

T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



MİKRO TANELİ ÇİMENTO VE UÇUCU KÜL
KARIŞIMLARININ JET GROUT
KOLONLARINDA ENJEKTE
EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Hurşit BATTAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

MAYIS-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

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.

Hurşit BATTAL



TEZ KABUL VE ONAYI

Hurşit BATTAL tarafından hazırlanan “**Mikro Taneli Çimento ve Uçucu Kül Karışımlarının Jet Grout Kolonlarında Enjekte Edilebilirliğinin Araştırılması**” adlı tez çalışması 02/05/2019 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

Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi. Atila DEMİRÖZ

Üye

Prof. Dr. Özcan TAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA
LEE Müdürü

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

MİKRO TANELİ ÇİMENTO VE UÇUCU KÜL KARIŞIMLARININ JET GROUT KOLONLARINDA ENJEKTE EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Hürşit BATTAL

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

2019, 121 Sayfa

Jüri

Danışmanın Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Prof. Dr. Özcan TAN

Jet grout, dünya genelinde yaygın kullanılan ve başarılı sonuçlar veren bir zemin iyileştirme uygulamasıdır. Bununla birlikte geoteknik mühendisleri ve uygulayıcıları açısından, en güvenilir yöntemlerden biri olma özelliğini sürdürmektedir. Jet grout yöntemi ile zayıf zeminlerin, taşıma gücü, geçirimsizlik ve oturma gibi özellikleri iyileştirilmektedir. Genel anlamda bir delgi makinesine bağlı tijlerin, iyileştirme yapılacak derinliğe indirilmesi; tijin ucundan yüksek basınçlı çimento harcı gönderilmesi, belirli bir hızda tijin döndürülmesi ve yukarı çekilmesi esasına dayanmaktadır.

Tez çalışmasında, laboratuvarında yapılan model deneylerle jet enjeksiyon karışımlarının enjekte edilebilirliği araştırılmıştır. Normal Portland çimentosu (NPÇ), mikro taneli çimento (DMFC-800) ve bu iki tip çimentonun ağırlığının %15'i oranında, F tipi uçucu kül (UK) eklenerek oluşturulan karışımlardan 4 farklı bağlayıcı tip oluşturulmuştur. Normal Portland çimentosu içeren bağlayıcılar için su/çimento 0.8, 1.0, 1.2 ve 1.4 oranlarında seçilen enjeksiyon harçlarıyla jet grout kolonları oluşturulmuştur. Mikro taneli çimento içeren bağlayıcılarla oluşturulan enjeksiyon harçları için su/çimento 0.8, 1.0, 1.4, 1.8, 2.4 ve 3.0 oranlarında jet grout kolonları imal edilmiştir. Oluşturulan kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinde, serbest basınç ve yarmada çekme dayanım deneyleri yapılmıştır. 4 farklı bağlayıcı tip kullanılarak oluşturulan jet grout kolonları içerisinde, su/çimento oranı 0.8 olan kolonlarda en yüksek serbest basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Mikro taneli çimento içeren S/B oranı 0.8 olan kolonun ortalama serbest basınç dayanım değeri 18,80 MPa'dır. Yarmada çekme dayanımında ise mikro taneli çimentoya ağırlığının %15'i oranında uçucu kül eklenerek su/çimento oranı 0.8 olan, jet grout kolonunda yarmada çekme dayanım değeri 2,52 MPa bulunmuştur. Jet grout kolonlarından alınan numuneler üzerinde SEM ve EDS analizleri yapılarak, bağlayıcı malzemelerin morfolojik yapıları ve elementel yüzdeleri belirlenmiştir. Serbest basınç dayanım değerlerinde düşük S/Ç oranlı karışımlarda, uçucu külün olumlu etkisi yeterince görülmemişken, su miktarının arttığı yüksek su/çimento karışımlarda ise uçucu külün etkisinin daha belirgin olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Jet Grout (JG), Mikro Taneli Çimento (DMFC-800), Uçucu Kül (UK), Serbest Basınç Dayanımı, Yarmada Çekme Dayanımı, SEM ve EDS analizi

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF INJECTABILITY OF MICROFINE CEMENT AND FLY ASH MIXTURES IN JET GROUT COLUMNS

Hurşit BATTAL

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
KONYA TECHNICAL UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ

2019, 121 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ
Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA
Prof. Dr. Özcan TAN

Jet grout is a soil improvement application that is widely used worldwide and gives successful results. In addition, it remains one of the most reliable methods for geotechnical engineers and practitioners. The jet grout method improves the properties of poor soils such as bearing capacity, permeability and consolidation. In general terms, it is based on the principle of lowering the mandrel connected to a drilling machine to the depth to be improved, sending a high pressure cement mortar from the tip of the spindle, turning the sprocket at a certain speed and pulling up.

In the thesis study, the injectability of jet injection mixtures with model experiments in laboratory was investigated. Four different types of binders have been prepared which was; ordinary Portland cement (OPC), micro-granular cement (DMFC-800) and F-type fly ash (FA) admixed of 15% by weight of these two types of cement. Jet grout columns were formed with the injection mortars chosen as 0,8, 1,0, 1,2 and 1,4 for water / cement (w / c) ratio for binders containing normal Portland cement. Jet grout columns were produced for the injection mortars formed with micro-grained cement-containing binders, where the w/c ratio was chosen as 0,8, 1,0, 1,4, 1,8, 2,4 and 3,0. Unconfined compressive strength (UCS) and splitting tensile strength (STS) tests were performed on core samples taken from the columns. The highest UCS values were obtained in the columns with w/c ratio of 0,8 in the jet grout columns formed using four types of binders. The average UCS value of the column, which has a w/c ratio of 0,8, is 18,80 MPa. The STS value of the JG column which formed by using DMFC-800 and the W/C ratio of injection mixture 0,8 was approximately 2,52 MPa. Morphological structures and elemental percentages of the binding materials were determined by SEM and EDS analyzes on the samples taken from JG columns. While the positive effect of the fly ash was not found to be sufficient in the UCS values of low w/c ratios, the effect of the fly ash on the mixtures with high w/c ratio was observed to be more significant.

Keywords: Jet Grout (JG), Micro Grained Cement (DMFC-800), Fly Ash (UK), Free Compressive Strength, Tensile Tensile Strength, SEM and EDS analysis

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans çalışmalarında benden yardımlarını esirgemeyen, hayatım boyunca mühendislik çalışmalarını örnek alacağım saygı değer hocam Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Beni yönlendiren, bilgilerini paylaşan, yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Özcan TAN'a ve Doç. Dr. Murat OLGUN'a teşekkür ederim. Tez çalışmam içerisinde yer alan laboratuvar deneyleri ve analizlerinde yardım ve katkıda bulunan deneylerimi gerçekleştirebilmek için bana imkân sunan Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA'a ve ARES çimentoya desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hurşit BATTAL
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1.1. Jet grout yöntemi	20
3.1.1.1. Çatlatma enjeksiyonu.....	22
3.1.1.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu	22
3.1.1.3. Sızdırma enjeksiyonu.....	23
3.1.1.4. Jet Enjeksiyonu (Jet Grout).....	24
3.1.2. Jet grout yapım aşamaları	24
3.1.2.1. Delgi.....	25
3.1.2.2. Enjeksiyon (Jetleme).....	25
3.1.3. Jet grout uygulama yöntemleri	27
3.1.3.1. Tek akışkanlı sistem (JET-1)	27
3.1.3.2. Çift akışkanlı sistem (JET-2)	28
3.1.3.3. Üç akışkanlı sistem (JET-3).....	28
3.1.3.4. Süper jet yöntemi	29
3.1.4. Parametrelerin belirlenmesi	30
3.1.4.1. Enjeksiyon basıncı	33
3.1.4.2. Çekme-dönme hızı	33
3.1.4.3. Su/Bağlayıcı (S/B) Oranı-Dozaj	35
3.1.5. Jet Grout ekipmanları.....	35
3.1.5.1. Delgi Makinesi.....	36
3.1.5.2. Yüksek basınç pompası	37
3.1.5.3. Mikser ünitesi	37
3.1.5.4. Çimento silosu	37

3.1.5.6. Monitör	38
3.1.6. Jet Grout Yönteminin Uygulama Alanları.....	38
3.1.7. Jet Grout Özellikleri.....	39
3.1.8 Jet Grout Kolonlarının Kalite Kontrolü.....	40
3.1.8.1 Karot numune alınması ve çap kontrolü	40
3.1.8.2. Dayanım kontrolü	41
3.1.8.3. Yükleme deneyleri.....	42
3.1.8.4. Bütünlük deneyi (integrity).....	43
3.1.8.5. İyileştirilmesi yapılan sahada zemin kontrollerinin yapılması	44
3.2. Kullanılan Bağlayıcı Malzeme Özellikleri	45
3.2.1. Normal Portland Çimentosu (CEM I 42,5R).....	45
3.2.2 Mikro Taneli Çimento (DMFC-800).....	46
3.2.3. Uçucu Kül (UK).....	48
3.2.3.1 Uçucu küllerin özellikleri	50
3.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kumun Özellikleri.....	52
3.4. Çimento Süspansiyonları	53
3.5. Çimento Karışımlarının Reolojik özellikleri	54
3.5.1 Marsh Hunisi Deneyi.....	54
3.5.2 Sedimentasyon (çökeltme) Deneyi	55
3.5.3 Vicat İğnesi Deneyi	56
3.6. Laboratuvarda Jet Grout Kolonlarının Üretilmesi.....	58
3.6.1. Deney İçin Zemin Ortamının Hazırlanması.....	59
3.6.2. Enjeksiyon Karışımlarının Hazırlanması.....	59
3.6.3. Jet Grout Kolonlarının İmalat Parametreleri ve Deney Programı	60
3.6.4. Jet Grout Deney Düzenineğinin Kalibrasyon Yapılması.....	61
3.6.5 Deneme Kolonlarının Yapılması	62
3.6.6. Laboratuvarda Jet Grout Kolonlarının İmalatı.....	63
3.7. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Laboratuvar Deneyleri.....	64
3.7.1. Serbest Basınç Deneyi	64
3.7.2. Yarmada Çekme Deneyi.....	66
3.7.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	67
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	71
4.1. Reolojik Deney Sonuçları.....	71
4.1.1.Marsh Hunisi Deney Sonuçları.....	71
4.1.2. Sedimentasyon Deney Sonuçları	73

4.1.3. Vicat iğnesi deney sonuçları	75
4.2. JG Kolonları Üzerinde Yapılan Çalışmalar	76
4.2.1. Jet Grout Kolonların Boy ve Çaplarının Ölçülmesi.....	76
4.2.2. Jet Grout Kolonlarından karot Numunelerinin Alınması	80
4.3. Karot Numuneleri Üzerinde Serbest Basınç Deneyleri	83
4.4. Karot Numuneler Üzerinde Yarmada Çekme Deneyleri.....	94
4.5 SEM ve EDS Analizi	100
4.5.1 SEM Analizi Sonuçları	100
4.5.2 EDS Analizi Sonuçları.....	105
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	109
5.1. Sonuçlar	109
5.2. Öneriler	113
KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	121

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

MPa	: Mega pascal
kPa	: Kilo pascal
KWh, KW	: Kilowatt
kV	: Kilvolt
MW	: Megawatt
mm	: milimetre
km	: Santimetre
m	: Metre
dak	: Dakika
NaOH	: Sodyum Hidroksit
CaOH	: Kalsiyum Hidroksit
CaO	: Kalsiyum oksit
SiO ₂	: Silika
Na ₂ SiO ₄	: Sodyum Silikat
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
Na ₂ SO ₄	: Sodyum Sülfat
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
MgO	: Magnezyum oksit
Dr	: Rölatif sıklık
D ₁₀	: Efektif tane çapı
Cu	: Üniormluk katsayısı
Cr	: Derecelenme katsayısı
e	: Boşluk oranı
e _{maks.}	: Maksimum boşluk oranı
e _{min.}	: Minimum boşluk oranı
γ _s	: Tane birim hacim ağırlığı
γ _{kmin}	: Minimum kuru birim hacim ağırlığı
γ _{kmaks.}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
S	: Kum
SP	: Kötü derecelenmiş kum
P	: Enjeksiyon basıncı
D	: Tıjın dönme hızı
rpm	: dönüş hızı(1 dak. devir sayısı)
V	: Tıjın çekme hızı
SP	: Kötü derecelendirilmiş kum
σ _B	: Basınç dayanımı
σ _Ç	: Çekme dayanımı
P _{max.}	: Maksimum kırılma yükü
A _o	: Başlangıç en kesit alan
A _f	: Kırılma anındaki kesit alan
ε	: Birim boy değiştirme

Kısaltmalar

JG	: Jet Grout
JET-1	: Tek Akışkanlı Jet grout Sistemi
JET-2	: Çift Akışkanlı Jet grout Sistemi
JET-3	: Üç Akışkanlı Jet grout Sistemi
UK	: Uçucu Kül
SD	: Silis Dumanı
GYFC	: Granülo Yüksek Fırın Curufü
B	: Bentonit
SAK, SA	: Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal
KK	: Kızdırma Kaybı
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflandırılması
NPÇ	: Katkısız (Normal) Portland Çimentosu
PÇ	: Portland Çimentosu
DMFC-800	: Mikro Taneli Çimento
s/ç	: su/çimento oranı
s/b	: su/bağlayıcı oranı
D	: Çap
H	: Yükseklik
İDY	: İnce Tane Yüzdesi
S	: Slump (Çökelme) Değeri
KSB	: Kendinden Sıkışan Beton
SBD	: Serbest Basınç Dayanımı
YÇD	: Yarmada Çekme Dayanımı
HSC	: Yüksek Dayanımlı Beton
SPT-N	: Standart Penetrasyon Sayısı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SE	: İkincil Elektron
BSE	: Geri Yansıyan Elektron
AE	: Auger Elektron
PE	: Temel Elektron
WDS	: Dalga Dağıtıcı Işın Metodu
C-S-H	: Kalsiyum-Silica-Hidrate Jeli
CH	: Kalsiyum Hidraoksit
EDS	: Elektron Dağılım Spektrumu
ASCE	: Amerikan İnşaat Mühendisliği Birliği

1. GİRİŞ

Günümüzde hızlı nüfus artışı nedeniyle, kentlerdeki yerleşim alanlarının hızlı azaldığı görülmektedir. Özellikle metropol kentlerde, sanayi ve yerleşim bölgelerindeki arsa sıkıntısı ve yüksek maliyetler nedeniyle, taşıma gücü ve oturma problemleri olan zeminlerde de mühendislik yapılarının inşası zorunlu olabilmektedir. Taşıma gücü ve oturma kriterlerinin sağlanması için temel zemininin mühendislik özellikleri, çeşitli yöntemlerle iyileştirilmekte veya yapıdan gelen yükler daha derinlerdeki sağlam tabakaya aktarılmaktadır.

Zemin, bina temeli altında taşıyıcı tabaka ayrıca inşaat malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Zeminin mühendislik özellikleri zeminin cinsi yanında arazi koşullarına bağlı olarak (sıklık derecesi, su muhtevası, konsolidasyon basıncı, yükleme ve drenaj koşulları gibi) geniş bir aralık içinde değişmektedir. Fakat zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilirler. İnşaat yapılacak alanın değiştirilmesi veya istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin atılarak, yerine elverişli zeminlerin kullanılması ise teknolojik ve ekonomik nedenlerden dolayı uygun çözümler olarak görülmemektedir. Bu gibi durumlarda, arazideki zemin özelliklerinden kaynaklanan sınırlamaları belirlemek ve tasarım sağlayacak şekilde zemin iyileştirilmesi, zeminin mukavemetinin artırılması sağlanırken, zeminin geçirimsizliğinin azaltılması gibi iyileştirilecek metodun benimsenmesi yoluna başvurulmaktadır. Bu amaçla, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranı azaltılabilir veya boşluklara çimento, kireç, bentonit vb. kimyasal karışımlar enjekte edilebilir. Ancak, zeminlerin kullanım amacına uygun özelliklerde olmadığı, örneğin taşıma gücünün yetersiz olması, oturma koşulunu sağlamaması, yeterli geçirimsizliğe-geçirimsizliğe sahip olmaması gibi problemlerle karşılaşılabilir. Bu gibi durumlarda zeminin özellikleri yeterli olmadığında, zemini iyileştirmek için;

- Kötü zemini geçerek temelleri sağlam tabakaya oturtmak,
- Yapı temellerini zayıf zeminin taşıyabileceği şekilde boyutlandırmak ve inşa etmek,
- Kötü malzemeyi tamamen kaldırarak yerine sağlam zemin doldurmak, ya da doğal zemini iyileştirerek tekrar belirli sıklıkta yerleştirmek,
- Zeminin özelliklerini yerinde yapılan işlemlerle iyileştirme

yapılabilir.

Zemini iyileştirme tekniklerinin, zeminde karşılaşılan problem ve istenilen iyileşme türü ve seviyesine bağlı olarak çeşitli alternatifleri vardır. Bu alternatiflerden en güncel olanı da jet grouting yöntemidir. Enjeksiyon da son yıllarda daha geniş kullanım alanı bulan ve sık başvuru alan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Jet enjeksiyonu 1970'li yıllarda Japonya'dan tüm dünyaya yayılmıştır. Avrupa'da soilcrete adı kullanılmaktadır. Her türlü zayıf zemin tiplerinde ve kum, çakıl, kil gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda, diğer iyileştirme tekniklerinden imalatı hızlı, fayda-maliyet oranı yüksek olduğundan tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem bir veya daha çok akışkanın (çimento şerbeti, hava, su) zemine yüksek basınç altında enjekte edilmesidir. Akışkanlar zemin yüzeyinden uygulama derinliğine kadar indirilmiş tij (çelik boru) üzerinde yer alan 2-4 mm çaplı bir nozülden, borunun zemin yüzeyine çekilmesi aşamasında, yüksek basınç altında enjekte edilmektedir. Uygulanan jet, boru eksenine dik yönde yayılmakta ve zeminle yoğrulma/parçalanma, kısmen erozyon/yüzeye taşınma ve zemin içerisine nüfuz etme (sızma) şeklinde etkileşim oluşturmaktadır. Enjekte edilen çimento şerbeti (su+çimento karışımı), zemin içerisinde zamanla hidrasyona uğramakta ve sonrasında zemin+çimentodan oluşan katılaşmış homojen ve sürekli bir kütle oluşturulmaktadır. Bu kütleler silindirik bir geometriye sahip olup, "jet enjeksiyon kolonu" olarak adlandırılmaktadır.

Termik ısı tesislerinde, enerji üretimi için yakıt olarak öğütülmüş kömür kullanılır. Öğütülmüş kömürün yanmasıyla atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %70-%75'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya doğru çıkmaya çalışır. Çok ince taneli toz halindeki maddeye uçucu kül denilir. Uçucu küller betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, beton teknolojisinde çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında, klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. Puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. Daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, ağırlıkça %20 oranında uçucu kül kullanılmasının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir

(Sümer, 1994). Bunun yanında uçucu kül kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte, prizi geciktirmektedir (Topçu ve Canbaz, 2001).

Tez çalışmasında, endüstriyel atık olan uçucu kül katılarak oluşturulacak jet grout kolonlarında kullanılmasının ana nedeni maliyeti yüksek olan mikro taneli çimentodan tasarruf sağlanmasına yardım ederken; betonun 7-28 günlük dayanımını da etkilediği görülmüştür. İnce taneli yapıya sahip olan uçucu külün katılması betonda daha düzgün bir yüzey oluşturmaktadır. Birim ağırlıkları düşük olduğu için karışımın birim ağırlığının azalmasına neden olmaktadır. Uçucu kül katkılı bir enjeksiyon karışımı, hidrasyon ısısı düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmamakla birlikte betonun işlenebilirliği ve enjekte edilebilirliğini arttırmaktadır. Prizini almış betonda durabilite ve mekanik dayanıma olumlu katkısı olmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında; Normal Portland Çimentosu (NPC) yerine mikro taneli çimento (DMFC-800) kullanılması ve çimentolar ile birlikte belirli bir miktar uçucu kül katkısı kullanılmasıyla oluşturulan jet grout (JG) kolonlarının boyutsal yapıda oluşumu ve performans özellikleri hakkında gerekli bilgilerin verilmesi amaçlanmıştır. JG kolonların oluşumu ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. NPC oluşturulan kolonlar ile DMFC-800 kullanılarak oluşturulan jet grout kolonların karşılaştırılması planlanmıştır. Böylece pratik uygulamalarda inşaatın amacına yönelik olarak hangi çimento ve endüstriyel katkı malzemesi uçucu külün kullanılabilir olduğu konusunda bilgi verilmesi hedeflenmiştir. Jet grout kolonlarının tasarım ve uygulamaları için geliştirilecek şartname, standart ve yönetmelik gibi çalışmalara katkı sağlanması düşünülmüştür. Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır.

- Birinci bölümde, tez çalışmasının amacı ve kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir.
- İkinci bölümde, jet grout yöntemi, mikro taneli çimento, F tipi uçucu kül ve yarmada çekme dayanımıyla ilgili kaynak araştırılmasına yer verilmiştir.
- Üçüncü bölümde jet grout yöntemi, uygulamada kullanılan jet grout sistemleri, jet grout parametreleri, jet grout yönteminin kullanıldığı yerler, imalat aşamasında kullanılan ekipmanlar ve jet grout kolonların imalat sonrasında yapılan kontroller, kısımlar ele alınarak anlatılmıştır. Bu bölümün devamında

deneysel çalışmada kullanılan zemin ve enjeksiyon karışımlarında kullanılan bağlayıcı malzemeler ve deney programı hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

- Dördüncü bölümde laboratuvar deney sonuçları ve SEM analizleri yorumlanmıştır.
- Beřinci bölümde deney sonuçları ve öneriler maddeler halinde verilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Baumann (1984), yedi adet farklı zeminde su/çimento oranına bağlı olarak serbest basınç dayanım etkilerini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre kohezyonsuz zeminlerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğunu, çakıllı kumlu, kumlu siltli ve siltli killi zeminlerde su/çimento oranının azalmasıyla, basınç dayanımında artış olduğu görülmüştür (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Jet grout kolonlarının basınç dayanımları (Baumann, 1984)

Kolon Basınç Dayanımları (MPa)							
Zemin tipi	Kum	Çakıl	Silt, kil	Organik zemin	Çakıllı kumlu	Kumlu siltli	Siltli killi
Kolon no	1	2	3	4	5	6	7
S/Ç = 0,67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12 -18	10 -14	6 -10
S/Ç = 1	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6 -10	5-7	3-5

Lloret ve diğ., (1991), yaptıkları çalışmada sıkıştırılmış siltli dolgu zemin içerisindeki jet grout kolonlarının serbest basınç dayanımı 10 MPa, elastisite modülü 5400 MPa, poisson oranını 0,27 olduğunu belirtmişlerdir.

Zebovitz ve diğ., (1996), yaptıkları çalışmada çok ince taneli çimento enjeksiyonlarının ince-orta taneli kumlu zeminlere enjeksiyonunda enjeksiyon karışımının içine permeasyonun başarılı olduğunu göstermişlerdir.

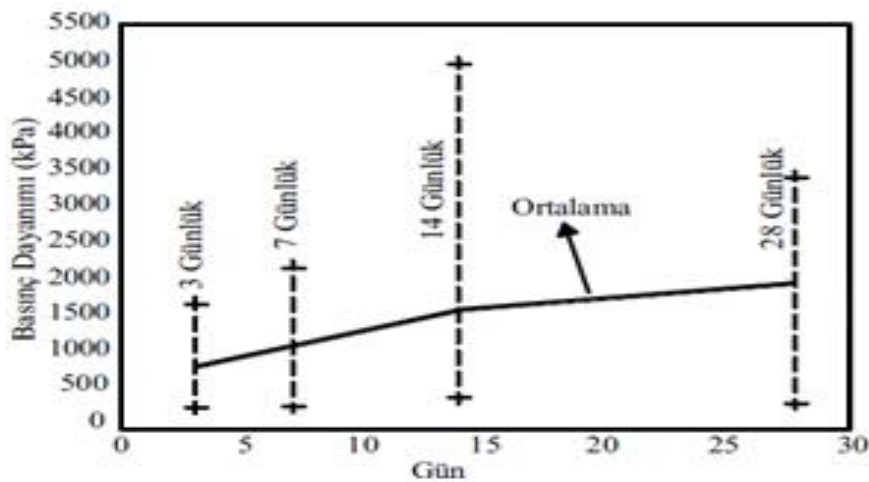
Ballarin ve Forti (1998), yaptıkları çalışmada zemin ve çimento karışımının serbest basınç dayanımının kil, silt zeminlerde 1,2-4 MPa, siltli kumlarda 3-12 MPa ve çakıllar içinde 12 MPa değerlerinde olabileceğini belirtmişlerdir.

Topçu ve Canbaz (2001), endüstriyel atık olan uçucu külün betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanımının, betonun işlenebilirliği ve dayanım özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Deneylerde CEM II-32.5 R çimentosu ve Çayırhan Termik Santrali'nden elde edilen uçucu külünü kullanılarak beton numuneleri 300, 350, 400 kg/m³ dozajda üretmişlerdir. Dozajların her biri için çimento yerine %0, %20 ve %40 oranında uçucu kül katılmıştır. Üretim sırasında taze betonlarda çökme, VeBe, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Her bir karışımdan 9 adet 150x300 mm boyutundaki silindir kalıplara numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler 24 saat bekledikten sonra kalıbından çıkarılıp, 20°C sıcaklıktaki havuzda bekletmişlerdir. Karışımlarda 7, 28 ve 60 günün sonunda yapılan deneylerle uçucu külün 7 günlük numunelerdeki dayanım değerlerinin

az olduğunu, fakat 60 günlük numunelerde uçucu kül oranı %20 olan numunelerin dayanımının normal betonun dayanımından yüksek olduğunu ve uçucu kül oranı arttırıldığında dayanımının geç kazanıldığını belirtmişlerdir.

Akbulut ve Sağlamer (2003), yaptıkları çalışmada taneli karışımların enjekte edilebilirliğinin zeminin tane çapının büyüklüğüne, çimentonun maksimum tane çapına, su/çimento oranına, zeminin ince tane yüzdesine, rölatif sıkılığına ve enjeksiyon basıncının fonksiyonlarına bağlı olduklarını belirtmişlerdir. Seçilen parametrelerle yapılan enjeksiyon uygulamalarının başarılı olduğunu ve niteliğini doğrudan etkilediklerini gözlemlemişlerdir. S/Ç oranı 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0, zeminin rölatif sıkılıkları %30-%80'de, enjeksiyon basınçları 50, 100, 150, 200 ve 250 kPa'da enjekte etmişlerdir. S/Ç oranı 1.0, rölatif sıkılık %80 ve enjeksiyon basıncı 100 kPa'da gerçekleştirilen deneylerde bazı zemin tiplerinde enjeksiyonun başarılı olduğunu, diğer zemin tiplerinde enjeksiyonun yetersiz ve başarısız olduğunu belirtmişlerdir. Nedeninin zemin numunelerinin içerisindeki dane çapı dağılımı ve ince dane yüzdesinin farklılığından dolayı kaynaklandığı sonucunu çıkarmışlardır. Yazarlar; S/Ç oranının 1.0'den büyük olan karışımların enjekte edilebildiğini, dane çapının küçülmesi ile enjeksiyon basıncının arttığını ve karışım içerisindeki 0,6 mm çapından daha küçük daneli zeminlerde ise çimento karışımlarının yapılamadığını belirtmişlerdir.

Bell ve diğ., (2003), araştırmacılar süper jet kolonlarından alınan karot numunelerinde 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarını bulmuşlardır. Süper jet kolonunun zaman içerisinde dayanım aldığını ve 28. günde gerçek dayanımına ulaştığını belirtmişlerdir. (Şekil 2.1)



Şekil 2.1. Süper jet kolonların dayanım ve süre ilişkisi (Bell ve diğ., 2003)

Tan ve Zaimoğlu (2004), yaptıkları çalışmada çimento içerisine farklı oranlarda bentonit, uçucu kül ve silis dumanı ilave ederek hazırlanan enjeksiyon karışımlarının reolojik özellikleri araştırılmıştır. Karışımlarının hazırlanmasında, kullanılan çimento ağırlığının %0, %0,5, %1 ve %3 oranında bentonit, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ve %0, %5, %10 ve %20 oranlarında silis dumanı kullanılmıştır. Bentonit ve silis dumanı oranları arttıkça, çökme yüzdesinin azaldığını ve uçucu kül %20'den sonraki değerlerin arttığını gözlemlemişlerdir. En az çökme yüzdesinin %3 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı karışımlarda olduğunu belirtmişlerdir.

Kavak ve Mutman (2005), çalışmalarında yüksek basınçlı enjeksiyon tekniğinin sıvılaştırma riskini azaltacağını, düşük basınçlı enjeksiyonun sıvılaştırma riskini ne kadar azaltacağı hakkında bir araştırma yapmışlardır. 0,6 mm'den küçük taneli malzeme bulunmayan zeminlerde düşük basınçlı enjeksiyon tekniğinin uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Kumun rölatif sıkılığı $D_r = 25 \pm 5$ olacak şekilde kalıplara yerleştirilen zemin numunelerinin içerisine S/Ç oranı 1.0, 1.5 ve 2.0 olan çimento enjeksiyonları 100, 150 ve 200 kPa enjeksiyon basıncı altında enjekte etmişlerdir. 7 ve 28 günler sonunda numuneler üzerinde serbest basınç deneyi sonuçlarına göre dayanımların doğru orantılı bir artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Su/çimento oranı sabit kalırken enjeksiyon basıncı arttırıldığında, basınç dayanımında artış, enjeksiyon basıncı sabit alınırken su/çimento oranı arttırıldığında basınç dayanımında azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Kavak ve diğ., (2005), çalışmalarında diğ. araştırmacıların yaptığı çalışmalarını (çimento enjeksiyonu-grout) incelemişler ve deneyleri yorumlamışlardır. Çimento ve silis dumanı ile yapılan çalışmalarda; çimentoya kütlece %20 oranında silis dumanı eklendiğinde, her numunenin mukavemet değerlerinin ilavesiz harçlara göre mukavemetin %10 arttırdığını belirtmişlerdir. Normal portland ve ince taneli çimentolar ile yapılan deneylerde ince taneli çimentonun normal portland çimentosuna göre daha kısa enjeksiyon süresi olduğunu belirtmişlerdir.

Türk ve diğ., (2006), tarafından yapılan çalışmada, çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül miktarının kendiliğinden sıkışan betonun (KSB) özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çimento yerine kullanılan farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül miktarına %25, 30, 35 ve 40 oranlarına sahip KSB karışımları sırasıyla KSB-I, KSB-II, KSB-III ve KSB-IV olarak hazırlanan harçlarda çökme-yayıma, t500, L-kutusu ve V-hunisi işlenebilirlik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, karışıma

giren agregalardan doğal kum ve çakıl oranları ile özel süper akışkanlaştırıcı (Viscocrete 3075) miktarı sabit, çimento yerine kullanılan uçucu kül oranları değiştirilmiştir. Karışımlar için optimum işlenebilirlik, S/(Ç+UÇ) oranı değiştirilerek sağlanmıştır. Oluşturulan karışımların çimento ve uçucu kül dozaj toplamaları 500 kg/m^3 olacak şekilde ayarlamışlardır. Elde edilen karışımlar, 3'er adet standart küp (150 mm) ve silindir (150x300 mm) numune kalıplarına sıkıştırma yapılmadan kürek yardımıyla dökülmüştür. Numuneler kalıpta 24 saat bekletildikten sonra 3, 7, 14 ve 28 gün olmak üzere $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ suda küre saklamışlardır.

- KSB-I karışımına ait numunelerin 3 ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri, diğer KSB karışımlarından elde edilen değerlere göre daha yüksek olduğunu,
- KSB karışımında çimento yerine %30-%40 oranında uçucu kül kullanılmasının basınç mukavemetini arttırdığını,
- Çimento yerine %25 oranında uçucu kül içeren KSB-I karışımına ait numunelerin, diğer KSB karışım numunelerine göre daha erken çekme mukavemeti kazandığını,
- Uçucu kül miktarının KSB karışımlarında elde edilen numunelerin erken çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu,
- Uçucu kül miktarı ne kadar fazla olursa erken çekme mukavemetinin de o kadar düşük olduğunu,

belirtmişlerdir.

Arslan (2006), çalışmasında betonun basınç altında çekme dayanımının şekil ve boyut değişimlerinden nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Brezilya yarma deneyi olarak adlandırılan *Silindir Yarma Deneyinin* silindir ve küp numuneler üzerinde yarmada çekme deneyleriyle ilgili çalışmalar yapmıştır. Yarmada çekme deneyine ek olarak betonun basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve Elastisite modülü deneyleri etkileri üzerinde de deneyler yapmıştır. Beton numuneleri için CEM II-42,5 çimentosu ve karışımda maksimum tane çapı 8 mm, kum agregası kullanmıştır. S/Ç oranı 0,53 olan betondan 2 farklı geometrik şekil ile 3 farklı boyuta sahip beton numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımlarının değişimi tespit etmiştir. Kalıp boyutları yarmada çekme dayanımı deneyleri için 5x5 cm, 10x10 cm, 20x20 cm silindir ve küp numuneler için 5x5x5 cm, 10x10x10 cm, 20x20x20 cm boyutlarındaki beton numunelerinden 3 adet beton numuneleri ve basınç dayanımı için 15x15x15 cm ve eğilmede çekme deneyi için

10x10x50 cm'lik numuneleri hazırlamıştır. 28 günlük kür işlemi sonrasında basınç dayanımını 42,65 MPa, eğilmede çekme dayanımını 2,36 MPa olarak bulmuşlardır. Yarmada çekme numuneleri kırıldığında 5x5x5 cm'lik küp numunesinin 5,13 MPa iken aynı boyuttaki silindir numunesi 5.41 MPa çıkmıştır. Numunelerin boyutu büyüdükçe kırılma yükünde artış, çekme dayanımında azalma olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak; betonun çekme mukavemetinin boyuta bağlı olarak değiştiğini ve betonun çekme dayanımının belirlenmesinde en uygun sonucunun silindir yarma deneyinden elde edileceğini belirtmiştir.

Özdemir, (2006), yaptığı çalışmasında, portland çimentosu ve mineral katkı maddeleriyle hazırlanan harç numunelerinin işlenebilirlik, basınç, eğilme, aşınma ve rötre özelliklerine olan etkileri incelemiştir. S/Ç 0,5 oranında hazırlanan karışımlarda basınç, eğilme, aşınma dayanımı sonuçlarına göre tekli mineral karışımlarda %5-%30, uçucu kül, %5-%20 silis dumanı, %5-%50 granüler yüksek fırın curufununun çimento katkı malzemesi olarak kullanılabilceğini belirtmiştir. 12 ayın sonunda ikili mineral karışımlardan SD+UK içeren numuneler %1-%13, SD+GYFC içeren numuneler %1-%9 ve üçlü mineral karışımlar içeren numuneler ise %2-%15 oranında şahit numuneden daha yüksek basınç değerleri ve harç numunelerinin aşınma değerlerinin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Tüm karışımlarda, uçucu külün rötreyi azalttığı ve silis dumanın rötreyi arttırdığı görülmüştür.

Özgan ve diğ., (2007), çalışmalarında 2-6 atmosfer enjeksiyon basıncında düşük poroziteli zeminlerde ince taneli (MICROCEM 900H) çimento enjeksiyon uygulanması hakkında deneysel bir araştırma yapmışlardır. Bu amaçla laboratuvar ortamında enjeksiyon düzeneği kurduktan sonra. Enjeksiyon yapılacak zeminde 20/80, 30/70, 40/60 kum/çakıl oranına sahip üç tip zemin seçmişlerdir. Deneylerde bu zemin numunelerinin rölatif sıklıklarını iki farklı sıklıkta ($D_r = 0,35$ ve $D_r = 0,70$) seçmişlerdir. MICROCEM 900H çimentosunun içerisine çimento ağırlığının %2 ve %5 oranında RHEOBUILD 1000 süper akışkanlaştırıcı (SAK) kimyasal katkı, %3 Na_2SiO_4 ve %5 bentonit, 4 farklı enjeksiyon karışımlarını (%5 SAK, %2 SAK, %3 Na_2SiO_4 ve %2 SAK + %5 bentonit + %3 Na_2SiO_4) hazırlayarak deney yapmışlardır. İnce taneli çimento enjekte edilen numunelerin 37,5 mm çapında ve 75 mm uzunluğunda silindir numuneler hazırlamışlardır. Belirledikleri oranlardaki enjeksiyonları gerçekleştirdikten sonra oluşturdukları silindirik numuneler 7 ve 28. gün sonunda serbest basınç dayanımları

incelemişlerdir. Yazarlar 28 günlük deney sonuçlarını dikkate aldıklarında en yüksek basınç dayanımının 118 kg/cm^2 olduğunu, bu değeri veren parametreler olarak kum/çakıl oranı 20/80, $D_r=0,35$ ve enjeksiyon basıncının 6 atmosfer basınç altında yapılan karışımlardan elde etmişlerdir. En düşük dayanım olarak 63 kg/cm^2 değerini veren parametreler ise kum/çakıl oranı (40/60), sıklık derecesi %35, Na_2SiO_4 %3 ilave edilerek ve enjeksiyon basıncı 2 atmosfer olduğunda yapılan karışımlardan elde edildiğini belirtmişlerdir.

Gökdemir ve Yıldız (2008), yaptıkları çalışmada farklı katkılı çimento enjeksiyonunun düşük poroziteli granüler zeminlerdeki basınç dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla laboratuvar ortamında enjeksiyon düzeneği kurduktan sonra enjeksiyon basınç değerlerini 2-6 atm basıncı seçmişlerdir. Enjeksiyon işlemi yapılacak zemin 20/80, 30/70, 40/60 kum/çakıl oranına sahip üç tip zeminden oluşmaktadır. Zemin numunelerinin rölatif sıklıkları %35 ve %70 ve PÇ 32,5 çimentosu kullanmışlardır. Çimentonun içerisine çimento ağırlığının %2-%5 süper akışkanlaştırıcı kimyasal (SAK), %3 Na_2SiO_4 ve %5 bentonit oranında üzere 4 farklı enjeksiyon karışımlarında deneyler yapılmıştır. Su/çimento 0,6, 0,8 ve 1,0 oranında üç farklı su/çimento oranı seçmişlerdir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Çizelge 5'te verilmiştir. Aynı zemin koşullarında enjeksiyon basıncının arttırıldığında basınç dayanımında artış, kum/çakıl oranının artmasında enjeksiyon değerlerinde azalışların olduğunu ve rölatif sıklığın artığında ise dayanımlarda azalmaların olduğunu görmüşlerdir. Enjeksiyon basıncının zemini yırtma gücünün yetersiz olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 5. Enjeksiyon basıncı 2 atm ve kum/çakıl=20/80 olan $D_r=0,35$ 'deki enjeksiyon uygulanmış numunelerin dayanım değerleri (Gökdemir ve Yıldız, 2008)

Deney No	Katkı Maddesi	Kum/Çakıl (%)	Rölatif Sıklık (D_r)	S/Ç	Enj. Basıncı (atm)	Viskozite (sn)	Basınç Dayanımı (kg/cm^2)	
							7. gün	28. gün
1		20/80	0,35	0,6	2	34	-	-
2	%5 SAK	20/80	0,35	0,8	2	33	72	90
3		20/80	0,35	1,0	2	31	69	87
4		20/80	0,35	0,6	2	36	-	-
5	%2 SAK	20/80	0,35	0,8	2	34	70	88
6		20/80	0,35	1,0	2	33	64	80
7		20/80	0,35	0,6	2	43	-	-
8	%3 Na_2SiO_4	20/80	0,35	0,8	2.0	40	60	75
9		20/80	0,35	1.0	2.0	39	56	70
10	%2 SAK,	20/80	0,35	0,6	2.0	42	-	-
11	%5 Bentonit,	20/80	0,35	0,8	2.0	40	54	68
12	%3 Na_2SiO_4	20/80	0,35	1,0	2.0	38	50	63

Çağatay ve Günindi (2008), %0 (referans), %10, %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül+beton karışımların basınç ve eğilmeye karşı direnci araştırmışlardır. Süper akışkanlaştırıcıyla sabit su-çimento oranında betonlar üretilmiştir. Uçucu kül içeren betonun dayanım özellikleri ile normal betonun özellikleri arasındaki ilişkinin benzer olduğu sonucuna varmışlar. Laboratuvarda elde edilen verilere göre mevcut uçucu külün çimentoyu %10-%40 oranında ikame edebileceğini belirtmişlerdir. Betonun, uygun bir şekilde dizayn edildiği takdirde özellikle beton yol kaplaması olarak kullanılabilmesi kanaatine varmışlardır.

Tekin ve Mollamahmutoğlu (2010), çalışmalarında ince taneli çimento ve RHEOCEM 900 süspansiyonunu ile farklı gradasyonlardaki kumların enjekte edilebilirliğini araştırmışlardır. Enjeksiyonun edilebilirliği *süspansiyonun reolojik özelliklerine, enjeksiyon basıncına, zeminin tane çapı dağılımına, zeminin rölatif sıkılığına ve ince tane miktarı* ile değiştiğini gözlemlemişlerdir. Değişik boyutta olan kum ve ince dane yüzdesi (İDY) 10, 15, 20, 25 ve 30 olan numunelere, su/çimento oranları 0,8, 1,0 ve 1,2 olan süspansiyonların enjeksiyon deneylerini yapmışlardır. Süspansiyonun enjekte edilebilirliği için kalıpların alt ve üst kısımlarına iri kum yerleştirmişlerdir. S/Ç=0,8, İDY %20'den fazla, S/Ç=1,0, İDY %25'ten fazla ve S/Ç=1,2, İDY %30'dan fazla olan numunelerde enjeksiyonun gerçekleşmediğini belirtmişlerdir. Süspansiyon enjeksiyonunda S/Ç oranının ve İDY yüzdesinin ne kadar önemli olduğunu ve ampirik enjeksiyon bağıntılarının güvenilir sonuçlar vermediğini belirtmişlerdir.

Okucu (2010), Bigadiç (Balıkesir) Borat İşletmelerindeki bor üretiminden atılan çamur, Soma (Balıkesir) termik santral atığı uçucu kül ve Antalya Eti Elektrometalürji A.Ş. baca tozu atığı silis dumanı katkılarının çimentonun dayanımına etkilerini araştırmıştır. CEM-I 42,5 N portland çimentosuna %5, %10 ve %15 oranlarında atık çamur, uçucu kül ve silis sumanı katılarak 4x4x16 cm'lik prizmatik harç numunelerini 20±1 °C'de kür ederek 2, 28 ve 56. günlerde eğilme ve basınç dayanımını incelemiştir. Katkılı harç numunelerinin dayanım değerlerini CEM-I 42,5 N çimento harçlarının dayanım değerleri ile karşılaştırmıştır.

- %5 ve %10 atık çamur katkıli harçların eğilme ve basınç dayanımları 56. günde şahit harca göre dayanım değerlerinin daha yüksek olduğunu,
- %5 ve %10 uçucu kül katkıli harçların 56. günde basınç dayanım değerleri şahit harca göre yüksek dayanım değeri aldığı,

- %15 uçucu kül katkılı harç şahit harçla yaklaşık aynı basınç dayanım değeri aldığı,
- Silis dumanı katkılı harçların tamamında eğilme ve basınç dayanım değerleri 56. günde şahit harcın basınç dayanım değerinden yüksek olduğunu,
- Atık harçların erken dayanım değerlerini azalttığını, ilerleyen zamanlarda dayanım değerlerinin arttırdığını,
- Endüstriyel atıkların içerisindeki SiO_2 'ce miktarının çok ve ince taneli olması dayanım değerlerinin artmasında etkili olduğunu

belirtmiştir.

Erkan (2013), çalışmasında laboratuvar ortamında jet grout kolonları imal etmiştir. Araştırmacı, enjeksiyon basıncı, su/çimento oranı, tijin çekme ve dönme hızının jet grout kolonların performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmasında laboratuvar ortamında ilk kez parametrik olarak jet grout kolonlarının davranışlarını incelemiştir. Yapılan analiz ve değerlendirmeler sonucunda geliştirilen sistem ile laboratuvar ortamında jet grout kolonlarının başarılı bir şekilde imal edilebileceğini ve parametrik çalışmaların yapılabileceğini göstermiştir.

- Jet grout kolon çapı üzerinde en etkili parametrenin %43 ile enjeksiyon basıncı olduğunu,
- Kolonların serbest basınç mukavemeti üzerinde ise en etkili parametrenin enjeksiyon basıncının %36 olduğunu,
- Dayanım üzerinde su/çimento oranının etkisi %27, çekme hızının etkisi %23 ve dönme hızının etkisi %14 olduğunu,
- Oluşturulan jet grout kolonlarında kolon çapının maksimum olması için enjeksiyon basıncının 40 bar, S/Ç oranının 1,5, çekme hızının 15 cm/dak ve dönme hızının 5 dev/dak.,
- Basınç mukavemetinin maksimum olması için enjeksiyon basıncının 20 bar, su/çimento oranının 1.0, çekme hızının 15 cm/dak. ve dönme hızının 10 dev/dak.,

olduğunu belirtmiştir.

Akan ve Keskin (2014), yaptıkları çalışmada jet grout kolonlarının serbest basınç dayanım testinde bulanık mantık ve çoklu regresyon yöntemlerini kullanarak

determinasyon katsayısını %91 hesaplamıştır. Analizlerde girdi parametresi olarak; enjeksiyon basıncı, tijin çekme hızı, nozül çapı, zeminin standart penetrasyon sayısı (SPT-N) ve zeminin ince tane oranını, çıkışta jet grout kolonunun serbest basınç dayanımları elde etmişlerdir. Analizde elde sonuç ile oluşan kolonun dayanımı karşılaştırmışlardır. Çoklu regrasyon analizinde kullandıkları parametreler arasında tijin çekme hızının en etkili ve standart penetrasyon sayısının en az etkili parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Jet grout kolonlarının serbest basınç dayanımının, SPT-N ve nozül çapının artmasıyla arttığını, çekme hızı ve zeminin ince tane oranının artmasıyla dayanım değerlerinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Mollamahmutolu ve Avcı (2015), spesifik yüzey alanı ile ilgili literatürde sıkça belirtilen aynı tür ürünlerden daha büyük olan mikro taneli çimentonun harç özelliklerini araştırmışlardır. Bu bağlamda, mikro taneli çimento yüzey alanı (Ultrafin 12) 22000 cm²/g'dır. Başlangıçta mikro taneli çimento s/ç 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 süspansiyonlarının viskozitesi, akış süresi ve stabilitesi incelemişlerdir. Mikro taneli çimento süspansiyonlarının 0.8, 1.0, 1.2 ve 1.5 oranlarındaki çökeltme ve akış süreleri şartnamedeki aralıklarda olduğu için enjekte edilebileceğini belirtmişlerdir. Çimento süspansiyonlarının numunelere enjekte edilebilirliğin başarılı olduğunu ve s/ç oranı arttıkça paralel arttığını görmüşlerdir. Enjeksiyon işleminde kumlu zemin numuneleri kullanmışlardır. Mikro taneli çimento süspansiyonlarının geçirgenliği %30 yoğunlukta hazırlanan çeşitli dereceli orta-ince kum numunelerine farklı s/ç oranları ile 0,25- 0,5 MPa arasında değişen enjeksiyon basınçları altında, 53,6 mm çapında 110 mm yüksekliğinde test numuneleri oluşturmuşlardır. Numunelerin dayanıklılığı üzerindeki yaşlanma etkisini görmek için, 1, 3, 7, 14, 28 ve 56 günlerde kırmışlardır. Stabilize edilmemiş basınç dayanımının, kürlenme süresiyle arttığını ve mukavemetin büyük kısmının 28 gün sonunda kazanıldığını görmüşlerdir. Ayrıca, kum örneklerindeki ince tane yüzdesinin ve s/ç oranının arttırıldığında numunelerin mukavemetinde azalma olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek dayanımının s/ç oranı 0,8 ve orta/ince kum zemin karışımında, %70'i orta, %30'u ince boyutlu numuneyle hazırlanan enjeksiyon numunesinin olduğunu görmüşlerdir ve 28 günlük dayanımını 10,83 MPa bulmuşlardır. 56. gün sonunda numunelerin geçirimsiz olduklarını belirtmişlerdir.

Çelik ve Çanakçı (2015), yazarlar çalışmada pirinç kabuğu külü ile karıştırılmış çimento esaslı harçların akışkanlığı ve reolojik özellikleri araştırmışlardır. CEM1-42,5R

çimentosuna pirinç kabuğu külünü mineral katkı malzemesi olarak kullanmışlardır. Pirinç kabuğu külünü Edirne'de bir pirinç üreticisi fabrikadan temin etmişlerdir. Çimento ağırlığının %5, %10, %20 ve %30 içeriğinde pirinç kabuğu külü ilave ederek üç farklı su içeriğine sahip 15 farklı karışım oluşturmuşlardır. Hazırladıkları karışımların su/bağlayıcı oranlarını 0,75, 1,0 ve 1,25 olarak belirlemişlerdir. Karışımların marsh akma süresi, viskozite değerleri ve karışımların akma gerilmesini belirlemişlerdir. Pirinç kabuğu külünün eklendiği tüm karışımların farklı su içeriklerinde dahil, çimentonun akış süresini uzattığını belirtmişlerdir. Harçların plastik viskozitesi, su/bağlayıcı oranından bağımsız olarak pirinç kabuğu külünün içeriğinin artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir.

Güllü (2016), Jet-Grout harcının akışının reolojik modellerinin jet grout uygulamalarında endişe oluşturduğunu belirtmiştir. Bunun için en yaygın reolojik modellerin (Bingham, Modifiye Bingham, Casson, Herschel- Bulkley, Robertson-Stiff De Kee) performansları üzerine, akışkanlık davranışını tahmin eden çimento enjeksiyon karışımlarına bağlı kesme gerilmelerini araştırmıştır. Çalışmasında jet grouting için kil, kum, kireç, baz kül ve çeşitli oranlarda (%0-100) stabilizatörler ele almıştır. Bu amaçla önceki çalışmalardan toplanan kesme gerilmesi-kayma hızı verilerinin akış eğrilerini kullanarak reolojik modellerin tam bir karşılaştırmasını yapmıştır. Karşılaştırmalara dayanarak performanslar, düşükten yüksek sıralamaya göre uygun modelleri temsil eden bir şemada sunmuştur. Casson hariç tüm reolojik modellerin, stabilizasyon kalıntılarının çoğunda kayma gerilmesi-kayma hızı verisinin yeterince uygun olduğunu ayrıca daha düşük hatalara ve güçlü korelasyonlara neden olan performanslarını incelemiştir. Sıralama modelinden Robertson-Stiff modelinin ve bu çalışmasından türetilmiş formüllerinin kabul edilebilir olduğunu, De Kee modelinin orta düzeyde kabul edilebilir olduğunu ve Casson modelinin ise kabul edilemez olduğunu belirtmiştir.

Pastor ve diğ., (2016), Bu çalışmada, uçucu kül çimentosunun mikro yapılarda harç olarak kullanılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Genel olarak mikro yapı harçları, Portland çimentosu kullanılarak hazırlanır ancak standartlar bir mukavemet şartı sağladıkları sürece, kullanılacak çimento türünü kısıtlamamaktadır. Bu araştırmada, 2. ve 90. gün arasında 0,40, 0,45, 0,50 ve 0,55 s/ç oranlarında yapılan uçucu kül karışimli çimento harçları üzerinde çalışılmıştır. Dayanıklılık özellikleri, basınç altındaki su penetrasyonunun ve klorid difüzyon katsayısının belirlenmesiyle incelenmişlerdir. Numunelerin basınç dayanımı da ölçülmüş ve her çimento tipi için farklı bir maksimum

su/çimento oranı elde edilmiştir. Tüm sonuçlar Portland çimento harçları için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, uçucu kül çimento harçları kullanılarak yapılan numunelerin performansının yeterli olduğunu ve mineral katkı maddeli çimentoların çevresel yararlar sağlayacağını belirtmişlerdir.

Yılmaz (2016), yaptığı çalışmada, düşük plastisiteli kil zemin ile uçucu kül kullanarak zemindeki dayanımındaki artışları araştırmıştır. Bartın yöresine ait düşük plastisiteli kil zeminini kullanmıştır. Kil içerisine kütlece %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında uçucu kül eklemiştir. Kompaksiyon deneyinden her karışımın optimum su içeriğinin %23 olduğunu belirtmiştir. Daha sonra 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde numuneler hazırlayarak 7. ve 28. günlerin sonunda serbest basınç deneyi yapmıştır. Deney sonuçlarını incelediğinde %25 oranında uçucu kül ekleyerek hazırladığı numunelerin dayanım değerinin en yüksek dayanım değerine sahip olduğunu ve uçucu külün uzun kür süresinde dayanımını arttırdığını belirtmiştir.

Ernesto ve Guades (2016), yaptıkları çalışmada, jeopolimer ve temiz kuru nehir kumu + F tipi uçucu kül karışım harcının, basınç ve çekme dayanımı üzerine bir araştırma yapmışlardır. Jeopolimerizasyon için kullanılan alkali sıvı sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikatın (Na_2SiO_3) bire bir (1/1) karışımli kombinasyonudur. Deneylerde 2,00 mm'lik elekten geçen, 0.475 mm'lik elek üzerinde kalan kum kullanmışlardır. Kum/uçucu kül 0, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2, 1,5, 2,0, 4,0 ve 6,0 oranlarında 9 ana tasarım yapmışlardır. Tasarımlara ek olarak, karşılaştırma için çimento esaslı bir harcı sırasıyla çimento, kum ve su; hacimce (1/3/1) karışımı kullanılarak hazırlamışlardır. Boyutları 50x100mm olan numuneler 7, 14 ve 28 gün bekletildikten sonra basınç ve çekme dayanımı deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre test edilen jeopolimer örneğinin başarısızlığının, yarma, kesme ve merkezi çatlama ile domine olduğunu belirtmişlerdir. Kum/uçucu kül oranı 0 olan tasarım grubunda 28 günlük basınç dayanımı 12,4 MPa ve çekme dayanımı 2,1 MPa olarak bulmuşlardır. Kum/uçucu kül oranı arttırıldığında, 0,0-1,5 oranlarında daha belirgin bir şekilde dayanımların azaldığını ve dayanımın kum/uçucu kül oranından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

Shen ve diğ., (2016), çalışmalarında yüksek dayanımlı beton (HSC) farklı yaşlarda sertleşen uçucu kül yüksek dayanımlı betonun çekme özellikleri üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Uçucu kül içeren yüksek dayanımlı beton

numuneleri üzerinde tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve Young çekme modülünü ölçmüşlerdir. Test sonuçlarına göre:

- Erken yaşta uçucu kül içeren yüksek dayanımlı beton numunelerinin, eksenel basınç dayanımı, aynı yaşta uçucu kül içermeyen kübik basınç dayanımından daha düşük olduğunu,
- Erken yaşta uçucu kül içeren yüksek dayanımlı betonun çekme dayanımı, aynı yaştaki çekme dayanımı yarısından daha düşük olduğunu,
- Çekme Young modülü, erken yaşta sertleşen uçucu kül içeren yüksek dayanımlı betonun, aynı yaştaki sıkıştırıcı Young modülünün yaklaşık 1,06-2,02 katı olduğunu,
- Çekme Young sertleşme modülü, uçucu kül içeren yüksek dayanımlı betonun erken yaşta tek eksenli çekme dayanımı artışıyla arttığını,

belirtmişlerdir.

Helson ve diğ., (2017) çalışmalarında çimento dozajının, kil miktarı, zaman ve sertleşme koşullarının, fiziksel ve mekanik özellikleri (tek eksenli basınç dayanımı) üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Altı adet kum zeminin içerisine hacimce %0 ila %50 oranlarında kil ilave edilerek hazırlanan zemin numunelerinde jet grout kolonları oluşturmuşlardır. Oluşan zeminler K0, K5, K10, K15, K25 ve K50 olarak adlandırmışlardır. Kum zeminin içerisine karıştırılan kil kaolinit kökenli yüksek plastisiteli (CH) kil ve bağlayıcı olarak CEM III-32.5N çimento tipi kullanmışlardır. Hazırlanan zeminlerin içerisine 3 farklı dozajda çimento harcı enjekte etmişlerdir. Çimento dozajlarını 200, 250 ve 300 kg/m³ olacak şekilde hesaplayıp enjeksiyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için numuneler alıp gerekli ölçümleri yaptıktan daha sonra 60 °C'de bir fırında kurutmuş ve buradaki değerlerden oluşan zeminin fiziksel özelliklerini belirlemişlerdir. Alınan numuneler 28 ve 180 günlük kür şartlarını sağladıktan sonra Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki numuneleri 0,04 MPa/s'lik hızla kırmışlardır. Kil yüzdesi %5 ile %15 arasında artış ve azalışlar gözlemlemişlerdir. Zemin içerisindeki kilin optimum olarak %15 olması gerektiğini görmüşlerdir. Çimento dozajının 100 kg/m³'lük bir artışında tüm zemin numuneleri için %70'lik önemli bir basınç artışı gözlemlemişlerdir. Zemin numunelerinin içerisindeki kil yüzdesi %15'ten sonrasında dayanımlarda azalmalar görmüşlerdir.

Orhan ve Esen (2017), çalışmalarında öğütülmüş atık cam tozu katkılı betonun, puzolanik aktivitesi, yarmada çekme dayanımı, su emme, porozite ve birim hacim ağırlık değerlerini araştırmışlardır. Deneylerde CEM I 42,5 R çimento türünü kullanmışlardır. Mineral katkısı olarak atık pencere camlarının 50 µm tane büyüklüğüne kadar öğütülmesi sonucu elde edilen cam tozu ve kimyasal katkı olarak Sika ViscoCrete Hi-Tech-36 Serisi üçüncü nesil süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Öğütülmüş atık cam tozu, betona %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında, çimento ile yer değiştirilerek ilave edilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında maksimum tane çapı 16 mm olan agrega boyutunu tercih etmişlerdir. Puzolanik aktivite için 50x50x50 mm ölçülerinde, yarmada çekme dayanımı, su emme, porozite, birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık deneyleri için 100x100x100 mm ölçülerinde küp numuneleri hazırlamıştır. Numuneler 20±2°C’de 7, 28, 90 gün standart su küründe bekletmişlerdir. Kür işlemi tamamlanan numunelere deneyler uygulamıştır. Cam tozu katkısının puzolanik aktivitesinin olduğunu görmüşlerdir. Optimum cam tozu kullanım değerinin %10 oranında olduğu numunelerde 90 günlük betonun yarmada çekme dayanımı, kontrol betonunun dayanım değerinden yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Çetin ve İnce (2017), yazarlar çalışmalarında birlikte karşılıklı basınç kuvveti uygulanan küp yarma testi ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Sunulan bu çalışmada, CEM-I 42,5 R çimentosu, su/çimento 0,6 oranında ve betonun maksimum agrega çapı 8 mm'lik kesikli ve sürekli granülometrilili beton karışımları hazırlanmıştır. Aynı geometriye sahip farklı boyutlu (4:2:1) küp numuneler üzerinde boyut etkisi incelenmiştir. Boyut değişim oranları 1/4 olan d=50, 100 ve 200 mm beton küp numunelerin 28 günlük yarmada-çekme dayanımlarını belirlenmiş, elde edilen deney sonuçları Bazant’ın “Boyut Etkisi Kuralı”na göre analiz etmişlerdir. Sonuç olarak kesikli granülometriye sahip betonların daha sünek davrandığını belirtmişlerdir.

Sha ve diğ., (2018), Uçucu kül, bentonit, süper akışkanlaştırıcı ve cam atığı ile karıştırılmış çimento esaslı harçların performansları üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada Portland çimentosu (PÇ), F sınıfı uçucu kül (UK), bentonit (B), süper akışkanlaştırıcı (SA) ve cam atığı malzemeleri kullanılmıştır. Harç özelliklerinin akışkanlığı, yayılma kabiliyeti; mekanik özelliklerden, eğilme mukavemeti ve basınç dayanımı; ayrıca çimento esaslı harçların mikro yapıları incelemişlerdir. Su / bağlayıcı oranı 1,0 olarak seçmişlerdir. PÇ kütlesi içerisindeki UK oranı %0-40, bentonit oranı,

%0-15 ve SA oranı %0,7 dir. Çimento esaslı süspansiyonların ile cam atığının hacim oranları 1/1, 2/1 ve 3/1 olarak seçmişlerdir. Sonuç olarak, UK ve %0,7 SA' nın harçların akışkanlığını, yayılma kabiliyetini arttırdığını ve bentonitin ise stabiliteyi arttırabildiğini ortaya koymuşlardır. UK, B ve SA karışimli harçların 28 günlük basınç dayanımını azalttığını görmüşlerdir.

Tulga ve Kılınç (2018) yaptıkları çalışmada, 4 farklı dayanıma sahip beton karışımları üretmişlerdir. Her bir beton sınıfı için şahit beton, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmişlerdir. Uçucu kül kullanım yüzdesi, çimento miktarının %20'si olarak almışlardır. Uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonlarda toplam bağlayıcı miktarının %1'i olmak üzere kimyasal katkı maddesi kullanmışlardır. Üretimlerde 10 cm ebatlı küp kalıplar kullanarak C20/25, C25/30, C30/37 ve C35/45 beton sınıflarını oluşturmuşlardır. Küp numuneler kür havuzunda 23 ± 2 °C suda beklettikten sonra 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı ve 28 günlük beton numunelerinde yarmada çekme deneyini yapmışlardır. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanılan betonların en yüksek basınç dayanımının 56'ncı günde elde edildiği görmüşlerdir. Uçucu külün ilerleyen zamandaki basınç dayanımlarını arttırdığı gerçeğini de buradan doğrulamışlardır. Yarmada çekme dayanımı sonuçları değerlendirmesinde ise C20/25 sınıfı betonlarda hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül içeren betonların ve uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımına oranla daha yüksek olduğu görmüşlerdir. Ayrıca yazarlar uçucu kül içeren betonların yarmada çekme dayanımının uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu da açıkça belirtmişlerdir.

Hefni ve diğ., (2018), yaptıkları çalışmada 8 farklı beton karışımı hazırlamışlardır. Çimento ağırlığının %40'ı kadar uçucu kül kullanmışlardır. Tüm karışımlar için su/çimento oranı 0,45'tir. Sürekli işlenebilirliği arttırmak ve korumak için süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Bu karışımlarda dört farklı kimyasal aktivatör'ün oranlarla kullanıldığı uçucu külün kimyasal aktivasyonunun etkisini incelemek için I. aşamada 6 adet karışım hazırlanmıştır; %2,5 Na₂S₀₄, %2,5 NaOH, %3 (CaO ve Na₂SiO₃, (1/8)) ve suda %4 oranında Na₂SiO₃ kullanmışlardır. Tüm aktivatörler için dozaj, çimento esaslı malzemelerin (çimento ve uçucu kül) ağırlığının bir oranı olarak almışlar. II.

aşamada cam elyaf ekleme etkisinin incelenmesi için I aşamanın çıktısına dayanarak iki beton karışımı uygulamışlardır. Ağırlıkça %0,7 oranında cam elyafları eklenmiş ve seçilen aktivatörün suda %4 oranında Na_2SiO_3 olmuştur. Betonları ürettikten sonra 3, 7, 28, 56, 90 ve 180 günlerdeki basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarına bakmışlardır. 56. gün ve sonrası günlerde kullanılan tüm aktivatörler ve UK normal betonun dayanımından yüksek olduğunu görmüşlerdir. Yazarlar uçucu külün çimento içinde kısmi olarak kullanılmasında, erken yaşlarda beton mukavemetini azalttığını fakat 56 ile 180 gün arasında beton mukavemetinde önemli bir artış olduğunu belirtmişlerdir.

Kanat ve Olgun (2018), İnce taneli portland çimentosu ve silis dumanı katkı maddesi içeren ve içermeyen normal portland çimentosu harçlarının reolojik özelliklerini incelemişlerdir. İnce taneli portland çimentosu (DMFC-800), normal portland çimentosu (NPÇ) ve %10 silis dumanı (SD) ile normal portland çimentosu (NPÇ+ %10SD) kullanılmıştır. 0.5, 0.75, 1.0, 1,25, 1,5, 2,0, 2,25, 2,5 su / çimento (s/ç) oranlarına sahip bu harçların reolojik özelliklerini belirlemek için marsh hunisi, sedimentasyon ve vicat deneyleri yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları aralarında karşılaştırdıklarında aynı s/ç oranlarında DMFC-800 çimentosu kullanarak hazırladıkları şerbetin viskozitesinin, sedimentasyonunun ve priz süresinin, diğer çimento serbetlerine kıyasla en iyisi olduğunu; silis dumanlı çimentonun reolojik özellikleri üzerinde etkisinin olduğunu belirtmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

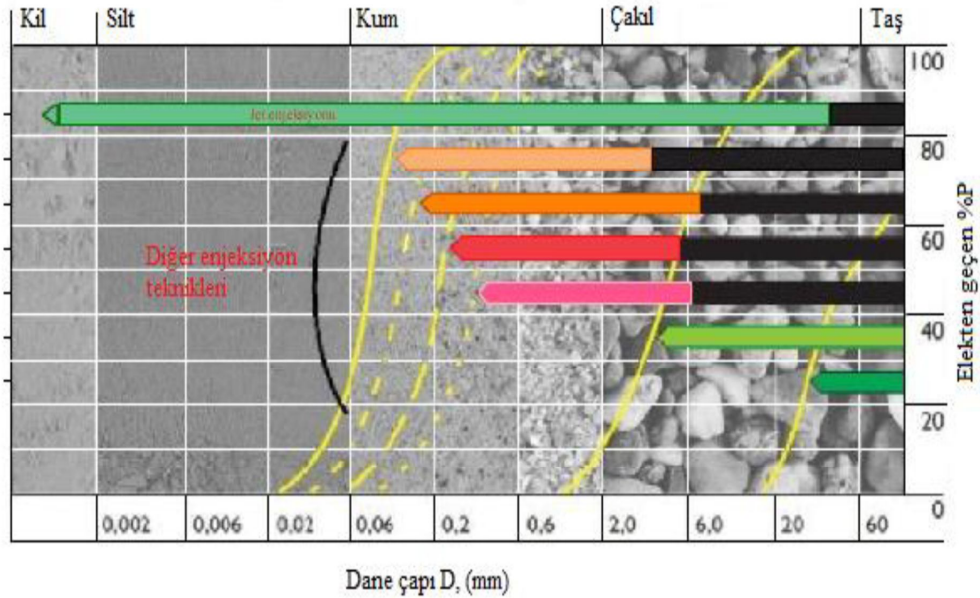
Bu bölümde zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet-grout yönteminde kullanılan farklı tip çimentoların ve uçucu kül karışımlarının etkileri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Jet grout yöntemi ülkemizde de sıklıkla kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Jet grout yöntemi ekonomik olması, hızlı uygulanabilmesi ve birçok zemin cinsine uygunluğu ile öne çıkmıştır. Ayrıca iş güvenliği ve çevreye zarar vermemesi gibi özellikleri ile de diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden farklıdır.

3.1.1. Jet Grout Yöntemi

Jet enjeksiyonu İngiltere’de bulunmuş fakat ilk uygulamayı Japonya da 1965’li yıllarda Yamakado kardeşler gerçekleştirmiştir. Daha sonra gelişerek devam eden teknik Avrupa’da hızla yayılmıştır. Ülkemizde 1986 yılında Haliç Kolektörleri Projesi kapsamında Ayvansaray Tünel aynasının zemin iyileştirmesinde uygulanmıştır.

Jet grouting yöntemi, belli bir hızla dönen enjeksiyon borusundan yatay bir şekilde yüksek basınçlı hava veya su jetinin etkisiyle kuyu açılması ve bu kuyuya yine yüksek basınç altında yatay bir şekilde çimento şerbetinin karıştırılması olayıdır (Durgunoğlu, 2004). Kuyunun taban seviyesinden yukarı doğru uygulanan bu yöntemle oluşturulan kolon, priz almadan arada boşluk bırakmayacak şekilde yanına uygulanan diğer jet grout kolonlarıyla birlikte yeraltında duvarlar ve diyaframlar inşa edilebilir. Bu yöntem zeminin taşıma kapasitesini, elastisite modülünü artırır; geçirgenliği azaltacağından zeminin sıkışabilirliğini de azaltır ve böylece daha rijit bir zemin elde edilir.

Jet grout kolon yöntemini diğer klasik enjeksiyon yöntemlerinden ayıran önemli özelliği hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm alternatif sunması, uygulaması sonucunda çimento şerbeti ile zeminin karıştırılarak kompozit bir malzeme oluşturulmasıdır. Uygulamadan önce gerekli malzemenin miktarı ile iyileştirilmiş olan zeminin taşıma gücü, deformasyon modülü, geçirimsizliği, oluşacak kolonların mekanik ve geometrik özellikleri uygulama yapılacak olan zemin parametrelerinin bilinmesi ve dolayısıyla projeye başlamadan maliyetin önceden belirlenebilmesidir. Yapım sırasında enjeksiyon hızı, açısı, tıjın dönme ve geri çekiş hızı, nozül çapı ve sayısı gibi parametrelerin değiştirilmesi ile çeşitli iyileştirilmiş zemin şekilleri elde etmek mümkün olmaktadır. Şekil 3.1’de tane dağılımına göre enjeksiyon tipi uygulamaları verilmiştir.



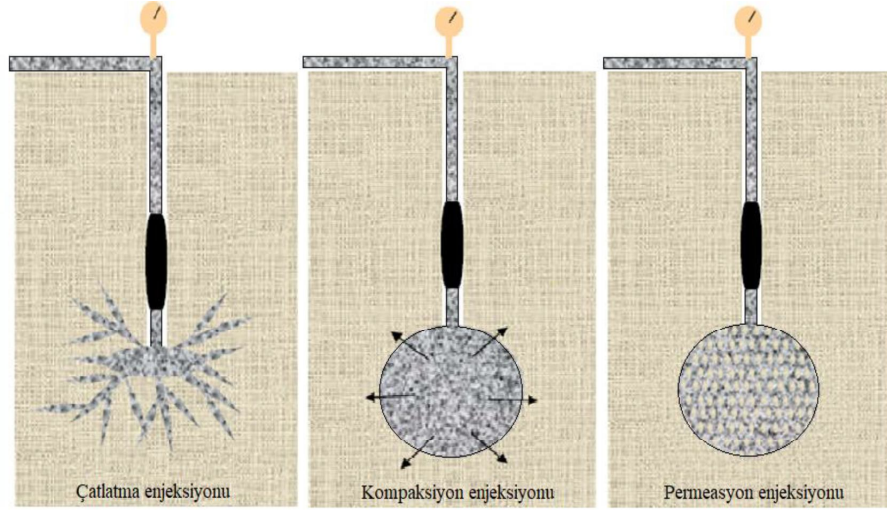
Şekil 3.1. Enjeksiyon yönteminin uygulanabilirliği (Önalp ve Sert, 2016)

Zemin veya kaya ortamına dışarıdan, basınç altında ve sondaj kuyusu gibi bir girişten yollanan akışkanlaştırılmış bir madde ile iyileştirme ve stabilizasyon sağlamaya yönelik işlemlere içitim (jet grout) denir. İçitim veya Türkiye’de kullanılan yabancı adıyla Jet Grout enjeksiyon çalışmaları birçok amaca yönelik olarak yapılmakta, hacimce en büyük uygulaması da baraj temellerinde geçirimsizliğin sağlanması için gerçekleştirilmektedir. Çalışmalar amacına göre literatürde dört ya da altı grupta toplanmakta ise de burada bina temelleri açısından basitçe (Şekil 3.2.);

- Çatlatma enjeksiyonu
- Kompaksiyon (telafi) enjeksiyonu
- Permeasyon (sızdırma=emdirme) enjeksiyonu
- Jet Enjeksiyonu

olmak üzere dört gruba ayrılır.

Bunlara yönelik enjeksiyon çalışmaları günümüzde zeminin güçlendirilmesi, sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesi, farklı oturmaların giderilmesi, özel durumlarda kazı duvarlarının oluşturulması gibi giderek artan önemli uygulamalar bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Enjeksiyon türleri

3.1.1.1. Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu zeminin kontrollü bir şekilde düşük viskoziteli sıvılarla 4 MPa'a kadar yüksek basınçlarda çatlatılması (zeminin parçalanması) işlemidir. Çatlatma enjeksiyonu sonucunda zemin içinde ağaç dallarına benzer sertleşmiş çimento kanalları oluşur, böylelikle zemin kontrollü bir şekilde sıkıştırılır (Şekil 3.2). Burada amaç, enjeksiyon malzemesinin zemin partikülleri arasındaki boşluklarda akmasını sağlamak değildir. Oluşturulan harç, tabakalarının toplam dayanımı arttırdığı, bağlantısız boşlukları doldurduğu, zemini yerel olarak birleştirdiği ve aslında yatay, geçirimsiz tabakalar oluşturduğu düşünülmektedir. Permeasyon enjeksiyonu yapılamayan, geçirimsizliği düşük ince taneli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır (Rawlings ve diğ., 2000). Çatlatma enjeksiyonlarının etkilerinin kontrol edilmesi zordur ve yüksek basınç kullanarak bitişik yapılara zarar verme tehlikesinden dolayı sınırlı olarak kullanılmaktadır.

3.1.1.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu

1950'li yıllarda ABD'de maden ve tünel işletmeciliğinde yaygın olarak kullanılan bu teknik, zayıf ve yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında, temel ve döşemelerin desteklenmesinde, çatlakların neden olduğu gevşek veya boşluklu zeminlerde, temel oturmalarının kontrol altına alınmasında kullanılmaktadır. Slamp değeri düşük harcın yüksek basınç altında zemine enjekte edilmesiyle zeminin yoğunluğunun artması olayıdır. Slamp değeri düşük olan bu harç onu çevreleyen zemini sıkıştırmaya ve bir süre sonra ampül ya da kolon şekline benzer bir yığılma yaparak katılaşmaya başlar (Şekil 3.2).

Bu yöntem, 1980 yılında toplanan ASCE Enjeksiyon Komitesi, kompaksiyon enjeksiyonunu 25 mm'den daha az çökme değeri olan, yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar da kum içeren katı enjeksiyon malzemesinin, zemin boşlukları içerisine girmeksizin enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturacak ve bu sayede etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştıracak şekilde 3-3,5 MPa arasındaki yüksek basınçlarda enjekte edilmesi olarak tanımlamıştır. (Tunçdemir, 2004).

Bu tekniğin uygulanabilmesi için enjeksiyon malzemesinin katı ve yüksek vizkozitede olması gerekir. Bu nedenle karışımlarda plastisiteyi gereğinden fazla arttıracak silt ve gereğinden fazla akışkanlığı sağlayacak bentonitin kullanılmaması öngörülmektedir. Enjeksiyon karışımı zemin boşluklarına nüfuz etmeyecek şekilde ve zemin taneleri ile karışmayacak şekilde tasarlanır. Çatlatma enjeksiyonu durumundan farklı olarak, harcın enjeksiyon noktasından uzağa gitmeyen çok yoğun ve bir ampul şekli oluşturması amaçlanmıştır. Yüzeye yakın yapılan kompaksiyon enjeksiyonlarında zemin yüzeyinde yükselmeler veya kabarmalar meydana gelebilir. Uygulamada enjeksiyon aralıkları 1,0-4,5 m arasında olup, uygulama yapılacak zemin derin olduğunda, enjeksiyon aralıklarının fazla seçilmesi gerekir.

3.1.1.3. Sızdırma enjeksiyonu

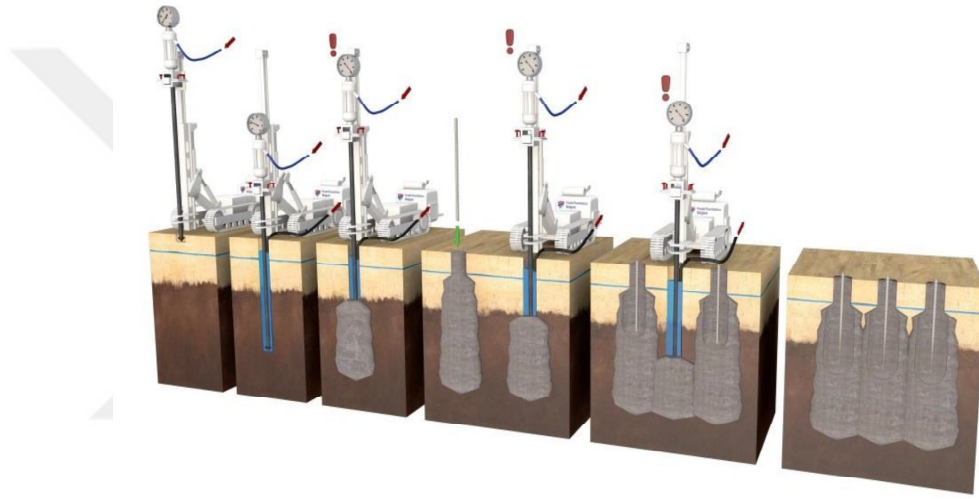
Sızdırma enjeksiyonun amacı zeminin enjeksiyon yapılmadan önceki hacminde ve yapısında herhangi bir değişiklik yapmadan zeminin boşluklarına enjeksiyon harçlarının nüfuz edilmesidir (Şekil 3.2) Zeminin cinsi, zeminin boşluklu yapısı ve enjeksiyon malzemeleri (çimento ve kimyasal harçlar) bu yöntemin temel parametreleridir. Şekil 3.3'de zemin ve kaya ortamında mevcut boşlukları doldurmada kullanılan maddelerin etkinliği gösterilmektedir.

ENJ. SIVISI	ÇAKIL	KUM			SİLT	KİL
		kaba	orta	ince		
Kimyasallar	İnce çimento	→	→	→	→	→
	Çimento	→	→	→	→	→
	Bentonit	→	→	→	→	→
	Sodyum silikat	→	→	→	→	→
Kimyasallar	Lignin	→	→	→	→	→
	Üre bazlı reçine	→	→	→	→	→
	Akrilamid	→	→	→	→	→
Dane boyutu (mm)	2	0.5	.25	0.74	0.005	
Geçirimli kat. (cm/s)	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5

Şekil 3.3 Enjeksiyon sıvısı penetrasyon yeteneği

3.1.1.4. Jet Enjeksiyonu (Jet Grout)

Jet grout yönteminde, zemin içerisine istenilen derinliğe indirilen tiji, belirli bir dönme ve çekme hızıyla yüzeye doğru çekilirken nozülden yüksek basınçta harç püskürtülerek zemin yapısı parçalanır. Jet grout kolonu, parçalanmış zemin yapısı ile harç malzemesinin karışarak yeni bir yapının oluşturulmasına denir (Şekil 3.4). Bununla birlikte, 50 MPa'ya kadar çalışma basınçlarında üç adede kadar sıvının aynı anda enjekte edilmesini içerebilecek herhangi bir sistemin, uygun zemin ve şartlarda kullanılmasının gerektiği belirtilmiştir (Xanthakos ve diğ., 1994). Sızdırma enjeksiyonu kohezyonsuz zeminlerde kullanılırken; jet grout enjeksiyonu kohezyonlu zeminlerde uygulanmaktadır.



Şekil 3.4. Jet enjeksiyonu uygulaması (<https://www.medramuhendislik.com>)

3.1.2. Jet Grout Yapım Aşamaları

Jet grout kolonu, 300-450 bar arasında basınçla püskürtülen su ve çimento karışımının zeminin boşluklarını doldurup ve sıkıştırılması suretiyle elde edilir. Yüksek basınç, enjeksiyon karışımının nozüllerden geçerken yüksek bir kinetik enerji kazanmasını sağlar. Enjeksiyon (su-çimento) karışımının hızı 250 m/sn değerlerine ulaşarak, enjeksiyon zemini yırtarak zeminle birleşerek çimentolu zemin yapısı (soilcrete) oluşur. Jet groutun özelliklerini belirleyen parametreler; zemin cinsi, jet enjeksiyon tiji içerisindeki akışkan basıncı ve akışkan debisi (nozül çapı), enjeksiyon şerbetinin bileşimi (s/ç), jet enjeksiyon tijinin çekme-dönme hızıdır. Kolonların imalatında delgi ve enjeksiyon (jetleme) uygulaması birlikte yapılmaktadır.

3.1.2.1. Delgi

Delgi sırasında kuyu ağzının yeraltı su seviyesinin üzerinde olması çalışabilme açısından tercih edilir. Delgi zemin cinsine bağlı olarak standart rotari (döner) veya darbeli rotari sistemleri ile yapılmaktadır. Delgi ekipmanı monitörün düşey yönde zemin içerisinde dönmesini sağlar. Monitörün ucuna tijlerden daha geniş (biraz büyük) olan kesici uçlar bağlanmaktadır. Delgi işleminin kolaylaştırılması, uç takımın soğutulması ve zeminin enjeksiyona hazırlanması amacıyla delme sırasında su, hava, bentonit şerbeti veya köpük gibi akışkanlar kullanılabilir. Bu sirkülasyon akışkanları tijlerin içerisinde aşağı yönde hareket ederken kuyu ve tij arasındaki boşluklarda yukarı yönde hareket etmektedir. Akışkan, yukarı doğru hareket ederken parçalanmış, ufalanmış ve kesilmiş zemini yüzeye taşımaktadır. Akışkanlar kuyunun göçmesini önler ve kuyunun stabilesini sağlamaktadır. Uç takımı olarak yumuşak zeminlerde genellikle kil matkabı, katı-sert zeminlerde Tricone Bitler (matkap) ve bloklu zeminde kuyu dibi delme (DTH=Borehole Drilling Elements) elemanlar kullanılmaktadır. Bağlantı manşonlarında 600–700 bar basınca dayanıklı sızdırmazlık elemanları ve delgide 90 mm çapında tijler kullanılmakta olup delgi çapları 120-150 mm arasında değişir.

3.1.2.2. Enjeksiyon (Jetleme)

Uygulamada belirtilen derinliğe ulaşıldığında delme ve enjeksiyon harcı basma işlemi durdurulur. Çelik bir bilye grout borusuna yollanarak groutun yönü ‘monitör’ diye adlandırılan ve delgi ucunun hemen arkasında bulunan 2-8 mm çapındaki 2-4 adet nozülleri taşıyan takıma çevrilir. Genelde su/çimento=1/1 oranında, proje koşullarına göre 0,7’ye düşürülebilir. Yüksek basınçlı groutun pompalanmaya başlanması ile enjeksiyona geçilir. Takriben 250 m/sn hızlı grout, delici takımın rotasyon hareketi ile dairesel kesitli bir grout tabakası formunu alır. Delici takımın önceden belirlenmiş dönme hareketi sabit bir hızla çekme hareketi ile birleşince düşey kolon şeklinde bir yapı meydana gelir. Zemine çimento enjeksiyonu, istenilen jet grout üst kotuna kadar yapılır. Enjeksiyonun kinetik enerjisinden zarar görmemek için, jet grout üst kotu her zaman yüzeyden 50 cm aşağıda bırakılmalıdır. Basınçlı enjeksiyon sırasında delici takımın etrafından dışarıya belli miktarda zemin materyali taşması uygun görülür. Bu durum grout ile karıştırılan zemin içinde, aşırı basınç oluşmadığına işaret eder. Aşırı basınç oluşması halinde zeminde kırılmalar ve kolonlarda süreksizlik gibi problemler meydana gelebilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Enjeksiyon uygulamasında nozûlden su çıkışı

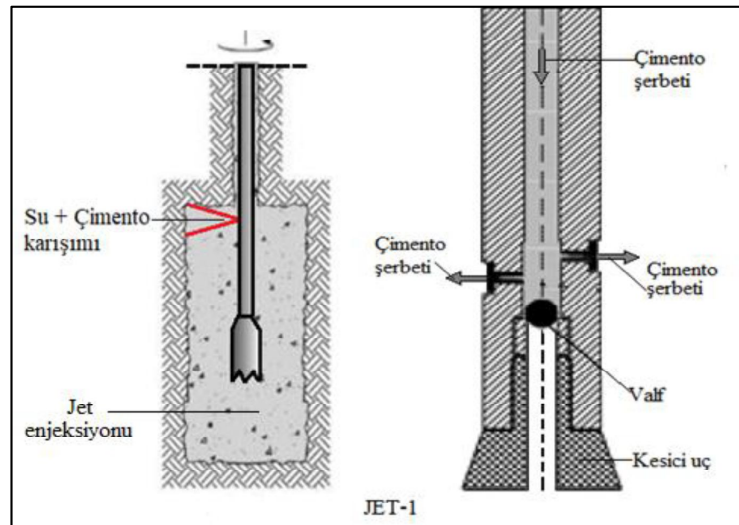
3.1.3. Jet Grout Uygulama Yöntemleri

Jet Grouting uygulamasında genel olarak 4 farklı yöntem kullanılabilir. Bunlar:

- Tek akışkanlı sistem (Jet-1, su+çimento karışımı)
- Çift akışkanlı sistem (Jet-2, su+çimento karışım+hava)
- Üç akışkanlı sistem (Jet-3, su+çimento karışım+hava)
- Süper jet

3.1.3.1. Tek akışkanlı sistem (JET-1)

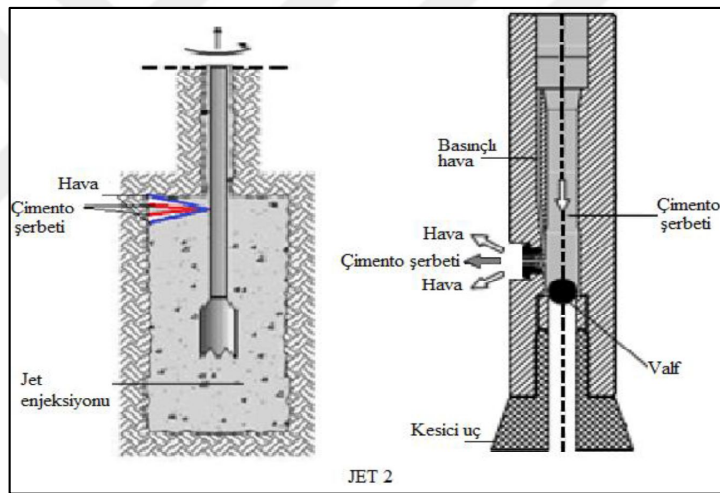
Bu teknik 1970'li yıllarda Japonya ve İtalya'da denenmiştir. Delgi ve enjeksiyon işlemlerinin tek kanallı tijle yapılan en yaygın yöntemdir (Şekil 3.6.). Bir veya birden fazla 2-4 mm. arasında değişen çaplardaki püskürtme ağızlığı (nozül) monitörün etrafında bulunur. Hazırlanmış olan çimento şerbeti 300-600 bar arasında değişen basınçla ağızlıklardan püskürtülür. Böylece zemin kesilerek, oluşan boşluklar harç ile doldurulur. Monitörün çekilmesi ve kendi etrafında belirli hızlarda döndürülmesi ile aşındırılan zemin ve enjekte edilen harç sayesinde zemin-çimento karışımı meydana getirilir. Hava kullanılmadığı için özellikle tünel inşaatlarındaki uygulamalarda ve sıvılaştırma potansiyeli olan zemin koşullarında çoğunlukla tercih edilmektedir. Yüzeyle alınan artık malzeme, diğer jet grout sistemlerine göre daha azdır. Killi zeminlerde 40-80 cm, kum-çakıl zeminlerde 50-120 cm çapa kadar kolon oluşturabilmektedir. Granüler zeminlerde mukavemeti en yüksek elemanlar tek akışkanlı sistem ile zemindeki boşluk oranları ise Jet-2 ve Jet-3 tekniğine göre daha azdır.



Şekil 3.6. Tek akışkanlı sistem (JET-1) (Croce ve diğ., 2014)

3.1.3.2. Çift akışkanlı sistem (JET-2)

Bu sistem, tek akışkanlı sisteme göre daha kapsamlı ve karmaşık bir sistem olup, çimento harcının bir hava jeti içinde püskürtülmesi ile zeminin parçalanması sağlanır. Monitör yani püskürtme gövdesi iç içe geçmiş iki üniteden oluşmaktadır (Şekil 3.7.). Tekli sisteme göre daha ince taneli zeminlerde ve oluşturulacak kolon çapı daha büyük olması istenilirse bu tekniğin kullanılması uygun olacaktır. Enjeksiyon işlemi jet-1 yönteminde olduğu gibi içteki borudan yapılır. Basınçlı hava, jet-1'deki kinetik enerji sürtünme kayıplarını azalttığı için, bu yöntemde oluşan kolon çapları jet-1'e kıyasla %60-%80 daha büyüktür. Enjeksiyon basıncı 400-500 bar, hava basıncı 7-17 bar arasında değişmektedir. Kolon çapları ise 80-140 cm'ye kadar ulaşabilmektedir (Burke ve diğ., 2000). Sistemin dezavantajı, mukavemetinin tekli sistemde elde edilen mukavemetten daha az olması ve çimento enjekte edilen zeminin hava içeriğini arttırmasıdır.

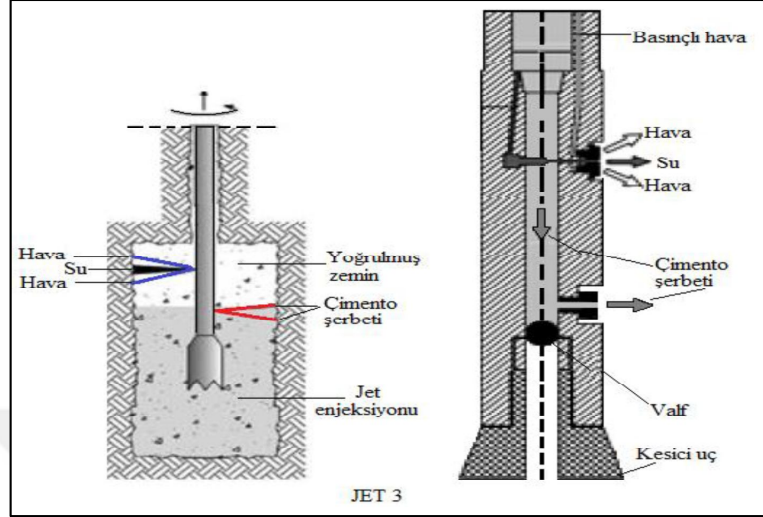


Şekil 3.7. Çift akışkanlı sistem (JET-2) (Croce ve diğ., 2014)

3.1.3.3. Üç akışkanlı sistem (JET-3)

Su, hava ve çimento şerbetinin püskürtülerek iri taneli zeminlerde karıştırma ve ince taneli zeminlerde parçalanmanın aynı anda yapılması esasına dayanır. İç içe geçmiş üç boru sayesinde, yaklaşık 8-12 bar basınçlı hava konisi içinde 400-600 bar basınçlı su jeti ile zemin parçalanmaktadır. Eş zamanlı olarak, bu su jetinin hemen altında bulunan nozülde 30-80 bar basınçlı çimento esaslı enjeksiyon malzemesi enjekte edilmektedir (Şekil 3.8). Hava+su basıncı ile önü açılan enjeksiyon şerbeti daha uzaklara kadar zemine nüfuz etmektedir. Bu yöntem ile yapılan zeminlerde, zemin koşullarına göre kolonlar 2-2,5 m'nin üzerine çıkabilmektedir. Gevşek granüler zeminlerde 2,5 m, sıkı zeminlerde ise

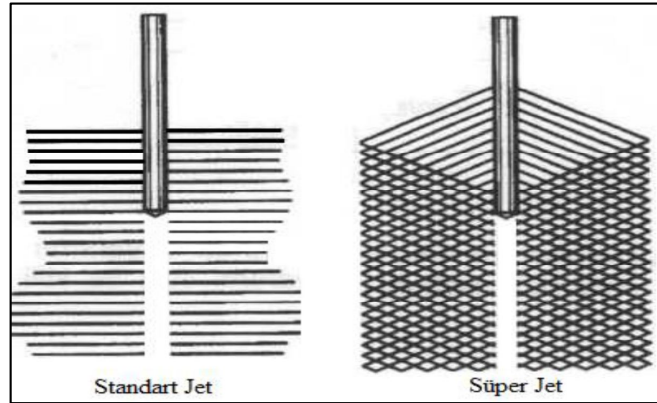
1,5 m ye kadar kolon çapı elde edilebilir. Jet grout kolonlarında zemin çimento karışımı malzemesi içerisine giren hava ve fazla su nedeniyle, çaptaki büyümeye karşı kolonların dayanımında azalmalar görülmektedir.



Şekil 3.8. Üç akışkanlı sistem (JET-3) (Croce ve diğ., 2014)

3.1.3.4. Süper jet yöntemi

3-5m çapta kolonlar elde edilmektedir. Kolon yapım aşaması ilk olarak 15 cm çapa sahip tijin istenilen noktaya indirilmesi ile başlanmaktadır. Tijlerin ucundaki yüksek çaplı nozüllerden çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçta püskürtülür ve zemin ilk önce parçalanarak zemin-çimento karışımı kolonlar oluşmaktadır (Şekil 3.9). Tijlerin dönme ve çekme hızları standart jet'e göre daha azdır. İmalatta işletim parametreleri olarak dönüş hızı 3-4 devir/dakika, çekme hızı 7 mm/dak, enjeksiyon basıncı 40 MPa ile 4 m çapa kadar ulaşılabildiği görülmektedir (Bell ve diğ., 2003).



Şekil 3.9. Standart ve Süper Jet

3.1.4. Parametrelerin Belirlenmesi

Jet enjeksiyonu kolonlarının çapına, dayanımına ve homojenliği zemin iyileştirme parametrelerine bağlıdır. Bazı parametreler birbirine bağlıdır ve uygulamada esnasında çeşitli değişkenler denenerek oluşturulan kontrol parametreleri, imalatlar tasarıma da uygun olacak şekilde belirlenir (Çizelge 3.1 ve 3.2).

- Tek akışkanlı enjeksiyon uygulamasına karar verilebilmesi için 6 farklı imalat parametresi vardır. Bunlar; enjeksiyon basıncı, püskürtme ağızlığının sayısı ve çapları, su/çimento oranı, tijin dönme-çekme hızına bağlıdır.
- İki akışkanlı enjeksiyon uygulaması için tek akışkanlı uygulamasındaki parametrelere ek olarak hava basıncı ve hava akış oranı parametreleri belirlenmelidir.
- Üç akışkanlı sistemde ise iki akışkanlı sistemde kullanılan parametrelere ek olarak su basıncı, su jeti püskürtme ağızlığı sayısı ve çapı parametreleri de tasarımcı tarafından belirlenmelidir (Xanthakos ve diğ., 1994).

Çizelge 3.1 Jetgrout tekniğinin temel işletim parametreleri (Xanthakos ve ark., 1994)

PARAMETRELER			JET GROUT SİSTEMİ		
			JET-1	JET-2	JET-3
Enjeksiyon Basıncı	Su	(Bar)	Ön Yıkama (200~300)	Ön Yıkama (200 ~ 300)	300 ~ 500
	Enj. Harcı	(Bar)	300~600	300 ~ 600	40 ~ 60
	Sıkıştırılmış Hava	(Bar)	Yok	8 ~ 13	8 ~ 13
Akış Oranları	Su	(lt/dak)	Ön Yıkama	Ön Yıkama	70 ~ 100
	Enj. Harcı	(lt/dak)	60~150	100 ~ 150	150 ~ 250
	Sıkıştırılmış Hava	(m ³ /dak)	Yok	1 ~ 3	1 ~ 3
Püskürtme Ağızlığının Büyüklüğü	Su	(mm)	Ön Yıkama (1.6~2.4)	Ön Yıkama (1.6 ~ 2.4)	1.8 ~ 2.5
	Enj. Harcı	(mm)	1.6 ~ 3.0	2.0 ~ 4.0	3.5 ~ 6.0
Püskürtme Ağızlığının Sayısı	Su		Ön Yıkama (1)	Ön Yıkama (1)	1 ~ 2
	Enj. Harcı		2 ~ 6	1 ~ 2	1
Tijin Dönme Hızı		(devir/dak)	10 ~ 30	10~30	3 ~ 8
Tijin Çekilme Hızı		(sn/m)	200 ~ 375	250~500	375 ~ 625
Kolon Çapı	İri Taneli Zeminler	(m)	0.6 ~ 1.0	1.0~2.0	1.5 ~ 2.5
	İnce Taneli Zeminler	(m)	0.5 ~ 1.0	1.0~ 1.5	1.0 ~ 2.0
Su/Çimento Oranları		s/c		0.8:1~2:1	
Tüketilen Çimento Miktarı		(kg/m ³)	200 ~ 500	300 ~ 1000	500 ~ 2000
		(kg/m ³)	400 ~ 1000	150 ~ 550	150 ~ 650
Mukavemeti	İri Taneli Zeminler	(MPa)	10 ~ 30	7.5 ~ 15	10 ~ 20
	İnce Taneli Zeminler	(MPa)	1.5 ~ 10	1.5 ~ 5	1.5 ~ 7.5

Çizelge 3.2. Kontrol parametreleri değişim aralıkları (Croce ve diğ., 2014)

Parametreler	Birim	Jet Grout Sistemleri		
		JET-1	JET-2	JET-3
Yükselme adımı	mm	40-50	40-80	40-100
Ort. Yükselme hızı	mm/sn	4-10	1-8	0,5-5
Rotasyon hızı	rpm	5-40	3-30	1-40
Nozül çap	mm	2-8	2-8	2-8
Nozül sayısı	-	1-2	1-2	1-2
Enjeksiyon basıncı	MPa	30-55	20-40	2-10
Hava basıncı	MPa	-	0,50-2,00	0,5-2,0
Su basıncı	MPa	-	-	20-55
Enjeksiyon akış hızı	lt/sn	2-10	2-10	2-5
Hava akış hızı	lt/sn	-	200-300	200-300
Su akış hızı	lt/sn	-	-	0,50-2,50
Su/çimento oranı	-	0,60-1,25	0,60-1,25	0,40-1,00

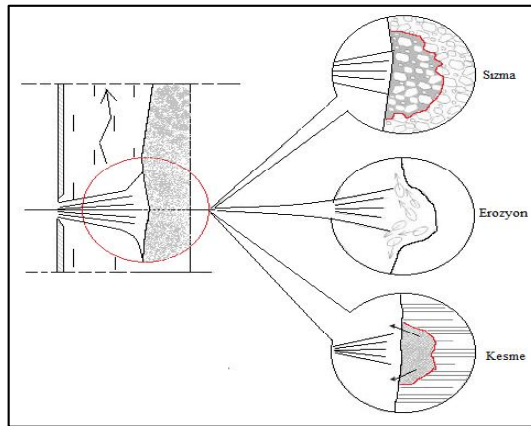
Bu amaçla jet grout imalatına başlamadan önce farklı işletim parametreleri ile zeminin yapısı gözönünde bulundurularak deneme kolonları oluşturulmalıdır. Kumlu ve çakıllı zeminlerde tane dağılımı, su içeriği, doymuş yoğunluğunun belirlenmesi, killi zeminlerde kıvam limitlerinin tayini ile en uygun JG tekniği belirlenmelidir. Killi zeminlerde, düzgün bir kolon elde etmek için 1,6-2 mm çapında ve 2 adet nozül kullanılmalıdır. Zeminde göçmeleri önlemek amacıyla enjeksiyon debisi düşük tutulmalıdır (Melegary ve Garassino, 1997).

Konsolida killerde, enjeksiyon karışımının oluşturulması zor ise nozül adedi bire düşürülmelidir. Bu tür killi zeminlerde kum yoğunluğunu azaltmak için 250-300 bar basınçlı su enjeksiyonu yapılması uygun olabilmektedir. Çakıllı ve granüler zeminlerde enjeksiyon basıncı 400-500 bar ve nozül çapları 2,5-3 mm arasında seçilerek zemine daha fazla enjeksiyon karışımı sağlanmaktadır. Enjeksiyonda istenen mukavemet değerleri elde edilmesinde aşağıdaki faktörler etki etmektedir (Kutzner, 1996).

- Zeminin parçalanması için jetin enerjisi, jetin dönme-çekme hızına, enjeksiyon basıncına ve nozül çapına bağlıdır.
- Pompa kapasitesi, püskürtme enerjisine ve pompalanacak enjeksiyon malzemesinin miktarına bağlıdır.
- İstenilen özelliklerde kolonların oluşması için derinlik boyunca enerjinin arttırılmasıyla zeminin mukavemetinde artış olacaktır.
- Kolonların mukavemeti ve homojenliği arttıkça geçirimsizliği azalır. Bu nedenle düşük mukavemete sahip olan killi-siltli zeminlerde düşük geçirimsizlik elde edilebilmektedir.

- Uygulamada enjeksiyon karışım oranının düşük olması, kolonlarda aşınabilirliğe neden olacaktır.
- Uygulamada kullanılacak jetin basınçlı hava ile çevrenmesi, kesme enerjisini ve verimliliği arttıracaktır. Oluşturulacak bir kolon için verimlilik değerinin yüksek olması, düşük bir enerjiye karşılık gelmektedir. Bu şekilde daha az akışkanın enjekte edilmesine ekonomik bir uygulama sağlanmış olmaktadır. İri taneli zeminlerde, erozyon kolay oluşacağı için uygulamada verimlilik yüksek olmakta ve sonuçta istenilen çapta kolonlar oluşacaktır. İnce taneli zeminlerde verimlilik değeri düşük olacağından (iri taneli zeminin verimliliğinin 1/3'ü kadardır) kolon çapları da küçük olmaktadır.
- Uygulamada imalatı biten jet grout kolonlarının mukavemeti, enjeksiyon karışımının oranlarına, imalat öncesi zeminin özelliklerine ve kolonun homojenliğine bağlıdır.
- Uygulamalarda düşeyde 30° fazla açı yapan jet grout kolonlarında, zeminde kırılma ve kabarmalara yol açtığı için hava ayrı bir akışkan olarak kullanılmamalıdır (Schaefer, 1997).

Jet enjeksiyonun etkisiyle zeminin tane dağılımına bağlı olarak çakıllı, kumlu ve killi zeminlerde farklı şekilde gelişmektedir. *Kumlu çakıl ve çakıllarda* sızma etkili olup, malzeme kompozisyonu homojendir. Büyük kolon çapları için nozül çapı ve akışkan debisi artırılması gerekir. *Kum, çakıllı kum ve siltli kumlarda* erozyon etkili olup, malzeme kompozisyonu homojendir. Büyük kolon çapları için nozül çapı ve akışkan debisi artırılması gerekir. *Silt, kumlu silt ve killerde* kesme ve yoğurma etkisi olmaktadır. Homojenlik için aynı derinlikte jetlemenin tekrar edilmesi gereklidir (Şekil 3.10).

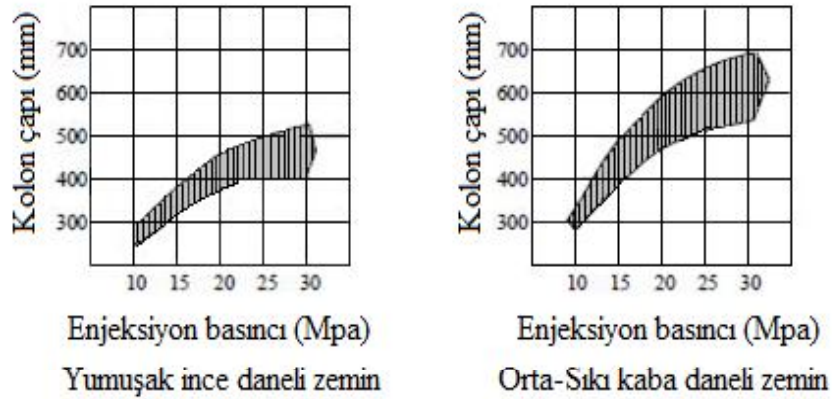


Şekil 3.10. Jet-Zemin Etkileşimi (Croce ve diğ., 2014)

3.1.4.1. Enjeksiyon basıncı

İstenilen kolon çapının elde edilmesi için en önemli parametre enjeksiyon basıncıdır. 200~250 bar (düşük), 300~400 bar (orta) ve 400~700 bar (yüksek) basınç aralığında jet grout kolonlarının imalatının yapılması uygun olacaktır.

Kolon çapı ile enjeksiyon basıncı arasında doğrudan bir bağlantı bulunmaktadır. Yüksek enjeksiyon basınçlarında, büyük kolon çapları elde edilebilir, fakat her zaman basınç artışı ile istenilen çapta olmayabilir. Bunun nedeni kolon çapının zamanın bir fonksiyonu olmasıdır. Kolonun oluşturulması için geçen zaman kolonun çapının homojen olmasını doğrudan etkilemektedir. Şekil 3.11’de oluşan kolon çapı ile enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki görülmektedir (Xanthakos ve ark., 1994). Enjeksiyon basıncı pompadan çıktıktan sonra hortumlarda, tijlerde ve püskürtme ağzında basıncının %5~10’unu kaybetmektedir.



Şekil 3.11. Jetgrout kolonu ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos ve diğ., 1994)

3.1.4.2. Çekme-dönme hızı

Tijin çekme ve dönme hızı; oluşturacağımız jet grout kolonunun sürekliliği ve zemin ile enjeksiyon malzemesinin homojen bir şekilde karışabilmesi açısından, büyük önem taşır. Jet grout kolonları oluşturulurken, delgi makinesi tijinin kendi eksenini etrafında dakikada kaç devir döndüğü; aynı zaman içerisinde tijin çekilme işlemi ise öngörülen derinliğe ulaşıldıktan sonra, enjeksiyonun başlamasıyla birlikte aşağıdan yukarıya doğru belli bir hızla çekilmesidir. Tijin dönme ve çekme hızı belirlenirken; zemin özellikleri, kullanılacak jet sistemi ve birim hacme enjekte edilecek malzeme göz önünde bulundurulur. Kohezyonlu zeminlerde, zemini parçalamak ve homojen karışımı

sağlamak uzun sürede olmaktadır. Jet-2,3 yöntemlerinde de daha büyük çapta kolonlar oluşturmak istendiği için, iyileştirilecek zemin hacmi artacak ve uzun sürelere gerek duyulacaktır.

Homojen bir karışım (zemin+bağlayıcı) oluşturabilmesi için, tijin dönüş hızı fazla olmamalı, tijin çekme hızı ise iyileştirme yapılan bölgede sürekliliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Dönüş hızı 10 ~ 20 rpm arasında değişmekte olup; özel durumlarda 30 rpm'e kadar çıkabilir. Tij çekme işlemi; delgi makinesinin özelliğine bağlı olarak kademeli ve sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır (Melegary ve Garassino, 1997).

Her iki yöntemde de delgi makinesi imalat yöntemine bağlı olarak seçilir. Kademeli çekmede, her kademedede 40 mm ilerleme, 6~10 sn beklemek şantiye tecrübelerinde en iyi sonucu sağlamıştır. Dönme-çekme hızı, zeminin özelliklerine, birim hacme enjekte edilecek enjeksiyon miktarına, iyileştirme yapılacak zemine ve jet grouting uygulama tekniğine bağlıdır. Örneğin Jet 2-3 ve süper jet tekniğinde, büyük çapta kolonların oluşması istendiği için daha uzun sürelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle de kolon çapının en iyi şekilde oluşması, enjeksiyon basıncının artırılmasına veya çekme hızının azaltılmasına bağlıdır. Çizelge 3.2.'de püskürtme gövdesinin çekme hızı ile iyileştirilecek zemin arasındaki ilişki, farklı kaynaklara göre özetlenmiştir (Erdil, 2008).

Çizelge 3.2. Püskürtme gövdesinin çekme hızı ile ıslah edilen zemin arasındaki ilişki (Erdil, 2008)

Zemin	Enj. Basıncı (MPa)	Çekme Hızı (cm/dak)	Islah Edilen Hacim (m ³ /m)	Kaynak
Yumuşak Kaya	39.3 ~ 48.9	2.3 ~ 9.4	0.1 ~ 0.2	Yahiro ve diğ., 1975
Sıkı Kum, Çakıl	39.3 ~ 48.9	3 ~ 11.7	0.1 ~ 0.2	Yahiro ve diğ., 1975
	34.5 ~ 41.4	30.5	0.3 ~ 1.8	ENR, 1986
Orta Sıkı Kum	39.3 ~ 48.9	13.2 ~ 23.1	0.2 ~ 0.2	Yahiro ve diğ., 1975
	20 ~ 40	9.9 ~ 50	0.1 ~ 1.8	Welsh ve diğ., 1986
	38.6	91.4	0.2	ENR, 1974
	30.3	39.9	0.3	Aschieri ve diğ., 1973
	39.3 ~ 48.9	50 ~ 119.9	0.1 ~ 0.6	Yahiro ve Yoshida, 1973
	5.5 ~ 6.9	39.9 ~ 59.9	0.2 ~ 1	Broid ve diğ., 1981
Gevşek Kum	39.3 ~ 48.9	23.1 ~ 28.7	0.2 ~ 0.2	Yahiro ve diğ., 1975
Kil ve Silt	39.3 ~ 48.9	31 ~ 38.6	0.2 ~ 0.3	Yahiro ve diğ., 1975
	20 ~ 40	9.9 ~ 42.2	0.1 ~ 1.5	Welsh ve diğ., 1986
	30.3	39.9	0.3	Aschieri ve diğ., 1973
	39.3 ~ 48.9	50 ~ 119.9	0.1 ~ 0.5	
	5.5 ~ 6.9	39.9 ~ 59.9	0.1 ~ 0.4	Broid ve diğ., 1981

3.1.4.3. Su/Bağlayıcı (S/B) oranı-Dozaj

Jet enjeksiyonunda çimento şerbeti miktarı, uygulamada oluşturulacak kolonların dayanım değerlerini sağlaması ve maliyetlerinin belirlenebilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle çimento şerbeti miktarı; enjeksiyon basıncına, su/çimento oranına, püskürtme ağzı sayısına (nozül), ıslahın türü ve uygulanacak jet sistemine göre farklılık gösterir. Su/çimento oranının Jet-1,2’de 1,0-1,5 ve Jet-3’de ise 1,2-1,5 arasında değiştiğini belirtmiştir (Lunardi, 1977).

Jet-grout imalatı için arazi uygulamalarında su/çimento oranı 1.0 ve enjeksiyon malzemesinin ağırlığı 14,10-15,70 kN/m³ alınmaktadır. Enjeksiyonun su/çimento oranındaki artış, dayanımındaki azalmaya neden olmaktadır. Ancak seçilen su/çimento oranı zemin tipine, uygulanan jet-grout yöntemine ve istenilen kolon dayanımına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek viskoziteli akışkanlar, düşük viskoziteli akışkandan daha fazla dağılmaktadır. Bu da akışkanın odaklanmasını azaltmakta ve aşındırma enerjisini etkilemektedir. İyileştirilmiş 1 m³ zemin içindeki çimento miktarı ise 350-700 kg arasında değişmektedir (Melegary ve Garassino, 1997).

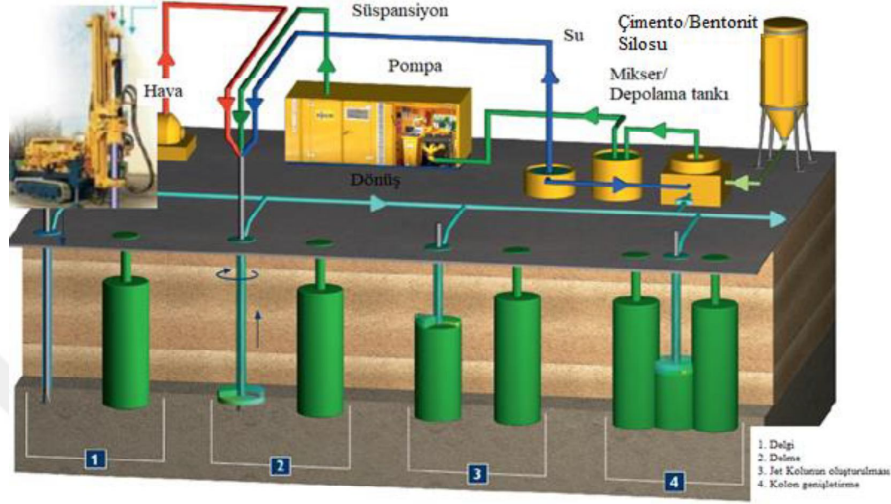
Debisi yüksek olan zeminlerde, enjeksiyon karışımına ilave %1-3 oranlarında sodyum silikat katkısı ilave edildiğinde priz süresini hızlandırmaktadır. Organik zeminin içerisindeki asitler çimento bağlayıcılığını azalttığı için çimento dozajı 450 kg/m³’den 750 kg/m³’e çıkarılabilir. Aynı su/çimento oranında hazırlanmış Jet-2 kolonunun mukavemeti hava içeriğinden dolayı Jet-1 kolonuna göre %10-%18 daha düşüktür. Su/çimento oranları aynı olacak şekilde hazırlanmış Jet-3 kolonunun mukavemetinin Jet-1,2 kolonunun mukavemetinden daha düşüktür. Bunun nedeni, su içeriğinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır (Bakım, 2007).

3.1.5. Jet Grout Ekipmanları

Ülkemiz konumu itibariyle, sismik tehlikelerin çokça görüldüğü bir bölgede olduğundan dolayı zemin iyileştirme yöntemleri büyük önem taşır. Jet grout yöntemi, kullanım alanının çokluğu, uygulanabilir oluşu ve daha önceden bahsettiğimiz diğer özellikleriyle, ülkemizde ve diğer ülkelerde özellikle sıvılaşma riskinin azaltılması amacı ile kullanımı oldukça yaygındır. Bu yöntemde kullanılan ekipmanlar: (Şekil 3.12).

- Çimento silosu
- Karışım ünitesi

- Enjeksiyon ve su pompası
- Hava kompresörü
- Delgi makinesi
- Ek olarak sahada kaynak makinesi ve elektrik kesintilerinin olması halinde 50 kVA'lık bir jeneratör de bulundurulması gerekir (Küçükali, 2008).



Şekil 3.12. Jet grouting yöntemi ekipmanları (Croce ve diğ., 2014)

3.1.5.1. Delgi Makinesi

Delgi makinesi; jet grout kolonu oluşturulması amacıyla yapılacak delgiyi gerçekleştiren makine olup, aynı zamanda sondaj makinesi işlevi de görmektedir. Her türlü arazi koşullarında paletli yürüme takımıyla rahatlıkla hareket edebilen ve önceden belirlenen dönme-aktarma hızlarında ilerlemek için; enjeksiyon tiji, monitör, su başlığı ve püskürtme ağız ile donatılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Jet grout delgi makinesi (<https://www.insaatofis.com/jet-grouting-jet-grout-imalati-asamalari.html>)

Tijler, delgi esnasında içinden su, kolon oluşturulmasında ise yüksek basınçlı enjeksiyon harcını geçirir. Monitör, adaptör takımının ve delgi ucunun istenen derinliğe kadar inmesini sağlar. Kolon oluşturma yöntemlerine göre su başlığı ve tijlerde olduğu gibi tek, çift veya üç cidarlı olabilir. Monitör adaptör takımı; delgi makinesine bağlı bulunan su başlığı ve tij sisteminin son halkasını oluşturur. Bu ekipmanın en uç noktasına da delgi ucu takılır. Su başlığı; bir ucu enjeksiyon pompasına bağlı yüksek basınca dayanıklı hortumların, delgi makinesindeki tijler ile bağlantısını sağlayan hareketli bir başlığa sahip bir çeşit adaptördür (Doğanışık, 2010).

Püskürtme ağzı; milimetre mertebesinde elmas cidarlı küçük bir deliktir. Monitör üzerinde bulunan yuvalara birbirleriyle 180°lik açıda ve düşeyde 4'er cm kot farkıyla monte edilirler. Bir monitör üzerinde en az iki adet püskürtme ağzı yuvası bulunmaktadır. Püskürtme ağzı çapları genellikle 1.6-3.0 mm arasındaki çaplardan seçilerek kullanılır (Doğanışık, 2010).

3.1.5.2. Yüksek basınç pompası

Enjeksiyon karışımı; istenen çapta jet grout kolonu teşkil edebilecek basınçta basabilecek, yüksek basınçlı pompadan oluşan pompa ünitesidir. Jet grout kolonlarının yapımında 60 MPa'da 150-450 lt/dak arasında çimento harcı basabilen ve 8 saate kadar sürekli çalışabilen pompalar kullanılmaktadır (Kauschinger vd., 1992).

3.1.5.3. Mikser ünitesi

Karışım ünitesi, enjeksiyon karışımını istenen su/çimento oranında hazırlamayı sağlayan mikser ve dinlendiriciden oluşur. Belirlenen s/ç oranlarına göre çimento ve su miksere aktarılırken karıştırma işlemi de başlatılmış olur ve sonrasında karıştırılan enjeksiyon harcı dinlendirme kazanına aktarılır. Monitöre komut verilerek, enjeksiyon pompa ünitesi tarafından zemine yüksek basınçla gönderilir.

3.1.5.4. Çimento silosu

Farklı kapasitelere çimento depolayabilen ve mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek kapasitede çimento silosu ve konveyörü ekipman sisteminde yer alan ünitelerdir (Çınar, 2014).

3.1.5.6. Monitör

Monitör aşağıda verilen özellikleri kapsar (TS EN 12716);

- Tekli sistemde, enjeksiyon şerbetini jet haline getiren bir ya da daha fazla dairesel püskürtücüdür. Bu püskürtücüler; aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkân sağlayan açılarda bulunabilir.
- İkili (hava) sistemde, hava ve enjeksiyon şerbetinin eş zamanlı jet haline getirilme işlemi için bir ya da daha çok çift püskürtücüdür. Hava püskürtücüsü, dairesel şerbet püskürtücüsünün çevresini bir halka şeklinde sarar.
- İkili (su) sistemde suyun jet haline getirilmesi için bir ya da daha fazla püskürtücü ve çimento karışımını yollamak için bir ya da daha fazla daha derine yerleştirilen püskürtücüdür.
- Üçlü sistem için, su ve havanın eş zamanlı jetlenmesi işleminde bir ya da daha fazla çift püskürtücü ve enjeksiyon şerbetinin gönderilmesini sağlayan daha derine yerleştirilmiş bir ya da daha fazla normal püskürtücüdür (Küsin, 2009).

3.1.6. Jet Grout Yönteminin Uygulama Alanları

Yapılan araştırmalar ve vaka analizleri incelendiğinde bu yöntemin bütün dünyada etkin bir şekilde rol aldığı görülmektedir. Bu yöntem ile iyileştirilen zeminin taşıma gücü değerlerinin ve elastisite modülünün artırılması, oturma değerlerinin ve geçirgenliğin azaltılması amaçlanmaktadır. Başlıca kullanım alanları:

- Temellerin takviyesinde,
- Eski tarihi yapıların temellerinin güçlendirilmesi,
- Kazı çevresindeki zeminin desteklenmesi,
- Kazı tabanında yeraltı suyunun kazı alanına girmesinin engellenmesi,
- Dayanma ve istinat yapılarının takviyesinde,
- Kesişen kolonlar oluşturarak geçirimsizlik perdesi oluşturulması,
- Tünel inşaatlarında yumuşak zeminlerin desteklenmesi,
- Barajlarda sızdırmazlık perdesi oluşturması,
- Atık sahalarında geçirimsizlik perdesi görevi sağlanmasıdır.

3.1.7. Jet Grout Özellikleri

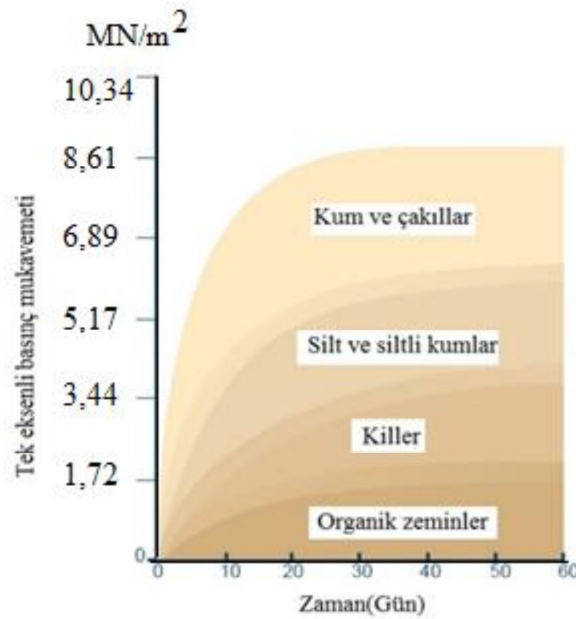
Uygulamada su/çimento oranı 0,6-1,3 aralığındadır. Yüksek su/çimento oranları da zeminin öğütüp-dağıtma potansiyelini arttırmaktadır. Bu nedenle düşük kolon basınç dayanımlarına, neden olabileceği değerlendirilerek su/çimento oranları uygulama projesine göre seçilmelidir. Kullanılacak çimento çeşidi ile ilgili bir sınırlama yoktur. Ancak zemin özellikleri ve projeye özel koşullar değerlendirilerek; bazı durumlarda özel çimentoların kullanımı gerekli olmaktadır. Örneğin, hızlı priz alması istenirse Portland çimentosu, bazen de puzolonik veya yüksek fırın cürufu çimentoların kullanımı önerilmektedir.

Araştırmacıların elde ettikleri deneysel veriler değerlendirilerek farklı zemin sınıflarında imal edilen kolonların da beklenen tek eksenli basınç dayanımı değerleri Çizelge 3.3 ve Şekil 3.14’te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Zemin sınıfına göre kolonlardaki serbest basınç dayanımı değerleri (Durgunoğlu, 2004)

Zemin Sınıfı	Serbest basınç Dayanımı, q_U (MPa)	Modül oranı, E/q_U
Kil	2-5	150
Silt	3-7	200
Kum	7-14	600
Çakıl	12-18	900

E: %40 gerilme seviyesine karşılık gelen elastisite modülü



Şekil 3.14. Farklı zemin sınıflarında JG kolonlarındaki serbest basınç dayanımları (Burke, 2004)

3.1.8 Jet Grout Kolonlarının Kalite Kontrolü

Zemin iyileştirme uygulanan sahada, proje verilerine göre uygun deneme kolonları yapılmalıdır. Deneme kolonlarında şartnameye uygun değerler elde edilmişse, deneysel ve gözlemsel verilere göre jet grout kolonlarının kalitesi ve iyileştirme yapılan sahanın kontrol işlemlerinin yapılması gerekir. Bunlar:

- İmal edilen jet grout kolonların çap, boy ve dayanım özelliklerinin imal edilen yapıda istenilen değerleri sağlayıp sağlamadığı,
- Kazık yükleme deneyi,
- Bütünlük (süreklilik) deneyleri,
- İmal edilen jet grout kolonun-zemin ile etkileşimlerinin, projede öngörülen davranışa uygun olup olmadığının

araştırılması gerekir.

3.1.8.1 Karot Numune Alınması ve Çap Kontrolü

Kolonların imalatından sonra kolonlardan silindirik karot numunesi alınır (Şekil 3.15). Yerinde oluşturulan jet grout kolonları yaş ise piston numune alıcı ile alınması gerekir (Durgunoğlu ve diğ., 2003). Laboratuvarda serbest basınç deneyi yapılarak kolonların (7, 28 günlerde prizini aldığı kabul edilerek) basınç dayanımı tespit edilir. Serbest basınç deneyinde deformasyonlar ölçülerek deformasyon modülü hesaplanabilir (Sağlamer ve diğ., 2002).



Şekil 3.15 Arazide Jet Grout Kolonundan Karot Numune Alınması (<https://www.insaatofis.com/jet-grouting-jet-grout-imalati-asamalari.html>)

Jet grout kolonların projeye uygunluğunu gösteren en önemli parametre çap kontrolünün tahminidir. Çapın tahmin edilebilmesi için geliştirilen farklı yöntemler

olmasına rağmen kolon çapının tahmini kesin değildir. Çap kontrolü, projelerin ve imalatçıların uygulamadaki tecrübelerine dayanmaktadır. Zemin sınıfına göre oluşan kolon çapları değişmektedir. Gerçekleştirilen imalatlar, doğruluğu geliştirilen çeşitli sonuçlar ve aralarındaki kolerasyonlara göre kontrol edilir. Mevcut yöntemlerden bazıları şunlardır:

- Kolon etrafının kazı ile açığa çıkarılması (Şekil 3.16),
- Kolonların merkez ve çevresinden alınan sondajların incelenmesi,
- Belirlenen kolonların belli bir yükseklikten kırılarak, oluşan yapının homojenliğine bakılması ve laboratuvar için örneklerin alınması,
- Kolonların boylarının sürekliliği,
- Kolonların imalatı sırasında, yüzeye çıkan atık enjeksiyon harcından (zemin+enjeksiyon) alınan numunelerden özgül ağırlığının tahmin edilmesi,
- Jeofizik yöntemlerle kolon çaplarının kontrolü,
- Teorik modellere dayalı analitik yaklaşım yapılarak çap hesaplamalarıdır.



Şekil 3.16. Jet grout kolonların çap kontrolü (Kimpritis,2013)

3.1.8.2. Dayanım kontrolü

Jet grout yöntemindeki diğer önemli husus, imal edilen kolonların dayanımıdır. Kolonların dayanımını etkileyen en önemli faktörler kullanılan harçların su/çimento oranı ve zeminin cinsidir. Uygulamada mukavemet değerinin kontrolünde, kolon imalatı sırasında yüzeye çıkan atık malzemelerden alınan numunelerde veya oluşan kolonlardan en az 28 gün sonunda karot numuneleri alınarak üzerinde basınç deneyleri yapılmasıdır (Şekil 3.17). Yaygın olarak kullanılmayan diğer yöntemde, jet grout kolonuna yerleştirilen bir örnekleyiciden alınan numuneler üzerinde analizler yapılmasıdır.



Şekil 3.17. Jet grout kolonlarından alınan karot numuneleri (Kimpritis,2013)

3.1.8.3. Yükleme deneyleri

Projenin uygun olup/olmadığını kontrol etmek amacıyla fore kazıklarda olduğu gibi düşey yükü taşıyacak kolonlar üzerinde, yükleme deneyi yapılarak kolonun taşıma gücü değeri tahmin edilir. Yükleme deneyi için bir basınç kolunu ve iki adet çekme kolunu olacak şekilde önceden imal edilir. Bu nedenle yapılacak deneylerin düzeneği, yükleme prosedürleri ve yük-deplasman eğrilerinden belirlenecek taşıma gücü yöntemleri, kazıklar için verilen standartlara göre yapılır (ASTM D 1143, 2007). Bu amaçla jet grout kolonuna gelen düşey basınç yükünde yük-deplasman, yük-zaman, deplasman-zaman grafikleri hazırlanır. Deney yükü için kolonun taşıma kapasitesinin 1,5-2 katı olacak şekilde yüklenmelidir. Uygulamada arazide seçilen deneme kolonu/kolonlarında göçme oluncaya kadar veya şartnamede belirlenen oturma değerine kadar yükleme yapılır. Jet grout kolonları üzerinde yapılan yükleme deneyinin basit bir örneği Şekil 3.18’de verilmiştir. Yükleme düzeneği için imal edilen kazık başlığının zemin ile iletişiminin kesilmesi gerekir.

Göçme yükü; yükleme sırasında yükün artmadığı halde oturmanın devam etmesi durumundaki yük veya kolon çapının %10’u kadar bir oturmaya neden olan yüke göre belirlenir (ASTM D 1143, 2007). Ancak jet grout kolonunda, maksimum yüklemeye meydana gelen deformasyon servis yükündeki deformasyonun 1,5-2 katını geçmemesi ve deney yükü kaldırıldıktan sonra kalıcı deformasyonun, toplam deformasyonun %50’sini geçmeyecek şekilde yükleme deneyinin yapılması gerekmektedir (Düzceer, 2004)



Şekil 3.18. Yükleme düzeneği (<http://www.zeminarastirma.com/deneyler/kazik-yukleme-deneyi/>)

3.1.8.4. Bütünlük deneyi (integrity)

1968 yılından günümüze kadar bütünlük deneyi kullanılarak kazıklar test edilmiştir (Şekil 3.19). Kazıkların üst kısımlarında tespit edilen bozukluklardan dolayı, kazıklar daha detaylı inceleme için kazılmış veya karot numuneler alınmıştır. Fakat kazık/jet grout kolonları yer altında görülmeyen yapılardır. Standartlara uygun olarak yapılan jet grout kolonunun, işveren ve uygulayıcı için proje yüklerini taşıyıp taşımadığı önemlidir. Yeraltında oluşturulan bu kolanlarda çap, boy sürekliliğinin denetlenmesi bütünlük deneyi ile imalatların uygunluğunu kontrol etmek mümkündür. Zemini açmadan yeraltındaki imalatın konumu ve hatalar belirlenebilmektedir. Bütünlük deneyi, hataları belirlemede hızlı ve daha az masraflı bir yöntemdir. Bu deneyin sonucuna göre arızalı jet grout kolonun onarımı veya yenilenmesi yapılabilir.

Bu deneyde, jet grout kolonunun üst kısmına el çekiciyle darbe yapılır. Jet grout kolonu üstüne yerleştirilmiş olan ivme ölçer veya akselometre ile bir ivme (yansıma) sinyali hemen algılanarak sayısallaştırılıp bilgisayarda kayıt edilir. Kolondaki şekil ve malzeme değişiklikleri tespit edilir. Şantiye yetkilisinden kazık boyu, çapı, beton cinsi, zemin bilgileri, varsa çalışma sıkıntıları, imalat yapım yöntemi, muhafaza borusu, bentonit vb. gibi ön bilgiler alınır.

Bütünlük deneyinde iyi sonuç elde etmek için; kazık/jet grout başı temiz olmalı, ses ve hareketli sudan etkilenmeyecek uzaklıkta, en azından 5 günlük olmalı ve beton sınıfı bilinen malzemelerden yapılmalıdır. Prekast eklemeli veya kalıcı muhafaza borulu kazıklar için uygun değildir. Deneyin dezavantajları ise taşıma kapasitesi hesaplanamaz

ve küçük bozukluklar kolaylıkla görülmez, kazıklar için uzunluk zor belirlenir. Kazık ucundaki çöküntü belirlenemez.



Şekil 3.19. Jet Grout Bütünlük Deneyi (<http://www.zeminarastirma.com/referanslar/canakkale-jet-grout-pit-sureklilik-deneyi/canakkale-jet-grout-butunluk-deneyi-pit-1/3/>)

3.1.8.5. İyileştirilmesi yapılan sahada zemin kontrollerinin yapılması

İyileştirme yapılan saha üzerinde yapılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneylerinin yapılmasıdır. Sondaj tüplerinden elde edilen zemin katmanları Şekil 3.20’de görülmektedir. Alınan numuneler üzerinde su içeriği, tane dağılımı, atterberg limitleri, sıklık/kıvam ve kayma dayanımı özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvar ortamında deneylerin yapılması gerekir (Erol ve Çekinmez, 2018). Sahada arazi deneyleri (SPT, CPT, PMT vb.) yapılarak ve mevcut korelasyonlarla zemin özellikleri veri tabanı zenginleştirilmeli ve zemin profilindeki değişimlere bakılmalıdır.



Şekil 3.20. İyileştirme yapılan zeminden alınan sondaj numuneleri (Kimpritis,2013)

3.2. Kullanılan Bağlayıcı Malzeme Özellikleri

Çalışmada, Normal Portland çimentosu (NPC), mikro taneli çimento (DMFC-800) ve çimento ağırlığının %15'i oranında F tipi uçucu kül (UK) olup, bunların karışımlarından elde edilen 4 farklı enjeksiyon harç karışımları oluşturulmuştur. Bu karışımlardan jet grout kolonlarının oluşumu, basınç dayanımı ve çekme dayanımı özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılıp incelenecek şekilde deney programı hazırlanmıştır.

3.2.1. Normal Portland Çimentosu (CEM-I 42,5R)

Portland çimentosu klinkerinin temel hammaddeleri kalker ve kildir. Portland çimentolarının %90'ını oluşturan CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi temel bileşenleri dışında MgO, SO₃ ve Alkali oksitleri de yer alır. Deneylerde kullanılan çimento, erken dayanım kazanan bir çimento olup; TS EN 196 ve TS EN 197-1'e uygundur. Çimentonun bu özelliği enjeksiyon karışımında, hidrasyon sıcaklığının hızlı bir şekilde olmasına ve kolonların daha erken yüksek dayanım kazanmasına neden olmuştur. Tasarımda kullanılan çimentonun özgül yüzeyi 3312 cm²/g RRSB (Rasin Rammlar Sperling Benett) yöntemine göre belirlenen (2540-3850 cm²/g) sınır değerleri arasındadır. Tane inceliğinin yüksek olması oluşturulan kolonlarda dayanımın bir göstergesidir. Çimentonun özgül kütlesi ve kimyasal bileşenleri üreticinin verdiği değerler kullanılmıştır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. CEM I 42,5R çimentosunun kimyasal bileşenleri

İçerik (%)	CEM I 42,5 R
CaO	62.10
SiO ₂	20.10
Al ₂ O ₃	4.92
Fe ₂ O ₃	3.17
MgO	1.81
Na ₂ O	0.32
K ₂ O	1.07
SO ₃	4.71
Cr ₂ O ₃	0.05
TiO ₂	0.42
Kızdırma kaybı (KK)	2.69
Özgül kütlesi (g/cm ³)	3.08
Özgül yüzey İncelik (cm ² /g)	3312

3.2.2 Mikro Taneli Çimento (DMFC-800)

Deneyde kullanılan mikro taneli çimento (DMFC-800), ultra ince parçacıklardan oluşan Portland esaslı bir çimentodur. Gri renkli ince tozlu, kokusuz ve sağlık açısından zararsızdır. DMFC-800 yurt dışından getirilmiş ve kuru bir ortamda saklanmıştır (Şekil 3.21). Çimentonun sudaki çözünürlüğü %1'den küçük, pH derecesi 12-13 arasındadır. Mikro taneli ince çimento, küçük parçacık boyutundan dolayı (elekten geçen %95 oran için en büyük tanecik boyutu $D_{95} < 16.0 \mu\text{m}$ ve özgül yüzey değeri $> 8000 \text{cm}^2/\text{g}$) enjeksiyon sıvısı olarak kullanıldığı zaman kaya veya zemin içindeki çatlak ve gözenek alanlarına nüfuz ederek ortamı su sızdırmaz hale getirme özelliğine sahiptir. DMFC-800 mikro taneli çimentoya ait malzeme özellikleri Çizelge 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Mikro taneli çimento (DMFC-800)

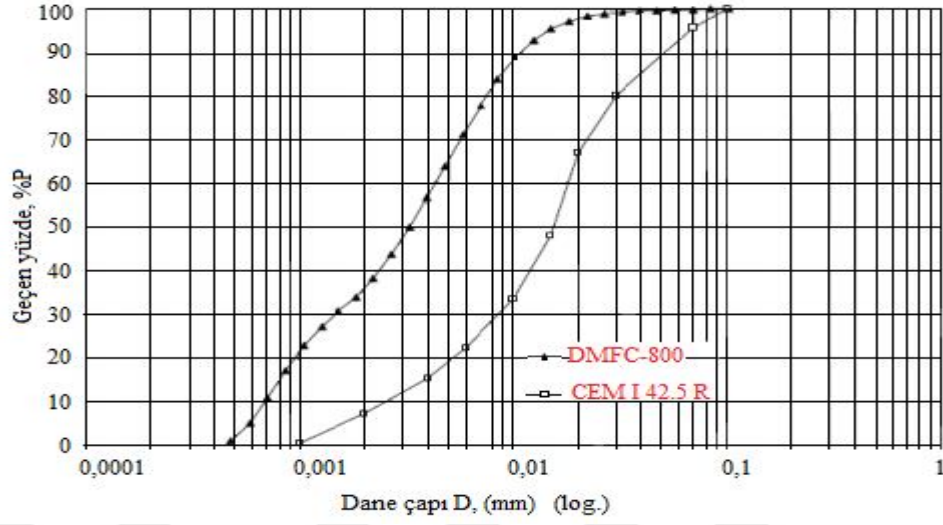
Çizelge 3.5. Mikro taneli çimentonun özellikleri

(<http://www.sakingsh.com/skin/saking/DOWNLOAD/DMFC-800.pdf>)

Ürün	Birim	DMFC-800
Renk	-	Gri
Koku	-	Yok
Toksit madde	-	Yok
Spesifik yüzey alanı	cm^2/g	≥ 8000
Tanecik Boyutu	D_{50}	μm
	D_{90}	μm
	D_{95}	μm
Priz alma ilk süresi	min (dak)	120
Priz alma son süresi	min (dak)	150
Dayanım (gün)	3	MPa
	7	MPa
	28	MPa

Mikro taneli çimento normal portland çimentosundan daha ince parçacıklara ve dolayısıyla daha yüksek spesifik yüzey alanına sahiptir. Deneylerde kullanılan mikro taneli çimentonun tane büyüklüğü dağılımı üretici firma tarafından Mastersizer cihazı ile belirlenerek tarafımıza verilmiştir (Şekil 3.22). Mikro taneli çimentonun (DMFC-800) üretici firma tarafından beton karışımında $s/\phi=0.6-0.75$ oranları, granüler zemin ve

gevşek kaya enjeksiyonunda $s/\phi=0.75-1.50$ oranları arasında kullanılabilceğini belirtmişlerdir.



Şekil 3.22. DMFC 800 ve NPC çimentonun tane boyutu dağılımı

Mikro taneli çimentonun teknik özellikleri: (URL-6);

- İnce ve küçük parçacık boyutuna sahip olması,
- İnce taneli çimento, diğer çimentolara göre daha yüksek dayanım değerlerine sahip olması,
- Ekonomik ve dayanıklı olması,
- Organik ve çevre kirlenici madde içermediği için sağlık açısından tehlikesiz olması,
- Sıkı derz, çatlaklar ve gözenek alanlarında daha iyi penetrasyon sağlayabilmesi,
- Daha fazla penetrasyon ve daha fazla su geçirmezlik özelliği kazandırması,
- Daha iyi çalışma ortamı sunması ve içeriğinde zararlı bileşenlerin olmaması,
- Geliştirilmiş enjeksiyon verimliliği ve daha az atık oluşması,

Mikro taneli çimentonun uygulamadaki kullanım alanları: (URL-6);

- Zemin ve kaya enjeksiyonu: Kazı öncesi ve sonrası enjeksiyon için kullanılan tüneller, mağaralar, maden vb.
- Yeraltı suyu sızdırmazlığı ve yerden sabitleme
- Baraj temeli enjeksiyonu
- Jet enjeksiyonu

3.2.3. Uçucu Kül (UK)

Uçucu kül elektrik enerjisi elde etmek için yakıt olarak öğütülmüş kömürün kullanıldığı termik santrallerde veya demir, çelik ve bazı metallerin üretimlerinde olduğu gibi elde edilmek istenen esas ürünün yanı sıra yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Atık madde olarak elde edilen uçucu külün depolanması, santrallerden uzaklaştırılması ve atılması ekonomik olmamakla birlikte güçlükler yaratmakta ve çevre kirliliği sorunlarının yanında işletme, enerji üretim kaybı gibi teknik sorunlara neden olmaktadır. Bu yan ürünlerin değerlendirilmesi, kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesi ve doğal malzemelerin azalmasını önlemektedir. Uçucu küller atık olarak geri kazanılmaya elverişli bir malzeme olup, değişik sektörlerde değerlendirilebilir. Atık malzemelerin değerlendirilmesi durumunda çevre sorunları azalmakta, enerji tasarrufu ve ekonomi sağlanmaktadır (Demiröz, 2009).

Türkiye’de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta, ortalama 15 milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Ülkemiz için böyle bir atığın depolanmaması veya değerlendirilmemesi önemli derecede ekonomik ve çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir (Demiröz, 1992). Termik santrallerden 1 kWh’lik enerji üretiminde ~110 g uçucu kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW’lık bir santralden yılda yaklaşık 650000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dünyadaki uçucu kül üretimi ise yılda yaklaşık 450 milyon ton olup, toplam uçucu kül miktarının sadece %6’sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır (Tokyay ve diğ., 2009).

Uçucu kül üretimini; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi gibi çeşitli faktörler etkilemekle birlikte genel olarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taşkömürünün %10-15’i, linyit kömürünün ise %20-50’si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonucu ortaya çıkan külün %75-85’i baca gazları ile kazandan çıkan ve yukarı doğru yükselen çok ince tane atıklar "uçucu kül" olarak tanımlanırlar. Santrallerde, baca gazlarından uçucu küllerin tutulması amacıyla yüksek verimli elektro filtreler ve siklon denilen toz tutucular kullanılmaktadır (Morrison, 1970).

Uçucu küller alüminli, silisli ve demirli malzemelerdir. Genellikle gri renkli ve renkleri koyu ise içlerinde yanmamış karbon parçacıkları çok miktarda bulunmaktadır. Kireçle birleştiklerinde bağlayıcılık özelliği taşımaktadır (Özbayoğlu, 1993). SiO₂, FeO ve Al₂O₃ içeren karmaşık yapıları çoğunlukla camsı küresel taneciklerden oluşur. Çapları

1-300 mikron arasında değişen uçucu külün özelliklerine etki eden faktörler; yakılan kömürün cinsi, yakma randımanı, kömürün yakıldığı fırının sınıfı, kömürün inceliği, kömüre ilave edilen katkı maddeleridir. Termik santrallerde çok ince öğütülerek yakılan kömürden üç farklı kül elde edilmektedir.

- Baca gazları ile taşınmayan ve kazan tabanına düşen iri taneli olanlara “*taban külü*”
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulularak uzaklaştırılması ile elde edilen “*ham kül*”
- Baca gazları ile taşınan ince taneli olanlara “*uçucu kül*”

Mineralojik ve kimyasal özellikler açısından uçucu küller, içi boşluklu veya boşluksuz, camsal kürecikler süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden oluşurlar. Kimyasal yapılarında Si, Al, Ca ve S bulunur. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alümina silikatlardan ve Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezler (Demiröz, 2009). Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır (Türker ve diğ., 2009). ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

F Sınıfı Uçucu Kül: Taşkömürünün yakılmasıyla elde edilen ve yapılarında $\text{SiO}_2 + \text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \geq \%70$ olduğu zaman F sınıfı uçucu kül diye adlandırılırlar. Yapısında kireç serbestçe bulunmaz. İçerisinde %10’dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireçli uçucu kül olarak isimlendirilir. Kendi kendine sertleşme özelliğine sahip değildirler. Sulu ortamda kireçle reaksiyona girerek çimentolaşma özelliği gösterirler.

C Sınıfı Uçucu Küller: Yapılarında $\text{SiO}_2 + \text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \geq \%50$, %1-3 kireç bulundururlar. Linyit ve düşük kalorili kömürlerin yakılmasıyla elde edilirler. Çimentolama özelliğine sahip oldukları için kendi kendilerine sertleşebilirler. TS EN 197-1’e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

V Sınıfı Uçucu Küller: Puzolanik özelliklere sahip ince ve küresel taneciklerden meydana gelen tozdur. Esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten

(Al_2O_3) ve demir oksit bileşenleri içeren küllerdir. Reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının ise %25'den fazla olması gerekmektedir.

W sınıfı küller: Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO) (%10'dan fazla), reaktif SiO_2 (%25'den fazla) ve Al_2O_3 'den geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) oluşan küllerdir.

3.2.3.1 Uçucu küllerin özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmamasına rağmen, yalnızca kimyasal oksit analizi kullanılarak bu malzemelerin kullanılabilirliği belirlenmektedir. Mineral malzemenin çoğu kil, pirit ve kalsitten oluşur. Minerallerin %85'den fazlası termal işlemlerle şekillendirilmiş camsı, içi boşluklu ve dolu kristalimsi taneciklerden oluşmaktadır. Linyitten elde edilen külde CaO ve MgO oranı Fe_2O_3 'den fazla, taşkömüründen ise Fe_2O_3 oranı CaO ve MgO oranından daha fazladır (Demiröz, 2009).

İnşaat mühendisliğinde uçucu kül;

- Dolgu malzemesi,
- Zemin stabilizasyonunda zemin özelliklerini iyileştirici malzeme,
- Yalıtım malzemesi,
- Maden ocaklarında filler malzeme olarak,
- Hafif beton üretiminde yardımcı hammadde,
- Katkılı çimento ve beton üretiminde (maliyeti düşürmek, özelliklerini iyileştirmek amacıyla) katkı malzemesi,
- Hafif agrega üretiminde yardımcı hammadde,
- Tuğla üretiminde yardımcı hammadde,
- Donatılı zeminlerde duvar arkası dolgusu, (Eftelioğlu ve Bowders, 1992)
- Katı atık depolama sahalarında yeraltı suyunun kirlenmemesi için çevresinde düşey geçirimsiz perdelerin oluşturulmasında bentonit-çimento ve zemin-bentonit karışımlarında katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde ise:

- Geçirimsizliği sağlamak ve oturmayı azaltmak, taşıma gücünü arttırmak
- Temel alt dolgusu

- İstinat duvarı arka dolgusu
- Baraj dolgularında katkı malzemesi olarak,
- Zemin stabilizasyonu ve yollarda,
- Beton üretiminde reolojik özellikleri düzenleyici olarak,
- Asfalt ve kireç+uçucu kül enjeksiyonunda,
- Çimento-bentonit ve uçucu kül enjeksiyonunda,
- Bina ve park alanlarının yapımını desteklemek amacıyla yapılan dolguların stabilizasyonunda ve onarımında kullanılmaktadır.

Uçucu küllerin enjeksiyonda kullanımı oldukça yenidir. Tane boyutu ve şekli, tane dağılımı ve puzolanik aktivitesi uçucu küllerin enjeksiyonda kullanımını sağlayan özelliklerdir. Taneleri çimentodan daha ince olduğu için etkili bir enjeksiyon malzemesidir (Eftelioğlu ve Bowders, 1992). Kireç-uçucu kül enjeksiyonu, zeminlerin arazideki hacim değiştirme potansiyellerini azaltmak ve taşıma kapasitelerini arttırmaktadır. Kil oranı az olan zeminlerde kireç, tek başına istenilen iyileştirmeyi sağlayamadağı için uçucu külle birlikte kullanılmalıdır.

Tez çalışmasında jet rout kolonların imalatı yapılırken bağlayıcı madde olarak çimento ile birlikte %15 oranında uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül Kütahya Seyitömer Termik Santralinden temin edilmiş olup, çizelge 3.6'da verilen kimyasal bileşimi ve standartlara uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.6. Seyitömer uçucu külünün kimyasal bileşenleri (Türker ve diğ., 2009)

Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	54.49	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	20.58	-	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	9.27	-	-	-	-	-	--
S+A+F	84.34	-	-	-	>70.00	>70.00	>50.00
CaO	4.26	-	-	-	-	-	-
MgO	4.48	-	-	-	<5.00	-	-
SO ₃	0.52	<3.00	-	-	<5.00	<5.00	<5.00
K ₂ O	2.01	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	0.65	-	<5.00	-	-	-	-
KK	3.01	<5.00	-	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl ⁻	0.0058	<0.10	-	-	-	-	-
Serbest CaO	0.26	<1.00	>25.00	-	-	-	-
Reaktif SiO ₂	39.01	>25.00	<10.00	>25.00	-	-	-
Reaktif CaO	2.49	-	-	>10.00	-	-	-

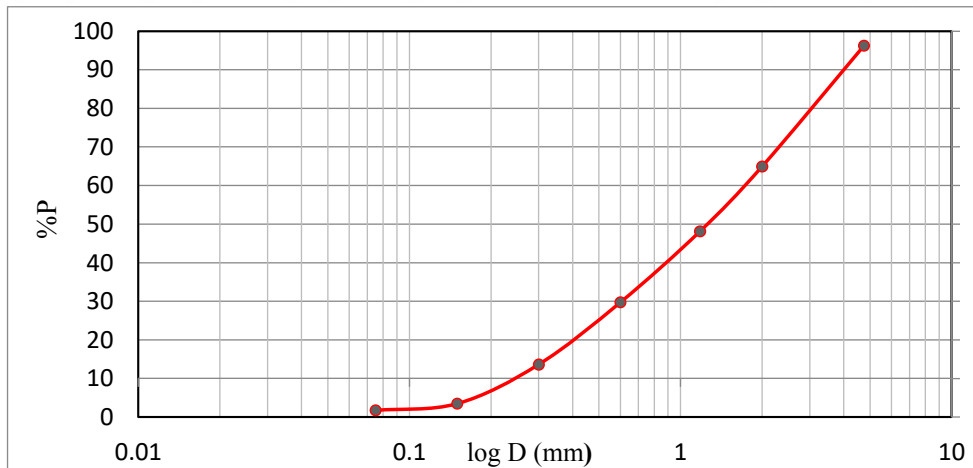
3.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kumun Özellikleri

Çalışmada, Konya İli, Selçuklu İlçesi, Eğribayat kum ocağından getirilen malzeme öncelikle yıkanmış ve zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Kum zeminde elek analizi ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılarak fiziksel özellikler belirlenmiş (ASTM D 6913-04, 2009, ASTM D 854-10, 2010), ayrıca TS1500-2000'e göre zemin sınıfı tespit edilmiştir (TS1500, 2000).

Kumun tane boyut dağılımı (Granülometri) eğrisi: Deney kumu için laboratuvarında ASTM standartlarına uygun olarak yapılan elek analizi sonucunda tane çapı dağılımı bulunmuştur. USCS zemin sınıfına göre kötü derecelenmiş kum (SP) zemin sınıfına girmektedir. Elek analizi deneyi sonuçları Çizelge 3.7'de verilmiştir. Zeminde %4 çakıl ve %94 kum %2'si ince tane bulunmaktadır. Tane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.23'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Kumun fiziksel özellikleri

Tanımlama (USCS)	SP
Efektif Tane Çapı D_{10} (mm)	0,25
D_{30} (mm)	0,60
D_{60} (mm)	1,7
Üniformluk Katsayısı $C_u = D_{60}/D_{10}$	6,80
Derecelenme Katsayısı $C_c = (D_{30})^2/D_{60} \times D_{10}$	0,85



Şekil 3.23. Deneyde kullanılan kumun granülometri eğrisi

Kumun dane birim hacim ağırlığı: Deney kumunun dane birim hacim ağırlığını belirlemek için laboratuvarında piknometre deneyleri yapılmıştır. Yapılan piknometre deneyi sonucuna göre ortalama dane birim hacim ağırlığı $\gamma_s = 26,50 \text{ kN/m}^3$ bulunmuştur.

Kumun maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlığı: Deneylerde kullanılan kumun maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıklarını (boşluk oranlarını)

belirlemek için standartlara uygun olarak proctor kalıpları ile deneyler yapılmıştır. Çizelge 3.8’de, deney ile belirlenen kuru birim hacim ağırlıklarına karşılık gelen kumun maksimum ve minimum boşluk oranları verilmiştir (ASTM D 4254, 2006, ASTM D 4253, 2002).

Çizelge 3.8.Kuru birim hacim ağırlığı ve boşluk oranı deney sonuçları

Sıklık parameteleri	Değer
Tane birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	26,50
Gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_{k,min}$ (kN/m ³)	15,20
Sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_{k,max}$ (kN/m ³)	19,40
Minimum boşluk oranı e_{min} (%)	36,5
Maksimum boşluk oranı e_{max} (%)	74,2
Sıklık derecesi Dr (%)	33

3.4. Çimento Süspansiyonları

Deneysel çalışma kapsamında yapılan reolojik deneyler (Marsh hunisi, sedimentasyon ve vicat iğnesi deneyleri) ile jet grout kolonların oluşturulmasında kullanılan enjeksiyon karışım harçları süspansiyonlar şeklinde hazırlanmıştır. Bu dört farklı çimento karışımlı süspansiyonlar hazırlanırken tüm süspansiyonlarda aynı prosedür uygulanmıştır. Portland ve ince taneli çimento ve çimento+uçucu kil karışımlı süspansiyonlar su/çimento 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.4, 2.8 ve 3.0 oranlarında hazırlanmıştır.

Karıştırıcının devir sayısı ve karıştırma süresi süspansiyon için son derece önemli olduğundan, taneciklerin topaklanmasının ve erken hidratasyonun önüne geçmek için karıştırma işlemi özenle yürütülmüştür. Karıştırma süresi çok uzun tutulursa süspansiyon ıslığı çok aşırı yükselip erken hidratasyon görülebilir. Karıştırıcının hızı da topaklanmanın olmaması ve önüne geçilmesi açısından son derece önemlidir. Karıştırma süresi ve devir sayısı için üretici firmanın bize göndermiş olduğu bilgi kataloğunda belirtilen hususlar dikkate alınmıştır (Fidan, 2015).

Süspansiyonlar 2800 devir/dak’lık karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Önce karıştırma kabı içerisine belirlenen su doldurulup mikser çalıştırılmıştır. Mikser çalışırken NPC veya DFMC-800 çimentoları azar azar eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. 3-5 dakikalık karıştırma süresinden sonra enjeksiyon süspansiyonları hazır olmuştur.

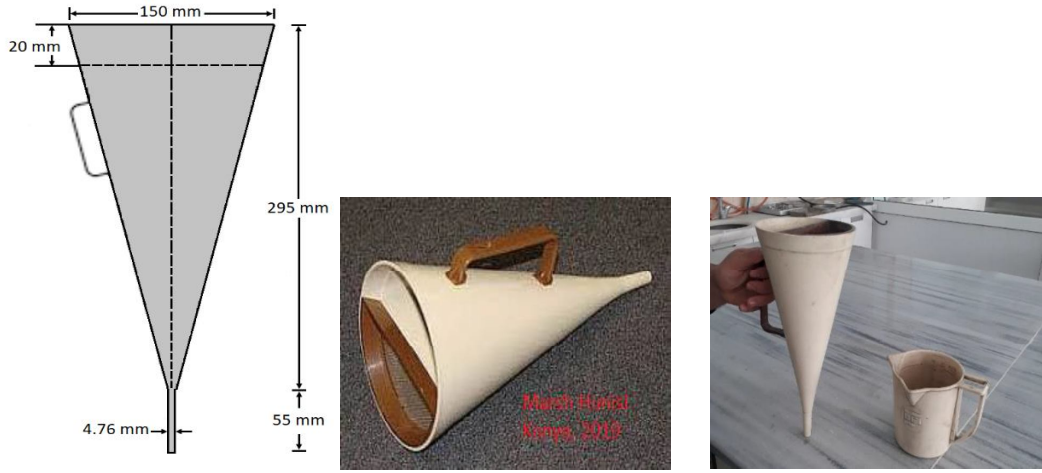
3.5. Çimento Karışımlarının Reolojik özellikleri

Enjeksiyon harcı için kullanılan çimentolara veya çimento karışımlarına ait enjeksiyon karışımlarının uygun su/çimento (s/ç) oranlarının belirlenebilmesi için; 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.4, 2.8 ve 3.0 gibi farklı s/ç oranlarında Marsh hunisi ve sedimentasyon deneyleri yapılmıştır. ASTM C191'e göre Vicat iğnesi deneyleri s/ç oranı 0,5 değeri için farklı çimento karışımlarında yapılmıştır.

3.5.1 Marsh Hunisi Deneyi

Viskozite içsel moleküller arasındaki sürtünmeden dolayı akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Marsh Hunisi, enjeksiyon sıvısının akışkanlık ve viskozite özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan en basit cihazdır. Deney aletinin üst kısmı 152.4 mm ve alt kısmı 4.76 mm çaplarında, 304.8 mm yüksekliğinde kesik koniden oluşmaktadır. Alt kısmı (akış ağzı) 4.76 mm çaplı ve 55 mm yükseklikli bir hunisidir (Şekil 3.24). Marsh hunisi deneyi, çimento enjeksiyonunun zaman içindeki viskozitesinin ölçülmesi (yani saniye) için kullanılır, sahadaki kalite kontrolü için genellikle çeşitli harç karışımlarının viskozite değerleriyle birlikte uygulanır. Uygulama kolaylığı açısından sahada enjeksiyon materyalinin akış özelliklerinin belirlenmesinde en çok tercih edilen metottür. Huni hacmi 1500 ml civarındadır. Ancak akış süresinin belirlenmesinde 1000 ml lik enjeksiyon materyalinin akması için geçen süre ölçülür. Bu süre su için $26 \pm 0,5$ saniye dir. Enjeksiyon materyalleri akış süresi 26 s ile 60 s arasında değişir. Akış süresi 75 s den uzun olan enjeksiyon materyalleri için Marsh hunisi metodunun kullanılması uygun değildir (Warner 2004).

Bu tez çalışmasında NPC ve DMFC-800 çimento çeşitleri ve karışımları için ASTM C939 göre 40 adet Marsh hunisi deneyi yapılmıştır. Marsh hunisi deneyinde ASTM C939'a göre ortam sıcaklığı 24 °C de enjeksiyon sıvısı iyice karıştırılarak 1000 ml'lik hacim bölmeli dereceli silindir kaba aktarılmıştır. Marsh hunisinin deliği kapatılarak, süspansiyon dereceli silindirinden huniye aktarılarak süspansiyonun huniden akması için gerekli zaman, kronometreyle belirlenmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 3.24. Marsh hunisinin şematik gösterimi



Şekil 3.25. Marsh hunisi deneyinin yapılışı

3.5.2 Sedimentasyon (Çökeltme) Deneyi

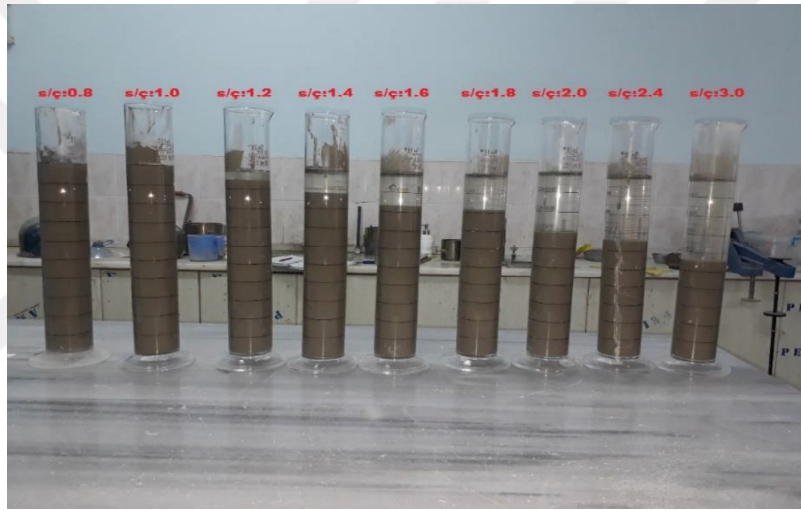
Süspansiyon içerisindeki serbest halde bulunan parçacıklar çökme eğilimi gösterirler. Çökme eğilimi arttıkça parçacıklar dibe doğru çöker. Çöken parçacıkların üzerinde berrak bir su toplanır. Bu olaya sedimentasyon denilmekle birlikte Stokes yasası prensipleri geçerlidir.

ASTM C940'a göre sedimentasyon deneyi;

- Deney ortamının sıcaklığının ($23.0 \pm 2^\circ\text{C}$) arasında olması sağlanır.
- Deney yapılacak enjeksiyon şerbet miktarı 1000ml olmalı ve bu şerbet cam mezür şeklindeki silindirlere aktarılmalıdır.
- Enjeksiyon şerbetinin buharlanmasını engellemek için ölçü silindirin ağzı kapatılmalıdır.

- İlk bir saat içinde her 15 dakikada bir okuma alınır, ikinci saat için her 10 dakikada bir okuma alınır. Böylece çökelmiş enjeksiyon şerbeti seviyesi art arda iki okuma arasında sabitleninceye kadar devam edilmelidir.
- Sedimentasyon yüzdesi, toplanan berrak su hacminin toplam enjeksiyon hacmine bölünmesi ile bulunur.
- Sedimentasyon yüzdesi %5' ten küçükse süspansiyon stabildir.

Bu tez çalışması kapsamında farklı çimento tipleri ve karışımları için toplam 40 adet sedimentasyon deneyi yapılmıştır (Şekil 3.26). Jet grout yapılırken, karıştırıcı kullanılarak enjeksiyon yapılması halinde başarılı bir enjeksiyon olmaktadır. İnce tane oranı fazla ise akışkanlaştırıcı madde kullanılmalıdır.



Şekil 3.26 Mikro taneli çimento süspansiyonlarının çökme deneyi

3.5.3 Vicat İğnesi Deneyi

Vicat aleti, düz bir tabla ve tablanın eksenine gelecek şekilde ayarlanmış silindir mili tutan deveboynundan ibarettir. Deveboynuna bağlı sabit bir gösterge mevcuttur. Ayrıca deveboynundaki yatağa vida ile sıkıştırılabilen silindir mili vardır. Mili istenilen noktada göstergeye sıfırlayabilen aparat, mile vida ile sıkıştırılmıştır. Milin alt ucuna vicat sondası ve iğnesi monte edilir. Milin etken ağırlığı 300 gramdır. Bu ağırlığı ayarlamak için milin üst kısmında bulunan ağırlık tablasına gereken ağırlık konulur.

CEM I 42,5 R çimento, DMFC-800 ince taneli çimento ve enjeksiyon karışımları için su/çimento 0,5 oranında vicat deneyleri yapılmıştır. Küre kesmesi şeklinde metal bir kaba konularak (metal kap 25-30 cm çapında, 8-10 cm derinliğindedir) kabın içindeki

çimentonun ortasına açılan bir çukura, çimento ağırlığının %25-30'u su katılarak (~125 g su) ilave etme süresi 5 saniyeden az, 10 saniyeden fazla olmamalıdır. İlavenin tamamlandığı an sonraki ölçümler için sıfır zamanı olmak üzere kaydedilir. Uygun bir kaşıkla karıştırılır. Çimento hamurunun yoğrulmasına çimento ile suyun karıştırıldığı andan itibaren üç dakika devam edilir.

ASTM C191'e göre Vicat iğnesi deneyi şu şekilde tariflenmiştir;

- Enjeksiyon karışımının sıcaklığı 20°C-27,5°C arasında olmalıdır.
- Vicat iğnesi çimento süspansiyonunun yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmeli ve ölçme sistemi bu noktaya göre alınmalıdır.
- İlk 30 dakika içinde okuma alınmaz.
- Sonraki her 15 dakikada, bir defa 1 mm çapındaki Vicat iğnesi (Şekil 3.27) serbest bırakılarak süspansiyon içerisine penetre olması sağlanır. Penetrasyon değeri 25mm okunduğunda priz başlama süresi olur. Batma 25mm'den az bir değer olursa 25mm batma olana kadar sürekli deney yapılır ve 25 mm'ye karşılık gelen değer bulunur.
- Batma miktarı 1mm olduğu süre priz bitiş süresidir (Şekil 3.27).
- Her deney yapılan nokta arası mesafe 5mm'den yakın olmamalıdır.



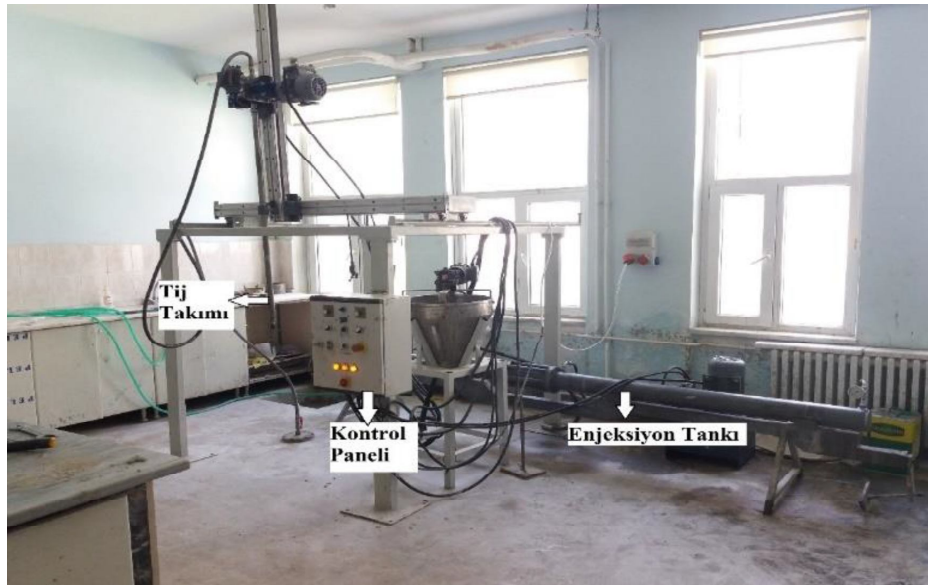
Şekil 3.27. Vicat deneyi

Bu tez çalışması kapsamında farklı çimento tipleri ve karışımları için s/ç 0,5 oranındaki değerler için vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır. ASTM C191'e göre vicat iğnesi yapılacak olan harç numune karışımının yoğun kıvamlı olması gereklidir.

3.6. Laboratuvarda Jet Grout Kolonlarının Üretilmesi

Bu tez çalışmasında farklı tip çimentoların (CEM I 42,5 R, DMFC-800) ve uçucu kül (UK) karışımı çimentoların jet grout kolonları üzerindeki fiziksel ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında önceden tasarlanmış jet grout deney düzeneği modifiye edilerek laboratuvar ortamında jet grout kolonları imal edilmiştir.

Deney düzeneğinde bir adet içi boşluklu sondaj tiji, 1,5 mm çapında tek nozül bulunan konik uç, 12 lt kapasiteli enjeksiyon haznesi (tank), tjin çekme-dönme işlevini sağlayan 2 adet motor ve kontrol panelinden oluşmaktadır. Tank üzerinde yatay yönde hareket edebilen öngörülen derinliğe kadar delgi yapabilecek ve jet grout kolon teşkil edebilecek kapasitede delgi makinesi monte edilmiştir. Sisteme enjeksiyon karışımını istenen çapta jet grout kolonunu teşkil edecek (kolonun oluşması için) basıncı verebilecek pompa ve kompresör eklenerek tamamlanmıştır. Deneylerde tek nozül kullanılmasının amacı, deney esnasında herhangi bir tıkanıklığın hemen fark edilip müdahale edilmesidir. Jet grout kolonları oluşturulması için 120 lt kapasiteli plastik atık bidonları kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan laboratuvar tipi, özel jet grout deney düzeneği Şekil 3.28'de görülmektedir.



Şekil 3.28. Laboratuvardaki Jet grout deney düzeneği

3.6.1. Deney İçin Zemin Ortamının Hazırlanması

Çalışmada kullanılan kumun özellikleri bölüm 3.3’de verilmiştir. JG kolonları; 60 cm çapında, 90 cm yüksekliğindeki plastik varillerin içerisine kum zemini %33 rölatif sıklılığı sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Kumun plastik varile yerleştirilmesi

3.6.2. Enjeksiyon Karışımlarının Hazırlanması

Deneyde kullanılan enjeksiyonlara sedimantasyon deneyi ve Marsh hunisi deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarına göre farklı çimento ve karışımlar için, ağırlık cinsinden su/çimento oranları 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.8, 2.4 ve 3.0 olan enjeksiyonlar hazırlanmıştır. Enjeksiyon karışımları, 2800 devir/dak’lık matkap ve karıştırıcı uç kullanılarak hazırlanmıştır. Karıştırma kabının içerisine belirlenen miktarda su doldurulup mikser çalıştırılmıştır. Çalışma esnasında, mikro taneli çimento belirli miktarlarda eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. 3 dakika karıştırma süresinden sonra çimento enjeksiyonları hazır hale gelmiştir (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Enjeksiyon harcının hazırlanması ve enjeksiyon tankına doldurulması

3.6.3. Jet Grout Kolonlarının İmalat Parametreleri ve Deney Programı

Bu deney çalışmasında Erkan'ın (2013) tez çalışmasında kullanmış olduğu laboratuvar tipi jet grout deney düzeneği kullanılmıştır. Laboratuvardaki deney düzeneği ile arazide yapılan jet grout sistemi birebir olacak şekilde yapılmıştır. Bu nedenle deneylerde kullanılan sistem, gerçek bir jet grout kolon sistemiyle aynı şekilde çalışabilecek ve tüm işlevlerini yerine getirebilecek kapasiteye sahiptir. Bu deney düzeneği ile laboratuvarda jet grout kolonları imalatı gerçekleştirilmiştir.

Erkan (2013), jet grout kolonları etkileyen parametrelerin; enjeksiyonun basıncı, su/çimento, tijin çekme hızı ve tijin dönme hızı olduğunu belirtmiştir. Bu parametreler; önceki araştırmacılar tarafından (Erkan, 2013; Fidan, 2015, Demiral, 2017 ve Kanat, 2018) belirtilen değerler ve enjeksiyon karışımlarının zemine enjekte edilebilirliği de göz önüne alınarak deneysel çalışma için, belli aralıklarda sabitlenmiş ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmada normal portlant çimentosu, mikro taneli çimento ve çimento ağırlığının %15'i oranında F tipi uçucu kül kullanılacak şekilde 4 farklı grup enjeksiyon karışımları için bir çalışma yapılmıştır. Bu enjeksiyon karışımlardan jet grout kolonların oluşması ve oluşan kolonların, serbest basınç ve yarmada çekme dayanım özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılacağı şekilde bir deney programı yapılmıştır. Bu amaçla yapılan kolonların deney programı Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9 JG kolonların imalat parametreleri

Grup No	Kolon No	Enjeksiyon Karışımı	S/Ç	Enjeksiyon Basıncı (P) (bar)	Dönme hızı (D) (devir/dak)	Çekme hızı (V) (cm/dak)
1	1	CEM I- 42,5 R	0.8	30	10	30
	2		1.0	30	10	30
	3		1.2	30	10	30
	4		1.4	30	10	30
2	5	CEM I 42,5 R + %15 UK	0.8	30	10	30
	6		1.0	30	10	30
	7		1.2	30	10	30
	8		1.4	30	10	30
3	9	DMFC-800	0.8	30	10	30
	10		1.0	30	10	30
	11		1.4	30	10	30
	12		1.8	30	10	30
	13		2.4	30	10	30
	14		3.0	30	10	30
4	15	DMFC-800 + %15 UK	0.8	30	10	30
	16		1.0	30	10	30
	17		1.4	30	10	30
	18		1.8	30	10	30
	19		2.4	30	10	30
	20		3.0	30	10	30

3.6.4. Jet Grout Deney Düzenliğinin Kalibrasyon Yapılması

Çizelge 3.9.'da belirtilen tasarım deneylerinden önce deney düzenliğinde gerekli kalibrasyon değerleri için, tijin çekme, dönme hızı, tijin başlangıç ve bitiş yükseklik ayarları yapılmıştır. Delgi makinesinin tij kısmının aşağı-yukarı hareket ve dönme hızının ayarlandığı kontrol ünitesindeki faz ayarları, deney programındaki dönme ve çekme hızlarını verecek şekilde düzenlenmiştir. Nozülünden çıkan suyun, akış süresi belirlenerek akış debisi hesaplanmıştır (Şekil 3.31). Kalibrasyon değerleri Çizelge 3.10 ve 3.11'de verilmiştir. Kontrol panelinde tijin çekme ve dönme hızı değerleri Şekil 3.32'de görülmektedir.



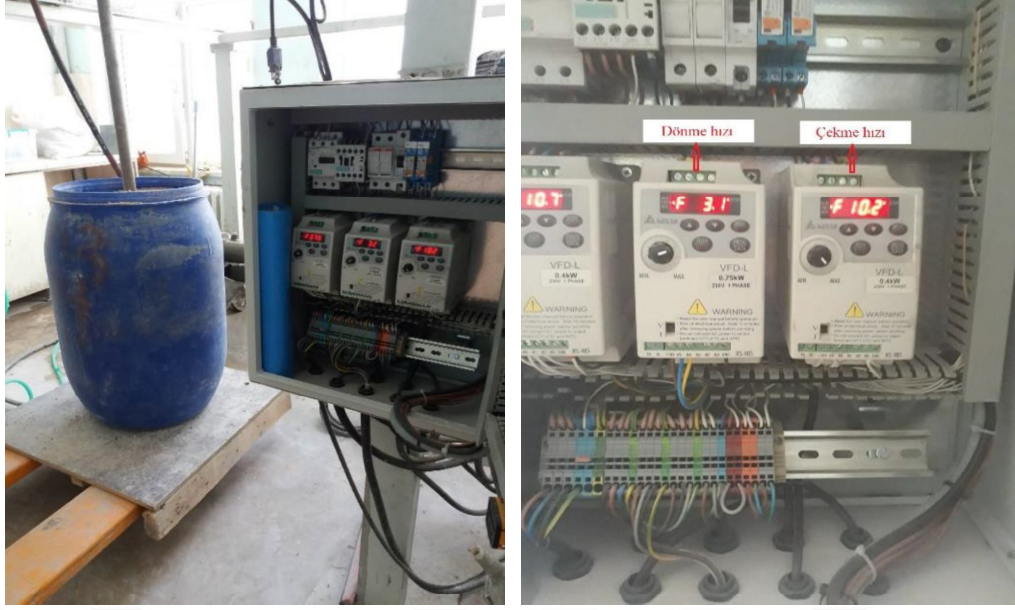
Şekil 3.32. Deney düzenliğinde kalibrasyon yapılması

Çizelge 3.10. Tijin kalibrasyon değerleri

	Gerçek değerler	Kontrol ünitesindeki Faz değerleri
Çekme hızı (cm/dak) [V]	7,20	20
	8,60	25
	10,20	30
	12,30	40
Dönme hızı (devir/dak) [D]	1,50	5
	2,50	7.5
	3,20	10
	4,50	15

Çizelge 3.11 Enjeksiyon basınç kalibrasyon değerleri

Enjeksiyon Basıncı (bar)	Suyun Çıkış Süresi (sn)
10	76
20	72
30	63



Şekil 3.32. Tijin dönme ve çekme hızı değerleri

3.6.5 Deneme Kolonlarının Yapılması

Araştırmacıların önceki yaptığı çalışmalarda; imalatı etkileyen parametrelerin enjeksiyon basıncı, tijin çekme hızı, dönme hızı ve su/çimento oranının etkili olduğu belirtilmiştir.

Kolon çapı ve serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametrenin enjeksiyon basıncı olduğunu; enjeksiyon basıncı arttırıldıkça kolonların çaplarında artış, serbest basınç mukavemetinde doğrusal düşüş olduğunu belirtmiştir (Erkan, 2013). Jet grout kolonlarında tijin çekme hızı 30 cm/dak, dönme hızı 10 devir/dak jet grout kolonlarını oluşturmuştur (Demiral, 2017). Çekme hızı 5,9 cm/dak'da tijin 15 cm yukarı veya aşağıya doğru hareket ettiğini, dönme hızı 3,8 cm/dak. iken tijin saat yönü veya tersi yönünde 5 devir/dak yaptığını belirtmiştir (Fidan, 2015).

Diğer araştırmacılar ve literatür çalışmaları birlikte değerlendirilerek deneylerde enjeksiyon basıncı 30 bar, tijin çekme hızı 30 cm/dak ve dönme hızı 10 devir/dak olarak belirlenmiştir. Deneylerde enjeksiyon parametreleri, mikro taneli çimento ve portland çimentoları ile uçucu kül karışımıyla oluşturulan kolonların serbest basınç ve yarmada çekme dayanımlarının aynı koşullarda değerlendirilmesi için sabit seçilmiştir.

Kolonların oluşturulmasında belirlenen parametrelerde 2 adet deneme kolonları oluşturulmuştur (Şekil 3.33). Deneme kolonları üzerinde bazı değerlendirmeler yapılmış ve esas çalışmadaki kolonların istenilen özelliklerde oluşturulabileceği görülmüştür.

- CEM I 42,5R ve DMFC-800 ile aynı parametrelerde hazırlanan deneme kolonlarında enjeksiyon karışımının kum içerisine enjekte edildiği ve düzgün bir kolonun oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.33). Enjeksiyon tankındaki CEM-I 42,5R çimentosu hazırlanan karışım 66 sn'de, DMFC-800 çimentosu ile karışım 68 sn'de enjekte edilmiştir.



Şekil 3.33 Farklı tip çimento kullanılarak oluşturulan JG deneme kolonları

3.6.6. Laboratuvarda Jet Grout Kolonlarının İmalatı

Deneme kolonları incelendiğinde kolonların çapı ve boylarının istenilen boyutlarda oluştuğu görülmüştür. Çizelge 3.8'de belirtilen parametrelere göre kolonların imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalat aşamasında ilk olarak plastik variller içerisine sabit sıklıkta ve rölatif sıklık değeri ($D_r=0,33$) olarak deney kumu yerleştirilmiştir. Jet grout kolonları plastik variller içerisine sabit sıklıkta kumun yerleştirilmesinden sonra deney tasarımı programında belirlenen parametrelere göre oluşturulmuştur. 28 gün plastik varil içerisindeki kum zemininde bekletilerek gerekli kür şartı sağlanmıştır (Şekil 3.34).

Oluşturulan kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinde serbest basınç ve yarmada çekme dayanım deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deney sonuçları inceledikten sonra belirlediğimiz JG kolonlarından SEM analiz için numuneler alınmıştır.

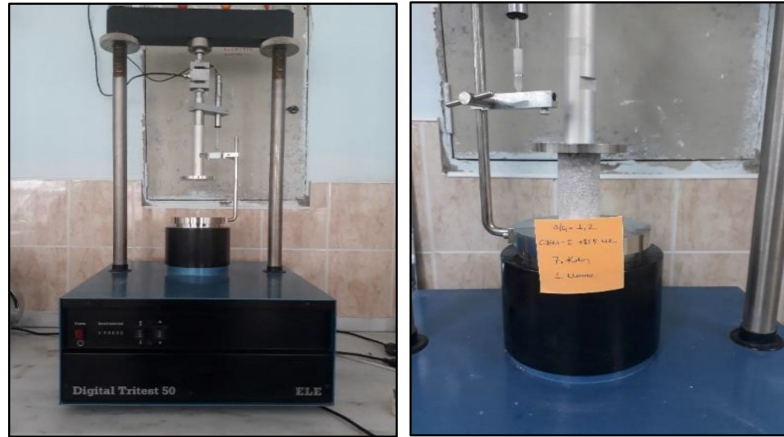


Şekil 3.34. Kolonların imalat aşamaları

3.7. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Laboratuvar DeneYleri

3.7.1. Serbest Basınç Deneyi

Zemin Mekaniği laboratuvarındaki serbest basınç deney aleti yukarı yönde hareket eden ve iki plaka arasına yerleştirilen numuneyi, alttaki plakanın yukarı doğru hareketi ile numuneye basınç uygulayan çalışma prensibine sahiptir (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. Laboratuvardaki Serbest Basınç deney aleti ve plaklar arasına yerleştirilen numune

Deneyler ASTM D 2166-00 (2003) standardına göre yapılmıştır. Deney numunesi serbest basınç deney plakasının merkezine yerleştirilmiştir. Deney aleti çalıştırılarak numunenin üst plakaya temas etmesi sağlanmıştır. Numunenin alt ve üst yüzeyleri deney aletinin alt ve üst plakaların merkezlerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Deformasyon ve yük hücresi saatleri sıfırlanmıştır. Yükleme hızı numune boyunun mm cinsinden %0,5-2'si arasında bir değer olacak şekilde seçilme ve yükleme hızı en çok 15-20 dak içinde kırılmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır.

Deneyisel çalışmada aletin hareket hızı 0.5mm/dak olarak seçilmiştir. Numune yüklendikten sonra, belli deformasyon değerlerine karşılık gelen kuvvet değeri okumaları bilgisayara aktararak numunenin yük-deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Numunenin kırılmanın olması halinde deney sonlandırılmıştır. Eğer numunede kırılma veya çatlama görünmüyor ise numunenin gözle görülebilir bir kırılma düzlemi oluşuncaya kadar yüklemelere devam edilmiştir. Ayrıca numunede kırılma gerçekleştikten sonra eğer deformasyonlar devam ediyor ve numuneler yük alıyorsa deney devam ettirilmiştir.

Deney bittikten sonra numunenin kırıldığı andaki maksimum kırılma yükü (P_{max}) kırılma anındaki enkesit alanına (A_f) bölünerek serbest basınç mukavemeti (σ_B) değeri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır;

$$\text{Basınç dayanımı: } \sigma_B = P_{max} / A_f \quad (3.1)$$

$$A_f = A_0 / (1 - \epsilon) \quad (3.2)$$

Buradaki:

- σ_B : Serbest basınç mukavemeti
- P_{max} : Numunenin maksimum kırılma yükü
- A_f : Kırılma anındaki en kesit alanı
- A_0 : Başlangıç en kesit alanı
- ϵ : Birim boy değiştirme

3.7.2. Yarmada Çekme Deneyi

Jet grout kolonlarından alınan silindir numuneler çekme dayanımı deneyinin uygulanmasında karot numunelerin iki parçaya ayrıldığı için bu yönteme “yarma çekme deneyi” olarak adlandırılmıştır. Yarma çekme dayanım deneyi ilk defa 1953’de Brezilya’daki Standardizasyon Konferansında önerilmiştir (Carneiro ve Barcellas, 1953).

JG kolonlarından alınan karot numunelerinin çekme dayanımını belirlemek için TS 3129 ve ASTM C496’ya uygun şekilde yarmada çekme aparatı yaptırılmıştır (Şekil 3.36). Deneyde silindir numuneler eksenini pres (serbest basınç aleti) tablasına paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yaptırılan aparatın üzerine yerleştirilen karot numunesi serbest basınç deney düzeneğinde numunenin tam ekseninden olacak şekilde plaklar arasına yerleştirilerek uygulanan basınç numuneyi kırılıncaya kadar yüklenmiştir (Şekil 3.36). Deney sonunda karot numuneleri ortadan ikiye bölünmüştür (yarılmıştır). Numuneye uygulanan basınç yüküyle numune, yükün uygulandığı eksen doğrultusunda kısaltmalar oluşurken yatay ekseninde uzamalar meydana gelir. Yüklemeler sonucunda numune yük doğrultusu boyunca kırılmaya uğrayarak çekme dayanımı belirlenmiştir.

Deneyde çalışmada serbest basınç deney aletinin yükleme hızı 0.7mm/dak seçilmiştir. Numunenin yük almasına başlandığında, belli deformasyon değerlerine karşılık gelen kuvvet değeri alınmıştır. Maksimum kırılma yükünü aşağıda verilen Bağlantı 3.3’e göre yarmada çekme dayanımı hesaplanmıştır.

$$\text{Çekme gerilmesi} = \sigma_{\text{çekme}} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.3)$$

Formülde;

- P : Kırılmaya neden olan basınç yükü (N)
- L : Silindir numunenin boyu (mm)
- D : Silindir numunenin çapı (mm)



Şekil 3.36. Jet Grout kolonlarında yarmada çekme deneyi

3.7.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

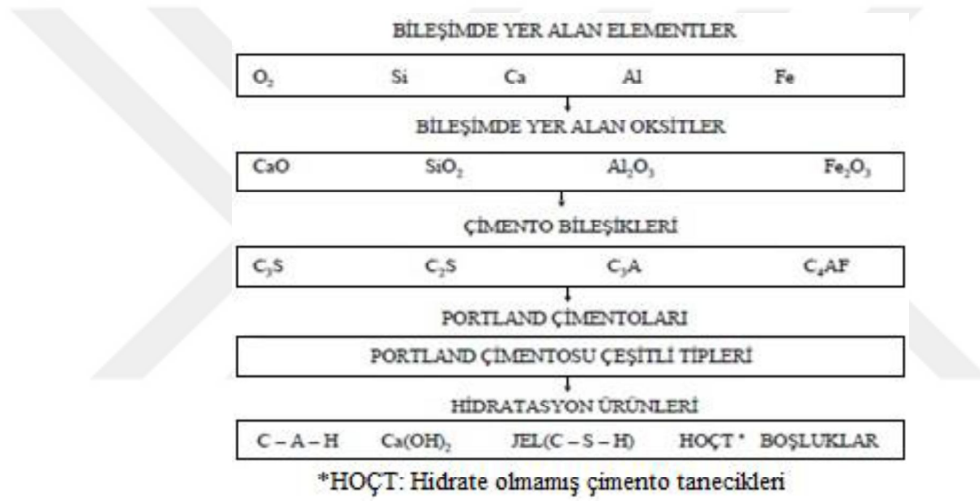
Elektron ışınını katı bir cisme gönderen ve katı cisimden yansıyan elektronlarla cismin içyapısını gösteren cihaza taramalı elektron mikroskop denir. Elektronlar katı cisme çarptığında, bu elektronlar yansır veya yutulmaktadır. Yansıyan elektronlar çeşitli sinyaller üretmektedir. Bu sinyaller, ikincil (SE), geri yansıyan (BSE), Auger (AE) ve diğer yansıyan elektron sinyalleri olarak adlandırılmaktadır. Temel elektronların (PE) enerji düzeyi yaklaşık 50 (eV)'dan daha yüksektir. Bu nedenle yansıyan elektronlardan ayrı bir de geri dönen elektronlar oluşmaktadır. Yüksek enerji geri dönen elektronların (BSE) en belirleyici özelliğidir. Yutulan elektronlar katı hacim içerisinde armut şeklinde dağıldığı görülmektedir. Yutulan bu elektronlar sayesinde yapı malzemelerinin mikro analizi yapılabilmektedir. Yapı malzemesinin SEM ile mikro analizinde, enerji dağıtan X ışınları (EDS) ve dalga dağıtıcı (WDS) ışın metotlarından yararlanılır.

Bu analizlerde en çok kullanılan metotlar, ikincil ve geri yansıyan elektronların yakalanmasını kapsar. Tüm bu yansımalar yapı malzemesinin yüzeyindedir. İkincil elektronlar (SE), yapı malzemesinin yüzeyine ilişkin veriler sunar, geri yansıyan elektronlar (BSE) ise daha çok yapı malzemesi taneciklerinin biçimlerini belirler. Yansıyan elektronların şiddeti yapı malzemesinin özgül ağırlığı ve atom numarasıyla orantılıdır (Savaşkan, 1986, Kırgız, 2011).

Yapı malzemelerinin bileşiminin görüntülenmesi sırasında SEM' analizinde 0,2 - 30 kV arasında voltaj seçilebilir. Çimento ve beton örnekleri ile çalışılırken 15-20 kV arasında voltaj seçilmesi uygun olacaktır. Fakat yüksek hacimli mineralojik ikame veya

katkı (uçucu kül, silis dumanı, mermer tozu v.b.) içeren örneklerde en uygun voltaj 15 kV'dur. Polimerler gibi elektron ışını altında daha çok zarar görebilen yapı malzemeleri için yaklaşık 5 kV voltaj seçilmesi yeterlidir (Kırgız, 2011). Deneysel çalışmada jet grout kolonlarından alınan 12 adet numunede SEM analizi yapılırken voltaj değeri 20 kV seçilmiştir.

Kullanılan farklı tip Portland çimento ve uçucu kül karışimli çimento harçların oluşturduğu yapıların şeması Şekil 3.37'te verilmiştir. Bunlardan; kalsiyum silikat jeli (C-S-H), kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum sülfaloüminat (Etranjit iğnesi) yapıları incelemiştir. İncelenen yapılar üzerinde X ışını mikro analizi (EDS) yapılmıştır. SEM ve EDS analizleriyle numunelerimizin elementel özellikleri belirlenmiştir.

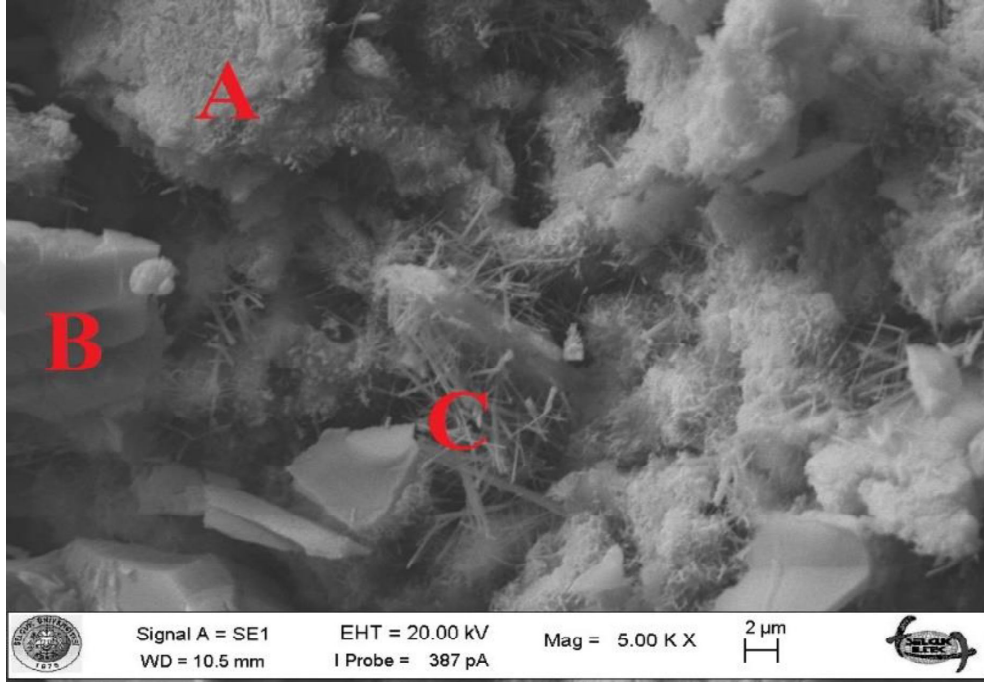


Şekil 3.37. Portland çimentosunun hidrasyon şeması (Kırgız, 2011)

Kalsiyum Silikat Jeli (C-S-H): Betonda ve harçta C-S-H bağlayıcı son evre olduğu için önemli bir bileşke yapısıdır ve bunun sonucu olarak dayanıma en büyük katkıyı sağladığı bilinmektedir. Sem analizleri yaptırılan numunelerde C-S-H jelinin genel lif yapısından karmaşık görünümlü ağ yapısına dönüştüğü Şekil 3.38'de A ile gösterilen yapılarıdır.

Kalsiyum Hidroksit (CH): Kalsiyum hidrat mineralleri som oyuk ve poligon yapıda ya da ince uzun maddeler biçiminde görülebilir. Beton ve harçlar içerisindeki CH bağlayıcı mineralleri çimento ile diğer malzemelerin bağlanma isteğini artırır. Sem analizi yapılan numunelerde altıgen şeklinde plak şeklinde olduğu bilinmektedir ve Şekil 3.38'de B ile görülen plak şeklinde görünenlerdir.

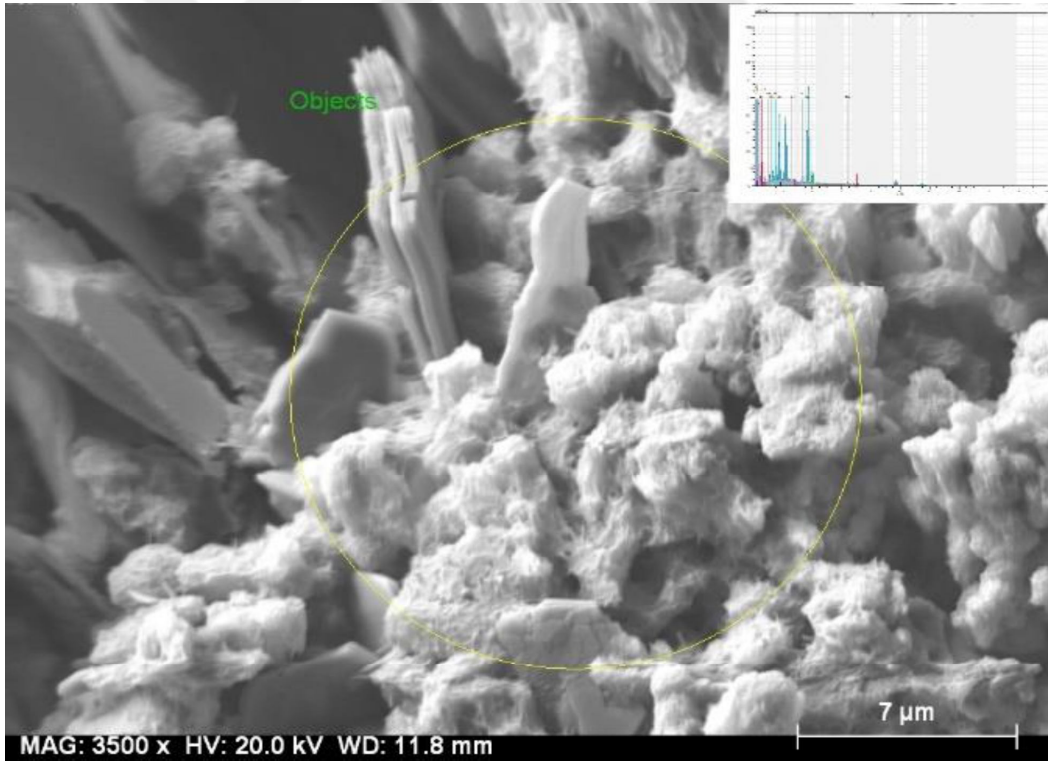
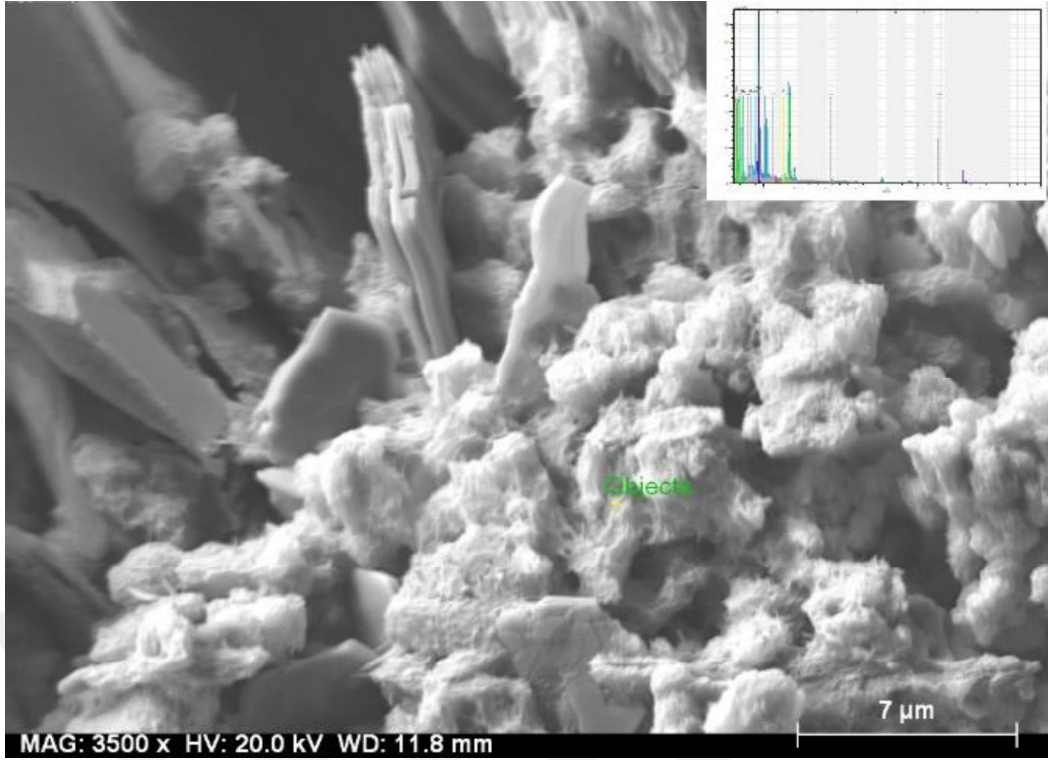
Kalsiyum Mono Sülfat (etrenjit): SEM aleti etrenjiti, kalsiyum sülföalüminat (etrenjit, AFt) ve mono sülfat hidrat (AFm) olarak iki tip mineral yapıda belirtilmektedir. Genelde etrenjit ilk hidratasyon aşamasında boşluklarda sivri ve ince uzun halde iğneler şeklindedir. Şekil 3.34’da C harfiyle gösterilen iğneler topluluğudur. Bu şekil daha ilerleyen aşamalarda ayrışma olayı olarak tanımlanan boşluklarda suyla şişen çok kenarlı prizmalara evrimleşmektedir.



Şekil 3.38. JG kolonunda NPC’nin SEM analizi sonuçları

X Işını Mikro (EDS) Analizi: Bir yapı numunesine çok yüksek enerjili elektron tanecikleri çarptığında X ışınları oluştuğu bilinmektedir. Bu X ışınları, sürekli bir enerji spektrumu ile birlikte numunedeki elementlerin karakteristik enerji seviyeleri sivri uçlardan meydana gelmektedir. Karakteristik enerji seviyelerinin belirlenmesi için X ışınları ölçülerek numunenin nitel ve nicel değerleri belirlenebilir. EDS ve SEM’in birlikte kullanımı ile numunenin elementel analizleri de yapılabilir (Kırgız, 2011). Numunelerimizin üzerinde yapılan EDS’nin nokta ve alan analizi kullanılmıştır (Şekil 3.39). Bunlar:

- **Nokta analizi:** numunenin morfolojik yapısında bir noktanın element yüzdesini belirlemek,
- **Alan analizi:** numunede bir alanın kütle bileşenini belirlemek için,



Şekil 3.39. EDS'de nokta ve alan analizleri

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

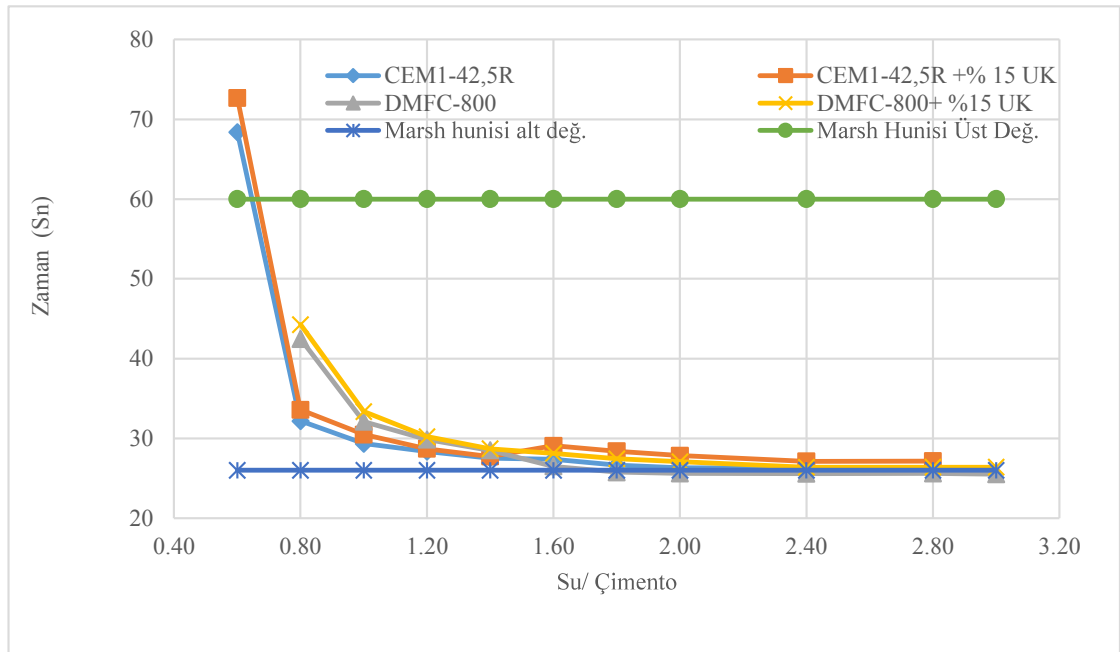
4.1. Reolojik Deney Sonuçları

4.1.1. Marsh Hunisi Deney Sonuçları

Bu tez çalışmasında farklı çimento tipi ve uçucu kül karışımli çimento tiplerine göre toplamda 40 adet Marsh hunisi deneyi yapılmış ve su/çimento oranlarına göre süspansiyonların Marsh hunisinden akması için geçen zamanı, kronometre ile belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Marsh hunisi deneyine ait grafikler Şekil 4.1’de verilmiştir. Deneylerde akış süresinin belirlenmesinde 1000 ml lik enjeksiyon materyalinin akması için geçen süre ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. Yapılan süspansiyon karışımlarının Marsh hunisi değerleri

s/ç	CEM-1 42,5R	CEM-1 42,5R+%15 UK	DMFC-800	DMFC-800+%15 UK
	Marsh hunisi akış süreleri (sn)			
0,6	68,4	72,7	Akış yok	Akış yok
0,8	32,2	33,6	42,5	44,3
1,0	29,3	30,5	32,1	33,3
1,2	28,4	28,7	29,9	30,2
1,4	27,5	27,7	28,5	28,7
1,6	27,4	29,1	26,5	28,1
1,8	26,7	28,4	25,8	27,5
2,0	26,3	27,8	25,6	27,1
2,4	26,3	27,1	25,6	26,4
2,8	26,2	27,1	-	-
3,0	-	-	25,5	26,4



Şekil 4.1. Yapılan süspansiyon karışımlarının Marsh hunisi değerlerinin

Çizelge 4.1'deki deney sonuçları ve Şekil 4.1 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Normal portland çimentosu ile hazırlanan S/Ç oranı 0,6'da akış süresi 68,4 s'dir. ASTM C-496'da belirtilen sınır değerlerinin üzerindedir. S/Ç=0.6'dan büyük olan s/ç oranları için süspansiyon karışımlarının akışkanlığı ASTM C-496'da belirtilen değer aralığında uygun olduğu görülmüştür.
- Normal portland çimentosuna %15 UK eklendiği zaman çimentonun akışkanlığının azaldığı görülmüştür. S/Ç oranı 0.6 olduğunda akışkanlık 75 sn'dir. Bu değerden daha küçük s/ç oranlarında enjeksiyonun akışkanlığının azaldığı ve viskozite değerinin arttığı görülmüştür. Maksimum akışkanlığı elde edebilmek için s/ç oranındaki akış süresi en az olan 0.8 olduğu belirlenmiştir. (60 saniye sınır değeri için).
- DMFC-800 mikro taneli çimentoda s/ç=0.6 oranının enjeksiyon karışımı viskozite değeri çok küçük olduğu için akış gerçekleşmemiştir. S/Ç oranı 1.6 ve sonraki karışımların viskozite değerlerinin suyun viskozite değerine yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür.
- Çizelge 4.1'de veriler incelendiğinde JG kolonlarının oluşturulabilmesi için kullanılan çimento şerbetlerinin, enjekte edilebilirliğinin sağlanmasında çimento tipleriyle ilişkisi olduğu görülmüştür. Çimento içerisine ilave edilen UK ile elde edilen karışımların kullanımı durumunda, aynı enjekte edilebilirliğin veya akışkanlığın sağlanması için enjeksiyon harcının içerisine daha fazla su ilave edilmesi gerekir.

4.1.2. Sedimentasyon Deney Sonuçları

Tez çalışmasında farklı çimento tipleri ve uçucu kül karışimli çimentolar için toplam 40 adet sedimentasyon deneyi sonuçları Çizelge 4.2-4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. CEM-I 42,5R için sedimentasyon deney sonuçları (%)

CEM I -42,5R										
S/Ç oranı	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8
Süre (dak)	Sedimentasyon deney sonuçları [Çökme (%)]									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1.1	3.0	3.5	3.2	5.0	7.7	11.2	14.1	20.7	30.5
30	2.1	7.0	8.0	6.2	10.0	14.9	21.1	26.0	37.8	50.8
45	2.4	10.0	10.5	9.8	14.5	22.0	31.9	38.2	51.1	61.4
60	5.9	12.0	14.0	12.7	19.0	29.0	41.0	48.5	58.4	65.1
70	6.9	14.0	16.0	14.9	21.2	33.9	46.1	53.0	61.0	65.7
80	7.8	16.5	18.9	17.1	25.5	38.5	49.6	54.0	62.0	65.8
90	8.5	20.0	21.9	19.3	29.0	42.6	51.3	54.7	62.1	65.8
100	8.5	20.0	25.4	22.1	32.7	45.0	52.0	54.8	62.1	-
110	-	20.0	25.4	25.5	35.0	46.3	52.0	54.8	-	-
120	-	-	25.4	28	35.1	46.8	-	-	-	-

Çizelge 4.3. CEM-I 42,5R + %15 UK karışimli çimento için sedimentasyon deney sonuçları (%)

CEM-I 42,5R + %15 UK										
S/Ç oranı	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8
Süre (dak)	Sedimentasyon deney sonuçları [Çökme (%)]									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.9	2.0	3.0	3.2	4.5	6.0	9.0	11.9	12.9	27.5
30	1.9	4.0	6.0	6.2	7.2	11.5	15.5	27.1	28.9	47.6
45	2.8	8.5	9.0	9.8	10.0	17.4	19.6	36.8	37.3	58.2
60	3.5	10.3	12.0	12.7	13.2	22.1	23.7	46.0	47.1	62.2
70	3.8	13.5	14.0	14.9	15.9	26.6	28.9	47.8	49.6	62.6
80	4.1	14.8	16.5	17.1	18.0	30.9	33.8	49.6	52.1	62.8
90	4.6	15.9	18.5	19.3	20.1	34.4	38.3	50.4	54.0	63.0
100	5.1	16.0	21.4	22.1	23.8	37.3	41.6	51.2	55.2	63.0
110	5.1	16.0	22.2	22.8	27.2	3.99	44.8	51.4	-	-
120	-	16.0	23.0	23.5	30.8	41.8	48.0	51.8	-	-

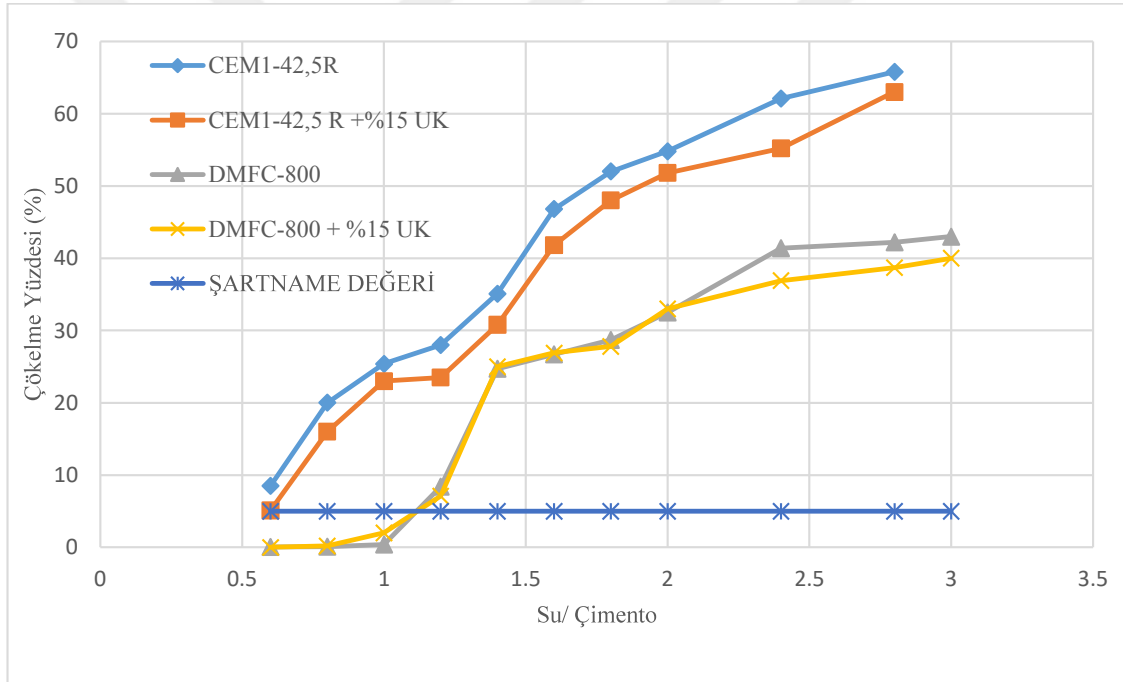
Çizelge 4.4. DMFC-800 çimento için sedimentasyon deney sonuçları (%)

DMFC-800										
s/ç oranı	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,4	3,0
Süre (dak)	Sedimentasyon deney sonuçları [Çökme (%)]									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.05	0.1	0.1	2.0	2.3	2.5	3.0	3.5	7.5	6.0
30	0.05	0.1	0.3	4.0	5.2	5.2	6.0	7.0	12.3	12.0
45	-	0.1	0.4	6.0	7.0	7.5	7.9	9.5	19.0	15.9
60	-	-	0.4	7.0	8.1	10.7	11.0	13.0	26.8	20.8
70	-	-	-	7.5	10.6	13.9	13.6	15.7	33.3	23.9
80	-	-	-	7.7	13.0	15.9	15.8	18.5	38.2	27.8
90	-	-	-	8.0	15.8	19.0	17.4	21.2	40.8	31.0
100	-	-	-	8.3	18.9	23.0	21.2	25.0	41.0	34.9
110	-	-	-	8.4	21.2	26.1	24.3	28.2	41.2	38.2
120	-	-	-	8.4	24.7	26.7	28.7	32.5	41.4	43.0

Çizelge 4.5. DMFC-800 + %15 UK karışimli çimento için sedimentasyon deney sonuçları (%)

S/Ç oranı	DMFC-800 + %15 UK									
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,4	3,0
Süre (dak)	Sedimentasyon deney sonuçları [Çökeltme (%)]									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0.3	1.2	3.0	2.5	3.0	4.1	4.3	6.2
30	0	0	0.5	2.7	5.0	5.0	5.0	5.8	8.3	16.6
45	-	0.1	0.6	4.0	7.4	7.5	7.6	11.2	12.2	16.7
60	-	0.2	1.0	5.0	10.5	10.7	11.0	15.2	17.9	21.1
70		0.2	1.1	5.5	12.8	12.9	13.3	17.6	21.2	24.6
80		0.2	1.2	6.0	15.5	15.4	16.3	20.1	25.8	28.0
90			1.3	6.2	18.6	18.0	19.8	23.7	28.8	31.6
100			1.4	6.7	22.0	20.5	23.7	26.9	33.0	36.0
110			1.8	7.0	24.4	23.9	26.8	29.5	35.5	40.0
120			2.0	7.1	25.0	26.9	27.8	33.0	36.9	40.0

Farklı çimento ve çimento karışımları için deneylerden elde edilen sedimentasyon yüzdeleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

**Şekil 4.2.** Farklı enjeksiyon şerbeti karışımları için sedimentasyon yüzdelerinin karşılaştırılması

Çizelge4.2-4.5 ve Şekil 4.2’deki sedimentasyon yüzdelerine göre enjeksiyon karışımlarının stabiliteleleri:

- CEM-I 42,5R çimentosuyla hazırlanan, çimento şerbetiyle yapmış olduğumuz s/ç oranları için sedimentasyon yüzdesi %5’ten çok olmakta ve çimento şerbetlerinin stabil olmadığı görülmüştür.

- Mikro taneli çimento (DMFC-800), s/ç oranı 1.2 iken stabil hale yakın olduğu ve s/ç oranı 1.2'den daha yüksek karışımlarda stabilitesinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Çimentoların içerisine uçucu kül eklendiğinde, stabilite değerlerinde azalma görülmektedir. Şekil 4.2'de DMFC-800+ %15 UK karışimli enjeksiyon şerbetlerinin diğer şerbetlere göre daha stabil olduğu gözlemlenmiştir. Aynı orandaki s/ç karışımlarında UK'nin çökeltme değerlerini azalttığı görülmüştür (Çizelge 4.2-4.5).
- DMFC-800 çimentosu kullanılarak hazırlanan enjeksiyon şerbetlerinin, CEM-I 42,5R çimentosu kullanılarak hazırlanan çimento şerbetlerinden daha az çökeltme yaptığı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.
- Çimento tiplerinin sedimentasyon değerlerini değiştirdiği görülmüştür.

4.1.3. Vicat İğnesi Deney Sonuçları

Farklı tip çimento ve çimento karışımları için s/ç=0.5 oranı için vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir

Çizelge 4.6. Yapılan süspansiyon karışımlarının Vicat iğnesi deney sonuçları

Çimento Tipleri	Priz Başlangıç Süresi (dak)	Priz Bitiş Süresi (dak)
CEM-I 42,5R	350	430
CEM-I 42,5R + %15 UK	325	415
DMFC-800	335	365
DMFC-800 + %15 UK	310	350

Çizelge 4.6'daki Vicat iğnesi deney sonuçlarına göre;

- CEM-I 42,5R çimentosu kullanarak hazırlanan enjeksiyonun, aynı s/ç oranındaki diğer enjeksiyon karışımlarından priz başlama ve bitiş sürelerinin daha uzun sürdüğü görülmüştür.
- CEM-I 42,5R ve DMFC-800 çimentolarına ilave edilen UK'nin, priz alma süresini uzattığı gözlemlenmiştir.
- DMFC-800 enjeksiyon şerbetinin priz bitiş süresinin, CEM-I 42,5R enjeksiyon şerbetine göre priz bitiş süresinin daha hızlı olduğu görülmüştür.

4.2. JG Kolonları Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Tez çalışmasının bu bölümünde laboratuvarında oluşturduğumuz JG kolonlarının çap ve boylarının ölçülmesi; kendi aralarında karşılaştırılması, oluşan kazıklardan karot numunelerinin alınması, alınan karot numunelerine serbest basınç deneyi ve yarmada çekme deneylerinin yapılması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Farklı çimento enjeksiyon tiplerinde ve aynı enjeksiyon için farklı s/ç oranlarında oluşan kolonların özelliklerinin araştırılması yapılmıştır. Bu araştırmaların amacı ise farklı s/ç oranı ve diğer parametrelerin JG kolonlarının oluşumu ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.2.1. Jet Grout Kolonların Boy ve Çaplarının Ölçülmesi

Temiz plastik variller içerisinde üretilen JG kolonları 28 gün bekledikten sonra kalıplardan çıkarılarak JG kolonlarının çapı ve boyları ölçülmüştür. Farklı s/ç oranlarında üretilen kolonların ölçüleri çizelge 4.7'de verilmiştir. Üretilen kolonların resimleri ise orijinal boyutlarda olup, çap-boy değişiminin anlaşılması için resimler aynı mesafelerden çekilmeye çalışılmıştır. Kolon resimleri herhangi bir büyütme veya küçültme uygulanmadan; farklı çimento ve çimento karışım şerbetleri için, kendi grubunda şekil 4.3 ve 4.7'de verilmiştir.

Çalışmada farklı tip çimento ve uçucu kül karışımli çimento şerbetlerinin, jet grout kolonları üzerindeki etkisi araştırılmak istenmiştir. Laboratuvar ortamında, jet grout kolonlarının üretim aşamasında tijin çekme-dönme hızları, enjeksiyon basıncı sabit tutularak farklı su/çimento oranındaki çimento karışımları etkisine bakılmıştır. Oluşan jet grout kolonlarının çaplarında, farklı su/çimento oranından dolayı değişiklikler görülmüştür. Ama jet grout kolonlarının boyları yaklaşık olarak aynı olduğu Çizelge 4.7'de de görüldüğü gibi yaklaşık olarak birbirlerine eşittir. Bunun nedeni ise tijin çekme hızı ile ilgili olduğu açıkça görülmüştür.

Çizelge 4.7. Laboratuvarda üretilen jet grout kolonların boy ve çap ölçüleri

Grup No	JG Kolon No	Kullunılan Malzeme	Su/Çimento	JG Kolon bilgileri		
				Çevre (cm)	Çap (cm)	Boy (cm)
1	1	CEM-I 42,5R	0.8	79.5	25.3	31
	2		1.0	87.0	27.7	30
	3		1.2	96.0	30.5	29.5
	4		1.4	100.5	32.0	31
2	5 (hatalı)	CEM-I 42,5R+ %15 UK	0.8	64.0	20.4	31
	5*(tekrar)		0.8	81.5	25.9	31
	6		1.0	90.5	28.8	31
	7 (hatalı)		1.2	83.0	26.6	30.5
	7*(tekrar)		1.2	101	32.1	30.5
3	8	DMFC-800	1.4	104	33.1	30.5
	9		0.8	97	30.9	30
	10		1.0	105	33.4	30.5
	11		1.4	111	35.3	31.5
	12		1.8	116	36.9	32
	13		2.4	117	37.2	33
4	14	DMFC-800+ %15 UK	3.0	117	37.2	33
	15		0.8	81.5	25.9	31.5
	16		1.0	85	27.0	30.5
	17		1.4	103	32.8	30.5
	18		1.8	106	33.7	31
	19		2.4	117	37.2	30
	20	3.0	122	38.8	31	



Şekil 4.3. CEM-I 42,5R çimentosu ile oluşturulan kolonların görünüşleri



Şekil 4.4. CEM-I 42,5R + %15 UK karışımı ile oluşturulan kolonların görünüşleri

Çizelge 4.7.'de 5 ve 7 no'lu jet grout kolonları imalatı yapılırken hatalı olduğu görülmüştür (Şekil 4.4). 5 no'lu jet grout kolonunda çimento harcı yüzeye çıktığı için, 7 no'lu kolonda enjeksiyon basıncının 30 bar yerine 20 bar enjekte edilmesinden dolayı hatalar gözlemlenmiştir. Plastik varilin içerisindeki kum, yırtılarak enjeksiyon şerbetinin yüzeye çıkmasına neden olmuştur (Şekil 4.4). Bu kolonların düzgün ve istenen boyutlarda olmamasından dolayı (imalat hatası) 5* ve 7* nolu kolonların laboratuvarında yeniden imatları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. 5 ve 7 nolu kolonlarda hatalı ve hatasız oluşan kolonlar



Şekil 4.6. DMFC-800 çimento şerbeti kullanılarak oluşturulan JG kolonları



Şekil 4.7. DMFC-800 + %15 UK karışımli çimento şerbeti kullanılarak oluşturulan JG kolonları

Çizelge 4.7'deki bilgilerin ve Şekil 4.3-4.7.'deki JG kolonların görüntülerinin birlikte değerlendirilmesiyle şu sonuçlar çıkarılmıştır;

- Aynı enjeksiyon basıncı, tij'in çekme ve dönme hızı ve s/ç oranlarında ince taneli çimento enjeksiyonu (DMFC-800) ile oluşturulan JG kolonlarının çapının daha fazla olduğu açıkça görülmüştür.
- Enjeksiyon basıncı 30 bar, tij'in çekme, dönme hızı ve s/ç oranlarında CEM -I 42,5R + %15 UK enjeksiyonu ile oluşturulan JG kolonlarının çapları, CEM-I 42,5R çimento enjeksiyonu ile oluşturulan JG kolonları daha fazla olmuştur ancak JG kolonlarının boyları hesaplanan değerlerde çıkmıştır.
- Enjeksiyon basıncı, tijin çekme ve dönme hızları eşit iken s/ç oranları arttıkça CEM-I 42,5R çimento enjeksiyonları için oluşturulan JG kolonlarının çaplarında artış görülmüştür.
- DMFC-800 çimento karışımı ile oluşturulan JG kolonları, CEM-I 42,5R ve UK karışımlarıyla oluşturulan kolon çaplarından daha yüksek olduğu görülmüştür. DMFC-800 çimentosu, s/ç=1,8'den sonraki kolonlarında artış görülmemiştir.
- DMFC-800+%15 UK çimento karışımı kullanılarak oluşturulan JG kolonların s/ç=1,8 değerine kadar kolonların DMFC-800 kolonların çaplarından küçük, s/ç=1,8 değerinden yüksek s/ç oranlı kolonların DMFC-800 kolonların çaplarından büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin mikro taneli çimento ve uçucu kül bünyelerine, su istemesinden kaynaklandığını ve bu yüzden yeterli su içeriğine sahip olmadığı için JG kolonlarının çaplarının küçük oldukları tahmin edilmiştir.

4.2.2. Jet grout kolonlarından karot numunelerinin alınması

İnşaat Mühendisliği Bölümü yapı ve deprem laboratuvarında karot makinesi ile jet grout kolonlarından 75 mm ve 100 mm çapında karot numuneleri alınmıştır. Bazı numunelerde 43 mm çapında karot ucu kolonları parçaladığından dolayı karot numunesi alınamamıştır. Karot numuneleri karışımın homojen olduğu kısımlardan alınmıştır (Şekil 4.8). Numune alınmasından sonra karotların içerisindeki enjeksiyon materyali incelenmiş karışımın homojen olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8. Karot numunelerinin alınması

Karot numunelerinin alt ve üst kısımları kesilerek boy/çap oranı 2 olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 4.9). Homojenliği sağlayan numuneler seçilerek serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri için elde edilen numune örnekleri Şekil 4.10-4.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Karot numunelerinin kesilmesi



Şekil 4.10. CEM-I 42,5R JG kolonlarından alınan karot numuneleri (1. Grup)



Şekil 4.11. CEM-I 42,5R+ %15 UK JG kolonlarından alınan karot numuneleri (2. Grup)



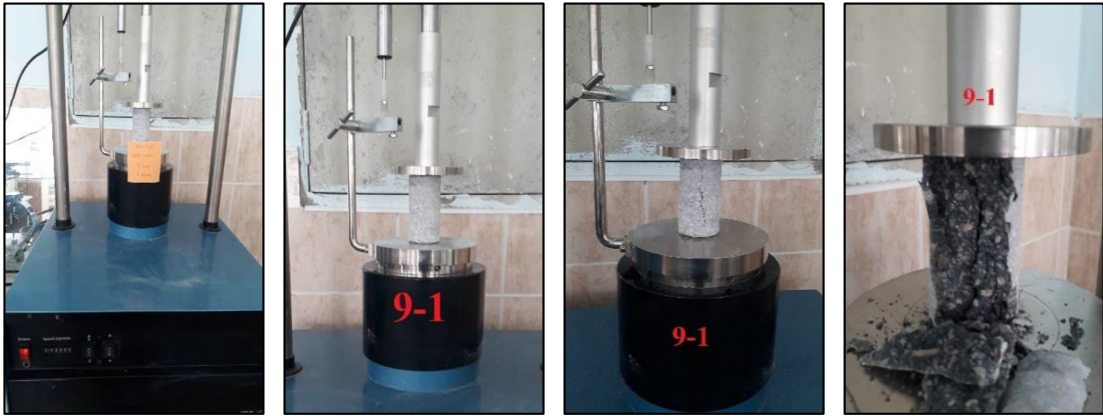
Şekil 4.12. DMFC-800 JG kolonlarından alınan karot numuneleri (3. Grup)



Şekil 4.13. DMFC-800+ %15 UK JG kolonlarından alınan karot numuneleri (4. Grup)

4.3. Karot Numuneleri Üzerinde Serbest Basınç Deneyleri

Jet grout kolonlarından alınan karot numuneleri Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında 0.5 mm/dak'lık yükleme hızıyla tek eksenli basınç deney aletinde, deformasyon ve yük değerlerinin bilgisayara aktarılan deney düzeneğinde karot numunelerin kırılması sağlanmıştır (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15.).



Şekil 4.14. Serbest basınç deneyinin yapılması



Şekil 4.15. Serbest basınç deneyinin yapılması esnasında karot numunelerin kırılmalarına ait resimler

20 adet jet grout kolonundan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen dayanım değerleri Çizelge 4.9.'da verilmiştir. Her bir deney için iki numune alınmasına özen gösterilmiştir. Alınan karot numuneleri fazlaca alınmaya çalışılmıştır; bunlardan jet grout kolonun dayanımını en iyi temsil edebilecek olan numuneler seçilerek, deneysel kıyaslamalar bu numuneler üzerinde devam ettirilmiştir.

Serbest basınç deneyinde numunelerin boy/çap =2 olması istenir. Boy/çap oranı 2'den küçük olanlar için ASTM C42 standartına göre farklı boy/çap oranlarındaki karot numunelerinin basınç dayanımları için kullanılacak düzeltme faktörleri Çizelge 4.8.'de

verilmiştir. Karot numunelerinin boy/çap oranının çizelge 4.8’de belirtilen değerler farklı ise enterpolasyonla bulunmuştur. Çizelge 4.9’da boy/çap düzeltmesi yapılarak JG kolonların dayanım değerleri verilmiştir.

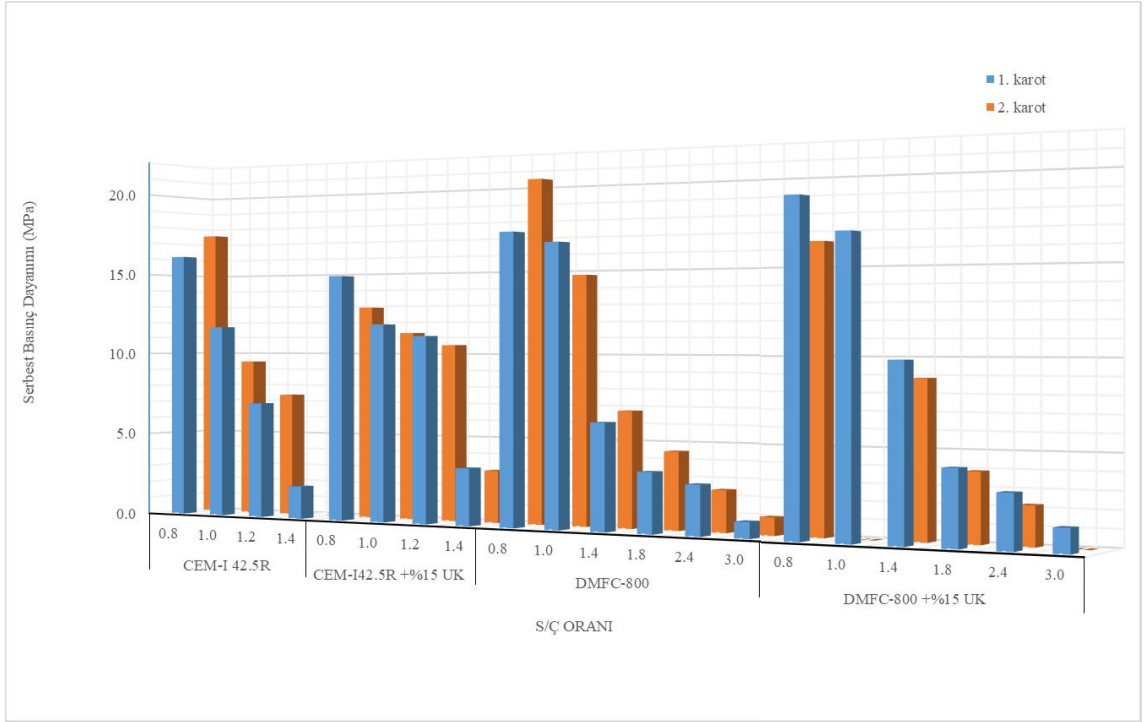
Çizelge 4.8. ASTM C42 standartına göre farklı boy/çap oranlarındaki karot numunelerinin basınç dayanımları için kullanılacak düzeltme faktörleri

Karot’un BOY/ ÇAP	Düzeltilme Faktörü
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Çizelge 4.9. Jet grout kolonlarının serbet basınç deneyi

Grup No	Kolon No	D ₁ (mm)	H ₁ (mm)	P _{maks,1} (N)	σ _{B1} (MPa)	D ₂ (mm)	H ₂ (mm)	P _{maks,2} (N)	σ _{B2} (MPa)
1	1	43	86	23378.8	16.11	43	86	25413.5	17.51
	2	43	87	16893.8	11.64	43	86	13759.4	9.48
	3	43	87	10094	6.95	43	87	10751.9	7.41
	4	100	102	17404	1.94	-	-	-	-
2	5	43	86.5	21428.6	14.76	43	86	18726	12.9
	6	43	86	17199.2	11.85	43	86.5	16353.4	11.27
	7	43	89	16094.9	11.09	43	88	15296.1	10.54
	8	75	152	14897	3.37	75	152.5	13600	3.08
3	9	43	85	24927	17.17	43	86	29576	20.38
	10	43	89	23994.4	16.53	43	90	21356	14.71
	11	43	80	8999.1	6.20	43	81	9821.4	6.77
	12	75	154	15410	3.49	75	155	19906	4.51
	13	75	154	12697	2.88	75	154	10653	2.41
	14	75	154	4115	0.93	75	154	4543	1.03
4	15	43	85	27246.2	18.77	43	86	23754.7	16.37
	16	43	94	24320	16.76	-	-	-	-
	17	43	84	14323.3	9.87	43	85	12866.5	8.86
	18	75	154	18741	4.24	75	154	17288	3.92
	19	75	154	13488	3.05	75	154	9819	2.22
	20	100	104	12012	1.35	-	-	-	-

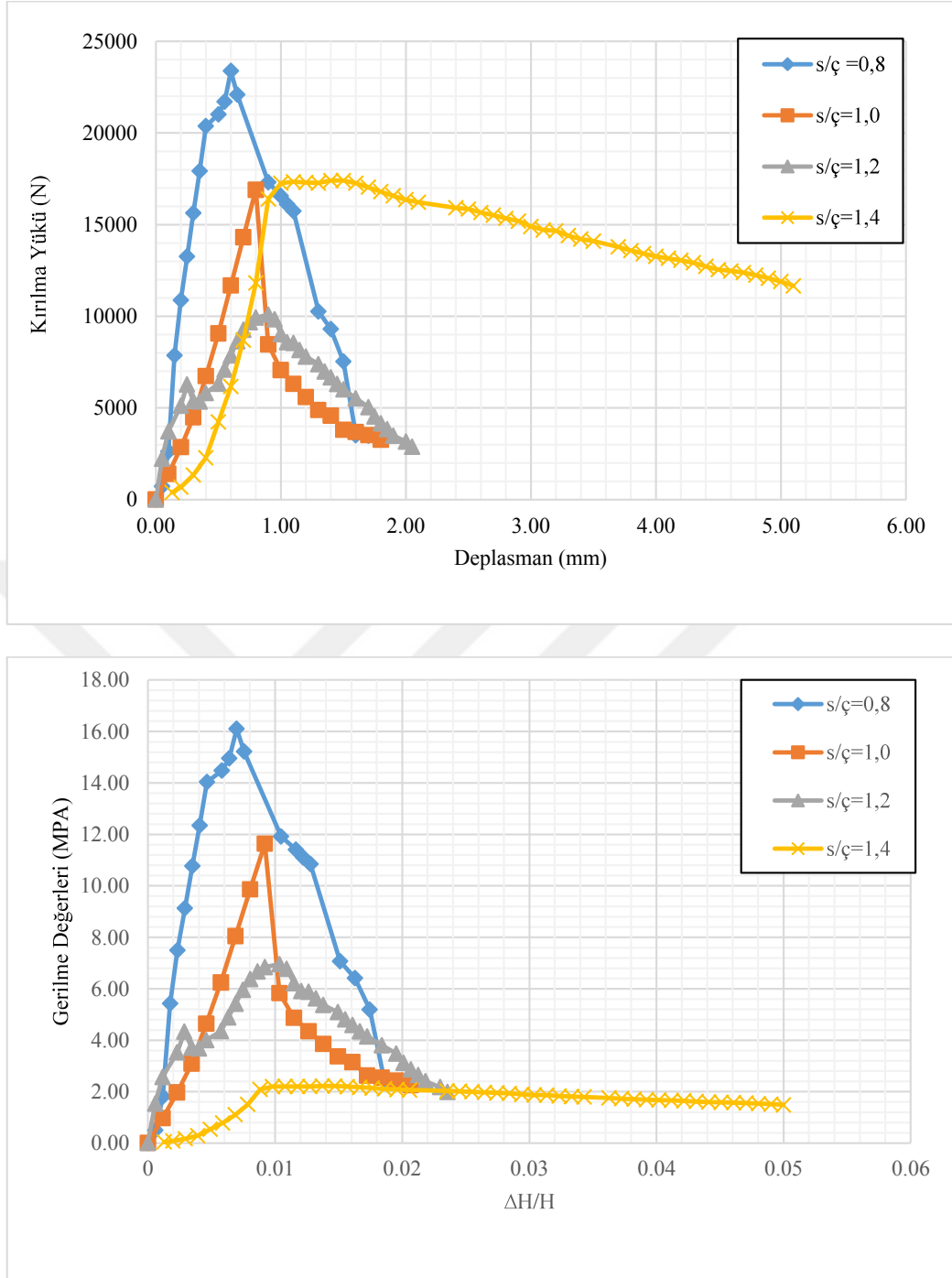
Çalışmada elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi için Şekil 4.16’da tüm karot numunelerin dayanım değerleri görülmektedir. Ayrıca aynı enjeksiyon karışımlarının farklı s/ç oranları ve farklı enjeksiyon karışımlarının aynı s/ç oranları olacak şekilde ayrı ayrı grafikler oluşturularak serbest basınç dayanım deney sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca numunelerin toplamda ne kadar deformasyon yaptığının görülebilmesi için kırılma yükü–deplasman ve gerilme-birim deformasyon grafikleri ayrı ayrı verilmiştir. Grafikler, çizelge 4.9’daki birinci numunelerin verileri kullanılarak çizilmiştir.



Şekil 4.16. Kolonlarından alınan karot numunelerinin serbest basınç dayanım değerleri

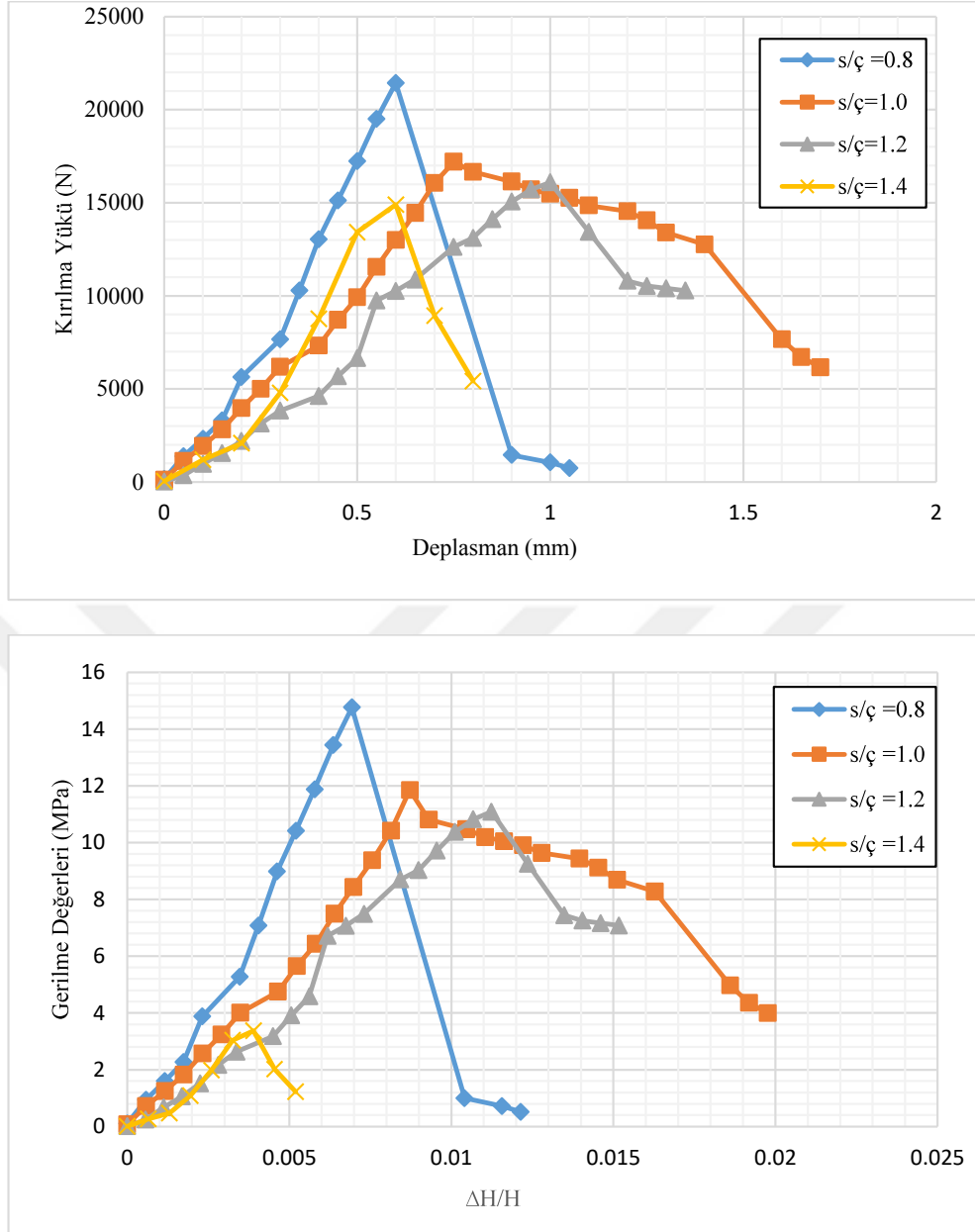
S/Ç 0.8 oranı olan kolonların dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. (Şekil 4.16).

- S/Ç oranı 1.0'den büyük olan çimento ve uçucu kül karışımlarıyla oluşturulan kolonların dayanımlarının, Portland çimentosu ile oluşturulan JG kolonların dayanımından yüksek olduğu görülmüştür.
- DMFC-800 mikro taneli çimento kullanılarak oluşturulan JG kolonların dayanım değerleri Portland çimentosu ile oluşturulan kolonlardan daha yüksek dayanım değeri kazandığı görülmüştür.



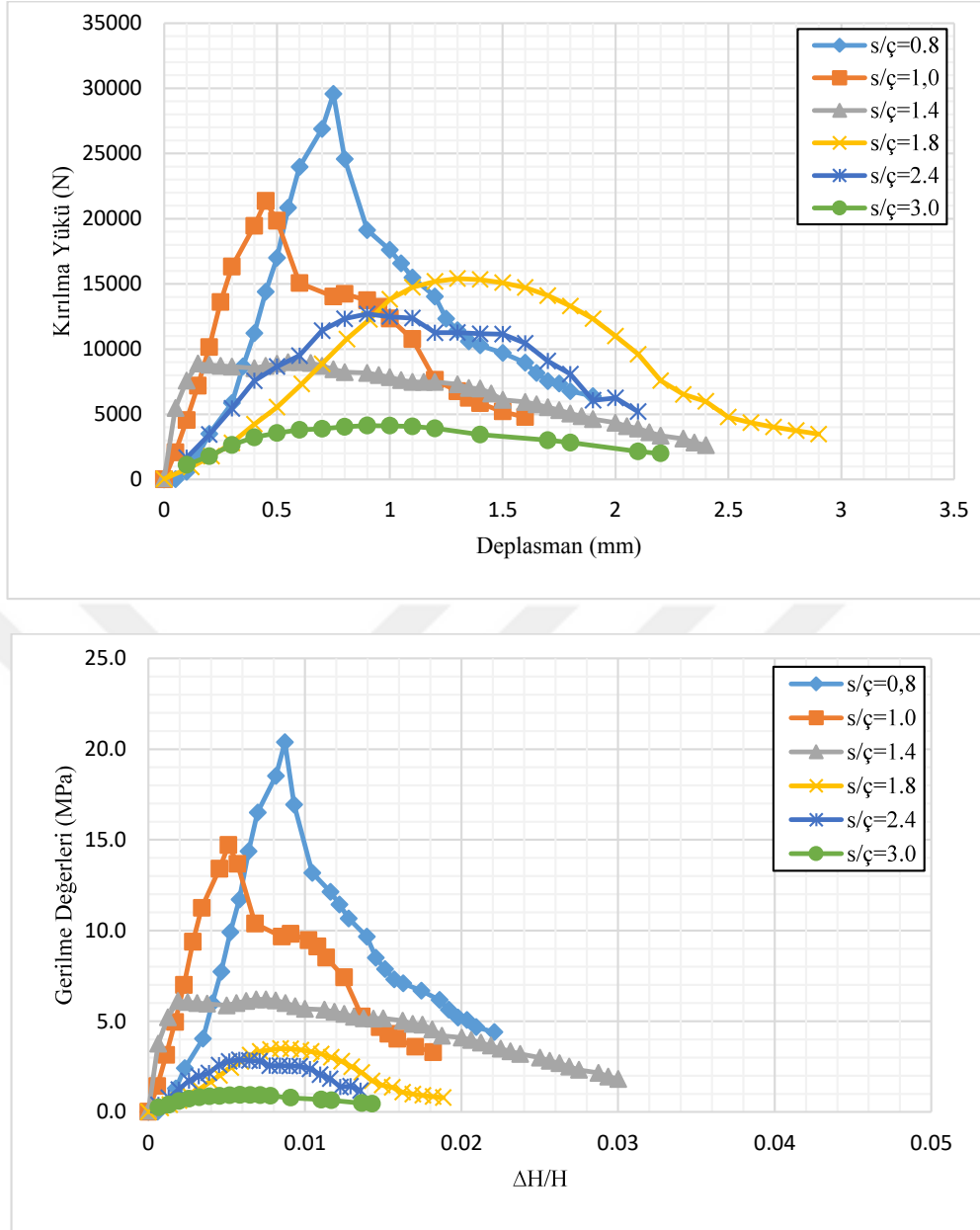
Şekil 4.17. CEM-I 42,5R çimentosu ile (1. Grup) hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.17’de CEM I-42,5R çimentosu için verilen değerler incelenmiştir. CEM-I 42,5R enjeksiyonundan oluşan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinde, s/ç oranı 0.8 olan kolonun maksimum kırılma yüküne ve maksimum gerilme değerine sahip olduğu belirlenmiştir. CEM-I 42,5R çimento enjeksiyonu ile oluşturulan kolonların en küçük dayanımına s/ç oranı 1.4 olan durumda oluşmuştur. CEM-I 42,5R oluşturulan kolonların, s/ç oranı arttıkça gerilme yani dayanım değerlerinin azaldığı görülmüştür.



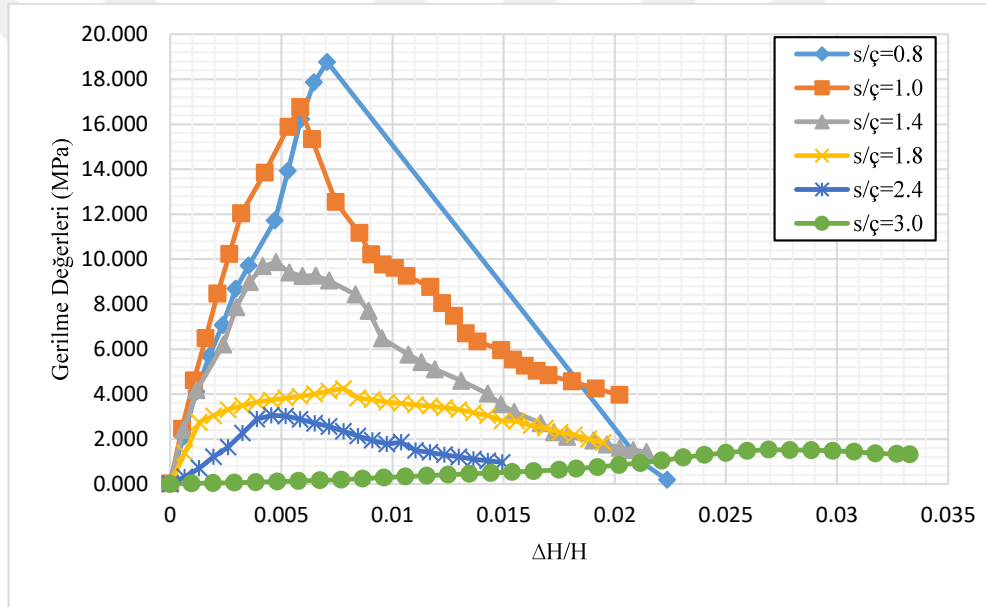
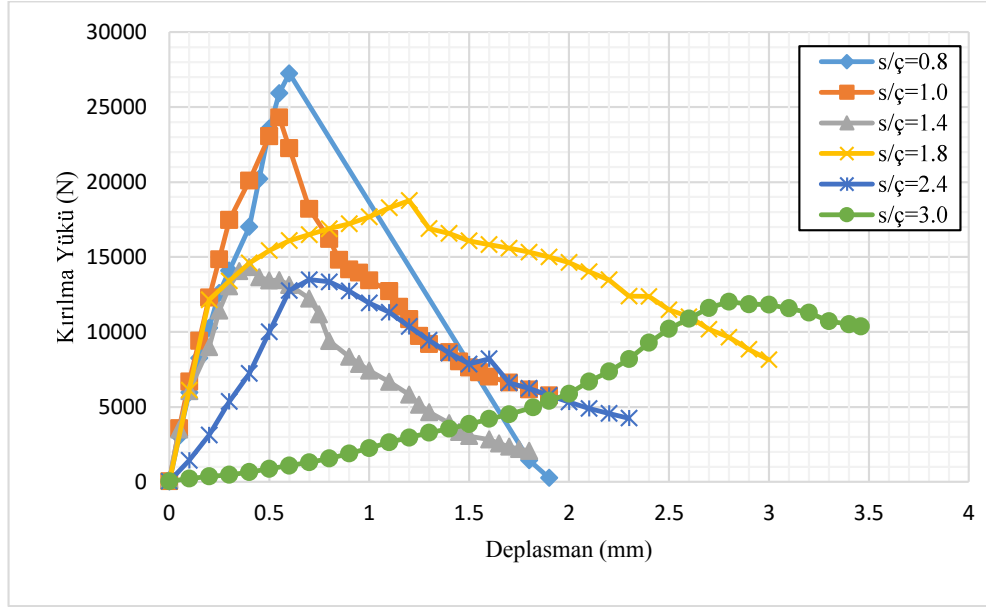
Şekil 4.18. CEM-I 42,5R + %15 UK karışımı ile (2. Grup) hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.18’de CEM-I 42,5R çimentosuna, çimento ağırlığının %15 oranında uçucu kül ilave edilmesiyle oluşturulan enjeksiyon karışımlarıyla oluşturulan JG kolonlar için elde edilen kırılma yükü ve gerilme değerleri verilmiştir. Şekilden $s/\ç=0.8$ olan kolonun dayanımının en büyük olduğu görülmektedir. $S/\Ç=1.0$ ve 1.4 oranları arasındaki oluşturulan kolonların dayanımlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak $s/\ç 1.0$ ve 1.2 oranlarındaki numune uçucu kül etkisinden dolayı daha fazla deformasyon yaptığı görülmüştür.



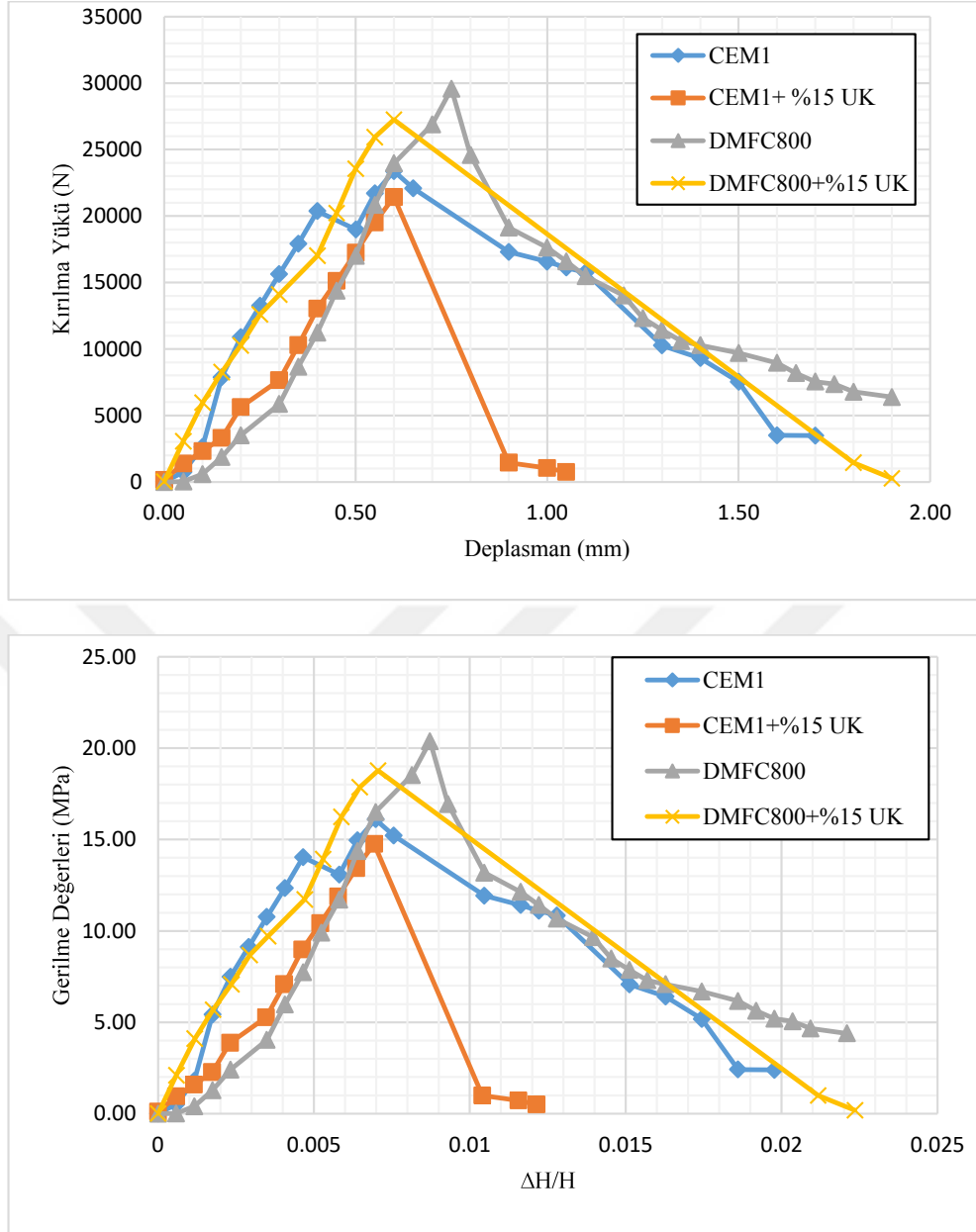
Şekil 4.19. DMFC-800 çimentosu ile (3. Grup) hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.19’da DMFC-800 enjeksiyonu ile farklı $s/\ç$ oranlarında hazırlanan JG kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç dayanım deney sonuçları gösterilmiştir. $S/\Ç$ oranları arttıkça kırılma yükü ve dayanım değerleri azalmıştır. $S/\Ç$ oranı 0.8 enjeksiyonuyla oluşan JG kolonundan alınan karot numunesinin kırılma yükü ve maksimum gerilme değerinin, diğer kolonlardan alınan karotların dayanımının çok üzerinde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak micro taneli çimentonun daha fazla etkileşim sağladığı gözlemlenmiştir. $S/\Ç$ oranı arttıkça dayanımın azaldığı görülmüştür.



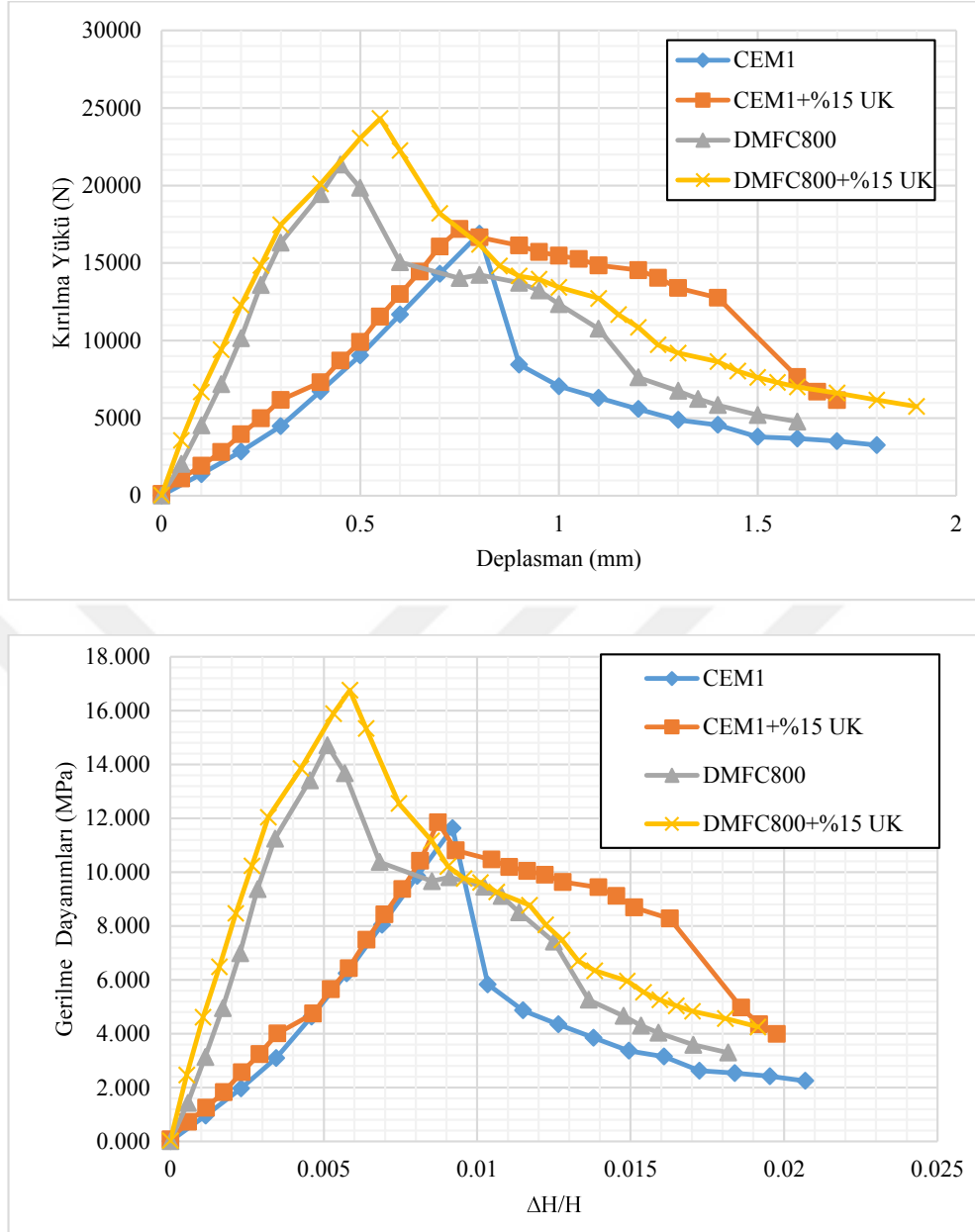
Şekil 4.20. DMFC-800 + %15 UK karışımı ile (4. Grup) hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.20’de DMFC-800 çimentosuna, çimento ağırlığının %15 oranında uçucu kül ilave edilmesiyle oluşturulan hazırlanan JG kolonları için elde edilen kırılma yükü ve gerilme değerleri verilmiştir. Şekilden s/ç oranı 0.8 olan kolonun dayanımının en büyük olduğu görülmektedir. S/Ç oranı 1.4 ve 1.4’ten büyük olan kolonların sünek kırılma yani sünek bir davranış gösterdiği görülmektedir.



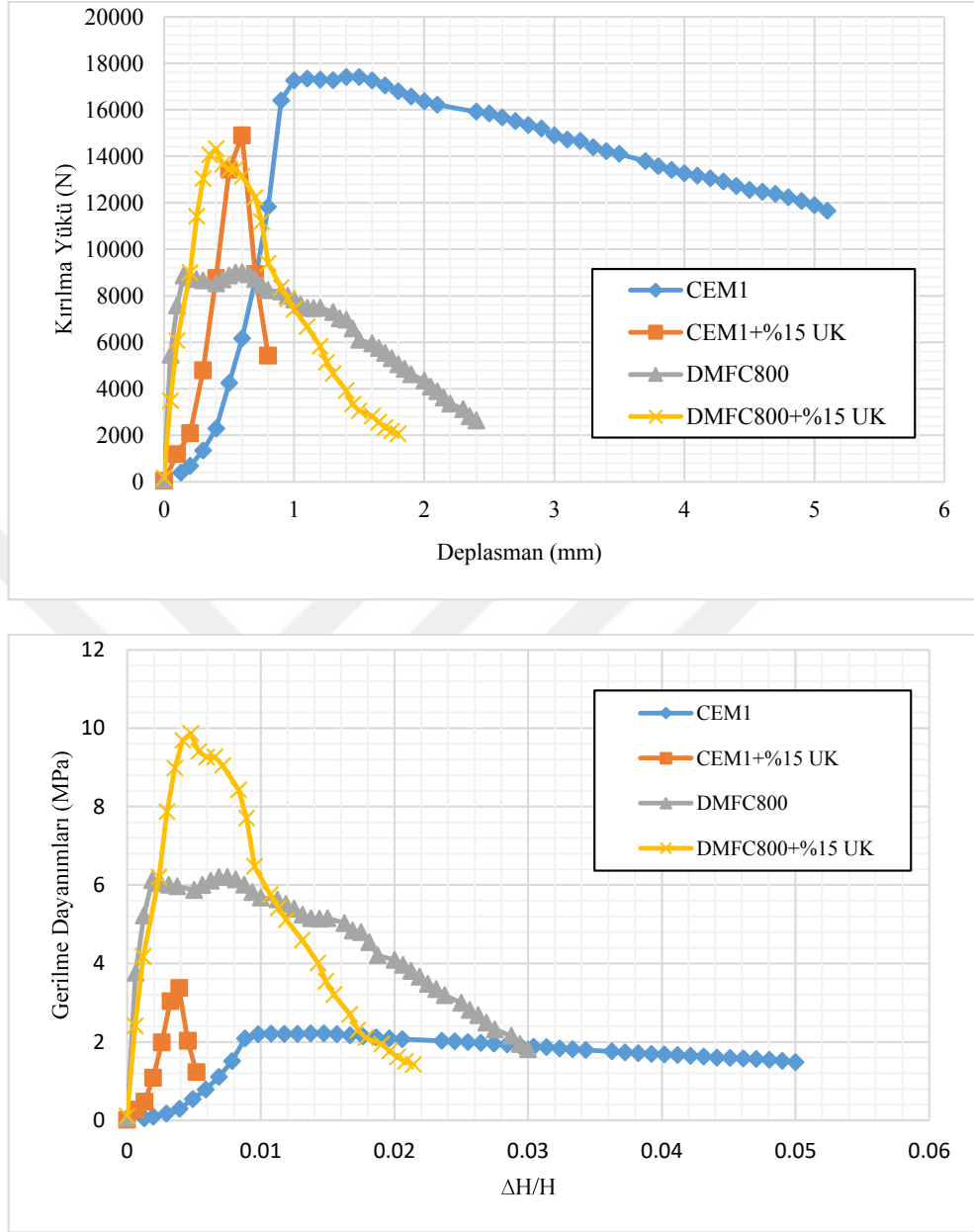
Şekil 4.21. $s/\phi = 0.8$ olan farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.21.'de farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan JG kolonlarının $s/\phi=0.8$ olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. En fazla dayanım DMFC-800 ve DMFC-800+%15 UK ile hazırlanan JG kolonlarında elde edilmiştir. DMFC-800 enjeksiyon karışımında hazırlanan numunelerin daha büyük deformasyon seviyelerinde kırılma gösterdiği görülmüştür. Bu durum ince taneli çimentonun ve çimento içerisine katılan uçucu külün, küçük tanecik boyutu ile malzemelerin elastiklik özelliğini arttırdığını göstermektedir. $S/\phi=0.8$ ve farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların, gevrek kırılma yaptığı görülmüştür.



Şekil 4.22. $s/\phi = 1.0$ olan farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.22’de farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların, s/ϕ oranı 1.0 olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. Bu durumda DMFC-800 + %15 UK katkılı enjeksiyon karışımı ile oluşturulan jet grout kolonunun kırılma yükü ve maksimum gerilme değerinin diğer 3 karışım için elde edilen değerlerden yüksek olduğu belirlenmiştir. CEM-I 42,5R enjeksiyonu ile oluşturulan kolonun dayanımı DMFC-800 dayanımlardan az olmakla birlikte, malzemenin deformasyon özelliği kazandığı gözlenmiştir. Ancak özellikle uçucu kül ilavesiyle oluşan JG kolonların hem deformasyon yapabilme kabiliyetini arttırması hem de yüksek dayanımlara ulaşmasını sağladığı gözlemlenmiştir.

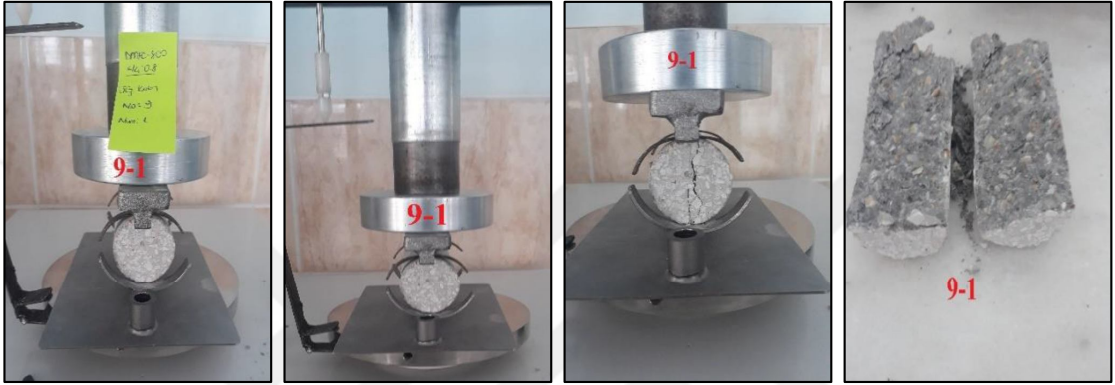


Şekil 4.23. $s/\phi = 1.4$ olan farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların dayanımı

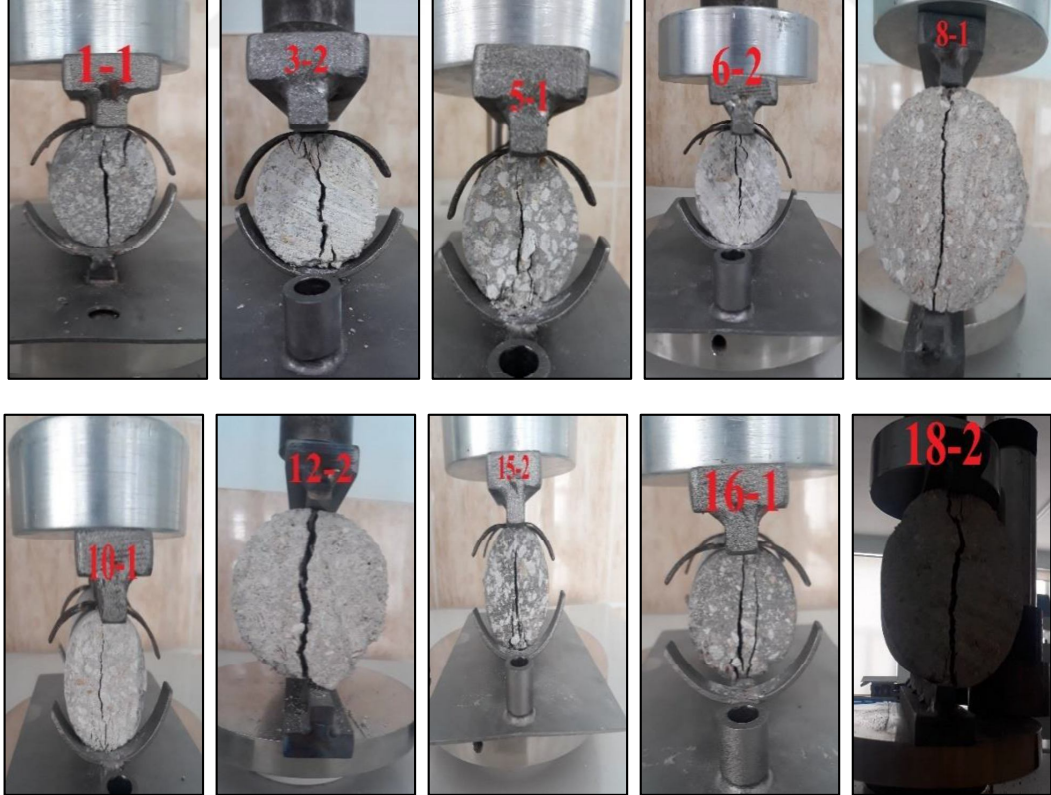
Şekil 4.23'te farklı farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların s/ϕ oranı 1.40 olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. DMFC-800 + %15 UK ilaveli çimento enjeksiyonu ile hazırlanan kolonlar için yaklaşık olarak %0.42 birim deformasyonda, gerilme dayanımı ve kırılma yükü değerlerinin maksimum olduğu görülmüştür. Hatta diğer kolonlar için elde edilen değerlerden yine açıkça fazla dayanım değerine sahip olduğu görülüyor. Karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç dayanımındaki azalmaların, artan s/ϕ oranlarında çimento boyutunun dayanım etkisini azalttığı görülmüştür.

4.4. Karot Numuneler Üzerinde Yarmada Çekme Deneyleri

Jet grout kolonlarından alınan karot numuneler üzerinde Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında mevcut bulunan tek eksenli basınç deney aletinde, yarmada çekme numuneleri kırılmıştır (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25). Alet yukarı yönlü 0.6 mm/dak'lık bir hızda hareket ederek çalışmakta olup, veriler bilgisayar ortamına da aktarılabilmektedir.



Şekil 4.24. Tek eksenli basınç deney düzeneğinde yarmada çekme deneylerinin yapılması



Şekil 4.25. Yarmada çekme deneylerine ait numuneler

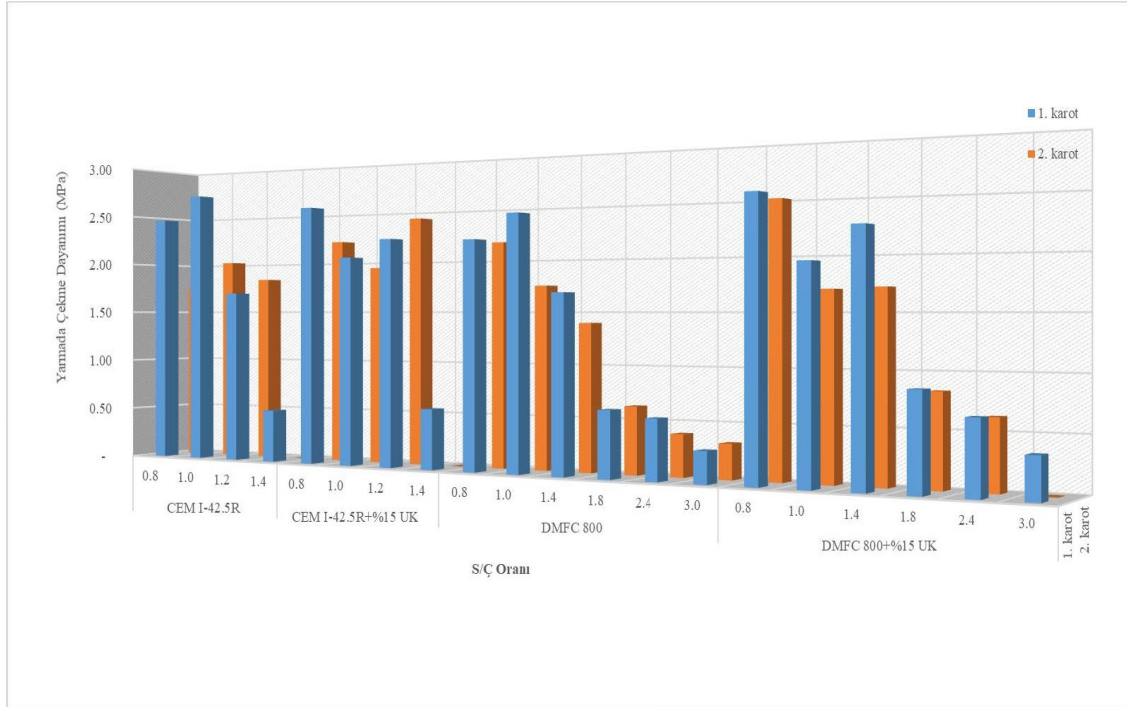
Farklı tip çimento ve çimento karışımlarından imal edilen JG kolonlarından alınan karot numuneleri, üzerinde yapılan yarmada çekme deneyleri esnasında elde edilen dayanım ve kırılma yükü değerleri çizelge 4.10'da verilmiştir. Çizelge 4.10'da JG kolonundan alınan karot numunesine ait çap ve boy değerleri ve numunenin tam kırılma esnasında ulaşılmış olduğu maksimum kırılma yük kapasitesi verilmiştir. Serbest basınç deneyinde olduğu gibi yarmada çekme deneyleri için JG kolonundan alınan iki karot numunesi üzerinde yapılmıştır. Elde edilen değerlerden bölüm 3'te verilen bağıntı 3.3'e göre çekme dayanımları hesaplanmıştır. (Çizelge 4.10.)

Çizelge 4.10. Jet grout kolonlarına ait çekme dayanımları

Grup No	JG Kolon No	D ₁ (mm)	H ₁ (mm)	P _{max1} (N)	σ _{ç1} (MPa)	D ₂ (mm)	H ₂ (mm)	P _{max2} (N)	σ _{ç2} (MPa)
1	1	43	85	14123	2.459	43	86	9075	1.751
	2	43	89	16212	2.695	43	86.5	11801	2.019
	3	43	97	11077	1.690	43	76	9433	1.837
	4	94	95	7172	0.511	-	-	-	-
2	5	43	85.5	14648	2.535	43	85	12703	2.212
	6	43	88	12103	2.035	43	88	11551	1.943
	7	43	83	12375	2.207	43	91	14920	2.426
	8	75	155	10551	0.578	-	-	-	-
3	9	43	85	12545	2.184	43	85	12473	2.172
	10	43	90	14721	2.421	43	90	10654	1.752
	11	43	72	8184	1.682	43	86	8122	1.398
	12	75	155	11399	0.624	75	156	11657	0.634
	13	75	156	10338	0.562	75	155	7200	0.394
	14	60	154	4265	0.294	62	153	4859	0.326
4	15	43	85	14569	2.537	43	85.5	14460	2.503
	16	43	79	10344	1.938	43	85	9786	1.704
	17	43	84	12690	2.236	43	84	9763	1.720
	18	75	155	15946	0.873	75	150	14794	0.837
	19	75	155	12038	0.659	75	154	11624	0.636
	20	97	142	8140	0.376	-	-	-	-

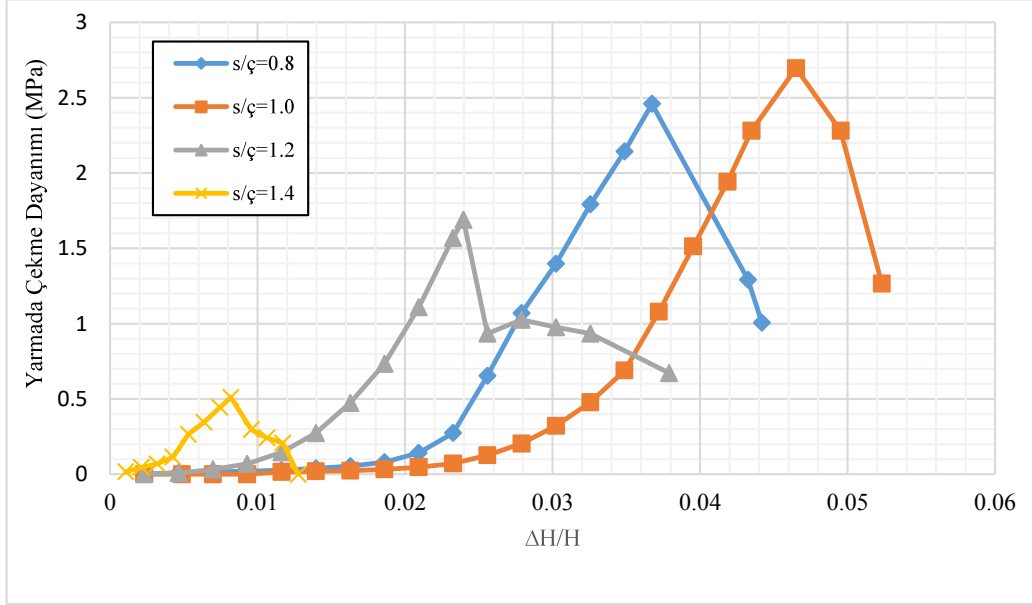
Çizelge 4.10'daki yarmada çekme dayanım sonuçları incelendiğinde, aynı kolondan alınan karot numunelerinde, çekme dayanımının farklılık gösterdiği görülmüştür. Bunun nedeni karot alım esnasında karot yüzeyinin boğumlanma yani dümdüz olmamasından kaynaklanmaktadır.

Uçucu kül içeren JG kolonlarının yarmada çekme dayanımının uçucu kül içermeyen JG kolonların yarmada çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu da açıkça görülmüştür (Şekil 4.26).



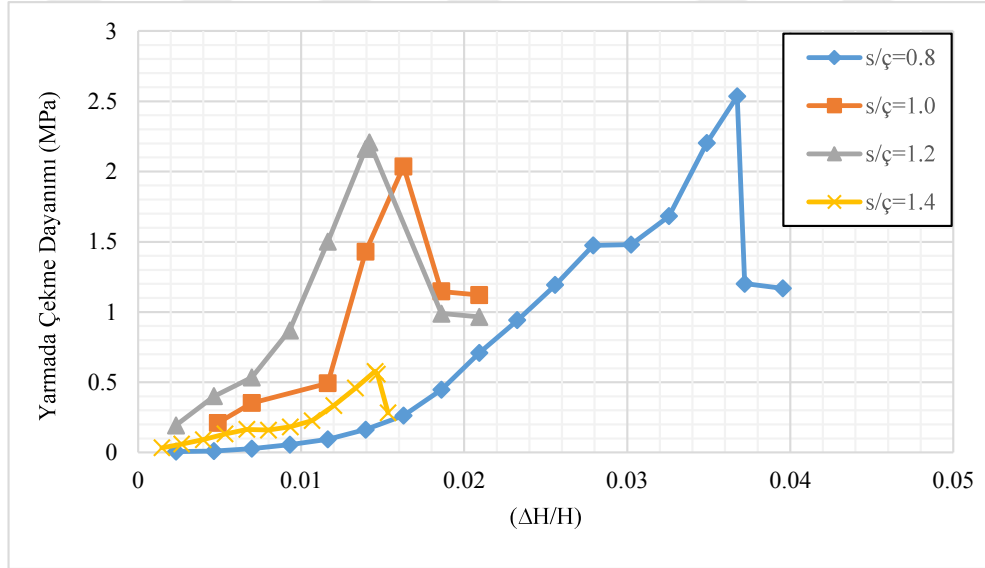
Şekil 4.26. JG kolonlarından alınan karot numunelerinin yarmada çekme dayanım değerleri

Şekil 4.26'daki numunelerin toplamda ne kadar deformasyon yaptığının görülebilmesi Gerilme-birim deformasyon grafikleri ayrı ayrı verilmiştir. Kırılma yükü-deplasman grafikleri verilmemiştir. Bunun nedeni, numunelerin boyutu büyüdükçe kırılma yükünde artış görülürken, çekme dayanım değerinde azalma olduğunu belirtmiştir (Arslan, 2006). Bu yüzden kırılma yükü-deplasman grafikleri çizilmemiştir. Grafikler, Çizelge 4.10'daki birinci numunelerin verileri kullanılarak çizilmiştir (P_{max1}).



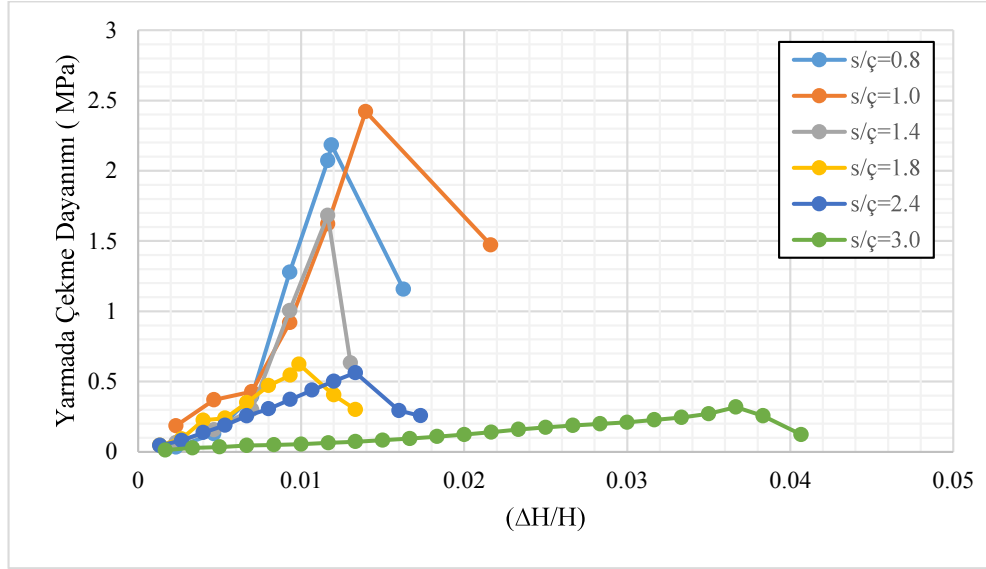
Şekil 4.27. CEM-I 42,5R çimentosu ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.27’de CEM-I 42,5R çimento enjeksiyonundan oluşan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinde, s/ç oranı 1.0 olan kolonun maksimum yarmada çekme dayanım değerine sahip olduğu görülmektedir. S/Ç oranı arttıkça çekme dayanımının da genel olarak azaldığı gözlemlenmiştir.



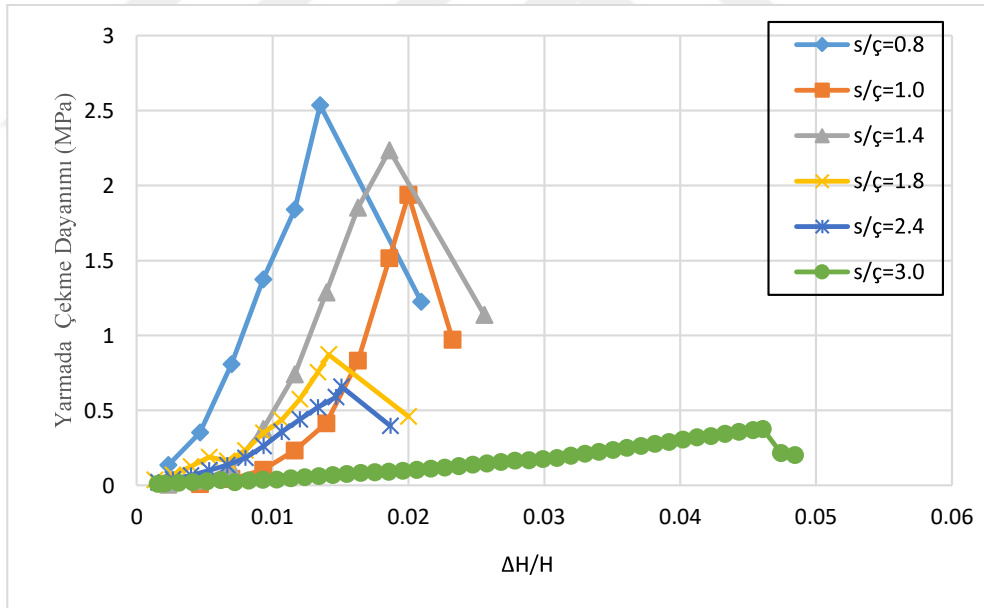
Şekil 4.28. CEM-I 42,5R+ %15 UK karışımı ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.28’de CEM-I 42,5R + %15 UK karışımlı çimento enjeksiyonundan oluşan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinde, s/ç oranı 0.8 olan kolonun maksimum yarmada çekme dayanım değerine sahip olduğu görülmektedir. S/Ç oranı 1.2 de UK çekme dayanımını arttırdığı görülmüştür.



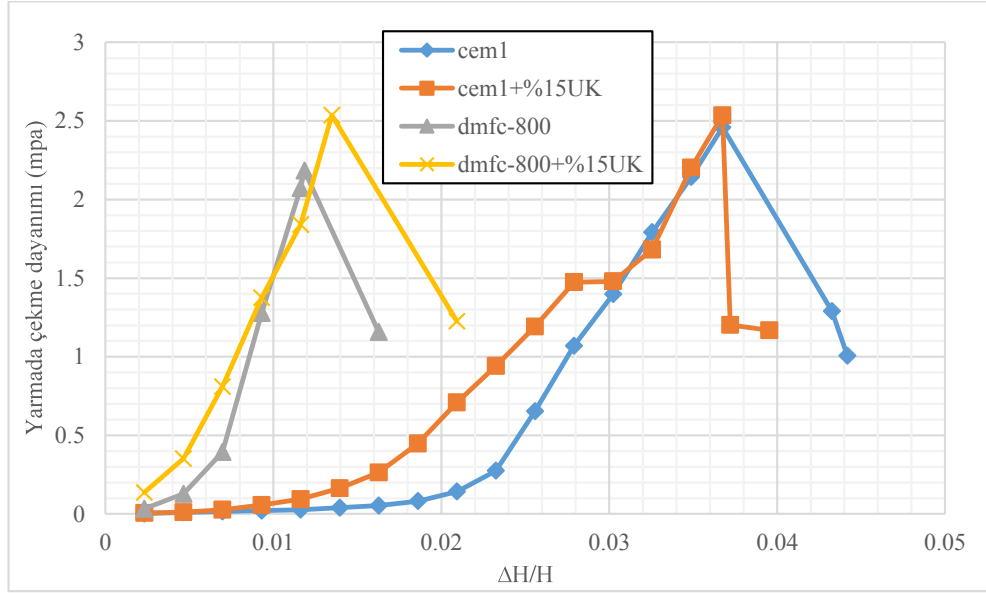
Şekil 4.29. DMFC-800 çimentosu ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.29'da DMFC 800 çimentosu ile enjeksiyonundan oluşan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinde, $s/\zeta=0.8$ olan kolonun maksimum yarmada çekme dayanım değerine sahip olduğu görülmektedir.



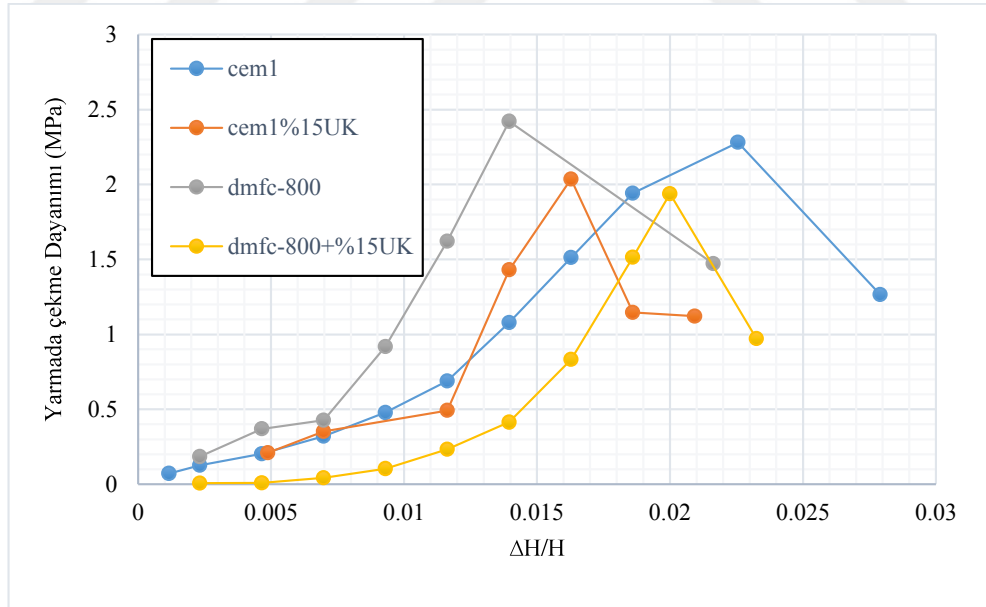
Şekil 4.30. DMFC-800 + %15 UK karışımı ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.30'da DMFC-800 + %15 UK karışımı çimento enjeksiyonundan oluşan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinde, s/ζ oranı 0.8 olan kolonun maksimum yarmada çekme dayanım değerine sahip olduğu görülmektedir. S/Ç oranı 1.4'de UK küllün çekme dayanımını arttırdığı açıkça görülmüştür.

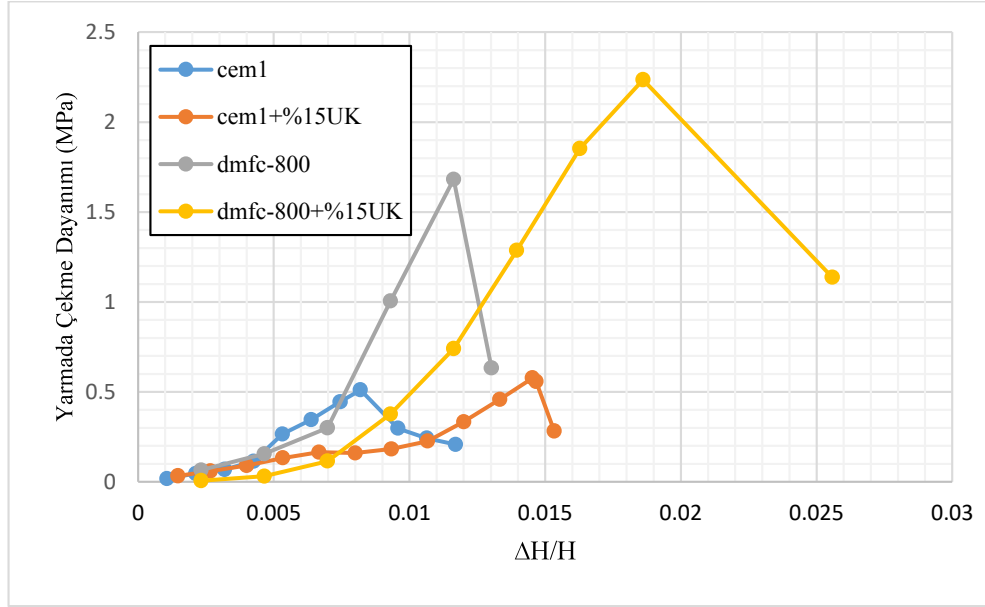


Şekil 4.31. S/Ç=0.8 farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.31.'de s/ç=0.8 olan farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanım değerleri gösterilmektedir. S/Ç=0.8 için tüm grupların yarmada çekme dayanımı yaklaşık olarak birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.32. S/Ç=1.0 olan farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı



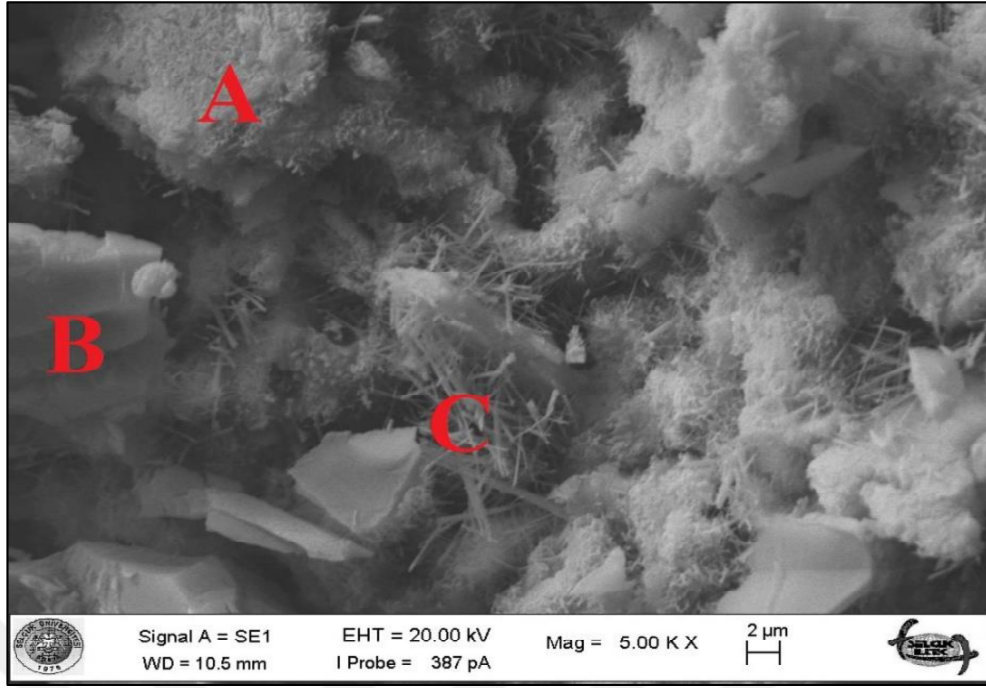
Şekil 4.33. S/Ç=1.4 olan farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.33’de s/ç 1.4 olan farklı çimento ve çimento karışımları ile hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımı değerleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi DMFC-800+%15 UK karışımı çimento kullanılarak oluşturulan JG kolonunun çekme dayanımı en yüksektir. En düşük çekme dayanımı ise NPC çimentosu ile oluşan JG kolonunundur. Buradan s/ç oranı 1.4 için mikro taneli ve uçucu kül çekme dayanım olarak diğer bağlayıcılardan iyi olduğu görülmüştür.

4.5 SEM ve EDS Analizi

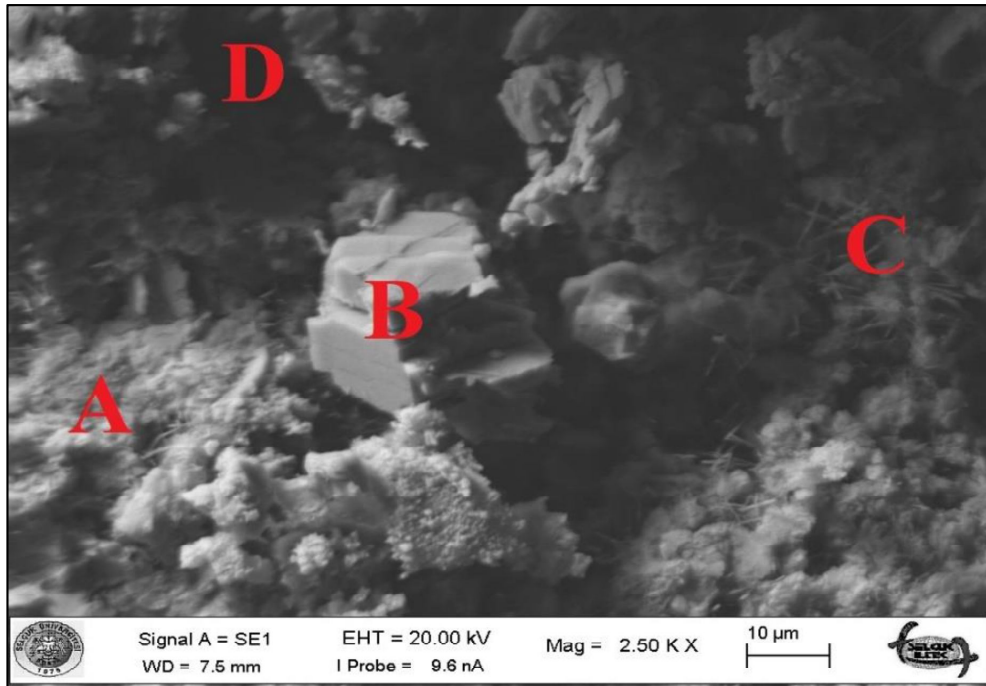
Bu bölümde serbest basınç dayanımı değerlerini değerlendirdikten sonra, yaklaşık olarak 1cm² boyutundaki numuneler üzerinde SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. SEM ve EDS analizleri Selçuk Üniversitesi İLTEK merkezinde yapılmıştır.

4.5.1 SEM Analizi Sonuçları



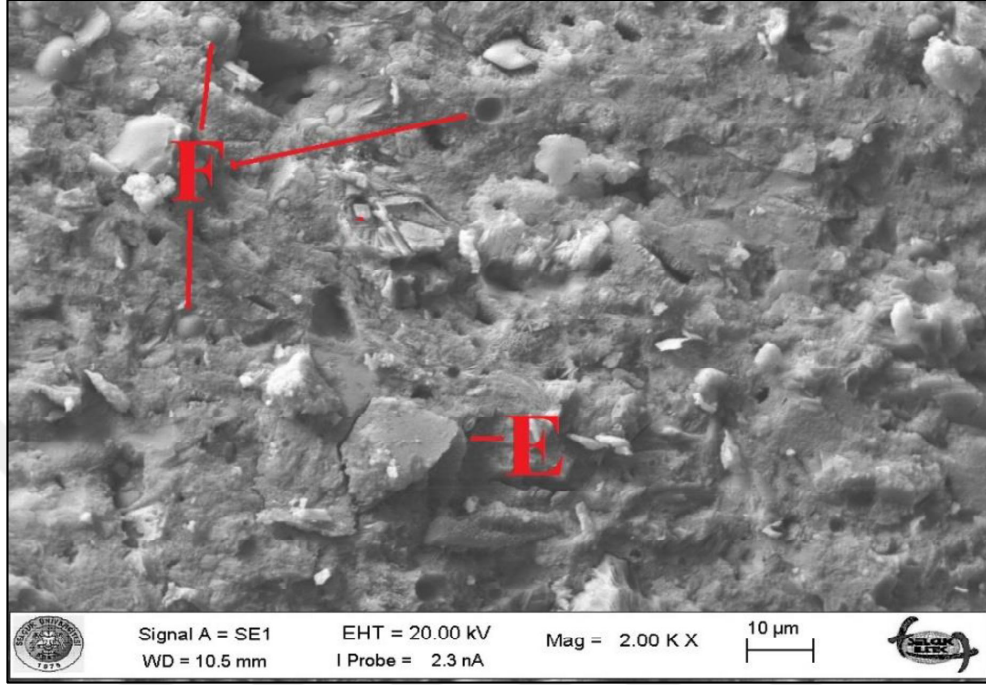
Şekil 4.34. NPC, s/ç oranı 0.8 olan JG kolonuna ait numunelerden elde edilen SEM görüntüsü

Şekil 4.34’de numunenin 5000 kat yakınlaştırılmış görüntüsüdür. Şekil 4.34.’deki A ile gösterilen yapı C-S-H jeli, B ile gösterilen yapı CH bağı ve C ile gösterilen yapı ise şekillinden de anlaşılacağı üzere etrenjit iğnesidir.



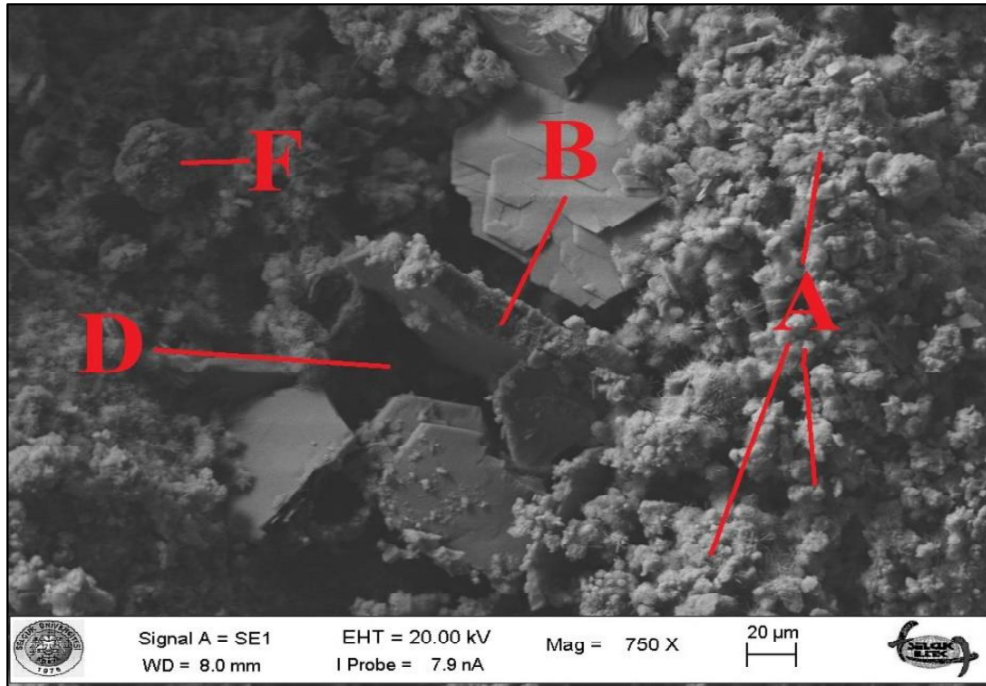
Şekil 4.35. NPC, s/ç oranı 1.2 olan JG kolonuna ait numunelerden elde edilen SEM görüntüsü

Şekil 4.35’de numunenin 2500 kat yakınlaştırılmış görüntüsüdür. Şekil 4.35.’deki A ile gösterilen yapı C-S-H jeli, B ile gösterilen yapı CH bağı ve C ile gösterilen yapı ise etrenjit kümesi ve D ise boşluğu ifade etmektedir.



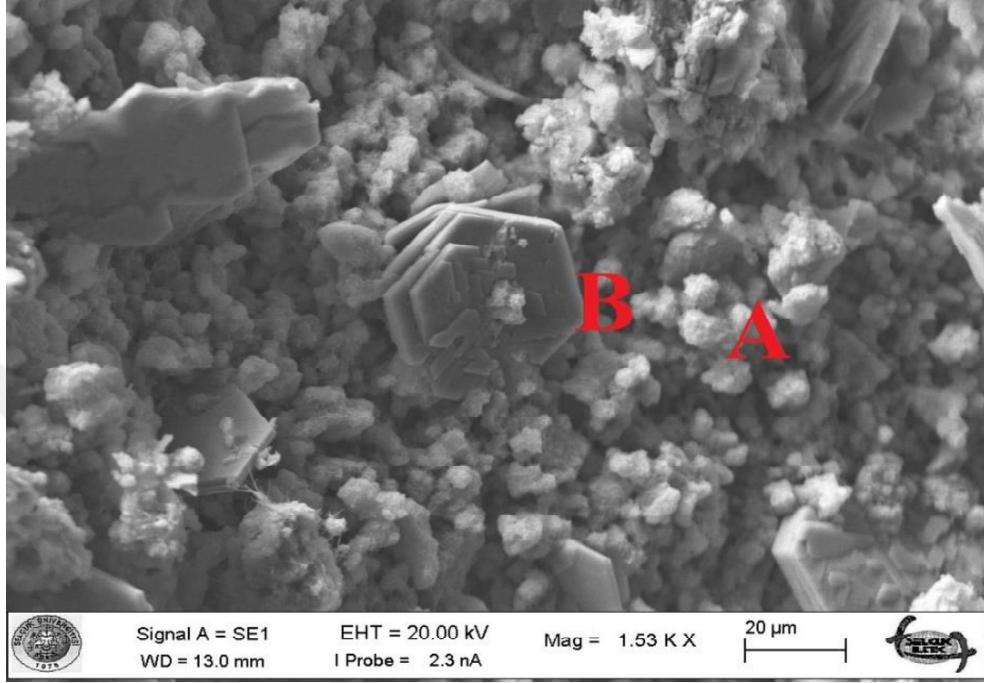
Şekil 4.36. NPÇ+ %15 UK, s/ç oranı 0.8 olan JG kolonuna ait numunelerden elde edilen SEM görüntüsü

Şekil 4.36’da numunenin 2000 kat büyütülmüş görüntüsüdür. Şekil 4.36’daki E ile gösterilen yapı tanesine ve F ile gösterilen yapılar ise uçucu kül tanecikleridir.



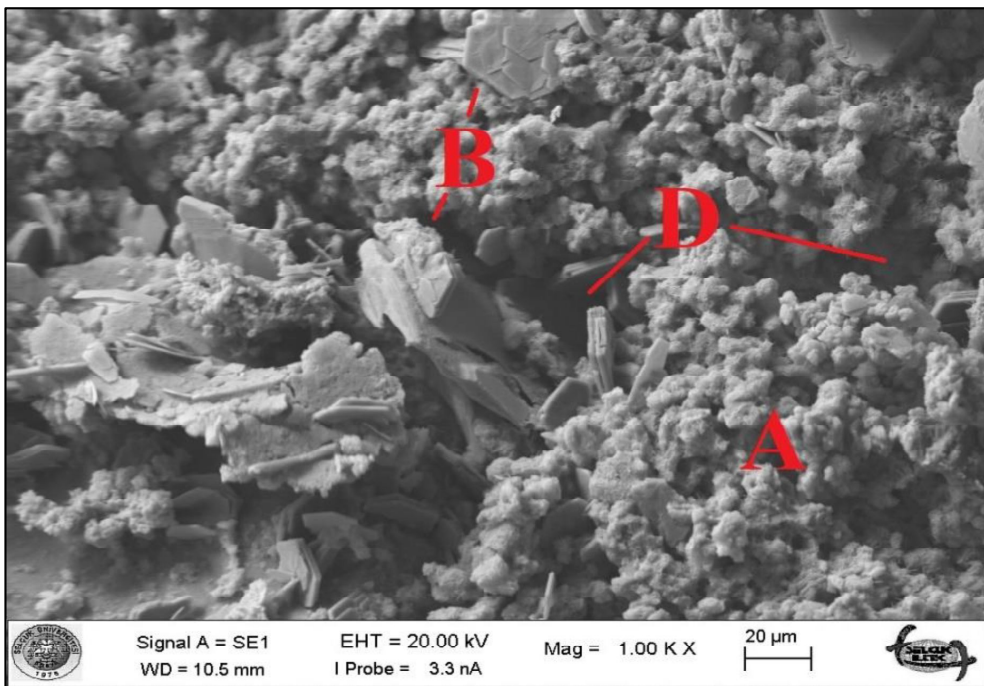
Şekil 4.37 NPÇ+ %15 UK, s/ç oranı 1.2 olan JG kolonuna ait numunelerden elde edilen SEM görüntüsü

Şekil 4.37’de numunenin 750 kat yakınlaştırılmış görüntüsüdür. Şekil 4.37.’deki A ile gösterilen yapılar C-S-H jeli, B ile gösterilen yapılar CH bağı, D ile gösterilen yer boşluğu ve F ile gösterilen yapı ise UK taneciğidir.



Şekil 4.38. DMFC-800+ %15 UK, (s/ç= 0.8) JG kolonuna ait numunelerden elde edilen SEM görüntüsü

Şekil 4.38’de numunenin yaklaşık olarak 1550 kat yakınlaştırılmış görüntüsüdür. Şekil 4.38.’deki A ile gösterilen yer C-S-H jeli, B ile gösterilen yapı CH bağıdır.

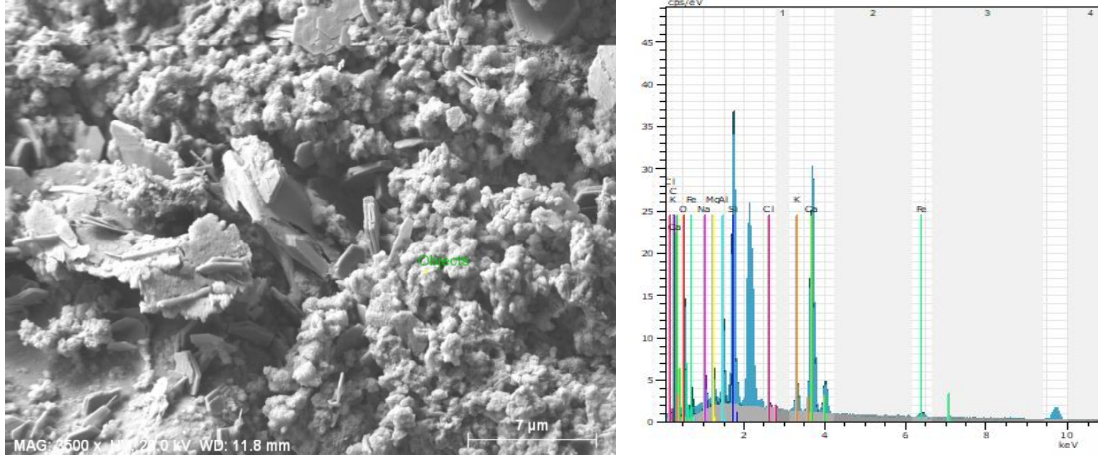


Şekil 4.39. DMFC-800, ($s/\phi=1.4$) olan JG kolonuna ait numunelerden elde edilen SEM görüntüsü

Şekil 4.39.'da numunenin yaklaşık olarak 1000 kat yakınlaştırılmış görüntüsüdür. Şekil 4.39.'daki A ile gösterilen yerler C-S-H jeli, B ile gösterilen yapılar CH bağı, D ile gösterilen yer boşluktur. Oluşturulan yapılardaki su içeriği arttığı için boşluklar daha net görülmektedir.



4.5.2 EDS Analizi Sonuçları

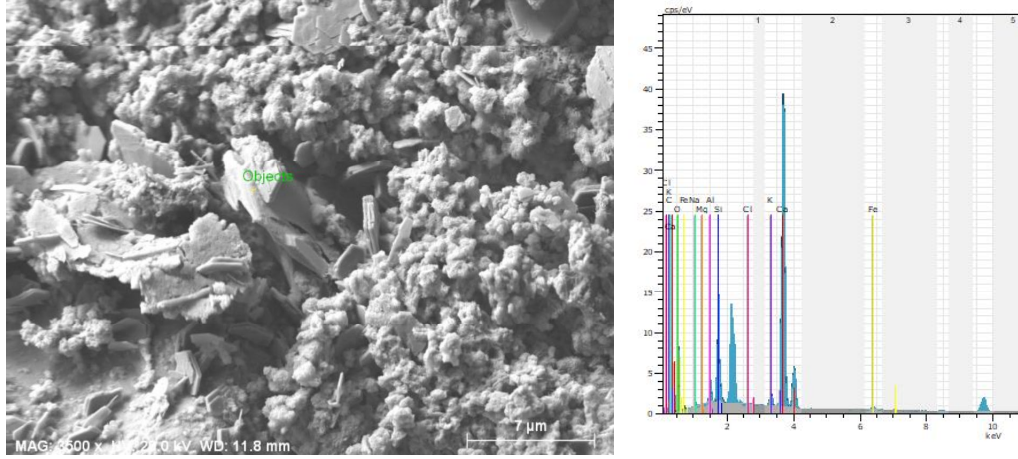


Şekil 4.40. DMFC-800 s/ç oranı 1.4 olan JG kolonuna ait numuneden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde C-S-H jeli olan yerde nokta yöntemiyle EDS analizi ve elementel yüzdesi

Şekil 4.40'da DMFC-800+ %15 UK, s/ç oranı 1.4 olan JG kolonuna ait numuneden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde C-S-H jeli olan yerde nokta yöntemiyle EDS analizi yapılmıştır. Analizden elde edilen elementel yüzdesi çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. DMFC-800 s/ç oranı 1.4 olan JG kolonuna ait numunesinin EDS analizi ve elementel yüzdesi

Elementler	Elementel Yüzdesi (%)
Oksijen	74.96
Kalsiyum	7.77
Silisyum	5.72
Alüminyum	2.06
Sodyum	1.98
Magnezyum	1.24
Potasyum	0.73
Demir	0.24
Karbon	5.17
Klor	0.12



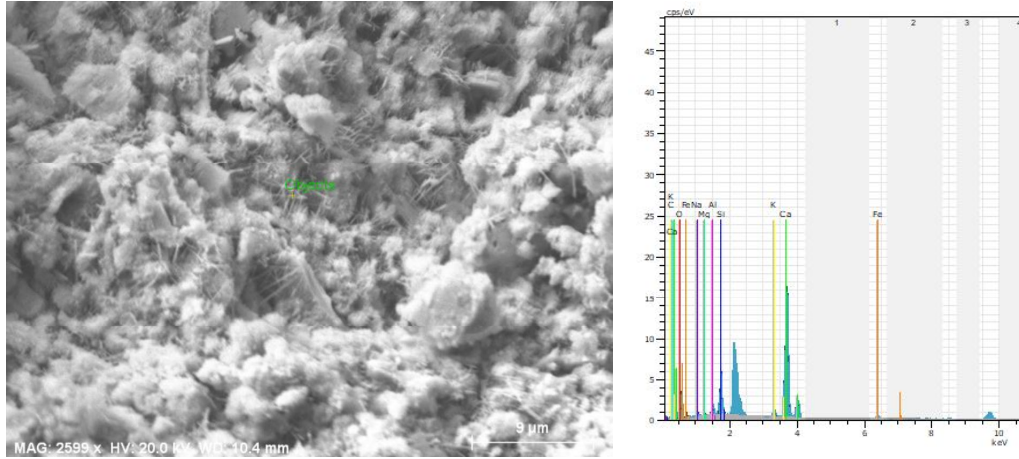
Şekil 4.41. DMFC-800 s/ç oranı 1.4 olan JG kolonuna ait numuneden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde CH plakası olan yerden nokta yöntemiyle EDS analizi ve elementel yüzdesi

Şekil 4.41.'de DMFC-800 s/ç oranı 1.4 olan JG kolonuna ait numuneden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde CH plakası olan yerden nokta yöntemiyle EDS analizi yapılmıştır. Analizden elde edilen elementel yüzdesi çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. DMFC 800 s/ç oranı 1.4 olan JG kolonuna ait numunesinin EDS analizi ve elementel yüzdesi

Elementler	Elementel Yüzdesi (%)
Kalsiyum	17.77
Oksijen	72.88
Silisyum	4.00
Karbon	2.91
Alüminyum	1.10
Demir	0.24
Magnezyum	0.02
Sodyum	0.42
Potasyum	0.60
Klor	0.07

DMFC-800 s/ç oranı 1.4 olan JG kolonuna ait numunesinin SEM analizinde belirttiğimiz yapı ve dokular üzerinde EDS analiz yapılmıştır (Şekil 4.40 ve 4.41.). EDS analizinde o yerdeki elementlerin yüzdeleri belirlenmektedir. Çizelge 4.11 ve 4.12'yi incelediğimizde; çizelge 4.11'deki silisyum yüzdesinin çizelge 4.12'den fazla olması yapının C-S-H jeli olduğunu göstermiştir. Ayrıca çizelge 4.12'deki kalsiyum oranının çizelge 4.11'den fazla olması da CH plakasının doğru olduğunu desteklemiştir.



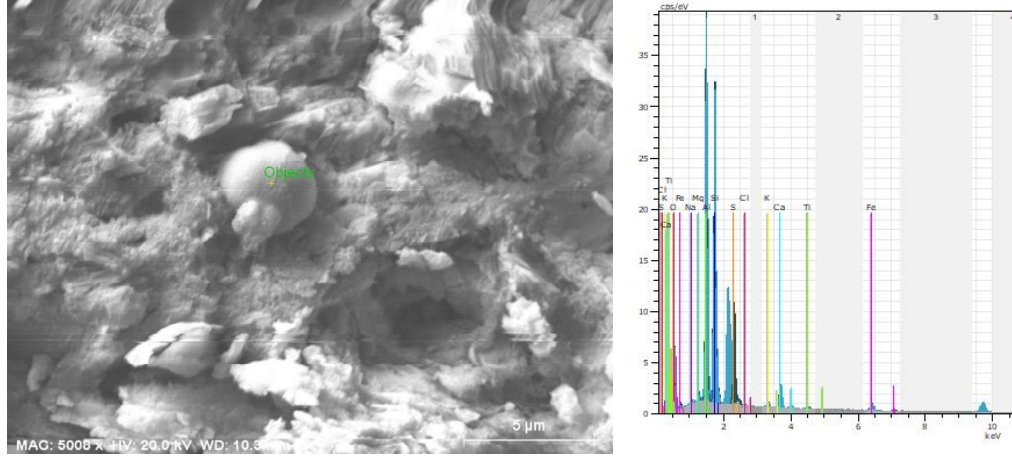
Şekil 4.42. NPC, s/ç oranı 1.2 olan JG kolonuna ait numuneden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde C-S-H jeli olan yerde nokta yöntemiyle EDS analizi ve elementel yüzdesi

Şekil 4.42.'de NPC, s/ç oranı 1.2 olan JG kolonuna ait numuneden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde C-S-H jeli olan yerde nokta yöntemiyle EDS analizi yapılmıştır. Analizden elde edilen elementel yüzdesi çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. NPC s/ç oranı 1.2 olan JG kolonuna ait numunenin EDS analizi ve elementel yüzdesi

Elementler	Elementel Yüzdesi (%)
Oksijen	79.21
Kalsiyum	13.65
Silisyum	2.98
Karbon	0.87
Alüminyum	1.13
Potasyum	0.60
Demir	0.42
Magnezyum	0.24
Sodyum	0.88

DMFC-800 ve NPC çimentolarından oluşan JG kolonlarından alınan numuneler üzerinde yapılan SEM analizinde DMFC-800 çimentosunun daha çok C-S-H jeli oluşturduğu açıkça görülmüştür (Şekil 4.40 ve 4.42). Çizelge 4.11. ile 4.13. arasındaki silisyum elementinin, elementel yüzdesinin daha fazla olduğu ($5,72 > 2,98$) görülmüştür. Buradan DMFC-800 çimentosunun, NPC ye göre daha iyi dayanım almasının SEM ve EDS analizi ile daha iyi anlaşılmıştır.



Şekil 4.43. UK kullanılarak oluşturulan JG kolonuna ait numuneden elde edilen SEM görüntüsü UK zerinde nokta yöntemiyle EDS analizi ve elementel yüzdesi

Çizelge 4.14. UK kullanılarak oluşturulan olan JG kolonuna ait numunesinin EDS analizi ve elementel yüzdesi

Elementler	Elementel Yüzdesi (%)
Oksijen	66.95
Alüminyum	14.12
Silisyum	11.65
Kalsiyum	1.32
Demir	0.64
Potasyum	0.29
Kükürt	4.12
Magnezyum	0.50
Sodyum	0.38
Klor	0.04

Literatürde uçucu külün (UK) küresel boyutta olduğu belirtilmiştir. Şekil 4.43'te SEM analizinde küresel yapının UK olup olmadığını anlamak için EDS analizi yapılmıştır. Analiz sonucu Çizelge 4.14.'te verilmektedir. Çizelge 4.14 incelendiğinde silisyum, alüminyum değerleri yüksek olduğu incelenmiştir. (Şekil 4.43). F sınıfı uçucu külün içerisinde SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 çok olduğu bilinmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında katkısız normal portland, mikro taneli çimento ve uçucu kül karışımı enjeksiyon harçlarının, jet grout kolonlarının üzerindeki enjekte edilebilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Laboratuvarda plastik variller içerisinde imal edilen JG kolonlarında, deney kumu olarak kötü derecelenmiş temiz doğal kum (SP) seçilmiştir. %33 rölatif sıklıkta plastik varile yerleştirilen kum zemine %3-4 oranında su ilavesi yapılmıştır.

Deneysel çalışmada

- 1. Grup Normal Portland çimentosu (NPÇ),
- 2. Grup NPÇ + %15 Uçucu Kül (UK) ilavesi,
- 3. Grup Mikro Taneli Çimento (DMFC-800)
- 4. Grupta ise DMFC-800 + %15 UK

karışımı çimento karışımları kullanılmıştır.

Deneyler kapsamında ilk olarak kullanılan harç karışımlarının, reolojik özelliklerini belirlemek için Marsh hunisi, sedimentasyon ve vicat deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bu reolojik deney sonuçları kullanılarak ve zemine enjekte edilebilirlik durumu göz önüne alınarak, uygun su/çimento (s/ç) oranları için 20 adet jet grout kolonu laboratuvarda imal edilmiştir.

Kolonların üretilmesinde, deneme kolonları deney sonuçlarından yararlanılarak; dönme hızı 10 devir/dak, çekme hızı 30 cm/dak ve enjeksiyon basıncı 30 bar olarak uygulanmıştır. Oluşturulan kolonlar 28. gün sonunda plastik varillerin içerisinden çıkarılmıştır. Çap ve boy ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için yeterli sayıda ve iyi çimentolanmış bölgelerden karot numuneleri alınarak serbest basınç ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Enjeksiyon karışımları için yapılan Marsh hunisi deneylerinde, en uygun akış süresi su için 26 saniye olduğu ASTM C191'de belirtilmiştir. 4 grup içinde s/ç oranı 0.6 ile 3,0 arasında enjeksiyon karışımları oluşturulup incelemiştir. DMFC-800 s/ç oranı 1.8 ve yüksek değerleri için Marsh hunisi akma süresi 26 saniyeden azdır. Bu nedenle

DMFC-800 çimentosu kullanılarak oluşturulan jet grout kolonlarının, s/ç oranı 1.8 ve yüksek oranlarındaki değerlerinden sonra oluşan kolonların, çaplarında artış olmayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Uçucu Kül karışımların akış süresini yavaşlattığı ve viskozitesini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca uçucu kül karışımı enjeksiyonlarda s/ç oranı 1.0 değeri altında oluşan kolon çaplarında ise azalma saptanmıştır. S/Ç oranı 1.0 değeri üzerinde oluşan kolonların, çaplarında artış net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak uçucu külün bünyesine su alma isteğinden kaynaklanmaktadır. Marsh hunisi akma süreleri için s/ç oranının farklı çimentolar için çok değişken olduğu görülmüştür.

Çimento enjeksiyon karışımlarının enjekte edilebilirliğinin sağlanabilmesi için, her bir karışımın reolojik özelliklerinin belirlenmesi gerektiğinin önemi anlaşılmıştır.

Enjeksiyon karışımlarının stabilitesinin belirlenmesi için, yapılan sedimentasyon deneylerine göre, NPC çimento enjeksiyon karışımları için yapılan ön deneylerin stabil olmadığı görülmüştür. DMFC-800 çimentosu kullanılarak hazırlanan enjeksiyon karışımlarında, s/ç oranı 1.2 ve altındaki değerler için stabil davranış sergilemiştir.

ASTM C191'e göre vicat iğnesi yapılacak deneylerde, numune karışımının yoğun kıvamlı (hamurumsu kıvam) olması gerektiği şartnamede belirtilmiştir. 4 grup içerisinde 3.grupta olan DMFC-800 çimentosu kullanılarak yapılan vicat deneyinin, priz alma ve bitiş süreleri en erkendir. Uçucu külün priz alma ve bitiş süresini uzattığı net bir şekilde görülmüştür. Uçucu külün priz geciktirici özelliği olduğu sonucuna varılmıştır.

DeneySEL çalışma kapsamında, kolonların dayanımını belirlemek için "Serbest Basınç Dayanım" deneyleri yapılmıştır. Kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinden ikişer adet deney numunesi elde edilmiştir. Buna göre:

- DMFC-800 çimentosu kullanılarak oluşturulan enjeksiyon karışımları ile elde edilen kolonlarda, en yüksek dayanım s/ç oranı 0.8 değeri için elde edilmiştir ($\sigma_1=20.38$ MPa). S/Ç oranı arttıkça dayanım azalmaktadır.
- NPC çimento enjeksiyon karışımları içerisinde en yüksek dayanımı aynı s/ç oranında alınmıştır ($\sigma_1=17.51$ MPa). Genel olarak s/ç oranının artması dayanımı azaltıcı etkisi olduğu görülmüştür.
- NPC+%15 UK katkılı enjeksiyon karışımları kullanılarak elde edilen kolonlarda en yüksek dayanım s/ç=0.8 değeri için alınmıştır ($\sigma_1=14.76$ MPa).

- DMFC-800 + %15 UK katkılı enjeksiyon karışımları kullanılarak elde edilen kolonlarda, en yüksek dayanım aynı s/ç=0.8 değeri için alınmıştır ($\sigma_1=18.77$ MPa).

Bu sonuçlar incelendiğinde s/ç oranı 0.8 değeri için JG kolonlarının oluşturulmasında, dayanım açısından en uygun bağlayıcı seçiminin DMFC 800 mikro taneli çimento olduğu görülmüştür.

Aynı s/ç oranlarında karşılaştırmalar yapıldığında; s/ç oranı 1.0 için en yüksek dayanım değeri DMFC-800 + %15 UK karışimli harçlar kullanıldığı zaman alınmıştır ($\sigma_1=16.76$ MPa). Ama s/ç oranı 1.4 değeri için en yüksek dayanım değeri DMFC-800 + %15 UK karışimli harçlar kullanıldığı zaman alınmıştır ($\sigma_1=9.87$ MPa).

Buradan çıkarılan sonuç uçucu külün çimento ile birlikte bağlayıcılık özelliğinin de sayesinde artan su muhtevalarında tanecikler arasındaki bağı ve jelleşmeyi (C-S-H bağ yapısı) açısından son derece önemlidir. Fakat su muhtevası (s/ç) 1.0 değerinin altında olduğu zaman bu etki jelleşmeyi tam olarak oluşturamadığı için, dayanım daha düşük değerlerde kalmaktadır. Ayrıca DMFC-800 içeren enjeksiyon karışımları ile imal edilen kolonlardan, alınan numunelerin daha sünek davranış yapabilme özelliği kazandıkları görülmüştür. Bu durum taneciğin mikro boyutta olması ile alakalı bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

DeneySEL çalışma kapsamında DMFC-800 mikro taneli çimento şerbetlerinin s/ç 1.8, 2.4 ve 3.0 değerleri için JG kolonları oluşturulmuştur. Bu kolonlardan karot alınırken parçalanma ve örselenme nedeniyle küçük çapta karotlar alınamamış, büyük çapta karotlar alınabilmiştir. Karotların serbest basınç dayanım deneyleri yapılmış, diğer numunelerden daha fazla kırılma yükü alsalar da küçük çaptakilere göre dayanım değerleri azalmıştır.

DeneySEL çalışma kapsamında, 4 farklı çimento karışimli enjeksiyon harçlarıyla hazırlanan kolonlardan, boy/çap oranı 2.0 olacak şekilde alınan karot numuneleri üzerinde yarmada çekme dayanımı yapılmıştır. Çekme dayanımı, jet grout kolonları, tünellerde, iksa yapılarında ve çekme dayanımı gerekli olan sistemlerde önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında; jet grout kolonlarının çekme dayanımını arttırmak için, NPC ile birlikte DMFC-800 ve %15 UK katkılı enjeksiyon karışımları kullanılmıştır. Deneysel çıkarımlar sonucunda UK katkılarının genel olarak çekme dayanımının olumlu yönde artış sağladığı görülmüştür.

S/Ç oranı 1.4 değeri için DMFC-800 + %15 UK katkılı karışımların çekme dayanımı NPC ye göre daha iyi çekme dayanımları sağladığı görülmüştür. Örneğin; DMFC 800 çimentosu kullanılarak düşük s/ç oranı 0.8 değeri için, yarmada çekme dayanımı serbest basınç dayanımının 1/8 değerine yaklaştığı görülmüştür. DMFC-800 çimentosu kullanılarak, yüksek s/ç oranı 3.0 değeri için yarmada çekme dayanımı, serbest basınç dayanımının 1/4 değerine yaklaştığı görülmüştür. S/Ç oranı artarken yarmada çekme ve serbest basınç dayanımının aynı oranda arttığı, azalmadığı görülmüştür.

Uçucu külün ince ve küçük boyutta olması nedeni ile zemin tanecikleri arasındaki boşlukları doldurarak, zeminin dayanımını arttırması beklenmektedir.

Çimento içerisine %15 UK katkılı enjeksiyon karışımları ile hazırlanan kolonların, yarmada çekme dayanımı istenildiği gibi arttırmıştır.

Uçucu kül ile oluşturulan kolonların normal dayanımlar beklenen artış değerlerini sağlayamasa da yarmada çekme dayanımın ve çimentonun reolojik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Bu durum uçucu külün katkısının daha etkili olabilmesi için, daha yüksek oranda kullanılması gerektiğini ya da daha yüksek s/ç oranlarında karışımların hazırlanması gerektiğini göstermektedir. Yüksek su/çimento oranında istenen mukavemet değerleri sağlayamama problemleri ortaya çıkabilir.

5.2. Öneriler

Farklı çimento enjeksiyon harçları ve şerbetleri için oluşturulan kolonlardan; alınan karot örnekleri üzerinde yapılan deneylerde, dayanım ve deformasyon özellikleri bakımından istenilen bazı davranış özelliği sonuçlarına ulaşamamıştır (bunun sebebinin numune imalatı ve karot alımı sırasında örselenmelerin etkili olduğu düşünülmektedir). Dayanım ve deformasyon özelliğinin küçük boyuttaki numuneler hazırlayarak daha doğru sonuçlar alınacağı düşünülmektedir.

Farklı tipteki çimentolar ve endüstriyel atıklarla yapılacak deneylerden ulaşılabilecek sonuçların, bu çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılması; diğer tezlerin temelini oluşturmasına katkı sağlayacaktır. Özellikle %15 uçucu kül katkılı çimento karışımli enjeksiyonların, daha yüksek su/çimento oranları için çalışmanın genişletilmesi uygun olacaktır.

Ayrıca uçucu külün, ilave oranı ve su/çimento oranları değiştirilerek uzun vadeli dayanımlarının da incelenmesi; uçucu kül katkısının önemini açığa çıkarmada faydalı olacağı uygun görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akan, R. ve Keskin, S. N., 2014, Jet Grout Yönteminin Zemin İyileştirmesine Katkısının ve Bu Yöntemde Kullanılan Parametrelerin Etkilerinin İrdelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18 (2), 22-26.
- Akbulut, S. ve Sağlamer, A., 2003, Daneli Zeminlerde Enjeksiyon Basıncı ve Dane Çapının Enjeksiyon Edilebilirlik Açısından Etkisi, *İMO Teknik Dergi*, 2985-2995.
- Arroyo, M., Gens, A., Croce, P. ve Modoni, G., 2012, Design of Jet Grouting for Tunnel Waterproofing. Proceedings of the 7th International Symp., on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground Viggiani, G. Taylor & Francis, Londra, UK.
- Arslan, E., 2006, Betonun Yarma Dayanımında Geometrik Değişimlerde Boyut Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- ASTM-C42, Standart Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete: ASTM, Pennsylvania, 1-7, 2018
- ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM, Pennsylvania, 1-8, 2018
- ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM, Pennsylvania, 1-5, 2004
- ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM, Pennsylvania, 1-5, 2015
- ASTM C939, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), ASTM, Pennsylvania, 1-3, 2016
- ASTM C940, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, ASTM, Pennsylvania, 1-3, 2016
- ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania, 1-15, 2010
- ASTM D1143, Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, ASTM, Pennsylvania, 1-15, 2007
- ASTM D2166, Standart Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM, Pennsylvania, 1-7, 2016
- ASTM D4253, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, ASTM, Pennsylvania, 1-14, 2016
- ASTM D4254, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight Of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM, Pennsylvania, 1-8, 2006

- ASTM D6913-04, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM, Pennsylvania, 1-38, 2009
- Bakım, M. A., 2006, Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ballarin, L. ve Forti, F., 1998, The Use of Jet Grouting Method for the Stabilization of the Undergrout *Geotechnical Hazards*, Balkema, 485-488.
- Baumann, V., 1984, Das Soilcrete- Verfahren in der Baupraxis, Baugrundtagung- DGEG: 49-83.
- Bell, K., Clemente, R., Gularte, F. ve Lopez, R., 2003, Süperjet grouting reduces foundation settlement for la Rosite Power Plant in Mexicalla. Grouting and ground Treatment, Mexico: 354-364.
- Burke, G. K., 2004, Jet-Grouting Systems: Advantages and Disadvantages, *Geo-Support 2004*.
- Carneiro, F. L. L. B. ve Barcellas, A., 1953, Concrete Tensile Strength. RILEM, Bulletin. 13: 97-123.
- Croce, P., G. Modoni, and G. Russo., 2004, Jet grouting performance in tunnelling. *Proceedings of the Conference on Deep Foundations, Earth-Retaining Structures, Soil Improvement, and Grouting-Geo-Support 2004*, Orlando, FL, September 2003, 910–922.
- Croce, P., Flora, A. ve Modoni, G., 2014, Jet Grouting Technology, Design and Control,
- Çağatay, İ. H. ve Günindi, İ., 2008, Yumurtalık Sugözü Uçucu Külü İçeren Betonların Basınç ve Eğilme Dayanımlarının Arastırılması, *Ç.Ü.Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 213 (1), 265-273.
- Çelik, F. ve Çanakçı, H., 2015, An investigation of rheological properties of cement-based grout mixed with rice husk ash (RHA), *Construction and Building Materials*, 91, 187-194.
- Çetin, S. ve İnce, R., 2017, Küp numunelerin yarmada-çekme dayanımında agrega granülometrisinin boyut değişimi üzerine etkisi, *Dicle Üniversitesi Mükendislik Fakültesi Dergisi*, 8 (3), 443-451.
- Çınar, H., 2014, Jet Grout Yöntemi ve Uygulamaya Yönelik Proje Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Demiral, Ö. T., 2017, Sülfatlı Su İçerikli Kum Zeminlerde Portland Çimentosu ve Sülfata Dayanıklı Çimento Kullanılarak Oluşturulan Jet- Grout Kolonlarının Taşıma Gücüne Sülfatın Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- Demiröz, A., 2009, Uçucu Küllerin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi*, 8 (3), 212-221.
- Demiröz, A., 1992, Zemin İyileştirme Metotları, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Doğanışık, S. K., 2010, Jet Grout Kolondaki Gerilme Dağılımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Durgunoğlu, H. T., Kulaç, H. F., Oruç, K., R. Yıldız, Sickling, J., Boys, I. E., Altugu, T. ve Emrem, C., 2003, "A Case History of Ground Treatment with Jet Grouting Against Liquefaction for a Cigarette Factory in Turkey". Grouting and Grout Treatment, February 2003, New Orleans, USA
- Durgunoğlu, H. T., 2004, Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongre. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Düzceer, R., 2004, Sakhalin Doğalgaz ve petrol İşletme Tesisi Kazık İşleri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Eftelioğlu, M. ve Bowders, J. J., 1992, Permeability Testing of Fly Ash/ Grout Specimens, *Environmental Geotechnology, Rotterdam*, p. 495-501.
- Erdil, B., 2008, Jetgrout Kolonu Tasarım Taşıma Gücü Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Erkan, İ. H., 2013, Jet Grout Kolonların Performansını Etkileyen Faktörlerin Deneysel Olarak Araştırılması, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*
- Ernesto, J. ve Guades, P. D., 2016, Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymers mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio, *Construction and Building Materials*, 127, 484-493.
- Erol, O. ve Bayram, Z. Ç., 2018, Jet Enjeksiyon Yöntemi, Yüksel Proje, Ankara
- Fidan, B., 2015, İnve Taneli Çimentonun Jet Grout Kolonların Performansı Üzerindeki Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Gökdemir, A. Ve Yıldız, K., 2008, Farklı Katkılı Çimento Enjeksiyonunun Düşük Poroziteli Granule Zeminlerde Basınç Dayanımına Etkisi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 23-37.
- Güllü, H., 2016, Comparison of rheological models for jet grout cement mixtures with various stabilizers, *Construction and Building Materials*, 127, 220-236.

- Hausmann, M. R., 1990, Engineering Principles Of Ground Modification, *University of technology, Sydney*, p.
- Hefni, Y., Zaher, Y. A. E. ve Wahab, M. A., 2018, Influence of activation of fly ash on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 172, 728-734.
- Helson, O., Beaucour, A., Eslami, J., Noumowe, A. ve Gotteland, P., 2017, Physical and mechanical properties of soilcrete mixtures: Soil clay content and formulation parameters, *Construction and Building Materials*, 131, 775-783.
- Kanat, A., 2018, Jet Grout Kolonlarının Oluşumu ve Davranışı Üzerinde Çok İnce Taneli Çimento ve Mikro Silika Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Kanat, A. ve Olgun, M., 2018, Investigation of the Rheological Properties of Microfine Grained Cement and Normal Portland Cement with Silica Fume, *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture* 2 (2), 33-43.
- Kauschinger, L., Hankour R. ve Perry, E. B., 1992, Methods to Estimate Composition of Jet Grout Bodies. ASGE GSP: 194-205.
- Kavak, A. ve Mutman, U., 2005, Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin İyileştirilmesi. Deprem Sempozyumu. Kocaeli: 1114-1119.
- Kavak, A., Mutman, U. ve Keskin, E., 2005, Granüler Zeminlerde Çimento Enjeksiyonu. Deprem Sempozyumu. Kocaeli: 1162-1166.
- Kimpritis, T., 2013, The control of column diameter and strength in Jet Grouting processes and the influence of ground conditions, MPhil Thesis, *Imperial College, Department of Civil and Environmental Engineering, London*.
- Kırgız, M. S., 2011, İkameli ve Katkılı Çimento Pastalarının Hidratasyon Bileşiklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Kullanılarak Belirlenmesine İlişkin Literatür Araştırmaları, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14 (1), 73-90.
- Kutzner, C., 1996, Grouting of Rock and Soil, *Balkema, Rotterdam*, p.
- Küçükali, N., 2008, Demiryolu Altyapısının Jet Enjeksiyon Yöntemi ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon*.
- Küsin, C. C., 2009, Jet Grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*
- Lloret, A., Alonso, E. E., Gens, A. ve Suriol, J., 1991, Horizontal load tests on jetgrouted columns. Proceedings XECSMFE. Floransa. 2: 471-474.

- Lunardi, P., 1977, Ground Improvement by Means of Jet-Grouting, *Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford*, 1 (2), 65-86.
- Melegary, C. ve Garassino, A. L., 1997, Seminar on Jet Grouting. CI_Premier Pte. Ltd. Singapore.
- Mollamahmutoğlu, M. ve Avci, E., 2015, Effectiveness of Microfine Portland Cement Grouting on the Strength and Permeability of Medium to Fine Sands, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 319-326.
- Morrison, R. E., 1970, A Review of Ash Specifications. Symposium on Fly Ash Utilization. Pittsburgh: 24-31.
- Okucu, A., 2010, Farklı Endüstriyel Katı Atıkların Çimento Harçlarının Dayanımına Etkisinin Araştırılması, *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (2), 181-186.
- Orhan, E. ve Esen, Y., 2017, Öğütölmüş Atık Cam Tozu Katkılı Betonun Puzalanık Aktivitesi ve Yarmada Çekme Dayanımının Belirlenmesi, *Engineering Sciences (NWSAEs)*, 12 (2), 108-116.
- Önalp, A. ve SERT, S., 2016, Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri, Birsen Yayınevi
- Özbayoğlu, F., 1993, Uçucu Küllerin, Bentonit, Kireç ve Çimento Katkılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonunda Kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu. Ankara: 103-118.
- Özdemir, E., 2006, PÇ ve Mineral Katkı Maddelerinin İkili, Üçlü ve Dörtlü Kombinasyonlarını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Özgan, E., Gökdemir, A., Subaşı, S. Ve Yıldız, K., 2007, Düşük Poroziteli Zeminlerde Mıctocem 900 H Çimento Enjeksiyonu Uygulaması, *International Earthquake*.
- Pastor, J. L., Ortega, J. M., Flor, M., López, M. P., Sánchez, I. ve Climent, M. A., 2016, Microstructure and durability of fly ash cement grouts for micropiles, *Construction and Building Materials*, 117, 47-57.
- Sağlamer, A., Düzceer, R., Gökalp, A. ve Yılmaz, E., 2002, Ground Improvement by Jet Grout Columns for the Foundations of an Automobile Plant in Turkey. Deep Foundations, Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002. Orlando, Florida.
- Savaşkan, T., 1986, Elektron mikroskoplarının Endüstriyel Problemlere Uygulanması, *Karadeniz Üniversitesi Basınevi, Genel Yayın No108*, p.
- Schaefer, V. R., 1997, Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment Developments 1987-1997. Proceedings of Sessions sponsored by the Committee of Soil Improvements and Geosynthetics of Geoinstitute of the ASCE. Geotechnical Special Publication 69.

- Sha, F., Li, S., Liu, R., Li, Z. ve Zhang, Q., 2018, Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass, *Construction and Building Materials*, 161, 282-291.
- Shen, D., Shi, X., Zhu, S., Duan, X. ve Zhang, J., 2016, Relationship between tensile Young's modulus and strength of fly ash high strength concrete at early age, *Construction and Building Materials*, 123, 317-326.
- Sümer, M., 1994, Uçucu Kül Atıkların Beton Üretiminde Değerlendirilmesi. 1. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu. Salihli: 179-185.
- Tan, Ö. Ve Zaimoğlu, A. Ş., 2004, Çimento Enjeksiyonlarında Kullanılan Katkı Malzemelerinin Reolojik Özelliklere Etkilerinin Araştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (2), 275-281.
- Tekin, E. ve Mollamahmutoğlu, M., 2010, Çok İnce Taneli Çimento (Rheocem 900) Enjeksiyonu ile Farklı Gradasyona Sahip Kumların Enjektelerde Edilebilirliği, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25 (3), 533-539.
- Tekin, E., 2004, İnce taneli çimento (Rheocem 900) enjeksiyonu ile değişik gradasyonlu kumların enjektelerde edilebilirliği üzerine deneysel çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- Toktay, M. ve Erdoğan, O., 2009, Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, *Türkiye Çimento Müstahsiller Birliği, Ankara, p.*
- Topçu, İ. B. Ve Canbaz, M., 2001, Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri, *Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 14 (2), 11-23.
- TS 1500, 2000, İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, TSE
- TS 3129, 1978, Betonda yarma çekme dayanımı tayini deneyi (silindir yarma metodu)
- TS EN 12716, 2002. Özel Jeoteknik Uygulamaları- Jet Enjeksiyon, TSE
- TS EN 196, 2009, Çimento Deney Metodları – Bölüm1: Dayanım Tayini, TSE
- TS EN 197-1, 2002, Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – bileşim, özellikler ve uygunluk kriteri, TSE
- Tulga, İ. ve Kılınç, K., 2018, Uçucu Kül Kullanımının Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *Kırklareli University Journal Of Engineering And Science*, 4 (2), 212-236.
- Tunçdemir, F., 2004, Temel Zeminlerinin Enjeksiyon TEknisiyle İyileştirilmesi. Türkiye Mühendislik Haberleri İMO. 430: 59-64.

- Türk, K., Karataş, M. ve Ulucan, Z. Ç., 2006, Farklı Oranlarda F Sınıfı Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Sıkışan Betonun Dayanım Özellikleri, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 18 (4), 513-520.
- Türker, P., Erdoğan, B., Kaynaş, F. ve Yeğınobalı, A., 2009, Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, p. 108.
- Warner, J., 2004, *Practical Handbook of Grouting Soil Rock and Structure*, p. 207-295.
- Xanthakos, P. P., Abramson, L. W. ve Bruce, D. A., 1994, *Ground Control and Improvement*. John Wiley and Sons Inc. New York: 580-592.
- Yılmaz, F., 2016, Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı. 3rd International Symposium on Environment and Morality. Alanya -Türkiye: 1175-1181.
- Zebovitz S., Krizek, R. J. ve Atmatzidis, D. K., 1989, Injection Of Fine Sands With Very Fine Cement Grout, *journal Geotechnical Engineering*, 115 (2), 1717-1733.
- [URL1] <https://www.medramuhendislik.com>
- [URL2] (<https://www.insaatofis.com/jet-grouting-jet-grout-imalati-asamalari.html>)
- [URL3] (<https://www.insaatofis.com/jet-grouting-jet-grout-imalati-asamalari.html>)
- [URL4] (<http://www.zeminarastirma.com/deneyler/kazik-yukleme-deneyi/>)
- [URL5] (<http://www.zeminarastirma.com/referanslar/canakkale-jet-grout-pit-sureklilik-seneyi/canakkale-jet-grout-butunluk-deneyi-pit-1/3/>)
- [URL6] (<http://www.sakingsh.com/skin/saking/DOWNLOAD/DMFC-800.pdf>)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hurşit Battal
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara/1994
Telefon : 0541 966 9410
Faks : -
e-mail : hrstbattal@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Cumhuriyet Anadolu Lisesi, Gelibolu, Çanakkale	2012
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2016
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, Konya	
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016	Mata-Çakır İnşaat	İnşaat Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Geoteknik

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Battal, H. ve Demiröz, A., Uçucu Kül Ve Mikro Taneli Çimento Karışımlarının Jet Grout Kolonlarının Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, Selçuk Teknik Dergi, Cilt17, No:3, 2018