazladır.	Kolonların hepsi çakıştığından daha çok zaman almaktadır.	Blok boyutunun dizaynı ağırlık yapılarıyla aynıdır.	Çok kalıcı yapılar
Duvar	Yapılan bütün duvarlar sıkı bir şekilde bağlandığında, yüksek stabilite sağlanır.	Maliyeti düşük olup, iyileştirme hacmi blok tipten daha küçüktür.	Uzun ve kısa birimlerin üst üste binme işleminin hassas bir şekilde yapılmasını gerektirir.	Duvarlar arasında iyileştirilmemiş zemine dikkat edilmelidir. İyileştirme ebatı iç stabiliteden etkilenmektedir.	İskele ve liman yapımları
Izgara	Blok tipe göre oldukça stabildir.	Maliyeti blok ve duvar tiplerin maliyetleri arasındadır.	Izgara şeklinde yapılması gerektiği için montaj sıralaması karışıktır.	Üç boyutlu iç kuvvetler üzerinde dizayn gerekmektedir.	Zemin sınılaşması ve deniz istinat duvarları
Grup Kolonu	Yanal kuvvetler küçük olursa yüksek stabilite sağlanır.	Maliyeti düşük olup, kurulum kısa zaman gerektirmekte ve iyileştirme hacmi azdır.	Üst üste bindirme işlemi yapılmalıdır.	Genel stabilite ve kazıkların iç kuvvetleri üzerine dizayn gerektirir.	Hafif yapı temelleri, düşük dolgu

Kazı destek duvarları, yüksek mukavemet, kazı yüzeylerinde stabil bir zemin yüzeyi oluşturmak, zeminin sıkılığını artırmak ve yeraltı sularının geçişini kontrol etmek amacıyla kullanılırlar. Singapur'da 23 m genişliğinde ve 225 m uzunluğundaki bir kazıda; 1.2 m çapında ve 41.5 m uzunluğunda derin karıştırma kolon imalatı yapılmıştır (Anonim, 2000).

Derin karıştırma yönteminin, zemin iyileştirme uygulamalarında zeminlerin dayanımını ve stabilitesini artırdığı, zeminin sıkışabilirliğini azalttığı ayrıca tünel, metro gibi benzer yeraltı inşaatlarında zemin hareketlerinin kontrol altında

tutulabileceği tespit edilmiştir. Derin karıştırma yönteminin uygulandığı en büyük örneklerinden biri de 1.8 milyon m³ sahaya uygulanmış ve sahadaki zeminin özelliklerinin bu yöntemle iyileştirildiği Trans- Tokyo Körfezi Tünel Projesi' dir.

Hidrolik cut-off duvarlar, yeraltı suyu akışını engellemek amacıyla paneller ya da örtüşen kolonlar şeklinde inşa edilmiş yapılardır. Yüzeğe yakın geçirimli tabakadan daha derindeki geçirimsiz kaya tabakasına kadar yapılan duvarlar çoğunlukla kaba taneli zeminlerin su geçişini engellemek için kullanılırlar. En büyük yer altı suyu kontrollü projesi Cusman Gölü barajı için uygulanmış olup 43- 63 m arasında geçirimsiz perdeler imal edilmiştir (Anonim, 2000).

2.2.6. Derin karıştırma yöntemi uygulanan zeminlerin mekanik özellikleri

Derin karıştırma yönteminin uygulandığı zeminlerde mukavemet artışı çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Çizelge 2.4.). Bunlar; zeminin karakteristik özellikleri (fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, boşluk suyu basıncı, organik madde içerikleri, su içeriği ve pH derecesi), bağlayıcı malzemenin karakteristik özellikleri (tipi, kalitesi, su ve diğer katkıları), karıştırma özellikleri (karıştırma kalitesi, karıştırma zamanı, karıştırma derecesi), kürlenme özelliklerini (nem, çözünme, sıcaklık, donma) oluşturmaktadır (Bruce, 2006).

Çizelge 2.4. Derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilen zeminlerin dayanımına etki eden faktörler (Terashi, 2017)

Kategori	Faktörler
Bağlayıcı malzemenin özellikleri	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bağlayıcı türü ▪ Bağlayıcı malzemenin kalitesi ▪ Su veya katkı malzemeleriyle karıştırma
İyileştirme yapılacak zeminin özellikleri	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeminin fiziksel, kimyasal, mineralojik özellikleri ▪ Boşluk suyu pH'ı ▪ Su muhtevası ▪ Organik içerik
Karıştırma koşulları	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bağlayıcı miktarı ▪ Karıştırma süresi ▪ Karıştırma/yeniden karıştırma zamanlaması
Kürleme koşulları	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sıcaklık ▪ Kür süresi ▪ Nem miktarı ▪ İslatma ve kurutma/donma ve çözülme, vb.
Yükleme şartları	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gerilmeler (sıkıştırma, çekme gerilmeleri gibi) ▪ Yanal çevresel basınç ▪ Yüklem hızı

Zemin iyileştirmesinde, derin karıştırma kolonunun performansını etkileyen en önemli faktör zemin türüdür. Farklı tür zeminlere uygulanan aynı tip derin karıştırma yöntemi uygulamasında, aynı tür enjeksiyon sıvıları ile zeminde oluşacak puzzolonik reaksiyon oranına göre farklı sonuçlar elde edilmektedir.

Derin karıştırma yönteminde, kum ve çakıllı zeminlerdeki mukavemet artışının killi zeminlerdeki mukavemet artışına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 2.5.) (Bruce, 2000).

Çizelge 2.5. Farklı türdeki zeminler için DKK basınç dayanımları (Bruce, 2000)

Bağlayıcı miktarı (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)		
	Turba	Kil	Kum
100	0.1	0.2	-
250	0.15	1.0	2.0
350	0.2	4.0	6.0
450	-	-	11.0

Uddin ve ark. (1997), yapmış oldukları çalışmalarında DKY ile yapılan zemin iyileştirmesinde en etkili çimentolama katkısı miktarının % 10- 20 arasında değişen çimento ilavesiyle olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada % 10'un altında ilave edilen çimento miktarındaki karışımlarda mukavemet artışı ve q_u belirgin bir şekilde tespit edilememiştir.

Derin karıştırma yöntemi uygulamasında zemin ve çimento karışımındaki su miktarı dayanımı etkilemektedir. Karışımdaki su, çimento ile hidrasyon reaksiyonuna girer ve C-A-H ve C-S-H gibi ürünler oluşur. Zemindeki su miktarı gereğinden az olduğu durumlarda, çimento ile su hidrasyon reaksiyonu tam olarak gerçekleştirilemez. Ancak zemin ve çimento karışımındaki suyun fazla olması durumunda ise fazla su içeriğinden dolayı iyileştirilmiş zeminde gözenek şeklinde boşluklar oluşmakta bu da zemin dayanımının düşük çıkmasına neden olmaktadır. Uygulama da genellikle su / çimento oranı; 0.8 - 1.5 aralığında değişmektedir.

Derin karıştırma yönteminde, kohezyonlu zeminlerin iyileştirilmesinde, granüler zeminlere göre daha fazla çimento miktarı kullanılmaktadır. Derin karıştırma yönteminde istenilen düzeyde iyileştirme olup olmadığı, derin karıştırma kolonlarından alınan örnekler üzerinde serbest basınç deneyi yapılarak belirlenmektedir (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.6. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zemin numunesinin laboratuvar sonuçları
(Anonim, 2000)

Serbest Basınç Direnci	Granüler zeminlerde 0.5-5 MPa Kohezyonlu zeminlerde 0.2-2 Mpa
Permeabilite Katsayısı	$10^{-6} - 10^{-9}$ m/s
Elastisite Modülü	Laboratuvar örnekleri için serbest basınç direncinin 350-1000 katı Arazi örnekleri için serbest basınç direncinin 150-500 katı
Kayma Mukavemeti	Serbest basınç direncinin 1 MPa'dan küçük olduğu durumlar için %40- 50
Çekme Mukavemeti	Serbest basınç direncinin %8-14
28 Günlük Serbest Basınç Direnci	Silt ve killer için 7 günlük mukavemetin 1.5 katı Kumlar için 7 günlük mukavemetin 2 katı

2.2.7. Derin karıştırma yönteminin avantaj ve dezavantajları

Derin karıştırma yöntemi, uygulandığı alandaki diğer alternatif yöntemlerle geoteknik, maliyet, performans, lojistik, çevresel etkiler gibi çeşitli faktörler açısından kıyaslandığında bir takım avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

Genellikle; derin karıştırma yöntemi kayalık ve çok sert olmayan zeminlerin iyileştirilmesinde hem pratik hem de ekonomik bir yöntemdir. Zemin tabakalarının üst katmanlarının boşluklu olması ve iyileştirme yapılacak alanın geniş olması, uygulama sırasında titreşimsiz ekipmanların kullanılması gerektiğinde, yapılacak iyileştirme derinliğinin 40 m den az olduğu, iyileştirme yapılmış zeminin serbest basınç mukavemet değerinin 0.1- 5 MPa aralığında olması gerektiği durumlarda derin karıştırma yöntemi tercih edilmesi avantajlıdır.

- Homojen olmayan zeminlerde üniform bir şekilde uygulanabilmekte ve su geçirimsizliği azaltılabilmektedir.
- Bitişik yapılara en az zarar verecek düzeyde ya da yanal gerilmelere sebep olmaktadır.
- İyileştirme yapılmış zeminin mühendislik özellikleri güvenli bir şekilde tahmin edilebilmektedir.
- Derin karıştırma yöntemi uygulaması yapılırken titreşimsiz, az gürültü çıkarmakta ve çevreye minimum düzeyde zarar vermektedir.
- DKY ile genellikle yüksek ölçüde verimlilik elde etmek mümkündür, bundan dolayı büyük ölçekli projelerde uygulanması ekonomik olmaktadır.

- DKY ile iyileştirilmiş zeminde derin karıştırma kolonları zemine uygulanan yükün büyük bir bölümünü taşıyarak toplam ve farklı oturmaları azaltmaktadır.
- Kolonların mesafeleri ve desenleri büyük ölçüde değişken olduğundan ihtiyaca göre düzenleme yapılabilir.
- DKY uygulanacak sahada, suyun mevcut olması uygulamaya engel olmadığından suyun uzaklaştırılmasına gerek duyulmaz.
- DKY, diğer alternatif uygulamalara göre, daha ekonomik, daha pratik bir yöntemdir.
- Derin karıştırma yönteminin dezavantajları ise;
- DKY, çok gevşek ya da kaya gibi sert zeminlerde uygulanamaz.
- Uygulama yapılan yönteme bağlı olarak derinlik sınırı bulunmaktadır.
- Derin karıştırma kolonları, sadece düşey yönde imal edilmektedir.
- DKY, çalışma alanları seçilirken geniş alanlar tercih etmekte gerekmektedir.
- İmal edilmiş derin karıştırma kolonlarında, çözülme bozulması ve donma gibi olaylar ile karşılaşılabilir.
- Uygulanan yönteme bağlı olarak zayıf zeminlerde ekipmandan dolayı oluşacak ağırlık sorun teşkil edebilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.1.1. Çimento

DKY, derin karıştırma kolon imalatında Normal portland çimento (CEM I 42.5 R) bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Portland çimentosu klinkeri hammaddelerini kil ve kalker oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılacak olan çimento erken dayanım kazanan bir çimento türü olup TS EN 196 ve TS EN 197-1 standartlarına uygundur.

Portland çimentosunun %90'ını CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ gibi temel bileşenler oluşturmaktadır. Çimento içerisindeki C₃S ve C₂S erken dayanıma etki ederken C₃S ve C₃A'nın nihai dayanım üzerinde etkili olduğu görülmektedir. CEM I 42.5 R çimento içerisinde C₃S'nin ana bileşen olması nedeniyle bu bileşenden dolayı erken dayanım kazanma özelliği vardır (Çizelge 3.1.).

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan CEM I 42.5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Karakteristik özellik	CEM I 42.5 R
Priz Başlangıcı (dak.)	200
Priz Sonu (dak.)	260
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.4
SO ₃ (%)	2.48
Cl (%)	0.0092
MgO (%)	0.85
Kızdırma Kaybı (%)	2.0
Hacim Genleşmesi (mm)	1.3
Özgül Ağırlık	3.15
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3880
<hr/>	
Basınç dayanımı (MPa)	
2 günlük	28.1
28 günlük	54.5

3.1.2. Zemin

Derin karıştırma kolonlarının oluşturulmasında kullanılacak killi zemin örneği; Konya ili, Selçuklu ilçesi, 2. Organize Sanayi Bölgesinde kurulacak olan Konya Teknik Üniversitesi Sanayi Kampüsü arazisinden temin edilmiştir. Zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için araziden örselenmiş zemin numuneleri alınmıştır. Killi zeminin sınıfı, USCS sınıflandırma sistemine göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir.

Zeminin likit limiti; düşen koni penetrasyon yöntemiyle %33.5, Casagrande yöntemi ile %33 olarak bulunmuştur. Zeminin plastik limiti %21.8, plastisite indisi %11.45, lineer rötre miktarı ise %7.2 olarak bulunmuştur. Standart kompaksiyon deney sonucuna göre zeminin optimum su muhtevası %20.5, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 17.2 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Araziden alınan zeminin doğal su muhtevası %12.0'dir. Deney sonuçlarına göre arazideki zeminin plastik kıvamda olduğu söylenebilir (Şekil 3.1. ve Çizelge 3.2.).



Şekil 3.1. Zeminin granülometri eğrisi

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan zeminin özellikleri

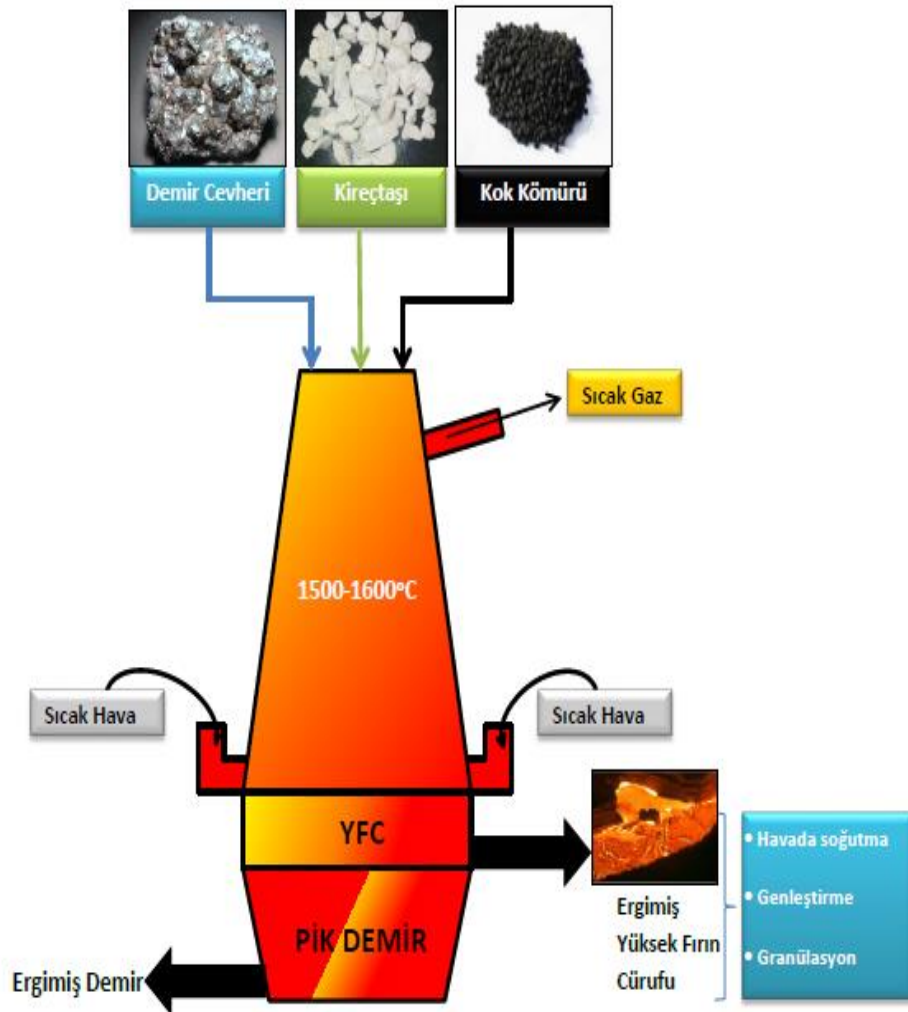
Likit limit (LL, %)	33.25
Plastik limit (PL, %)	21.8
Plastisite indisi (PI, %)	11.45
Doğal su muhtevası (w_n , %)	12.0
Tane birim hacim ağırlığı (ρ_s , g/cm^3)	2.64
Çakıl yüzdesi (%)	9.5
Kum yüzdesi (%)	25.15
Silt + kil (%)	65.3

3.1.3. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Adana Çimento, İskenderun Tesislerinden temin edilmiştir.

3.1.3.1. Yüksek fırın cürufunun elde edilmesi

Yüksek fırın cürufu, ham demir üretimi esnasında atık malzeme olarak elde edilmektedir. Demir filizi gangı, kok ve kireç taşının yanmasından sonra oluşan atıklar, hafif olmasından dolayı ham demirin üstünde kalır ve yüksek fırın cürufu oluşur (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Yüksek fırın cürufunun üretim süreci

Doğada demir oksit olarak bulunan demir cevheri, bünyesinde bir miktar alumina, kükürt, silika gibi yabancı maddeleri bulundurmaktadır. Demir cevheri elde etmek için demir oksitin bünyesindeki yabancı maddelerden arındırılması ve demir oksitteki oksijenin dışarı çıkartılması gerekmektedir.

Yüksek fırınlarda, yakıt olarak en çok kok kömürü kullanılmakta ve hammaddelerle sürekli beslenen fırınlarda sıcaklık 1600°C'lere ulaşmaktadır. Demir cevherini yabancı maddelerden arındırmak için yardımcı hammadde olarak bir miktar kireç taşı cevherle birlikte üst kısmından fırına girmektedir.

Kok kömüründe bulunan karbon, cevherin içeriğindeki demiroksitin oksijeniyle birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit olarak fırından çıkmaktadır. Fırında, geride eriyik halde demir ile birlikte, kireç, kok kömürünün külü, mangan, silis, alümin, karbon, fosfor ve sülfür gibi maddelerden oluşan, cüruf olarak isimlendirilen malzeme kalmaktadır. Yoğunluk farkı nedeniyle, demir ve cüruf farklı çıkışlarla dışarı verilmektedir (Erdoğan, 2004).

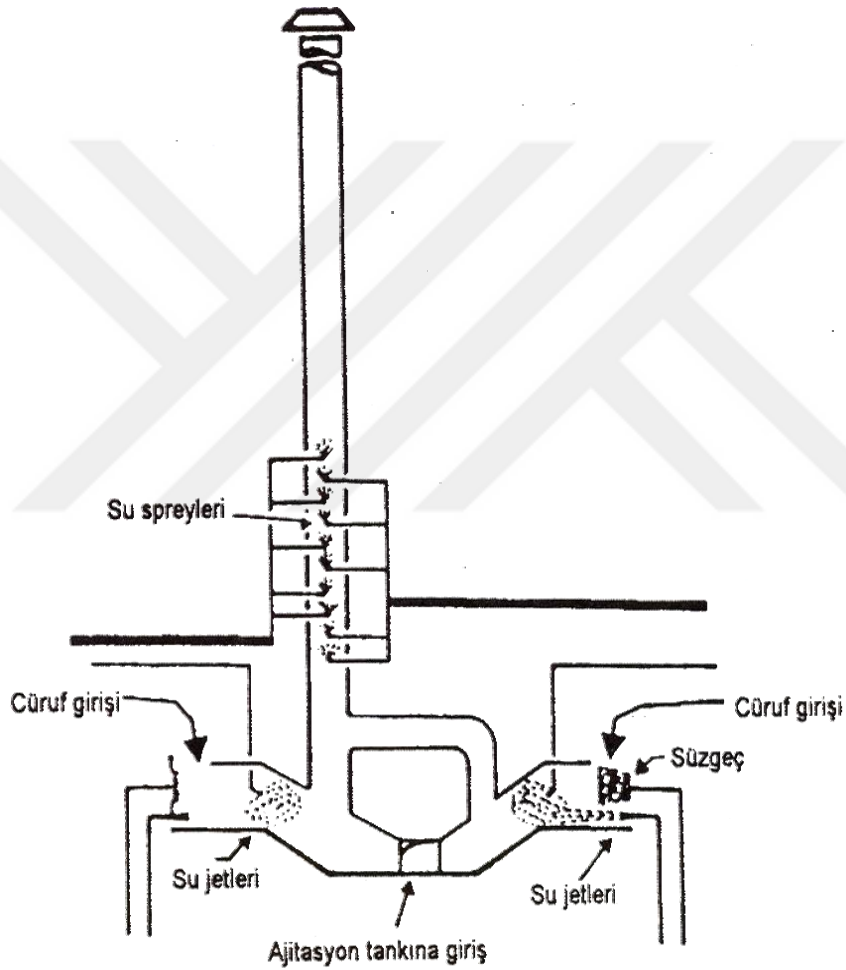
Fırından yaklaşık 1500°C sıcaklıkta çıkarılmış olan cürufun kullanılmadan önce soğutulması gerekmektedir. Cüruf, kullanılan soğutma tekniklerine göre farklı özellikler kazanmaktadır (Şekil 3.3.). Cürufun, hızlı bir şekilde soğutulup, düzensiz camsı yapı kazanması sağlanır ve bağlayıcı malzeme olarak kullanılırlar. Cürufun, yavaş soğutulması durumunda ise kristal bir yapı oluşarak bağlayıcılık özelliği olmayan bir yapı oluşur ve hidrolik bağlayıcılık özelliği olmadığından dolayı yol dolgu malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar (Newman ve Choo, 2003).

Granülasyon ve peletleme (hava granülasyonu) olmak üzere cürufun soğutulmasında iki yöntem kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Tane büyüklüklerine göre yüksek fırın cürufu

Granülasyon yönteminde; ergimiş durumda bulunan cüruf, yüksek basınçlı su fiskiyelerinin içinden geçirilmekte, yaklaşık olarak sıcaklığı 50°C'nin altında olan çok miktarda suyun püskürtülmesi (kütlece suyun cürufa oranı 10) ile soğutma işlemi yapılmaktadır (Şekil 3.4.). Böylece, cüruf hızlı bir şekilde soğuyarak en büyük tane büyüklüğü yaklaşık olarak 5 mm olan camsı granüller elde edilir. Bu yöntem sonucunda cüruf bünyesinde yaklaşık olarak %30 miktarda su içerir.

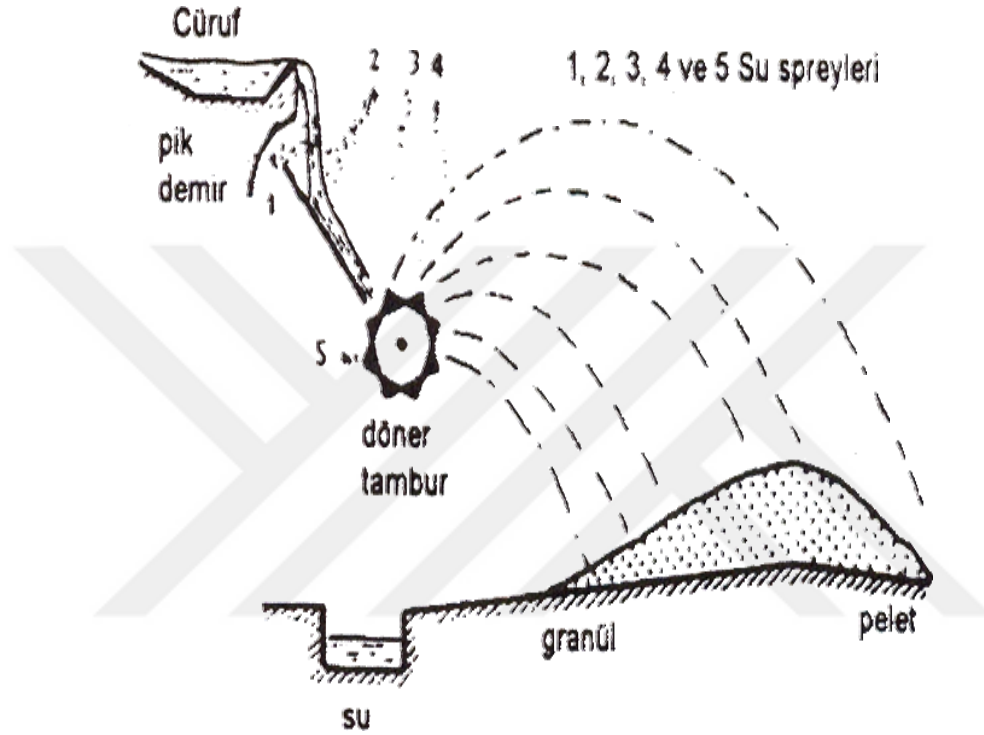


Şekil 3.4. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay, 2003)

Peletleme yönteminde, ergimiş halde bulunan cüruf bir vibrasyon plakası üzerine dökülmekte ve böylece genişmesi sağlanan cüruf, bir miktar su püskürtülerek soğutulmaktadır. Daha sonra, yüzgeç gibi çıkıntılara sahip yaklaşık 1 m çapında dönen bir tambura aktarılan cüruf, tambur aracılığıyla havaya fırlatılarak çok çabuk soğuması

sağlanmaktadır. Bu uygulama sonunda cürufun bünyesindeki su miktarı %10'un altındadır (Şekil 3.5.).

Granülasyon metodu, yüksek camsı yapıda cüruf üretiminde en etkili yöntem olmakla birlikte; yaklaşık olarak maliyeti peletleme yönteminden 6 kat daha fazla olması, granülasyon metodunun kullanımını sınırlandırmaktadır (Newman ve Choo, 2003).



Şekil 3.5. Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay, 2003)

3.1.3.2. Yüksek fırın cürufunun tarihsel gelişimi

Dünyada demir çelik üretiminde önemli bir yere sahip olan Türkiye, demir çelik üretimine 1939 yıllarda başlamış olup Karabük, İskenderun ve Ereğli’de bulunan demir çelik fabrikalarında halen hizmetine devam etmektedir.

YFC’ nin tarihsel gelişimi kronolojik olarak aşağıdaki gibidir:

- YFC, 1774 yılında sönmüş kireçle birlikte ilk kez harç yapımında kullanılmıştır.
- Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özelliği 1862 yılında Almanya’da Emil Langen tarafından bulunmuştur.
- 1865 yılında öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile kireç karıştırılarak Almanya’da üretimi başlamıştır.

- Yüksek fırın cürüflü çimento 1888 yılında Almanya’da üretilmeye başlamıştır.
- 1889 yılına yüksek fırın cürüflü çimento Fransa’da Paris yeraltı metrosu inşasında kullanılmıştır.
- 1896 - Yüksek fırın cürüflü çimento 1896 yılında Amerika’da üretilmiştir.
- 1917 - Yüksek fırın cürüflü çimento ile ilgili ilk standart Almanya’da yürürlüğe girmiştir.
- 1950’ler – Yüksek fırın cürufu çimento ile birlikte beton üretiminde Amerika’da, İngiltere’de, Güney Afrika’da, Avustralya’da, Japonya gibi ülkelerde 1950 yıllarında kullanılmaya başlanmıştır (Erdoğan, 2003)

3.1.3.3. Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

YFC bağlayıcılık özelliğini, ani soğutma yoluyla oluşan camsı yapı sayesinde kazanmaktadır. YFC’nin hidrolik bağlayıcı özellikte olması; YFC’nin kimyasal yapısına, içerisindeki camsı yapı miktarına ve YFC’nin inceliğine bağlı olarak değişmektedir. YFC’nin kimyasal yapısına bakıldığında temel olarak CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃ sistemlerinden meydana gelmektedir. YFC, camsı fazdan oluşmasına rağmen, soğutulma şekline göre, gehlenite (2CaO.Al₂O₃.SiO₂), mervinit (3CaO.MgO.2SiO₂) ve akermanite (2CaO.MgO.2SiO₂) gibi bazı kristal fazları da içerebilmektedir. Yapısında CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ oranları oldukça yüksektir. YFC, yüksek miktarda CaO içermesi nedeniyle kendi başına da bir miktar bağlayıcılık özelliği göstermektedir (Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.3. İskenderun demir çelik fabrikası yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi (Canbaz, 2007)

Bileşenler	İsdemir YFC Değerleri
SiO ₂ (%)	34.43
Al ₂ O ₃ (%)	11.53
Fe ₂ O ₃ (%)	0.07
CaO (%)	30.94
SO ₃ (%)	1.79
Na ₂ O (%)	0.53
Cl	0.02
Kızdırma kaybı (%)	0.1
Özgül yüzey alan (cm ² /g)	4240
Özgül ağırlık	2.85

YFC'nin bağlayıcı özellikte olup olmadığı kimyasal yapısına bağlı olarak aşağıdaki denklemlerle yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenir. Denklem 3.1. ve 3.2. den hesaplanan değerlerin 1'in üzerinde olması gerekmektedir. Denklem 3.3. ile hesaplanan değerlerin 1.9'un üzerinde çıkması bağlayıcı özelliğinin oldukça iyi olduğunu, 1.5 ile 1.9 arasında ise iyi, 1.5 altında ise kullanılabilir durumda olduğunu göstermektedir (Tokyay ve Erdoğan, 2003).

$$\frac{CaO + MgO + \frac{1}{3} Al_2O_3}{SiO_2 + \frac{2}{3} Al_2O_3} \quad (3.1.)$$

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \quad (3.2.)$$

$$\frac{CaO + CaSiO_2 + \frac{1}{3} MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO} \quad (3.3.)$$

Çizelge 3.4.'de YFC ve portland çimentosunun kimyasal bileşenleri verilmiştir. YFC'nin yoğunluğu çimentoya göre düşük olup, tane inceliği cürufun öğütülmesine göre değişiklik göstermektedir. YFC, portland çimentosuna oranla daha az kalsiyum oksit (CaO) ve daha fazla silisyum dioksit (SiO₂) içermektedir. Bileşenlerin oranı, bağlayıcı maddelerin kimyasal özelliklerini etkilemekte ve cürufun yüksek miktarda SiO₂ içermesi, çimentoya göre daha zor öğütülmesine sebep olmaktadır.

Çizelge 3.4. Portland çimentosu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi (Kosmatka ve ark., 2003)

Bileşenler	Portland Çimentosu	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂ (%)	22	35
Al ₂ O ₃ (%)	5	12
Fe ₂ O ₃ (%)	3.50	1
CaO (%)	65	40
SO ₃ (%)	1	9
Na ₂ O (%)	0.20	0.30
K ₂ O (%)	1	0.40
Kızdırma kaybı (%)	0.20	1
Özgül yüzey alan (cm ² /g)	3500 -4000	4000 - 5000
Özgül ağırlık	3.15	2.94

YFC, Portland çimentosuna göre daha açık renklidir. Bunun sebebi ise çimentoya gri rengi kazandıran C₄AF bileşeninin yüksek fırın cürufunda olmamasıdır.

3.1.3.3. Pozzolanik reaksiyon ve pozzolonik aktivite

Pozzolanlar, silisli ve alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan kendi başına bağlayıcılık değeri olmayan ancak ince öğütüldüklerinde ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleşerek bağlayıcılık özelliği gösteren doğal maddelerdir.

Pozzolan ve portland çimentosu karışımındaki hidrasyonda, pozzolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı karışımındaki serbest kireç miktarı azalmaktadır. Belirli bir süre sonunda, içerisinde pozzolan bulunan betonların çimento hamurunda, portland çimentosu hamuruna göre daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ürünü bulunmaktadır. İçerisinde pozzolan madde bulduran betonlarda daha çok bağlayıcı ürün olan C-S-H jellerinin bulunması, dayanım artışına sebep olur ve boşluk yapısının azalması sonucunda betonun dış etkilere dayanıklılığı da artmaktadır (Özturan, 1991).

Nemli bir ortamda, ince öğütülmüş olan pozzolanın silisi ile kalsiyum hidroksit arasında oluşan reaksiyon basitçe $CH+S+H \rightarrow C-S-H$ (kalsiyum silika hidrat) şeklinde gösterilebilir. Bu yavaş bir reaksiyon olup çimento kimyasında $C = CaO$, $S = SiO_2$, $H = H_2O$ ve $CH = Ca(OH)_2$ olarak gösterilmektedir.

3.1.3.4. Yüksek fırın cürufunun hidrasyonu

Bağlayıcı madde ile su arasında meydana gelen kimyasal reaksiyona hidrasyon reaksiyonu denir. Hidrasyon reaksiyonu, su ve sıcaklığa bağımlı bir reaksiyon olup dışarıya ısı vermektedir. YFC bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Su ile girdiği reaksiyonda, portland çimentosuna kıyasla çok yavaş ve daha düşük etkidir. Bu nedenle yüksek fırın cürufunun aktive edilmesi gerekmektedir.

Cürufaların kimyasal aktivasyonu için kullanılan aktivatörler iki gruba ayrılmaktadır:

- Alkaliler (soda, kireç, sodyum karbonat, sodyum silikat)
- Sülfatlar (alçı, anhidrit, fosfojip vb).

Bu malzemeler, cürufların hidrasyon ürünlerinin oluşmasını hızlandırmakta ve bu malzemeler YFC ile kimyasal reaksiyona girdiklerinde ortamın pH seviyesini artırmaktadırlar. Kritik pH seviyesine ulaşıldığında cürufun camsı yapısı bozulmakta ve cüruf kendi bağlayıcı jellerini üreten suyla reaksiyona girmeye başlamaktadır (Newman ve Choo, 2003).

3.1.3.5. Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özelliğini etkileyen faktörler

Cürufun çimento ve beton üzerine etkisi, puzolanların etkilerine benzer olarak büyük ölçüde cürufun sahip olduğu özelliklere bağlıdır.

Yüksek fırın cürufunun betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılması durumunda bağlayıcı özelliklerini etkileyen faktörler sıralanacak olursa (Elibol, 2012):

- YFC'nin kimyasal yapısı
- Reaksiyon yapan sistemdeki alkali konsantrasyonu
- YFC içerisinde bulunan camsı yapının miktarı
- YFC ile birlikte kullanılan portland çimentosunun inceliği
- Ortamın sıcaklığı

YFC'nin beton katkı maddesi olarak kullanılmasının, cürufu çimento üretiminde kullanılması karşılaştırıldığında, bazı avantajları olduğu gözlemlenmiştir. Bunlar:

- YFC, portland çimentosu klinkerinden daha sert bir malzeme olmasından ötürü, çimento üretimi yapılırken iki malzemedeki birlikte öğütüldüğünde, çimentonun içerisinde bulunan cüruf taneleri klinker kadar ince olmaz. Aynı şekilde istenilen incelikte öğütülen YFC beton katkı maddesi olarak kullanıldığında daha fazla verim elde edilmektedir.
- YFC, çimento gibi prehidratasyon durumu göstermediğinden ötürü daha iyi depolanma özeliğine sahiptir.
- YFC mineral katkı maddesi olarak kullanıldığında, optimum incelikte ve miktardaki cüruf ile istenilen özellikteki beton elde etmek mümkündür.
- YFC, katkı maddesi olarak kullanıldığında betonun işlenebilirliğini artırmaktadır.

3.1.3.6. Yüksek fırın cürufunun kullanım alanları

YFC, taze betonda işlenebilirliği artırmakta, terlemeyi azaltmakta, hidrasyon ısısını azaltıp priz süresini uzatmaktadır. Sertleşmiş betonda permeabiliteyi azaltmakta ayrıca sülfata dayanıklılığını artırmaktadır (Beycioğlu ve ark., 2008).

Çizelge 3.5. YFC'nin kullanım alanları

Doğrudan Kullanılan Alanlar	Öğütülmüş Olarak Kullanılan Alanlar
Beton agregası	Çimento yapımı
Hafif beton	Beton agregası
Hafif dolgu malzemesi	Cam Sanayi
Yalıtım malzemesi	Harç Enjeksiyonu
	Zemin Stabilizasyonu

3.1.4. Küçük ve büyük ölçekli DKK imalatında kullanılan ekipmanlar

3.1.4.1. Mikser

Küçük ölçekli DKK örnekleri hazırlanması esnasında homojen karışım elde etmek için mikser kullanılmıştır (Çizelge 3.6. ve Şekil 3.6). TS EN 12697-35 standartları ve daha önceki yapılan çalışmalar dikkate alınarak karışım hazırlanırken mikser, 120-300 devir/dak. ile yaklaşık 5-10 karıştırılarak karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler 5cm çapında ve 10 cm boyundaki ebatlarda olan PVC kalıplara doldurulmuştur.

Çizelge 3.6. Mikser özellikleri

Boyut	70×75×80 cm
Güç	550 W
Hız	20 - 480 devir/dak.
Ağırlık	80 kg
Kapasite	10 litre



Şekil 3.6. Çalışma esnasında kullanılan mikser

3.1.4.1. Derin karıştırma makinesi

Tez çalışmasında, derin karıştırma kolonlarının oluşturulması; Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'ndaki derin karıştırma makinesiyle yapılmıştır (Çizelge 3.7. ve Şekil 3.7.). Tez kapsamında kullanılan derin karıştırma makinesi, TÜBİTAK Projesi kapsamında olan bir başka proje için Doç. Dr. Murat OLGUN ve Arş. Gör. Yavuz YENGİNAR tarafından tasarlanmış ve Konya'da özel bir firmaya yaptırılmıştır.

Çizelge 3.7. Derin karıştırma makinesinin özellikleri

Şaft yüksekliği (cm)	95
Şaft çapı (cm)	17
Karıştırıcı bıçağın dönme hızı (devir/dak.)	0-100
Karıştırıcı şaftın batma veya çekme hızı (cm/dak.)	0-200
Enjeksiyon basıncı (Bar)	0-60



Şekil 3.7. Derin karıştırma makinesi

Karıştırıcı bıçak, arazideki derin karıştırma makinelerindeki bıçaklara benzer biçimde tasarlanmış olup bıçağın çapı 30 cm olup iki farklı düzeyde karıştırma bıçağı bulunmaktadır. Bıçaklardan birisi zemin ve suyu karıştırarak zeminin istenen su içeriğine sahip olması için kullanılırken, diğeri ise ıslak zemini enjeksiyon ile karıştırmak için kullanılmaktadır (Çizelge 3.8. ve Şekil 3.8.).

Çizelge 3.8. Karıştırıcı bıçağın özellikleri

Bıçak çapı (cm)	30
Bıçak yüksekliği (cm)	25
Delik sayısı (adet)	4
Delik çapı (mm)	3



Şekil 3.8. Derin karıştırma düzeneğinin bıçağı

3.1.4.2. Enjeksiyon hazırlama tankı ve pompası

Derin karıştırma kolonu imalatı için gereken enjeksiyon, enjeksiyon hazırlama tankında hazırlanmıştır. Enjeksiyon hazırlama tankı iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısmı enjeksiyon bileşenlerini oluşturan malzemelerin homojen karışması sağlamak için kullanılan kazan kısmıdır. İkinci kısmı ise enjeksiyon karışımını pompalama işlemi yaparak karıştırma bıçağına gönderen pompa kısmından oluşmaktadır (Çizelge 3.9. ve Şekil 3.9.).

Çizelge 3.9. Enjeksiyon hazırlama tankı ve pompasının özellikleri

Bıçak sayısı (adet)	3
Dönme hızı (devir/dak.)	60
İletim mesafesi (m)	50
Enjeksiyon miktarı (L/ dak.)	35
Çap (cm)	65
Yükseklik (cm)	42
En yüksek çalışma basıncı (Bar)	40
Tank hacmi (L)	160



Şekil 3.9. Enjeksiyon hazırlama tankı ve pompası

3.1.4.3. Karot alma makinesi

Tez çalışmasında, imal edilen derin karıştırma kolonlarından karot almak için Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında bulunan karot makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Karot alma makinesi

Karot alma işlemleri sırasında yüksek hızdan ötürü elmas uçlu karotiyer ile kolon arasında sürtünmeden dolayı oluşacak yüksek sıcaklığa engel olmak için basınçlı su kullanılmaktadır.

3.2. Enjeksiyon Hazırlanması

Deneysel çalışma kapsamında yapılan reolojik deneyler (Marsh hunisi, sedimentasyon) ve derin karıştırma kolonlarının imalatında kullanılan enjeksiyon karışım harçları süspansiyonlar şeklinde hazırlanmıştır. Süspansiyonların hazırlanmasında aynı prosedür uygulanırken, farklı su/çimento oranları (0.7, 0.85, 1.0, 1.25, 1.50) kullanılmıştır.

Süspansiyonlar 280 devir/dak. karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Önce karıştırma kabı içerisine belirlenen su doldurulup mikser çalıştırılmıştır. Mikser çalışırken çimento ve YFC yavaş yavaş eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Toplam 3-5 dak. karıştırma süresinden sonra süspansiyonları hazır hale gelmiştir.

3.3. DDK' nin Hazırlanmasında Kullanılacak Enjeksiyonların Reolojik Özellikleri

Reoloji, malzemelerin deformasyon ve akışkanlık özelliklerinin belirlenmesi durumunu ifade etmektedir. DKY uygulanarak imal edilecek olan kolonların performansı; iyileştirilecek olan zemin, makine teçhizat kaynaklı sistemsel parametreler ve kıvama bağlı özellikler etkilemektedir. Bundan dolayı enjeksiyon içerisinde kullanılacak olan malzemelerin sınır değerlerini belirlemek için bazı ön deneyler yapılmıştır.

Enjeksiyon malzemesinin davranışını tahmin etmek için ilk aşamada karışımın reolojik özelliklerini belirlenmesi gerekir. Marsh hunisi ve sedimentasyon deneyleri çeşitli su / çimento (W / C) oranları için (0.7, 0.85, 1.0, 1.25, 1.5) çimento karışımları için yapılmıştır.

3.3.1. Marsh hunisi deneyi

Marsh hunisi deneyi, enjeksiyonun zaman (saniye) içindeki viskozitesinin ölçülmesinde kullanılmaktadır.

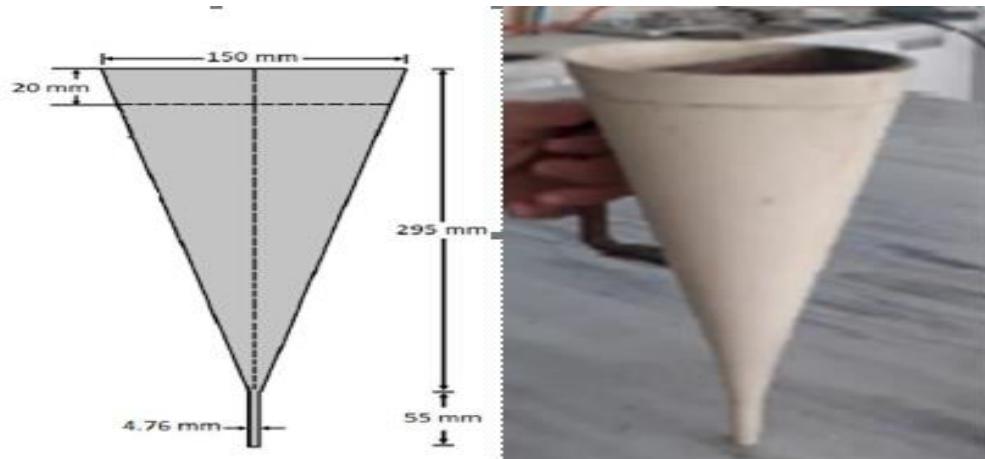
Viskozite; içsel moleküller arasındaki sürtünme nedeniyle akışkan maddenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Akma olayının başlaması için akmaya karşı bu direncin aşılması gerekmektedir (Warner, 2004). Newton kanununa göre sıvının kayma direnci(τ), hız eğimine (dv/dz) oranı olarak tanımlanır (Hausmann, 1990).

Sıcaklık, çimento, yüksek fırın cürufu miktarı, su/çimento oranı ve akışkanlaştırıcı gibi faktörler viskozite değerini etkilemektedir. Sıcaklık ve su/çimento oranı arttıkça viskozite değeri düşmektedir. Marsh hunisi, enjeksiyon harcının, akışkanlık ve vizkozite gibi reolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Marsh hunisinin üst çapı 152.4 mm ve alt çapı 4.76 mm, 304.8 mm yüksekliğinde bir koniden oluşmaktadır. Enjeksiyon çıkış borusu ise 55 mm yüksekliğinde ve 4.76 mm çapında koninin alt kısmını oluşturmaktadır (Şekil 3.11.).

Deneyin yapılışı (ASTM C939);

- Marsh hunisi deneyi, $23.0 \pm 2^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığında yapılmalıdır..
- Marsh hunisi nemlendirilmelidir.
- Enjeksiyon sıvısı homojen karıştırılmalıdır.
- Marsh hunisinin üst kısmında bulunan ince elek, büyük çimento parçalarının koninin çıkış borusunu tıkamasını önlemede kullanılmaktadır.
- Marsh hunisinin deliği parmak kapatılır ve enjeksiyon sıvısı huniye doldurulur .Enjeksiyon sıvısının akması için huni ucu açılarak kronometre çalıştırılır.
- Enjeksiyon sıvısının hazneden 1000 ml'lik kaba akması için gereken süre kronometre tarafından ölçülür.

Bu tez çalışması kapsamında; farklı oranlarda portland çimentosu ve YFC karışımları için toplam 35 adet Marsh hunisi deneyi yapılmıştır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.11. Marsh hunisi



Şekil 3.12. Marsh hunisi deneyinin yapılışı

3.3.2. Sedimentasyon deneyi

Sedimentasyon, süspansiyon içerisinde serbest halde bulunan partiküller çökelme eğiliminde bulunurlar ve dibe doğru çökerler, çöken partiküllerin üzerinde berrak su toplanmaktadır bu durum sedimentasyon olarak adlandırılmaktadır.

Enjeksiyon sıvısı; yerçekimi etkisi ile oluşan sedimentasyon sıfır veya minimum da tutulabiliyorsa stabildir. Stabilité; iki saat sonunda 1000 ml ölçekli cam mezür içindeki enjeksiyon karışımı üzerinde toplanan berrak su hacmi toplam enjeksiyon karışımı hacminin %5'inden az ise süspansiyon stabildir.(Hakansson,1992).

Stokes kanununa göre, karışım sıvısındaki granüler partiküller, partikül çapının karesi ile orantılı olarak, yerçekiminin etkisi altında, hıza bağlı olarak çökeler yani önce iri partiküller ardından küçük partiküller çöker. Partikül boyutunun küçülmesi ile sedimentasyon yoğunluğu da azaltılmaktadır (Nonveiler, 1989).

Sedimentasyon deneyleri ASTM C940 standardına göre yapılmıştır:

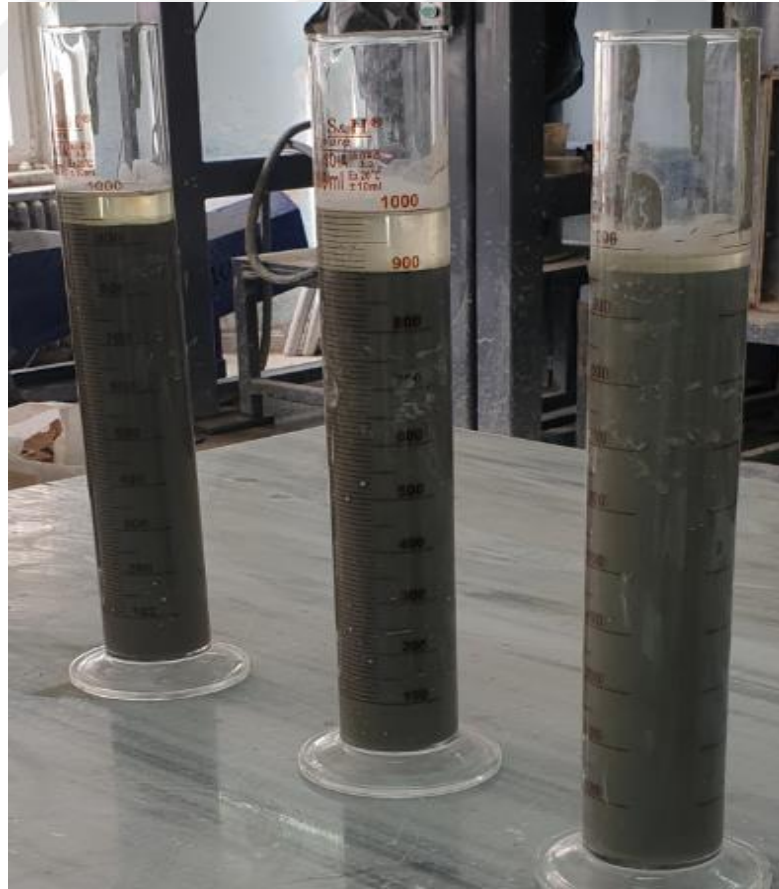
- Deney, $23.0 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki ortamda yapılır.
- Enjeksiyon sıvısı hazırladıktan sonra 1000 mL'lik dereceli mezür içine doldurulur.
- Okumanın yapıldığı ilk zaman kaydedilir.
- İlk bir saatte 15 dakikalık aralıklarla ve ikinci saatte 10 dakikalık aralıklarla seviyelerin okuması yapılır ve kaydedilir.
- Sedimentasyon yüzdesi $\frac{V_w}{V_1} \times 100$ formülü ile hesaplanır.

Formülde;

V_1 : Deneyin başlangıcında numunenin hacmi (ml)

V_w : Sediment olan su hacmi (ml)

Bu tez çalışması kapsamında; farklı oranlarda portland çimentosu ve YFC karışımları için toplam 35 adet sedimentasyon deneyi yapılmıştır (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. Sedimentasyon deneyi

3.4. DDK Numuneleri Üzerinde Yapılan Laboratuvar Deneyleri

3.4.1. Tek eksenli (serbest basınç) deneyi

Deneyel tasarımın her bir aşamasında, kür sürelerinin sonunda zemin numuneleri üzerindeki serbest basınç mukavemeti deneyleri ASTM D4832–16, ASTM D2166/D2166M-16 standartlarına göre yapılmıştır.

Tez çalışması aşamasındaki Serbest basınç deneyleri Konya Teknik Üniversitesi Laboratuvarındaki serbest basınç deney aleti ile yapılmış olup; aletin çalışma prensibi, yukarı yönde hareket eden ve iki plaka arasına yerleştirilen örneği, alttaki plakanın yukarıya doğru hareket etmesiyle numuneye basınç uygulayarak çalışmaktadır. Serbest basınç mukavemeti deneyleri ASTM D4832–16, ASTM D2166/D2166M-16 standartlarına uygun şekilde yapılmıştır (Şekil 3.14.).

Deney, 100 mm boyunda ve 50 mm çapındaki numuneler deney cihazındaki iki plaka ortasına yerleştirilir, makine çalıştırılarak fazla yük almadan üst levhanın numune ile temas etmesi sağlanır. Cihazın yükleme hızı, numune boyunun % 0.5-2 ‘si arasında ve numunenin 15-20 dak. arasında kırılmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Yükleme hızı 0.5 mm/dak. olarak seçilmiştir. Yükleme silindir numune kırılana kadar devam edilir. Yükleme devam ederken yük–deformasyon verileri 0.1mm deformasyon aralığında bilgisayara kayıt edilmiştir. Numunenin kırıldığı andaki maksimum değer numunenin en kesit alanına bölünerek serbest basınç mukavemeti hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 = q_u = P_{\max} / A_f \quad (3.4)$$

$$A_f = A_o / (1 - \epsilon) \quad (3.5)$$

$$\epsilon = \Delta H / H_o \quad (3.6)$$

P_{\max} : Kırılma anındaki maksimum yük değeri

H_o : Numunenin ilk boyu (mm)

ΔH : Deformasyon okuması (mm)

ϵ : Numunenin eksenel birim deformasyon değeri (%)

A_o : Numunenin ilk en kesit alanı

A_f : Numunenin kırılma anındaki en kesit alanı

σ_1 : Serbest basınç mukavemeti değeri (kPa)



Şekil 3.14. Serbest basınç deneyi

3.4.2. Permeabilite deneyi

İyileştirilmiş zemin örneklerinin geçirimsizlikleri çok küçük olduğundan ($k < 10^{-13}$ cm/s) düşük seviyeli permeabilite deneyi yerine, permeabilite deneyleri ASTM D5084-10 standardına göre, üç eksenli deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.15.).

Deney numunelerinin boyutları, suyun drenaj yolunu kısaltmak için 3 cm yüksekliğinde ve 5 cm çapında olacak şekilde hazırlanarak üç eksenli deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Suya doymun numune elde etmek için numuneler deneyden en az üç gün önce suda bekletilmiştir.

Deney aletine yerleştirilen numunelere, hücre basıncı 500 kPa verilmiş, zemin içerisinden 400 kPa geri basıncı verilerek birim zamanda geçirilen suyun miktarı ölçölmüş ve Darcy Yasasına göre permeabilite katsayısı hesaplanmıştır.

$$k_{(cm/s)} = \frac{Q_{(cm^3)}}{t_{(s)}} \times \frac{1}{A_{(cm^2)}} \times \frac{L_{(cm)}}{\Delta h_{(cm)}} \quad (3.7)$$

$$\Delta h = \frac{\sigma_{(kPa)} \cdot 1000}{\rho \cdot g} \quad (3.8)$$

Formöllerdeki;

Q = Numune kesitinden geçen su miktarı (cm³)

A = Numune kesit alanı (cm²)

t = Numuneden su çıkışına izin verilen süre (s)

L = Numunenin boyu (cm)

Δh = Geri basıncı yüksekliği (cm)



şekil 3.15. Üç eksenli basıncı deney düzeneğinde permeabilite deneyi

3.4.3. Yarmada çekme (STS) deneyi

Numuneler, TS 3129 ve ASTM C496 standartlarına uygun olarak imal edilmiş yarmada çekme aparatının plakları arasına yerleştirilir. Deney için serbest basınç deney aleti kullanılmıştır. Numunenin tam olarak ekseninden geçecek şekilde yerleştirilen plaklar serbest basınç deney düzeneğinde kırılmaya kadar basınç uygulanır. Serbest basınç deney aletinin yükleme hızı 0.5 mm/dak. olarak belirlenmiştir. Yükleme silindiri numune kırılana kadar devam edilir (Şekil 3.16).

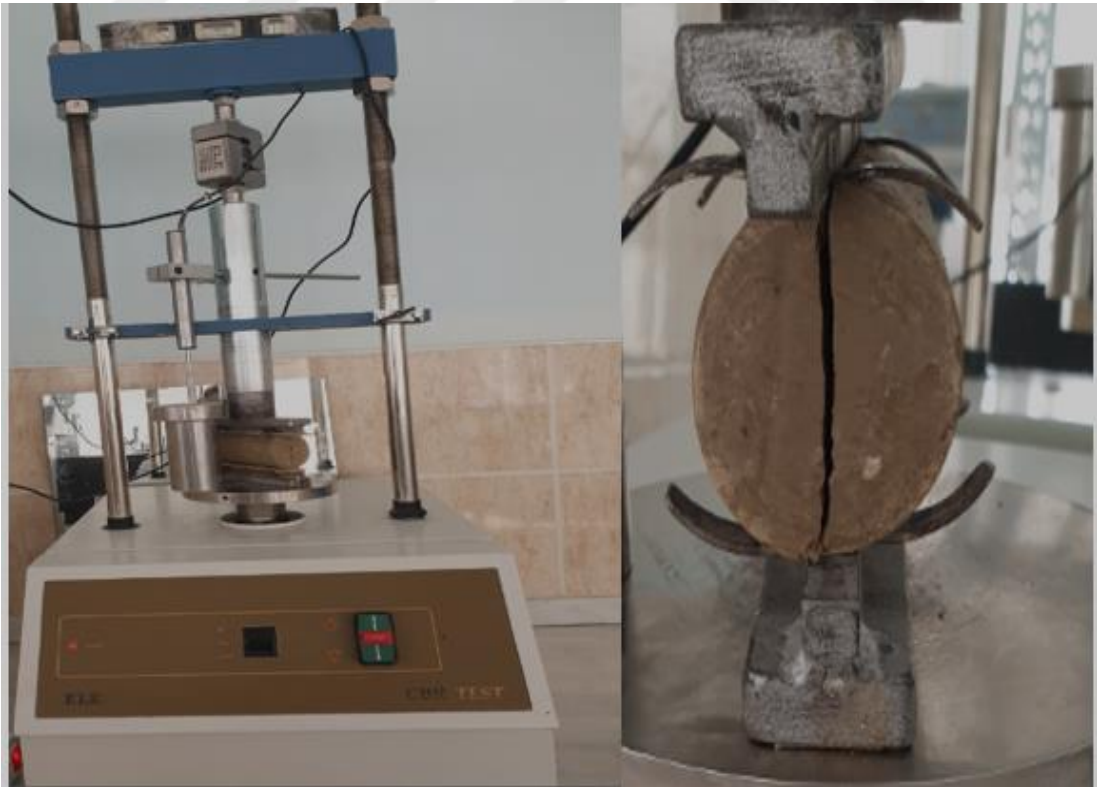
Deney sonunda numuneler ortadan ikiye bölünür, bu ikiye bölündüğü andaki uygulanan yük, maksimum yüküdür. Yarmada çekme dayanımı;

$$\sigma_{\text{çekme}} = 2P / \pi LD \quad (3.9)$$

P: Kırılma anındaki basınç yükü (N)

L: Numunenin boyu (mm)

D: Numunenin çapı



Şekil 3.16. Yarmada çekme (STS) deneyi

3.5. SEM Analizi

Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) analizinde; örnek yüzeyini odaklanmış elektron demeti ile tarayarak görüntüler elde edilen bir mikroskop aletidir. Elektronlar örneklerin içermiş olduğu atomlar ile etkileşimde bulunarak örnek yüzeyindeki kompozisyon ve topografi hakkında bilgiler veren sinyaller üretir.

Bu çalışma kapsamında SEM analizleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde yaptırılmıştır. SEM analizinde 28 günlük küre maruz kalmış numuneler seçilmiştir. SEM analizlerinde, serbest basınç deneyi, yarmada çekme deneyi ve permeabilite deney sonuçları incelenmiş ve tüm durumları temsil edecek şekilde %20 oranındaki portland çimentosuna %0, %20, %35, %50 oranlarında YFC ikameli (tasarım 6, tasarım 8, tasarım 9, tasarım 10) ve saf kil olmak üzere 5 tasarım seçilmiştir.

Analiz yapılacak olan numuneler 24 saat boyunca etüvde kurutulmuş ve boyutları 1 cm geçmeyecek şekilde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler küçük poşetlere yerleştirilerek analiz için SEM analiz birimine teslim edilmiştir. Her numune için 150X, 500X, 1000X, 5000X, 10000X ve 20000X büyütme oranıyla incelenmiştir.

3.6. XRD Analizi

X-Işınları analizi, bir maddenin karakteristiği olan kırınım desenine dayanmaktadır. X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, aynı mertebedeki dalga boyuna sahip X-ışını dalgalarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır.

X-ışını kırınımı, ince taneli zemin minerallerinin tanımlanması ve kristal yapılarının incelenmesi için kullanılan en yaygın yöntemdir. X-ışınları kırınım yöntemi, çimentonun, çimento ve YFC ile iyileştirilen kilde tepkime sonucu oluşan bileşikleri ve jellerin incelenmesinde kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında XRD analizleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde, BRUKER D8 ADVANCE X-Işını Difraktometresi cihazında yaptırılmıştır. %20 oranındaki portland çimentosuna %20, %35 oranlarında YFC ikameli (tasarım 8, tasarım 9) olan 2 tasarım seçilmiştir. 28 gün kür edilmiş numuneler seçilmiştir.

3.7. Küçük Ölçekli DKK Numunelerinin Hazırlanması ve Deneysel Tasarımı

Çimento ve YFC'nin reolojik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar sonucunda, enjeksiyon karışımları için optimum su/bağlayıcı (W/C) oranı belirlenmiştir. Çalışmalarda; enjeksiyon karışımları W/C=1.0 oranında olacak şekilde hazırlanmıştır. Küçük ölçekli model örnekleri hazırlarken kullanılacak olan zeminin su muhtevası killi zemin için bulunan plastik limit - likit limit değerleri arasındaki su muhtevasında olacak şekilde %27 olarak belirlenmiştir. Bu su muhtevasında hazırlanan killi zemin içerisinde W/C=1.0 oranlarında hazırlanan enjeksiyon karışımları ilave edilmiş ve karıştırılmıştır.

Plastik limit - likit limit değerleri arasındaki su muhtevasında zemin hazırlamak için, bir miktar zemin elenmiştir. Elenen zemin, bir gün boyunca 60 °C de etüvde kurutulmuş olan kuru zemine % 27 su muhtevasında olacak şekilde su ilave edilmiştir.

Karışımların hazırlanmasında kullanılacak çimento yüzdesi, kuru kilin ağırlıkça yüzdesi (%) olarak 2 farklı oran (%15, %20) olarak seçilmiştir. Bu her iki orana da ayrıca çimentonun kuru ağırlıkça yüzdesi (%) olarak 5 farklı oranda (%0, %10, %20, %35, %50) yüksek fırın cürufu ikame olarak eklenmiştir.

Küçük ölçekli oluşturulacak olan derin karıştırma kolonu numunelerinin homojen olarak karıştırılması ve boşluksuz bir şekilde kalıba doldurulması gerekmektedir. Uygulamadaki bazı standartlar ve daha önceki çalışmalar dikkate alınarak numune hazırlanırken karışım dakikada 120-300 devirle hareket eden bir mikser ile 5-10 dakika karıştırılmış, minimum boyutları 5 cm çapında ve 10 cm boyunda olan PVC kalıplara doldurulmuştur. Kalıpların iç yüzeyi gres yağı ile yağlanmıştır.

Hazırlanan karışımlar kalıplara üç tabaka şeklinde yerleştirilmiş, hava boşluklarının boşaltılmasını sağlamak için her tabaka 15 kez sıkıştırılmıştır. Tüm karışımlar biraz sertleşene kadar açık havada bekletilmiş, daha sonra poşetlenerek belirli bir su miktarı içeren plastik kaplar içinde yerleştirilip 7, 28 ve 56 gün kür süresine bırakılmıştır.

10 farklı oran için hazırlanan numunelerden kür süresinin, yüksek fırın cürufu ve çimento performansı üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla 3 farklı kür süresi için (7 gün, 28 gün ve 56 gün) deneysel numuneler hazırlanmıştır.

Çizelge 3.10.'da oluşturulan deney programına göre her bir tasarım için zemin ve enjeksiyon malzemesi mikserle karıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen karışımlar UCS ve yarmada çekme deneyleri için 5 cm çapında ve 10 cm boyunda, geçirimlilik

deneyleri için 5 cm çapında ve 3 cm boyundaki PVC kalıplara dökülmüştür. Her bir tasarımdan, 28 ve 56 günlük kür süreleri için 2 adet serbest basınç deneyi, 1 adet geçirimsizlik ve 2 adet yarmada çekme deneyi, 7 günlük kür süresi için 2 adet serbest basınç deneyi ve 2 adet yarmada çekme deneyi için numuneler hazırlanmıştır. Kür süreleri sonunda numune çıkarıcı ile çıkarılan örnekler üzerinde gerekli deneyler yapılmıştır. Tüm tasarımlar ve kür süreleri dikkate alındığında 60 adet serbest basınç deneyi, 20 adet permeabilite deneyi ve 60 adet yarmada çekme deneyi numunesi (toplamda 140 numune) hazırlanmıştır (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Küçük ölçekli deney numuneleri

Çizelge 3.10. Küçük ölçekli DKK numuneleri için deneysel tasarım programı

Tasarım	Çimento Oranları (%)	YFC Oranları (Çimentonun %'si)	Kür Süresi (Gün)	Toplam Deneysel Numune Sayısı
1		0	7	14
			28	
			56	
2	15	10	7	14
			28	
			56	
3	15	20	7	14
			28	
			56	
4		35	7	14
			28	
			56	
5		50	7	14
			28	
			56	
6		0	7	14
			28	
			56	
7	20	10	7	14
			28	
			56	
8	20	20	7	14
			28	
			56	
9		35	7	14
			28	
			56	
10		50	7	14
			28	
			56	

3.8. Büyük Ölçekli DKK Hazırlanması ve Deneysel Tasarımı

Araziden temin edilmiş olan killi zeminin doğal su muhtevası ölçülmüş, daha sonra zemin, 60 cm çapında ve 90 cm yüksekliğindeki varile, iki tabaka olarak iki aşamada yerleştirilmiştir. Varile yerleştirilen zeminin her tabakası su ile karıştırılarak % 27 su muhtevasında hazırlanmıştır. Hazırlanan zemin daha kararlı hale gelmesi için iki gün bekletilmiştir. İki gün sonra varilde kolon yapımına başlanmıştır. İlk önce deney için daha önce hesaplanan çimento, YFC ve W/C oranı 1.0 olacak şekilde enjeksiyon hazırlama tankında hazırlanmıştır. Hazırlanan enjeksiyon zemine 10 bar sabit basınçla gönderilmiş ve aynı anda karıştırma bıçağı zemini karıştırarak 30 cm çapında 60 cm yüksekliğinde kolon oluşturulmuştur. DKK oluşturulurken bıçak zeminde 10 defa

tarama yapmıştır (Şekil 3.18.). Bu tarama sayısı seçilirken arazide kullanılan DKK bıçaklarının şekli ve tarama sayısı dikkate alınarak bir değer belirlenmiştir. İmal edilen kolonların üstü poşetle kapatılarak 28 gün küre bırakılmıştır.

Bu yöntemle toplamda 4 adet DKK oluşturulmuştur. Bu DKK oluşturulurken küçük ölçekli numunelere yapılan deney sonuçları değerlendirilmiş ve %20 çimento oranında ve %0, %20, %35, %50 oranlarında YFC ikameli (tasarım 6, tasarım 8, tasarım 9, tasarım 10) tasarımlar seçilmiştir.

Kür süresi bittikten sonra oluşturulan kolonlardan dayanım ve geçirimsizlik özelliklerini araştırmak nedeniyle serbest basınç deneyi, yarmada çekme deneyi ve geçirimsizlik deneyleri için kolonların farklı bölgelerden karot makinesi ile karot numuneleri alınmıştır (Şekil 3.19.).



Şekil 3.18. Büyük ölçekli DKK imalatı



Şekil 3.19. Büyük ölçekli numunelerden karot alınması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Reolojik Özellik Deneyleri

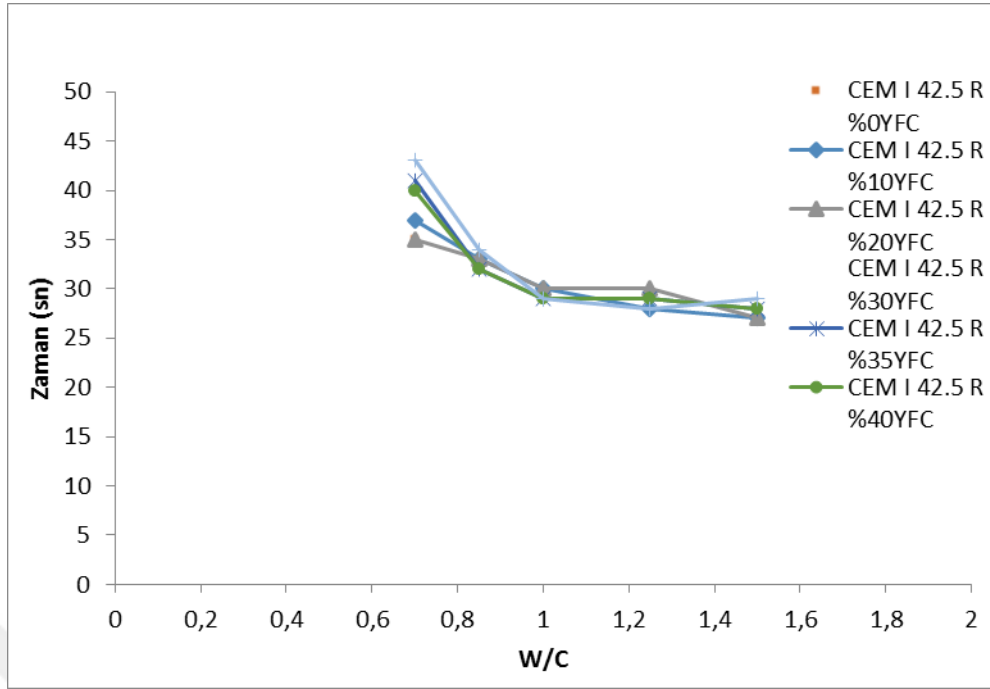
4.1.1. Marsh hunisi deneyleri

Bu tez çalışması kapsamında Normal portland çimento (CEM I 42.5 R) tipine farklı oranlarda YFC ikamesi yapılarak toplamda 35 adet Marsh hunisi deneyi yapılmış olup su /çimento oranlarına göre karışımların Marsh hunisinden akması için geçen zaman kronometre ile belirlenmiştir.

Şekil 4.1. ve Çizelge 4.1. incelendiğinde, aynı W/C oranlarında CEM I 42.5 R çimentosu en düşük akışkanlık süresine sahiptir. W/C=0.7 oranında en düşük akış süresine CEM I 42.5 R (%0 YFC ikame) sahip olup akış süresi 35 sn olarak belirlenmiştir. Yine aynı W/C =0.7 oranında %10 YFC ikame karışımı, akış süresi 37 sn olup, W/C =0.7 oranında %50 YFC ikame karışımı akış süresi 43sn'dir. Bu durum W/C=0.7 oranında CEM I 42.5 R çimentosuna, YFC ikame oranı arttıkça akma süresinin arttığı, akışkanlığın ise azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni ise, CEM I 42.5 R çimentosunun tane büyüklüğünün YFC'ye göre daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. %30 YFC ikamesinde; W/C =0.85 oranında akış süresi 32 sn iken W/C=1.5 oranında akış süresi 28 sn olduğu bu da W/C oranı arttıkça akışkanlığın arttığını göstermektedir. Genel olarak W/C oranı arttıkça akışkanlık artmaktadır. Özellikle, W/C=0.85 oranından sonraki W/C (1, 1.25, 1,5) oranlarda, %40 YFC ikamesi akış süreleri sırasıyla 29 sn, 29 sn, 28 sn olarak kaydedilmiş olup bu değerlerin birbirine yakın olduğu ve diğer ikame oranlarında da bu durum gözlenmiştir.

Çizelge 4.1. Marsh hunisi deney sonuçları

W/C (SU/BAĞLAYICI)	CEM I	CEM I	CEM I	CEM I	CEM I	CEM I	CEM I
	42.5 R	42.5 R	42.5 R	42.5 R	42.5 R	42.5 R	42.5 R
	%0YFC	%10YFC	%20YFC	%30YFC	%35YFC	%40YFC	%50YFC
ZAMAN (S)							
0,7	35	37	35	40	41	40	43
0,85	32	33	33	32	32	32	34
1	29	30	30	30	29	29	29
1,25	28	28	30	29	29	29	28
1,5	28	27	27	28	28	28	29



Şekil 4.1. Marsh hunisi deney sonuçları

4.1.2. Sedimentasyon deneyleri

Tez çalışmasında, Normal portland çimento (CEM I 42.5 R) tipine farklı oranlarda YFC ikamesi yapılarak toplamda 30 adet sedimentasyon deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.2. - 4.8. sedimentasyon deneyi sonuçları verilmiştir.

CEM I 42.5 R çimentosu %0 YFC, W/C=0.7 değerinde sedimentasyon yüzdesi 5'ten küçük olduğu için stabildir. CEM I 42.5 R çimentosu - %40 YFC ikameli hazırlanan karışımın, diğer oranlardaki ikameli karışımlara göre daha kararlı olduğu görülmüştür. W/C oranı arttıkça stabilitenin azaldığı görülmektedir.

Farklı oranlardaki YFC ikamelerinin sedimentasyon karşılaştırılması Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. CEM I 42.5 R (% 0 YFC) için sedimantasyon deney sonuçları

CEM I 42.5 R % 0 YFC					
W/C oranı	0,7	0,85	1	1,25	1,5
Zaman (dak)	Sedimantasyon Yüzdesi (%)				
0	0	0	0	0	0
15	1	1	3	3	4
30	1,5	1,5	4	4	8
45	3	3	6	6	13
60	3,5	3,5	8	8	17
70	4,5	4,5	10	10	21
80	5,5	5,5	11	11	25
90	7	7	13	13	31
100	9	9	15,05	15,05	36
110	10,5	10,5	18,05	18,05	42
120	13	13	21	21	45

Çizelge 4.3. CEM I 42.5 R - % 10 YFC için sedimantasyon deney sonuçları

CEM I 42.5 R % 10 YFC					
W/C oranı	0,7	0,85	1	1,25	1,5
Zaman (dak)	Sedimantasyon Yüzdesi (%)				
0	0	0	0	0	0
15	1	1	2,05	3	3
30	2	2	4,05	6	6
45	3	3	6	8	9
60	4	4	7,05	11	13
70	4,5	4,5	9	13	16
80	5,5	5,5	10,05	16	20
90	7	7	12,05	19	26
100	9	9	15	23	30
110	10,5	10,5	18	26	36
120	13	13	19,5	30	40

Çizelge 4.4. CEM I 42.5 R - %20 YFC için sedimantasyon deney sonuçları

CEM I 42.5 R %20 YFC					
W/C oranı	0,7	0,85	1	1,25	1,5
Zaman (dak)	Sedimantasyon Yüzdesi (%)				
0	0	0	0	0	0
15	3	3	2,05	2	4
30	4	4,5	5	5,7	8
45	6	6	6,5	6,5	11
60	8	8	8,5	8,5	13
70	9	9	9	10	16
80	10	11	11	12	20
90	13	13	13,5	16	24
100	17	17	18	18,5	25
110	18	18	18,5	20	25,5
120	19	19	19,2	21	26,4

Çizelge 4.5. CEM I 42.5 R- %30 YFC için sedimantasyon deney sonuçları

CEM I 42.5 R %30 YFC					
W/C oranı	0,7	0,85	1	1,25	1,5
Zaman (dak)	Sedimantasyon Yüzdesi (%)				
0	0	0	0	0	0
15	2	1,5	2	2,5	3
30	2,1	2,5	4	4,2	6
45	3	3,5	6	7	9
60	3,5	4,5	7	7,5	12,05
70	4	5,5	9	10	15
80	5	6,5	10,05	12	18
90	6	7,5	12,03	15	21
100	8	9	15	17,05	27
110	11	11	17	21	31
120	14	12	19,02	25	35

Çizelge 4.6. CEM I 42.5 R- %40 YFC için sedimentasyon deney sonuçları

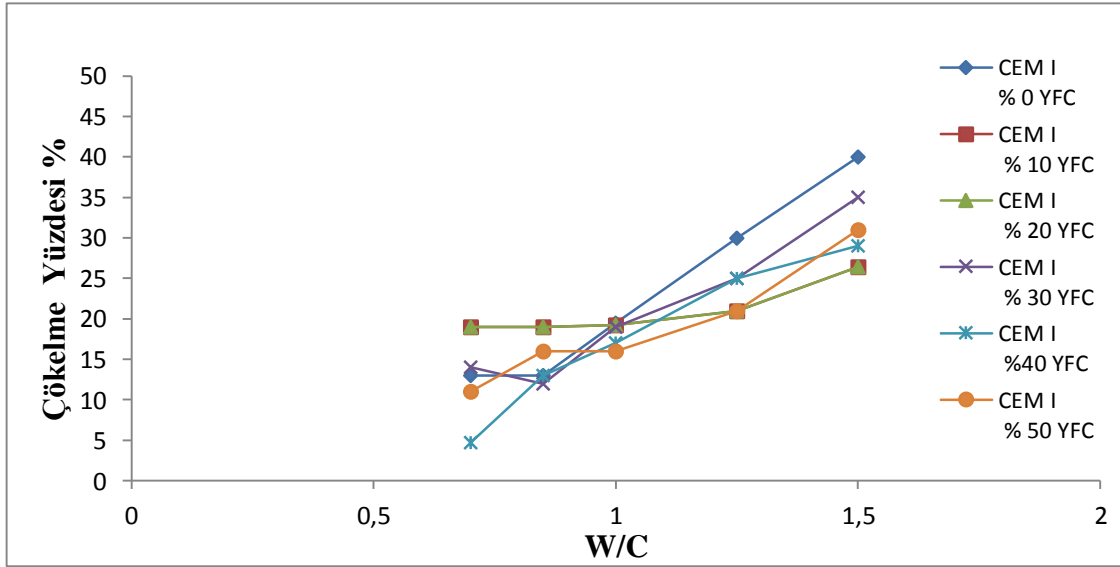
CEM I 42.5 R %40 YFC					
W/C oranı	0,7	0,85	1	1,25	1,5
Zaman (dak)	Sedimentasyon Yüzdesi (%)				
0	0	0	0	0	0
15	0,5	1	2	2	2
30	1	2,5	2,5	4	4
45	1,3	3	5	6	7
60	1,6	4	6	7	10
70	2	5	8	8	12
80	2,3	6	9	12	15
90	3	8	11	15	18
100	3,5	10	13	17	22
110	3,8	11,5	15	20,05	25
120	4,7	13	17	25	29

Çizelge 4.7. CEM I 42.5 R - %50 YFC için sedimentasyon deney sonuçları

CEM I 42.5 R %50 YFC					
W/C oranı	0,7	0,85	1	1,25	1,5
Zaman (dak.)	Sedimentasyon Yüzdesi (%)				
0	0	0	0	0	0
15	1	1	1	2,05	6
30	1,5	1,5	1,5	4	8
45	2	2	2	6	11
60	2,5	3	3	6,5	12
70	4	3,5	3,5	9	15
80	5	4,5	4,5	12	18
90	8	7	7	14	21
100	9	10	10	16	25
110	10	14	14	18	27
120	11	16	16	21	31

Çizelge 4.8. Sedimentasyon deney sonuçları

Sedimentasyon Yüzdesi (%)						
W/C oranı	CEM I % 0 YFC	CEM I % 10 YFC	CEM I % 20 YFC	CEM I % 30 YFC	CEM I %40 YFC	CEM I %50YFC
0,7	13	13	19	14	4,7	11
0,85	13	13	19	12	13	16
1	21	19,5	19,2	19,02	17	16
1,25	21	30	21	25	25	21
1,5	45	40	26,4	35	29	31



Şekil.4.2. Farklı oranlardaki YFC ikameli enjeksiyon karışımların sedimentasyon yüzdelерinin karşılaştırılması

4.2. Küçük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları

4.2.1. Serbest basınç deney sonuçları

Tez çalışması kapsamında; Çizelge 3.10.'daki üç farklı kür sürelerinde (7, 28, 56 gün), %15 ve %20 oranlarında çimento ilavesine, 5 farklı oranda (%0, %10, %20, %35, %50) yüksek fırın cürufu ikamesi yapılarak hazırlanan deney programında toplamda 60 adet serbest basınç deneyi yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan kil çok yumuşak olduğu için serbest basınç deneyi yapılamamıştır. Bundan dolayı; %27 su muhtevastaki killi zemine; Vane kanatlı sonda deneyi yapılmış ve zeminin kohezyonu $c=13.5$ kPa olarak hesaplanmıştır.

Çalışmadaki deney sonuçları Çizelge 4.9. – 4.10.'da gösterilmiştir. Farklı oranlardaki CEM I çimentosuna ve çimentoya farklı oranlarda ikame edilmiş YFC için üretilen küçük ölçekli DDK numunelerine uygulanmış deney sonuçlarının kıyaslanması ve değerlendirilmesi Şekil 4.3. ve Şekil 4.5.'de grafiklerle yapılmıştır.

Şekil 4.4.a.'da % 15 oranındaki CEM I çimentosuna ikame olarak ilave edilen farklı yüzde oranlarındaki (%0, % 10, %20, %35, %50) YFC'nin dayanıma etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.4.b.'de % 20 oranındaki CEM I çimentosuna ikame olarak ilave edilen farklı yüzde oranlarındaki YFC'nin dayanıma etkisi gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Serbest basınç deneyi sonuçları, (%15 oranında) CEM I

%15 CEM I 42.5 R ilave q_u (kPa)									
YFC miktarı (%)	7. gün			28. gün			56. gün		
	1	2	q_{u-ort}	1	2	q_{u-ort}	1	2	q_{u-ort}
0	1062	1238	1150	2010	1960	1985	1947	2257	2102
10	1053	1199	1126	1749	2013	1881	2443	2751	2597
20	916	890	903	2294	1958	2126	2415	2813	2614
35	803	953	878	3028	2670	2849	3804	2700	3252
50	835	1003	919	2720	3060	2890	2782	3770	3276

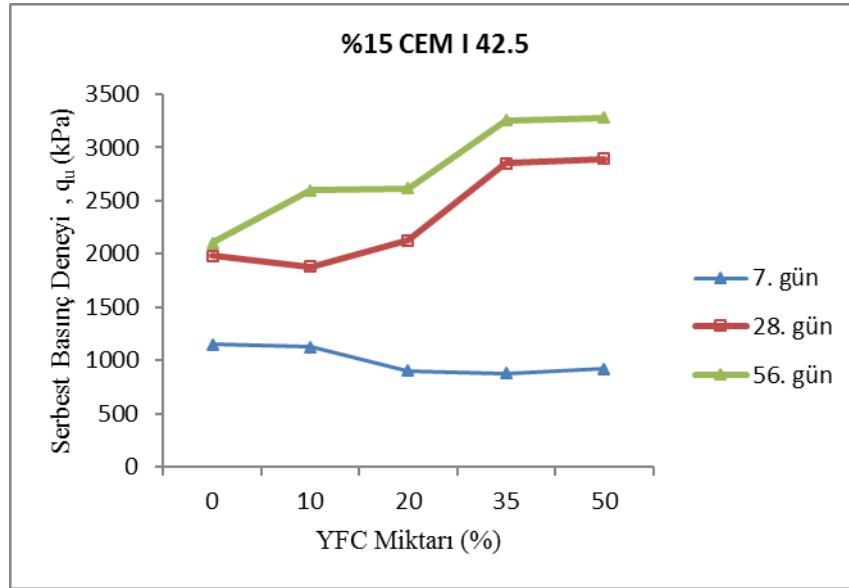
Çizelge 4.10. Serbest basınç deneyi sonuçları, (%20 oranında) CEM I

%20 CEM I 42.5 R ilave q_u (kPa)									
YFC miktarı (%)	7. gün			28. gün			56. gün		
	1	2	q_{u-ort}	1	2	q_{u-ort}	1	2	q_{u-ort}
0	1971	1527	1749	2508	2566	2537	3005	2767	2886
10	1998	2116	2057	3209	3193	3201	3380	3226	3303
20	1852	1932	1892	3204	3207	3205,5	3483	3573	3528
35	1634	1654	1644	3176	3278	3227	3201	4149	3675
50	1384	1170	1277	4638	5024	4831	5014	4864	4939

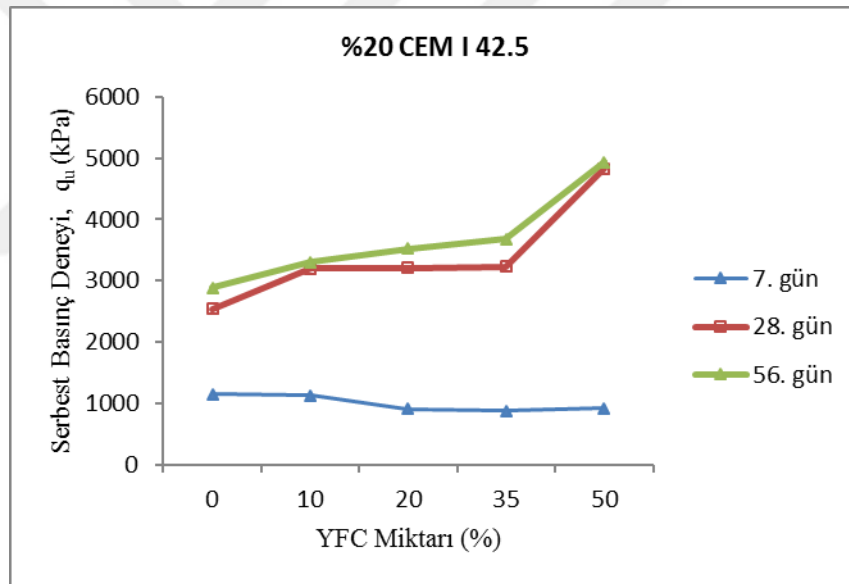
Derin karıştırma kolonlarının performansına, çimentonun türü, miktarı, karışımın içerisine katılan puzzolan türü, miktarı ve kür süreleri gibi faktörler etkili olmaktadır.

Kuru kil ağırlığına %15, %20 oranlarında çimento ilave edilerek hazırlanan numunelerin, bağlayıcı (çimento, YFC) dozajları sırasıyla, 143.5 kg/m^3 , 179.5 kg/m^3 'tür. Lorenzo ve Bergado (2004) tarafından yapılan çalışmada, bağlayıcı madde miktarına bağlı olarak UCS değerlerinde büyük artışların olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 4.9.'da % 15 CEM I - %0 YFC ikameli derin karıştırma kolonu numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda mukavemetleri sırasıyla 1150 kPa, 1985 kPa ve 2102 kPa olup mukavemetlerinde sırasıyla %73 ve %83 oranında artış görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 4.3. Farklı oranlarda CEM I çimentosuna, farklı oranlardaki YFC ikamesinin serbest basınç deneyi değerleri üzerindeki etkisi; (a) CEM I - %15YFC, (b) CEM I - %20YFC

Çizelge 4.10. ve Şekil 4.3-b'de % 20 CEM I - %0 YFC ikameli derin karıştırma kolonu numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda mukavemetleri sırasıyla 1749 kPa, 2537 kPa ve 2886 kPa olup mukavemetlerinde %45 ve %65 oranında artış görülmüştür.

% 15 CEM I - %0 YFC ve % 20 CEM I - %0 YFC ikameli derin karıştırma kolonu numunelerinin 28 günlük kür süreleri sonunda mukavemetleri sırasıyla; 1985kPa ve 2566 kPa'dır. %5 oranındaki CEM I çimento ilavesi %29 oranında mukavemet artışına neden olmuştur. Bu durum genel olarak çimento oranı arttıkça dayanımın arttığını göstermektedir.

Çizelge 4.10. ve Şekil 4.3-b'de % 20 CEM I - %10 YFC ikamesinde; 7 günlük kür sonunda kolonların mukavemeti 2057 kPa, 28 günlük kür sonunda 3201 kPa ve 56 günlük kür sonunda 3303 kPa olduğu görülmüş ve sırasıyla, %56 ve %61 oranında mukavemetlerinde artış gözlenmiştir.

%20 CEM I - %50 YFC ikameli numunelerin 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda DKK mukavemetleri 1277 kPa, 4831 kPa ve 4939 kPa olup mukavemet oranlarındaki artış miktarı sırasıyla %278 ve %286'dır. Çimento içerisine ikame olarak ilave edilen YFC'deki yüzde oranı arttıkça DKK mukavemetinde de artış olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.9. ve Şekil 4.3-a'da %15 CEM I çimentosuna sırasıyla %0, %10, %20, %35 ve %50 YFC ikamelerinin 7 günlük kür süreleri sonunda mukavemetleri sırasıyla 1150 kPa, 1126 kPa, 903 kPa, 878 kPa, 919 kPa'dır. 7 günlük kür süresi sonunda en yüksek mukavemetin CEM I - %0 YFC ikameli DKK numunelerinde görüldüğü, diğer numunelerde ise YFC ikame oranı arttıkça, mukavemette bir azalma görülmüştür. CEM I çimentosu içeriğinde trikalsiyum silikat (C_3S) bileşenine sahip olduğundan dolayı erken dayanım kazanmaktadır.

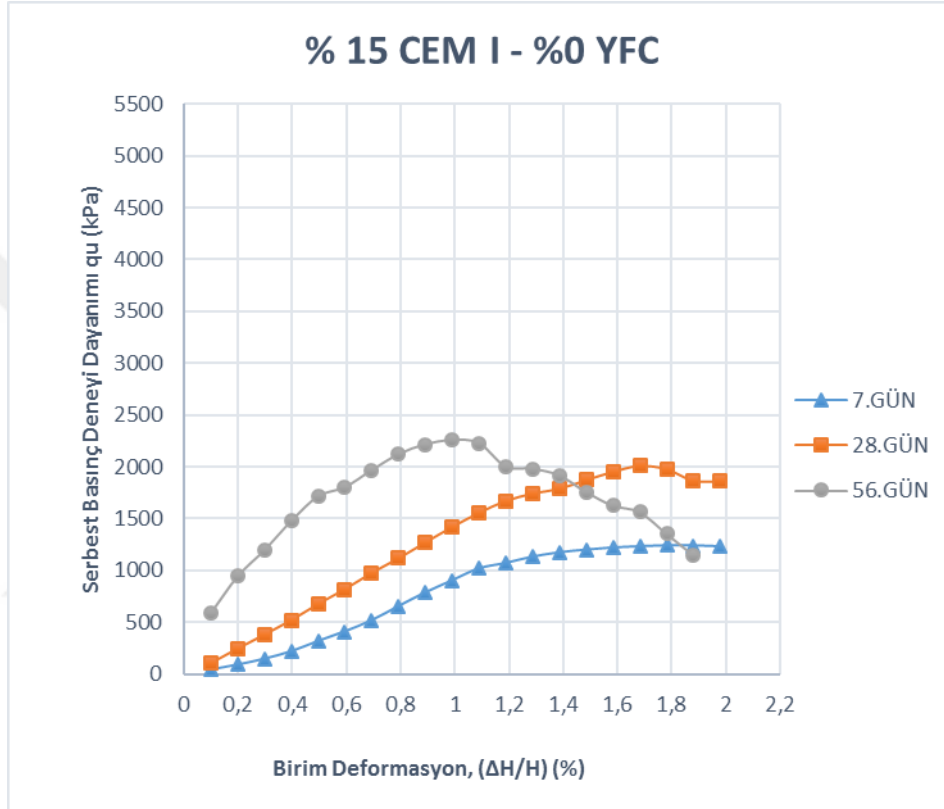
Beton içerisinde ikameli olarak kullanılan YFC'nin su /bağlayıcı oranına bağlı olmaksızın YFC içeren betonların 7 günlük basınç dayanımları her zaman için kontrol betonuna göre daha düşüktür (Ernandez ve Malhotra, 1990).

Çizelge 4.10. ve Şekil 4.3-b'de %20 CEM I çimentosuna sırasıyla %0, %10, %20, %35 ve %50 YFC ikamelerinin 56 günlük kür süreleri sonunda mukavemetleri sırasıyla; 2886 kPa, 3303 kPa, 3528 kPa, 3675 kPa, 4939 kPa'dır. 56 günlük kür süresi sonunda en yüksek mukavemetin CEM I - %50 YFC ikameli DKK numunelerinde görülmüştür. 56 günlük kür sonunda YFC ikame oranı arttıkça dayanım da artmaktadır.

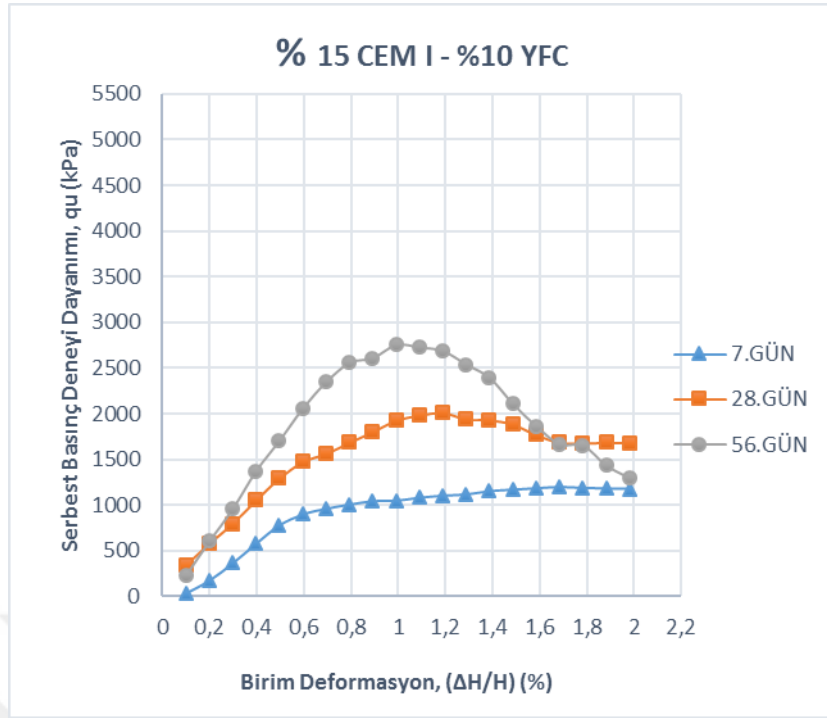
Genel olarak, kür süresi arttıkça YFC ikameli DKK dayanımlarının arttığı görülmüştür. Çimento içerisine ilave edilen puzzolanlar, çimento ile hidratasyonu sonucunda C-H jelleriyle reaksiyona girmekte ve yeni C-S-H jelleri oluşmaktadır. Puzzolanik maddeler dayanımlarını geç kazandırmaktadır. YFC' da bir puzzolan olduğu için 56 günlük DDK dayanımları yüksek çıkmıştır.

Brooks ve ark. (1992), YFC'nin erken yaştaki mukavemetinin artan oranlardaki YFC ikamesi ile birlikte düştüğünü fakat uzun dönemdeki mukavemetin ise normal Portland çimentolu betona eşit veya daha fazla olduğunu belirtmiştir.

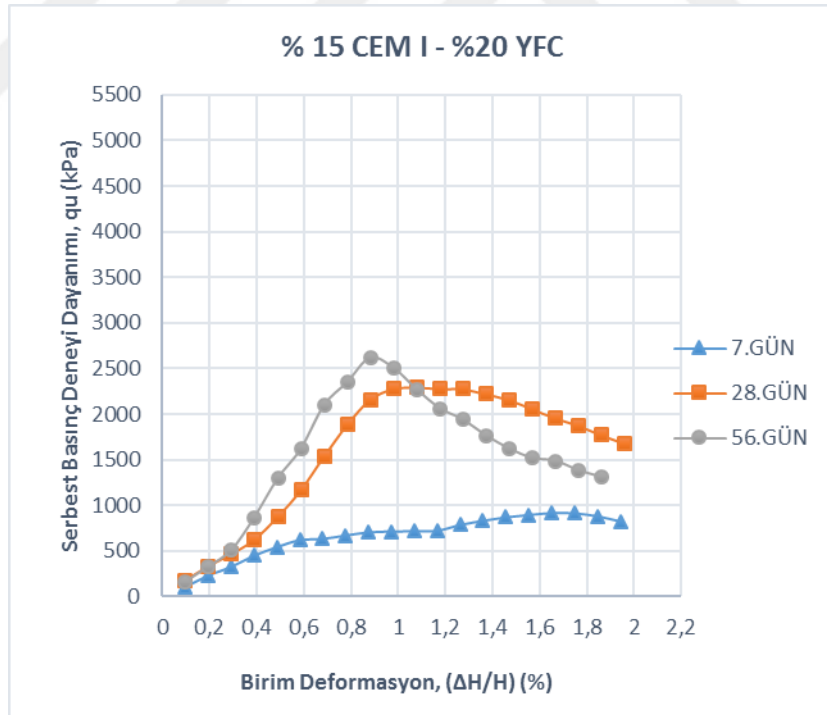
Yüksek fırın cürufu içeren betonların dayanımını, kontrol betonlarıyla karşılaştırıldığında, kür şartlarına hassas olduğu ve YFC' li betonların daha iyi kür edilmesi gerektiğini bildirmiştir (Bilim, 2006).



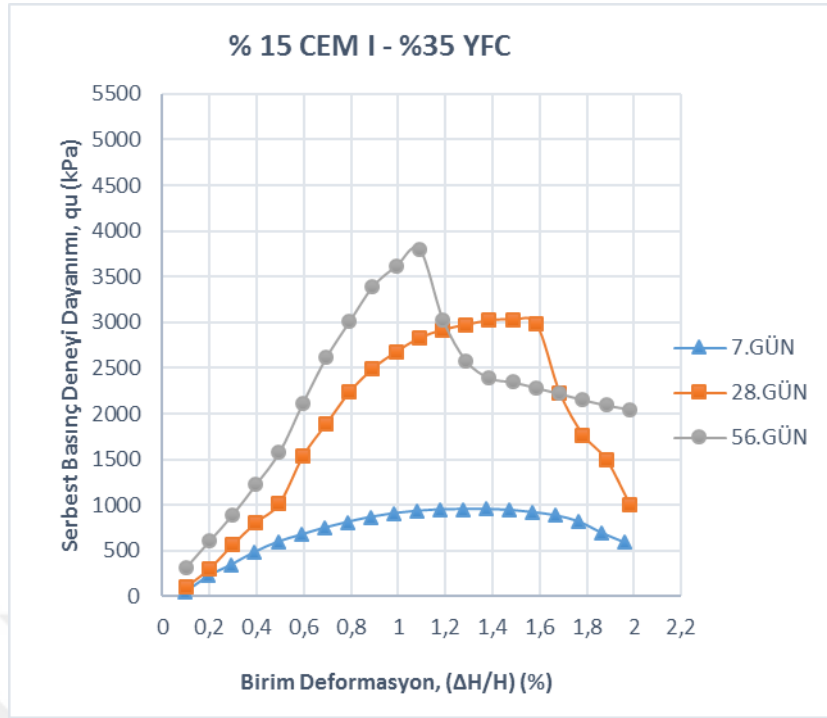
(a)



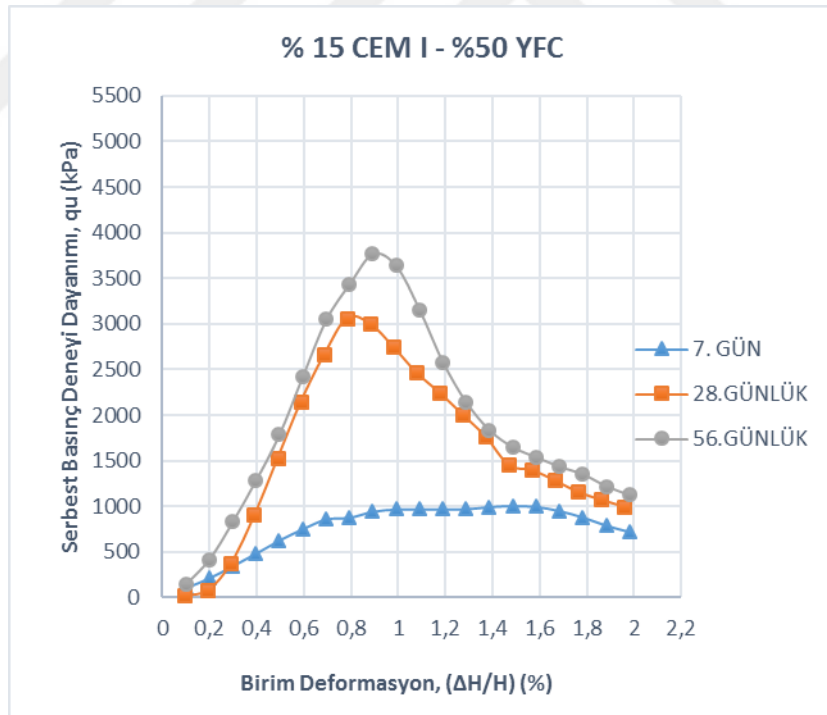
(b)



(c)

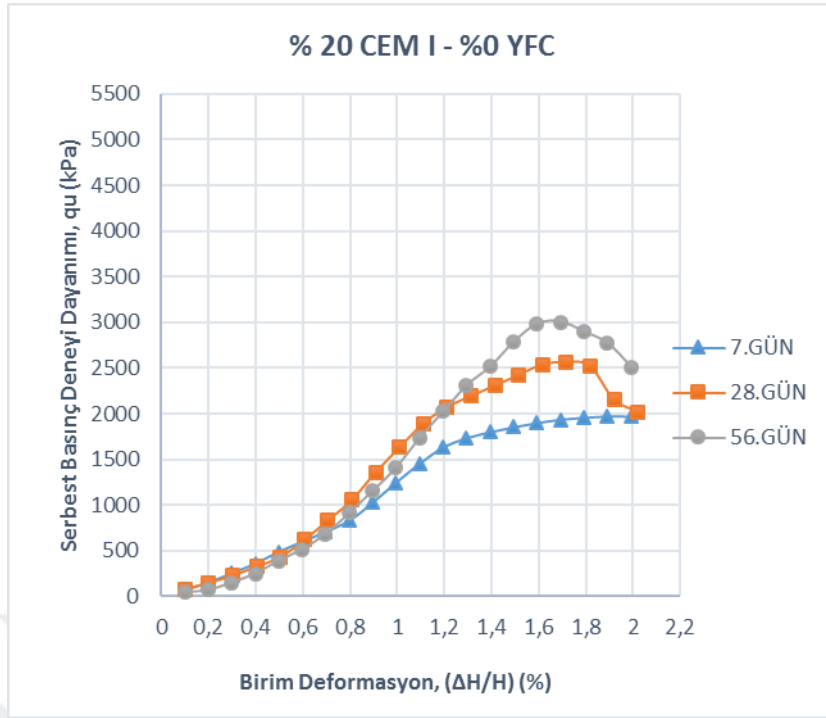


(d)

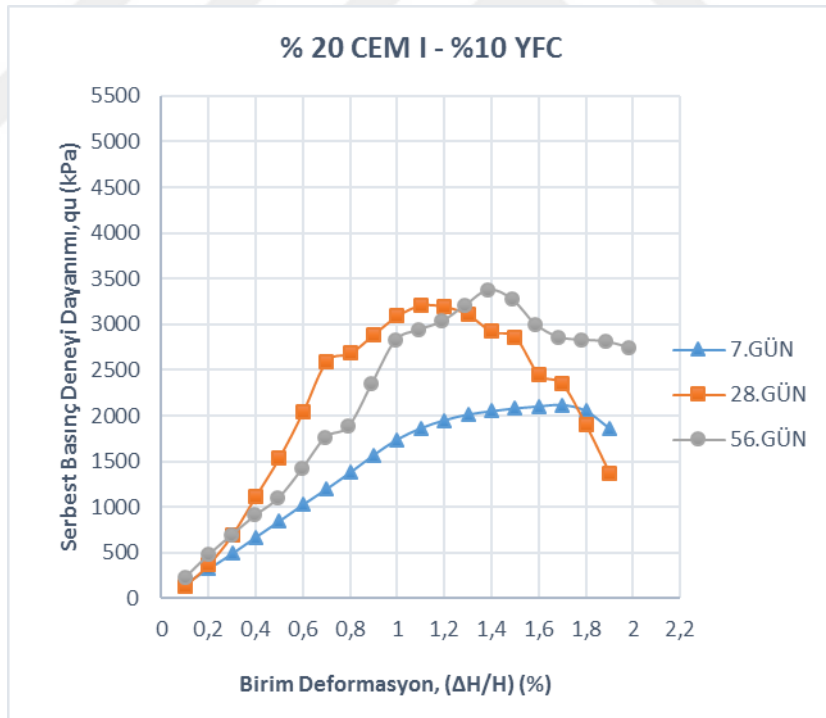


(e)

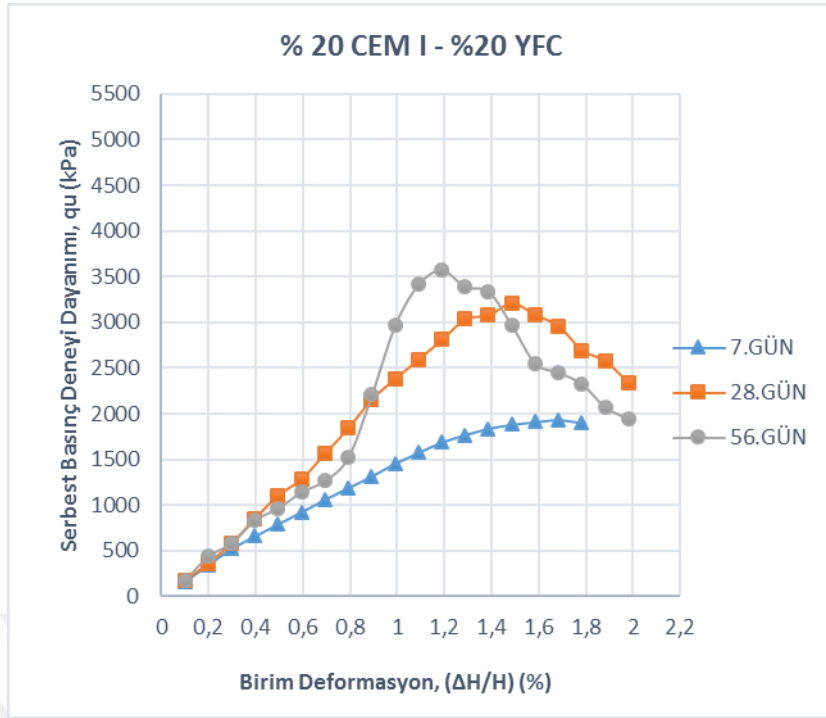
Şekil 4.4. %15 oranındaki CEM I çimentosuna farklı oranlardaki YFC ikamesinin UCS sonuçlarına kür süresinin etkisi



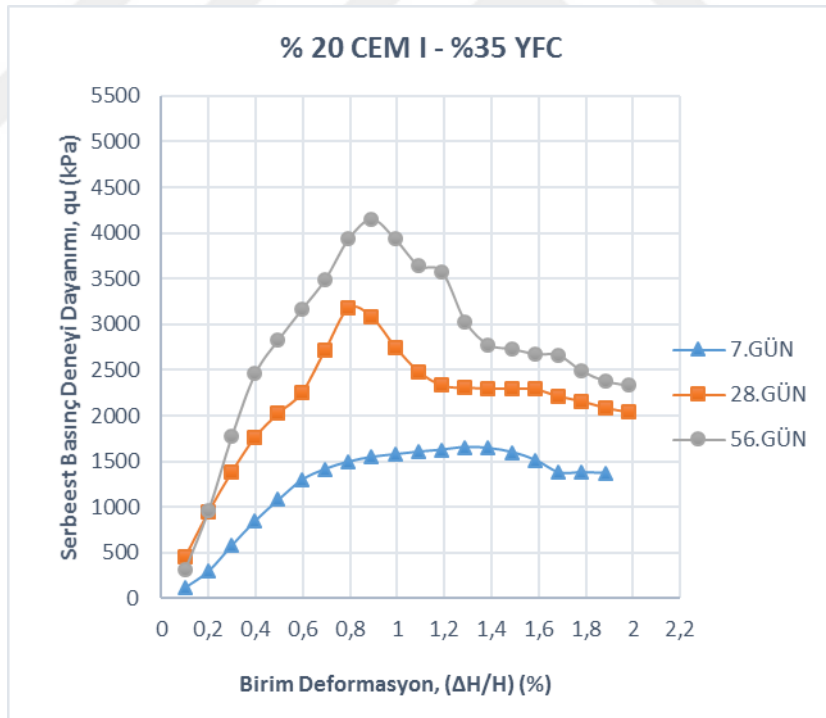
(f)



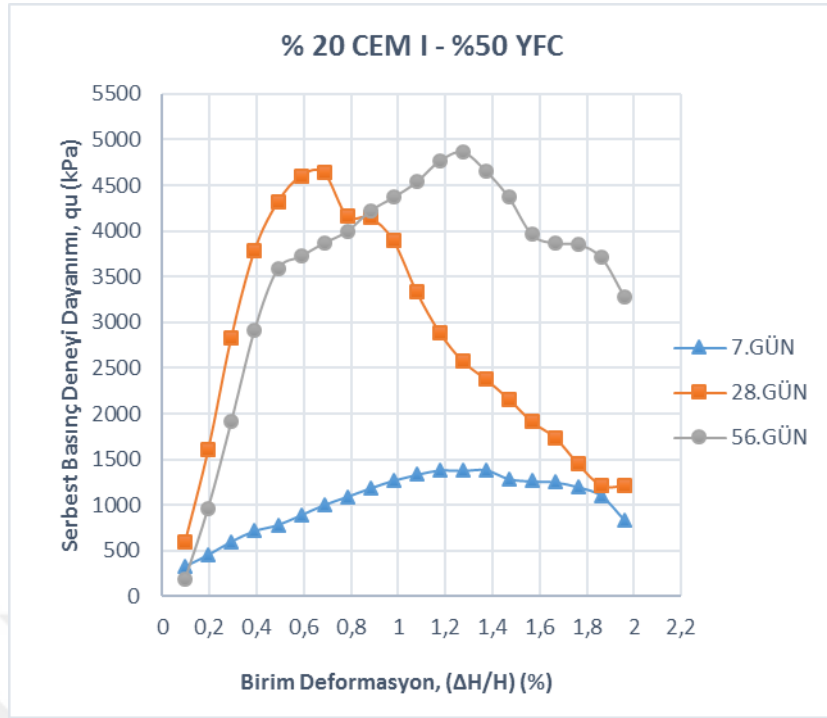
(g)



(h)



(i)



(j)

Şekil 4.5. %20 oranındaki CEM I çimentosuna farklı oranlardaki YFC ikamesinin UCS sonuçlarına kür süresinin etkisi

Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.' da iki farklı orandaki çimento miktarına farklı oranlarda YFC ikameleri kullanılarak imal edilmiş, küçük ölçekli DKK numunelerinin 7, 28, 56 günlük kür süreleri sonunda gerilme- birim deformasyon eğrileri verilmiştir.

Kür sürelerine göre numunelerin gerilme- birim deformasyon davranışları değişiklik göstermektedir. Kür süresi arttıkça, eğrinin pik noktası daha belirginleşmekte ve kırılma anındaki aksenal birim deformasyon daha az olmaktadır (Nguyen, 2016).

Şekil 4.5'da %20 CEM I %20 YFC ikameli hazırlanmış derin karıştırma kolonlarının 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonrasındaki gerilme-birim deformasyon eğrisi verilmiştir. Sırasıyla kırılma anındaki gerilme-birim deformasyon değerleri sırasıyla; 1932 kPa - %1.6, 3207 kPa - %1.4, 3573 kPa - %1.2'dir. 7 günlük kür sonundaki numunede en sünek kırılma görülürken; 56 günlük kür sonundaki numunede en gevrek kırılma olmakta ve pik noktası belirgin olmaktadır.

YFC ikame oranı arttıkça pik değerleri daha belirginleşmektedir. %20 CEM I - %50 YFC ikameli numune 28 günlük kür sonunda UCS değeri 4638 kPa iken $\varepsilon = \%0.7$ 'dir. 7 günlük kür sonunda UCS değeri 1384 kPa iken $\varepsilon = \%1.2$ 'dir.

4.2.2. Permeabilite deneyi

Tez çalışmasında, küçük ölçekli deney numuneleri üzerinde toplam 20 adet permeabilite deneyi yapılmıştır. Deneyler, üç eksenli basınç deney aletinde gerçekleştirilmiştir.

Numuneler; deneyden 3 gün önce su içerisinde bırakılarak numunelerin tamamen suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır.

Çizelge 4. 11.' de 28 ve 56 günlük kür süreleri için permeabilite deney sonuçları verilmiştir.

Geçirimsizlik katsayıları numune içerisindeki çimento miktarı, YFC oranı ve kür süresine göre değişiklik göstermektedir.

28 günlük küre maruz bırakılmış %15 CEM I - %50 YFC ve %20 CEM I - %50 YFC ikameli derin karıştırma kolonları permeabilite katsayısı en küçük olan numunelerdir. %15 CEM I - %50 YFC ve %20 CEM I - %50 YFC ikameli numunelerin, permeabilite katsayısı sırasıyla $1.61 \times 10^{-10} \text{cm/sn}$ ve $2.66 \times 10^{-10} \text{cm/sn}$ 'dir.

Çizelge 4.11. DKK numunelerinin permeabilite deney sonuçları

CEM I miktarı (%)	YFC Miktarı miktarı (%)	Permeabilite katsayısı $k (\times 10^{-10} \text{cm/sn})$	
		28. gün	56. gün
15	0	9,17	3,63
15	10	2,71	0,539
15	20	2,1	0,485
15	35	2,02	0,176
15	50	1,61	0,157
20	0	7,01	1,49
20	10	3,82	0,565
20	20	5,88	0,483
20	35	5,17	0,454
20	50	2,66	0,255

28 günlük küre maruz bırakılmış numuneler arasında permeabilite katsayısı en büyük olan numune; %15 CEM I - %0 YFC ikameli numune olup permeabilite katsayısı $9,17 \times 10^{-10} \text{cm/sn}$ 'dir. Çimentoya %50 YFC ikame edilmesiyle geçirimsizlik katsayısı 5.7 kat azaltmıştır. Bu sonuçlar DKK içerisinde ikame edilen YFC 'nin geçirimsizliği

arttırdığını göstermektedir. CEM I çimentosu bünyesinde yüksek miktarda C₂S olduğu için kür süresi boyunca jel oluşumu devam etmektedir. %15 CEM I - %0 YFC ve %20 CEM I - %0 YFC ikameli numunelerin geçirgenliği saf kil numune geçirimsizliğine göre azalmaktadır. Fakat bu numunelerin geçirgenlikleri diğer YFC ikameli numunelere daha fazladır.

Normal Portland çimentolu betonlar öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içerikli betonlarla kıyaslandığında daha fazla toplam boşluk hacmi ve boşluklara sahiptir. Cüruf katkılı betonlar ise daha küçük çapta boşluklara sahiptir ve artan cüruf miktarı ile birlikte toplam boşluk hacmi azalmaktadır (Nakamura ve ark., 1992).

Farklı YFC içerikli numuneler şeklinde hazırlanmış olan DKK numunelerinin hepsinde kür süresi arttıkça geçirimsizlik katsayıları azalmıştır. %20 CEM I - %0 YFC ikamesiyle hazırlanmış olan numunelerde 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, geçirimsizlik kat sayıları sırasıyla 7.01×10^{-10} cm/sn, 1.49×10^{-10} cm/sn şeklindedir. Buna göre; kür süresi 28 günden 56 güne arttıkça geçirimsizlik katsayısının 4.7 kat azaldığı görülmüştür. %15 CEM I - %35 YFC ikamesiyle hazırlanmış olan numunelerde 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, geçirimsizlik kat sayıları sırasıyla 2.02×10^{-10} cm/sn, 0.176×10^{-10} cm/sn şeklindedir. Buna göre; kür süresi 28 günden 56 güne arttıkça geçirimsizlik katsayısının 11.5 kat azaldığı görülmüştür.

YFC katkılı çimentolarda, kür süresi arttıkça hidrasyon reaksiyonu hızlanmakta ve pozzolanik reaksiyonun hızlanması ile oluşan jel miktarları artmakta, numunelerin geçirgenliği azalmaktadır. Kür süresi uzadıkça geçirgenliğin azalmasının nedeni, C-A-S-H ve C-S-H jellerinin kil parçacıklarının arasındaki gözenek büyüklüğündeki azalma ile ilişkilidir (Chew ve ark., 2004).

4.2.3. Yarmada çekme (STS) deneyi

Tez çalışmasında; Çizelge 3.10.'daki üç farklı kür sürelerinde (7, 28, 56 gün), %15 ve %20 oranlarındaki CEM I ilavesine, 5 farklı oranda (%0, %10, %20, %35, %50) yüksek fırın cürufu ikamesi yapılarak hazırlanan deney programında toplamda 60 adet yarmada çekme deneyi yapılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 4.12. ve Çizelge 4.13'de gösterilmiştir.

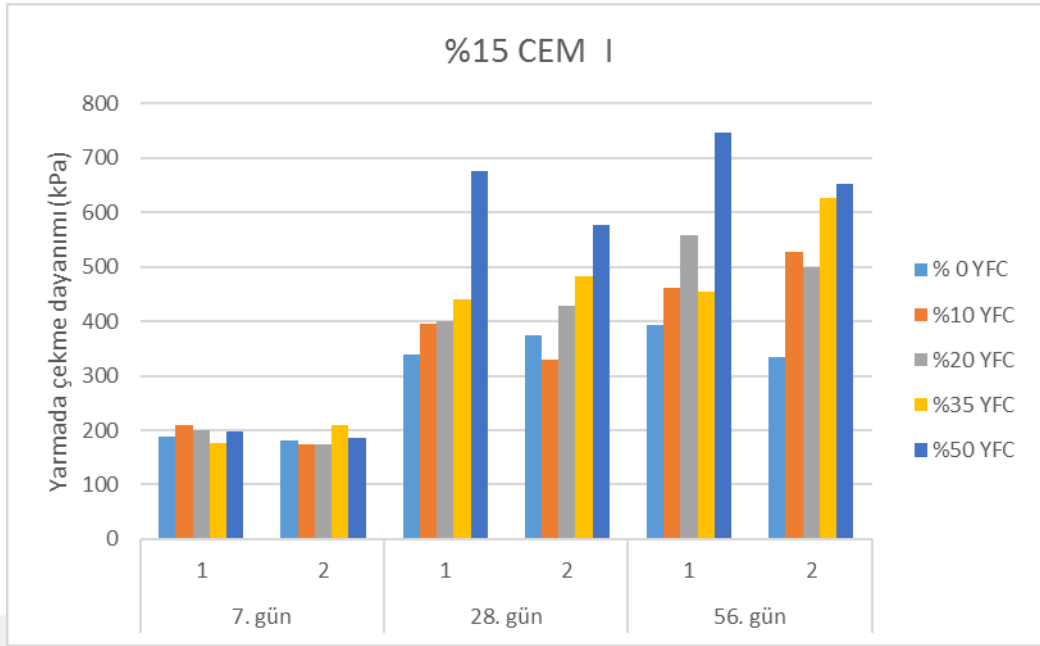
Çizelge 4.12. %15 CEM I ilaveli DKK numunelerinin yarmada çekme deney sonuçları

%15 CEM I 42.5 R ilave $\sigma_{çekme}$ (kPa)									
YFC miktarı (%)	7. gün			28. gün			56. gün		
	1	2	$\sigma_{çekme}$ ort	1	2	$\sigma_{çekme}$ ort	1	2	$\sigma_{çekme}$ ort
0	188	180	184	340	375	357,5	392	335	363,5
10	209	175	192	396	329	362,5	461	527	494
20	200	173	186,5	401	428	414,5	558	500	529
35	176	210	193	440	483	461,5	455	627	541
50	198	186	192	676	576	626	747	653	700

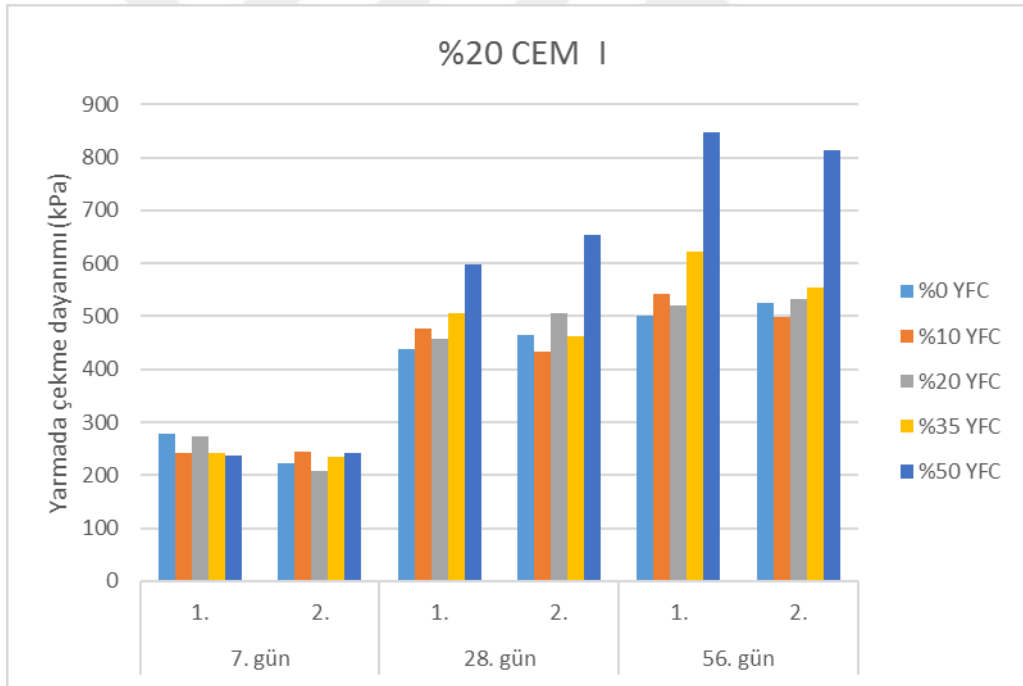
Çizelge 4.13. %20 CEM I ilaveli DKK numunelerinin yarmada çekme deney sonuçları

%20 CEM I 42.5 R ilave $\sigma_{çekme}$ (kPa)									
YFC miktarı (%)	7. gün			28. gün			56. gün		
	1.	2.	$\sigma_{çekme}$ ort	1.	2.	$\sigma_{çekme}$ ort	1.	2.	$\sigma_{çekme}$ ort
0	277	223	250	439	465	452	502	525	513,5
10	243	245	244	478	433	455,5	542	498	520
20	273	207	240	457	507	482	520	532	526
35	243	234	238,5	505	463	484	623	554	588,5
50	238	242	240	598	654	626	847	813	830

Şekil 4.6'da numunelerin 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda yarmada çekme gerilmeleri gösterilmiştir.



(a)



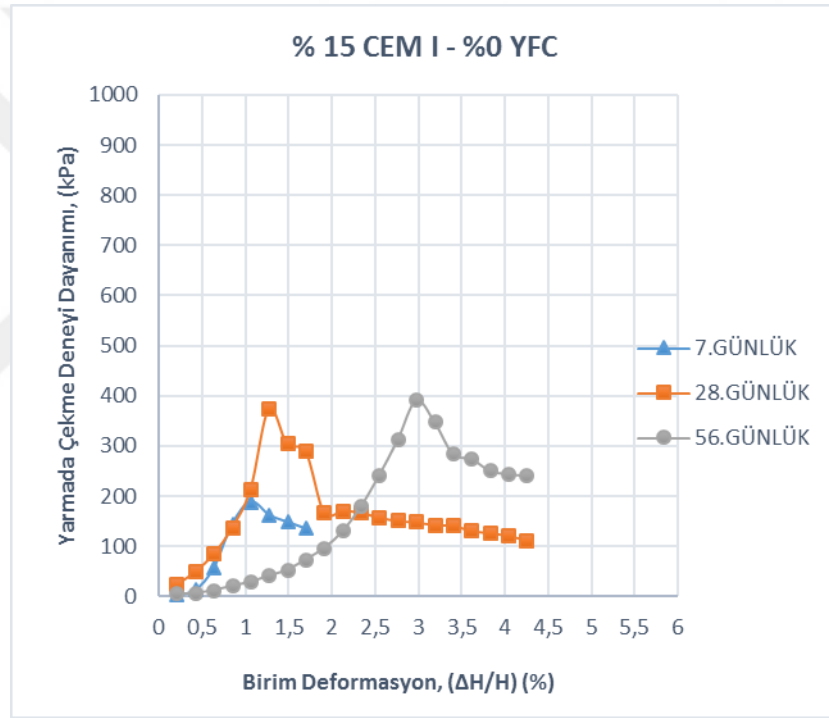
(b)

Şekil 4.6. % 15 CEM I ve % 20 CEM I için farklı oranlardaki YFC ikameli DKK numunelerinin yarmada çekme deney sonuçları

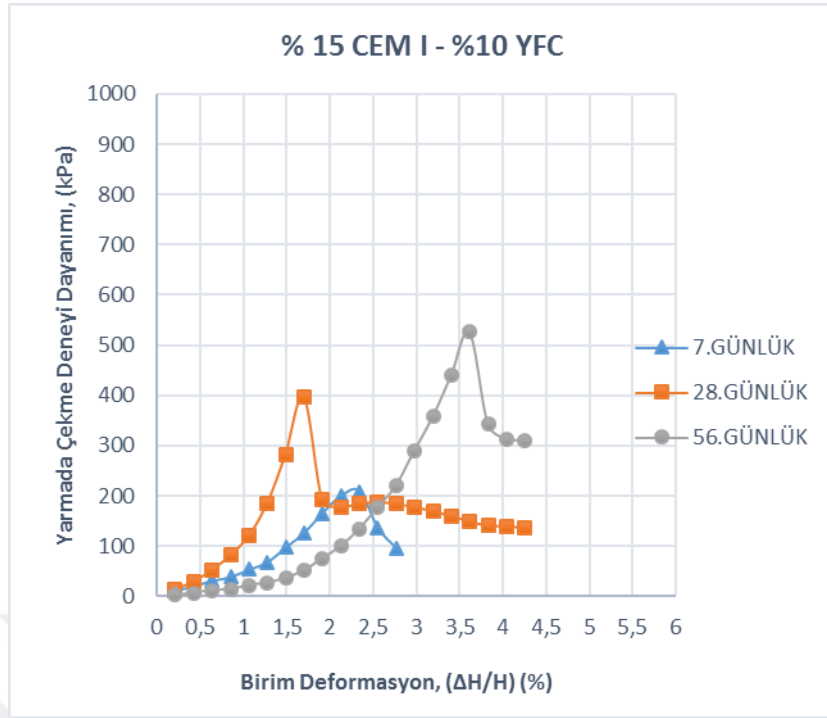
Farklı oranlardaki YFC ikamesinde oran arttıkça çekme gerilmesi miktarında da artışlar görülmektedir. Çizelge 4.12. ve Çizelge 4.13.'e göre 56 günlük küre maruz numunelerde en yüksek çekme dayanımı %20 CEM I - %50 YFC ikameli numunede

görülmekte olup çekme dayanımı 847 kPa'dır. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.6-a'da 28 günlük kürde %15 CEM I - %0 YFC ve %15 CEM I - %50 YFC ikameli numunelerde çekme dayanımı sırasıyla 375 kPa ve 576 kPa'dır. YFC ikameli numunelerin çekme dayanımlarında artış olduğu görülmektedir.

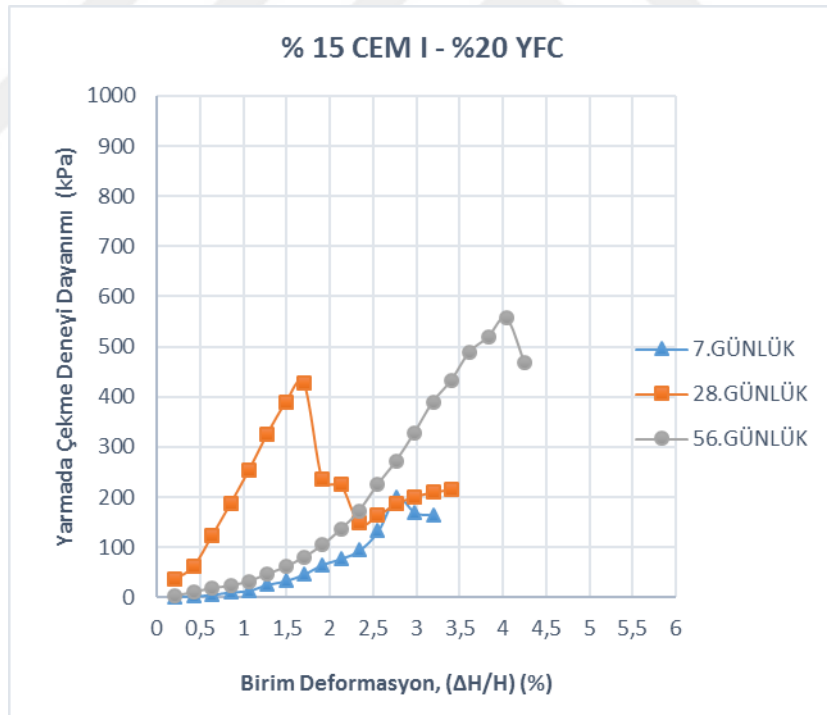
Şekil 4.7.'de iki farklı orandaki çimento miktarına (%15 ve %20) farklı oranlarda YFC ikame edilerek imal edilmiş, küçük ölçekli DKK numunelerinin 7, 28, 56 günlük kür süreleri sonunda yarmada çekme dayanımı – birim deformasyon grafikleri verilmiştir. Her bir YFC ikame oranı için iki adet numuneye deney uygulanmıştır. Fakat sonuçların kısa tutulması için her ikame oranı için çalışılan bir numuneye ait grafik - birim deformasyon eğrisi çizilmiştir.



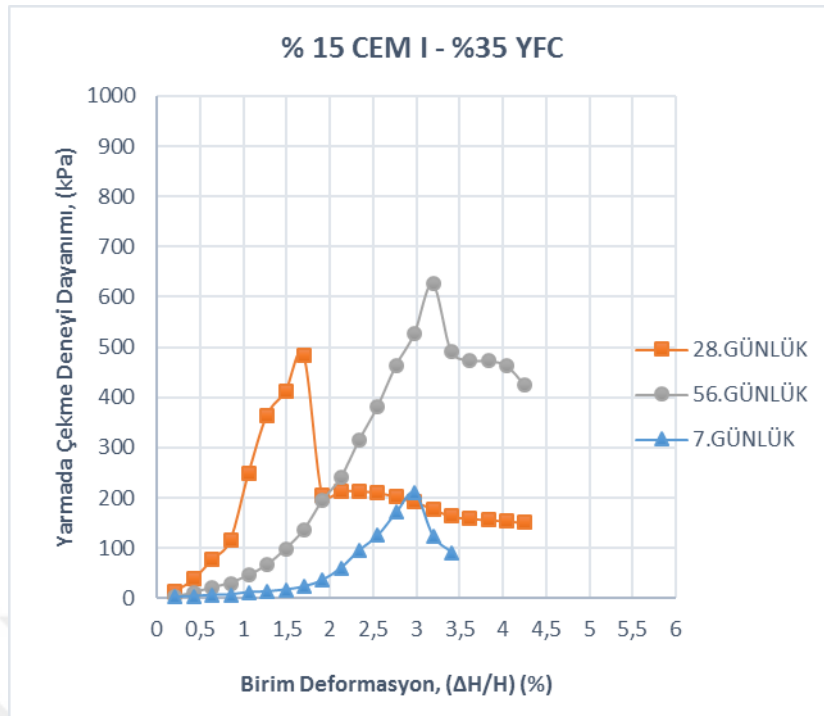
(a)



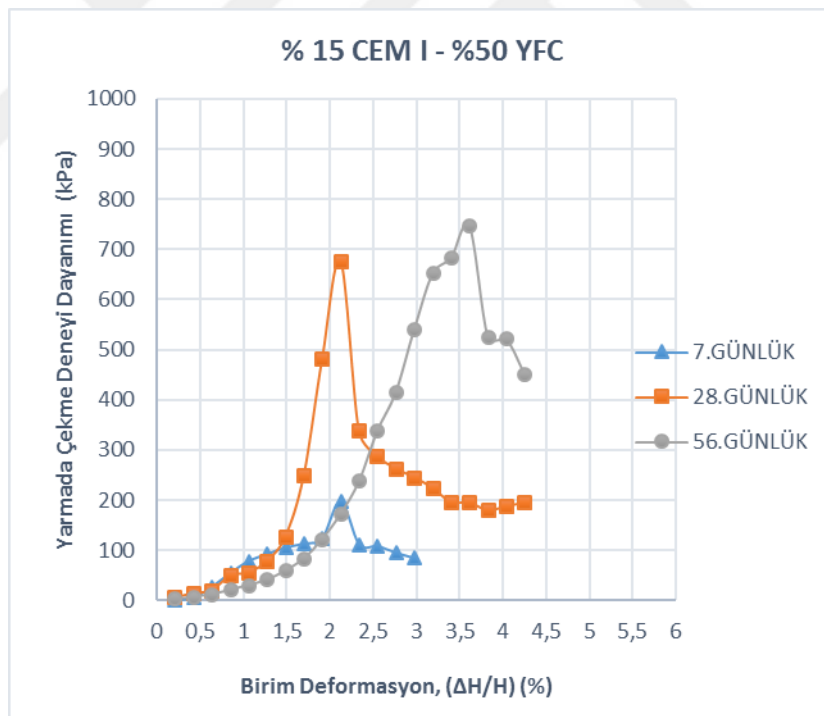
(b)



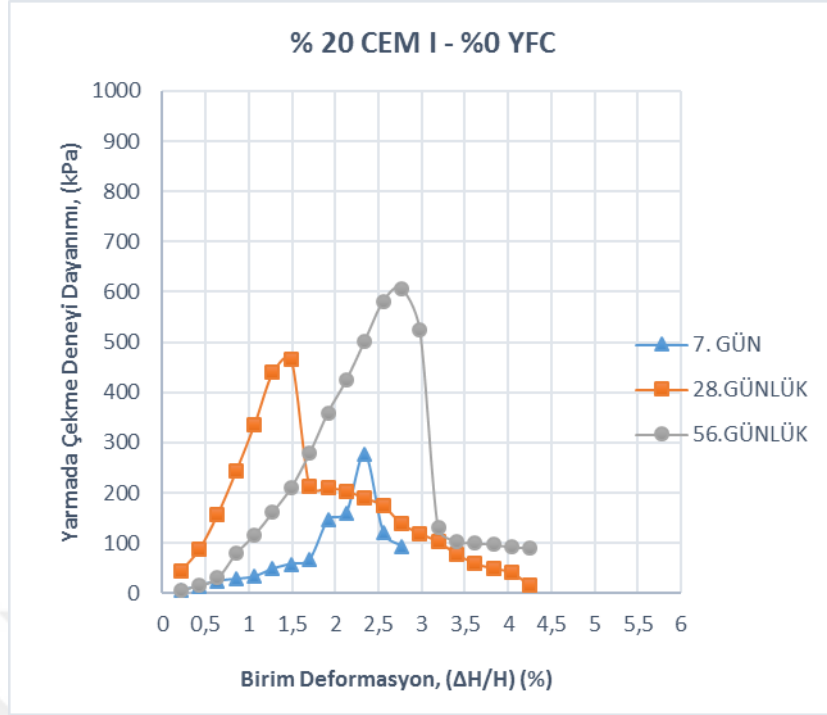
(c)



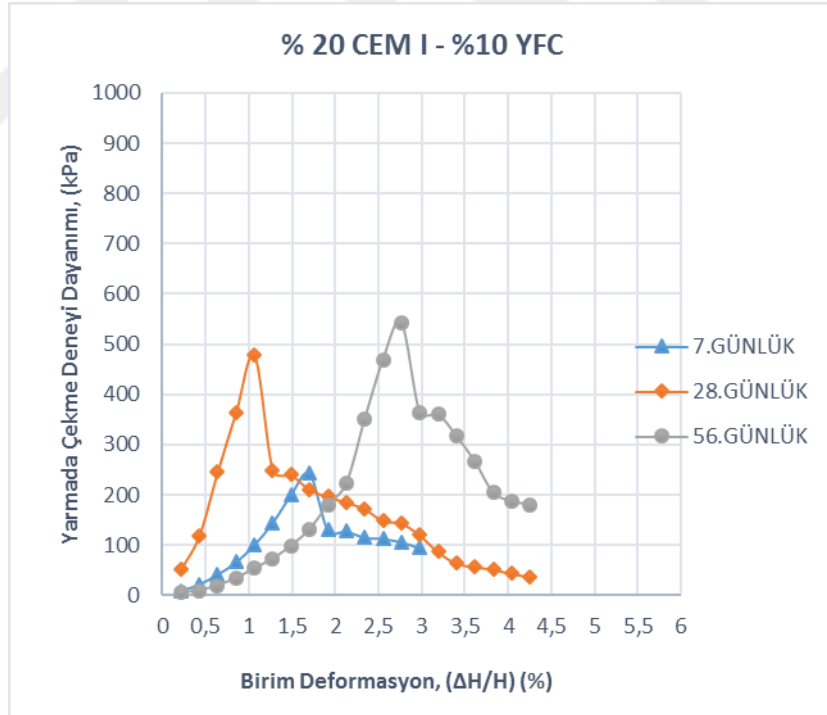
(d)



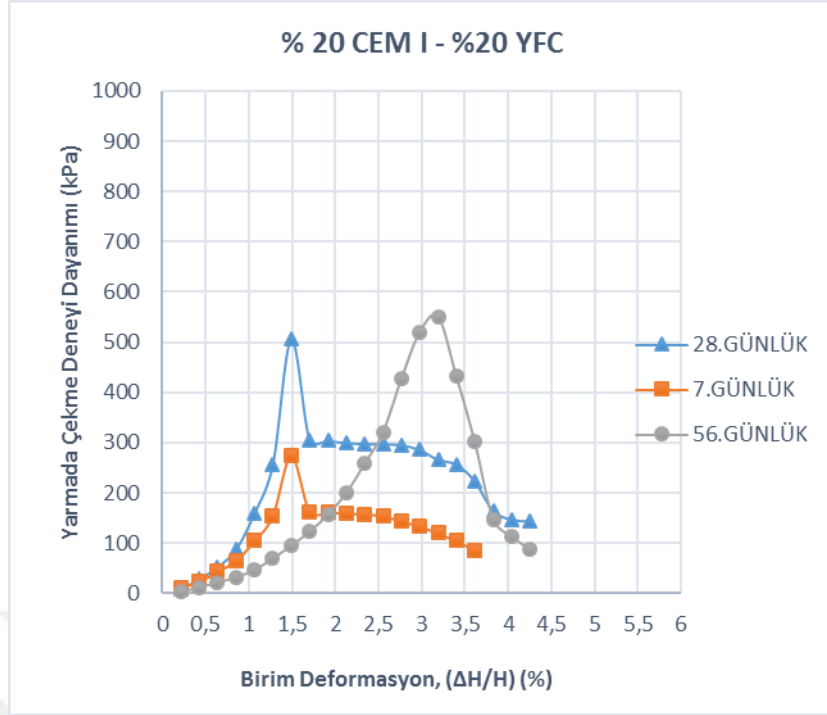
(e)



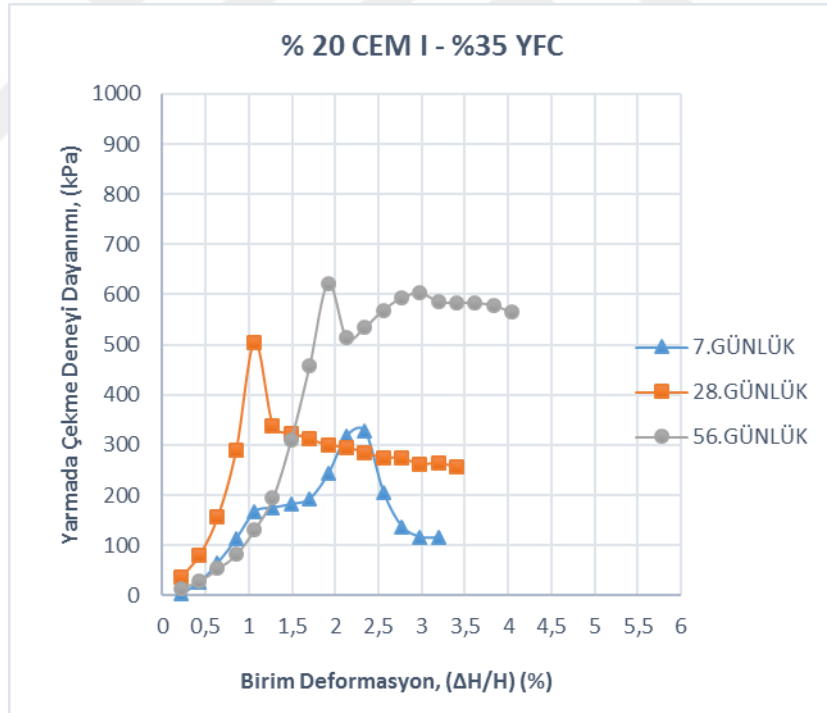
(f)



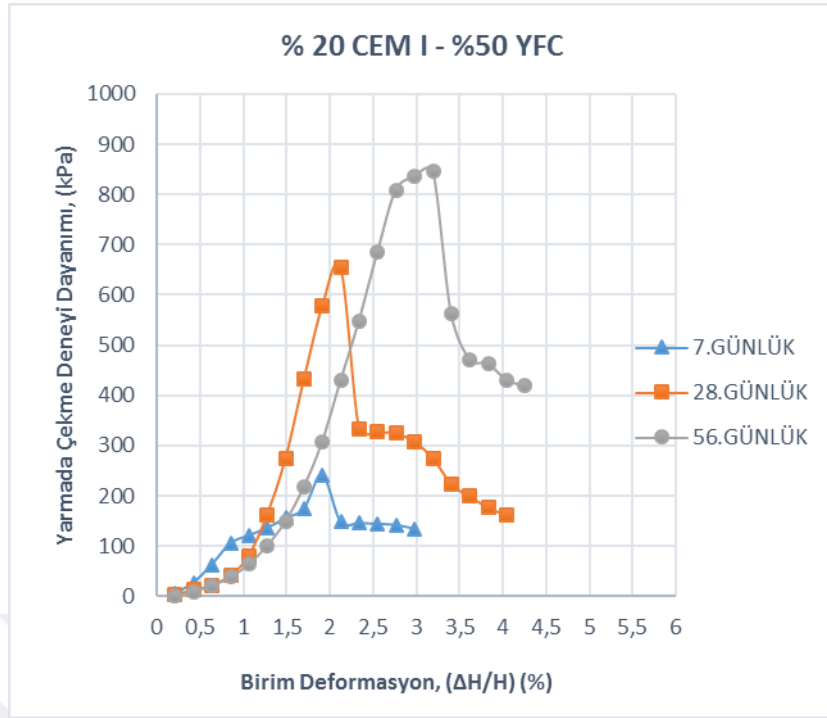
(g)



(h)



(i)



(j)

Şekil 4.7. %15 ve %20 CEM I çimentosuna farklı oranlardaki YFC ikamesi için yarmada çekme dayanımı- birim deformasyon sonuçları

Çizelge 4.12.'de farklı oranlardaki (%0, %10, %20, %35, %50) YFC ikameli DKK numunelerinin 7 günlük kür sonunda dayanımlarında artış görülmemiş ve yarmada çekme dayanımları sırasıyla 184 kPa, 192 kPa, 186.5 kPa, 193 kPa ve 192 kPa olarak elde edilmiştir. Hogan ve Meusel (1981) tarafından yapılan çalışmada %40, %50, %65 ikame oranlarında, beton dayanımına cürufun etkisinin 3 günlük yaşlarda genellikle düşük olduğu, fakat 7 günlük yaşlarda cürufun kontrol betonlarının dayanımına benzer ya da daha yüksek mukavemetlerin sağlanmasında etkili olduğu belirtilmiştir. Şekil 4.7.'ye göre kür süresi uzadıkça ve YFC ikame oranı arttıkça yarmada çekme dayanımının arttığı görülmektedir.

4.3. Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları

4.3.1. Büyük ölçekli derin karıştırma kolonları deney sonuçları

Büyük ölçekli derin karıştırma kolonlarının imal edilmesinde 179.5 kg/m^3 bağlayıcı (çimento, YFC) dozajı yani %20 çimento oranı seçilmiştir. Büyük ölçekli DKK oluşturulurken küçük ölçekli numunelere yapılan deney sonuçları

değerlendirilmiş ve %20 çimento oranında ve %, %20, %35, %50 oranlarındaki YFC içeren 4 adet kolon imal edilmiştir. Büyük ölçekli derin karıştırma kolonları laboratuvarında bulunan derin karıştırma deney düzeneği yardımı ile oluşturulmuştur. %20 çimento oranına 4 farklı oranda YFC ikame yapılarak hazırlanan enjeksiyonların, derin karıştırma bıçağı ile karıştırılması ile imal edilen kolonlar 28 gün kürde bekletilmişlerdir. Karot makinesi 70 cm yükseklikteki bir aparatın üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 4.8.). Boyu 45 cm ve iç çapı 5 cm boyu olan karot alma silindiri karot makinesine monte edilmiştir. Karot örneklerinin alınması esnasında hortumla su verilerek numunelerin bozulmadan alınması sağlanmıştır. Her derin karıştırma kolonu için en az 4 ayrı bölgeden karotlar alınmış ve karot makinesi 1000 devir/dak da çalıştırılmıştır. Karot alınan numuneler, tek eksenli basınç deneyleri ve yarmada çekme deneyleri için 5 cm çapında, 10cm yüksekliğinde, permeabilite deneyleri için de 3cm yükseklikte 5cm çapında numuneler kesilmiş ve deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.8. Büyük ölçekli derin karıştırma kolonu karot örnekleri

4.3.1.1. Büyük ölçekli DDK karot numuneleri serbest basınç deney sonuçları

28 günlük kür süresi sonrasında alınan karotlardan hazırlanan numunelere, her oran için 2 adet olmak üzere toplamda 8 adet serbest basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.14.'te gösterilmiştir. Karot numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre; küçük ölçekli numunelerde olduğu gibi en düşük dayanım %0 YFC ikameli numunede olup UCS değeri 1232 kPa bulunmuştur. En yüksek dayanım ise %50 YFC ikameli numunede elde edilmiş olup UCS değeri 2297 kPa olarak bulunmuştur.

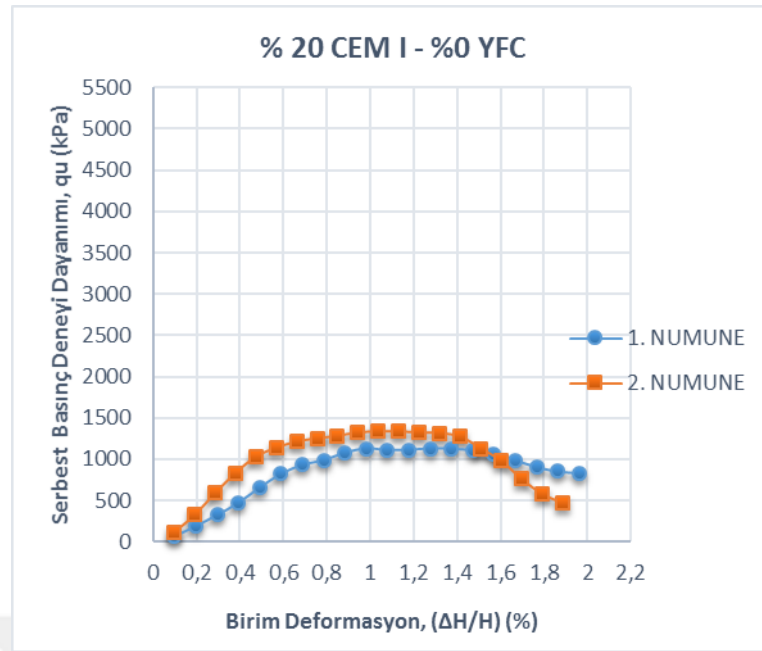
Çizelge 4.14. Büyük ve küçük ölçekli DDK numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçlarının kıyaslanması

Serbest basınç mukavemeti (q_u , kPa)				
YFC miktarı (%)	Büyük ölçekli DDK sonuçları			Küçük ölçekli DDK
	1	2	q_{u-ort}	q_{u-ort}
0	1130	1334	1232	1985
20	1557	1387	1472	2126
35	2241	2403	2322	2849
50	2462	2232	2347	2890

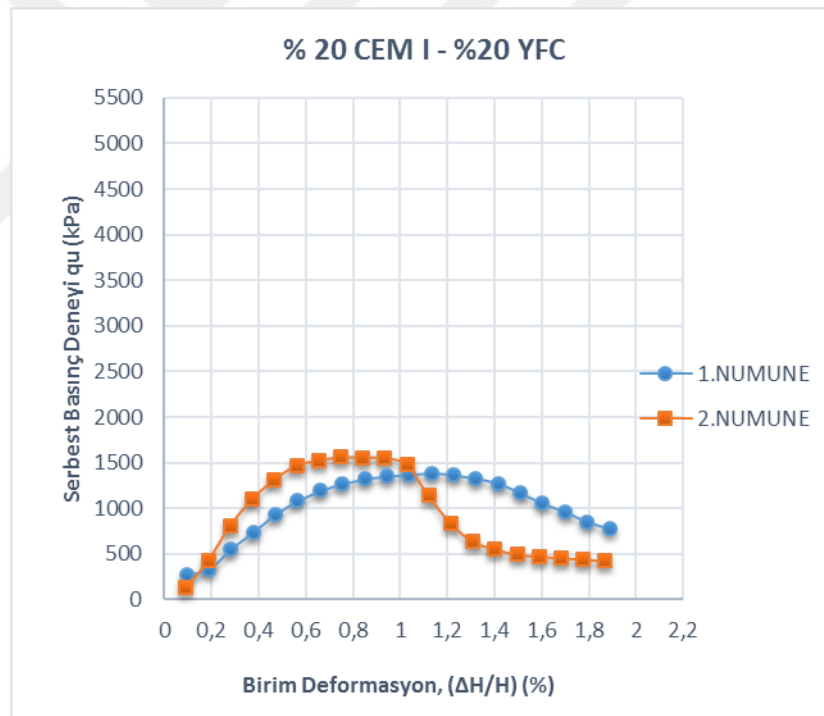
%35 YFC ve %50 YFC ikameli numunelerin serbest basınç dayanımları sırasıyla 2322 kPa, 2347 kPa bulunmuştur. Büyük ölçekli kolonlardan elde edilen DDK numunelerinde %35 ikame oranından %50 ikame oranına bir artış durumu için karot numunelerinin dayanımı yaklaşık %1.01 oranında bir artış göstermiştir.

%0 YFC ve %50 YFC ikameli numunelerin serbest basınç dayanımları sırasıyla 1232 kPa, 2347kPa olarak elde edilmiştir. Büyük ölçekli kolonlardan elde edilen DDK numunelerinde %0 YFC ikame oranından %50 YFC ikame oranına geçişte dayanımda yaklaşık %90 oranında bir artış olmuştur.

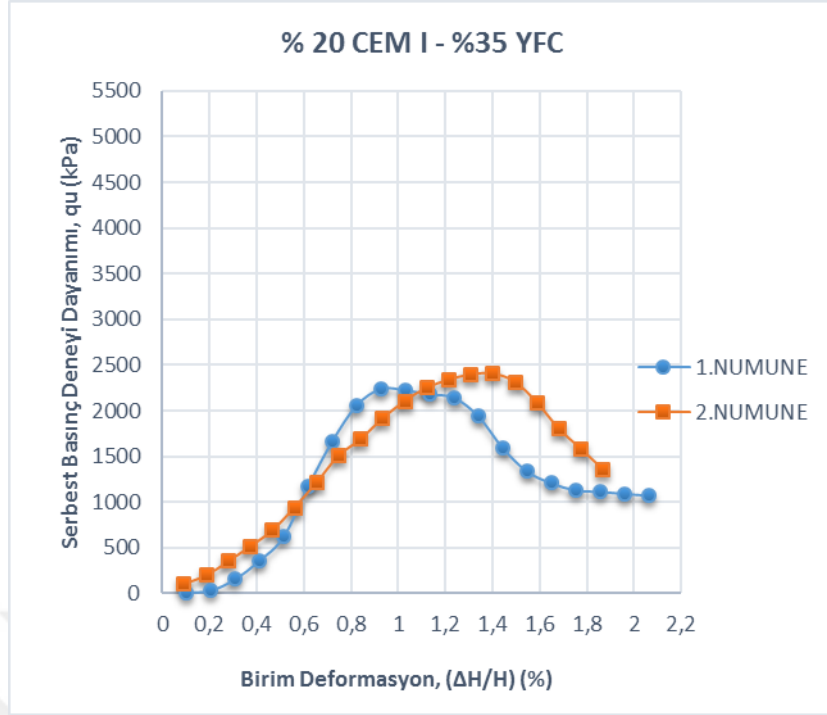
Şekil 4.9.'da büyük ölçekli derin karıştırma kolonu numunelerine ait gerilme-eksenel birim deformasyon eğrileri verilmiştir.



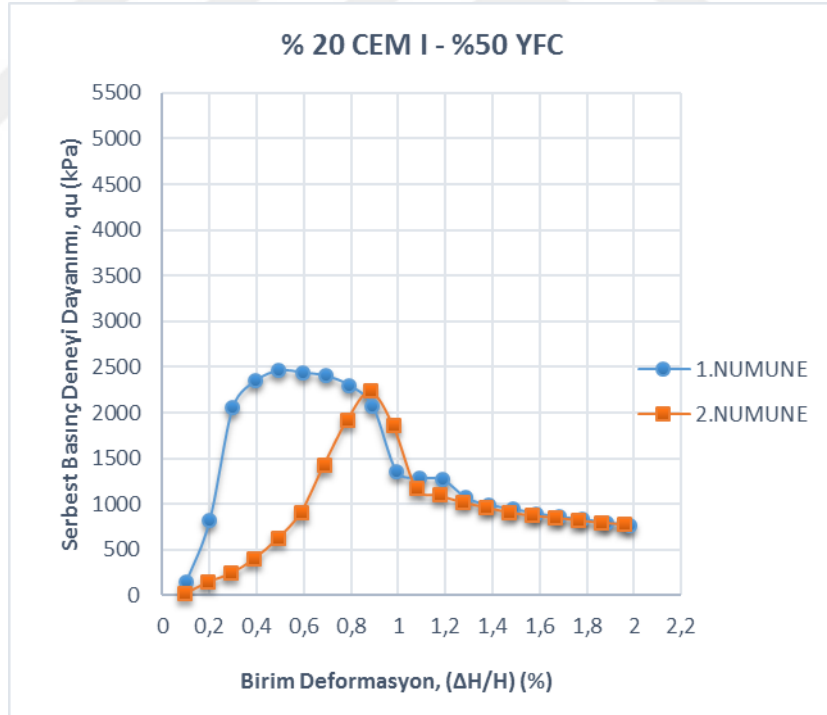
(a)



(b)



(c)



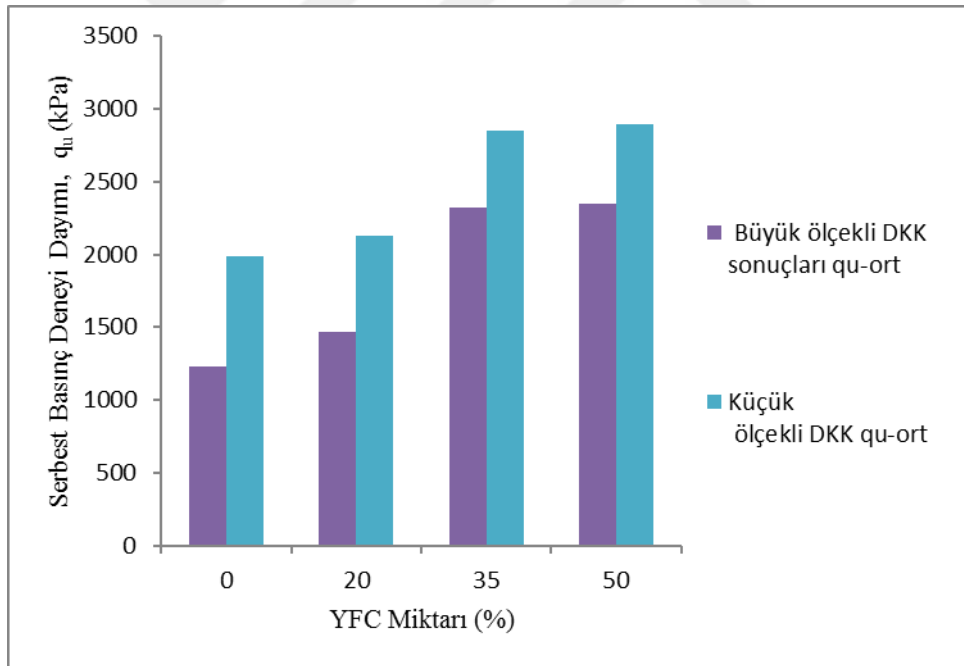
(d)

Şekil 4.9. Büyük ölçekli derin karıştırma kolonu numuneleri serbest basınç deney sonuçları

%0 YFC ikameli küçük ölçekli DKK numunesi ile %0 YFC ikameli büyük ölçekli DKK'ndan alınan karot numunelerinin serbest basınç dayanımları sırasıyla 1985

kPa ve 1232 kPa'dır. %0 YFC ikameli karot numunesinde küçük ölçekli numuneye göre dayanım %38 oranında azalmıştır (Şekil 4.10.).

%50 YFC ikameli küçük ölçekli numune ile %50 YFC ikameli karot numunelerinin serbest basınç dayanımları sırasıyla 2890 kPa ve 2347 kPa' dır. %50 YFC ikameli karot numunesinde küçük ölçekli numuneye göre dayanım %19 oranında azalmıştır. Bu da YFC ikame oranı arttıkça büyük ölçekli DKK karot numuneleri ve küçük ölçekli numuneler arasındaki dayanım oranındaki farkın azaldığını göstermektedir. Dayanımdaki bu azalmanın sebebi; küçük ölçekli DKK numuneleri hazırlanırken zeminin 2 mm çapındaki elekten elenmiş olmasıdır. Fakat büyük ölçekli DKK imalatında arazideki doğal zeminin doğrudan kullanılması nedeniyle DKK bünyesinde daha büyük çapta, çakıl boyutunda tanecikleri içermektedir. Büyük ölçekli DKK numuneleri için oluşturulan karışımlarda, küçük ölçekli DKK numunelerindeki gibi homojenlik sağlanamamıştır. Böylece daha az C-S-H jelleri elde edilmiş ve dayanımda azamalar görülmüştür.



Şekil 4.10. Büyük ölçekli ve küçük ölçekli derin karıştırma kolon numuneleri serbest basınç deney sonuçlarının karşılaştırılması

Küçük ölçekli numune imalatında şartların hepsi kontrol edilebilirken, büyük ölçekli numunelerin imalatında şartların kontrol edilmesi zor olduğundan homojenlik tam olarak sağlanamamıştır. Bundan dolayı büyük ölçekli numunelerden elde edilen dayanım sonuçları daha düşüktür.

4.3.1.2. Büyük ölçekli DDK karot numuneleri permeabilite deney sonuçları

28 gün kürde bekletilen büyük ölçekli derin karıştırma kolonlarından alınan karotlardan 5 cm çapında ve 3 cm yükseklikteki ebatlarda numuneler kesilmiş ve her ikame oranı için 1 adet olmak üzere toplamda 4 adet permeabilite deneyi yapılmıştır.

Numuneler, deney yapılmadan yaklaşık 5 gün önce suya koyularak numuneler tamamen suya doymun hale getirilmiştir. Daha sonra üç eksenli basınç deney düzeneğinde deneyler yapılmıştır. Çizelge 4.15.'teki sonuçlara göre; en fazla geçirimsizliğe sahip numune %0 YFC ikameli numune olup, en az geçirimsizliğe sahip numune ise %50 YFC ikameli numune olmuştur. Büyük ölçekli DDK imalatındaki kullanılan zemin içeriğinde daha büyük çaplı tanecik ihtiva ettiğinden dolayı, büyük ölçekli DDK numuneleri, küçük ölçekli DDK numunelerine göre daha fazla geçirimsizlik özelliği göstermiştir.

Çizelge 4.15. Büyük ve küçük ölçekli DDK permeabilite deney sonuçları

YFC Miktarı miktarı	Permeabilite katsayısı $k (\times 10^{-10} \text{ cm/sn})$	
	Büyük ölçekli DDK	Küçük ölçekli DDK
(%)	1. Numune	1. Numune
0	7,31	7,01
20	6,09	5,88
35	5,41	5,17
50	2,98	2,66

4.3.1.3. Büyük ölçekli DDK karot numuneleri yarmada çekme deney sonuçları

28 günlük kür süresi sonrasında alınan karotlardan hazırlanan numunelere, her oran için 2 adet olmak üzere toplamda 8 adet yarmada çekme deneyi yapılmıştır. Şekil 4.11.'de büyük ölçekli derin karıştırma kolonlarından alınan karot numunelerine ait yarmada çekme dayanımı - eksenel birim deformasyon eğrileri verilmiştir.

Deney sonuçlarının verildiği Çizelge 4.16.'ya göre küçük ölçekli numunelerde olduğu gibi en düşük dayanım %0 YFC ikameli numune olup yarmada çekme dayanım değeri 277 kPa olarak elde edilmiştir. En yüksek dayanım değeri ise %50 YFC ikameli

numune de elde edilmiş olup yarmada çekme dayanım değeri 379 kPa olarak bulunmuştur.

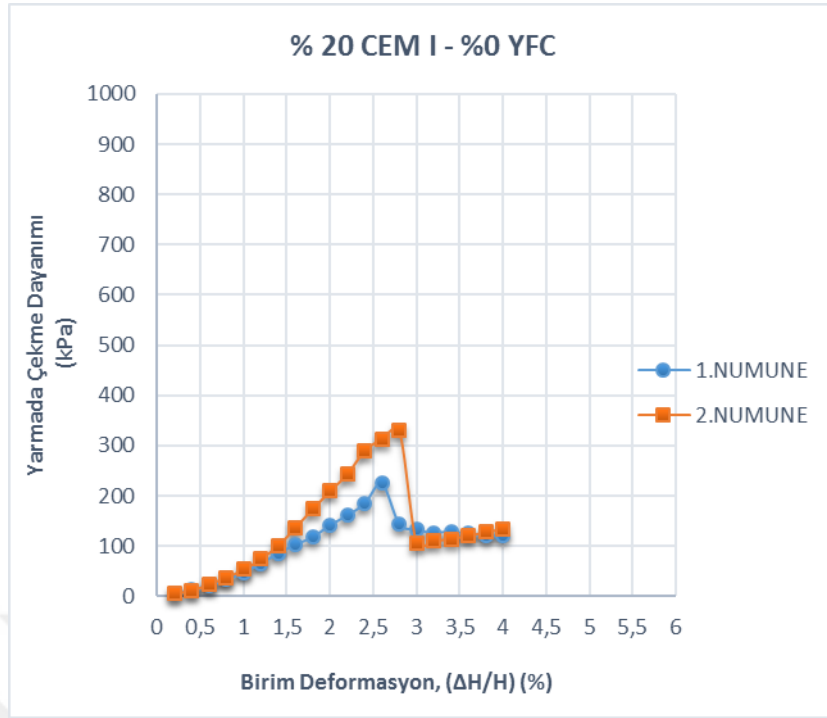
%0 YFC ve %50 YFC ikameli numunelerin yarmada çekme deneyi dayanımları sırasıyla 277 kPa, 379 kPa şeklinde bulunmuştur. Büyük ölçekli DKK alınan karot numuneleri üzerinde yapılan yarmada çekme deney sonuçlarına göre; %0 YFC ikame oranından %50 YFC ikame oranına geçişte dayanım yaklaşık %37 oranında artmıştır.

%35 YFC ve %50 YFC ikameli büyük ölçekli DKK karot numunelerinin yarmada çekme dayanımları sırasıyla 375.5 kPa, 379 kPa' dır.

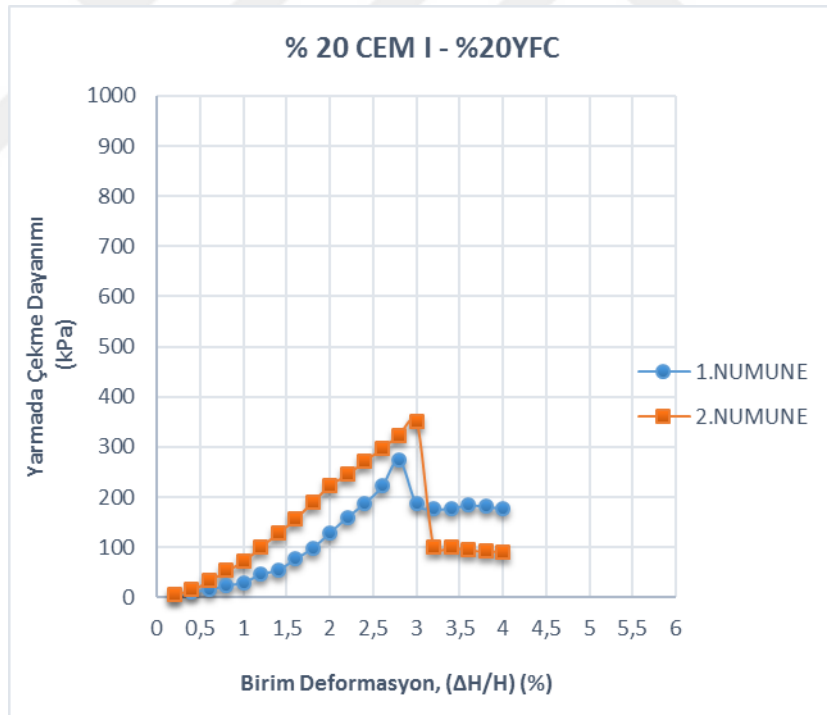
Şekil 4.12.'de büyük ölçekli DKK karot numuneleri ve küçük ölçekli derin karıştırma kolonu numunelerine ait yarmada çekme dayanım değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.16. Büyük ölçekli DKK karot numuneleri ve küçük ölçekli DKK numunelerinde yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

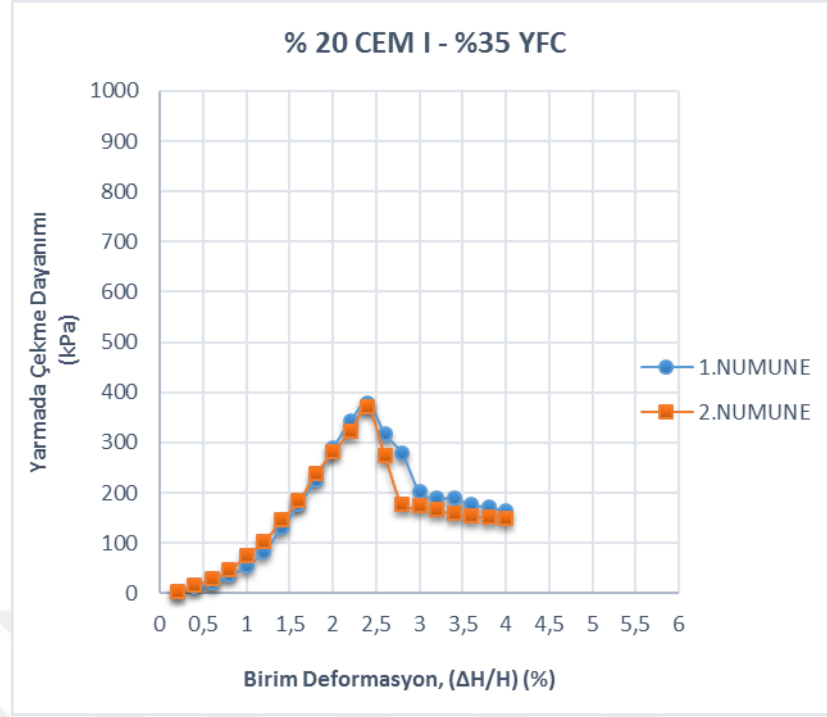
Yarmada çekme dayanımı, (kPa)				
YFC miktarı (%)	Büyük ölçekli DKK sonuçları			Küçük ölçekli DKK
	1	2	çekme ort	çekme ort
0	224	330	277	452
20	274	352	313	482
35	380	371	375,5	484
50	383	375	379	626



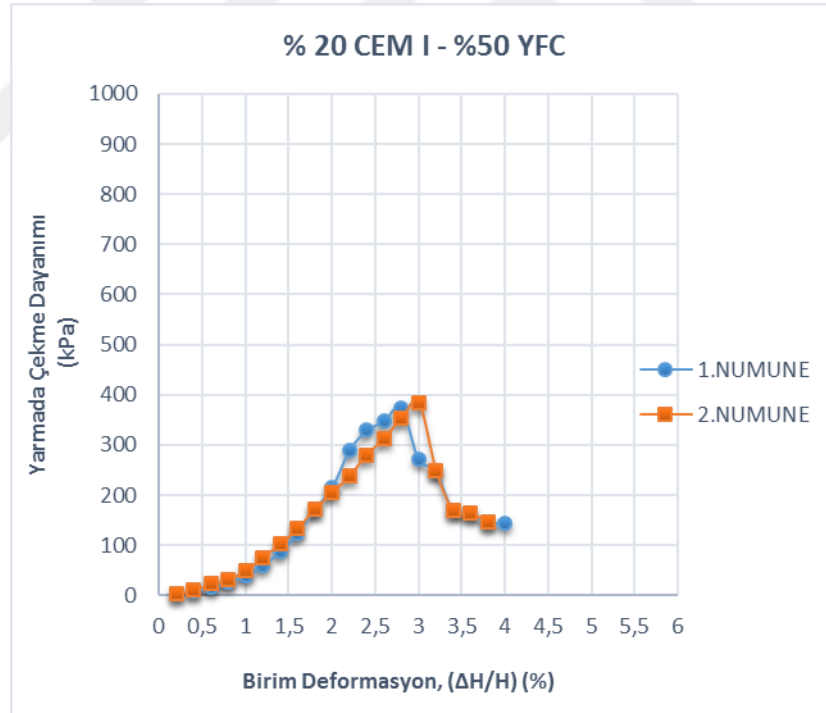
(a)



(b)

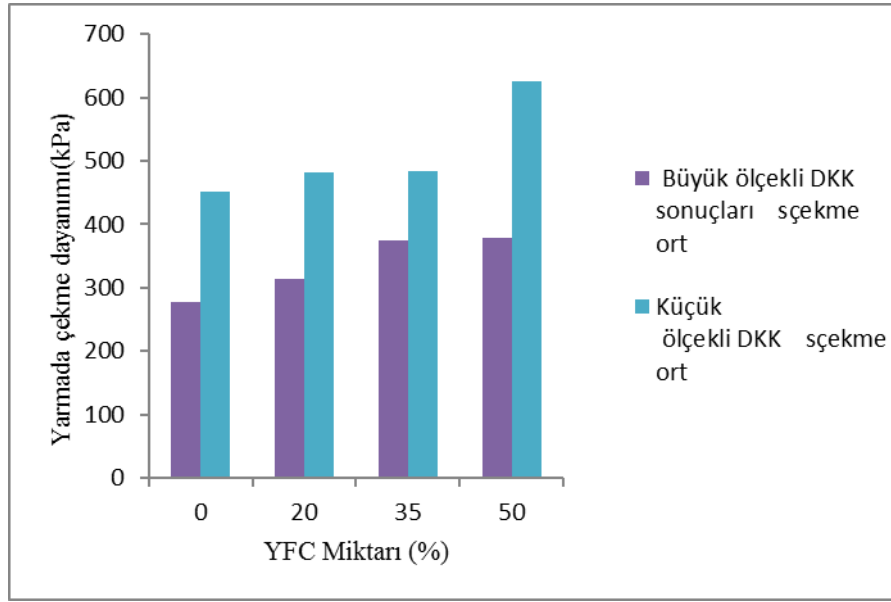


(c)



(d)

Şekil 4.11. Büyük ölçekli DKK numunelerine ait yarmada çekme dayanımı- birim deformasyon sonuçları



Şekil 4.12. Büyük ölçekli DKK karot numuneleri ve küçük ölçekli derin karıştırma kolonu numunelerine ait yarmada çekme dayanım değerleri

4.4. DKK Numunelerinde Yapılan SEM ve XRD Analiz Sonuçları

Tez çalışması kapsamında; CEM I 42.5 R portland çimentosu, saf kil ve %20 çimento içerikli karışıma farklı oranlarda YFC ikame edilmiş numunelerden alınan örnekler üzerinde, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde XRD ve SEM analizleri yapılmıştır (Şekil 4.13.).

SEM analiziyle yapılan büyütme oranları arttıkça, sertleşmiş çimento ve YFC harcının içeriğinde bulunan bileşenler daha net bir şekilde gözlemlenmiştir.

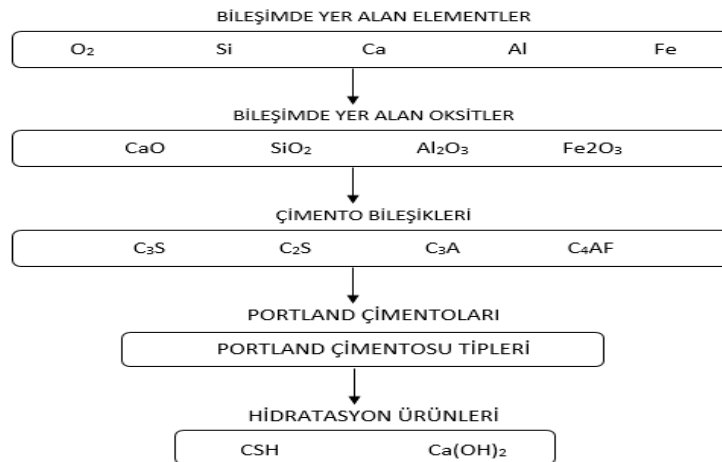
Portland çimentosunun 4 ana bileşenini; trikalsiyum silikat (C_3S , $3CaO.SiO_2$, Alit), dikalsiyum silikat (C_2S , $2CaO.SiO_2$, Belit), trikalsiyum alüminat (C_3A , $3CaO.Al_2O_3$, Alüminat) ve tetrakalsiyum alumino-ferrite (C_4AF , Ferrit) oluşturmaktadır. Trikalsiyum silikat (C_3S) çimentonun erken dayanım kazanmasında etkiliyken, dikalsiyum silikat (C_2S) çimentonun uzun zamanda dayanım kazanmasında, trikalsiyum alüminat (C_3A) çimentonun ilk dayanımını kazanmasında etkili olmakta iken tetrakalsiyum alumino-ferrite'nin (C_4AF) çimentonun dayanımında katkısı çok azdır (Deb ve ark., 2017).



Şekil 4.13. BRUKER D8 ADVANCE X-Işını Difraktometresi cihazı

Çimentonun bileşenlerinin hidrasyonu sonucunda birbirinden farklı ürünler oluşmaktadır Bunlar C-H, C-S-H ve C-A-S-H jelleridir (Şekil 4.14.).

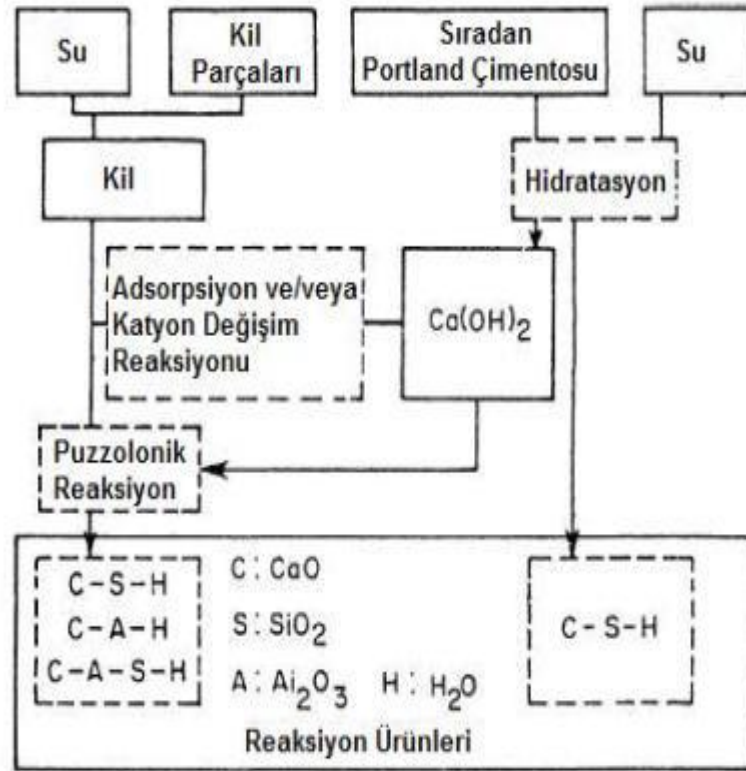
C-S-H Jeli: Çimento ve harçta C-S-H jeli bağlayıcı son evreyi oluşturduğundan dolayı önemli bir bileşendir ve bunun sonucunda dayanıma en büyük katkıyı sağladığı bilinmektedir. SEM analizi yapılan numunelerde C-S-H jeli genel lif tipinden düzensiz taneli bir ağ örgüsüne benzeyen yapılarıdır.



Şekil 4.14. Portland çimentosunun hidrasyon aşamaları (Noori, 2019)

Kalsiyum Hidroksit (CH): Kalsiyum hidroksit kristalleri; yassı ya da büyük zayıf uzun kristaller şeklinde, çok farklı biçim ve boyutta görülmektedirler. Çimento harcı ve beton içerisindeki kalsiyum hidroksit (CH) kristalleri çimento ile agrega ara yüzeyinin bağlayıcılığını geliştirmektedirler.

Kalsiyum Mono Sülfat (Etrenjit): SEM cihazında etrenjit, kalsiyum sülfoalüminat (etrenjit, AFt) ve mono sülfat hidrat (AFm) olmak üzere iki mineralojik yapıda tanımlanır. Genel olarak, etrenjit erken hidrasyon aşamasında boşluklarda sivri ve iğne biçimi görümlü olup bu biçim ilerleyen aşamalarda ayrışma olayı olarak bilinen boşluklarda su ile şişen ve genişleyen çok kenarlı kristallere dönüşmektedir (Kırgız, 2011).



Şekil 4.15. Çimento- zemin arasında oluşan reaksiyon (Rjasekaran, 2005)

Derin karıştırma kolonlarında killi zemin, çimento harcı karıştırıldığı zaman çimento-zemin karışımı arasında da bir kısım reaksiyonlar oluşmaktadır (Şekil 4.15.) (Rjasekaran, 2005). Reaksiyon sonucunda, yeni jeller oluşmakta, oluşan jeller kolonların dayanımının artmasına neden olmaktadır.

Puzolanlar, silisli ve alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Puzolanlar, suyla karıştırıldığında kendi kendine sertleşmezler ancak

ince öğütüldüklerinde ve suyun bulunduğu durumlarda çözünmüş kalsiyum hidroksitle (CH ; $\text{Ca}(\text{OH})_2$) reaksiyona girerek dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri oluştururlar.

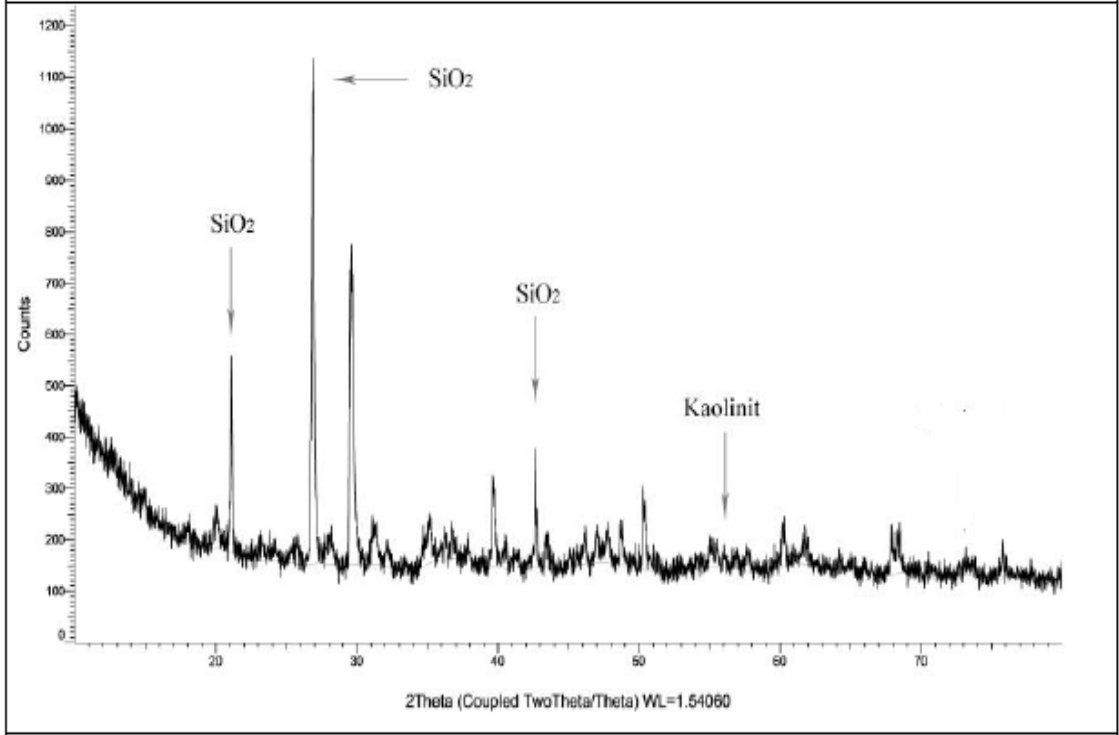
Yüksek fırın cürufu ve portland çimentosu ile su karıştırıldıklarında ilk olarak portland çimentosu klinkerinin yapısındaki C_3S ve C_2S gibi kalsiyum silikatlı ana bileşenlerden reaksiyon başlar ve çimentonun hidrolik bağlayıcılık özelliğini veren $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ (C-S-H, kalsiyum-silikat-hidrat) jelleriyle beraber $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (kalsiyum hidroksit) oluşur. Yüksek fırın cürufu, hidrolik bağlayıcılık oluşturması için gerekli olan kalsiyum hidroksiti, portland çimentosu hidratasyon ürünü olan kalsiyum hidroksitten karşılamaktadır. Amorf yapıda bulunan yüksek fırın cürufunun silisi ve alümini, kalsiyum hidroksitle reaksiyon oluşturarak portland çimentosunun hidratasyonundaki gibi bağlayıcı özelliğe sahip C-S-H jelleri gibi çok güçlü bağlayıcı özellikte hidratasyon ürünleri oluşmaktadır (Erdoğan, 1997).

Tez çalışması kapsamında; DKK, 28 günlük kür süresinde bırakıldıktan sonra, bu kolonlardan alınan numunelere XRD analizleri uygulanmıştır. Yapılan bu analizlerle saf kilde, CEM 1 42.5 R çimentosunda, %20 CEM I - %20 YFC, %20 CEM I - %35 YFC içeren DKK numunelerinde hangi kırınım deseninde, hangi derecede hangi bileşik ve jellerin bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 4.16., Şekil 4.17. ve Şekil 4.18. (a) ve (b)).

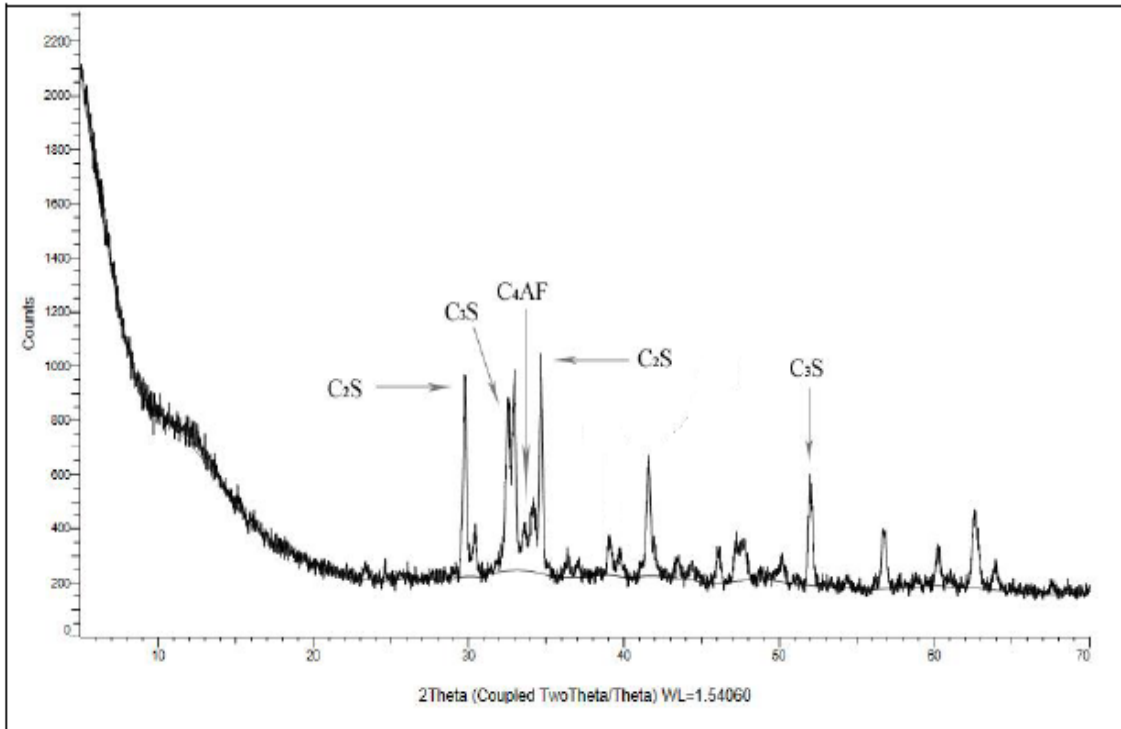
Saf kilin kullanıldığı Şekil 4.16. incelendiğinde; XRD deseninde 56.2° ve 73.5° (2 Theta)'de kaolinit minerali tespit edilmiştir.

Şekil 4.18.a.'da %20 CEM I - %20 YFC ikamesiyle hazırlanan numunede, XRD deseninde C-S-H jelleri, 9.4° , 20.1° , 29.8° , 43.6° , 48.8° (2 Theta)' de tespit edilmiştir. Aynı şekilde düz plaka şeklinde olan portlandit (CH) 16.1° , 35.3° (2 Theta)' de, etrenjit 36.8° (2 Theta)'de, kaolinit 39.8° , 68.4° (2 Theta) tespit edilmiştir.

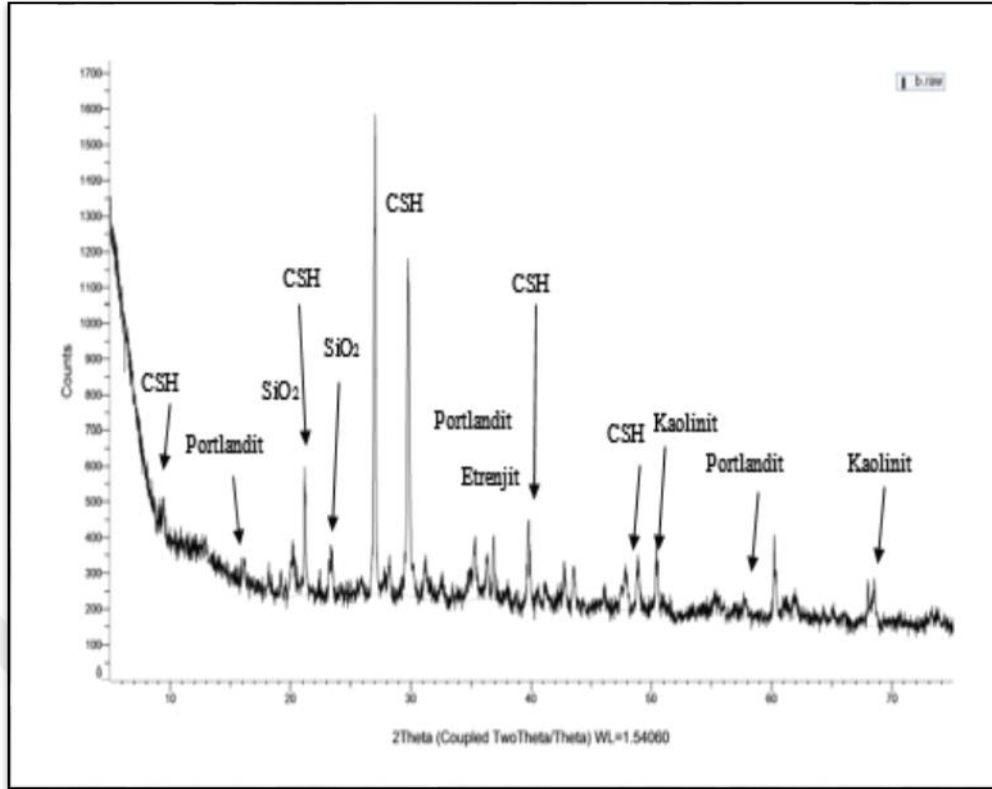
Şekil 4.18.b.'de %20 CEM I - %35 YFC ikamesiyle hazırlanan numunede, XRD deseninde C-S-H jelleri, 9.3° , 28.1° , 42.8° , 48.3° , 68.4° (2 Theta)' de tespit edilmiştir. Aynı şekilde, C-H jelleri, 18.1° , 35.2° (2 Theta)' de, etrenjit 72.3° (2 Theta)'de, kaolinit 39.2° (2 Theta) tespit edilmiştir.



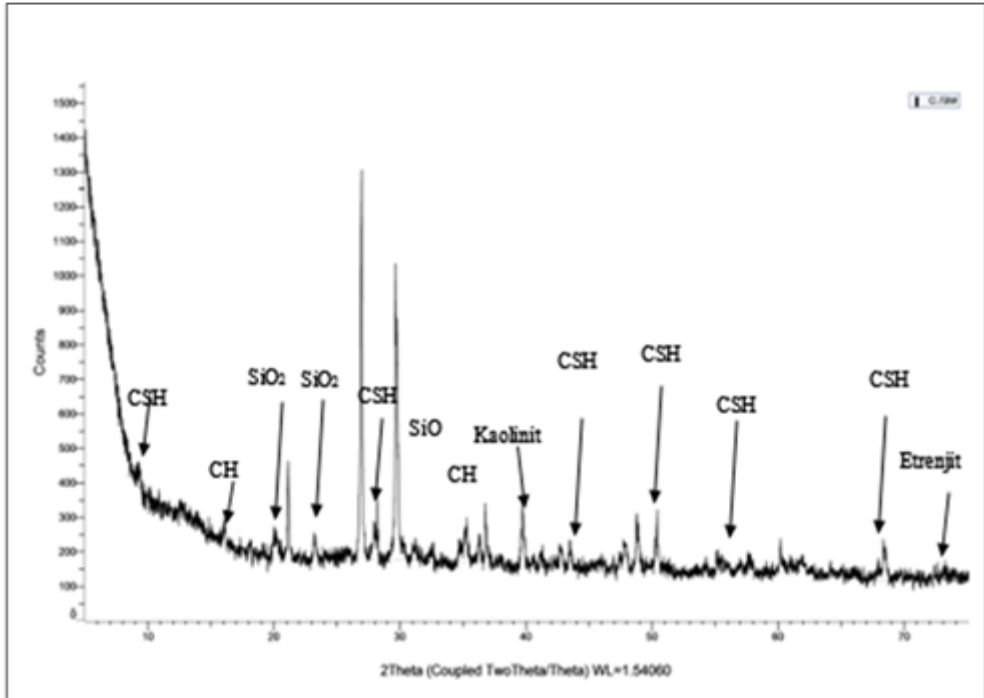
Şekil 4.16. Saf kilin XRD analiz sonuçları



Şekil 4.17. CEM I 42.5 R için XRD analiz sonuçları



(a)



(b)

Şekil 4.18. XRD analiz sonuçları; (a) %20 CEM I - % 20 YFC, (b) %20 CEM I - %35 YFC

Saf kilin ve %20 CEM I - %0 YFC, %20 CEM I - %20 YFC, %20 CEM I - %35 YFC, %20 CEM I - %50 YFC karışımları şeklinde imal edilen ve 28 günlük küre tabi tutulan DKK numunelerinin mikro yapılarında meydana gelen C-H, C-S-H ve C-A-S-H jellerini gözlemek amacıyla SEM analizleri yapılmıştır (Şekil. 4.19. – Şekil. 4.23).

Hidratasyon reaksiyonlarının sonunda gözenekli yapıda olan C-S-H jeli ile kristal yapıya sahip olan kalsiyum hidroksittir (CH) olmak üzere iki ürün ortaya çıkmaktadır.

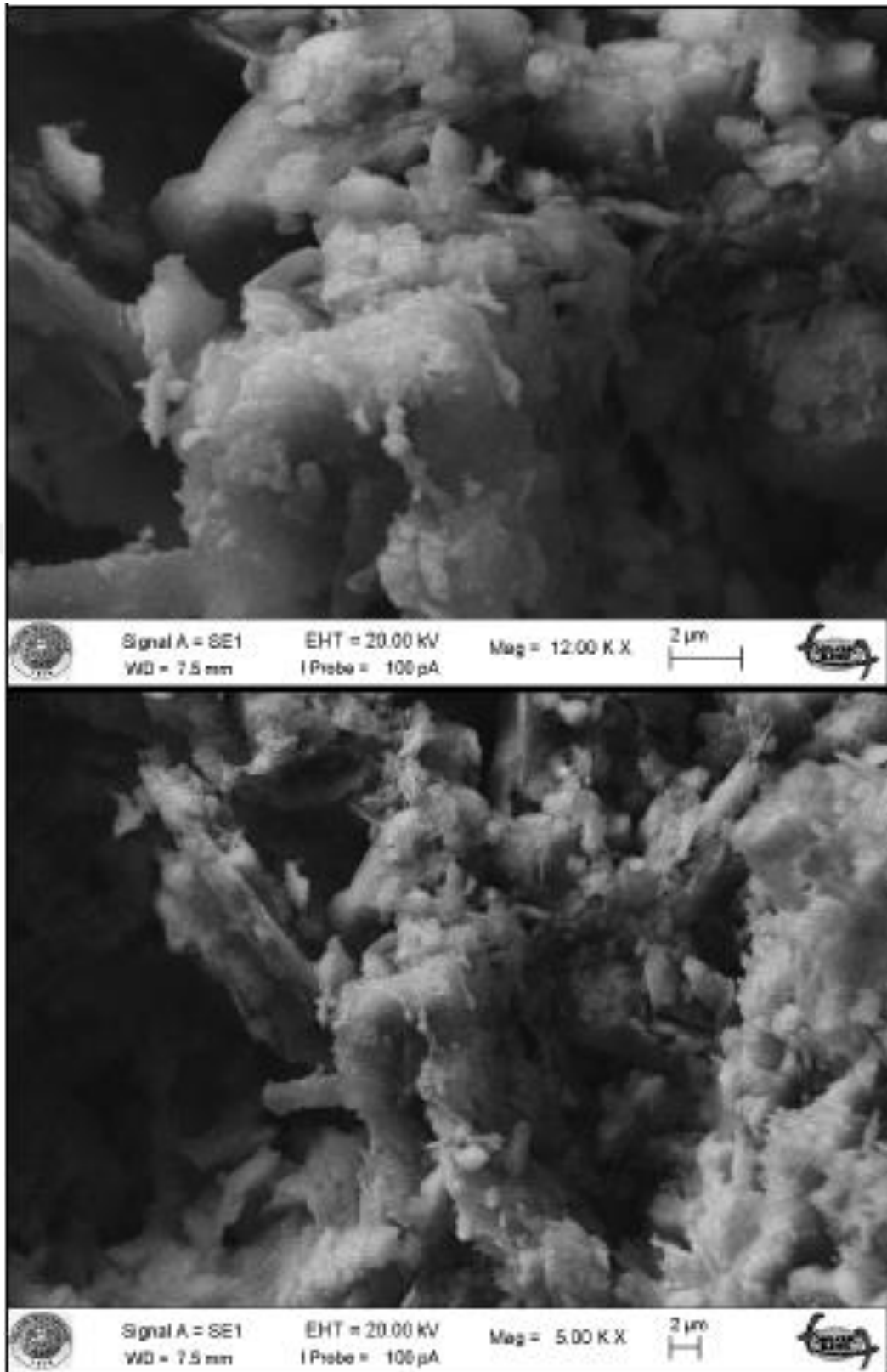
Şekil 4.22.'de %20 CEM I - %35 YFC ikamesiyle hazırlanan derin karıştırma kolonunun SEM görüntüleri verilmiştir. El edilen görüntülerde zemin yüzeyinde C-S-H, C-H ve etrenjit jellerine rastlanılmış olup numunenin boşluklu bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

%20 CEM I - %20 YFC ikamesi ile %20 CEM I - %35 YFC ikameli numunelerin SEM ve XRD analizlerine bakıldığında, %20 CEM I - %20 YFC ikamesinde; C-S-H, C-H, daha fazla gözenekli bir yapı ve etrenjit kristallerinin olduğu gözlemlenmiştir. Etrenjit, boşluklarda erken oluşan çubuk şeklindeki iğnemsî yapılar olup suyun emilimini sağlayarak bozulmalara neden olmaktadır. %20 CEM I - %35 YFC ikameli numunede, C-S-H, C-H ve etrenjitlere rastlanmaktadır. C-S-H jelleri daha fazladır ki bu nedenle %20 CEM I - %20 YFC ikameli numuneye göre daha az gözenekli yapıya sahiptir ve bu nedenle daha az geçirimlidir.

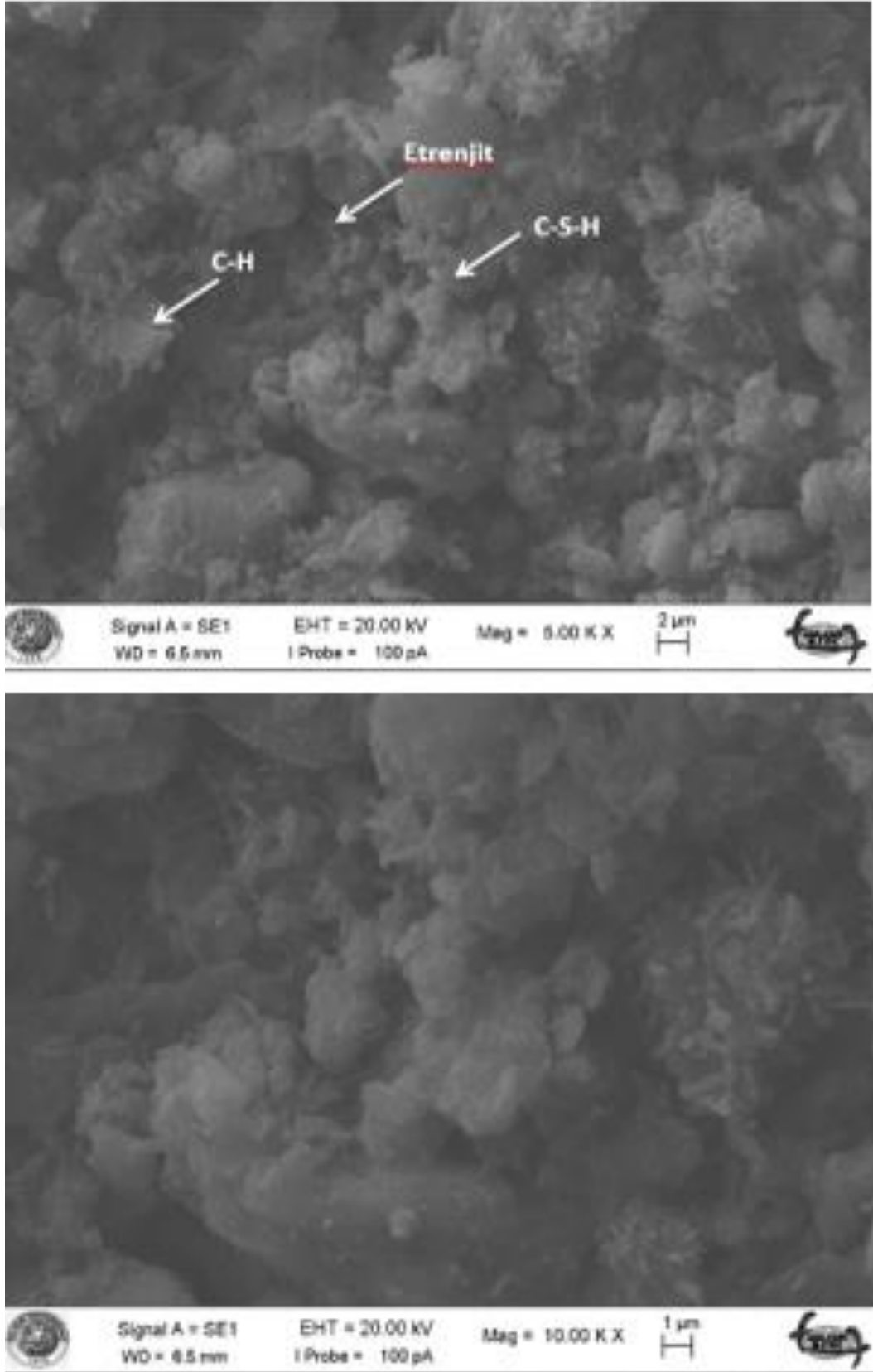
Şekil 4.20.'de %20 CEM I - % 0 YFC numunesinin 5000 kat yakınlaştırılarak çekilmiş görüntüsü verilmiştir. Zemin yüzeyinde, C-S-H, C-H ve etrenjit jellerine rastlanılmış olup boşluklu yapı gözlenmiştir.

Şekil 4.21.'de %20 CEM I - %20 YFC ikamesiyle hazırlanan derin karıştırma kolonunun SEM görüntüleri verilmiştir. Zemin yüzeyinde C-S-H, portlandit, kaolinite, etrenjit jellerine rastlanılmış olup, boşluklu yapı gözlenmiştir.

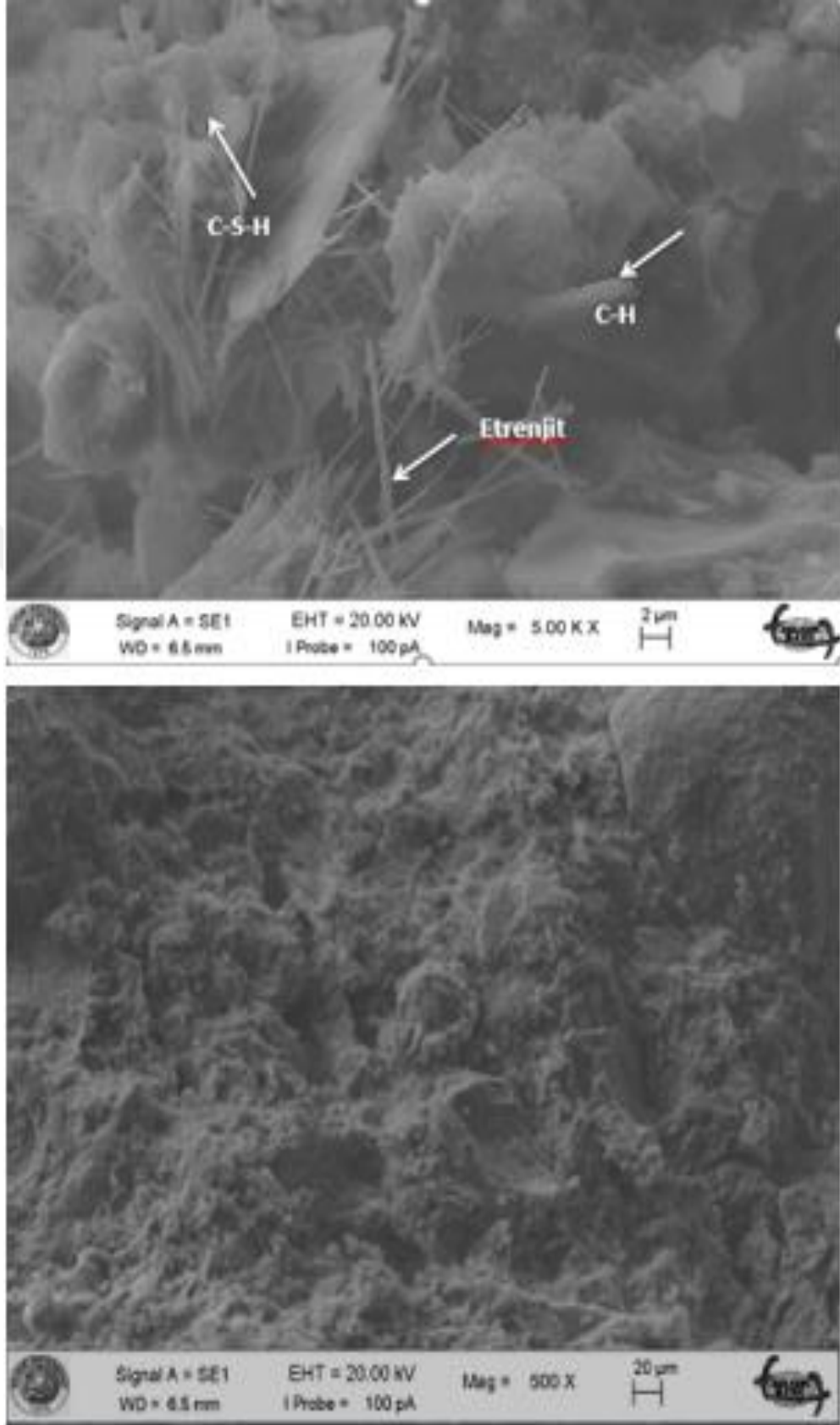
Şekil 4.23'te %20 CEM I - % 50 ikameli numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde zemin yüzeyinde, bol miktarda C-S-H ve C-H jellerine rastlanmaktadır. Daha az boşluklu yapıya sahiptir. Bunun nedeni ise C-S-H jellerinin daha fazla olmasıdır.



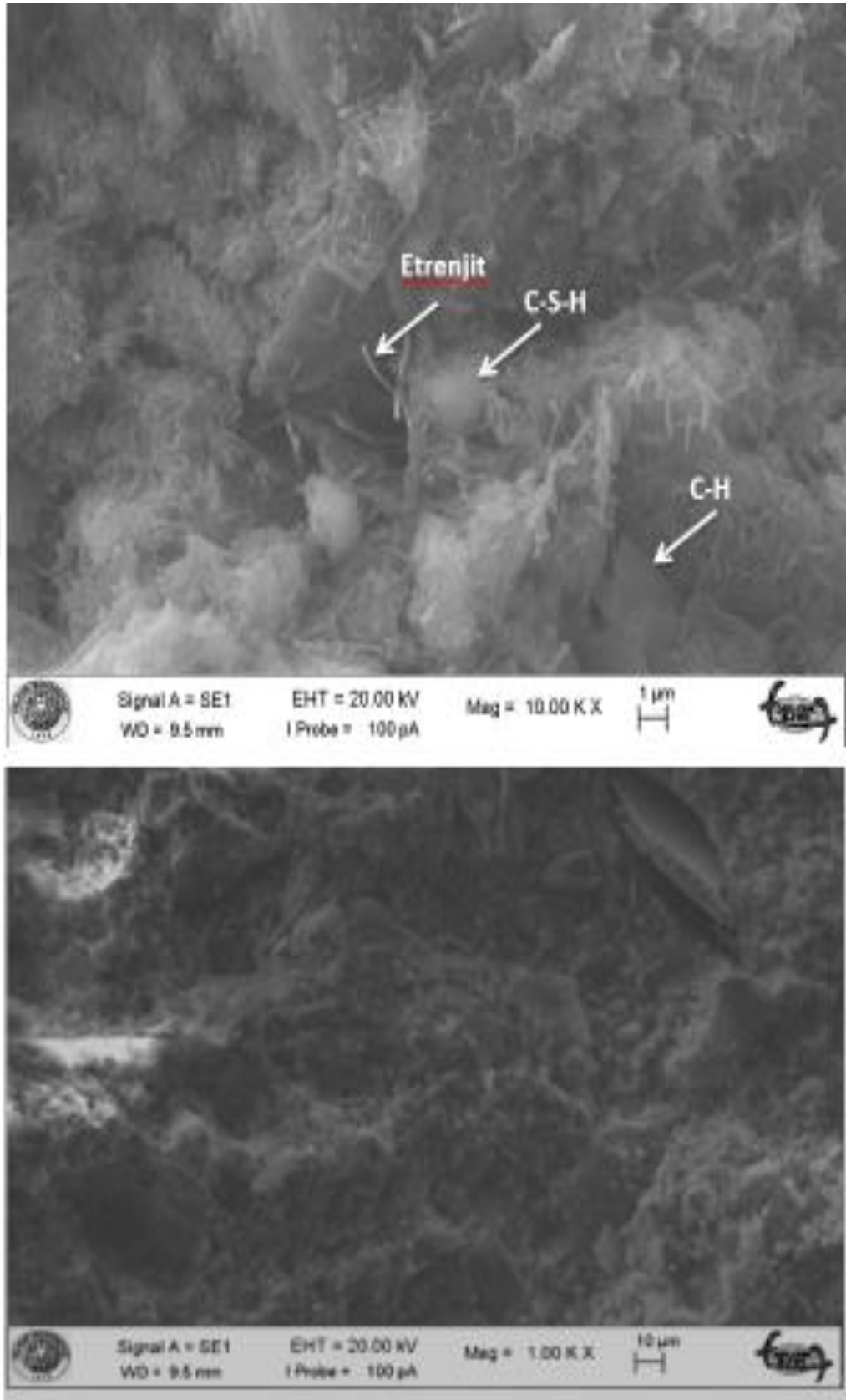
Şekil 4.19. Saf kil için SEM analiz görüntüleri



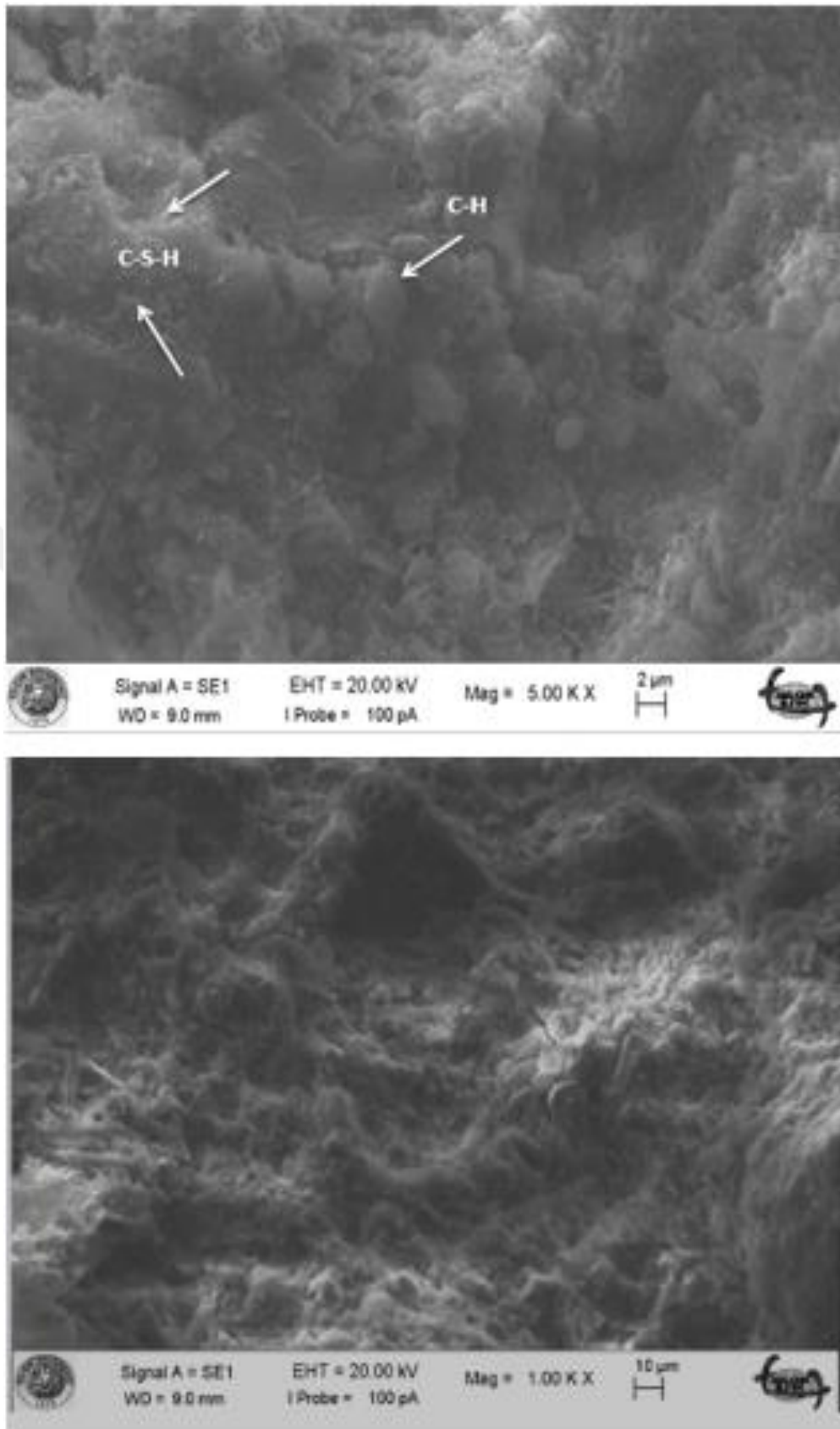
Şekil 4.20. %20 CEM I - % 0 YFC numunesi için SEM görüntüsü analiz sonuçları



Şekil 4.21. %20 CEM I - % 20 YFC numunesi için SEM görüntüsü analiz sonuçları



Şekil 4.22. %20 CEM I - % 35 YFC numunesi için SEM görüntüsü analiz sonuçları



Şekil 4.23. %20 CEM I - % 50 YFC numunesi için SEM görüntüsü analiz sonuçları

5. SONUÇLAR

5.1. Sonuçlar

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında; yüksek fırın cürufunun, çimento yerine belli oranlarda enjeksiyon harcına ikame edilmesiyle oluşturulan derin karıştırma kolonlarının performansı üzerine bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada, normal portland çimentosu (CEM I 42.5 R), yüksek fırın cürufu (YFC), düşük plastisiteli kaolin kili kullanılmıştır.

YFC ikame oranlarının, derin karıştırma kolonlarına olan etkilerini araştırmak amacıyla ilk olarak, çimento oranı kil kuru ağırlığının %15 ve %20 oranlarında seçilerek, ayrıca bu her iki orana da çimentonun kuru ağırlıkça yüzdesi olarak 5 farklı oranda (%0, %10, %20, %35, %50) YFC eklenmiştir. Küçük ölçekli model DKK üzerinde deneyler yapılarak ve bu deneylerin sonuçlarına göre optimum çimento ve YFC oranlarının seçilmesiyle büyük ölçekli DKK'nın yapılması hedeflenmiştir.

Enjeksiyonla ilgili içerik ve kıvama bağlı değerlerin belirlenmesi amacıyla reolojik özellik deneylerinden Marsh hunisi ve sedimentasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarına göre W/C oranı arttıkça stabilitenin azaldığı görülmektedir. W/C oranı arttıkça akışkanlığın arttığı da görülmüştür. Reolojik özellik deneylerine göre, optimum su/bağlayıcı (W/C) oranı 1 seçilmiştir.

DKK'nın oluşturulmasında zeminin su muhtevası, zemin için bulunan plastik limit - likit limit değerleri arasındaki su muhtevasında olacak biçimde %27 olarak seçilmiştir.

Küçük ölçekli derin karıştırma kolonlarının hazırlanmasında %15 ve %20 çimento oranları kullanılmış ve bu her iki orana da çimentonun kuru ağırlıkça yüzdesi olarak 5 farklı oranda (%0, %10, %20, %35, %50) YFC eklenerek hazırlanan enjeksiyon harçları, zeminle karıştırılarak DKK imal edilmiştir.

Küçük ölçekli DKK serbest basınç deneyi sonuçlarına göre; çimento oranı ve YFC ikame oranı arttıkça dayanım artmıştır. En yüksek dayanım %20 CEM I - %50 YFC ikameli numunede görülmüştür. En düşük dayanım ise %15 CEM I - %0 YFC ikameli numunede görülmüştür.

Deney sonuçlarına göre kür süresinin dayanımda etkili olduğu ve kür süresi arttıkça dayanımın arttığı görülmektedir. 7 günlük kür süresinde %0 YFC ikameli (YFC katkısız) numunelerdeki UCS dayanımı, diğer oranlardaki YFC ikameli numunelere

göre daha yüksektir. CEM I çimentosu içeriğinde trikalsiyum silikat (C_3S) bileşenine sahip olduğundan dolayı erken dayanım kazanmaktadır. 7 günlük kür süresinde YFC ikame oranı arttıkça numunelerin dayanımında azalma görülmüştür. 28 ve 56 günlük kür sürelerinde ise %0 YFC ikameli numunede ki dayanım, diğer oranlardaki YFC ikameli numunelere göre daha daha düşüktür. YFC ikame oranı arttıkça UCS dayanımlarında artış görülmüştür. En yüksek dayanım 56 günlük kür süresinde %20 CEM I - %50 YFC ikameli numunede görülmüştür. 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında şu sonuca varılmaktadır; YFC'nin belli oranlarda CEM I çimento ile ikamesi neticesinde basınç dayanımının, doğal puzolan ikamesiyle erken yaşlarda düşük, geç yaşlarda ise daha yüksek basınç dayanımına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca kür şartları da dayanımı etkilemektedir. Çimento içerisine ilave edilen puzolanlar, çimento ile hidrasyonu sonucunda C-H jelleriyle reaksiyona girmekte ve yeni C-S-H jelleri oluşmaktadır. YFC gibi puzolanik maddeler, dayanımlarını geç kazanmaktadırlar ve bu nedenle 56 günlük DKK'nın dayanımları yüksek çıkmıştır.

Tek eksenli basınç deneylerinde bağlayıcı madde oranı ve kür süresi arttıkça numunelerin daha kırılğan davranışta oldukları ve kırılma piklerinin daha belirgin olduğu belirlenmiştir.

Geçirimsizlik katsayısı değerleri numune içerisindeki çimento miktarına, YFC oranına ve kür süresine göre değişiklik göstermektedir. 28 günlük küre maruz bırakılmış numuneler arasında permeabilite katsayısı en büyük olan numune; %15 CEM I - %0 YFC ikameli numune olup permeabilite katsayısı $9,17 \times 10^{-10} \text{cm/sn}$ 'dir. 28 günlük küre bırakılmış YFC ikameli derin karıştırma kolonlarından, permeabilite katsayısı en küçük olan numune %20 CEM I - %50 YFC ikameli numune olup, permeabilite katsayısı $2,66 \times 10^{-10} \text{cm/sn}$ 'dir.

Kür süresi arttıkça geçirimsizlik azalmakta, %20 CEM I - %0 YFC ikamesiyle hazırlanmış olan numunelerde 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, geçirimsizlik katsayısının 28 günlük küre maruz kalmış numunelere göre 4.7 kat azalmıştır. YFC ikameli çimentolarda, kür süresi uzadıkça hidrasyonu reaksiyonu hızlanmakta ve puzolanik reaksiyonun hızlanması ile oluşan jel miktarları artmakta, numunelerin geçirgenliği azalmaktadır. Kür süresi uzadıkça geçirgenlikteki azalmanın nedeni, C-A-S-H ve C-S-H jellerinin kil parçacıklarının arasındaki gözenek büyüklüğündeki azalma ile ilgili olduğu görülmektedir.

Yarmada çekme deneyinde ise karışımdaki YFC ikamesi oranı arttıkça çekme gerilmesi miktarında da artışlar görülmektedir. 56 günlük küre maruz kalmış numunelerde en yüksek çekme dayanımı %20 CEM I - %50 YFC ikameli numunede görülmüştür. 56 günlük küre maruz numunelerde en düşük çekme dayanımı %20 CEM I - %0 YFC ikameli numunede görülmüştür. Farklı oranlardaki YFC ikameli DKK numunelerinde kür süresi arttıkça çekme dayanımında artışlar gözlenmiştir. Çekme dayanımı iksa yapılarında, tünellerde, jet grout gibi yapılarda önem teşkil etmektedir.

Büyük ölçekli DKK imalatı için %20 CEM I çimento oranı ve %0, %20, %35, %50 oranlarındaki YFC ikameleri seçilerek ve 4 adet büyük ölçekli DKK imal edilmiştir. 28 günlük kür süresi sonrasında her bir derin karıştırma kolonundan 5 cm çapında karot örnekleri alınmıştır. Karot örnekleri üzerinde yapılan UCS deney sonuçlarına göre en yüksek dayanım %20 CEM I - %50 YCF ikameli numunede, en küçük değer ise %20 CEM I - % 0 YFC ikameli numunede görülmüştür. Büyük ölçekli DKK ve küçük ölçekli DKK deneyleri kıyasladığında; büyük ölçekli DKK karot numuneleri UCS deneyleri için elde edilen dayanım değerleri sonuçları, küçük ölçekli DKK dayanımlarının yaklaşık %60-%85'i arasındadır.

Karot numuneleri için yarmada çekme deney sonuçlarına göre; en yüksek dayanım %20 CEM I - %50 YCF ikameli numunede, en küçük değer ise %20 CEM I - % 0 YFC ikameli numunede görülmüştür. Büyük ölçekli DKK karot numunelerinin dayanımları küçük ölçekli DKK dayanımlarının yaklaşık %60-%80'i arasındadır.

Karot numuneleri için permeabilite deney sonuçlarına göre en düşük geçirimsizlik %20 CEM I - %50 YCF ikameli numunede, en büyük geçirimsizlik değeri ise %20 CEM I - % 0 YFC ikameli numunede görülmüştür.

Dayanım ve geçirimsizlik anlamında küçük ölçekli numunelerin daha istenilen düzeyde olması, küçük ölçekli DKK numuneleri hazırlanırken zeminin 2 mm çapındaki elekten elenmiş olması ve böylelikle homojen bir yapı içermesidir. Fakat büyük ölçekli DKK imalatında arazideki doğal zemin doğrudan kullanılmakta ve bünyesinde daha büyük çapta, çakıl boyutunda tanecikler içermektedir. Büyük ölçekli DKK numuneleri için oluşturulan karışımlarda, küçük ölçekli DKK numunelerindeki gibi homojenlik sağlanamamıştır. Böylece daha az C-S-H jelleri elde edilmiş ve dayanımda azalma ve bünyesindeki boşluktan dolayı küçük ölçekli derin karıştırma kolonu numunelerine göre daha fazla geçirimli bir yapı oluşmuştur.

YFC, yüksek puzzolanik aktiviteye sahip olup, su ve çimentolu ortamda C-S-H jeli oluşması en önemli özelliğidir. Çalışmada kullanılan saf kil, XRD analizi desende

56.2° ve 73.5° (2Theta)'de kaolinit minerali olduğu tespit edilmiştir. SEM analizinde, yüzey alanında C-S-H, etrenjit, CH jellerine rastlanmıştır. YFC ikame oranı arttıkça C-S-H jellerinde artış gözlenmiştir.

5.2. Öneriler

CEM I çimentosuna belli oranlarda YFC ikame edilerek yapılan çalışmada en yüksek dayanım %50 YFC ikamesi oranındaki karışımlarda gözlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda bu oranın artırılarak diğer oranlardaki sonuçlarının detaylı olarak araştırılması planlanmaktadır.

Çalışmada zemin olarak killi zemin kullanılmış olup, YFC ikamesinin etkisi kum, silt gibi zeminlere ilave edilmesiyle nasıl değişeceğinin araştırılmasının önemli olduğu düşünülmektedir.

Dayanımda kür şartları ve kür süresinin etkili olduğu görülmektedir. Bu nedenle farklı kür metotları kullanılarak bunların dayanıma ve geçirgenliğe etkilerindeki değişimlerin nasıl olacağı hakkında detaylı araştırma yapılması gerekmektedir.

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.
- Anonim, An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications, U.S Federal Highway Administration, 2000.
- Anonim, TS EN 14679 Özel jeoteknik uygulamalar-derin karıştırma, TSE Ankara, 2006.
- Bagherinia, M. (2019), Derin Karıştırma Yöntemi ile Düşük Plastisiteli Kil Zeminin Biyopolimer ve Bazik Kimyasallar Kullanılarak İyileştirilmesi, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Beycioğlu, A., Başığit, C., Subaşı, S.(2008), “Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması” Çevre Sorunları Sempozyumu, Kocaeli, 1386-1394.
- Brooks, J. J., Wainwright, P. J., Boukendakji, M., (1992), Influence of Slag Type and Replacement Level on Strength, Elasticity, Shrinkage and Creep of Concrete. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, 1325-1341.
- Bruce, D. A., 2000, An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications.
- Bunavan, A. R., Rashid, A. S., Said, K. N. M. (2017). The Deep Mixing Method: Bearing Capacity Studies. *Geotech Geol Eng*, 1272, 1215.
- Chew, S., Kamruzzaman, A. ve Lee, F., 2004, Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (7), 696-706.
- Deb, K., Das, J. ve Patel, S., 2017b, Effect of Cement Constituents on Strength Improvement of Cement Stabilized Soil, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, India, *Marine Georesources & Geotechnology*.
- Dias, D.R., Camarini, G., 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 2012*, Geotechnical Special Publication (GSP) No. 228.

- Elibol, C., (2012), Alkalilerle Aktivite Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tez, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 15-17.
- Erdoğan, T.Y., 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 741.
- Erdoğan, T., Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2004.
- Hogan, F. J., Meusel, J. W., 1981. Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag. Cement Concrete Aggregates, Vol. 3, No. 1, pp. 40–52.
- Holm, G. (1999). Applications of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. In H.Bredenberg, G. Holm and B. B. Broms (Eds.), Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. Rotterdam. Balkema, pp. 5.
- İnternet: MODEL&CO Foundation Engineering Equipment, URL: https://www.modelco.com/en/applications/grouting-applications/wet_soil_mixing, (Son Erişim Tarihi: 28.07.2019)
- Kaya, Z. (2016), Derin karıştırma kolonlarının ölçülen ve hesaplanan hapsitelerinin tam ölçekli yükleme deneyleri ile incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-8.
- Kılıç, H. O. (2013). Derin Karıştırma Yöntemi Tasarım ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 17-19.
- Kırgız, M.S., İkameli Ve Katkılı Çimento Pastalarının Hidratasyon Bileşiklerinin Taramalı Elektron Mikroskopu Kullanılarak Belirlenmesine İlişkin Literatür Araştırmaları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(1), 73-90.
- Kosmatka, StevenH. Kerkhoff, Panaree., and William, C., “Design and Control of Concrete Mixtures” Portland Cement Association Publication, 2003.
- Lorenzo, G. A. ve Bergado, D. T., 2004, Fundamental parameters of cement-admixed clay—New approach, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (10), 1042-1050.
- Madhyannapu, R. S., Puppala, A. J., Bhadriraju, V. ve Nazarian, S., 2009, Deep Soil Mixing (DSM) Treatment of Expansive Soils, In: Advances in Ground Improvement: Research to Practice in the United States and China, Eds, p. 130-139.

- Nakamura, N., Sakai, M., Swamy, R..N., SWAMY, R. N., 1992. Effect of Slag Fineness on the Development of Concrete Strength and Microstructure. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1343-1366.
- Newman, J., Choo, B. S. (2003). Advanced Concrete Technology. Constituent Materials, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Nguyen, L. D., 2016, Developing constitutive model to simulate behaviour of cement treated clay composite capturing effect of cementation degradation.
- Noori, M. A. (2019), Katkı İçerikli Derin Karıştırma Kolonları Performans Özelliklerinin Model Deneylerle Araştırılması, Yüksek Lisans tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Özturan, T., 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği. 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 280–293.
- Pakbaz, M.S., Alipour, R., 2012. “Influence Of Cement Addition On The Geotechnical Properties Of An Iranian Clay”, Department of Civil Engineering, Shahid Chamran Univ., Ahvaz, Iran. Geotechnical Engineering, Sazabpardazan Consulting Engineers Co., Ahvaz, Iran.
- Pathivada, S. P., 2005, Effects of water-cement ratio on deep mixing treated. arlington, ABD, The University Of Texas.
- Rajasekaran G. (2005), Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays.
- Shrestha, R., 2008. “Soil Mixing: A Study on ‘Brusselian Sand’ Mixed with Slag Cement Binder”, Master Dissertation, University of Ghent, University of Brussle.
- Siva, P.P., 2005. “Effects of water-cement ratio on deep mixing treated expansive clay characteristics”, Master of science in civil engineering, The university of Texas at arlington.
- Şengör, M. Y. (2011), Yumuşak kil zemin içinde derin karıştırma kolonlarının deformasyon karakteristikleri, bir model deney çalışması, Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Terash, I. 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.
- Tokyay, M. (2003), Cüruflar ve cürüflü çimentolar araştırmaların gözden geçirilmesi ve durum değerlendirmesi raporu, TÇMB, Ankara, 47.
- TS EN 14679, 2006. Özel jeoteknik uygulamalar derin karıştırma, TSE Ankara.

- Uddin, K., Balasubramaniam, A. ve Bergado, D., 1997, Engineering behavior of cement-treated Bangkok soft clay, *Geotechnical Engineering*, 28, 89-119.
- Wahidy, M. (2019), Derin Karıştırma Kolonlarının Performansı Üzerinde Farklı Özellikteki Çimentoların Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Ye, G., Xu, C. ve Gao, Y., 2006, Improving soft soil using combined cement deep mixing column and preloading with prefabricated vertical drains, In: *Ground Modification and Seismic Mitigation*, Eds, p. 23-28.
- Yi, Y. Liska, M., 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.



ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Gülsüm Yalçinyiğit
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya /1985
Telefon : 0537 235 4353
Faks :
E-Posta : gulsumyalcinyigit@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Atatürk S.M. Lisesi	Selçuklu	Konya	2003
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	Selçuklu	Konya	2009
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi		Konya	2019
Doktora	:			

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2006-2017	KEAH	Laborant
2017-Halen	KEAH	İnşaat Mühendisi

YABANCI DİLLER

İngilizce