



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**FARKLI ÇİMENTO TİPLERİYLE
OLUŞTURULMUŞ JET GROUT
KOLONLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE
ULTRA SES YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Alican ŞENKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Alican ŞENKAYA tarafından hazırlanan “Farklı imento Tipleriyle Oluşturulmuş Jet Grout Kolonların Mekanik zelliklerinin Belirlenmesi ve Ultra Ses Yöntemiyle İncelenmesi” adlı tez çalışması 05/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

Danışman

Doç. Dr. Murat OLGUN

Üye

Doç. Dr. Zülküf KAYA

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

Bu tez alışması Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 191004007 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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



Alican ŞENKAYA

Tarih: 05.09.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI ÇİMENTO TİPLERİYLE OLUŞTURULMUŞ JET GROUT KOLONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE ULTRA SES YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Alican ŞENKAYA

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

Danışman: Doç. Dr. Murat OLGUN

2019, 133 Sayfa

**Jüri
Doç. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Doç. Dr. Zülküf KAYA**

Bu tez çalışması kapsamında kumlu zeminlerin Jet Grout (JG) yöntemiyle iyileştirilmesinde farklı çimento tiplerinin performansları araştırılmıştır. Kullanılan çimentolar DMFC-800 ince taneli çimento, CEM I 42.5 R normal Portland çimentosu, CEM II 42.5 A-M (P-L) Portland kompoze çimento ve CEM III/ A 42.5 N yüksek fırın cürufu (YFC) katkılı çimentolarıdır. CEM I 42.5 R katkısız, normal Portland çimentosu diğer çimentoların performanslarının yorumlanması için referans çimento tipi olarak seçilmiştir.

Öncelikle çimentoların reolojik özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla Marsh hunisi, Lombardi'nin önerdiği basit plaka kohezyon ölçer, sedimentasyon deneyleri ve Vicat priz süresi tayini deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen veriler ışığında çimento enjeksiyonlarında kullanılacak su/çimento (S/Ç) oranlarına karar verilmiştir. Enjeksiyon oranlarının belirlenmesinin ardından küçük ölçekli silindirik numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelere 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda numuneler üzerinde serbest basınç deneyi (UCS), yarmada çekme deneyi (STS) ve yalnızca 56 günlük kür süresinin sonunda geçirimsizlik testleri uygulanmıştır.

Küçük ölçekli deneylerin yanı sıra laboratuvar ortamında kurulmuş olan model JG teçhizatı kullanılarak büyük variller içerisinde model JG kolonları oluşturulmuştur. Büyük ölçekli deneylerde küçük ölçekli deneylerle aynı S/Ç oranları kullanılmıştır. Bu büyük ölçekli kolonlardan 90 günlük kür süresinin sonunda karot numuneleri alınarak UCS deneyi, STS deneyi, geçirimsizlik ve ultra ses dalga iletim hızı (UPV) testleri uygulanmıştır. Ayrıca dayanım testlerinden seçilen numunelerden örnekler alınarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizleri yapılmıştır.

Yedi günlük kür süresi sonunda yapılan dayanım testlerinde en iyi sonuçlar DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerden elde edilmiştir. CEM II ve CEM III katkılı çimentoları klinkere ikame katkıları içerdiklerinden kısa dönemde düşük performans göstermişlerdir. Katkılı çimentolar 28 günlük kür süresi sonunda CEM I çimentosundan daha iyi performans göstermişlerdir. CEM II ve CEM III çimentoları 56 günlük kür süresinin sonunda ince taneli çimentonun sonuçlarından daha iyi sonuçlar vermişlerdir.

Büyük ölçekli kolonlardan alınan karot numunelerinin performansında çimento enjeksiyonlarının reolojik özellikleri sonuçlar üzerinde etkili olmuştur. Enjeksiyonun reolojik özellikleri zemine nüfuz etme kabiliyetini etkilemiş ve küçük ölçekli numunelerin sonuçlarına göre farklılıklar ortaya çıkmıştır. UPV test sonuçları dayanım ve geçirimsizlik test sonuçlarıyla büyük ölçüde uyumluluk göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento enjeksiyonu, Jet Grout yöntemi, ince taneli çimento, geçirimsizlik deneyi, mekanik özellikler, UPV (Ultra ses dalgası iletim hızı) yöntemi



ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF JET GROUT COLUMNS CONSTRUCTED BY USING DIFFERENT CEMENT TYPES AND INVESTIGATION WITH ULTRA SOUND METHOD

Alican ŞENKAYA

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Murat OLGUN

2019, 133 Pages

Jury
Assoc. Prof. Murat OLGUN
Prof. Mustafa YILDIZ
Assoc. Prof. Zülküf KAYA

In this thesis, the performance of different cement types in the improvement of sandy soils by Jet Grout (JG) method was investigated. The cements used are DMFC-800 fine grain cement, CEM I 42.5 R normal Portland cement, CEM II 42.5 A-M (P-L) Portland cement and CEM III / A 42.5 N blast furnace slag (YFC) admixtured cements. CEM I 42.5 R normal Portland cement (without additives) was selected as the reference cement type for the interpretation of the performance of other cements.

First of all, rheological properties of cements were determined. For this purpose, Marsh funnel, simple plate cohesion meter suggested by Lombardi, sedimentation tests and Vicat setting time tests were performed. In the light of the data obtained from these experiments, the water / cement (W/C) ratios to be used in cement injections were decided. After determining the injection recipes, small scale cylinder samples were prepared. These samples were subjected to unconfined compressive strength (UCS), splitting tensile strength test (STS) at the end of the cure times of 7, 28 and 56 days. Permeability tests subjected after 56 days of cure time.

In addition to small scale experiments, model JG columns were formed in large barrels by using model JG apparatus installed in the laboratory. The same W/C ratios were used in large-scale experiments as in small-scale experiments. At the end of the 90-day curing period, core samples were taken from these large-scale columns and unconfined compressive strength test, splitting tensile strength test, permeability test and ultrasonic pulse velocity (UPV) test were applied. In addition, scanning electron microscopy (SEM) image analyzes were performed from samples selected from strength tests.

The highest strength results were obtained at the end of 7 days of cure time from samples prepared with DMFC-800 cement. CEM II and CEM III admixtured cements showed lower strength at the end of 7 days of cure time as they contain clinker substitutes. Admixtured cements performed better than CEM I cement after 28 days curing period. CEM II and CEM III cements showed higher strength results than fine-grained cement after 56 days of curing.

The rheological properties of cement injections were effective on the results of the performance of core samples taken from large scale columns. The rheological properties of the injection affected the ability to penetrate the soil, and there were differences according to the results of small-scale samples. The UPV test results were substantially parallel to the strength and permeability test results.

Keywords: Cement injection, Jet Grout method, fine grained cement, permeability test, mechanical properties, UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

ÖNSÖZ

Bu zorlu süreçte hep yanımda olan aileme ve sevgili eşime sevgilerimle. Yol göstericiliği ve katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat OLGUN hocama, deneysel ve teorik çalışmalarındaki katkılarıyla tez çalışmamın ortaya çıkmasındaki yardımlarından dolayı İnşaat Yüksek Mühendisi Hurşit BATTAL' a ve Arş. Gör. Ekrem Burak TOKA' ya teşekkürü borç bilirim.

Alican ŞENKAYA
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAM VE LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Jet Grout Yöntemine Genel Bakış	3
2.1.1. Jet Grout Teçhizatı ve Uygulama Esasları	5
2.2. Ultra Ses Dalgalarının Kullanımına Genel Bakış.....	10
2.3. Literatür Özeti	15
3. MALZEME VE YÖNTEM	25
3.1. Malzeme	25
3.1.1. Kumlu zemin	25
3.1.2. Çimento	27
3.2. Yöntem.....	30
3.2.1. Çimento enjeksiyonlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi	30
3.2.2. Küçük ölçekli numunelerin hazırlanması.....	39
3.2.3. Büyük ölçekli model Jet Grout kolonlarının oluşturulması	40
3.2.4. Oluşturulan JG numunelerinden karot numunelerinin alınması.....	45
3.2.5. Serbest basınç deneylerinin yapılması	46
3.2.6. Yarmada çekme dayanımı deneylerinin yapılması.....	48
3.2.7. Geçirimlilik deneylerinin yapılması	49
3.2.8. Taramalı elektron mikroskopu görüntü analizlerinin yapılması.....	52
3.2.9. Ultra ses dalga hızı testlerinin yapılması.....	54
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	57
4.1. Enjeksiyon Karışımlarının Reolojik Özellikleri.....	57
4.1.1. Marsh hunisi akış zamanı sonuçları	57
4.1.2. Lombardi plaka kohezyon ölçer deneyi sonuçları	59
4.1.3. Sedimentasyon deneyi sonuçları.....	65
4.1.4. Vicat iğnesi ile belirlenen priz başlangıç ve bitiş süreleri.....	68
4.1.5. Enjeksiyon reolojik özelliklerinin büyük ölçekli JG kolonlarının oluşumuna etkisi.....	70
4.2. Serbest Basınç ve Yarmada Çekme Deney Sonuçları	75
4.2.1. Küçük ölçekli numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları.....	75
4.2.2. Küçük ölçekli numunelerin yarmada çekme deneyi sonuçları.....	83

4.2.3. Büyük ölçekli model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçları.....	94
4.2.4 Büyük ölçekli model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin yarmada çekme deneyi sonuçları.....	99
4.3. Geçirimsizlik Deneyi Sonuçları.....	102
4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntü Analizleri.....	107
4.5. Ultra Ses Dalgası İletim Hızı Test Sonuçları	113
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	119
5.1. Sonuçlar	119
5.2. Öneriler	124
KAYNAKLAR	126
ÖZGEÇMİŞ.....	132



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

MPa	: Mega Pascal
kPa	: Kilo Pascal
kN	: Kilo Newton
mm	: Milimetre
km	: Santimetre
m	: Metre
dk	: Dakika
D_r	: Rölatif Sıkılık
e	: Boşluk Oranı
e_{max}	: Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	: Minimum Boşluk Oranı
σ_{STS}	: Çekmede Yarma Gerilmesi
q_u	: Serbest Basınç Mukavemeti
P_{max}	: Kırılma Yüğü
A_f	: Kırılma Anındaki En Kesit Alanı
A_0	: Numunenin İlk En kesit Alanı
ϵ	: Birim Deformasyon
C_u	: Üniformluk Katsayısı
C_c	: Derecelenme Katsayısı
μ	: Dinamik Viskozite
τ_0	: Sıvının Akma Gerilmesi
k	: Geçirimsizlik Katsayısı
γ_s	: Zeminin Birim Hacim Ağırlığı
γ_k	: Zeminin Kuru Birim Hacim Ağırlığı
SO_3	: Sülfür Trioksit
Cl	: Klor
MgO	: Magnezyum Oksit

Kısaltmalar

UCS	: Unconfined Compressive Strength
STS	: Splitting Tensile Strength
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity
JG	: Jet Grout
S/Ç	: Su/Çimento
SEM	: Scanning Electron Microscope
C-H	: Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
R^2	: Determinasyon katsayısı
R^2_{adj}	: Düzeltilmiş determinasyon katsayısı

1. GİRİŞ

İnsanlığın yapılar inşa etmeye başladığı günden bu yana istenen taşıma performansını sağlamayan zeminler için çözümler üretilmeye çalışılmıştır. Bazı eski çağ yapılarında yapı temeli etrafına kuyular açılarak; zeminden su çekmek suretiyle zemin suyu seviyesinin düşürüldüğü tespit edilmiştir. Mimar Sinan'ın zemine ahşap kazıklar çaktırdığı, Venedik'te bulunan su içinde temelleri olan yapıların da ahşap kazıklar üzerinde durduğu bilinmektedir. Romalılar binalar ve yolların altına farklı fraksiyonlarda kırma taş dolguları yaparak temel ve alt temeller teşkil etmişlerdir. Modern mühendisler günümüzde ilerleyen teknolojiyle birlikte büyüyen binalar veya yer altı yapılarının inşasını mümkün kılmak için taşıyıcı zeminin mühendislik özelliklerini geliştirmenin yollarını aramaktadırlar. Zeminlerde geliştirilmesi hedeflenen başlıca hususlar; sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde sıvılaşmayı önlemek, aşırı oturmaları önlemek, zeminlerin taşıma gücünü ve kayma mukavemetini artırmak, su yapılarının temelleri ya da kirli atıkların bulunduğu bölgelerde kirliliğin yayılmasını önlemek amacıyla sıvı geçirimsizliğini azaltmaktır. Bu amaçlar için derin temeller, ankrajlar, betonarme ya da palplanş perdeleri gibi çözümlerin yanı sıra zemin iyileştirme teknikleri kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme teknikleri yukarıda sayılan pek çok durumda betonarme ya da çelik yapı elemanlar kullanılan yöntemlerin işlevini görebilmekte ya da bu yöntemlerin maliyetlerinin azaltılması amacıyla kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında zemin iyileştirme tekniklerinden Jet Grout (JG) yöntemi üzerinde durulmuştur. Jet grout yöntemiyle zemin iyileştirme yöntemi dünya genelinde artarak kullanılmakta ve kabul görmektedir. Jet grout teknolojisinin ilk tescilli kullanımı İngiltere'deki 1950'lere kadar uzanmaktadır. Bir dizi teknolojik atılımla birlikte bu teknik yavaş yavaş gelişmiştir ve sayısız avantajları nedeniyle dünya çapında popüler hale gelmiştir. Uygulama alanları; hemen her tür zemini ve hatta belirli tipte yumuşak kayalar kapsamaktadır. Jet grout yöntemi, basit anlamda çimento harcının zemine yüksek basınçla enjekte edilmesi işlemidir. Zemine verilen su-bağlayıcı karışımı yüksek basınç sayesinde zemini örselemekte ve zeminle birlikte yoğurulmaktadır. Jet grout yönteminde son yıllarda yenilik ve ilerleme gereksinimi doğmuştur ve yapılan çalışmalarla jet enjeksiyonunun saha uygulamaları, jet grout kolonun çapı ve mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi konusunda çok sayıda ilerleme sağlanmıştır.

Saha uygulamalarında ekipman sistemlerine göre üç farklı sistem mevcuttur. Bunlar sırasıyla Jet 1, Jet 2 ve Jet 3 sistemleridir.

Jet grout uygulamasının geliştirilmesi çalışmalarında üzerinde önemle durulan konulardan biri de kullanılan enjeksiyon malzemelerinin geliştirilmesi olmuştur. Bu bağlamda organik enjeksiyonlar, çimentolu enjeksiyonlar gibi çözümler geliştirilmiştir. Organik enjeksiyonlar yer altı sularını kirletici etkisi ortaya çıktıktan sonra yasaklanmış ve ince taneli çimento, puzolan katkılı çimento enjeksiyonları gibi malzemelerin kullanımı artmıştır.

Bu tez çalışmasında DMFC-800 ince taneli çimento, CEM I 42.5 R Portland çimentosu, CEM II /A-M (P-L) doğal puzolan katkılı Portland kompoze çimento ve CEM III / A 42.5 N yüksek fırın cürufu katkılı çimento tipleri kullanılarak kumlu zeminde; küçük ölçekli numuneler ve laboratuvar ortamında büyük ölçekli model JG kolonların oluşturulmasını sağlayan özel bir ekipman kullanılarak büyük boyutlu numuneler hazırlanmıştır. Küçük ölçekli numuneler kumlu zemin – çimento enjeksiyonu karışımının silindir kalıplara doldurulmasıyla hazırlanmıştır. Büyük ölçekli JG kolonlarından ise karot numuneleri alınarak deneyler yapılmıştır. Küçük ve büyük ölçekli numunelerin hazırlanmasında kullanılan çimento enjeksiyonlarının su/çimento (S/Ç) oranlarının belirlenmesi için reolojik özellik deneyleri yapılmıştır. Reolojik özelliklerin belirlenmesi için sedimentasyon ve marsh hunisi deneyleri yapılmış, Lombardi tarafından önerilen basit plaka kohezyon ölçme yöntemiyle enjeksiyon karışımlarının viskoziteleri belirlenmiştir. Bu ön deneylerin sonuçlarına göre numune hazırlanmasında kullanılacak enjeksiyon karışımlarının S/Ç oranları belirlenmiştir.

Küçük ölçekli numuneler kumlu zemin ve enjeksiyon karışımının silindir kalıplara yerleştirilip kür edilmesiyle hazırlanmıştır. Büyük ölçekli JG kolonlarından karot numuneleri alınarak bu numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında numuneler üstünde; serbest basınç deneyi (UCS), yarmada çekme deneyi (STS), geçirimsizlik deneyi ve ultras ses dalga tarama (UPV) deneyleri yapılmıştır. Dayanım deneylerinde kırılan numunelerden örnekler alınarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri mikro yapının sonuçlara etkisi değerlendirilmiştir. Ultra ses dalga hızı verileri ile dayanım, geçirimsizlik sonuçları arasındaki ilişki yorumlanmıştır.

2. KURAM VE LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Jet Grout Yöntemine Genel Bakış

Jet Grout yöntemi zemin iyileştirme yöntemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Günümüze geoteknik mühendisleri tarafından oldukça sık kullanılan ve etkinliği kanıtlanmış olan bu yöntemin günümüzdeki duruma gelmesi, halen devam etmekte olan uzun süredir devam eden teknik gelişmeler dizisinin bir sonucudur. 1962'de Pakistan'da bir baraj inşaatında geçirimsizlik perdesi inşası çalışmaları sırasında yapılan jet enjeksiyon denemesi Mühendislik Uygulamalarında Grout ve Sondaj Çamurları Sempozyumunda tartışılmıştır (Croce ve ark., 2014). Bununla birlikte, jet grouting tekniğinin Japonya'da ortaya çıktığı bilinmektedir (Nakanishi, 1974). Aslında, 1960'ların sonlarında, kaya ve kayaya benzer malzemeleri kesmek için yüksek hızlı jetlerin kullanımı konusundaki deneyimler bir grup Japon uzmana zemin iyileştirme aracı olarak kullanımlarını araştırmak için ilham vermiştir. Zemin içerisinde çimentolaşmış malzeme gövdeleri üretmek amacıyla daha önce delinmiş sondaj deliklerine sıvı bağlayıcıları enjekte etmenin işlevsel olabileceğini öngörmüşlerdir. Takip eden yıllarda, teknik önemli ölçüde gelişmiştir ve şu anda dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Şu anda, jet grouting tartışmasız en yaygın zemin iyileştirme yöntemidir. 1970'li yıllarda enjeksiyon malzemesi olarak kimyasal bağlayıcılar kullanılmış olsa da bu ürünler yerlerini kısa sürede su çimento harçlarına bırakmıştır (Croce ve Flora, 2001).

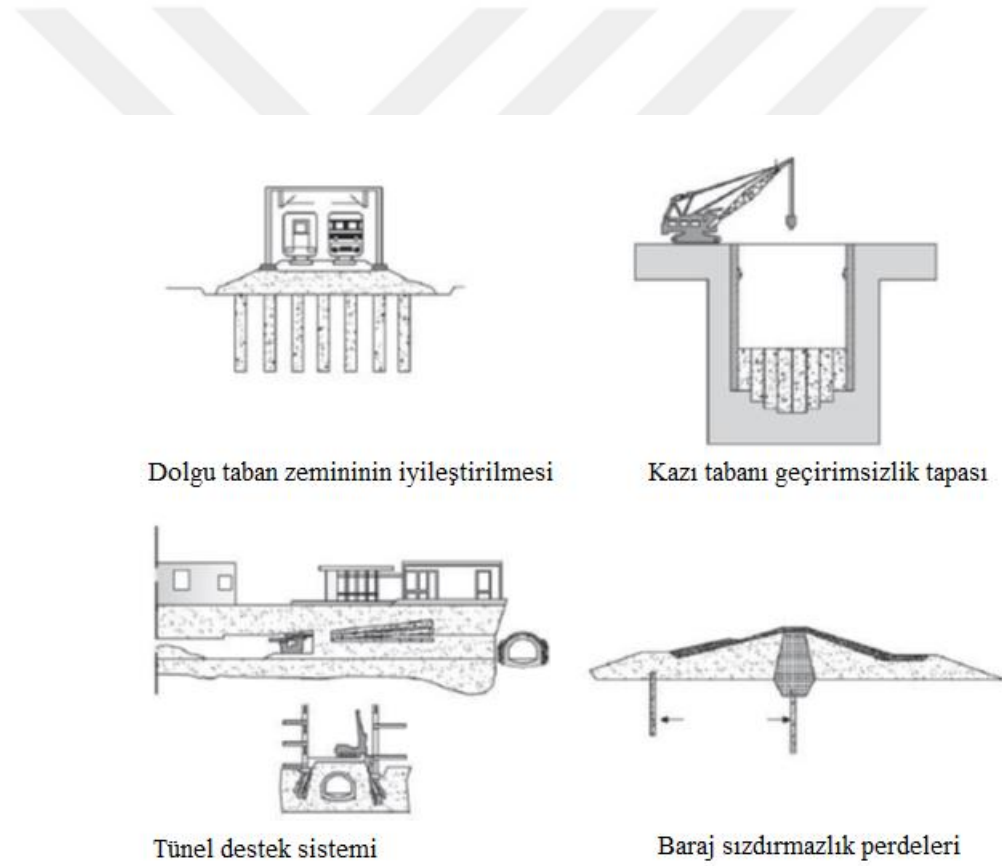
Jet grout yöntemi temel olarak; zemine su-çimento karışımının yüksek basınçta verilmesidir. Çelik bir boru zeminde istenen derinliğe kadar indirilmekte ve borunun ucunda bulunan, boru çapına nispeten oldukça küçük çaplı nozuldan zemine yüksek basınçta su-çimento karışımı (enjeksiyon sıvısı) enjekte edilmektedir. Boru dairesel şekilde dönerek indirildiği derinlikten yukarı doğru çekilir. Yüksek basınç sayesinde enjeksiyon sıvısı zemini örseleyerek daha sıkı bir yapıya kavuşmasını sağlamak ve aynı zamanda zemini çimento enjeksiyonuyla harmanlayarak iyileşmiş bir yapı meydana getirmektedir. Hidratasyon sonucunda zeminin doğal durumuna kıyasla yüksek mukavemetli ve düşük geçirimsizliğe sahip katılaştırmış bir kütle elde edilmektedir. Bu iyileşmiş yapı yöntemin mekanizması gereği zemin içerisinde dairesel kolonlar şeklinde oluşmaktadır. Bu dairesel kolonlara Jet Grout (JG) kolonu denmektedir.

Jet Grout yöntemi dünya çapında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Jet Grout yönteminin tipik kullanım alanları Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Jet Grout yönteminin yaygın şekilde kullanılmasını sağlayan bazı avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Jet Grout ekipmanı forajlı sistemlerin ekipmanlarına göre küçüktür. Bu durum ekipmanın dar alanlarda rahatlıkla kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca büyük makinalara göre daha az yakıt tüketmektedirler.

2. Foraj yapılmadığı için hafriyat aşaması yoktur bu da hem imalatı hızlandırmakta hem de hafriyat atıklarını uzaklaştırma maliyetini ortadan kaldırmaktadır.

3. Kolonlar farklı dizilim planlarında teşkil edilerek çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Geçirimlilik perdeleri, şaftlar vb.



Şekil 2.1. Jet Grout kolonlarının bazı kullanım alanları (Croce ve ark. 2014)

2.1.1. Jet Grout Teçhizatı ve Uygulama Esasları

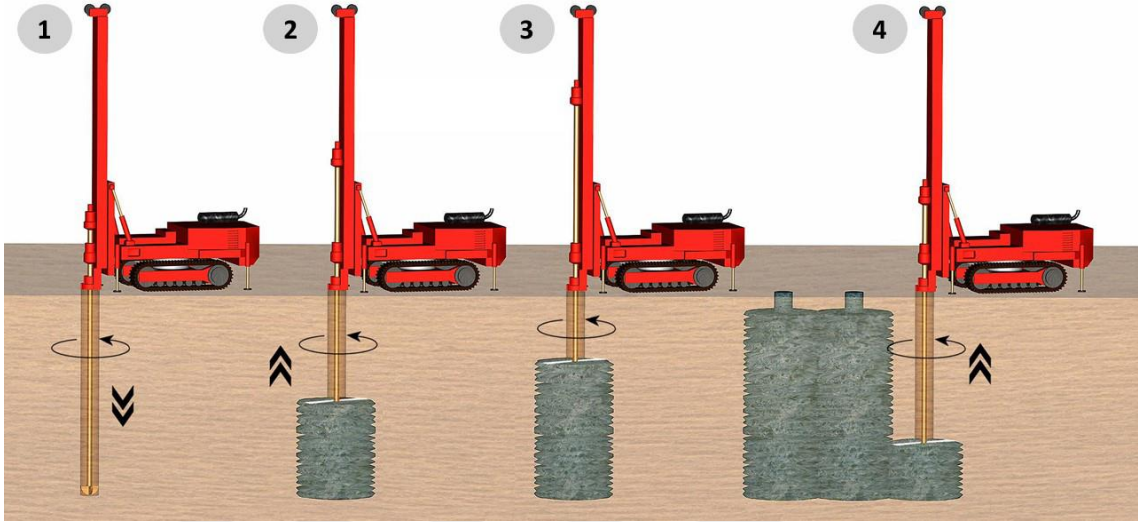
JG kolonlarının oluşturulmasında birbirine eklenmiş çelik borular teknik ifadeyle tijler kullanılmaktadır. Bu tijlerin içerisinde ekipmanın türüne göre tek, çift ya da üç akışkanlı tijin ucundaki nozullara basınçlı bir şekilde gönderildiği iletim boruları bulunur. Tijin ucundaki nozullar borulara nispeten küçük çaplı deliklerdir. Tijin en alt kısmında zemini tijin çapından bir miktar daha büyük olacak şekilde kesen kazıcı uçlar bulunur. JG makinası tiji istenen derinliğe doğru döndürerek kazı işleminin istenen derinliğe kadar gerçekleştirilmesini sağlar. Kazı işlemi tijin aşağı yönde itilmesi ve döndürmesiyle gerçekleştirilir. Delgi çapı genel olarak 120 ila 150 mm arasında değişmektedir. Özel uygulamalarda daha büyük çapta delgiler yapılabilmektedir (Erol ve Çekinmez, 2018).

Kazıcı uçların hemen üzerinde mönitör diye tabir edilen bir çelik tüp yer alır. Monitör üzerinde çapı nozullara göre geniş olan bir açıklık yer alır ve tij istenen derinliğe doğru indirilirken kazı yüzlerinin stabil kalmasını sağlamak için bu açıklıktan sondaj sirkülasyon sıvısı verilir. Sirkülasyon sıvısı tij ile kuyu iç yüzeyi arasındaki halka şeklindeki boşlukta alt uçtan yukarı yönde hareket eder, kazı yüzünün stabil kalmasını ve kazı esnasında zeminden kopan küçük parçaların yüzeye sürüklenmesini sağlar. Sirkülasyon sıvısı olarak su, çimento şerbeti veya köpük gibi malzemeler kullanılabilir. İstenen derinliğe inildiğinde bu açıklık kumanda kontrol panelinden kapatılır ve jet enjeksiyon aşamasına geçilir. Kazı ve jetleme aşamalarının bir arada olması yöntemin hızlı olmasının temel nedeni olarak gösterilebilir. İmalat tijin bir kez indirilip geri çekilmesi sonucunda tamamlanmış olur (Şekil 2.2).

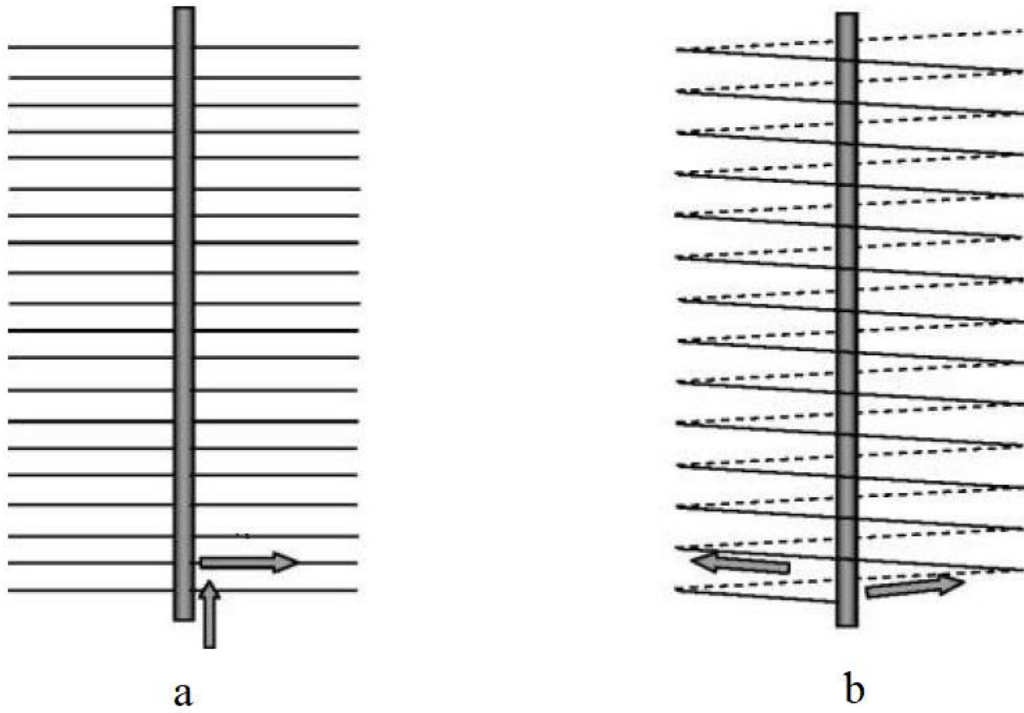
Jetleme işlemine geçildiğinde nozullardan yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu verilmeye başlanır ve tij yukarı yönlü döndürülerek çekilir. Tijin yukarı çekilmesi esnasında kazı yüzlerinden kopan bir miktar zemin sirkülasyon sıvısıyla birlikte yüzeye çıkar. Balçık kıvamındaki bu atık malzemeye spoil adı verilmektedir.

Jet enjeksiyon işlemi boyunca dönme hızı sabit olmaktadır. Tij yukarı yönde sürekli ya da duraklamalı olarak çekilebilmektedir. Duraklamalı yöntemde tij belli mesafe aralıklarında sabit seviyede tutularak jetlemeye devam edilmekte sonra tekrar yukarı çekilmektedir. Duraklama yapılmayan yöntemde ise tij sürekli ve sabit hızlı olarak yukarı çekilmekte ve jetleme işlemi de aralıksız sürdürülmektedir (Şekil 2.3.).

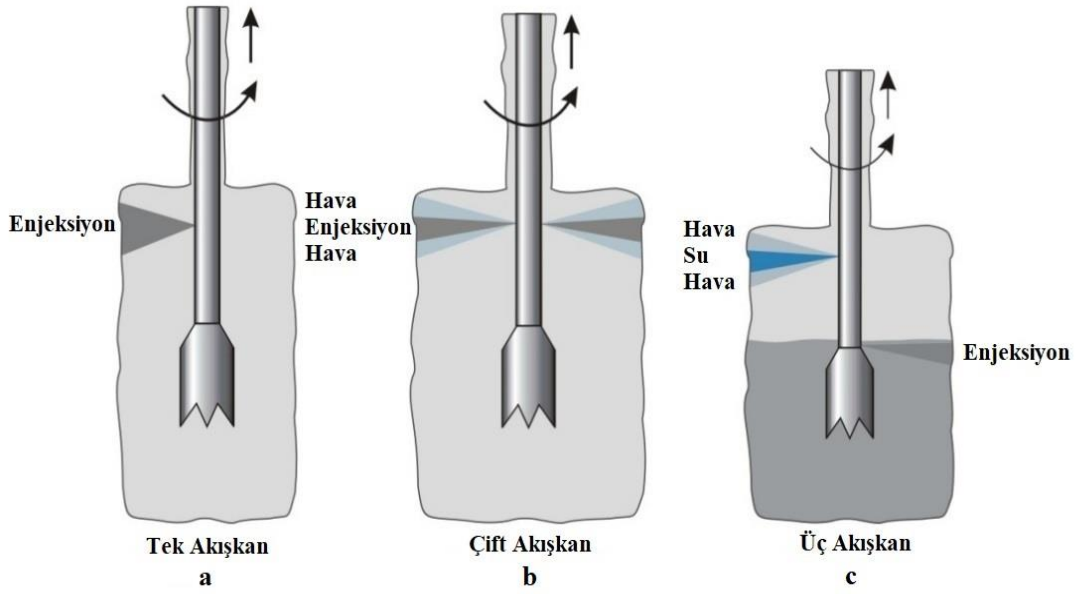
Duraklama yapılmadığında jet kolon yüzeyi spiralli bir formda olmaktadır (Shibazaki, 2003).



Şekil 2.2. Jet Grout kolonlarının imalat aşamaları (railsystem.net).



Şekil 2.3. Tij yukarı çekilirken a) duraklanarak jetleme metodu b) sürekli çekme metodu (Shibazaki, 2003).



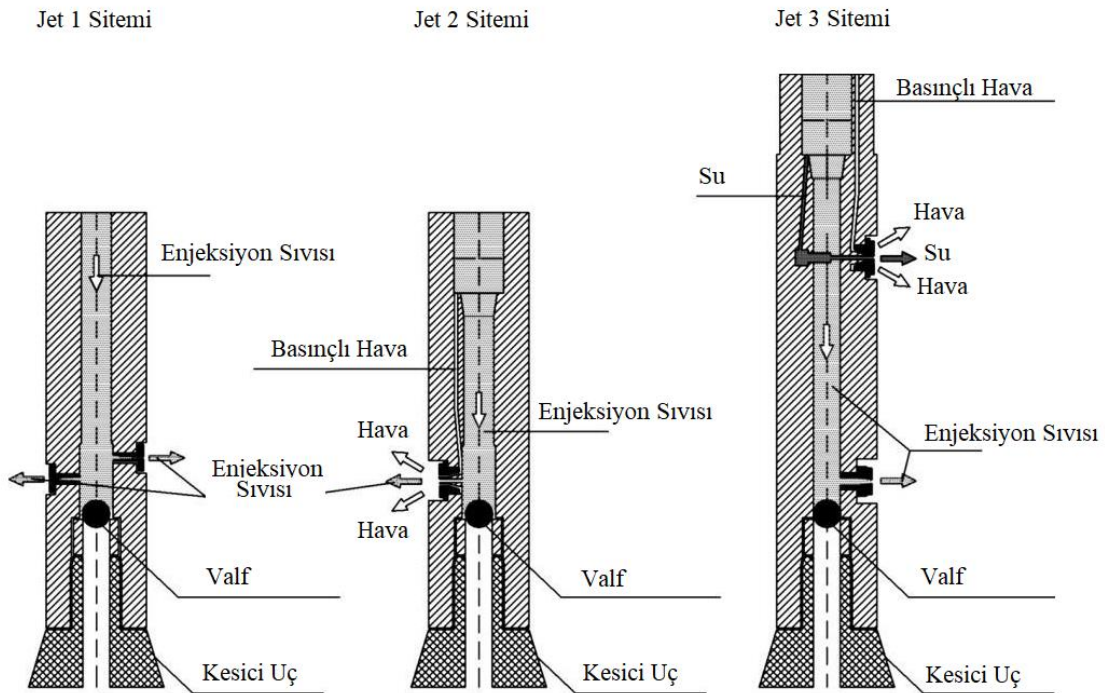
Şekil 2.5. Jet enjeksiyon sistemleri a) tek akışkanlı sistem b) çift akışkanlı sistem c) üç akışkanlı sistem (railsystem.net)

Çift akışkanlı sistem:

Çift akışkanlı sistemde de zemini yırtma ve geveşme işlevi basınçlı enjeksiyon sıvısı vasıtasıyla sağlanır fakat bu sistemde jet grout enjeksiyonu işlemi sırasında enjeksiyon sıvısıyla beraber basınçlı hava da verilmektedir. Sistemin esasları iki adet iç içe geçirilmiş tij takımı kullanılarak basınçlı hava konisi içinden yüksek basınçlı enjeksiyon sıvısının enjekte edilmesidir. Bu sistemde, içteki tij takımından basınçlı enjeksiyon malzemesi, iki tij arasından ise basınçlı hava geçmektedir. Kullanılan 7-12 bar basınçlı hava konisi ile zeminin yırtılma mesafesi artmaktadır. Basınçlı hava zeminin yırtılmasına yardımcı olarak enjeksiyon sıvısının enerji kaybını azaltır ve daha derinlere nüfuz edebilmesini sağlamaktadır (Şekil 2.6). Bu sistemde, kullanılan hava konisi nedeniyle enjeksiyon malzemesinde hapsolmuş havanın bulunması ile mekanik dayanım azalmakta, elde edilen kolon çapı ise hava konisinin aşındırıcı etkisinden dolayı tek akışkanlı sistemde elde edilen kolon çapından %30-70 daha büyük olmaktadır (Lunardi, 1997). Bu sistemde olası nozul tıkanıklıklarını fark etmek için tek nozul kullanımı önerilmektedir (Şekil 2.7). Bu yöntem kohezyonlu zeminlerde tek akışkanlı sisteme göre daha etkilidir. Kullanılan enjeksiyon basıncı 300-900 bar aralığında olmaktadır.

Üç akışkanlı sistem:

Üç akışkanlı sistemde zeminin yırtılması ve gevşetilmesi işlevi enjeksiyon sıvısı tarafından değil enjeksiyon nozulundan daha üstte bulunan nozullardan gönderilen basınçlı su ve hava ile sağlanır. İç içe geçirilmiş üç adet tij kullanılarak yaklaşık 7-12 bar basınçlı hava konisi içinde 300-900 bar basınçlı su jeti ile zeminin yırtılması sağlanır. Eş zamanlı olarak bu su jetinin hemen altında bulunan nozuldan 30-80 bar basınçlı çimento esaslı enjeksiyon malzemesi enjekte edilmektedir (Yağızatlı, 2012). Burada tıpkı iki akışkanlı sistemde olduğu gibi basınçlı havanın görevi basınçlı suyun enerji kaybını azaltmaktır. Bu yöntem ile elde edilen kolonlar 2 m'nin üzerine çıkabilmektedir. Gevşek granüler zeminlerde 2.5m, sıkı zeminlerde ise 1.5m ye kadar kolon çapı elde edilebilir. Aynı su/çimento oranı ve çimento dozajı kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarında, tek akışkanlı sistem kullanılarak oluşturulan kolonun basınç dayanımı çift akışkanlı sistem kullanılarak oluşturulan kolonun mukavemetinden daha yüksek olmaktadır. Bunun durum kullanılan hava konisine bağlanmaktadır. Aynı şekilde üç akışkanlı sistem kullanılarak oluşturulan kolonun dayanımı diğer iki sistem kullanılarak oluşturulan kolonların dayanımından daha düşüktür. Bu durum ise üç akışkanlı sistemde çok miktarda su kullanılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.6. Jet 1, Jet 2 ve Jet 3 sistemlerinin monitör teçhizatlarının detaylı gösterimi (Croce ve erk., 2014)



Şekil 2.7. Jet Grout monitör, delici uç ve nozul ekipmanı (anchordrillingrig.com)

2.2. Ultra Ses Dalgalarının Kullanımına Genel Bakış

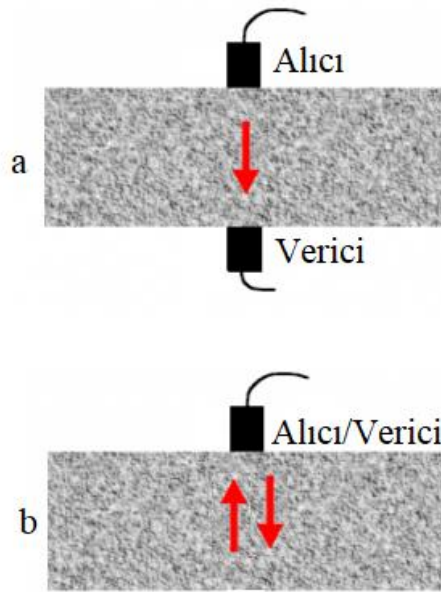
Ultra ses dalgaları yani insan kulağının duyabileceğinden çok daha yüksek frekanstaki ses dalgaları üzerinde ilk araştırma ve yayınları yapan bilim adamı Francis Galton' dur. Galton 1883 yılında yayınladığı kitabında yüksek frekanslı ses dalgalarından bahsetmiştir. Ultra ses dalgaların üretilmesi ve bu dalgaları ölçecek ilk dönüştürücülerin (transdüserlerin) gelişmesi elektronik biliminin de gelişimiyle I. ve II. Dünya Savaşları sürerken yapılan araştırmalarda geliştirilmiştir. Ultra ses dalgaları öncelikle tıp dünyası olmak üzere gelişerek kullanım alanı artmış ve modern teknoloji dünyasında pek çok alanda kullanılmaktadır.

Ultra ses yayılım teorisi ve duyulabilir ses teorisi tamamen aynıdır. Aralarındaki tek fark, ultra seslerin insan kulağı tarafından tespit edilememesidir (Blitz, 1971). Ultra ses testi, ölçümleri için 20 kHz'in üzerinde yüksek frekanslı ses enerjisi kullanılır. Ultra ses dalgası hızlarının ölçümü, bilinen kalınlıkta bir malzemedeki bir dinamik basınç dalgasının (puls/atma) yayılmasına ve ortaya çıkan akustik basınç dalgasının geçiş

zamanının ölçülmesine bağlıdır (Brown, 1997). Dalganın geçiş zamanını ölçtüktan sonra ultra ses dalga hızı, malzemenin kalınlığını geçiş zamanına bölerek hesaplanır.

Tipik bir ultra ses test sistemi bir atma vericisi / alıcısı, dönüştürücü ve gösterge cihazlarından oluşur. Yüksek voltajlı elektrik darbesi, elektronik bir cihaz olan atma verici / alıcı tarafından üretilir. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen ve bu dönüşümün tersini de yapabilen dönüştürücü yüksek frekanslı ultra ses enerjisi üretir. Ses enerjisi, materyallerden dalgalar halinde yayılır. Dalga yolunda bir çatlak gibi bir süreksizlik varsa, enerjinin bir kısmı kusurlu yüzeyden geri yansıtılacaktır. Dönüştürücü, yansıtılan dalga sinyalini elektrik sinyaline dönüştürür ve sinyal görüntüleme cihazları tarafından alınır. Sinyal süreksizlik, boyut, yönelim ve konum bilgisi ve diğer özellikler hakkında bilgi verir (Yaman, 2000; NDT Araştırma Merkezi web sitesi).

Ultra ses dalgalarının hızı iki ölçüm metodu ile belirlenebilir; dalga iletim ve dalga yansıması metodları. İletim metodunda iki dönüştürücü kullanılır; bunlardan biri verici, diğer alıcıdır (Şekil 2.8.a). Öte yandan, dalga yansıması metodunda, atmayı veren ve ayrıca yansıtılan sinyali alan sadece bir dönüştürücü kullanılır (Şekil 2.8.b). Transmisyon sayesinde, oldukça zayıflatıcı yapısından dolayı betonda tercih edilir. Zayıflama, ortamdan geçerken dalganın enerjisindeki azalmadır (Yaman ve ark., 1998).

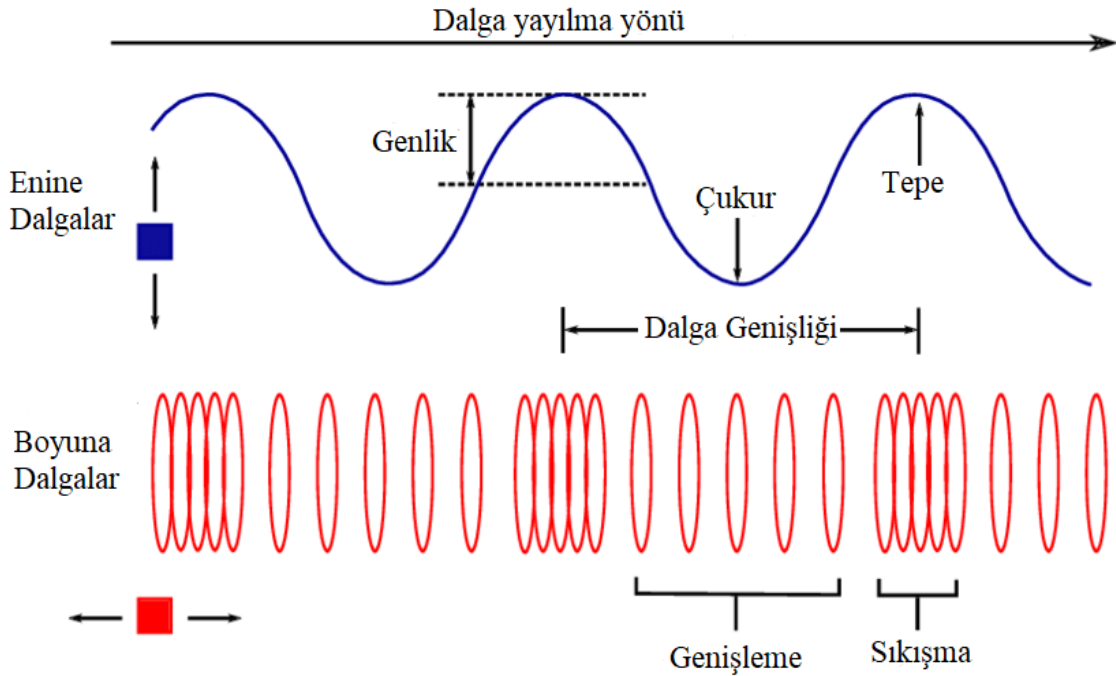


Şekil 2.8. Ultra ses dalgası ölçüm metodları; a) iletim metodu, b) dalga yansıma metodu

Malzemelerin ultra ses dalga yayılım hızı ile incelenmesi, farklı malzeme parçacıklarının salınımlarından oluşan mekanik dalgaların kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Katılarda, ses dalgaları, parçacıkların salınım biçimine bağlı olarak dört ana formda yayılabilir. Bu formlar, boyuna dalgalar, enine dalgalar, yüzey dalgaları (Rayleigh dalgaları) ve ince kütlelerde plaka dalgalarıdır (Lamb dalgaları) (Krautkrämer, 1983; NDT Araştırma Merkezi web sitesi).

Boyuna dalgalarda, bir ortamdaki parçacıklar, dalga yayılım yönüne paralel olarak salınır, yani salınımlar, Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi uzunlamasına doğrultuda gerçekleşir. Bu dalgalara basınç veya sıkıştırma dalgaları da denir, çünkü bunlarda sıkıştırma ve genişletme kuvvetleri etkindir (Krautkrämer, 1983; Szilard, 1982).

Enine dalgalarda, bir ortamdaki parçacıklar dik ve dik bir açıda salınır veya Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi dalga yayılma yönüne çaprazdır. Bu dalgalar yalnızca katılarda yayılabilir, çünkü sıvılar ve gazlar kayma gerilmelerini desteklemez ve bu nedenle kayma dalgaları olarak da adlandırılırlar (Krautkrämer, 1983; Szilard, 1982; Blitz, 1971).



Şekil 2.9. Enine ve boyuna dalgaların teorik görünümü (Pozzi, 2015)

Yüzey veya Rayleigh dalgaları yatay yer değiştirmeye sahiptir ve partiküllerin bir ortamdaki hareketi bir elips şeklindedir. Bu dalgalar, bir sıvı ile katı bir faz arasındaki veya iki katı faz arasındaki ara yüzde meydana gelir (Krautkrämer, 1983). Plaka dalgaları sadece çok ince metallerde yayılabilir. En yaygın kullanılan plaka dalgaları, her zaman yüzeye dik açılarla parçacık salınımının bileşenlerini içeren Lamb dalgalarıdır. Lamb dalgaları iki farklı temel biçimde ortaya çıkar; simetrik veya genişleyen dalga ve asimetrik veya bükülme dalgası. Lamb dalgaları, katı maddelerin yüzeylerinin hemen altındaki laminar kusurların tespiti için kullanışlı bir araçtır (Krautkrämer, 1983; NDT Araştırma Merkezi web sitesi; Blitz, 1971).

Yukarıda belirtilen dalga yayılım formlarının arasında ultra ses yayılma hızı testlerinde en yaygın kullanılan formlar, boyuna ve enine dalgalardır. Bu dalgalar, dalgaların etkisiyle üretilen deformasyonların tamamen elastik olmaları koşuluyla sabit bir hızla düzgün bir malzemeden geçerler. Bu hız, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi uzunlamasına dalgalar için yoğunluk ve elastisite modülüne bağlıdır (Denklem 2.1);

$$V_l = \frac{E}{\rho} \quad (2.1)$$

V_l : Hız

E : Elastisite modülü

ρ : yoğunluk

Kayma dalgası hızı (V_s), izotropik ve homojen malzemelerin bünyesinde kayma modülü G , ile aşağıdaki bağıntıda gösterildiği şekilde ilişkilidir (Denklem 2.2);

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklemlerden de görüldüğü gibi ses dalgaları; atomik parçacıkların kütlesiyle ilişkili malzemenin yoğunluğu ve malzemenin elastiklik durumuyla ilişkili yay sabitlerinin farklı olması nedenleriyle farklı malzemelerde farklı hızlarda hareket eder. (Blitz, 1971; Brown, 1997).

Ultra ses dalga yayılım hızı (UPV) testi ile numunelerin incelenmesini kısaca özetlemek gerekirse, ultra ses dalgalarının numune bünyesinden geçirilerek numunenin fiziksel yapısı hakkında veri elde edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Ultra ses test

cihazı, alıcı ve verici arasında oluşturulan ultra ses dalgalarının numune içerisindeki geçiş süresinin belirlenmesi esasına dayanır. Bu hasarsız yöntem, çok sayıda nokta üzerinden okuma yapılabilmesi, zamandan tasarruf sağlanması açısından tercih edilir.

Ultra-ses dalgalarının numunede yayılma hızları ölçülerek;

- Numunenin homojenliği,
- Numunenin boşluk yapısı,
- Numunede kusur, çatlak vb.

Yukarıdaki maddelerden yola çıkarak test edilen malzemenin dayanımı hakkında veri elde edilebilir.

Bu yöntemin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek faktörler şöyle sayılabilir;

1) Numunenin su içeriği;

Hava kuru numune ile nemli numune arasında ölçüm sonuçları arasında çok büyük farklılıklar vardır. Çünkü nemli numunelerde ses boş gözeneklerden geçmek yerine, bu gözeneklerdeki su zerreciklerinin içerisinden geçer. Sesin sudaki hızı ile havadaki hızı arasındaki büyük fark ölçüm sonuçlarının sapmasına sebebiyet verebilir. Genel olarak, nemli numuneler olduğundan daha fazla ses hızı değeri verirler.

2) Numunenin sıcaklığı;

Ölçümlerin aynı sıcaklık değerlerinde yapılması gerekmektedir. Zorunlu olarak farklı sıcaklık değerlerinde ölçümler yapılmak durumunda ise sesin farklı sıcaklıklardaki hızına göre düzeltme yapılmalıdır.

3) En büyük agrega boyu ve ölçüm mesafesi ilişkisi;

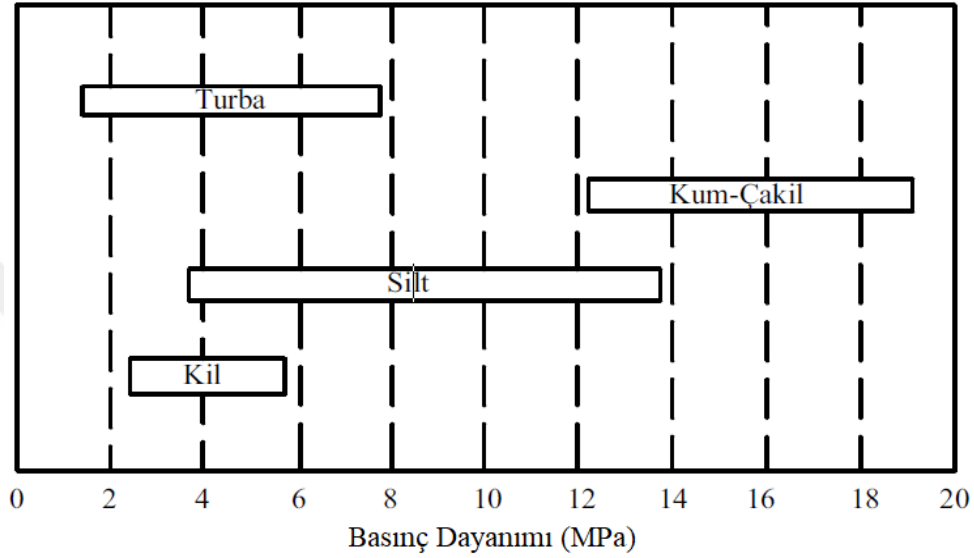
- En büyük agrega boyu 20 mm'den küçük ise en kısa ölçüm mesafesi 100 mm olmalıdır.
- En büyük agrega boyu 40 mm ise en kısa ölçüm mesafesi 150 mm olmalıdır.

2.3. Literatür Özeti

Vipulanandan ve Shenoy (1992) çimento bazlı harçları kullanarak kumlu zeminleri enjeksiyona tabi tutuşlardır. Bağlayıcı tipi olarak çimento, çimento-sodyum silikat, çimento-bentonit, çimento-kalsiyum silikat, çimento silis dumanı ve çimento-uçucu kül karışımlarını kullanmışlardır. Bu bağlayıcı tipleriyle hazırlanan enjeksiyon karışımlarının viskozite, priz süresi, sulanma ve basınç mukavemetini incelemişlerdir. Su/ Bağlayıcı oranı 1,0 olan karışımları kuma enjekte ederek 38 mm çapında 74-90 mm uzunluğunda numuneler elde hazırlamışlardır. Su içerisinde kür edilen numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarını belirlemişlerdir. En yüksek serbest basınç dayanımını çimento karışımı ile iyileştirilmiş numune verirken, silis dumanı kullanılan bağlayıcıyla hazırlanan numunenin serbest basınç dayanımı bentonit ile hazırlanan numunenin serbest basınç dayanımından daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Buna karşılık en fazla sedimentasyon çimento karışımlarında gözlemlenirken diğer karışımların sedimentasyon miktarının daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Hazırlanan numunelerde bentonit içeren numunelerin serbest basınç ve çekme dayanımları diğer numunelere göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Lunardi (1997), Jet Grout uygulaması hakkında kapsamlı bir inceleme yaptığı çalışmasında JG uygulamasının aşırı kohezyonlu zeminler dışında hemen her tür zeminin iyileştirilmesi için kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu tekniğin tabakalı zeminlerde verimli bir şekilde kullanılabildiğini ve bunun önemli bir avantaj olduğunu belirten yazar, yöntemin homojen bir çimentolaşma sağladığını belirtmiştir. İyileştirilmiş zeminlerin kayma mukavemetinin büyük oranda S/Ç oranının ve zeminin tane dağılımının bir fonksiyonu olduğunu belirtmiştir. Yazar, JG yöntemiyle iyileştirilmiş zeminlerin basınç dayanımlarının çakıllı zeminlerde maksimum olduğunu ve ince taneli zeminlere doğru gidildikçe azaldığını saptamıştır. JG yöntemiyle iyileştirilmiş zeminlerde ölçülen maksimum basınç dayanımının kumlu çakıl tipi zeminlerde 50 MPa olarak ölçüldüğünü belirten yazar ince taneli zeminlerde çakıllı zeminlerin onda biri dolaylarında dayanım değerleri ölçüldüğünü belirtmiştir. Tek akışkanlı yöntemle jet grout işlemi uygulanan kumlu ve çakıllı zeminlerin ortalama olarak 12 ila 19 MPa dayanıma ulaştığını belirten yazar ince taneli zeminlerde tek akışkanlı sistem kullanılarak tatmin edici sonuçlara ulaşabilmek için yüksek S/Ç oranlarının seçilmesi gerektiğini vurgulamıştır. İnce taneli zeminlerde tek akışkanlı sistemde 1,2 -1,3 gibi S/Ç oranlarında 2 ila 14 MPa dayanım değerleri elde

edilebildiğini ortaya koymuştur. İnce taneli zeminlerde daha verimli sonuçlar alabilmek için geliştirilen üç akışkanlı sistemde iki akışkanlı sisteme göre daha yüksek dayanım değerleri elde edilebildiğini belirten yazar bunun nedeninin iki akışkanlı sistemde çimentoyla karışan zeminin içerisinde hava boşluklarının kalması olduğunu belirtmiştir. JG ile iyileştirilmiş zeminlerde elde edilen basınç dayanımlarını Şekil 2.10' da verilmiştir.



Şekil 2.10. JG ile iyileştirilmiş zeminlerin basınç dayanımları (Lunardi, 1997)

Zaimoğlu (2003) yapmış olduğu deneysel çalışmada, farklı oranlarda bentonit, silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan enjeksiyon karışımlarının serbest basınç dayanımını, akma özellikleri, dinamik viskozite, çökeltme ve priz sürelerini araştırmıştır. Deneyler için Taguchi yöntemine göre L16 deney tasarım tablosu seçmişlerdir. Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, kullanılan katı ağırlığının %0, %0,5, %1 ve %3' ü oranlarında bentonit, %10, %20, %30 ve %40' ı oranlarında uçucu kül ve %0, %5, %10 ve %20' i oranlarında silis dumanı kullanmışlardır. Hazırlanan enjeksiyon karışımları için 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda serbest basınç, sedimentasyon, Marsh Hunisi, Vicat iğnesi ve dönmeli viskozimetre deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler üç farklı Su/Bağlayıcı (S/B) oranı (0.75, 1.00 ve 1.25) kullanılarak yapılmış olup deney sonuçlarını Taguchi Yöntemine göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda; enjeksiyon karışımlarının serbest basınç dayanımı değişimi üzerinde en etkili parametrenin uçucu kül, en az etkili parametrenin

ise bentonit olduğunu belirlemişlerdir. Priz başlama süresi üzerindeki en etkili parametreler silis dumanı ve uçucu kül olurken, priz bitiş süresi üzerinde ise bentonit ve uçucu külün etkili olduğunu görmüşlerdir. Akma süresi ve çökelme miktarı üzerinde ise en etkili parametrenin silis dumanı olduğunu belirlemişlerdir. Enjeksiyon karışımlarının dayanım, akış özelliği ve kararlılık özellikleri için optimum karışım oranlarını Taguchi Yöntemi ile belirlemiş ve bu oranlar için doğrulama deneyleri yapmışlardır. Ayrıca %10 uçucu kül, %20 silis dumanı ve %3 bentonit, %10 uçucu kül, %20 silis dumanı kullanılarak hazırlanan enjeksiyon karışımlarının; rölatif sıkılığı 0.70, tane çapı aralığı 2-10 mm olan kalıp içerisindeki çakıl örneklerine 1 atmosfer basınç altında enjekte etmişlerdir.

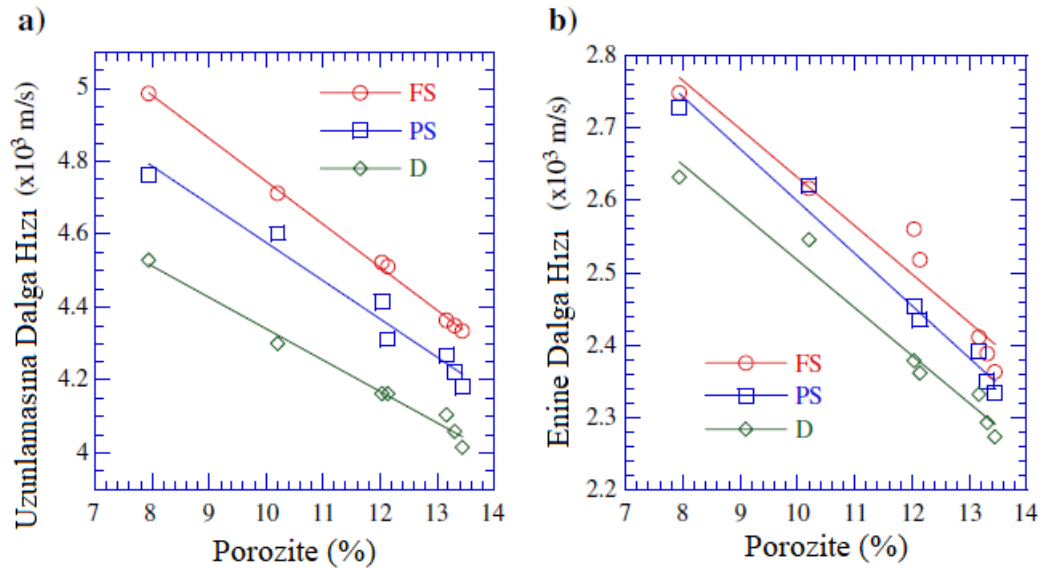
Warner (2004) yayınlamış olduğu çalışmada, enjeksiyon yöntemiyle zemin iyileştirmenin geoteknik mühendisliğinde geniş uygulama alanına sahip olduğunu vurgulayarak uygulama alanlarını şöyle sıralamıştır;

- Su yapılarının çekirdek altı geçirimsizlik perdelerinin teşkil edilmesi,
- Bağlama, baraj, gölet gibi su yapılarında sızmaları kontrol etmek,
- Şev stabilitesinin sağlanması,
- Zeminin kayma mukavemetini artırmak, taşıma gücünü artırmak,
- Farklı oturmaların önlenmesi,
- Tünel geçici destek sistemi olarak kullanılması,
- Ankrajlar köklerinin sabitlemesi,
- Derin kazılarda geçirimsizlik perdesi olarak kullanılması,
- Derin kazılarda yanıl gerilmeleri azaltmak,
- Çevre kirliliğine neden olabilecek atık sahalarında geçirimsizlik elemanı olarak kullanılması,
- Kazıkların taşıma gücünü arttırmak,
- Sıvılaşma riskini azaltmak olarak sıralamıştır.

Lafhaj ve arkadaşları (2006), yaptıkları çalışmada, çimentolu harçların ultra ses parametrelerinin porozite, geçirimsizlik ve su muhtevası ile değişimini araştırmışlardır. Ultra ses parametrelerini; yani darbe hızı (UPV) ve zayıflama (UA), boyuna ve kayma dalgaları için 0,5 ila 1 MHz frekans aralığında geniş bant spektroskopisi kullanılarak ölçmüşlerdir. Geçirimsizlik, sabit basınç gradyanı altında malzemedan kesintisiz bir gaz akışı sağlanarak ölçülmüştür. Porozite, vakum vasıtasıyla

numunenin doyurularak, yerçekimi yöntemiyle elde edilmiştir. Son olarak, tamamen doymuş malzemenin kuruma süresi ayarlanarak su içeriği üç farklı seviyeye (kuru, kısmen doymuş ve tam doymuş) ayarlanmıştır. Ultra ses parametrelerinin fiziksel özelliklere göre gözlenen değişimi yazarlar tarafından şu şekilde belirtilmiştir:

- Ultra ses dalgalarının yayılma hızı, porozite ve geçirimsizlik arttıkça azalmakta, su içeriği arttıkça artmaktadır. Kayma dalga hızı, boyuna dalga hızının yaklaşık yarısı kadardır ve su içeriğine karşı daha az hassas olduğu görülmüştür.
- Zayıflama yani ses dalgalarının enerji kaybı porozite, geçirimsizlik ve su içeriği ile artmaktadır. Kayma dalgası zayıflaması, poroziteye bağlı olarak, boyuna dalga zayıflamasından 2 ila 4 kat daha yüksek olmuştur (Şekil 2.15).



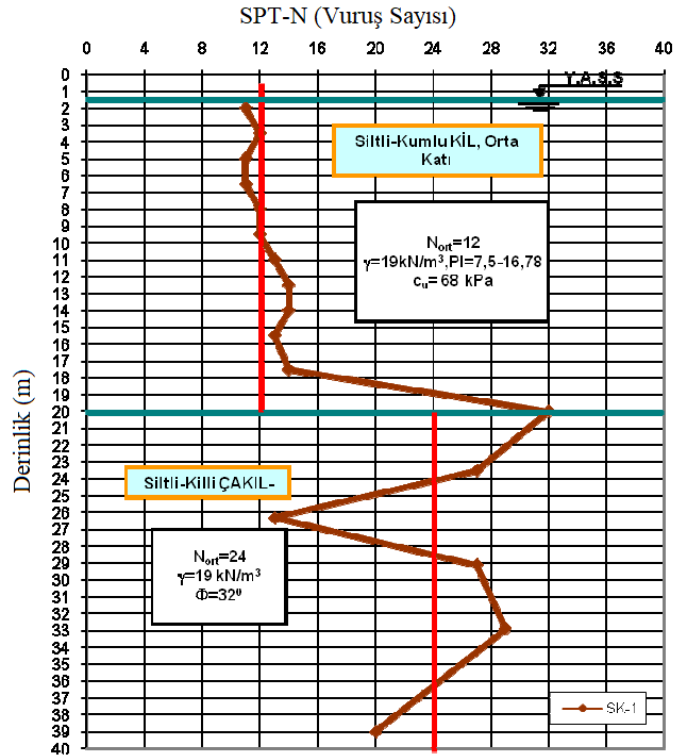
Şekil 2.15. UPV parametrelerinin poroziteye bağlı değişimi a) Boyuna ses dalgaları, b) enine ses dalgaları (Lafhaj ve ark., 2006)

Küçükali (2008), yapmış olduğu tez çalışmasında Ulukışla-Gümüş demiryolu hattında yapılan enjeksiyon yöntemiyle zemin iyileştirme uygulamasını incelemiştir. Demir yolunun problemlili bölgelerinde yapılan sondaj çalışmalarında bölgede kil, silt, kum ve çakıl tabakaları içerisinde anhidrit ve jipslerin bulunduğu belirlendiğini ve yeraltı su seviyesinin yaklaşık 1.0 m'de olduğu belirtmiştir. Sondajda her 1,5 metrede Standart Penetrasyon Testi (SPT) yapılmıştır. Çalışma alanının 4. derecede deprem bölgesinde olduğundan dolayı yerel zemin sınıfı Z2 olarak saptanmıştır. SPT-N değerleri 18 metre derinliğe kadar ortalama 13 olarak verilirken 18 metrenin altında ortalama 24 olarak verilmektedir. Sahadaki problem tespiti, yeraltı suyu akışı nedeniyle bölgede bulunan anhidrit ve jipslerin yıkanarak erimesi ve bu erimenin bölgede zemin

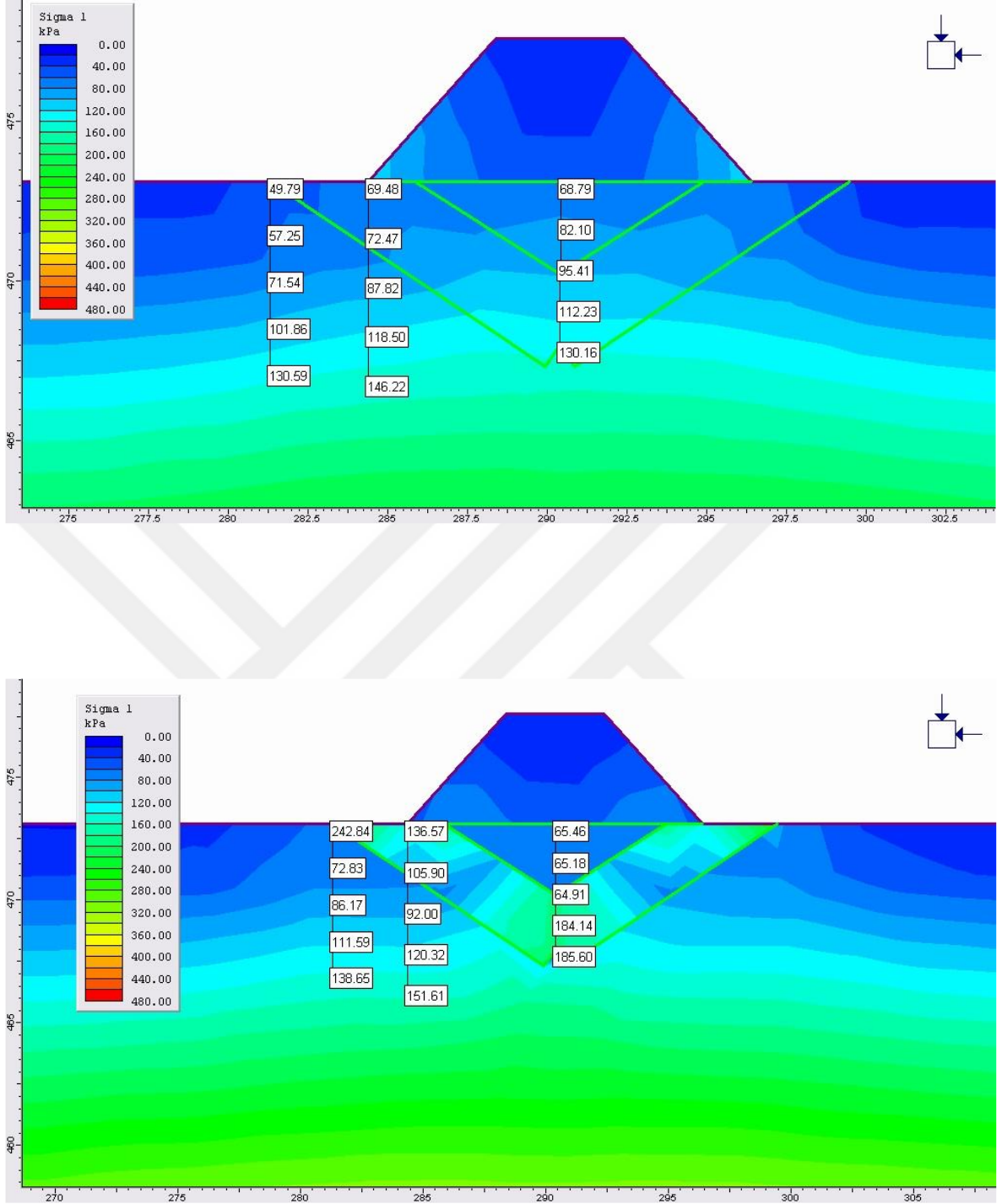
tabakaları arasında boşluklar yaratması ve buna bağlı olarak zeminde ani ve büyük çaplı göçmeler meydana gelmesi olarak yapılmıştır.

Demiryolu hattında 1.000 m'lik kısımda ani göçmeyi önlemek için (V) şeklinde birbirini kesen 80 cm çapında, 125 adet 6-8 m uzunluğunda jet-grout kolon imalatı yapılmıştır. Jet-grout yöntemi olarak, tek akışkanlı Jet 1 sistemi kullanılmıştır. İyileştirme öncesindeki ve sonrasındaki zemin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli için zemin profili Şekil 2.12'deki gibi idealize edilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda iyileştirme öncesi ve sonrasında yer değiştirmelerde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüş ve bu durum yapılan jet enjeksiyonunun yalnızca zemindeki boşlukları doldurmaya yetecek derinlikte yapılmasına ve uygulamanın bölgesel olmasına bağlanmıştır. Şekil 2.13'de verilen sonlu eleman analizinde uygulama sonrası Jet Grout kolonlarında daha yüksek gerilmeler oluştuğu görülmektedir. Yazar yapılan jet-grout uygulamasının temel altı zeminde oluşan göçmeleri engellediğini ortaya koymuştur.



Şekil 2.12. İdealize edilmiş zemin tabakalarına ait mühendislik parametreleri (Küçükali, 2008)

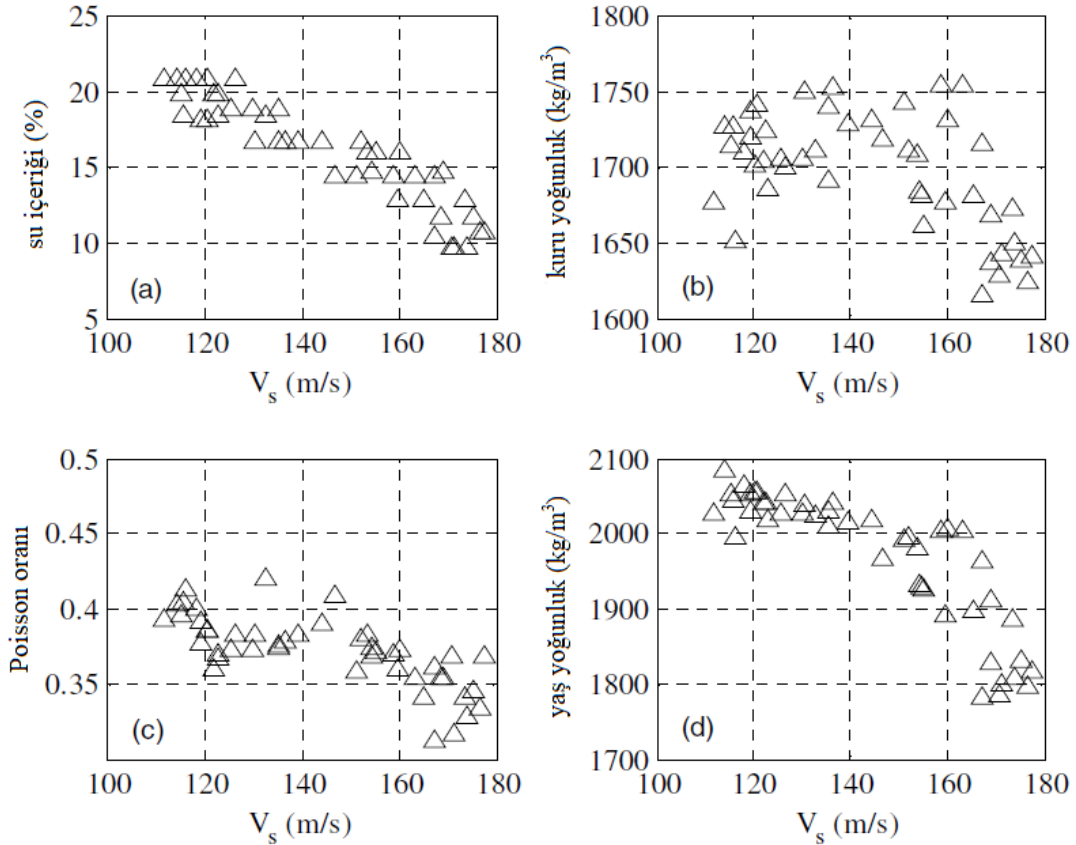


Şekil 2.13. “V” formundan kesişen Jet Grout uygulaması önce ve sonrası geril durumunun sonlu eleman modeli (Küçükali, 2008)

Weidinger ve arkadaşları (2009), yaptıkları çalışmada Mississippi Nehri civarından elde edilmiş, kil oranı %17 olan silt ağırlıklı bir zemin kullanmışlardır. 40 No.’lu elekten eleyerek hazırlanan zemini standart proktor prosedürüne göre çeşitli su muhtevalarında sıkıştırmışlardır. Zeminin optimum su muhtevasını %15, maksimum kuru birim hacim ağırlığını ise $17,1 \text{ kN/m}^3$ olarak tespit etmişlerdir. Su muhtevasının

deney boyunca değişimini engellemek için UPV test cihazı üç eksenli test düzeneği içerisine yerleştirilmiştir.

Araştırmacıların UPV ölçümlerinden elde ettikleri P dalgası hızları 260 m/s ile 390 m/s arasında değişirken, S dalgası hızları da 110 m/s ila 180 m/s değişmiştir. Maksimum kayma dalgası hızları, optimum su muhtevasından daha kuru hazırlanan zemin numunelerinde meydana gelmiştir ve artan nem içeriği ve doğunluk ile kayma dalgası hızları azalmıştır. Test sonuçlarından hesaplanan Poisson oranları, sıkıştırılmış zemindeki su içeriği ile doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiş ve bu da su içeriğine karşı hem P hem de S dalga hızında doğrusal bir eğilim çizgisi vermiştir (Şekil 2.14). Ayrıca, dalga hızına karşı kütle yoğunluğunda grafikler sunmanın, dalga yoğunluğuna karşı kuru yoğunluktan daha net bir eğilim sağladığını vurgu yapılmıştır. Yazarlar çeşitli zeminlerle ilişkili dalga hızları ölçmenin, dinamik yüklenme altındaki bir zemin hakkında önemli miktarda verebileceğinin altını çizmiştir.



Şekil 2.14. Su muhtevası- S dalgası hızı ilişkisi (üstte) ve Poisson oranı S dalgası ilişkisi (Weidinger ve ark., 2009)

Draganovic ve Stille (2011), çimento enjeksiyonlarının kaya çatlaklarına nüfuz edebilirliği ve filtre olma özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar literatürde farklı yöntemler kullanılarak yapılan enjeksiyon nüfuz etme (penetrasyon) kapasitesi ölçümlerini karşılaştırmış ve yöntem birliği olamamasının sağlıklı çıkarımlar yapmaya engel olduğu kanısına varmışlardır. Bu nedenle bir düzenek tasarlayıp imal ederek çimento enjeksiyonlarının nüfuz etme ve filtre olma özelliklerini ölçmüşlerdir. Çimento bazlı enjeksiyon sıvılarının nüfuz edilebilirliğini birçok faktörün etkilediğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, tane büyüklüğü, topaklanma ve hidrasyon, w / c oranı, enjeksiyon basıncı ve daralma geometrisinin penetrasyon kabiliyetini nasıl etkilediği gibi faktörler açıklanmıştır. Çalışmada ANL (ölgül yüzey alanı 310 m²/kg), INJ30 (spesifik yüzey alanı 1300 m²/kg), UF16 (spesifik yüzey alanı 1600 m²/kg) ve UF12 (spesifik yüzey alanı 2200 m²/kg) iri taneliden ince taneliye sıralanmış olmak üzere farklı tane büyüklüğü dağılımlarına sahip dört tip çimento kullanmışlardır. Yazarlar, araştırma metodu olarak farklı parametrelerin etkileri hakkında hipotezler kurmuş ve bu hipotezlerin geçerli olup olmadığı hakkında deney sonuçlarına göre değerlendirmeler yapmışlardır.

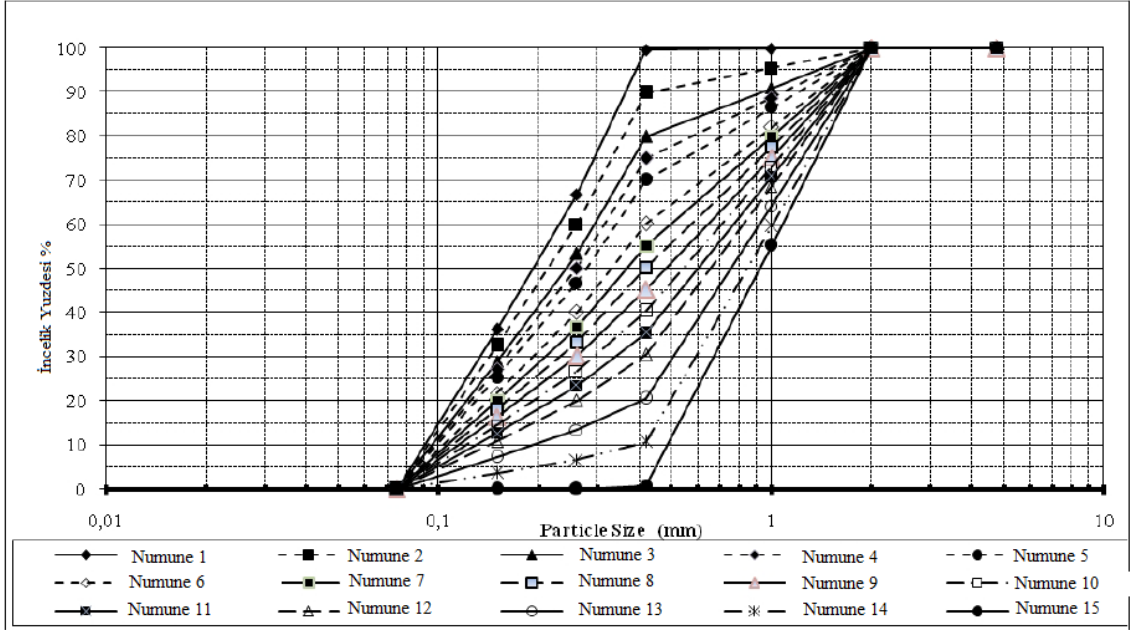
Çimento tane büyüklüğünün penetrasyon kabiliyetine etkisi hakkında, çimentoların öğütülerek ince taneli hale getirilmesinin penetrasyon kabiliyetini ancak belli bir tane büyüklüğüne kadar artıracakını; taneleri daha fazla küçültmenin hızlı priz alma ve topaklanma yüzünden penetrasyon kabiliyetini olumsuz etkileyebileceği hipotezini kurmuşlardır. Araştırmacıların verdiği sonuca göre; INJ30 çimentosuyla S/Ç = 0.6 olacak şekilde hazırlanan enjeksiyon, özel düzencekle alınan ölçümlere göre test edilen enjeksiyonlar arasında en iyi penetrasyon kabiliyetini göstermiştir. Daha ince çimento bazlı enjeksiyonların oldukça zayıf bir nüfuz etme kabiliyeti sergilediğini belirtmişlerdir. Bu zayıf penetrasyon, muhtemelen hipotezde belirtildiği gibi daha yüksek hidrasyon ve topaklanmadan kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Çimento öğütme için optimum d₉₅ tane dağılımı kriterinin 32 ile 16 µm arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Çok ince taneli bir çimento olan UF12' nin biraz daha düşük penetrasyon kabiliyetine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Enjeksiyon basıncı çatlak iç yüzeyinde oluşacak filtre kekini ve muhtemel kemerlenmeyi azaltacağı için penetrasyon kabiliyetini artırmasının muhtemel olduğu öngörmüşlerdir. Deney sonucunda artan enjeksiyon basıncının tıkanma riskini azalttığını ve penetrasyon kabiliyetine olumlu etki yaptığını ortaya koymuşlardır.

Markou ve ark. (2012), kumlu zeminlerde tane dağılımının enjekte edilebilirliğe etkisini normal Portland çimentosu ve ince taneli çimentolar kullanarak araştırmışlardır. CEM II /B-M tipi çimento kullanan araştırmacılar, bu çimentoyu öğütürerek farklı tane dağılımlarına sahip dört farklı çimento elde etmişlerdir. Elde edilen çimentoların maksimum tane büyüklükleri 100 µm, 40 µm, 20 µm ve 10 µm olarak verilmektedir. Her bir çimento için S/Ç oranı 1, 2, 3 olacak şekilde enjeksiyonlar kullanılmıştır. Özel olarak tasarladıkları emdirme tipi enjeksiyon düzeneğinde altı farklı tane büyüklüğü dağılımına sahip kumlu zemini enjeksiyonla iyileştirmişlerdir. Kullanılan altı farklı kumlu zeminin tane büyüklüğü aralıkları; 4mm~2mm, 2mm~1,4mm, 1,4mm~0,71mm, 0,71mm~0,30mm, 0,3mm~0,15mm ve 0,15~0,074 mm olarak verilmektedir. Araştırmacıların verdiği sonuçlara göre çimento tane büyüklüğü azaldıkça enjekte edilebilirlik artmaktadır ayrıca S/Ç oranının artması da enjeksiyon başarısını olumlu etkilemektedir. Kumlu zeminlerde enjeksiyonun başarısında kumlu zemindeki ince tane miktarı (özellikle $D < D_{25}$ aralığındaki miktar) etkin rol oynamaktadır. D_{25} tane büyüklüğünden daha küçük tane miktarının az olduğu yani granülometri eğrisi bir kuyruk formuyla biten zemin tiplerinde başarılı enjeksiyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi oldukça mümkündür.

Mollamahmutoğlu ve Avcı (2015), yaptıkları çalışmada Ultrafin12 ince taneli çimentosunun farklı S/Ç oranlarındaki enjeksiyon karışımlarının viskozite, stabilite ve priz süresi gibi özelliklerini incelemiş ve bu farklı oranlardaki karışımları %30 rölatif sıklıkta fakat farklı tane dağılımına sahip kumlu numunelerin enjeksiyonunda kullanmışlardır. Kumlu zemini eleyerek farklı tane büyüklüğü aralıklarına ayırmış ve kontrollü olarak 15 farklı tane dağılımına sahip kum numunesi hazırlamışlardır. Kum numunelerinin tane dağılımı Şekil 2.11.'de verilmiştir.

Araştırmacılar çimento enjeksiyonlarının reolojik özelliklerini incelerken 0,8 ila 4,0 arasında değişen W/C oranları kullanmışlardır. S/Ç oranı arttıkça enjeksiyon karışımları stabilitesini kaybetmekte, priz süreleri artmakta ve viskozite değerleri düşmektedir. Farklı S/Ç oranlarındaki enjeksiyonlarla on beş farklı tane dağılımına sahip kumlu numuneye enjeksiyon işlemi uygulamışlardır. S/Ç oranı arttıkça enjeksiyonların penetrasyon kabiliyeti artarken; zemin numunesindeki ince tane oranının artmasıyla enjeksiyonun penetrasyon kabiliyetinin azaldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.11. Hazırlanan kumlu zemin numunelerinin tane dağılımı (Mollamahmutoğlu ve Avcı, 2015)

Enjeksiyonla iyileştirilen numuneler aynı zamanda serbest basınç deneyi ve geçirimsizlik deneylerine tabi tutulmuştur. S/Ç oranı arttıkça serbest basınç dayanımının düştüğünü ayrıca zemin içeriğindeki ince kum miktarındaki artışın da serbest basınç dayanımını düşürdüğünün kaydetmişlerdir. Numuneler düşen seviyeli geçirimsizlik testine tabi tutmuşlardır. Numuneler iki ay boyunca teste tabi tutulduğunu ancak su seviyesinde değişme gözlenmediğini belirtmişler ve dolayısıyla numunelerin geçirimsiz olduğunu ortaya koymuşlardır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Bu tez çalışması kapsamında kumlu bir zeminde dört farklı tipte çimento kullanılarak Jet Grout yöntemiyle zemin iyileştirme yapılmıştır. Kullanılan malzemeler özetle; kum, CEM I 42.5, CEM II 42.5, CEM III 42.5 ve DMFC-800 ince taneli çimentosudur. Malzemelerin özellikleri ve malzemeler üzerinde yapılan tanımlama deneyleri aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Kumlu zemin

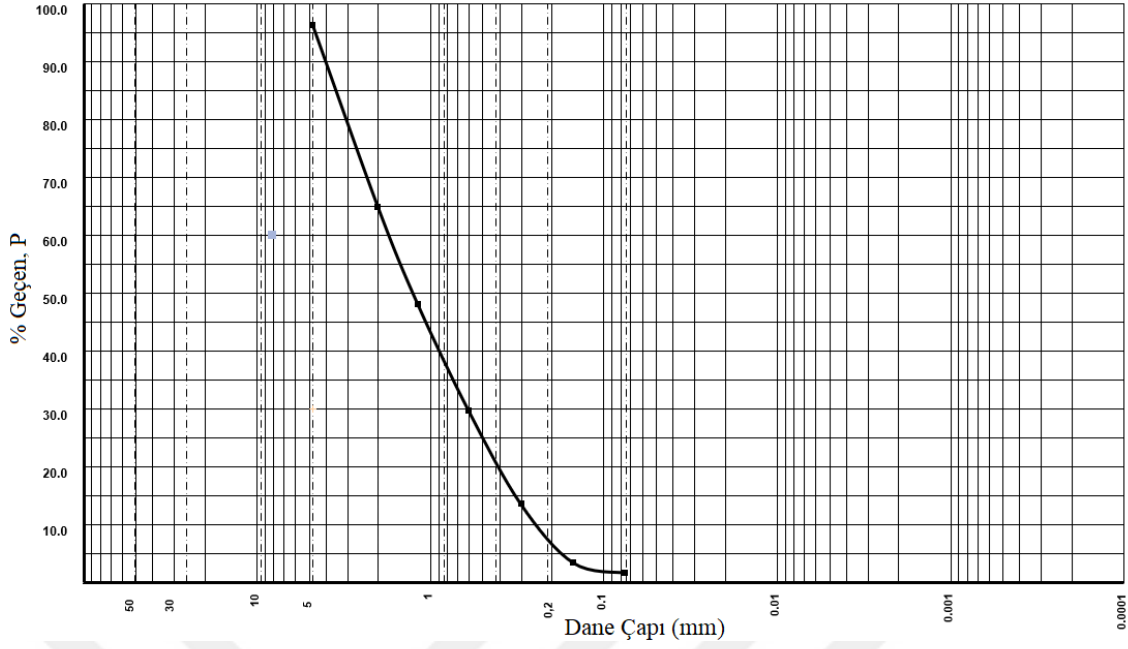
Çalışmalarda kullanılan kumlu zemin Konya ili, Selçuklu İlçesine bağlı Eğribayat Mevkiinde bulunan doğal kum ocaklarından temin edilmiştir. Yuvarlak tane yapısına sahip kum üzerinde yapılan elek analizi sonucu aşağıda verilmiştir (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Elek analizi ASTM D6913-04 standardına göre yapılmıştır.

Yapılan elek analizi sonucu kumlu zeminin bileşenleri;

- %3.75 çakıl,
- %94.5 kum,
- %1.72 silt + kil olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.1. Elek analizi deneyinin yapılması



Şekil 3.2. Kumlu zeminin granülometri eğrisi

Çizilen granülometri eğrisine göre kumlu zeminin;

- Üniformluk katsayısı $C_u = 6,8$
- Derecelenme katsayısı $C_c = 0,84$ olarak hesaplanmıştır.

USCS sınıflandırma sistemine göre kumlu zeminin sınıfı SP yani kötü derecelenmiş kum olarak belirlenmiştir.

Kumlu zeminin tane birim hacim ağırlığını belirlemek için piknometre deneyi yapılmıştır. Piknometre deney sonucuna göre zeminin tane birim hacim ağırlığı γ_s ; 26,6 kN/m^3 olarak bulunmuştur. Piknometre deneyi ASTM D854 standardına göre yapılmıştır.

Zeminin sıkılık durumuna göre maksimum ve minimum birim hacim ağırlıkları ve bunlara bağlı olarak hesaplanan boşluk oranları Çizelge 3.1.' de verilmiştir. Maksimum ve minimum boşluk oranları sırasıyla ASTM D4253 ve ASTM D4254 standartlarına göre belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Zeminin sıkılık parametreleri

$\gamma_{k,\min}$ (kN/m^3), zeminin en gevşek durumda birim hacim ağırlığı	1,55
$\gamma_{k,\max}$ (kN/m^3), zeminin en sıkı durumda birim hacim ağırlığı	1,98
e_{\min} , minimum boşluk oranı	0,34
e_{\max} , maksimum boşluk oranı	0,72

3.1.2. Çimento

Jet Grout yönteminin uygulama başarısını artırmak için üzerinde çalışılan ve hala geliştirilmeye devam eden yöntem elemanlarından biri ve belki de en önemlisi enjeksiyon sıvısıdır. Enjeksiyon sıvısının geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar tekniğin kullanılmaya başlandığı zamandan beri devam etmektedir. Bu bağlamda çeşitli kimyasal organik enjeksiyonlar, farklı özellikteki çimentolu enjeksiyonlar gibi çözümler geliştirilmiştir. Organik enjeksiyonlar yer altı sularını kirletici etkisi ortaya çıktıktan sonra yasaklanmış ve ince taneli çimento, puzolan katkılı çimento enjeksiyonları gibi malzemelerin kullanımını artmıştır.

İnce taneli çimento enjeksiyonlarıyla diğer enjeksiyon türlerine göre daha düşük maliyetle yüksek dayanımlar elde edilebilmektedir (Zebovitz ve ark., 1989). Ayrıca ince taneli çimento enjeksiyonlarında, eski tip kimyasal enjeksiyonlar gibi zamanla dayanım kaybı problemi gözlenmemektedir (Mollamahmutoglu, 2003). Günümüzde uygulamada genel olarak CEM I 32.5 N tipi Portland çimentosu kullanılmaktadır (Erol ve Çekinmez, 2018).

Bu tez çalışmasında piyasada dolaşımda olan CEM I 42.5 R, CEM II / A-M (P-L) 42.5 N, CEM III / A 42.5 N ve Çin'den ithal olarak getirdiğimiz DMFC-800 ince taneli çimento kullanılmıştır. Çimento tiplerinin hepsi 42.5 MPa karakteristik dayanıma sahip bileşenleri ve tane büyüklük dağılımları farklı olan çimentolardır.

3.1.2.1. CEM I 42.5 R çimentosu

TS EN 197-1:2002 standardına göre Portland çimentosu klinkeri ve alçıtaşından üretilen bir çimento tipidir. Genel kullanıma uygun olan bu çimentoda hidratasyon reaksiyonu hızlı gerçekleşir ve çimento harcı hızlı sertleşir. İçerisinde çimentonun ana bileşenlerinden C_3S bulunup, bu bileşenden dolayı kullanılan çimento malzemenin erken dayanım kazanmasını sağlar. Sahip olduğu yüksek hidratasyon ısısı sayesinde soğuk havalarda imalata olanak sağlar.

3.1.2.2. CEM II / A-M (P-L) 42.5 N çimentosu

TS EN 197-1:2012 standardına göre katkılı çimentolar sınıfında olan bu çimento, Portland kompoze çimento olarak da adlandırılmaktadır. Hem doğal puzolan olan tras hem de kalker içermektedir. Doğal puzolanlar, yeryüzünde doğal olarak yer alan ve puzolanik özeliğe sahip olan malzemelerdir. Erdoğan ve Erdoğan 2007 yılında yaptıkları araştırmada volkanik kül, tuf, ve diatom olarak adlandırılan mikro boyuttaki

silisli alglerin kalıntılarını içeren diatomlu toprakların, doğal puzolan sınıfına girdiğini, bu malzemelerin dışında, 540 °C - 900 °C kadar pişirilme işlemine tabi tutulmuş olan bazı killerin de doğal puzolanlar arasında yer aldığını belirtmişlerdir. Killer yapılarında yeterli miktarda silika ve alümina içerseler bile, bu malzeme, doğal haliyle puzolanik davranış gösterememektedirler. Bu durum, kildeki minerallerin kristal yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, kil, pişirilme işlemine tabi tutulduğunda, kristal yapı bozulmakta ve amorf yapı elde edilmektedir. O nedenle, pişirilmiş kil puzolanik özellik gösterebilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Sahip olduğu bu mineral katkılardan dolayı uzun süreli mukavemeti yüksek, su ihtiyacı düşüktür, Portland çimentoya göre dayanıklılığı daha yüksektir. CEM II A-M 42.5 N çimentosu içerdiği ince dolgu malzemeleri sayesinde, çimentolaşan kütle içindeki mikro gözenekleri sıkılaştırarak geçirimsizliği düşürmektedir. Kendi sınıfı içinde nihai dayanımı yüksek çimento grubunda yer alan bu çimento tras içeriği sayesinde uzun süreli dayanıklılık sağlamaktadır.

3.1.2.3. CEM III / A 42.5 N çimentosu

Bu çimento yüksek oranda cüruf içermektedir. Yüksek fırın cürufu (YFC) demir-çelik üretim tesislerinde yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında elde edilen bir yan üründür. Demir madeni, doğada demir oksit halinde bulunmaktadır; maden cevheri içerisinde bir miktar silika, alümina, kükürt gibi maddeler de yer almaktadır. Demir elde edebilmek için, demir oksitteki oksijenin ayrıştırılması ve ayrıca, cevherin, içerisindeki yabancı maddelerden arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla, yüksek fırın olarak adlandırılan bir fırının içerisine kademeler halinde kok kömürü, kalker taşı ve cevher yerleştirilmekte, kok kömürünün yakılmasıyla da yaklaşık 1600 °C sıcaklığa ulaşılmaktadır.

Kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşik oluşturarak karbon monoksit veya karbon dioksit gazları halinde ortamı terk ettikten sonra, geride, eriyik durumda demir ve yine eriyik durumda yabancı maddeler kalır. Eriyik haldeki bu yabancı madde topluluğuna cüruf adı verilmektedir. Yan ürün olarak elde edilen cürufun içerisinde büyük miktarlarda kalsiyum oksit, alümina ve silika bulunmaktadır. Yüksek fırından eriyik durumda dışarıya çıkartılan cüruf, havada yavaş soğuma işlemine tabi tutulduğunda, kristal yapıya sahip olmaktadır; fakat, çok hızlı soğutma yapılırsa (suya dökülerek veya başka bir işlemle), iri kum taneleri büyüklüğünde granüle duruma gelmekte ve amorf yapıya sahip olmaktadır. Granüle yüksek fırın

cürufu amorf yapıda olduğundan ve yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden, öğütülerek ince taneli duruma getirildiği takdirde puzolanik özellik gösterebilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

3.1.2.4. İnce (mikro) taneli DMFC-800 çimentosu

Maksimum tane büyüklüğü sınırlandırması (D95) mikro ince çimentoları standart çimentolardan ayıran sınır değerdir. EN 12715: 2000 Avrupa “Enjeksiyon” standardına göre mikro ince çimentolar dik ve homojen tane büyüklüğü dağılımıyla tanımlanabilir. Maksimum tane büyüklüğü D95 değeri 20 mikronu aşmamalıdır. DMFC-800 Portland çimentosu esaslı bir çimentodur. Normal portland çimentosuna göre tane boyutları oldukça küçüktür. Toplam kütesinin %95’ i 16 mikrondan daha küçüktür ($D_{95} < 16\mu\text{m}$).

Küçük tane boyutu sayesinde çimento enjeksiyonu çok küçük çatlaklar, fisürler ve tanecikler arasındaki boşluklara kolaylıkla sızabilmekte ve zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılabilir. Spesifik yüzey alanı Blaine değeri $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ değerinden büyük olup bu özelliği ile agrega ve diğer zemin bileşenleri ile elektriksel etkileşime girme özelliği çok yüksektir. Bu tip çimentolar özellikle gevşek zeminler, çatlaklı kaya ve betonların içerisine enjeksiyon işlerinde tercih edilir ve kullanılır.

Çimento tiplerinin bileşenleri ve kütlece oranları Çizelge 3.2’ de ve bazı teknik verileri ise Çizelge 3.3’ de verilmiştir

Çizelge 3.2. Kullanılan çimentoların kütlece bileşen oranları (Veriler üretici firmalardan alınmıştır)

Çimento Bileşenlerinin Kütlece Oranları (%)				
Çimento Tipi	Klinker	Doğal Puzolan	Yüksek Fırın Cürufu	Diğer
CEM I 42.5 R	94	-	-	6
CEM II A-M 42.5 N	80	20	-	-
CEM III / A 42.5 N	45	-	55	-

Çizelge 3.3. Kullanılan çimentolara ait katalog bilgileri (Veriler üretici firmalardan alınmıştır)

	CEM I 42.5 R	CEM II A-M 42.5 N	CEM III/A 42.5 N	DMFC-800
Priz Başlangıcı (dk)	125	150	175	120
Priz Bitişi (dk)	185	205	225	150
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,5	0,40	0,38	-
SO ₃ (%)	3,2	2,5	1,83	-
Cl (%)	0,03	0,0082	-	-
MgO (%)	0,85	-	4,22	-
Kızdırma Kaybı (%)	3,5	-	2,25	-
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,12	3,11	2,97	3,0
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3450	4500	4690	8000
Basınç dayanımı (MPa)				
2 günlük	28	18	16,7	30
28 günlük	50	48	48,8	60

3.2. Yöntem

3.2.1. Çimento enjeksiyonlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi

Reoloji tanımı gereği maddenin akışı ve deformasyonu olup; kuvvet, deformasyon ve zaman arasındaki ilişkileri araştırır, bu nedenle elastik bir katıdan sıvıya kadar her şey reolji biliminin konusu olabilir (Barnes ve ark., 2001). Viskozite, akışa direnç olarak tanımlanır. Bir sıvının deformasyona karşı direnci yüksekse, viskozitenin yüksek bir değere sahip olacağı anlamına gelir.

Wallewik, (2009) reolojik özelliklerin belirlenmesinin amaçlarını şu şekilde özetlemiştir;

1. Bir ürünlerdeki farklı bileşenler arasındaki etkileşimi anlamak ve bir çözücü içinde çözülen veya süspanse edilen partikül veya moleküllerin boyutu ve şekli ile aynı çözeltinin viskozitesi arasında bir ilişki olduğu için numunenin iç yapısını kavrayabilmek amacıyla kullanılabilir.
2. Hammaddelerin, işlem şartlarının ve nihai ürünlerin kalite kontrolünde kullanılır. Reolojik teknik, numunenin bütünüyle aynı özelliklerini ve farklı bileşenler arasındaki etkileşimi ölçmek amacıyla kullanılabilir.

3. Reolojik testlerde elde edilen sonuçlar işletim ekipmanlarını tasarlamak için kullanılabilir. Pompaların ve boru hatlarındaki akışın işlevi, maddenin reolojik özelliklerine tabidir.

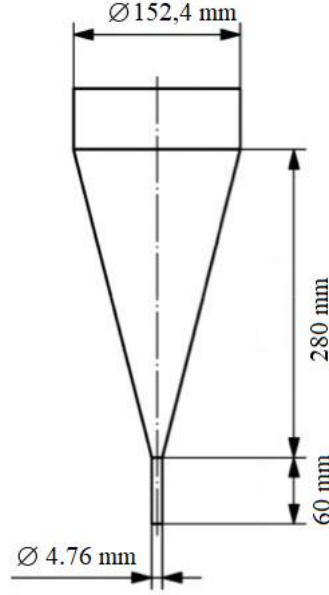
Çimento su karışımları araştırması açısından, reolojik ölçümler yapmanın amacı sadece bir harç içerisindeki farklı bileşenler arasındaki etkileşimi anlamak değil, aynı zamanda ürünlerin ve işlem koşullarının kalite kontrolünü sağlamaktır. Harç pompalanabilmeli ve gözenekli ortam içinde akabilmelidir. Artan reolojik yaklaşımlar sayesinde, yapılacak uygulamanın ihtiyaçlarına özel enjeksiyon tasarımları yapılabilmektedir.

Jet Grout yöntemi ile zemin iyileştirmenin en önemli etmenlerinden biri kullanılan enjeksiyon karışımıdır. Bu nedenle kullanılacak enjeksiyon karışımlarının performanslarını öngörebilmek için farklı S/Ç oranlarında enjeksiyon karışımları hazırlanarak reolojik özellikleri belirlenmiştir. Bunun için Marsh hunisi, Lombardi' nin önerdiği basit plaka kohezyon ölçer, sedimentasyon deneyleri ve vicat priz başlangıç ve bitiş süresi tayini deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak S/Ç oranlarının tayin edilmesi için yapılan reolojik özellik deneylerinde kullanılan oranlar Çizelge 3.4' de verilmiştir.

3.2.1.1. Marsh Hunisi deneyleri

Marsh Hunisi deneyi, test edilen enjeksiyon sıvısının akış özellikleri hakkında genel bir fikir edinilmesini sağlar. Test sonuçları izafi viskozite olarak da değerlendirilmektedir. Deney mekanizması belli miktar çimento-su karışımının huni içine belli bir hacim ölçüsüne kadar doldurulması ve huninin alt ucundaki deliğin açılmasıyla akışkanın serbest akışa bırakılması şeklindedir. Bir litre akışkanın huniden akması için geçen süre kaydedilir ve bu zaman verisi Marsh Hunisi akış zamanı olarak belirlenir. Akışkanın viskozitesi ne kadar yüksek ise akış süresi o kadar uzun olmaktadır. Akış süresi test edilen akışkanın özelliklerine bağlı olduğu kadar, huninin geometrisinden de etkilenmektedir. Çok düşük viskoziteli akışkanların test sonuçlarına bakıldığında akış süresi ve viskozite değerleri arasındaki ilişki doğrusal olmamaktadır. Bu nedenle, akış süresi parametresinin düşük viskoziteli akışkanların reolojik özelliklerini değerlendirmek için anlamlı bir veri olmadığı sonucuna varılmaktadır. Diğer taraftan, test edilen akışkanın bir akma gerilmesi varsa, akış sağlanamayabilir. Bu durumda Marsh Hunisi testi güvenilir sonuç vermemektedir (Roussel ve Le Roy, 2005). Bu çalışma kapsamında akış sağlanamayan enjeksiyon karışımları enjeksiyon işleminde kullanılmamıştır. Standart bir Marsj Hunisinin ölçüleri Şekil 3.3' de verilmiştir.

Deneyler ASTM C939 standardına göre yapılmıştır. Su ve çimento karışımı kütlece belirlenen oranlarda (Çizelge 3.4.) 1000 devir/dk kapasiteli mikserle karıştırılarak Marsh Hunisine yaklaşık 1750 mL hacminde enjeksiyon doldurulmuştur. Tam olarak dik konuma getirilen huni altındaki delik açılarak akışkan serbest akışa bırakılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Marsh Hunisi aparatının şematik gösterimi.



Şekil 3.4. Marsh hunisi deneyinin yapılması.

Çizelge 3.4. Enjeksiyon karışımları için öngörülen ve reolojik özellik deneylerine tabi tutulacak olan S/Ç oranları

Deney No	S/Ç	S/Ç	S/Ç	S/Ç
1	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.6	0.6	0.6	0.6
3	0.75	0.75	0.75	0.75
4	0.8	0.8	0.8	0.8
5	0.9	0.9	0.9	0.9
6	1.0	1.0	1.0	1.0
7	1.2	1.2	1.2	1.2
8	CEM I 1.25	CEM II 1.25	CEM III 1.25	DMFC-800 1.25
9	1.4	1.4	1.4	1.4
10	1.5	1.5	1.5	1.5
11	1.6	1.6	1.6	1.6
12	1.8	1.8	1.8	1.8
13	2.0	2.0	2.0	2.0
14	2.5	2.5	2.5	2.5
15	3.0	3.0	3.0	3.0

Huni altına yerleştirilen dereceli kabın 1000 mL hacmi dolduğu anda süre durdurulmuş ve bu değer Marsh hunisi akış süresi olarak kaydedilmiştir. Deneyler iki tekrar şeklinde yapılmıştır. Tekrarlar hariç 60 adet Marsh hunisi deneyi yapılmıştır.

3.2.1.2. Lombardi plaka kohezyon ölçer deneyi

Viskozite, bir sıvı tabakasının, bitişik sıvı tabakasına göre bağıl hareketinin ne oranda olduğunu gösteren parametredir. Yukarıda Marsh Hunisi akış zamanı değerinin izafi bir viskozite değeri olduğunu, dolayısıyla gerçek viskozite değerini vermediğini belirtmiştik. Bingham karışımları için, Lombardi, huni akış zamanı değerleriyle birlikte uygulanmak üzere basit bir kohezyon plaka ölçer deneyi önermiştir (Lombardi, 1985).

Bu yönteme göre Marsh Hunisi içerisine doldurulan 1000ml'lik karışımın akması için geçen zaman ölçülür, pürüzlü yüzeye sahip ince çelik levha (150x150x2 mm), enjeksiyon malzemesine daldırılır (Şekil 3.5). Plakanın boyutları ilgili pek çok çalışmada benzer boyutlar kullanılmıştır, Weaver, (1991) tarafından yayınlanan kitapta da levha boyutları aynı şekilde verilmektedir. Plaka çıkartılarak, levhaya yapışan çimento-su karışımının damlaması durana kadar beklenir ve başlangıç akma gerilmesi yani kohezyon (τ_0), levhaya yapışan enjeksiyon malzemesi ağırlığından (ΔW) hareketle hesaplanır (Denklem 3.1).

$$\tau_0 = \Delta W / 2.A \quad (3.1)$$

Bu deneklemede;

τ_0 : başlangıç akma gerilmesi (kN/m^2),

A: 15x15 cm boyutundaki çelik levhanın alanı (m^2),

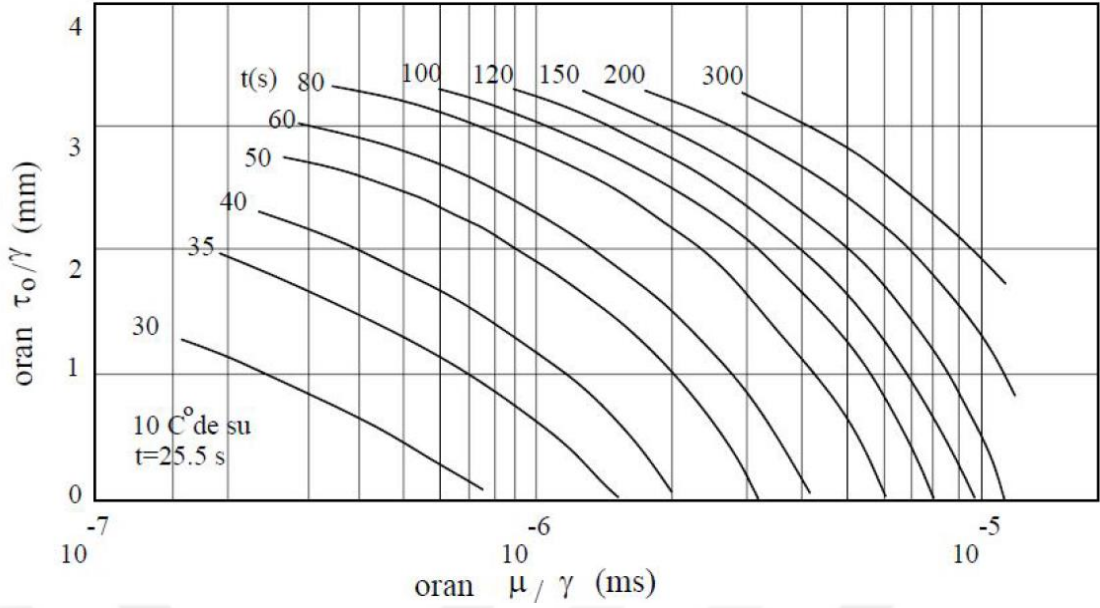
ΔW : Levhaya yapışan enjeksiyon sıvısının ağırlığı (kN).

Denklemden yararlanılarak üzere karışımların birim hacim ağırlıkları hesaplanır ($\gamma(\text{kN/m}^3)$). Birim hacim ağırlıkların bulunmasıyla τ_0/γ değerleri elde edilir. Lombardi'nin önerdiği abak (Şekil 3.6) yardımıyla, τ_0/γ değerlerine karşılık kinematik viskozite (η/γ) değerleri abak yardımıyla bulunur. Daha sonra kinematik viskozite (μ/γ) değerleri ile birim hacim ağırlık (γ) değerleri çarpılarak dinamik viskozite (μ) hesaplanır.

Bu yöntemin bir standardı olmamakla beraber Lombardi'nin yöntemi önerdiği yıl olan 1985'ten beri pek çok çalışmada viskozitenin belirlenmesi için kullanılan bir yöntem olmuştur.



Şekil 3.5. Levhanın enjeksiyon sıvısına daldırılması



Şekil 3.6. Lombardi'nin önerdiği abak (τ_0/γ -akış zamanı-kinematik viskozite (μ/γ)) (Lombardi, 1985)

3.2.1.3. Sedimentasyon deneylerinin yapılması

Tomio'ya (1982) göre “stabilite”, su-çimento karışımından oluşan enjeksiyon sıvısının enjeksiyon işlemi sırasında sedimentasyon veya yoğunluğun artması olmadan özelliklerini koruma kabiliyetini ifade eder. Su içerisindeki asılı parçacıklar, yerçekimi etkisiyle, parçacık çapının karesiyle orantılı bir hızda bir suyun içinde çöker. Önce kaba taneler, ardından ince taneler çöker. Çimento taneleri eğer topaklanıyorsa, birbirine yapışan taneler tek bir tane gibi hareket edeceğinden çökme çok daha hızlı gerçekleşir. Çok ince parçacıklar yalnızca yerçekimi kuvvetine değil, karşılıklı hareket eden elektrokimyasal kuvvetlere ve Brownian hareketine de maruz kalır. Çok ince parçacıklar, yalnızca yerçekimi kuvvetine değil, aynı zamanda karşılıklı hareket eden elektrokimyasal kuvvetlere ve koloidal parçacıkların süspansiyonlarında çap olarak 1 μm 'den küçük olan Brownian hareketine de maruz kalmaktadır, böylece sedimentasyon hızı, Stokes yasasına göre hesaplanan çökme hızında daha düşük hale gelmektedir. Yer çekimi etkisi altında bir çimento harcı çökelmiyorsa ya da çökme minimumda kalıyorsa bu çimento enjeksiyonu “kararlıdır” denebilir. Sedimentasyon deneyleri ASTM C940 standardına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7) ve deney aşamaları aşağıdaki gibidir.

- Testler oda sıcaklığında (23-25°C) gerçekleştirilmiştir.
- 1000 devir/dk hıza sahip mikserle 3 dakika boyunca karıştırılan su-çimento karışımı 1000 mL hacminde 60 mm çapında dereceli cam mezüre doldurulur ve

düzgün yatay yüzeye konur. Mezürün düzgün yüzeye konduğu zaman kaydedilir.

- Kaydedilen deney başlangıç anından itibaren ilk bir saatte on beş dakikada bir, ilk saatin ardından her on dakikada bir okuma alınarak kaydedilir.
- Sedimentasyon yüzdesi mezürün üst kısmında berraklaşan suyun hacminin 1000 mL' lik başlangıç hacmine oranının yüzde cinsinden ifadesidir.

Sedimentasyon yüzdesi: $V_w/V_1 \times 100$ formülü ile hesaplanır.

V_1 : Deneyin başlangıcında numunenin hacmi (mL)

V_w : Sedimente olan su hacmi (mL) olarak tanımlanır.

- Toplamda iki saatlik sürenin sonunda sedimentasyon yani çökeltme yüzdesi %5 ve daha küçük bir değer ise enjeksiyon kararlı olarak değerlendirilir.

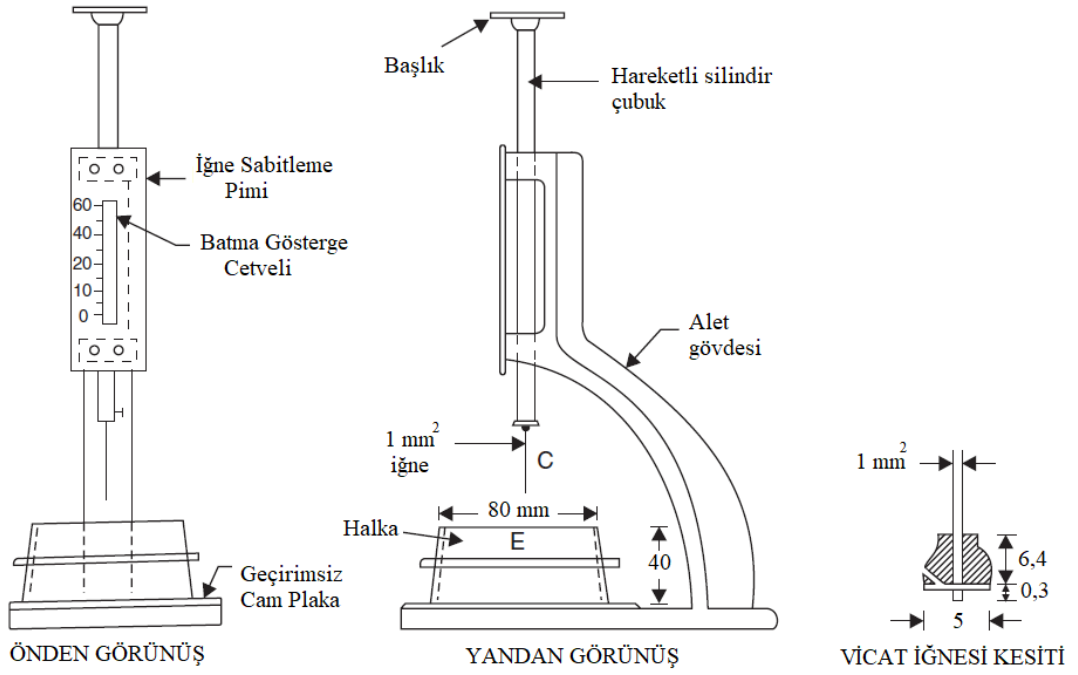


Şekil 3.7. Sedimentasyon deneylerinin yapılması.

3.2.1.4. Vicat iğnesi deneyi ile priz başlangıç ve bitiş sürelerinin belirlenmesi

Jet enjeksiyonu ile zemin iyileştirme yönteminde kullanılan çimento enjeksiyonunun priz başlangıç ve bitiş süreleri Vicat yöntemiyle belirlenmiştir (Şekil 3.8 ve 3.9). Deneysel ASTM C191 standardına göre gerçekleştirilmiştir ve deney aşamaları aşağıdaki gibidir;

- Testler oda sıcaklığında (23-25°C) gerçekleştirilmiştir.
- Deneyde kullanılacak çimentonun tamamen kuru olması gerekmektedir. Çimento etüve konularak 24 saat boyunca 80°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Daha sonra deney için seçilen S/Ç oranına göre su eklenerek çimento hamuru hazırlanmıştır.
- Yüksekliği 40 mm olan Vicat halkasının içi ve üzerine konduğu cam plaka ince film tabakası oluşturacak şekilde yağlanır. Çimento hamuru halka içine yerleştirilmiş ve halkaya doldurulan çimento hamurunun yüzeyi spatula yardımıyla düzeltilir.
- Vicat iğnesi çimento hamuru yüzeyine temas edecek kadar indirilir ve sabitleme vidası sıkılarak sabitlenir.
- Çimento hamuruna Vicat iğnesi batırılmadan önce yarım saat beklenir. Yarım saatlik süre dolduğunda vida yavaşça gevşetilerek çimento hamuruna batması sağlanır. Vida aniden gevşetilmemelidir, iğnenin kendi ağırlığıyla çimento hamuruna hafifçe girmesi sağlanmalıdır. İğnenin serbest bırakılmasının ardından 30 saniye beklenir ve okuma alınır.
- Priz başlangıç süresinin belirlenmesi için, iğne her 15 dakikada (Tip III çimentolar için her 10 dakikada bir) bir çimento hamura batırılmalıdır. Batma değeri 25 mm olarak okunduğunda, ilk priz zamanı bulunmuş olur. Okunan batma değeri 25mm'den daha küçük bir değer okunduysa, zaman aralığında enterpolasyon yapılır ve 25mm'ye karşılık gelen değer bulunur.
- Priz bitiş zamanı, çimentonun suyla ilk teması ile iğnenin çimento hamuru yüzeyinde tam dairesel bir iz bırakmadığı (batma <0.5 mm) zaman arası geçen süredir.
- İğne bir kez batırıldığı yere ikinci kez batırılmamalı ve her batırılışından sonra silinerek temizlenmelidir.
- Vicat iğnesi batmaya bırakıldığında önceki herhangi batma izinden en az 5 mm uzakta ve kalıbın iç tarafından en az 10 mm uzakta batmaya bırakılmalıdır.



Şekil 3.8. Vicat iğnesi deney düzeneği detay görünümü.



Şekil 3.9. Vicat iğnesi deneylerinin yapılması.

3.2.2. Küçük ölçekli numunelerin hazırlanması

Jet enjeksiyon yönteminde bağlayıcı olarak seçilen çimentonun tipi alınacak sonuçları üzerinde büyük ölçüde etkili olmaktadır. Tez çalışması için seçilen dört farklı tipteki çimentonun dayanım ve geçirimsizlik performanslarının tamamen kontrollü koşullarda kıyaslanabilmesi için küçük ölçekli silindir numuneler hazırlanmıştır. Silindir kalıplarının çapı 50 mm (iç çap 47 mm), boyu 100 mm'dir.

Kumlu zeminin su içeriği; doğal duruma yakın olabilmesi açısından %5 olarak belirlenmiştir. Zeminin sıkılığı ise orta sıkı olacak şekilde %50 olarak belirlenmiştir. Numunelerin karışım oranlarının tasarımı yapılırken numunelerin tasarımları tam olarak yansıtması amacıyla aşağıdaki işlem sırası takip edilmiştir;

1- %5 su içeriğine sahip kumun %50 sıkılıkta kalıba yerleştirilebilmesi ön deneyler yapılmış ve her numunenin sıkılığının yaklaşık aynı olabilmesi için bir yerleştirme yöntemi belirlenmiş ve her numune aynı şekilde hazırlanmıştır. Kullanılan kum 4.75 mm elekten elenerek kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre her kalıpta sıkılığın %50 olabilmesi için kalıp 113 cm^3 kum ile tamamen dolması gerektiği ve %50 sıkılıktaki kumun boşluklarına 61 cm^3 enjeksiyon karışımı girmesi gerektiği hesaplanmıştır. Kum ve enjeksiyon karışımı belirtilen hacimlerde karıştırılmış ve kalıplara 3 tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabakada kalıba dıştan 5 kez hafifçe vurularak kum-enjeksiyon karışımının yerleşmesi sağlanmıştır.

2- Belirlenen teknikte hazırlanan enjeksiyonsuz kumun boşluk oranı hesaplanmış ve buradan kalıptaki boşluğun hacmine geçilmiştir. Bu şekilde her numunenin bünyesinde barındırabileceği enjeksiyon miktarı hesaplanmış ve zemin bu miktarda enjeksiyon sıvısı kullanılarak hazırlanmıştır. Kullanılan enjeksiyonların S/Ç oranları yapılan reolojik özellik deneyleriyle belirlenmiştir. Belirlenen S/Ç oranları Çizelge 4.12.' de verilmiştir.

3- Numuneler hazırlandıktan sonra 48 saat bütünlüğünü koruyacak kadar dayanım kazanmaları için kalıpta bekletilmiştir (Şekil 3.10). 48 saatin sonunda numuneler kalıptan çıkarılarak tek tek plastik poşetlere yerleştirilerek saklanmıştır.

Plastik poşetlerin içi numunenin kurumasını önlemek amacıyla ıslatılmış ve ağızları hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Numuneler yaklaşık 23°C sıcaklıkta güneş ışığı almayan bölmelerde saklanmıştır.



Şekil 3.10. Elle karıştırılarak hazırlanan küçük numunelerin hazırlanması

3.2.3. Büyük ölçekli model Jet Grout kolonlarının oluşturulması

Jet Grout yöntemiyle iyileştirilen zeminler üzerinde çalışılırken yöntemin mekanizmasının sonuç üzerinde etkisi göz ardı edilemez. Laboratuvar ortamında kontrollü şartlarda hazırlanan numunelerle çalışarak herhangi bir zemin tipi üzerinde uygulanan, herhangi tipte bağlayıcının etkileri hakkında elbette ki veriler toplanabilir ve bazı sonuçlara varılabilir; ancak Jet Grout yönteminde bağlayıcının özellikleri kadar enjeksiyonun reolojik özellikleri, nüfuz etme kabiliyeti de sonuç üzerinde etkilidir. Bu nedenle küçük ölçekli deneylerin yanı sıra gerçek Jet Grout yöntemini laboratuvar ortamında temsil eden, ölçeklendirilerek laboratuvar boyutlarına indirgenmiş model bir ekipman kullanılarak Jet Grout kolonları oluşturulmuştur. Model Jet Grout sistemi 2013 yılında Hakkı Erkan tarafından doktora tez çalışması için tasarlanmıştır.

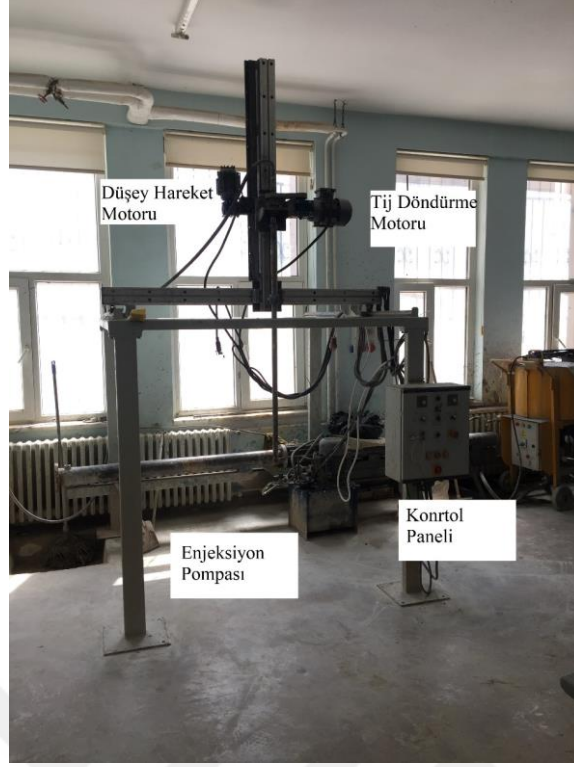
3.2.3.1. Model jet grout deney düzeneği

Sistem üç temel kısımdan oluşmaktadır ve Şekil 3.11’ de gösterilmiştir.

-Enjeksiyon basınçlandırma pistonu: içine karıştırılmış enjeksiyon sıvısı doldurulan piston 40 bara kadar basınç üretebilmektedir. Yağ basıncını üreten bir elektrik motoruyla çalışmaktadır. Piston 12 litre enjeksiyon sıvısı alabilmektedir.

-Tij takımı ve tij tahrik motorları: 90 cm uzunluğunda, alt ucunda 1.5mm çapında nozul bulunan tij bir dişli üzerinde düşey olarak hareket ettiren bir elektrik motoru ve tiji kendi ekseni etrafında döndüren bir elektrik motorundan oluşmaktadır.

-Kontrol paneli: Üç adet elektrik motorunun hızlarının ayarlanabildiği yani enjeksiyon basıncı, tij dönme ve çekme hızlarının ayarlandığı elektronik kontrol panelidir.



Şekil 3.11. Laboratuvar tipi JG kolon üretim teçhizatı

3.2.3.2. Kumlu zemin numunelerinin hazırlanması

Jet grout kolonlarının oluşturulduğu kumlu zemin numuneleri 90 cm çapında ve 110 cm yüksekliğindedir. Kum zemin varillere rölatif sıklığı %50 (Dr: %50) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Varile yerleştirilen kumun su muhtevası %5 olarak ayarlanmıştır. Kum kullanılmadan önce 4.75 mm elekten elenmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kumlu zeminin belirlenen sıklıkta varillere yerleştirilmesi

3.2.3.3. Enjeksiyon karışımının hazırlanması

Dört farklı çimento kullanılarak hazırlanan enjeksiyon karışımları reolojik özellik deneylerinin ardından belirlenen S/Ç oranlarına göre hazırlanmıştır. Pistonun kapasitesi olan 12 litre hacminde hazırlanan çimento-su karışımı enjeksiyon sıvıları en az üç dakika 1000 devir/dakika hızla dönen karıştırıcıyla karıştırıldıktan sonra pistonun haznesine doldurulmuş ve derhal jet enjeksiyon işlemine geçilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. a) Enjeksiyon karışımının hazırlanması, b) Enjeksiyon karışımının pompaya doldurulması

3.2.3.4. Model jet grout kolonlarının oluşturulması

Deney tasarımları yapılan kolonların oluşturulmasından önce sistem deney düzeneğinin kalibrasyonu yapılmıştır. Seçilen %50 sıklık ve kum zemin göz önünde bulundurularak Erkan (2013) ve Kanat (2018) tarafından yapılan çalışmaların verilerinden faydalanılmıştır. Seçilen sistem parametreleri Çizelge 3.5 'de verilmiştir. Kıyaslamanın doğru bir şekilde yapılabilmesi için tüm deneylerde aynı parametreler kullanılmıştır.

Çizelge 3.5. Model JG kolonlarının üretilmesinde kullanılan sistem parametreleri

Tij Çekme Hızı (cm/dk)	Tij Dönme Hızı (devir/dk)	Enjeksiyon Basıncı (bar)
30	10	35

Model JG kolonlarının oluşturulmasında işlem sırası aşağıdaki gibidir;

- Rölatif sıklığı %50 olarak ayarlanan varil içindeki kum deney düzeneğinin altına getirilip ve tij zemin içerisinde 80 cm derinliğe kadar indirilmiştir. Kum yerleştirildikten sonra titreşime maruz kalmadan jetleme işleminin gerçekleştirilmesi çok önemlidir çünkü hassas şekilde ayarlanan zemin sıklığı değişebilir ve bu da deney sonuçlarını önemli ölçüde etkiler.

- Varil içerisindeki kum jet işlemine başlamaya hazır halde olduğunda önceden tartılarak hazırlanmış çimento ve su bir kovaya aktarılarak 1000 devir/dakika hızdaki karıştırıcı ile en az üç dakika boyunca karıştırılmıştır (Şekil 3.13.a).

- Hazırlanan enjeksiyon sıvısı piston haznesine bir huni yardımıyla boşaltılmıştır. Olası topaklanmaların nozulları tıkanmasını önlemek için enjeksiyon ince bir süzektan geçirilerek hazneye boşaltılmıştır (Şekil 3.13.b).

- Enjeksiyon karışımı doldurulduktan sonra derhal jetli grout işlemine geçilmiştir. Çimentonun suyla karışmasının ardından beş dakika içerisinde jetleme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Jet enjeksiyon işleminin gerçekleştirilmesi

Jet enjeksiyon işleminin tamamlanmasının ardından variller sarsılmadan kür süresinin sonuna kadar kumun su muhtevası değişmeyecek şekilde saklanmıştır.

Kolonlar 90 gün boyunca nemli kum zeminin içinde saklanmıştır. Kür süresinin ardından kolonlar varillerden çıkarılmıştır (Şekil 3.15 ve 3.16).



Şekil 3.15. JG kolonlarının varillerden çıkarılması



Şekil 3.16. Kür süresinin sonunda kum içerisinde çıkarılan JG kolonları.

3.2.4. Oluşturulan JG numunelerinden karot numunelerinin alınması

Kür süresini tamamlayan JG kolonlarının mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için karot numuneleri alınmıştır (Şekil 3.17). Alınan karot numuneleri su soğutmalı kaya kesim aleti kullanılarak boyutlandırılmış ve deneyler için uygun boyutlara getirilmiştir (Şekil 3.18). Alınan karot numuneleri 4.3 mm çapında olup dayanım deneyleri ve UPV deneyleri için kullanılacak olan numuneler çap-boy oranı 0.5 olacak şekilde kesilmiştir. Geçirimlilik deneyleri için hazırlanan numuneler 3 cm boyunda kesilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.17. JG kolonlarından karot numunelerinin alınması



Şekil 3.18. JG kolonlarından alınan karot numunelerinin kesilmesi

3.2.5. Serbest basınç deneylerinin yapılması

Serbest basınç mukavemeti (UCS) JG yöntemiyle iyileştirilen zeminler için en önemli göstergelerden biridir. Deneyler ASTM C-4219-02 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numuneleri basınca maruz yüzeyleri birbirine paralel hale gelecek şekilde kesilmiş böylece kükürt başlık yapılmasına gerek kalmamıştır (Şekil 3.18).



Şekil 3.19. Çap-boy oranları 0.5 olarak ayarlanan ve yüzeyleri düzeltilen karot numuneleri

Çimento enjeksiyonuyla iyileştirilen kumlu zeminin serbest basınç mukavemeti iyileştirilmemiş herhangi zemine göre çok daha yüksek olacağından deneylerde yüksek basınç üretmene kapasitesi olan hidrolik basınç cihazı kullanılmıştır. Basınç cihazının hızı, yağ basıncı düşürülerek dakikada 0.4mm deplasman yapacak şekilde ayarlanmıştır. Yüksek hızda yapılacak serbest basınç deneyleri sonuçları olduğundan yüksek gösterebilir. Basınç cihazına bağlanan hassas komparatör ile yük-deformasyon ilişkisi dikkatle kaydedilmiştir. Her tasarım için ne az iki adet karot numunesi ya da elde hazırlanmış olan silindir numune kırılmıştır (Şekil 3.20). İki numunedan alınan sonuçlar arasında bariz farklılıklar varsa üçüncü bir numune kırılarak sonuçlar teyit edilmiştir. Numunelere ait gerilme-birim deformasyon ilişkisi grafikleri çizilerek numunenin

serbest basınç mukavemeti hesaplanmıştır. Serbest basınç mukavemeti Denklem 3.2 ve 3.3 'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P_{maks}}{A_f} \quad (3.2)$$

$$A_f = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (3.3)$$

σ : Serbest basınç mukavemeti; (MPa)

P_{maks} : Kırılma yükü; (kN)

A_f : Kırılma anındaki en kesit alanı; (mm²)

A_0 : Numunenin ilk enkesit alanı; (mm²)

ε : Birim deformasyon



Şekil 3.20. Serbest basınç deneyinde kırılan numuneler.

3.2.6. Yarmada çekme dayanımı deneylerinin yapılması

Beton numunelerinde olduğu gibi çimentoyla iyileştirilmiş kumlu zemin numunelerinin de çekme dayanımlarını doğrudan belirlemek mümkün değildir. Bunun için yarmada çekme deneyi diğer adıyla “Brezilya Yarma Deneyi” numunelerin yarmada çekme dayanımlarını (STS) belirlemek için sıkça kullanılan bir yöntemdir (Şekil 3.21). Çekme dayanımı kullanılan bağlayıcının oluşturduğu bağ kuvveti hakkında önemli bilgiler vermektedir. Deneyler ASTM C 496-90 standardına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.21. Yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

Yarmada çekme dayanımı kırılmanın, silindirik numunenin tam merkezinden geçen bir dikdörtgen düzlem boyunca gerçekleştiği varsayımına göre hesaplanır. Bu nedenle oldukça basit olan bu deneyden doğru bir sonuç elde edebilmek için numunenin doğru bir biçimde kırıldığından emin olunması gerekmektedir (Şekil 3.22). Yarmada çekme dayanımı Denklem 3.4’ deki gibi hesaplanır.

$$\sigma_{STS} = \frac{2.P}{\pi.D.L} \quad (3.4)$$

P : Numunenin kırılma yükü (kN)

L : Numunenin boyu (mm)

D : Numunenin çapı (mm)



Şekil 3.22. Silindir numunenin merkezindeki dikdörtgen düzlem boyunca kırılan (yarılan) numuneler

3.2.7. Geçirimsizlik deneylerinin yapılması

JG kolonları zeminin taşıma gücü kapasitesini artırmak veya sıvılaşmayı önlemek gibi amaçlarla kullanıldığı kadar geçirimsizlik sağlamak amacıyla da kullanılmaktadır. Bu işlevi sayesinde baraj kil çekirdeği altı geçirimsizlik perdeleri, zemin suyu seviyesinin yüksek olduğu inşaat alanlarında temel çukurunu su basmasını önlemek gibi amaçlarla kullanılabilir. Bu nedenle JG kolonlarının dayanım parametreleri kadar geçirimsizlik katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Çimento ile iyileştirilmiş zeminlerin geçirimsizliği zeminin yapısına bağlı olduğu kadar kullanılan çimentonun hidrasyon özelliklerine ve enjeksiyonun S/Ç oranına bağlıdır. Bu tez çalışması kapsamında üretilen büyük ölçekli JG kolonlarından alınan karot numuneleri ve elde hazırlanan silindirik numuneler üzerinde geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Deneyler ASTM D5084-10 standardına göre üç eksenli deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler için 3 cm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır. Büyük ölçekli JG kolonları için ise alınan karot örneklerinden geçirimsizlik deneyleri için 3 cm yüksekliğinde numuneler kesilmiştir. Deney aşamaları şu şekilde özetlenebilir:

- Numuneler oda sıcaklığında (22-25°C) 72 saat boyunca su seviyesi numuneyi en az 5 cm geçecek şekilde suda bekletilerek doygun hale getirilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Geçirimsizlik numunelerinin suya doymun hale getirilmesi

- Numunelerin suya doymun hale gelmesinin ardından numuneler tıpkı üç eksenli basınç deneyinde olduğu gibi bir membran içerisine yerleştirilerek üç eksekli deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Yükleme başlığı ve geri basınç su giriş borusunun montajı yapıldıktan sonra hücre yerleştirilerek çevre basıncı verilmiştir (Şekil 3.24).
- Çevre basıncı etkisi yaratmak için verilen su renklendirilerek numunenin içinden geçen renksiz geri basınç suyuna karışmadığından emin olunmuştur.
- Numune üzerine, numunenin kırılmasına neden olmayacak kadar stabil kalmasını sağlamak amacıyla belli bir miktar sabit yük etki ettirilmiştir.
- Çevre basıncı geri basınçtan daima yüksek tutulmuştur; böylece suyun numune etrafından değil içerisinden geçtiğine emin olunmuştur.
- Deney yapılan numunenin geçirimsizlik durumuna göre 400 ~ 600 kPa geri basınç; 500 ~700 kPa çevre basıncı uygulanmıştır.
- Her tasarım için en az 2 numune üzerinde, sonuçlarda belirgin farklar olması halinde 3 farklı numune üzerinde geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır.
- İyileştirilmiş zemin numuneleri oldukça geçirimsiz olduğundan sistem çalıştırılıp geri basınç uygulandıktan sonra su çıkışı sabit oluncaya kadar ölçüm alınmamıştır. Su çıkışının sabit olduğu görüldükten sonra kronometre kullanılarak zaman tutularak çıkan su damlaları küçük bir cam beherde biriktirilerek miktarı belirlenmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Geçirimsizlik deneylerinin yapılması

Elde edilen veriler kullanılarak geçirimsizlik katsayısı Denklem 3.5. ve 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$k = \frac{Q * L}{t * A * \Delta h} \quad (3.5)$$

$$\Delta h = \frac{\sigma_2 * 1000}{\rho * g} \quad (3.6)$$

Burada;

k : geçirimsizlik katsayısı, (cm/s)

Q : Numuneden çıkan su miktarı, (cm³)

L : Numunenin boyu (suyun kat ettiği mesafe), (cm)

A : Numunenin en kesit alanı (suyun ilerleme yönüne dik kesit alanı), (cm²)

t : Su çıkışının kaydedildiği süre, (s)

σ_2 : Geri basınç, (kPa)

Δh : Numuneye etkiyen basınç yüksekliği, (cm)

Küçük numunelere 56 gün ve model JG kolonlarından alınan karot örneklerine 90 gün sonunda yani uzun vadeli kür işleminin ardından bir kez geçirimsizlik testi uygulanmıştır. Toplamda 76 adet geçirimsizlik deneyi yapılmıştır.

3.2.8. Taramalı elektron mikroskobu görüntü analizlerinin yapılması

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizi çimentoyla iyileştirilmiş zeminin mikro yapısındaki değişiklikleri gözlemek ve çimento tiplerinin mikro yapıları arasında karşılaştırma yapmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobunda görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması, taratma sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması, bu bilgilerin sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

Taramalı elektron mikroskobunun çalışma mekanizması şu şekildedir: Mikroskobun optik kolonunda; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, demeti toplamakta ve yönlendirmekte kullanılan kondenser ve objektif mercekleri, demet çapını sınırlamakta kullanılan apertürler, numune yüzeyini taraması için demeti uygun şekilde saptıran tarama bobinleri vardır. Optik kolon alttan numune ocağına açılır. Burada üç boyutta hareket edebilen numune kızıağı, demet-numune etkileşimi sonucu oluşan değişik sinyallere duyarlı algılayıcılar bulunur. Mikroskobun elektronik donanımı ise flaman akımı, mercek akımı ve uyarma gerilimini kararlı tutarken, algıcılardan gelen sinyalleri işleyerek numunenin değişik özelliklerini yansıtan görüntüler oluşturur.

SEM görüntü analizi için kullanılan numuneler UCS deneylerinde kırılan silindirik numunelerden alınmıştır. Deney aşamasına geçilmeden önce tamamen kurutulmuş ve cihazın numune tutucu boyutlarına uygun olarak yaklaşık 1x1x1 cm boyutlarına getirilmiştir. Numunelerin elektrik iletkenliğini sağlamak için altın kaplama yapılmıştır (Şekil 3.25). SEM analizleri Selçuk Üniversitesi İLTEK laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.26).



Şekil 3.25. Numunelerin iletkenliğini sağlamak için altın kaplanması.



Şekil 3.26. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ekipmanı

SEM görüntü analizleri kullanılan farklı tip çimentoların mikro yapılarını incelemek ve dayanım geçirimsizlik ve UPV verilerinin mikro yapıyla ilişkisini ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Çimento ile iyileştirilmiş zeminlerin mikro yapısını etkileyen en önemli etken hidrasyon reaksiyonudur. Hidrasyon süreci çimento ve suyun biraraya gelmesiyle başlar. Çimento tanecikleri kısmi olarak su içerisinde çözünürler. Çözünen bileşenler değişik hızlarda ve oranlarda reaksiyona girer. Reaksiyonlar sırasında ısı açığa çıkar ve yeni ürünler meydana gelir. Oluşan yeni ürünler çimento hamurunun sertleşmesine ve agregaların çimento hamuru ile bağlanmasına neden olurlar.

Portland çimentosu, kireçtaşı ve kilin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ve bu işlem sonucu oluşan klinkerin alçıtaşıyla birlikte öğütülmesiyle meydana gelir. Pişirme sonucu klinker yapısında oluşan iki ana bileşen grubu (silikatlar-aluminatlar) ile sonradan ilave edilen alçı(sülfat) hidratasyon reaksiyonu sürecini doğrudan etkiler. Çimento ana bileşenleri:

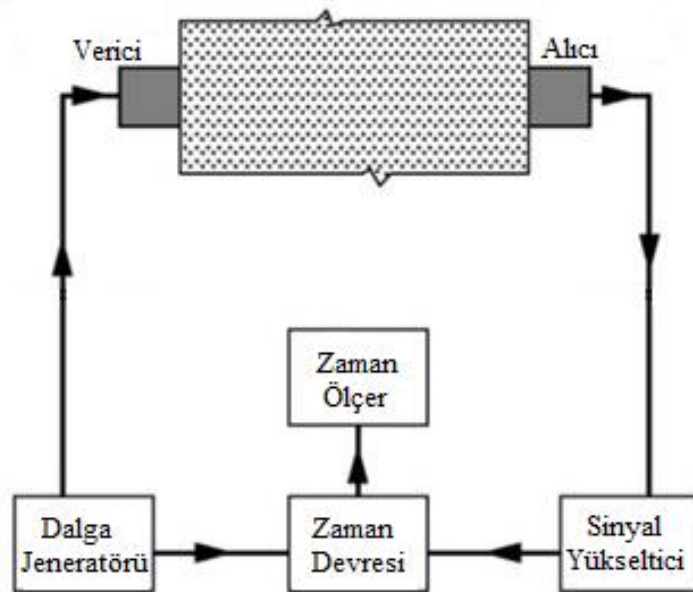
- Kalsiyum Silikatlar (C_3S-C_2S)
- Kalsiyum Aluminatlar ($C_3A - C_4AF$)
- Kalsiyum Sülfatlar ($CS.2H$)

Bu üç ana bileşenin ortak yanı kalsiyum (Ca) içermeleridir. Bu üç ana bileşenin kimyasal özellikleri ve etkileri oldukça farklıdır.

Bu tez çalışması kapsamında büyük ölçekli kolonlardan on adet tasarım seçilerek SEM görüntü analizleri yapılmıştır. 500 x ila 10000 x arası büyütme oranlarında görüntüler alınarak incelenmiştir.

3.2.9. Ultra ses dalga hızı testlerinin yapılması

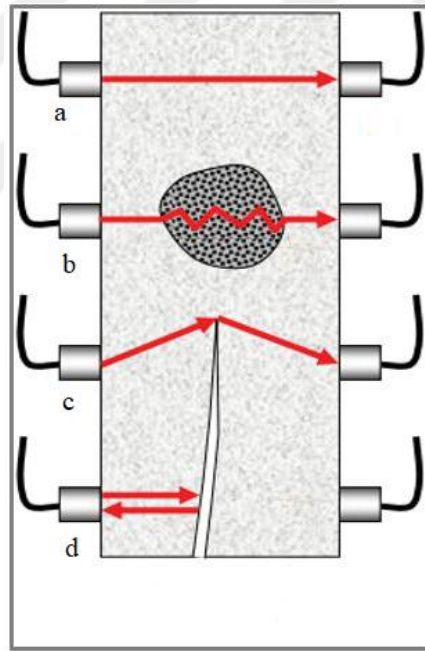
Ultra ses dalga hızı (UPV) testi, test edilen numunenin yapısındaki çatlak, boşluklu yapı ya da dayanım, geçirimsizlik özellikleri hakkında veri elde etmek için kullanılan hasarsız bir test yöntemidir. Deney ekipmanı farklı işlevleri olan ses dalga jeneratörü, ses dalga vericisi, ses dalga alıcısı, dönüştürücü gibi elemanlardan oluşur (Şekil 3.27). Testler ASTM C-597 standardından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.27. UPV tarama test ekipmanı genel şeması (ASTM C-597)

Deney sistemi basit anlamda ultra ses dalgalarının numune bünyesinden geçirilip, ultra ses dalgasının numuneyi ne kadar sürede kat ettiğinin ölçülmesi ve buna bağlı olarak numunenin iç yapısı hakkında (dayanım, boşluk yapısı, geçirimsilik v.b.) veri elde edilmesine dayanmaktadır. Ultra ses dalgalarının numune bünyesindeki dağılım yönleri ve dağılım hızını etkileyecek durumlarla ilgili genel durum Şekil 3.28.'de verilmiştir.

Testler Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir. Testlere başlanmadan önce cihaz ekipmanında bulunan pleksi glas malzemeden üretilmiş kalibrasyon çubuğu kullanılarak cihaz kalibre edilmiştir. Bu standart kalibrasyon çubuğuna gönderilen ses dalgalarının 25,4 μ s sürede iletilmektedir. Kalibrasyon çubuğuna uygulanan testlerde doğru iletim süresinin sağlandığı görülmüş ve testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.28. Ultra ses dalgalarının; a) homojen yapıda, b) boşluklu yapıda, c) ince çatlaktan geçme durumu, d) derin çatlaklarda yayılma durumları (Abduljabbar, 2018)

Kalibrasyonun ardından numunelerin testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler test edilmeden 30 gün boyunca atmosfere açık ortamda bekletilmiş ve hava kurusu hale getirilmiştir. Ultra ses dalgalarının iletiminin doğru şekilde sağlanabilmesi için özel bir jel kullanılmıştır. Her ölçümden önce hem numune başlıklarına hem de alıcı ve verici başlıklara jel sürülmüş bu şekilde ses dalgalarının dağılmadan numune bünyesinden geçmesi sağlanmıştır. Her numune için en az 3 ölçüm alınmıştır. Hız verileri arasında

fazla fark olduğu durumlarda jel uygulaması yenilenecek yakın sonuçlar elde edilinceye kadar ölçüm alınmaya devam edilmiştir (Şekil 3.30). UPV ölçümleri model kolonlardan alınan karot numuneleri için 90 ve elde hazırlanan küçük numuneler için 56 günlük kür süresinin sonunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.29. UPV cihazının kalibrasyonunun yapılması.



Şekil 3.30. UPV ölçümlerinin yapılması.

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Enjeksiyon Karışımlarının Reolojik Özellikleri

4.1.1. Marsh hunisi akış zamanı sonuçları

Tez çalışması kapsamında 60 adet Marsh hunisi deneyi yapılmıştır. S/Ç oranı 0.5 ile 3.00 arası değişen değerlerde ikişer tekrar şeklinde gerçekleştirilen deneylere ait ortalama akış süreleri Çizelge 4.1. 'de verilmiştir. Akış süresi 100 saniyeyi aşan deneyler geçersiz kabul edilmiş ve bu akış zamanı değerlerine sonuçlar arasında yer verilmemiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde S/Ç oranı arttıkça su-çimento karışımlarının akmaya karşı gösterdiği direnç azalmıştır, yani akış özellikleri su miktarı arttıkça iyileşmiştir.

Çizelge 4.1. Marsh hunisi akış zamanı verileri

	CEM I 42.5 R	CEM II / A-M (P-L) 42.5 N	CEM III A 42.5 N	DMFC-800
S/Ç	Akış Zamanı (saniye)			
0.50	72.32	83.50	62.00	96.12
0.60	62.41	71.64	50.00	78.45
0.75	36.00	40.50	34.00	45.00
0.80	32.20	36.34	31.20	42.25
0.90	31.00	32.00	29.60	38.00
1.00	29.34	30.50	28.50	32.10
1.20	28.36	29.80	27.91	29.87
1.25	27.90	29.50	27.50	29.26
1.40	27.53	28.10	26.43	28.50
1.50	27.44	27.65	26.00	28.35
1.60	27.38	27.43	26.00	26.50
1.80	26.65	27.28	26.00	25.77
2.00	26.31	27.20	26.00	25.60
2.50	26.29	26.00	26.00	25.57
3.00	26.00	26.00	26.00	25.52

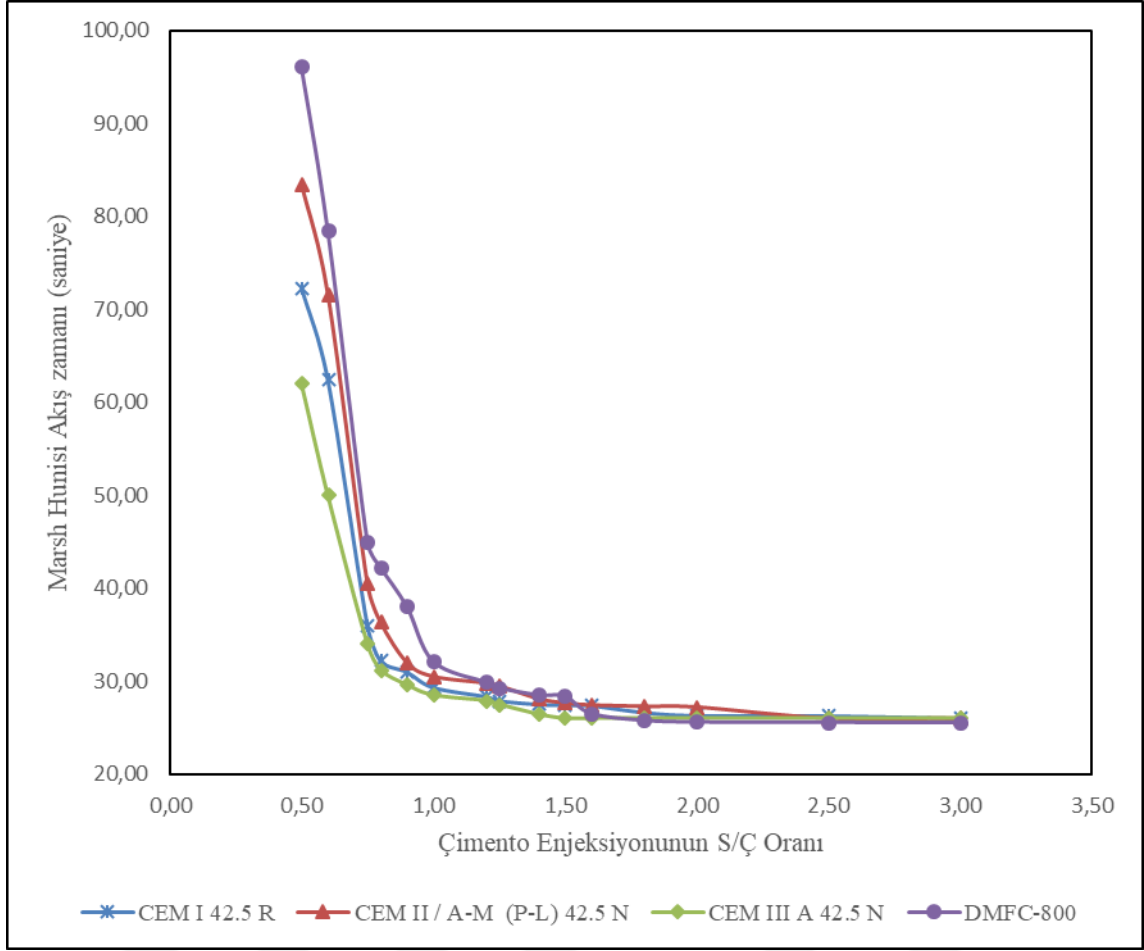
DMFC-800 ince taneli çimento, diğer çimento türlerine göre en yüksek akış zamanına sahiptir. Yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle; reaksiyona giren, reaktif, toplam yüzey alanı diğer çimentoların reaktif yüzey alanından daha büyüktür. Bu durum

reaksiyon için su ihtiyacını arttırmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Yılmaz, 2011). S/Ç oranı 0.9'a kadar olan ince taneli çimento enjeksiyon karışımlarının diğer çimento enjeksiyon karışımlarına göre daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. S/Ç oranı 1.0'dan daha büyük olan enjeksiyon karışımlarının akış zamanları diğer çimento tiplerininkine yakın değerler vermiştir. Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında kullanılan suyun Marsh hunisi akış zamanı 26 saniye olarak belirlenmiştir. S/Ç oranı 1.8 olduğunda, ince taneli çimento enjeksiyonu yaklaşık olarak suyun akış özelliklerine ulaşmıştır (Şekil 4.1.).

CEM II 42.5 (P-L) kompozit çimento, doğal puzolan içermektedir. Çimentodaki puzolanik katkılar su ihtiyacını arttırmakta ve dolayısıyla enjeksiyon karışımının akışkanlığını azaltmaktadır (Jiao, 2017). Bu nedenle, CEM II çimentosuyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarının akış zamanı değerleri, katkısız Portland çimentosu olan CEM I 42.5 R çimentosu ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. CEM II çimentosu S/Ç oranı 2.5 olduğunda suyun akış özelliklerine ulaşmıştır (Şekil 4.1.).

CEM III 42.5 N YFC katkılı çimento, diğer çimentolara göre en düşük akma zamanı değerlerine sahip çimento olmuştur. Diğer puzolanik mineral katkı maddelerinin aksine YFC su ihtiyacını azaltmış ve enjeksiyon karışımlarını daha akışkan hale getirmiştir. Lange ve arkadaşları (1997), öğütölmüş YFC 'nin optimum miktarda kullanıldığında çimento-su karışımlarının akış özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. CEM III tipi çimento, S/Ç oranı 1.5 olduğunda suyun akış özelliklerine ulaşmıştır (Şekil 4.1.).

CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu, katkısız Portland çimentosudur ve en yüksek oranda klinker içermektedir. Özgöl yüzey alanı diğer çimento tiplerine göre daha küçüktür yani bu çalışmada kullanılan çimentolar arasında ortalama tane büyüklüğü en fazla olan çimentodur. Akış zamanı verileri diğer çimentolarla kıyaslandığında CEM I çimentosu, yüksek reaktif yüzey alanına sahip ince taneli DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarından ve içerdiği doğal puzolanlar nedeniyle su ihtiyacı artan CEM II çimentosuyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarından daha iyi akış özelliklerine sahiptir. Buna karşın CEM III tipi çimento içerdiği YFC sayesinde daha iyi akış özellikleri göstermiştir. Genel karşılaştırmalı görünüm Şekil 4.1.' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Marsh hunisi akış zamanı verileri karşılaştırmalı görünümü.

4.1.2. Lombardi plaka kohezyon ölçer deneyi sonuçları

On beş farklı S/Ç oranı için yapılan Marsh hunisi deneylerinin her biri için Lombardi' nin plaka kohezyon ölçer deneyi de uygulanmıştır. Dört farklı tipteki çimentonun farklı S/Ç oranlarında hazırlanan enjeksiyon karışımlarının dinamik viskozite değerleri Lombardi' nin önerdiği yöntemle göre belirlenmiş ve hesaplanan dinamik viskozite değerleri Çizelge 4.2.-3.-4.-5.' de verilmiştir. Lombardi' nin önerdiği abak (Şekil 3.5) akma süresi 30 saniyenin altındaki karışımlara uygun olmadığından 30 saniyeden daha düşük akma değerine sahip karışımların dinamik viskozitesi hesaplanmamıştır.

Çizelge 4.2. DMFC-800 ince taneli çimentosuyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarının dinamik viskozite değerlerinin hesap çizelgesi.

S/Ç	ΔW (kN)	2A (m ²)	τ_0 (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	τ/γ (mm)	Akış zamanı (s)	μ/γ (m.s)	μ (Pa.s=N.s/m ²)	μ (Pa.s*1000)
0.50	137.70*10 ⁻⁵	0.045	3.06*10 ⁻²	18.000	1.7000	96.12	3.53*10 ⁻⁶	0.0635	63.5
0.60	116.47*10 ⁻⁵	0.045	2.59*10 ⁻²	17.140	1.5100	78.45	3.02*10 ⁻⁶	0.0518	51.8
0.75	30.54*10 ⁻⁵	0.045	6.79*10 ⁻³	16.160	0.4200	45.00	2.37*10 ⁻⁶	0.0383	38.3
0.80	25.01*10 ⁻⁵	0.045	5.56*10 ⁻³	15.880	0.3500	42.25	2.21*10 ⁻⁶	0.0351	35.1
0.90	11.79*10 ⁻⁵	0.045	2.62*10 ⁻³	15.410	0.1700	38.00	1.87*10 ⁻⁶	0.0289	28.9
1.00	3.51*10 ⁻⁵	0.045	7.80*10 ⁻³	15.000	0.0520	32.10	1.17*10 ⁻⁶	0.0176	17.6
1.20	1.55*10 ⁻⁵	0.045	3.44*10 ⁻⁴	14.350	0.0240	29.87	7.80*10 ⁻⁷	0.0112	11.2
DMFC-800 1.25	1.28*10 ⁻⁵	0.045	2.84*10 ⁻⁴	14.210	0.0200	29.26	7.60*10 ⁻⁷	0.0108	10.8
1.40	0.89*10 ⁻⁵	0.045	1.97*10 ⁻⁴	13.850	-	28.50	-	-	-
1.50	0.63*10 ⁻⁵	0.045	1.40*10 ⁻⁴	13.640	-	28.35	-	-	-
1.60	0.39*10 ⁻⁵	0.045	8.61*10 ⁻⁵	13.450	-	26.50	-	-	-
1.80	0.15*10 ⁻⁵	0.045	3.28*10 ⁻⁵	13.130	-	25.77	-	-	-
2.00	0.08*10 ⁻⁵	0.045	1.82*10 ⁻⁵	13.000	-	25.60	-	-	-
2.50	0.51*10 ⁻⁶	0.045	1.13*10 ⁻⁵	12.355	-	25.57	-	-	-
3.00	0.39*10 ⁻⁶	0.045	8.65*10 ⁻⁶	12.000	-	25.52	-	-	-

Çizelge 4.3. CEM I 42.5 R tipi çimentoyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarının dinamik viskozite değerlerinin hesap çizelgesi.

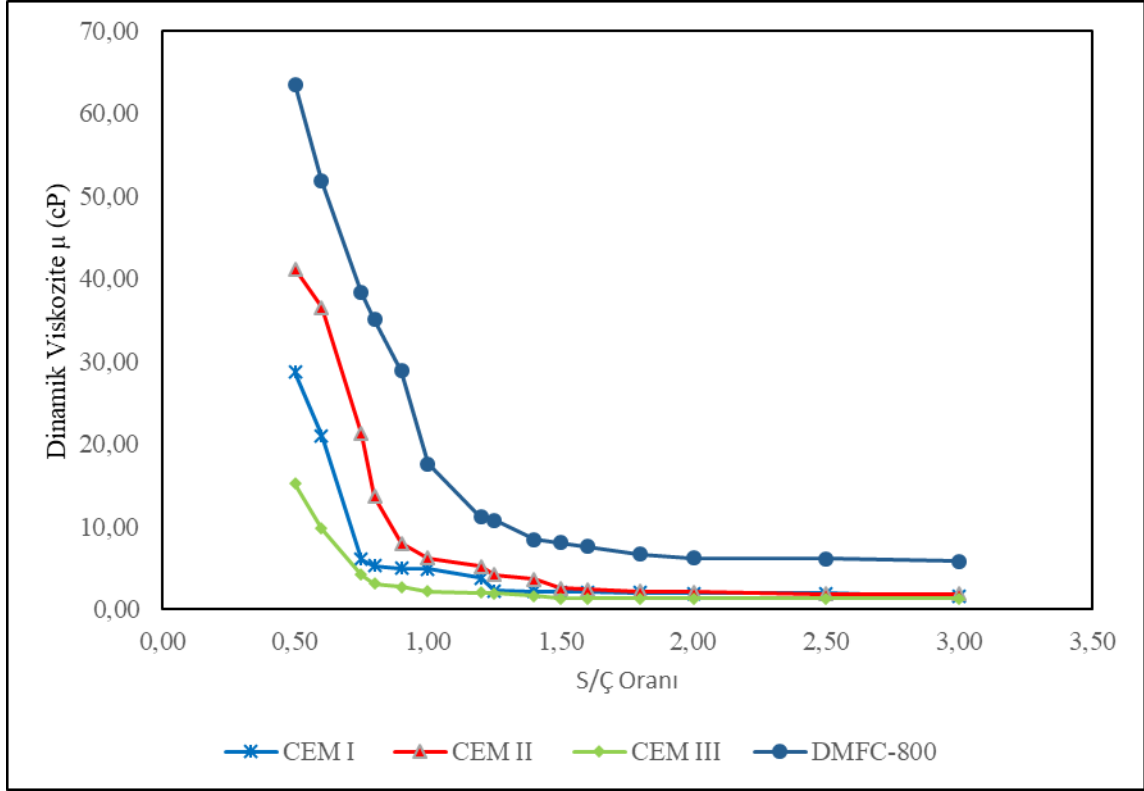
S/Ç	ΔW (kN)	2A (m ²)	τ_0 (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	τ/γ (mm)	Akış zamanı (s)	μ/γ (m.s)	μ (Pa.s=N.s/m ²)	μ (Pa.s*1000)
0.50	165.35*10 ⁻⁵	0.045	0.0367	18.281	2.01	72.32	1.57*10 ⁻⁶	0.0287	28.70
0.60	142.35*10 ⁻⁵	0.045	0.0315	17.382	1.82	62.41	1.21*10 ⁻⁶	0.021	21.00
0.75	119.90*10 ⁻⁵	0.045	0.0266	16.347	1.63	36	3.73*10 ⁻⁷	0.0061	6.10
0.80	81.68*10 ⁻⁵	0.045	0.0181	16.064	1.13	32.2	3.30*10 ⁻⁷	0.0053	5.30
0.90	68.65*10 ⁻⁵	0.045	0.0152	15.567	0.98	31	3.21*10 ⁻⁷	0.005	5.00
1.00	57.25*10 ⁻⁵	0.045	0.0127	15.146	0.84	29.34	3.23*10 ⁻⁷	0.0049	4.90
1.20	51.43*10 ⁻⁵	0.045	0.0114	14.469	-	28.36	-	-	-
CEM I 1.25	46.42*10 ⁻⁵	0.045	0.0103	14.327	-	27.9	-	-	-
1.40	38.29*10 ⁻⁵	0.045	0.0085	13.949	-	27.53	-	-	-
1.50	33.98*10 ⁻⁵	0.045	0.0075	13.732	-	27.44	-	-	-
1.60	29.85*10 ⁻⁵	0.045	0.0066	13.538	-	27.38	-	-	-
1.80	21.98*10 ⁻⁵	0.045	0.0049	13.204	-	26.65	-	-	-
2.00	14.54*10 ⁻⁵	0.045	0.0032	12.928	-	26.31	-	-	-
2.50	7.26*10 ⁻⁵	0.045	0.0016	12.409	-	26.29	-	-	-
3.00	4.87*10 ⁻⁵	0.045	0.0011	12.046	-	26	-	-	-

Çizelge 4.4. CEM II 42.5 A-M (P-L) tipi çimentoyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarının dinamik viskozite değerlerinin hesap çizelgesi.

S/Ç	$\Delta W(\text{kN})$	$2A (\text{m}^2)$	$T_0(\text{kN/m}^2)$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$T/\gamma(\text{mm})$	Akış zamanı (s)	$\mu/\gamma(\text{m.s})$	$\mu(\text{Pa.s}=\text{N.s/m}^2)$	$\mu (\text{Pa.s*1000})$
0.50	$213.62*10^{-5}$	0.045	0.0475	18.258	2.6	83.5	$2.25*10^{-6}$	0.0412	41.20
0.60	$187.51*10^{-5}$	0.045	0.0417	17.362	2.4	71.64	$2.10*10^{-6}$	0.0365	36.50
0.75	$41.16*10^{-5}$	0.045	0.0091	16.332	0.56	40.5	$1.30*10^{-6}$	0.0213	21.30
0.80	$37.56*10^{-5}$	0.045	0.0083	16.049	0.52	36.34	$8.53*10^{-7}$	0.0137	13.70
0.90	$35.07*10^{-5}$	0.045	0.0078	15.554	0.501	32	$5.14*10^{-7}$	0.008	8.00
1.00	$32.14*10^{-5}$	0.045	0.0071	15.134	0.472	30.5	$4.10*10^{-7}$	0.0062	6.20
1.20	$30.26*10^{-5}$	0.045	0.0067	14.459	0.465	29.8	$3.59*10^{-7}$	0.0052	5.20
CEM II 1.25	$27.77*10^{-5}$	0.045	0.0062	14.317	0.431	29.5	$2.92*10^{-7}$	0.004188	4.19
1.40	$24.09*10^{-5}$	0.045	0.0054	13.941	-	28.1	-	-	-
1.50	$22.36*10^{-5}$	0.045	0.0050	13.725	-	27.65	-	-	-
1.60	$19.79*10^{-5}$	0.045	0.0044	13.531	-	27.43	-	-	-
1.80	$17.70*10^{-5}$	0.045	0.0039	13.198	-	27.28	-	-	-
2.00	$14.77*10^{-5}$	0.045	0.0033	12.922	-	27.2	-	-	-
2.50	$10.77*10^{-5}$	0.045	0.0024	12.405	-	26	-	-	-
3.00	$9.48*10^{-5}$	0.045	0.0021	12.043	-	26	-	-	-

Çizelge 4.5. CEM III 42.5 A tipi çimentoyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarının dinamik viskozite değerlerinin hesap çizelgesi.

S/Ç	$\Delta W(\text{kN})$	2A (m ²)	$\tau_0(\text{kN/m}^2)$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$\tau/\gamma(\text{mm})$	Akış zamanı (s)	$\mu/\gamma(\text{m.s})$	$\mu(\text{Pa.s}=\text{N.s/m}^2)$	$\mu (\text{Pa.s}*1000)$
0.50	$185.55*10^{-5}$	0.045	0.0412	17.928	2.3	62	$8.48*10^{-7}$	0.0152	15.20
0.60	$167.57*10^{-5}$	0.045	0.0372	17.081	2.18	50	$5.74*10^{-7}$	0.0098	9.80
0.75	$94.21*10^{-5}$	0.045	0.0209	16.104	1.3	34	$2.60*10^{-7}$	0.0042	4.20
0.80	$84.09*10^{-5}$	0.045	0.0187	15.835	1.18	31.2	$1.96*10^{-7}$	0.0031	3.10
0.90	$73.98*10^{-5}$	0.045	0.0164	15.363	1.07	29.6	$1.75*10^{-7}$	0.0027	2.70
1.00	$42.42*10^{-5}$	0.045	0.0094	14.962	-	28.5	-	-	-
1.20	$28.99*10^{-5}$	0.045	0.0064	14.316	-	27.91	-	-	-
1.25	$21.70*10^{-5}$	0.045	0.0048	14.180	-	27.5	-	-	-
1.40	$17.41*10^{-5}$	0.045	0.0039	13.819	-	26.43	-	-	-
1.50	$14.70*10^{-5}$	0.045	0.0033	13.611	-	26	-	-	-
1.60	$12.69*10^{-5}$	0.045	0.0028	13.425	-	26	-	-	-
1.80	$11.20*10^{-5}$	0.045	0.0025	13.104	-	26	-	-	-
2.00	$9.24*10^{-5}$	0.045	0.0021	12.839	-	26	-	-	-
2.50	$7.77*10^{-5}$	0.045	0.0017	12.338	-	26	-	-	-
3.00	$6.47*10^{-5}$	0.045	0.0014	11.988	-	26	-	-	-



Şekil 4.2. Çimento enjeksiyonlarının dinamik viskozitelerinin S/Ç oranına göre değişimi.

Plaka kohezyon ölçer yöntemiyle belirlenen dinamik viskozite değerlerinin, karışımındaki su miktarına bağlı değişimi Marsh hunisi akma zamanı değerlerinin su miktarıyla değişimine benzer eğilimde olmuştur. Dinamik viskozite değerleri plaka kohezyon ölçer yönteminin mekanizması gereği Marsh hunisi akış zamanı değerlerinin bir fonksiyonu olsa da bu viskozite değerleri ile akış zamanı değerleri arasında anlamlı oransal bir ilişkisi gözlenmemiştir.

İnce taneli DMFC-800 çimentosunun enjeksiyon karışımları viskozitesi en yüksek karışımlardır. Yüksek özgül yüzey alanı çimentonun hızlı reaksiyon vermesine ve dolayısıyla işlenebilirliğin düşmesine sebep olmaktadır (Chen ve ark., 2012; Dils ve ark., 2013; Mork ve ark., 1997). DMFC-800 çimentosunun enjeksiyon karışımlarının S/Ç oranı 4.0' e kadar çıkarıldığı durumda bile diğer çimentolarla hazırlanan enjeksiyonlardan daha yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.2.).

CEM II / A-M (P-L) 42.5 N çimentosu kullanılan enjeksiyonlarda ince taneli çimentonun ardından viskozitesi en yüksek karışımlar elde edilmiştir. Bu çimento tipinin içindeki silisyum bileşikleri içeren doğal puzolanik katkılar çimento enjeksiyonlarının viskozitelerinin artmasına neden olmuştur. Silisyum içeren bileşiklerin yüksek reaktiflik göstermiş karışımın su ihtiyacını artırmıştır (Benaicha ve

ark., 2015; Collins ve Sanjayan, 1999). Bu durum CEM II çimentosuyla hazırlanan enjeksiyon karışımlarının aynı S/Ç oranında hazırlanan CEM I ve CEM III içerikli enjeksiyon karışımlarından daha yüksek viskoziteye sahip olmasına neden olmuştur (R.S. Ahari ve ark., 2015; Zhang ve Han, 2000; Ahari ve ark., 2015).

CEM III / A 42.5 N tipi çimento ile hazırlanan çimento enjeksiyonları en düşük viskozite değerlerini vermiştir. Bu çimentonun içerdiği YFC karışımının su ihtiyacını azaltarak daha kolay işlenebilir hale getirmektedir. Park ve arkadaşları (2005), YFC içeren çimentolu karışımların akma gerilmesinin önce azaldığını ve sonra arttığını, ancak plastik viskozitenin YFC içeriğinin artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir. Ahari ve arkadaşları (2015), Portland çimentosunun YFC ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanıldığı durumlarda, karışımların akma gerilmesinin ve plastik viskozitesinin S/Ç oranından bağımsız olarak azaldığını belirtmişlerdir.

CEM I 42.5 R katkısız Portland çimentosu burada da referans çimento tipi olarak değerlendirilebilir. Bu çimentonun gösterdiği özellikler, diğer çimentoların içerdiği katkı malzemelerinin ve özgül yüzey alanının reolojik özelliklere etkisinin anlaşılması açısından önemlidir. CEM I 42.5 R katkısız Portland çimentosu karışımın viskozitesini etkileyecek bir katkı içermediğinden ve özgül yüzey alanı diğer çimentolara göre en küçük olan çimento tipi olduğundan DMFC-800 ve CEM II tip çimentolardan daha akışkan; CEM III tipi çimentoya göre daha viskoz özellik göstermiştir.

4.1.3. Sedimentasyon deneyi sonuçları

Dört farklı tip çimentonun 0.5 ile 2.5 arasında S/Ç oranlarında enjeksiyon karışımları hazırlanarak 32 adet sedimentasyon deneyi yapılmıştır. Çizelge 4.6.- 4.9' da farklı zaman aralıklarında ölçülen çökme yüzdeleri verilmiştir.

CEM I tipi çimentosuyla hazırlanan enjeksiyonlar hiçbir S/Ç oranında kararlı özellik göstermemiştir. Bu çimentonun özgül yüzey alanı diğer çimentolara göre en küçük olduğunda suyla reaksiyona giren yüzey alanı en az olan çimentodur ve bundan dolayı kararlılık özelliği en kötü olan çimento tipidir.

CEM II ve CEM II tipi çimentolarla hazırlanan enjeksiyonlar 0.5 ve 0.6 S/Ç oranlarında kararlı özellik göstermiştir. Bu çimentoların içerisinde bulunan mineral katkılar ortalama yüzey alanını artırdığından sulu süspansiyonları katkısız Portland çimentosuna göre daha kararlı özellik göstermiştir. Çökme yüzdeleri incelendiğinde CEM III tipi çimentonun CEM II tipi çimentoya göre daha düşük oranlarda çökeldiği

görülmektedir. Küçük de olsa bu fark da CEM III çimentosunun özgül yüzey alanının CEM II çimentosuna göre daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır.

DMFC-800 ince taneli çimentosu diğer çimentolara göre çok daha büyük özgül yüzey alanına sahiptir ve beklendiği gibi bu çimentoyla hazırlanan enjeksiyon karışımları diğer çimentolara kıyasla çok daha kararlı özellik göstermiştir. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan enjeksiyonların S/Ç oranı 0.5 ve 0.6 iken hiç çökme gözlenmezken S/Ç oranı 0.75 ve 1.0 olduğunda %1' den daha küçük oranlarda çökme gözlenmiştir. S/Ç oranı 1.25 olduğu durumda dahi ince taneli çimentonun enjeksiyon karışımı kararlı özellik göstermiştir. Çimento enjeksiyonlarının sedimentasyon deney sonuçlarına göre kararlılık durumları Çizelge. 4. 10.' da verilmiştir.

Çizelge 4.6. CEM I 42.5 R çimentosuna ait sedimentasyon yüzdeleri

S/Ç	0.5	0.6	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
t (dk)	Sedimentasyon oranı (%)							
15	0.2	1.2	1.7	4.1	5.5	6.2	8.5	9.7
30	0.5	2.3	2.9	7.2	8.6	10.1	12.6	14.0
45	1.0	3.1	5.2	10.1	11.7	13.2	15.7	18.9
60	1.2	4.3	6.9	12.4	14.8	16.7	18.9	26.8
70	1.7	5.1	9.1	14.3	17.6	19.5	22.4	31.4
80	2.3	6.3	10.8	16.5	21.7	24.8	27.6	38.7
90	2.6	7.7	12.3	18.6	23.8	26.8	31.3	44.8
100	3.8	8.4	15.2	20.8	28.4	31.5	39.7	51.1
110	5.1	9.2	16.8	23.5	30.9	36.1	48.1	58.0
120	5.8	10.3	18.1	26.5	34.0	39.0	54.0	62.0

Çizelge 4.7. CEM II A-M(P-L) 42.5 N çimentosuna ait sedimentasyon yüzdeleri

S/Ç	0.5	0.6	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
t (dk)	Sedimentasyon oranı (%)							
15	0.1	0.2	0.6	1.5	2.2	3.6	7.2	8.1
30	0.35	0.5	1.0	2.1	3.5	4.7	11.7	13.2
45	0.6	0.8	2.2	3.4	4.8	7.8	14.8	17.4
60	0.68	0.9	3.9	4.9	6.2	11.2	17.9	25.2
70	0.76	1.0	5.1	6.4	7.6	14.3	21.8	30.1
80	0.84	1.2	6.3	8.1	9.1	17.8	27.1	37.4
90	0.91	1.5	8.4	10.9	12	20.4	30.4	42.5
100	0.96	1.9	10.7	12.7	14.5	24.2	38.5	48.7
110	1.0	2.0	12.6	14.8	18.1	27.6	46.2	55.2
120	1.12	2.15	14.8	16.5	20.7	31.5	53.0	60.0

Çizelge 4.8. CEM III A 42.5 N çimentosuna ait sedimentasyon yüzdeleri

S/Ç	0.5	0.6	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
t (dk)	Sedimentasyon oranı (%)							
15	0.1	0.2	0.5	1.3	1.9	2.5	6.0	8.6
30	0.3	0.45	0.8	2.5	2.7	4.3	7.5	14.2
45	0.5	0.55	3.2	3.8	4.5	7.4	9.1	18.9
60	0.65	0.7	4.1	4.4	5.9	10.2	14.2	23.8
70	0.75	0.85	4.9	5.7	6.8	12.8	19.5	28.5
80	0.85	1	5.5	6.1	8.9	14.9	26.3	34.2
90	0.8	1.2	6.1	6.4	12.2	17.1	31.4	38.3
100	0.85	1.5	6.8	7.3	15.5	20.8	36.7	43.1
110	0.9	1.7	7.4	9.2	17.1	24.2	40.4	48.5
120	0.95	1.98	8.3	12.0	18.0	26.5	44.0	52.0

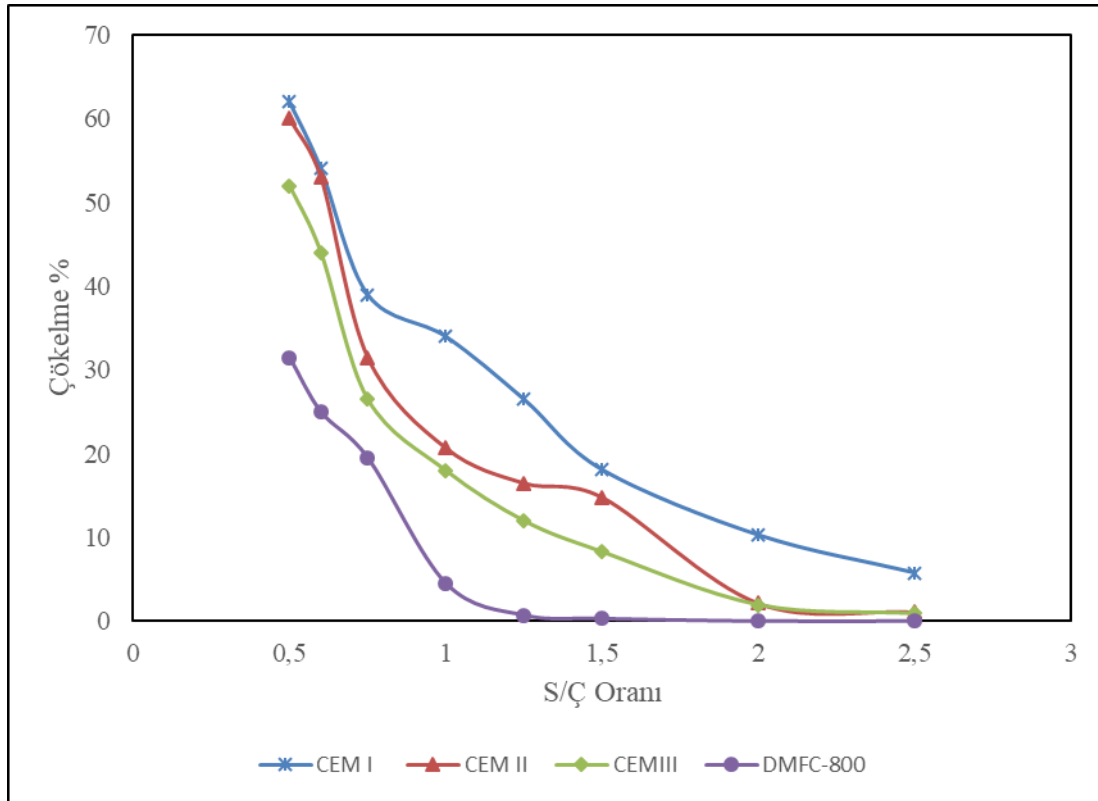
Çizelge 4.9. DMFC-800 çimentosuna ait sedimentasyon yüzdeleri

S/Ç	0.5	0.6	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
t (dk)	Sedimentasyon oranı (%)							
15	0	0	0	0	0	1.8	2.5	3.1
30	0	0	0	0	0.5	3.5	4.0	4.2
45	0	0	0	0	1.0	5.2	7.2	7.6
60	0	0	0	0.1	1.6	8.5	10.2	11
70	0	0	0.1	0.2	2.0	11.2	12.7	13.9
80	0	0	0.15	0.4	2.4	13.4	14.6	17.2
90	0	0	0.2	0.5	3.0	15	17.3	21.4
100	0	0	0.22	0.65	3.5	16.2	20.1	24.3
110	0	0	0.25	0.6	4.1	17.8	22.0	26.7
120	0	0	0.3	0.7	4.5	19.5	25.0	31.5

Çizelge 4.10. Sedimentasyon deney sonuçlarına göre enjeksiyonların kararlılık durumları

S/Ç	CEM I		CEM II		CEM III		DMFC-800	
	Çökme (%)	Durum	Çökme (%)	Durum	Çökme (%)	Durum	Çökme (%)	Durum
0.5	5.8	Kararsız	1.12	Kararlı	0.95	Kararlı	0	Kararlı
0.6	10.3	Kararsız	2.15	Kararlı	1.98	Kararlı	0	Kararlı
0.75	18.1	Kararsız	14.8	Kararsız	8.3	Kararsız	0.3	Kararlı
1	26.5	Kararsız	16.5	Kararsız	12	Kararsız	0.7	Kararlı
1.25	34	Kararsız	20.7	Kararsız	18	Kararsız	4.5	Kararlı
1.5	39	Kararsız	31.5	Kararsız	26.5	Kararsız	19.5	Kararsız
2	54	Kararsız	53	Kararsız	44	Kararsız	25	Kararsız
2.5	62	Kararsız	60	Kararsız	52	Kararsız	31.5	Kararsız

Çimentoların stabilite durumlarının S/Ç oranına bağlı değişimi Şekil 4.3.' de verilmiştir.



Şekil 4.3. Çimento enjeksiyonlarının çökme yüzdelerinin S/Ç oranına göre değişimi.

4.1.4. Vicat iğnesi ile belirlenen priz başlangıç ve bitiş süreleri

Çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri S/Ç oranı 0.4 – 0.75 arası değişen dört farklı oran için belirlenmiştir. S/Ç oranlarına göre priz başlangıç ve bitiş süreleri Çizelge 4.11.'de verilmiştir.

DMFC-800 ince taneli çimentosunun priz başlangıç ve bitiş diğer çimento tiplerinden önce gerçekleşmiştir. İnce taneli çimento diğer çimentolara göre çok daha büyük özgül yüzey alanına sahip olduğu için suyla etkileşime giren yüzey alanı çok daha fazla olmakta ve daha erken priz almaktadır (Mehta, 1996).

Priz süreleri küçükten büyüğe sıralandığında ince taneli çimentonun ardından en erken priz alan çimento CEM I çimentosu olmuştur. İçerdiği C_3S bileşiği bu çimentonun priz süresini öne çekmektedir, ayrıca CEM I çimentosunun katkısız olması yani yüksek oranda klinkerden oluşması katkılı çimentolara göre daha erken priz almasında etkili olmuştur.

CEM II ve CEM III tipi çimentolar katkıli çimento sınıfındadır. Bu çimentoların içerdiği puzolanik katkılar tek başına bağlayıcılık özelliği göstermezken ileri yaşlarda çimentonun hidrasyon reaksiyonunu geliştirmektedirler. Priz alma hususuna gelindiğinde, bu çimentoların içerdiği katkılar ağırlıkça yüzde olarak çimentonun yerini aldıklarından daha düşük oranda klinker içermektedirler ve dolayısıyla daha geç priz almaktadırlar (Pantazopoulos ve ark., 2012; Vipulanandan ve Shenoy, 1992; Perret ve ark., 1997).

CEM III tipi çimentonun en geç priz alan çimento olduğu görülmüştür. CEM II ve CEM III çimentolarının priz sürelerinde görülen farklılığın nedeni içerdikleri mineral katkının ağırlıkça yüzdesinin farklı olmasıdır. CEM III çimentosu yaklaşık %55 oranında katkı içerirken, CEM II çimentosu içerisinde yaklaşık %20 oranında katkı bulunmaktadır.

Çizelge 4.11. Vicat iğnesi yöntemiyle belirlenen priz başlangıç ve bitiş süreleri

S/Ç	CEM I 42.5 R		CEM II 42.5 (P-L)		CEM III 42.5 A		DMFC-800	
	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş
0.40	200	255	217	285	262	330	186	240
0.50	240	300	293	360	507	570	288	345
0.60	302	405	310	420	542	630	297	375
0.75	360	480	466	570	551	660	375	465

Yukarıda sonuçları verilen çalışmalar sonucunda küçük ve büyük ölçekli deneylerde kullanılmak için seçilen S/Ç oranları Tablo 4.12.' de verilmiştir. S/Ç oranları seçilirken özellikle model JG kolonlarının imal edilmesi göz önünde bulundurularak enjekte edilebilir enjeksiyon karışımları kullanılmıştır. Tüm çimento tipleri için 0.75 ile 1.5 arası S/Ç oranlarının kullanılmasına karar verilmiştir. İnce taneli çimento yüksek S/Ç oranlarında da etkili olabileceğinden ek olarak 2.0, 2.5 ve 3.0 S/Ç oranlarında enjeksiyon karışımları da kullanılmıştır. Toplamda 19 farklı tasarım uygulanmıştır.

Çizelge 4.12. Reolojik özellik deneyleri sonucunda belirlenen S/Ç oranları

Kolon No	Çimento	S/Ç
1	CEM I 42,5 R	0,75
2	CEM I 42,5 R	1,0
3	CEM I 42,5 R	1,25
4	CEM I 42,5 R	1,5
5	CEM II / A-M (P-L) 42.5 N	0,75
6	CEM II / A-M (P-L) 42.5 N	1,0
7	CEM II / A-M (P-L) 42.5 N	1,25
8	CEM II / A-M (P-L) 42.5 N	1,5
9	CEM III / A 42.5 N	0,75
10	CEM III / A 42.5 N	1,0
11	CEM III / A 42.5 N	1,25
12	CEM III / A 42.5 N	1,5
13	DMFC 800	0,75
14	DMFC 800	1,0
15	DMFC 800	1,25
16	DMFC 800	1,5
17	DMFC 800	2,0
18	DMFC 800	2,5
19	DMFC 800	3,0

4.1.5. Enjeksiyon reolojik özelliklerinin büyük ölçekli JG kolonlarının oluşumuna etkisi

90 günlük kür süresinin sonunda nemli zemin ortamından çıkarılan model JG kolonlarının çap, boy ve biçim özellikleri incelenmiştir. Her bir kolona ait çevre ölçümleri, bu çevre ölçümüne bağlı hesaplanan yaklaşık çap ölçümleri ve boy ölçümleri Çizelge 4.13.' de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Model JG kolonların çevre, çap ve boy ölçümleri

Çimento Tipi	Kolon No	S/Ç	Çevre 1 (cm)	Çevre 2 (cm)	Çap (cm)	Boy (cm)
CEM I	1	0.75	88	88	28.00	29
	2	1.00	92	93	29.43	31
	3	1.25	96	100	31.18	29.5
	4	1.50	103.5	104.5	33.09	29
CEM II*	-	0.75	83	80	25.93	23
CEM II	5	0.75	91	86	28.16	30
	6	1.00	97	99	31.18	30.5
	7	1.25	101	102	32.30	30
	8	1.50	103	102	32.61	30.5
CEM III	9	0.75	92	93	29.43	30.5
	10	1.00	100	100.5	31.90	29
	11	1.25	103	104	32.93	29.5
	12	1.50	107.5	108	34.28	30.5
DMFC-800	13	0.75	95	96	30.39	30
	14	1.00	102	103	32.61	30.5
	15	1.25	107.5	104	33.65	31
	16	1.50	109	110	34.84	31.5
	17	2.00	114	109	35.48	32
	18	2.50	112	112	35.64	31
	19	3.00	114	112	35.95	31.5

*CEM II tipi çimentoyla üretilen JG kolonlarından biri, varile kum yerleştirilmesi esnasında yapılan bir hata sonucu rölatif sıklık oranı %50 yerine %60 olan zemin içerisinde oluşturulmuştur. Bu kolon çalışma verileri dışında tutulmuş olup zemin sıklığının kolon boyutlarına etkisini göstermesi açısından örnek olarak yalnızca çap ve boy bilgileri verilmiştir.

Kolonların çap ve boy ölçümleri incelendiğinde enjeksiyonun viskozitesi azaldıkça yani enjeksiyonun S/Ç oranı arttıkça kolon çapları artmıştır. Viskozitenin yanı sıra enjeksiyonun zemine nüfuz etme kabiliyetini etkileyen en önemli faktör çimento tane büyüklüğü olmuştur. DMFC-800 ince taneli çimentosuyla hazırlanan kolonların özellikle S/Ç oranının düşük olduğu yüksek viskoziteye sahip enjeksiyonlarda diğer çimento tipleriyle hazırlanan kolonlara göre daha büyük çapta oldukları görülmüştür.

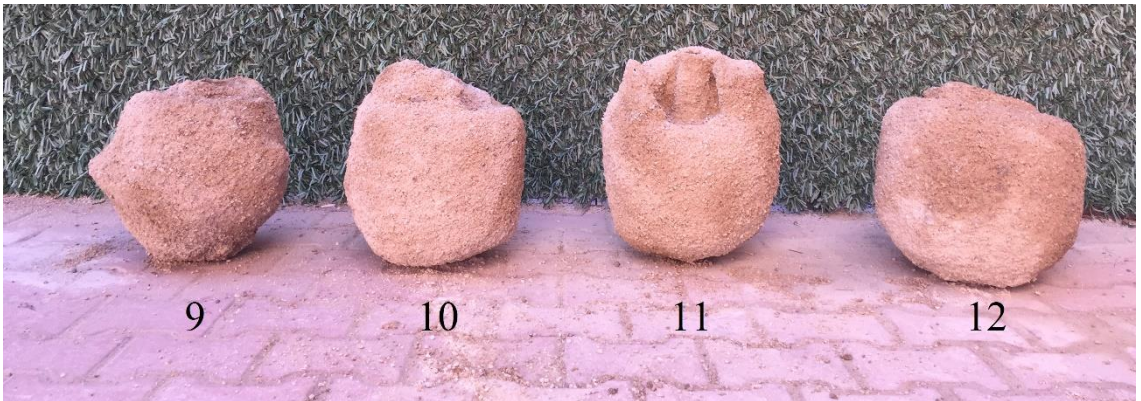
Üretilen JG kolonlarının çimento gruplarına göre ayrılarak çekilmiş fotoğrafları Şekil 4.4.-5.-6.-7.' de verilmiştir.



Şekil 4.4. CEM I çimentosuyla üretilen JG kolonları.



Şekil 4.5. CEM II çimentosuyla üretilen JG kolonları



Şekil 4.6. CEM III çimentosuyla üretilen JG kolonları.



Şekil 4.7. DMFC-800 çimentosuyla üretilen JG kolonları.

CEM I, CEM II ve CEM III tipi çimentoların S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonlarıyla hazırlanan 1, 5 ve 9 numaralı kolonların yüzey biçimlerine bakıldığında düzgün bir silindir şeklinde olmadığı kolonlarda bölgesel şekil bozuklukları görülmektedir. DMFC-800 ince taneli çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonuyla hazırlanan 13 numaralı kolona bakıldığında ise homojen bir silindir formda olduğu görülmektedir. İnce taneli çimentonun düşük su içerikli enjeksiyonları yüksek viskozite değerine sahip olsa da zemine nüfuz etme kabiliyeti sayesinde daha homojen bir kolon yapısı elde edilmesini sağlamıştır. S/Ç oranının artmasıyla tüm çimento tipleriyle hazırlanan kolonlar daha düzgün bir şekle sahip olmuştur.

S/Ç oranı 0.75 olan kolonların çapları kıyaslandığında, çap değerleri küçükten büyüğe sırasıyla CEM II, CEM II, CEM III ve DMFC-800 şeklindedir. CEM I çimentosu CEM II çimentosuna göre daha düşük viskozite değerine sahip olmasına rağmen ortalama tane büyüklüğü diğer tüm çimentolardan daha fazla olduğu için en küçük çaplı kolon CEM I çimentosuna ait olmuştur. CEM II çimentosu ince taneli çimentodan sonra en yüksek viskozite değerine sahip çimentodur ve CEM I çimentosundan sonra en küçük ortalama tane büyüklüğüne sahiptir. Hem viskoz bir enjeksiyon olması hem de tane büyüklüğü dolayısıyla zemine nüfuz etme kabiliyetinin düşük olması nedeniyle çap sıralamasında CEM I çimentosuyla hazırlanan kolonun ardından CEM II çimentosuyla hazırlanan kolon gelmiştir. CEM III çimentosu düşük viskozitesi sayesinde ince taneli çimentonun ardından çapı en büyük olan kolon oluşumunu sağlamıştır. CEM çimentoları arasında ortalama tane büyüklüğü en fazla olan çimento tipi CEM III' tür. DMFC-800 çimentosu yüksek viskozite değerine sahip olmasına rağmen çok küçük tane boyutu sayesinde yüksek nüfuz etme kabiliyetine sahiptir ve bu çimentoyla oluşturulan kolonların çapı daha diğer çimentolarla oluşturulan kolonlara göre daha büyük olmuştur.

Genel olarak bakıldığında S/Ç oranı arttıkça kolon çapları artış göstermiş ve yine kullanılan enjeksiyonların viskozite ve tane çapına bağlı nüfuz etme kabiliyetlerine paralel sonuçlar elde edilmiştir. Burada kolon çapına etkiyen ana unsur çimentonun zemine nüfuz etme kabiliyeti dolayısıyla çimentonun tane büyüklüğü olmuştur.

Kolon yükseklikleri incelendiğinde çap değerlerindeki kadar değişkenlik olmadığı göze çarpmaktadır. Kolon boyları büyük ölçüde tij çekme hızına bağlıdır. Enjeksiyon miktarı sabit olduğundan düşeyde sabit hızla ilerleyen tijin oluşturduğu kolonların boyları yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Ancak minör seviyede de olsa kolon boylarında görülen farklılığın sebebi atık enjeksiyon miktarıdır. Atık enjeksiyon, zemine nüfuz edemeyen fazla enjeksiyonun tijle zemine arasındaki boşluktan zemin yüzeyine taşmasıyla meydana gelmektedir. Atık enjeksiyon miktarı enjeksiyonların zemine nüfuz etme kabiliyeti arttıkça yani S/Ç oranı arttıkça azalmıştır. Farklı kolonlarda oluşan atık enjeksiyon miktarları Şekil 4.8.' de gösterilmiştir.

DMFC-800 çimentosunun diğer çimento tiplerinden farklı olarak hazırlanan S/Ç oranı 2.0, 2.5, ve 3.0 olan enjeksiyonlarla üretilen JG kolonlarının çap ve boy değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu durumu enjeksiyon viskozitesinin S/Ç oranı 2.0 ve daha büyük değerlerde çok düşük mertebede değişmesine bağlı olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.8. Farklı S/Ç oranlarında oluşan atık enjeksiyon miktarları

4.2. Serbest Basınç ve Yarmada Çekme Deney Sonuçları

4.2.1. Küçük ölçekli numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları

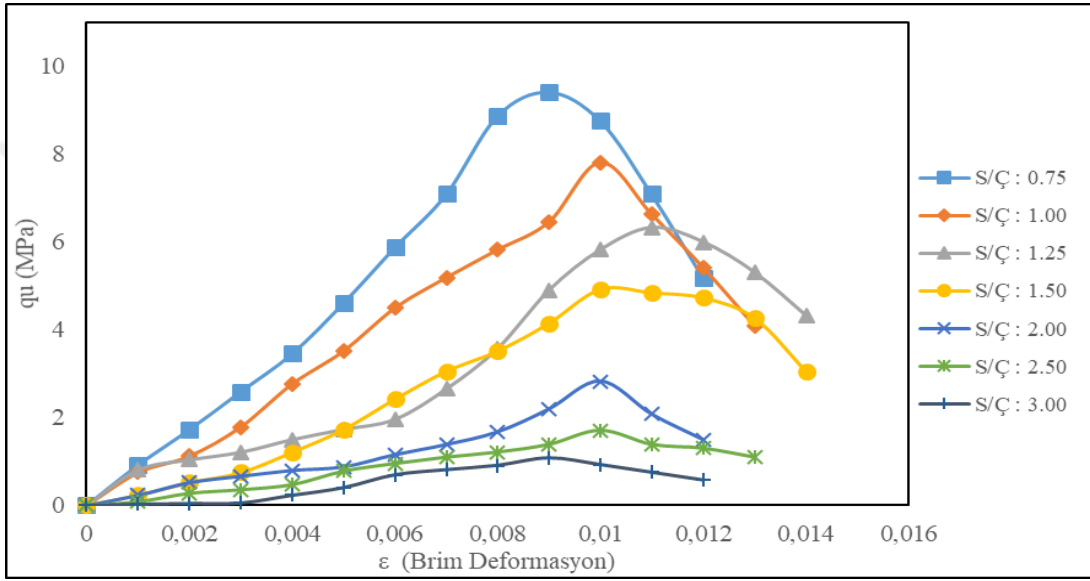
Hazırlanan 50x100 mm boyutlarında silindir numunelere 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda ikişer adet numune üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4.14., 4.15. ve 4.16.' da farklı kür sürelerinde tasarımlar için yapılan her iki serbest basınç deneyinden elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri ve ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 4.14. Küçük boyutlu silindir numunelerin 7 günlük serbest basınç dayanımı sonuçları

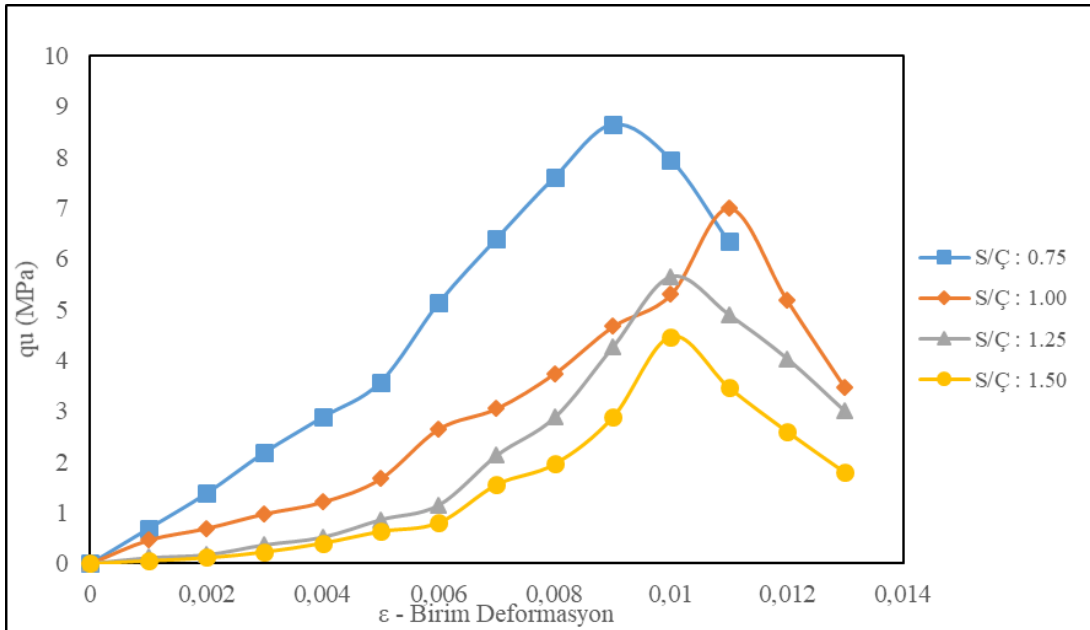
	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
	Serbest Basınç Dayanımları (MPa)											
S/Ç	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}
0.75	9.04	9.79	9.41	7.44	9.86	8.65	8.12	7.80	7.96	5.65	7.19	6.42
1.00	7.49	8.11	7.80	6.73	7.29	7.01	6.09	5.85	5.97	4.49	4.86	4.67
1.25	6.07	6.57	6.32	5.20	6.10	5.65	4.98	4.78	4.88	3.09	4.45	3.77
1.50	4.34	5.52	4.93	4.39	4.57	4.48	4.09	3.63	3.86	2.93	3.18	3.05
2.00	2.71	2.94	2.82									
2.50	1.40	2.01	1.70									
3.00	1.03	1.12	1.08									

Çizelge 4.14.'te verilen küçük numunelerin 7 günlük erken yaş dayanımları incelendiğinde ince taneli DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerin belirgin bir şekilde daha yüksek dayanım gösterdiği görülmektedir. S/Ç oranı 0.75 olan tasarımlarda CEM çimentolu numunelerin dayanımları DMFC-800 kullanılan numunelerin dayanımının %85'i ile %65 arasında değişirken, S/Ç oranı 1.5 olduğunda bu oran %50' ye kadar düşmektedir. İnce taneli çimento büyük özgül yüzey alanı sayesinde diğer çimento tiplerine göre daha hızlı hidrasyon reaksiyonu göstermiş ve yüksek erken yaş dayanımı sağlamıştır. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin serbest basınç deneylerine ait gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) ilişkisi Şekil 4.9.'da verilmiştir. İnce taneli çimentonun ardından CEM I tipi çimento kullanılan numuneler diğer çimento tiplerinden daha yüksek dayanım değerleri vermiştir. CEM I tipi çimento katkısız Portland çimentosu olduğundan mineral katkılı diğer çimento tiplerine göre daha yüksek oranda klinker içermektedir ve dolayısıyla daha yüksek erken yaş dayanımı göstermiştir. CEM I çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin serbest basınç

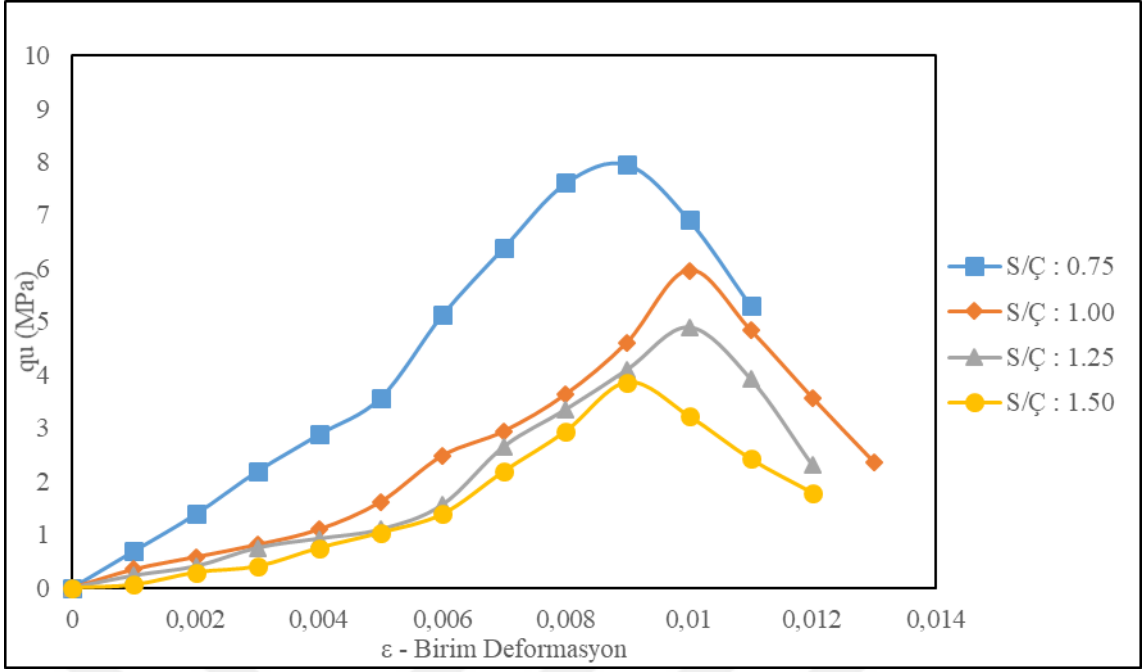
deneylerine ait gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) ilişkisi Şekil 4.10.'da verilmiştir. Portland kompoze çimentosu olarak da adlandırılan CEM II tipi çimento YFC katkılı CEM III çimentosuna göre daha yüksek oranda klinker içerir. Bu nedenle 7 günlük sürede CEM III çimentosuna göre daha yüksek dayanım vermiştir. CEM III çimentosunun klinker oranı %35-40 arası olduğundan 7 günlük dayanım testlerinde en düşük dayanımı veren çimento olmuştur. CEM II ve CEM III çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin serbest basınç deneylerine ait gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) ilişkisi Şekil 4.11 ve Şekil 4.12.'de verilmiştir.



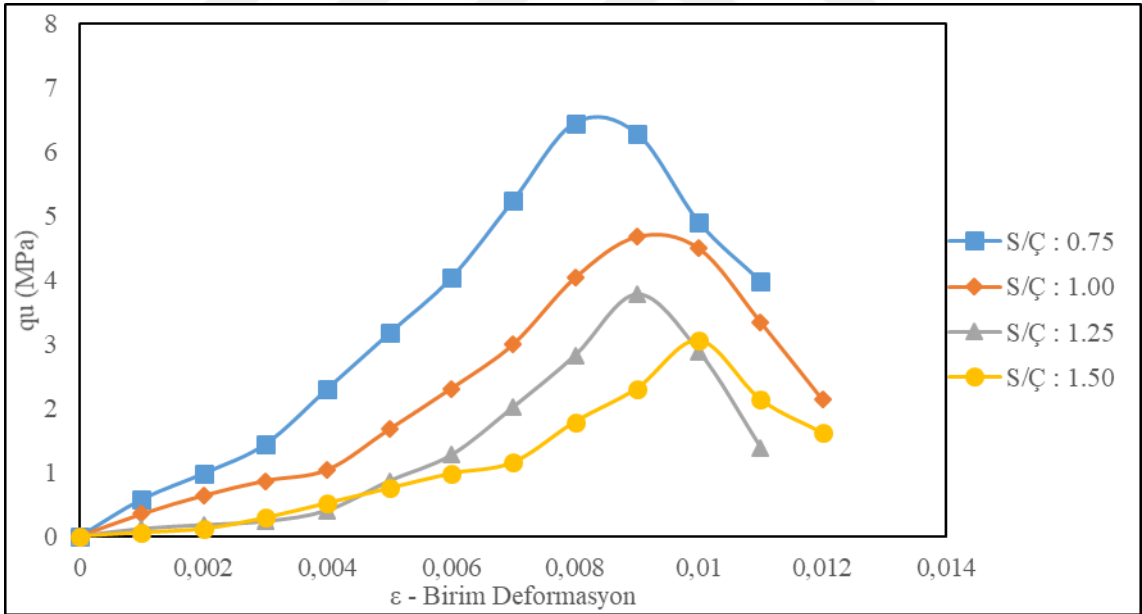
Şekil 4.9. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.



Şekil 4.10. CEM I çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.



Şekil 4.11. CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 7 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.



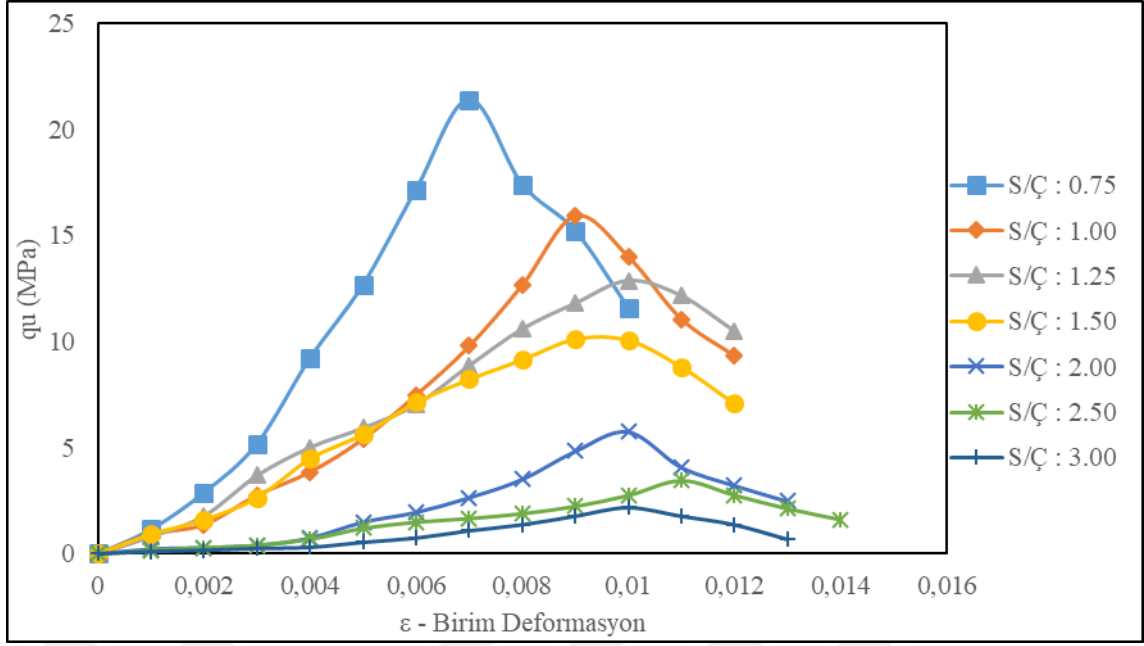
Şekil 4.12. CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin 7 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

Çizelge 4.15. Küçük boyutlu silindir numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı sonuçları

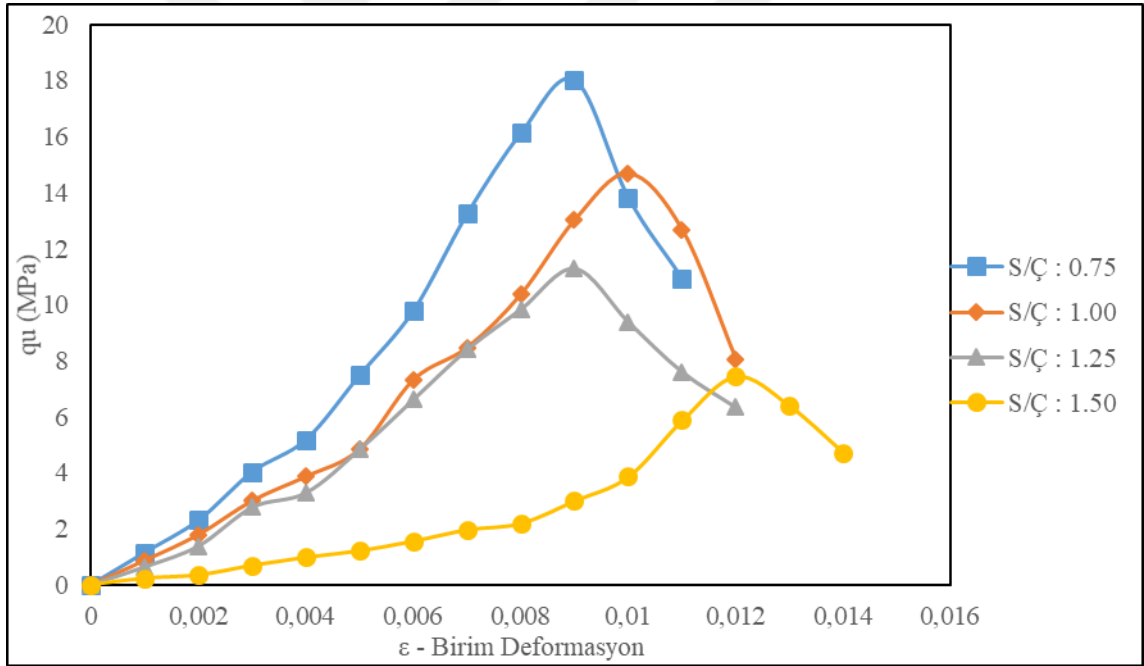
	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
Serbest Basınç Dayanımları (MPa)												
S/Ç	Q _{u1}	Q _{u2}	Q _{ort}	Q _{u1}	Q _{u2}	Q _{ort}	Q _{u1}	Q _{u2}	Q _{ort}	Q _{u1}	Q _{u2}	Q _{ort}
0.75	20.54	22.25	21.39	15.52	20.58	18.05	20.61	19.81	20.21	18.70	23.80	21.25
1.00	15.28	16.56	15.92	14.04	15.22	14.63	15.45	14.84	15.14	14.85	16.09	15.47
1.25	12.39	13.42	12.90	10.40	12.21	11.31	12.63	12.14	12.38	10.25	14.74	12.50
1.50	8.86	11.27	10.07	7.32	7.62	7.47	10.39	9.22	9.80	9.71	10.52	10.12
2.00	5.53	6.00	5.76									
2.50	2.85	4.10	3.48									
3.00	2.11	2.28	2.20									

Beklendiği üzere basınç dayanımlarının S/Ç oranının artışıyla ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür (Çizelge 4.15). Küçük numunelerin 28 günlük dayanımları incelendiğinde çimento tiplerine göre dayanım sıralaması değişmiştir. Puzolanik katkıları içeren CEM II ve CEM III çimentolarıyla hazırlanan numuneler erken yaşlarda daha düşük dayanım vermişken 28 günlük kür süresi sonunda katkısız Portland çimentosu olan CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin ortalama basınç dayanımından daha yüksek sonuçlar vermiştir (Şekil 4.14.). İnce taneli çimentoyla hazırlanan numuneler görece en yüksek dayanım sonuçlarını vermiştir (Şekil 4.13.).

CEM II ve CEM III çimentolarının ince taneli DMFC-800 çimentosuna oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. CEM I tipi çimentoyla hazırlanan numunelerin dayanımı ise diğer çimento tipleriyle hazırlanan numunelerin dayanımlarının yaklaşık %85'i mertebesinde kalmıştır. Katkısız çimento sınıfında olan DMFC-800 ve CEM I çimentolarıyla hazırlanmış numunelerde 7 günden 28 günlük kür süresine çıktığında yaklaşık 2 kat dayanım artışı görülürken; CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerde yaklaşık 2.5 kat, CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerde yaklaşık 3.3 kat dayanım artışı görülmüştür. CEM II çimentosu doğal puzolan içermektedir. CEM III çimentosu ise YFC içermektedir. Bu mineral katkıları sağladıkları puzolanik reaksiyon sayesinde 28 günlük kür süresi boyunca katkısız çimentoya göre daha fazla dayanım artışı elde edilmesini sağlamışlardır. CEM III çimentosunun içerdiği YFC, DMFC-800 çimentosuyla çok yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır (Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.).

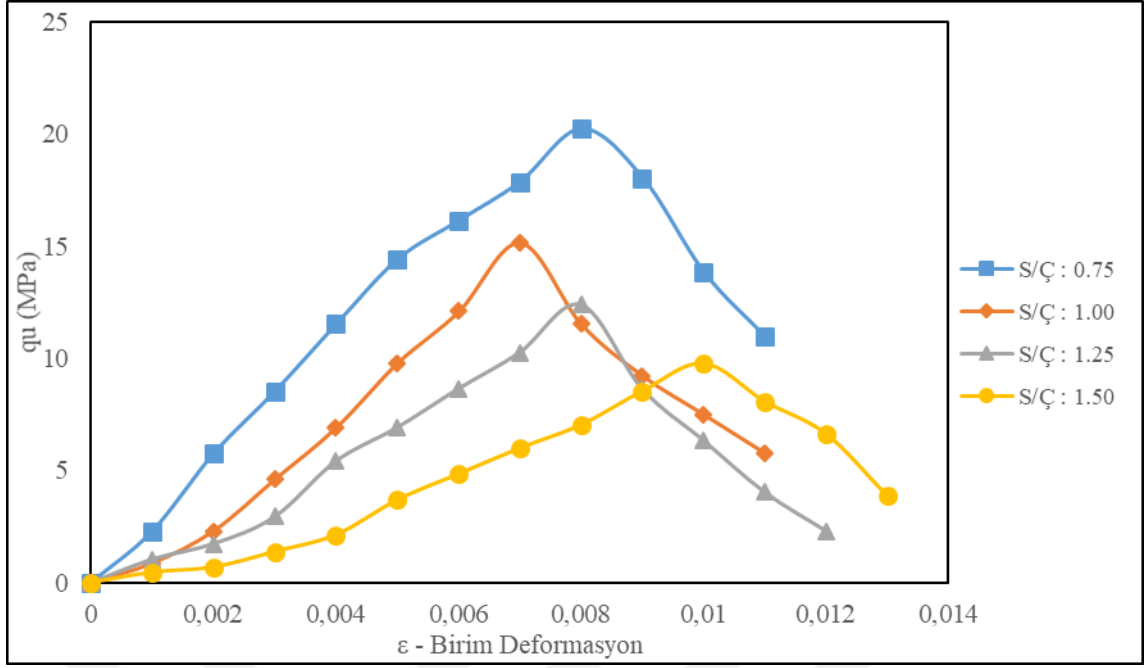


Şekil 4.13. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

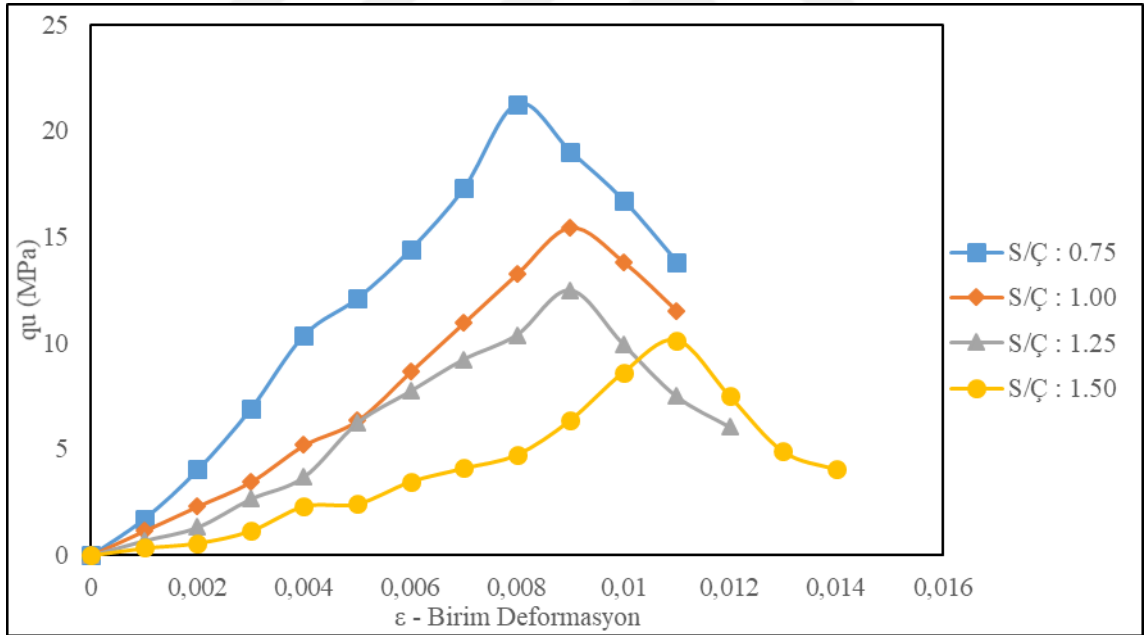


Şekil 4.14. CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerin CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelere göre daha düşük deformasyon değerlerinde kırıldığı yani daha gevrek bir kırılma davranışı gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.15. CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.



Şekil 4.16. CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

Tüm çimento tipleri için enjeksiyonların S/Ç oranı arttıkça numunelerde kırılma davranışının daha sünek olduğu gözlenmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda katkılı CEM II ve CEM III çimentolarının DMFC-800 ince taneli çimentoya yakın bir performans gösterdiği, katkısız Portland çimentosu olan CEM I çimentosundan daha iyi performans gösterdikleri görülmüştür.

Çizelge 4.16. Küçük boyutlu silindir numunelerin 56 günlük serbest basınç dayanımı sonuçları

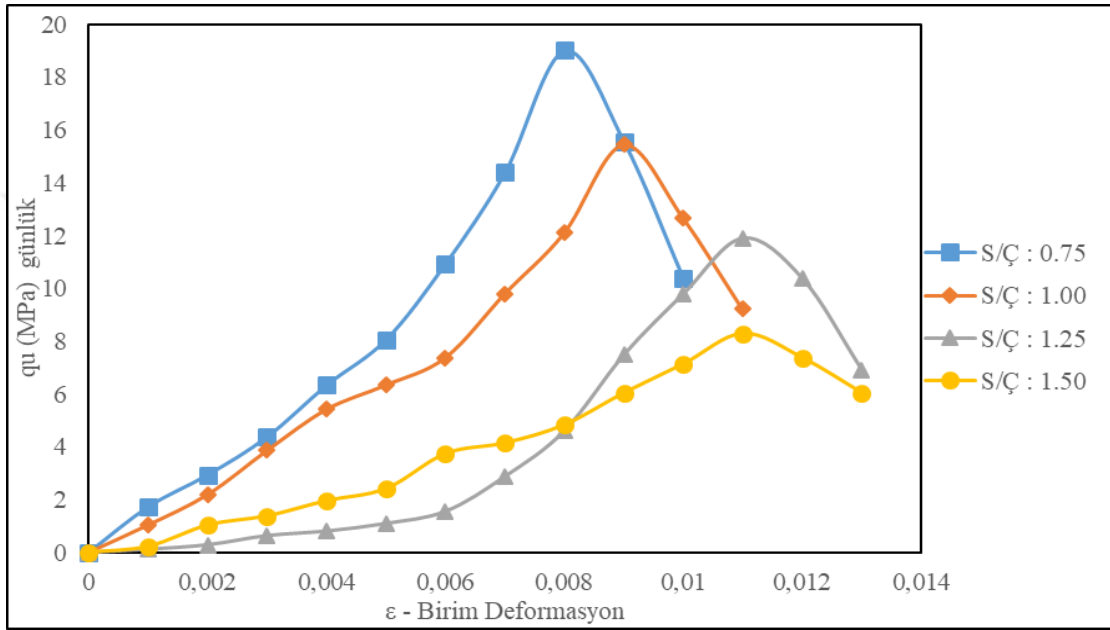
	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
	Serbest Basınç Dayanımları (MPa)											
S/Ç	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}
0.75	21.50	23.30	22.40	16.34	21.66	19.00	23.97	23.03	23.50	22.00	28.00	25.00
1.00	16.70	18.10	17.40	14.78	16.02	15.40	17.96	17.26	17.61	17.47	18.93	18.20
1.25	13.54	14.66	14.10	10.95	12.85	11.90	14.69	14.11	14.40	12.05	17.35	14.70
1.50	9.68	12.32	11.00	8.13	8.47	8.30	12.08	10.72	11.40	11.42	12.38	11.90
2.00	6.05	6.55	6.30									
2.50	3.12	4.48	3.80									
3.00	2.30	2.50	2.40									

Çimentoların uzun vadeli performanslarının değerlendirilebilmesi için 56 günlük küre süresi sonunda serbest basınç deneyleri yapılmış ve serbest basınç mukavemetleri Çizelge 4.16.' da verilmiştir. CEM I katkısız Portland çimentosunun 56 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri 28 günlük serbest basınç mukavemeti değerleriyle karşılaştırıldığında ortalama olarak yaklaşık %5 oranında dayanım artışı olduğu görülmüştür. CEM I çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin basınç deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.17.'de verilmiştir.

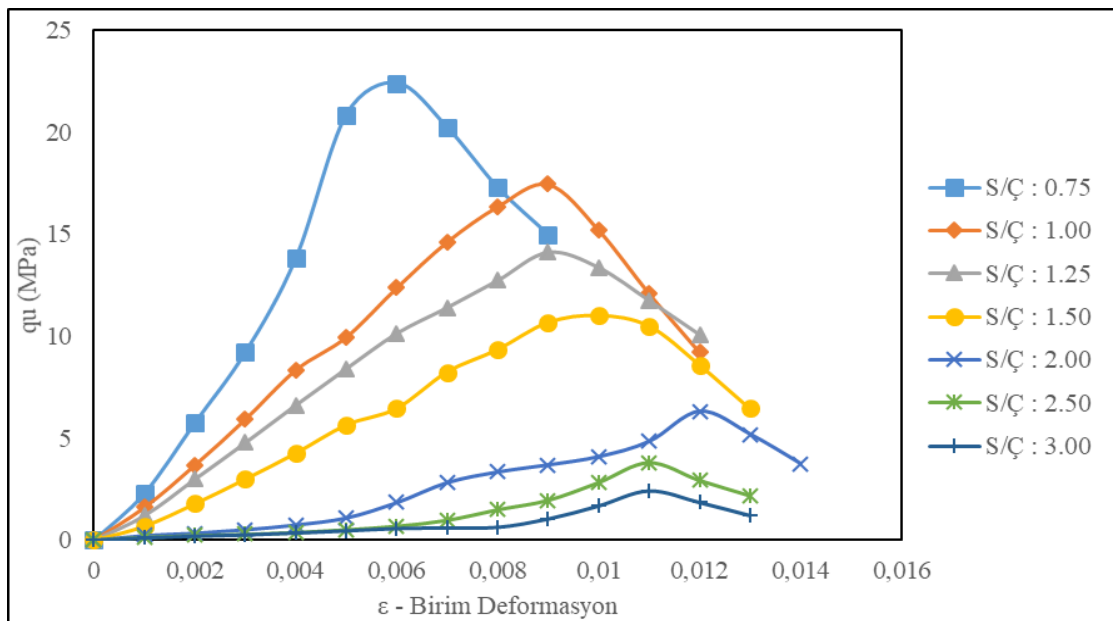
İnce taneli DMFC-800 çimentosunun 56 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri 28 günlük serbest basınç mukavemeti değerleriyle karşılaştırıldığında ortalama olarak yaklaşık %9 oranında dayanım artışı olduğu görülmüştür. İnce taneli çimento yüksek özgül yüzey alanı sayesinde mineral katkı içermemesine rağmen normal Portland çimentosuna göre daha fazla dayanım artışı göstermiştir. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin serbest basınç deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.18.'de verilmiştir.

CEM II Portland kompoze çimentonun 56 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri 28 günlük serbest basınç mukavemeti değerleriyle karşılaştırıldığında ortalama olarak yaklaşık %16 oranında dayanım artışı olduğu görülmüştür. Doğal puzolan içeren bu çimentonun puzolanik reaksiyonlar sayesinde katkısız ve ince taneli çimentolara göre çok daha fazla dayanım artışı gösterdiği görülmüştür. CEM II çimentosuyla hazırlanan numuneler 56 günlük kür süresi sonunda CEM I çimentosu ve DMFC-800 ince taneli çimentosundan daha yüksek dayanım değerleri vermiştir. CEM II çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin serbest basınç deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.19.'da verilmiştir.

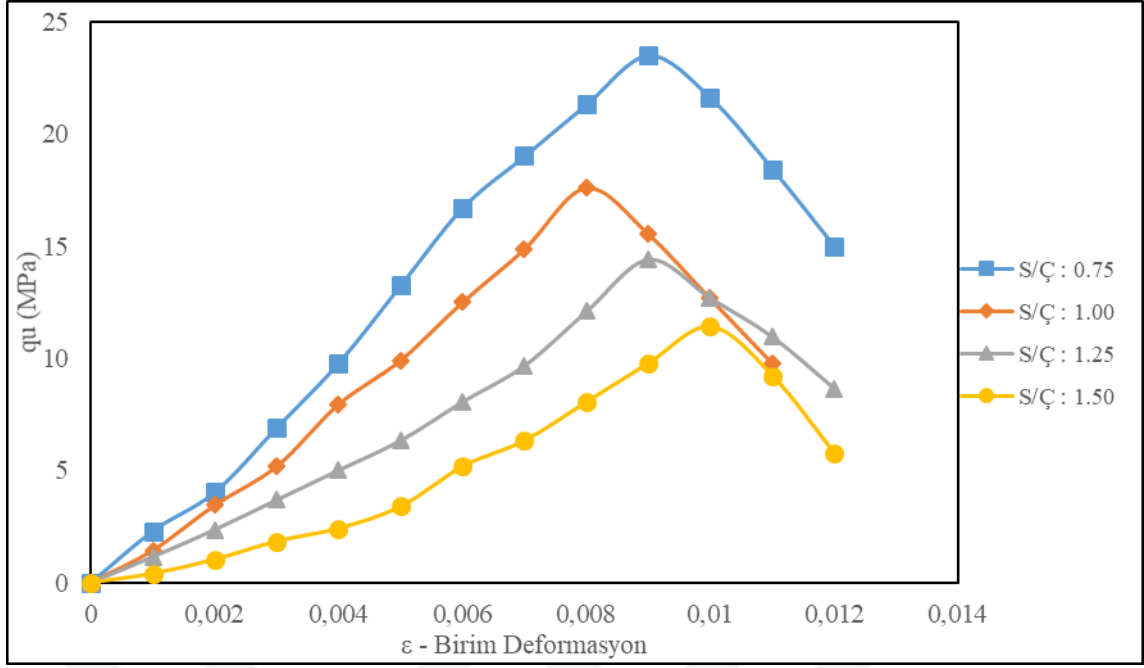
CEM III YFC katkılı çimento ile hazırlanan numuneler uzun vadeli dayanım testlerinde en yüksek dayanım sonuçlarını veren çimento olmuştur. YFC' nin puzolanik reaksiyonları 28 günden sonra da sürmüş ve 56 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri 28 günlük serbest basınç mukavemeti değerleriyle karşılaştırıldığında ortalama olarak yaklaşık %17 oranında dayanım artışı olduğu görülmüştür. CEM III çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin serbest basınç deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.20.'de verilmiştir.



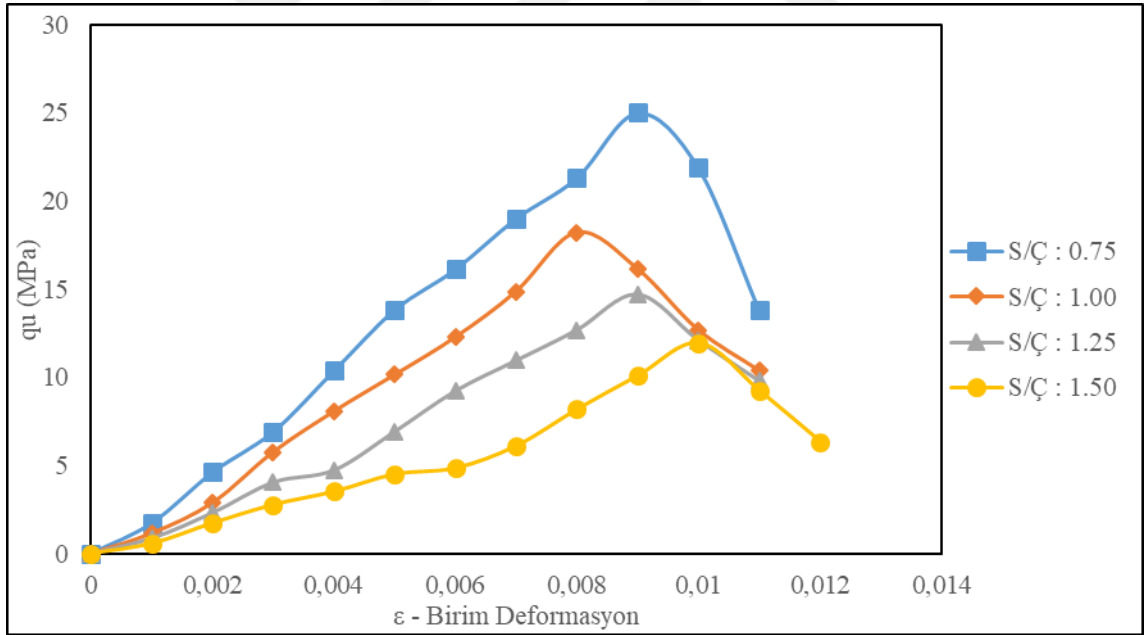
Şekil 4.17. CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi



Şekil 4.18. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.



Şekil 4.19. CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.



Şekil 4.20. CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

4.2.2. Küçük ölçekli numunelerin yarmada çekme deneyi sonuçları

Hazırlanan 50x100 mm boyutlarında silindir numunelere 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda ikişer adet numune üzerinde yarmada çekme deneyi yapılmıştır. Çizelge 4.17., 4.18. ve 4.19.' da farklı kür sürelerinde tasarımlar için yapılan her iki

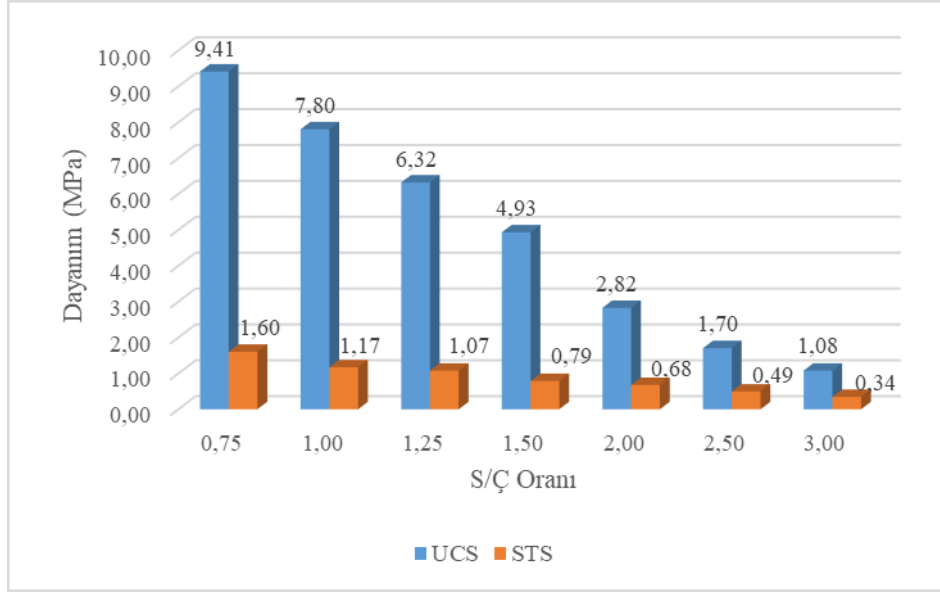
yarmada çekme deneyinden elde edilen yarmada çekme dayanımı değerleri ve ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 4.17. Küçük numunelerin 7 günlük kür süresi sonunda yapılan yarmada çekme deneyi sonuçları

S/Ç	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}
0.75	1.47	1.73	1.60	1.19	1.40	1.30	0.87	1.20	1.04	0.71	0.83	0.77
1.00	1.05	1.29	1.17	1.01	1.23	1.12	0.60	0.83	0.72	0.59	0.72	0.65
1.25	0.88	1.27	1.07	0.69	0.78	0.73	0.50	0.57	0.54	0.40	0.57	0.48
1.50	0.74	0.84	0.79	0.49	0.68	0.58	0.47	0.49	0.48	0.38	0.43	0.41
2.00	0.62	0.73	0.68									
2.50	0.44	0.54	0.49									
3.00	0.28	0.41	0.34									

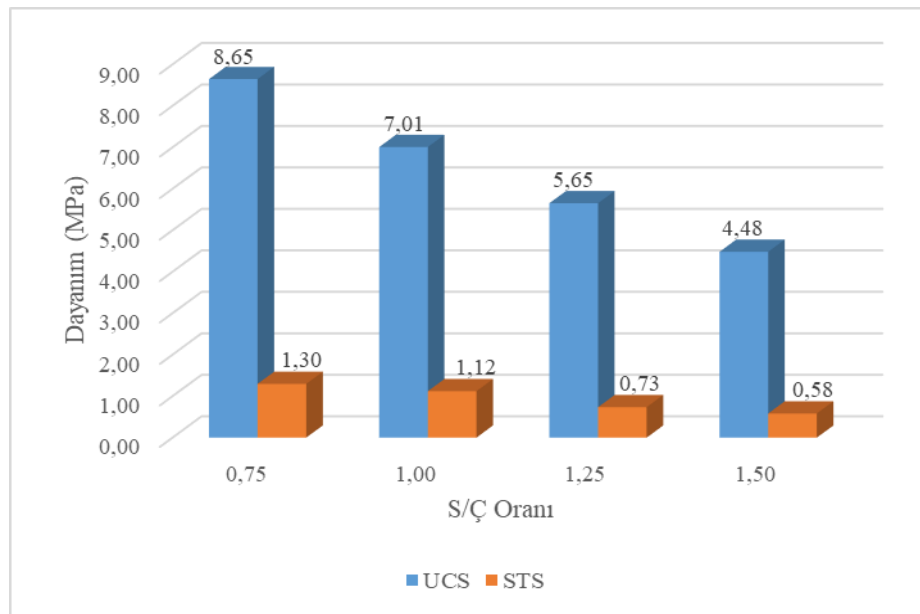
Küçük numuneler üzerinde 7 günlük kür süresi sonunda yapılan yarmada çekme deney sonuçları incelendiğinde; çekme dayanımları beklendiği üzere S/Ç oranının artmasıyla azalmıştır. 7 günlük ikişer numune üzerinde yapılan STS deney sonuçları ve ortalama çekme gerilmesi sonuçları Çizelge 4.17.' de verilmiştir.

DMFC-800 ince taneli çimentosuyla hazırlanan numunelerin 7 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları diğer çimentolara kıyasla en yüksek sonuçlardır. Reaktif yüzey alanı en fazla olan yani en yüksek özgül yüzey alanına sahip olan ince taneli çimentoda hidrasyon reaksiyonu diğer çimentolara göre daha hızlı gerçekleşmiş ve numuneler erken yaşta en yüksek çekme dayanımını göstermiştir. Yedi günlük numunelerin gösterdiği maksimum çekme dayanımları serbest basınç dayanımları ile karşılaştırıldığında; S/Ç oranı 0.75' ten 1.50'a kadar olan numunelerin çekme dayanımlarının basınç dayanımına oranı yaklaşık %16 olmuştur (Şekil 4.21). S/Ç oranı 2.0 ve daha yüksek olan numunelerde bu oran yaklaşık %28 olmuştur; yani basınç dayanımının S/Ç oranının artmasıyla azalma eğilimi, çekme dayanımının azalma eğiliminden daha yüksektir.



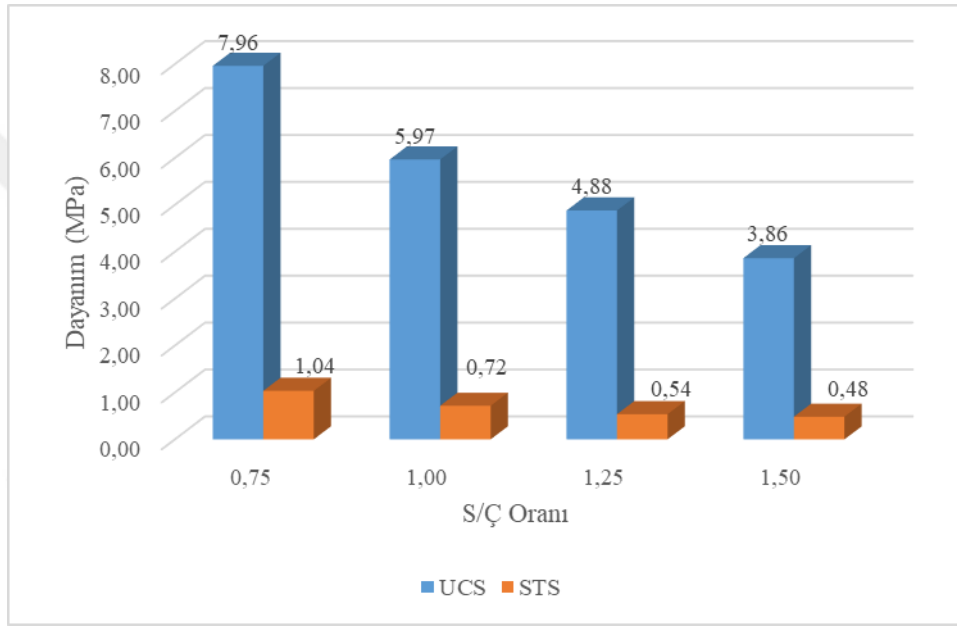
Şekil 4.21. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin 7 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerin çekme dayanımlarının ardından en yüksek sonuçlar olmuştur. Bu çimentonun kimyasal bileşenlerinden olan C_3S bileşiği sayesinde erken dayanım alan numuneler 7 günlük kür süresi sonunda CEM II ve CEM III çimentolarıyla hazırlanan numunelerden daha yüksek çekme dayanımı göstermiştir. CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %14 olmuştur (Şekil 4.22.).



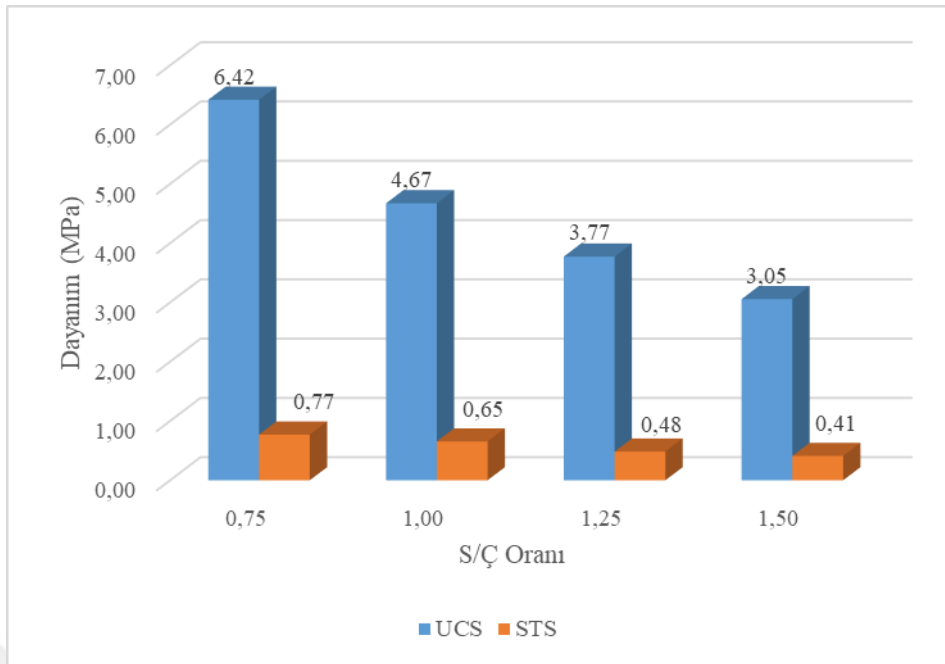
Şekil 4.22. CEM I çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 7 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları DMFC-800 ve CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin çekme dayanımlarından daha düşük olmuştur. CEM II çimentosu içeriğinde bulunan ve klinkerin yerini alan doğal puzolanlar 7 günlük kısa kür süresi göz önüne alındığından çekme dayanımını düşüren faktör olarak öne çıkmıştır. CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %12 olmuştur (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. CEM II çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin 7 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları dört çimento tipi arasındaki en düşük sonuçlar olmuştur. CEM III çimentosunun içeriğinde bulunan ve klinkerin yaklaşık %60'ının yerini alan YFC, 7 günlük kısa kür süresinde numunelerin en düşük çekme dayanımı sonuçlarını vermesine neden olmuştur. Kütlece en az oranda klinker içeren çimento olan CEM III' ün sonuçlarının kısa kür süresinde en düşük dayanım sonuçlarını vermesi beklenen bir sonuçtur. CEM III çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %13 olmuştur (Şekil 4.24.).



Şekil 4.24. CEM III çimentosuyla hazırlanan 7 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

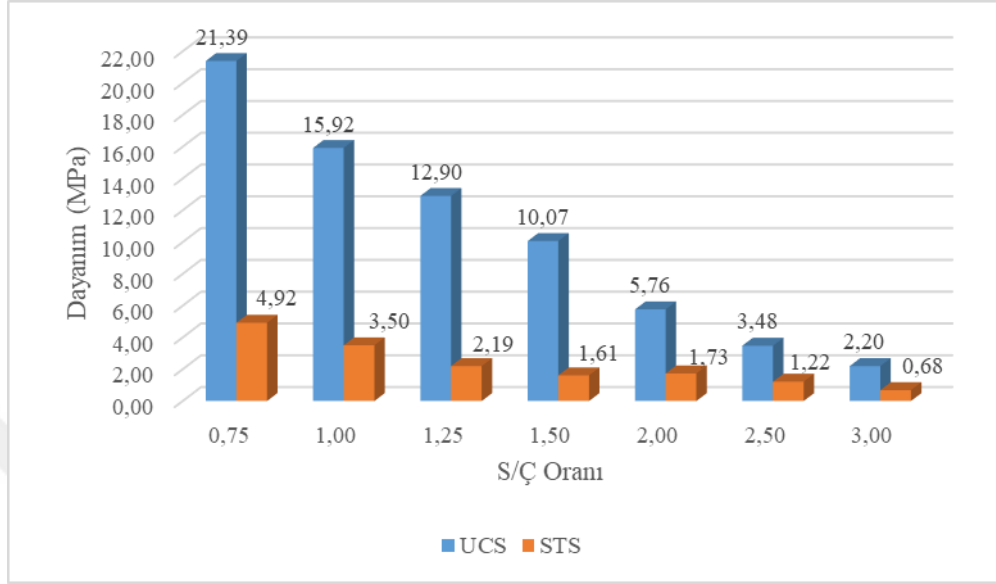
Çizelge 4.18. Küçük numunelerin 28 günlük kür süresi sonunda yapılan yarmada çekme deneyi sonuçları

S/Ç	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}
0.75	4.53	5.31	4.92	3.16	3.70	3.43	3.23	4.45	3.84	2.35	2.75	2.55
1.00	3.15	3.85	3.50	2.90	3.54	3.22	2.54	3.51	3.03	1.89	2.13	2.01
1.25	1.80	2.59	2.19	2.22	3.20	2.71	2.44	2.76	2.60	1.43	2.06	1.75
1.50	1.51	1.71	1.61	1.47	1.66	1.57	2.11	2.20	2.16	1.52	1.72	1.62
2.00	1.59	1.87	1.73									
2.50	1.10	1.34	1.22									
3.00	0.56	0.80	0.68									

28 günlük kür süresi sonunda ikişer numune üzerinde yapılan yarmada çekme deney sonuçları Çizelge 4.18.'de verilmiştir.

DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları diğer çimentolarla hazırlanan numunelerin sonuçlarına göre daha yüksek çekme dayanımı değerleri vermiştir. 7 günlük numunelerin ortalama çekme dayanımlarıyla 28 günlük numunelerin ortalama çekme dayanımları kıyaslandığında yaklaşık 2.5 kat dayanım artışı olduğu görülmüştür. S/Ç oranı 0.75' ten 1.50' a kadar olan numunelerin çekme dayanımlarının basınç dayanımına oranı yaklaşık %19 olmuştur. S/Ç oranı 2.0 ve daha yüksek olan numunelerde bu oran yaklaşık %32

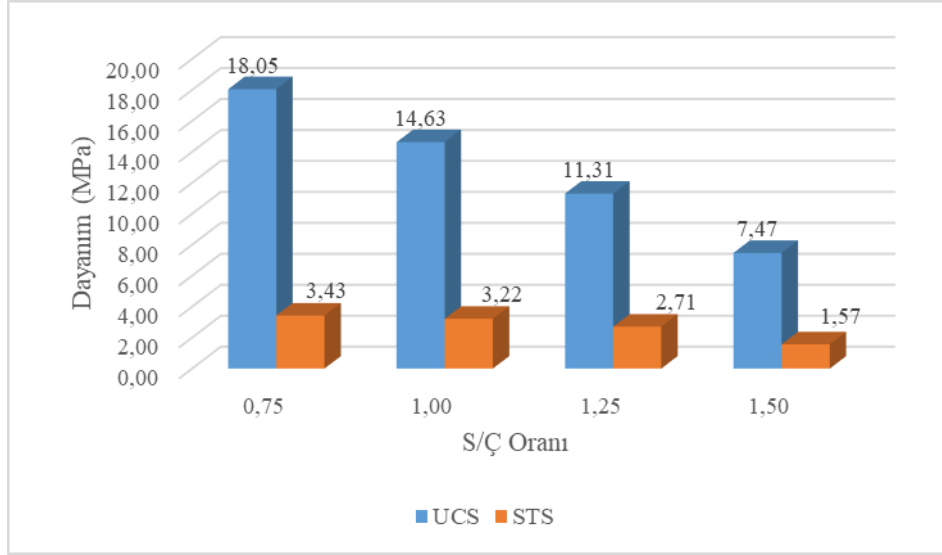
olmuştur DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan 28 günlük tüm numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %24 olmuştur (Şekil 4.25.).



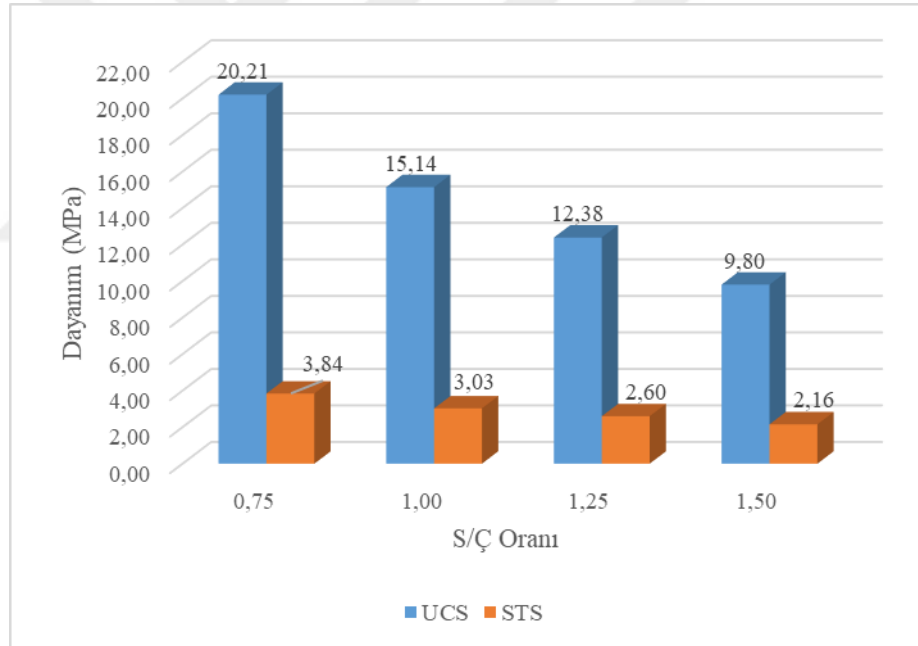
Şekil 4.25. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük yarmada çekme deneyi sonuçlarına bakıldığında 7 günlük numunelerin ortalama çekme dayanımlarına göre yaklaşık 3 kat dayanım artışı olduğu görülmüştür. CEM I çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %21 olmuştur (Şekil 4.26.).

CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin sonuçlarına yakın çekme dayanımı değerleri vermiştir. CEM II çimentosunun CEM I çimentosuna göre daha düşük oranda klinkerden oluşmasının dezavantajı 28 günlük deney sonuçlarına bakıldığında ortadan kalktığı görülmüştür. CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 28 günlük STS deney sonuçlarına bakıldığında 7 günlük deney sonuçlarına göre yaklaşık 4.5 kat dayanım artışı olduğu görülmüştür. Böylece 7 günlük deney sonuçlarında görülen dayanım farkı söz konusu olmamıştır. Cem II çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %21 olmuştur (Şekil 4.27.).



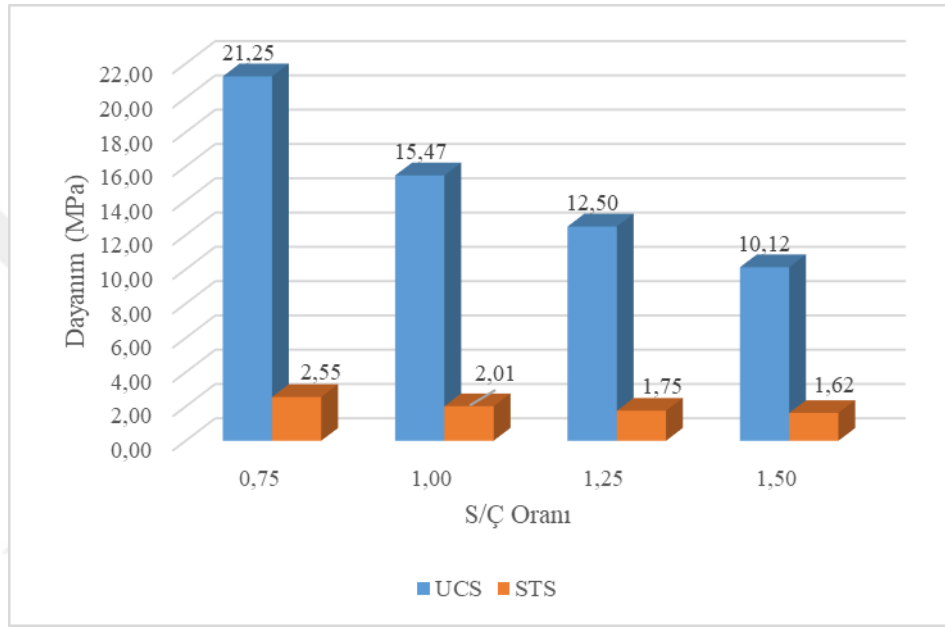
Şekil 4.26. CEM I çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.27. CEM II çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

CEM III çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin yarmada çekme deney sonuçlarına bakıldığında dört çimento tipi arasında en düşük deney sonuçlarını verdikleri görülmüştür. 7 günlük numunelerin ortalama çekme dayanımlarıyla 28 günlük numunelerin ortalama çekme dayanımları kıyaslandığında yaklaşık 3.5 kat dayanım artışı olduğu görülmüştür. Kullanılan çimentolar arasında en düşük oranda

klinker içeren çimento olan CEM III çimentosunun çekme dayanımı artış oranı katkısız DMFC-800 ve CEM I çimentolarından fazla olsa da katkılı CEM II çimentosuna göre düşük kalmıştır. Bu durum CEM II çimentosunun CEM III çimentosuna göre daha yüksek oranda klinker içermesine bağlanabilir. CEM III çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %14 olmuştur (Şekil 4.28.).



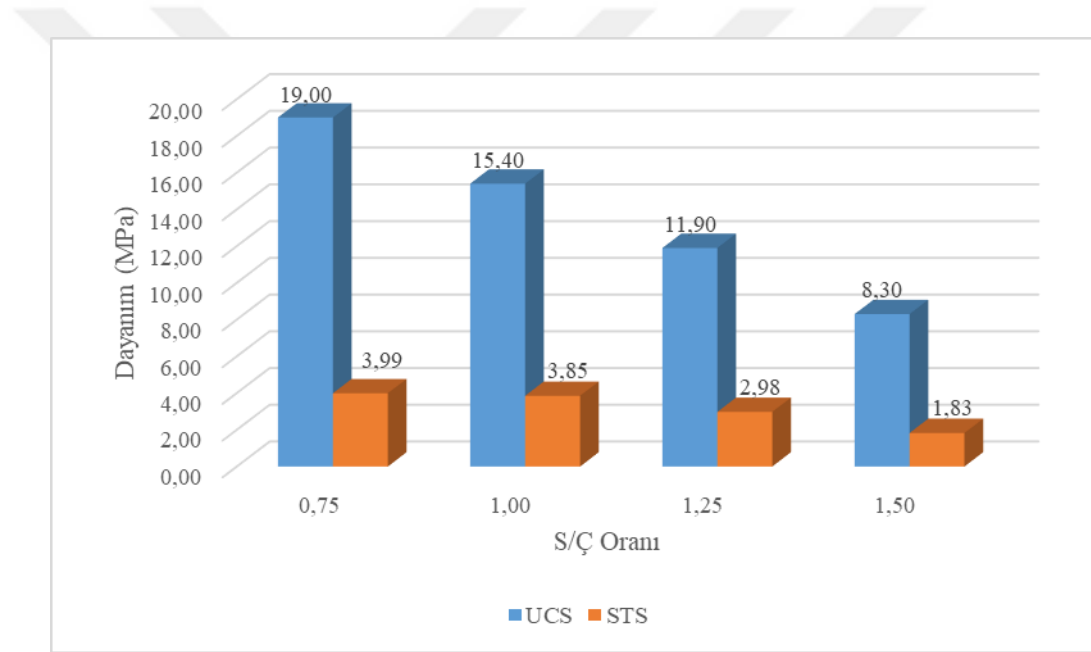
Şekil 4.28. CEM III çimentosuyla hazırlanan 28 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

Çimento tiplerinin uzun vadede gösterdiği performansın görülebilmesi için 56 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilen yarmada çekme deneylerinin sonuçları Çizelge 4.19.'da verilmiştir.

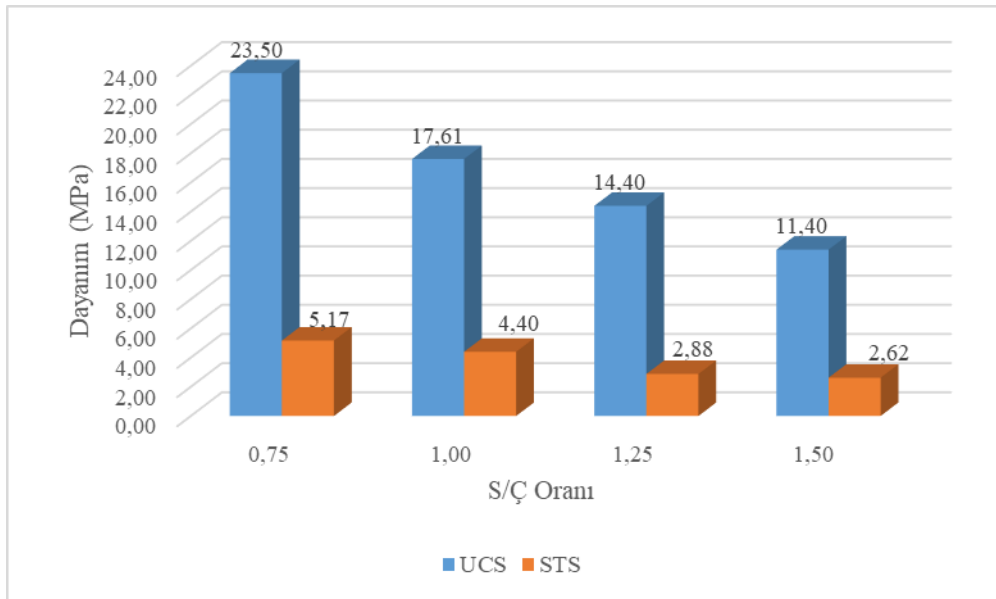
CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük STS dayanımları incelendiğinde 28 günlük dayanım değerlerine göre ortalama olarak yaklaşık %15 artış olmuştur. S/Ç oranı 0.75 için en düşük ortalama yarmada çekme dayanımını veren CEM I çimentosu diğer S/Ç oranları için DMFC-800 çimentosuyla yakın sonuçlar vermiştir. CEM I çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %23 olmuştur (Şekil 4.29.).

Çizelge 4.19. Küçük numunelerin 56 günlük kür süresi sonunda yapılan yarmada çekme deneyi sonuçları

S/Ç	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}
0.75	4.12	4.84	4.48	3.35	4.63	3.99	4.76	5.58	5.17	3.38	4.13	3.75
1.00	3.45	4.21	3.83	3.23	4.47	3.85	3.96	4.84	4.40	2.33	3.49	2.91
1.25	1.97	2.83	2.40	2.80	3.15	2.98	2.36	3.40	2.88	2.30	2.40	2.35
1.50	1.65	1.87	1.76	1.79	1.86	1.83	2.46	2.78	2.62	1.93	2.36	2.14
2.00	1.74	2.04	1.89									
2.50	1.20	1.46	1.33									
3.00	0.61	0.88	0.74									

**Şekil 4.29.** CEM I çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük dayanımları elde edilen en büyük STS dayanımı değerleri olmuştur. Doğal puzolan katkıları bu çimento tipinin çekme dayanımını uzun vadede önemli ölçüde artırmıştır. CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük yarmada çekme deney sonuçlarına bakıldığında 28 günlük deney sonuçlarına göre yaklaşık %30 dayanım artışı olduğu görülmüştür. CEM II çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %22 olmuştur (Şekil 4.30.).

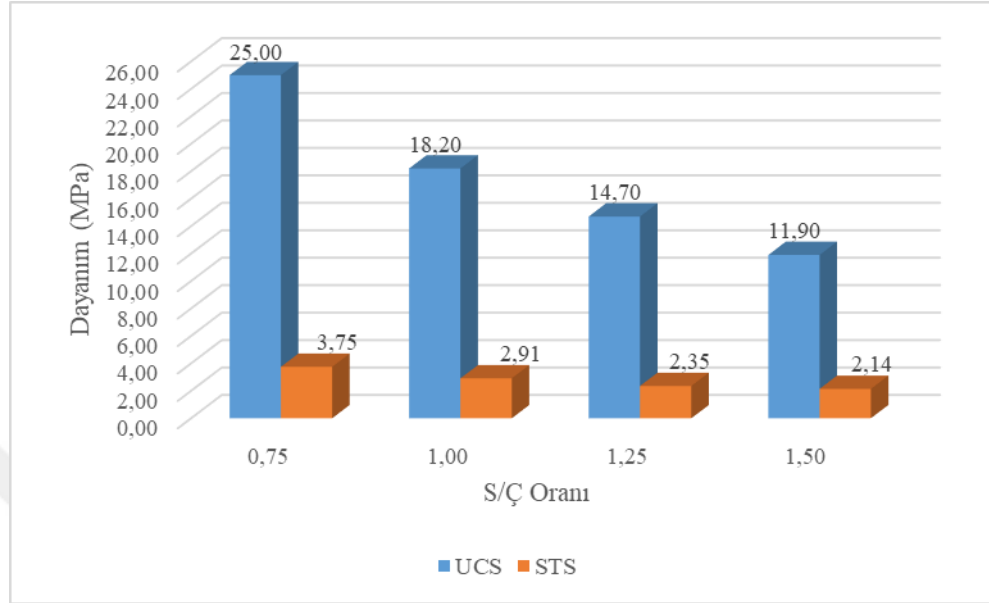


Şekil 4.30. CEM II çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı- basınç dayanımı ilişkisi

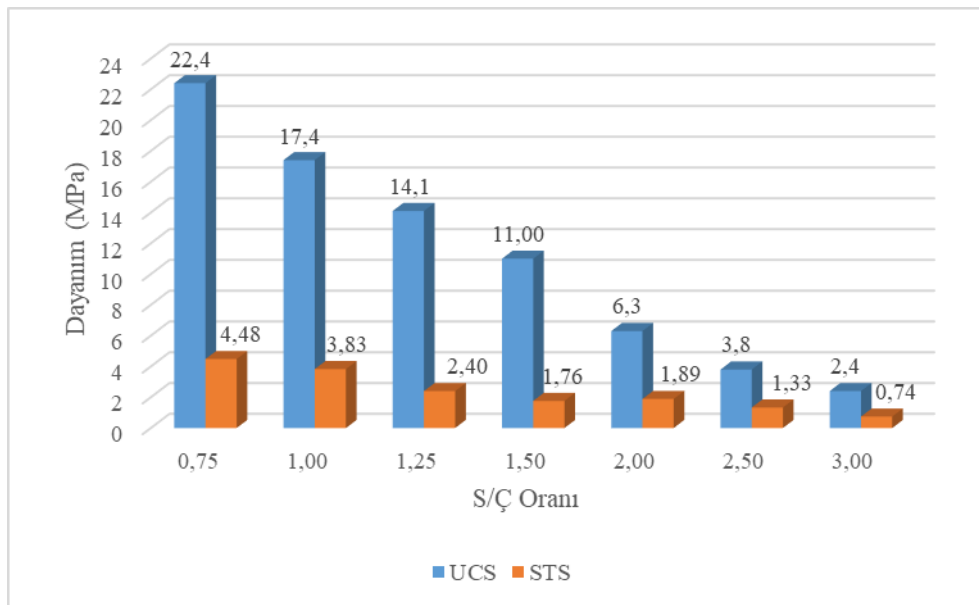
CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük yarmada çekme dayanımlarına bakıldığında 28 günlük dayanımlara göre %40 oranında bir dayanım artışı olduğu görülmüştür. Yüksek oranda YFC içeren CEM III çimentosu uzun vadede tamamına yakını klinkerden oluşan CEM I çimentosuna oldukça yakın bir performans göstermiştir. CEM III çimentosunun çekme dayanımı değerleri CEM II çimentosuyla elde edilen dayanım değerleri kadar olmasa da yalnızca %40 oranında klinkerden oluşan bir çimento için başarılı bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. CEM III çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı ortalama olarak yaklaşık %16 olmuştur (Şekil 4.31.).

İnce taneli DMFC-800 çimentosunun uzun vadeli çekme dayanımı performansı diğer katkısız Portland çimentosu olan CEM I çimentosuyla kıyaslandığında çimentoların yakın değerler verdikleri görülmektedir. 7 ve 28 günlük çekme dayanımlarında daha üstün olan DMFC-800 çimentosu, uzun vadede CEM I çimentosuyla denk sonuçlar vermiştir. Yüksek özgül yüzey alanının hızlı ve hidrasyon reaksiyonu gerçekleşmesini sağladığı için 7 ve 28 günlük çekme dayanımı sonuçlarında üstün olan DMFC-800 çimentosunun bu özelliği uzun vadede etkisini kaybetmiştir. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerin 56 günlük yarmada çekme dayanımlarına bakıldığında 28 günlük dayanımlara göre %6 oranında bir dayanım artışı olduğu görülmüştür. Artış yüzdesi kısa ve orta vadede hidrasyon reaksiyonlarının önemli bir kısmının tamamlandığının göstergesidir. DMFC-800 çimentosuyla

hazırlanan 56 günlük numunelerin çekme dayanımlarının serbest basınç dayanımlarına oranı S/Ç 0.75-1.50 arasındaki oranlar için ortalama olarak yaklaşık %19 olurken, S/Ç 2.0-3.0 arasındaki oranlar için %32 olmuştur (Şekil 4.32.).



Şekil 4.31. CEM III çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.32. DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan 56 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

4.2.3. Büyük ölçekli model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçları

Model JG düzeneği kullanılarak oluşturulan kolonlar 90 günlük kür süresinin sonunda oluşturuldukları zeminden çıkarılarak kolonlardan karot örnekleri alınmış ve karot örnekleri üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Her kolon için en az 2 adet numune kırılmıştır. Elde edilen serbest basınç dayanımları Çizelge 4.20.'de verilmiştir. Beklendiği üzere S/Ç oranı arttıkça kolon dayanımları azalmıştır.

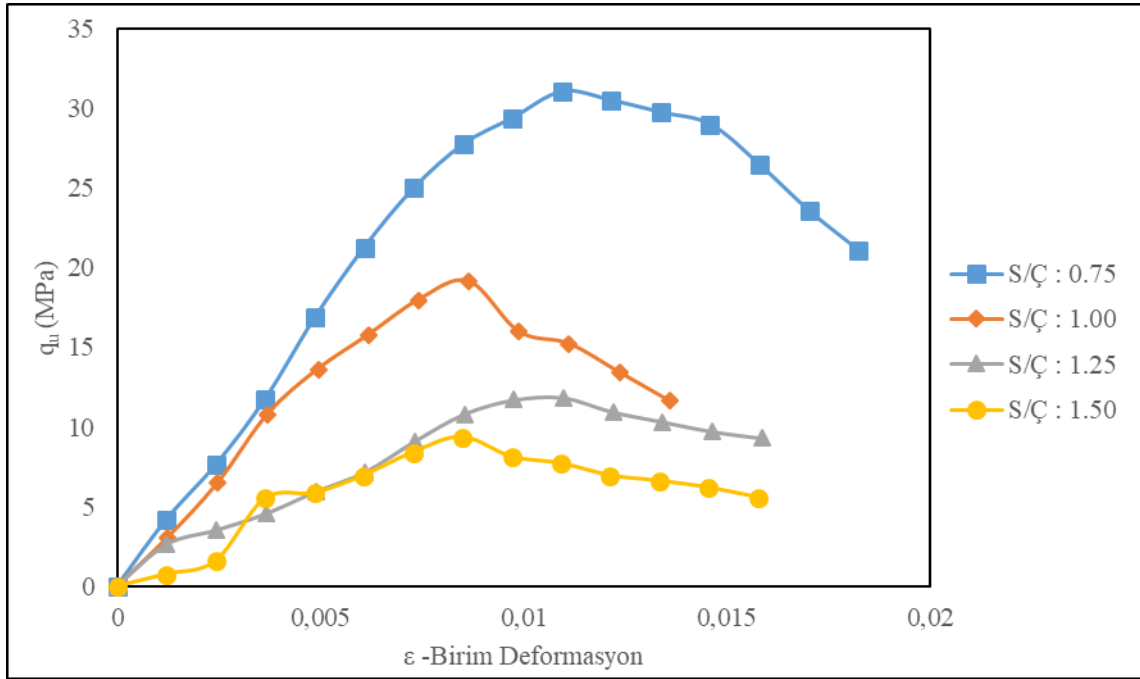
Çizelge 4.20. Model JG kolonlarından alınan karot örneklerine ait serbest basınç dayanımları

	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
	Serbest Basınç Dayanımları (MPa)											
S/Ç	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}	q _{u1}	q _{u2}	q _{ort}
0.75	21.54	18.00	19.77	17.41	18.72	18.07	21.00	20.44	20.72	31.00	26.23	28.62
1.00	16.5	15.14	15.82	12.46	11.5	11.98	18.45	14.73	16.59	19.14	19.00	19.07
1.25	14.39	13.49	13.94	5.71	5.40	5.55	13.08	12.60	12.84	11.84	9.77	10.81
1.50	11.29	10.6	10.95	5.14	4.90	5.02	9.64	9.40	9.52	9.36	7.50	8.43
2.00	5.44	4.20	4.82									
2.50	3.80	2.80	3.30									
3.00	3.41	2.25	2.83									

JG kolonlarının serbest basınç deneyi sonuçlarına bakıldığında kontrollü olarak karıştırılarak hazırlanan ve kalıplara dökülen küçük numunelerin sonuçlarına göre bir miktar düşük olduğu göze çarpmaktadır. Arazi koşullarını tam olarak yansıtmasa bile, arazideki JG kolon oluşum mekanizmasını temsil eden model JG kolonlarının dayanım sonuçlarının nispeten düşük sonuçlar vermesi beklenen bir durum olmuştur.

S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonlar kullanılarak hazırlanan JG kolonlarının serbest basınç dayanımları kıyaslandığında CEM III çimentosuyla oluşturulan kolon dayanımının belirgin şekilde en yüksek dayanım sonucunu verdiği görülmektedir. Çimentoların karakteristik özelliklerinin kıyaslanması amacıyla yapılan küçük ölçekli deney sonuçlarında da CEM III çimentosu uzun vadede en yüksek dayanımı veren çimento tipi olmuştur. Ancak dayanımlar arası fark bu denli bariz olmamıştır. CEM III çimentosunun dayanım performansını artıran puzolanik reaksiyonların etkisi önceki bölümlerde açıklanmıştır. Diğer puzolanik katkı içeren çimento tipi olan CEM II çimentosunun model deneylerde CEM III çimentosu kadar etkili olamamasının en temel

nedeni enjeksiyonların reolojik özellikleridir. CEM III çimentosunun S/Ç oranı 0.75 için belirlenen viskozitesine bakıldığında CEM II çimentosunun enjeksiyonuna göre çok daha akışkan özellikte olduğu reolojik özellik deneylerinde belirlenmişti (Bkz. Bölüm 4.1.2.). CEM III çimentosunun enjeksiyonu bu özelliği sayesinde CEM II çimentosuna kıyasla zemine daha iyi nüfuz etmiş ve daha üstün sonuçlar vermiştir. Bu durum S/Ç oranının 1.0 olduğu enjeksiyonlar için de geçerli olmuştur (Şekil 4.33.).

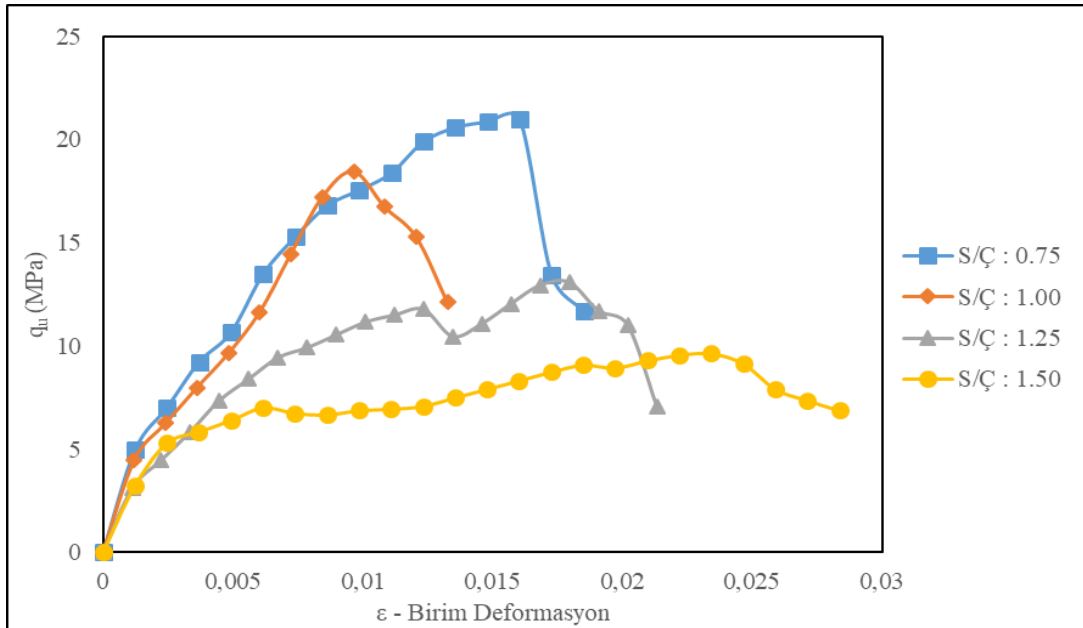


Şekil 4.33. CEM III çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

S/Ç oranı 1.25 ve 1.50 olan enjeksiyonlarla oluşturulan JG kolon dayanımlarına bakıldığında CEM II çimentosunun daha büyük dayanımlar verdiği görülmektedir. CEM II çimentosunun içeriğinde bulunan doğal puzolanik katkıların su ihtiyacını artırdığı; CEM III çimentosundaki YFC'nin ise su ihtiyacını azalttığı bilinmektedir ve önceki bölümde açıklanmıştır. Stabil olmayan enjeksiyonlarda su enjeksiyondan ayrılmaktadır. Bir kalıpla sınırlanmamış zemin ortamında ayrılan su, zemin içerisinde süzülerek iyileşen zemin bölgesinde uzaklaşmaktadır. Bu duruma bağlı olarak su muhtevası yaklaşık %5 olarak ayarlanan kumlu zeminin kolonlar oluşturulduktan sonra özellikle kolon altı bölgede kumlu zeminin çok daha yüksek oranda su içerdiği variller açıldığında gözlemlenmiştir. Su içeriğinin nispeten az olduğu S/Ç oranı 0.75 ve 1.00 olan enjeksiyonlarla hazırlanan kolonlarda, yukarıda anlatılan su kaybı da göz önünde bulundurulduğunda, CEM II çimentosunun hidrasyon reaksiyonlarına tam olarak

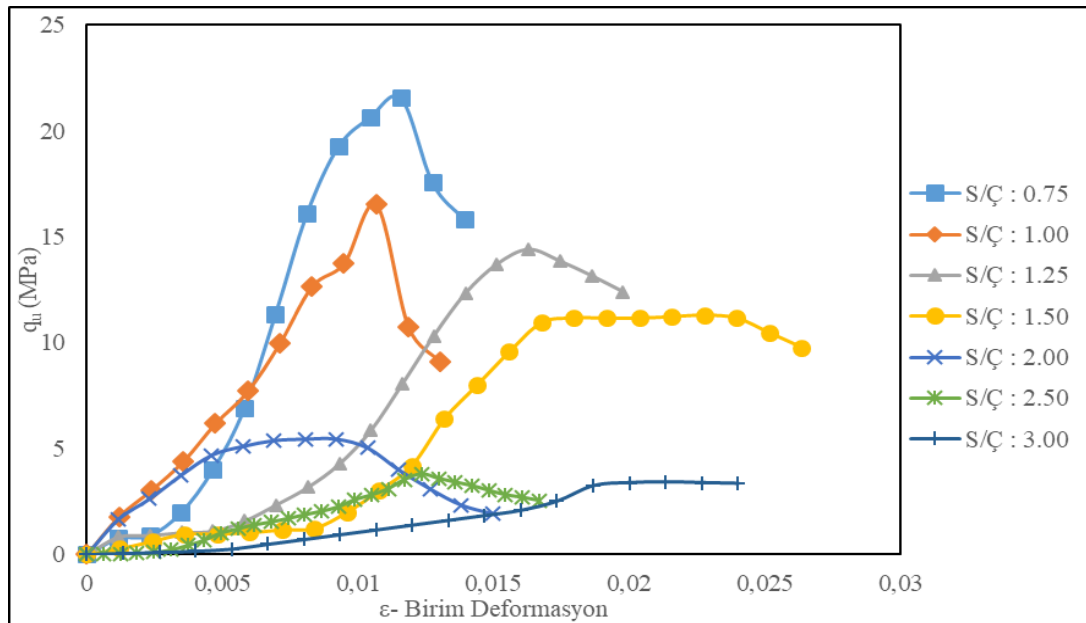
yetecek su sağlanamamış olabileceği ve enjeksiyonun yüksek viskozitesinden dolayı zemin ve çimento enjeksiyonundan oluşan kompozit yapısının istenen homojenlikte oluşmadığı düşünülmektedir. Diğer yandan düşük su içeren enjeksiyonlarda su miktarı CEM III çimentosunun hidratasyonu için su yeterli olurken, su miktarı fazla olan enjeksiyonlarda hidratasyon fazlası su CEM III çimentosunun CEM II çimentosuna göre bir miktar daha az dayanım göstermesine neden olduğu düşünülmektedir. CEM II çimentosuyla hazırlanan kolonların serbest basınç dayanımlarına ait gerilme-birim deformasyon ilişkisi Şekil 4.34.' de verilmiştir.

DMFC-800 ince taneli çimentoyla oluşturulan JG kolonlarının dayanım sonuçlarına bakıldığında S/Ç oranı 0.75 ve 1.0 olan enjeksiyonlar kullanılarak oluşturulan kolonlardan elde edilen değerlerin CEM II çimentosuyla aynı S/Ç oranındaki enjeksiyonlarla oluşturulan kolonlardan elde edilen sonuçlara yakın değerler olduğu görülmektedir. CEM II çimentosunda olduğu gibi DMFC-800 çimentosunun enjeksiyonlarında da su ihtiyacı CEM I ve CEM III çimentolarının enjeksiyonlarının su ihtiyacından fazladır. Yüksek özgül yüzey alanı suyla karıştırdığında reaktif yüzey alanı fazla olmakta ve enjeksiyonun su ihtiyacı artmaktadır. İnce taneli çimentonun özgül yüzey alanı CEM II çimentosunun yaklaşık iki katıdır ve su ihtiyacı da CEM II çimentosuna göre çok daha fazladır. Bunun sonucu olarak enjeksiyonun reolojik özelliklerinin değişimi önceki bölümde anlatılmıştır. CEM II çimentosunun S/Ç 0.75 ve 1.0 olan enjeksiyonlarda DMFC-800 çimentosundan bir miktar üstün olması bu gerekçeyle açıklanabilir.



Şekil 4.34. CEM II çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi

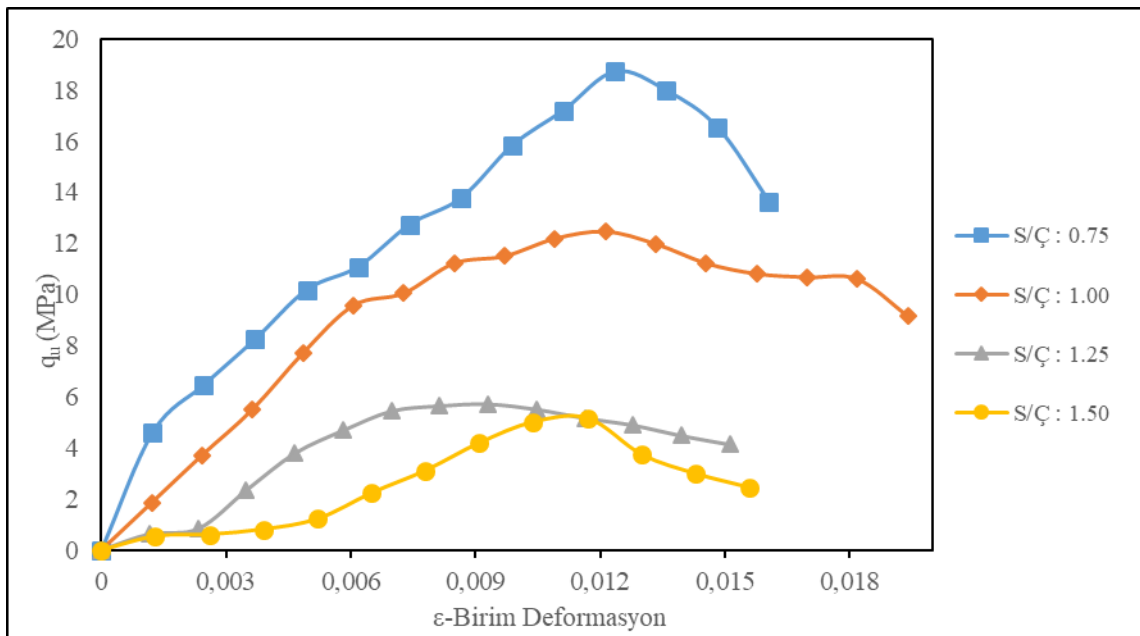
DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranı 1.25 ve 1.50 olan enjeksiyonlarıyla hazırlanan JG kolonlarının dayanımları aynı S/Ç oranına sahip CEM II ve CEM III çimentosuyla hazırlanan JG kolonlarının dayanımlarından daha yüksek değerler vermiştir. Hidratasyon fazlası su iyileşmiş zemin yapısında boşluklar kalmasına neden olarak dayanımı bir miktar düşürmüş olduğu düşünülmektedir dolayısıyla CEM II ve CEM III çimentolarının yüksek oranda su içeren enjeksiyonlarıyla oluşturulan kolonları arasındaki dayanım farkına sebep olan durum burada da söz konusu olmuştur. Su ihtiyacı en fazla olan ve suyla en fazla reaksiyon veren DMFC-800 ince taneli çimentosu artan S/Ç oranına karşın yüksek dayanım sonuçları vermiştir. S/Ç oranı 0.75 ve 1.0 olan enjeksiyonlarla hazırlanan kolonların dayanımlarına bakıldığında CEM III çimentosu belirgin şekilde sütun sonuçlar verirken enjeksiyondaki su miktarı arttığında DMFC-800 çimentosunun sonuçları diğer çimentoların verdiği sonuçlardan üstün olmuştur. DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranının 2.0, 2.5 ve 3.0 olduğu enjeksiyonlarıyla hazırlanan kolonların dayanımlarına bakıldığında bu denli çok su içeren enjeksiyonlarla bile iyileştirilmiş bir zemin için önemli dayanım değerleri elde edilebildiği görülmüştür. DMFC-800 çimentosuyla oluşturulan kolonlardan alınan karot örneklerinin serbest basınç dayanımlarına ait gerilme-birim deformasyon ilişkisi Şekil 4.35.' de verilmiştir.



Şekil 4.35. DMFC-800 çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

CEM I çimentosuyla hazırlanan kolonların dayanımlarına bakıldığında diğer çimento tipleriyle elde edilen sonuçlara göre daha düşük dayanım değerlerinin elde

edildiği görülmektedir. S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonla oluşturulan kolonun basınç dayanımı aynı S/Ç oranıyla hazırlanan DMFC-800 kolonunun basınç dayanımına yakın bir değer vermiştir. Diğer yandan S/Ç oranı 1.0 ve daha yüksek olan enjeksiyonlarla hazırlanan kolonların dayanımları kıyaslandığında ise CEM I çimentosuyla hazırlanan kolonun dayanım değerleri belirgin şekilde düşük olmuştur. S/Ç oranının 0.75'ten 1.0'e çıkmasıyla gözlemlenen ani dayanım düşüşü özgül yüzey alanının diğer çimentolara nispeten en küçük olmasıyla açıklanabilir. Hidratasyon fazlası su iyileşmiş zemin bünyesinde boşluklar kalmasına neden olmuştur. Katkısız Portland çimentosu olan CEM I çimentosu, puzolanik etki gösteren katkıları içeren CEM II ve CEM III çimentolarının gösterdiği uzun vadeli dayanım artışını gösterememiştir. Puzolanik etki gösteren katkıları hidratasyon reaksiyonunun uzun vadede devam etmesini sağlamaktadır. Bu sayede iyileşmiş zemin bünyesinde dayanımı artıran mikro yapıların oluşumu devam etmekte ve boşluk miktarı azalmaktadır. CEM I çimentosunun sonuçları referans alındığında ince taneli çimentonun ve katkı çimentoların performansları daha iyi anlaşılmıştır. CEM I çimentosuyla oluşturulan kolonlardan alınan karot örneklerinin serbest basınç dayanımlarına ait gerilme-birim deformasyon ilişkisi Şekil 4.36.'da verilmiştir.



Şekil 4.36. CEM I çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin serbest basınç deneylerine ait σ - ϵ ilişkisi.

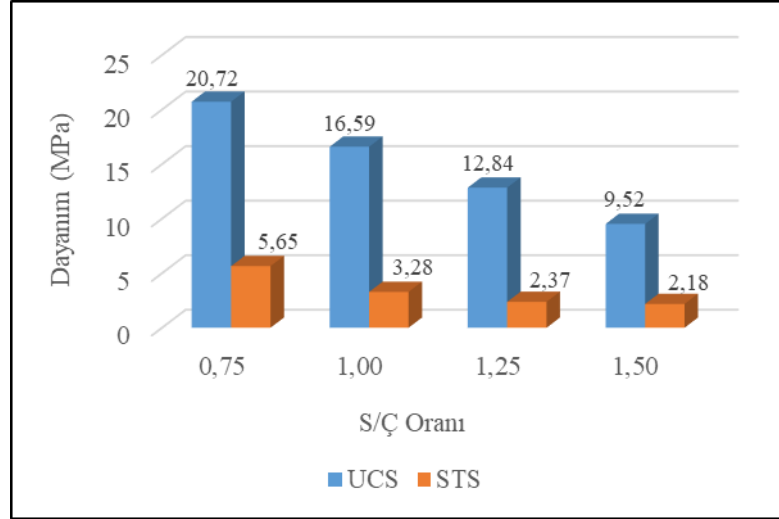
4.2.4 Büyük ölçekli model JG kolonlarından alınan karot numunelerinin yarmada çekme deneyi sonuçları

Model JG kolonlarından alınan karot örnekleri üzerinde 90 günlük kür süresinin sonunda yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Her kolondan ikişer numune üzerinde yapılan deneylerden elde edilen yarmada çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.21.' de verilmiştir.

Çizelge 4.21. Model JG kolonlarından alınan karot örneklerine ait yarmada çekme deneyi sonuçları

S/Ç	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}	σ _{STS-1}	σ _{STS-2}	σ _{STS-ORT.}
0.75	4.04	4.94	4.49	2.93	4.05	3.49	5.20	6.10	5.65	3.45	4.76	4.10
1.00	2.02	3.03	2.53	2.30	2.81	2.55	2.95	3.61	3.28	2.51	3.46	2.98
1.25	2.33	2.42	2.37	1.18	1.69	1.43	1.94	2.80	2.37	2.10	2.37	2.23
1.50	1.95	2.38	2.17	1.18	1.22	1.20	2.05	2.31	2.18	2.10	2.19	2.14
2.00	1.70	2.08	1.89									
2.50	1.25	1.53	1.39									
3.00	0.86	1.18	1.02									

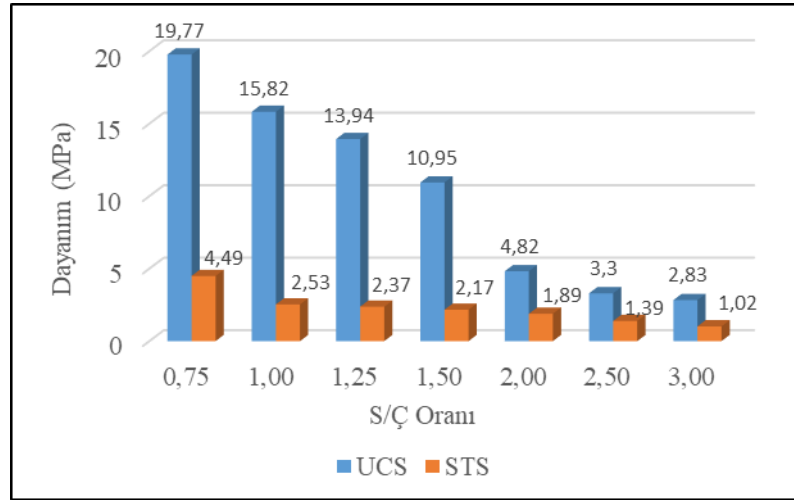
Model JG kolonlarının yarmada çekme dayanımları incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı değerleri CEM II çimentosuyla oluşturulan kolonlardan elde edilmiştir. CEM II çimentosunun su içeriği az olan (S/Ç oranı 0.75 ve 1.0 olduğu) enjeksiyon karışımlarıyla oluşturulan kolonların yarmada çekme dayanımları, diğer tüm çimento tiplerinin aynı S/Ç oranına sahip enjeksiyonlarıyla hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımlarından belirgin şekilde yüksek olmuştur. S/Ç oranı 1.25 ve 1.5 olan enjeksiyonlarla hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımlarına bakıldığında birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. CEM II çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarının çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranı ortalama %22 olmuştur (Şekil 4.37.).



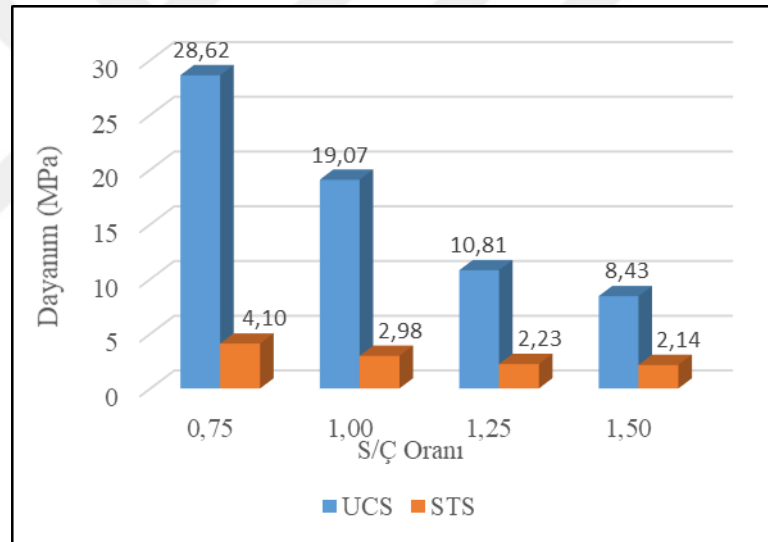
Şekil 4.37. CEM II çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan kolonlardan alınan karot örneklerinin yarmada çekme dayanımları CEM II çimentosunun ardından en yüksek yarmada çekme değerleri olmuştur. S/Ç oranı 1.0 olan enjeksiyonlarla hazırlanan kolonlar kıyaslandığında CEM III çimentosuna yakın ancak bir miktar daha düşük veren DMFC-800 diğer S/Ç oranları için CEM III çimentosundan daha yüksek sonuçlar vermiştir. İnce taneli DMFC-800 çimentosu katkı içermemesine rağmen YFC katkılı CEM III çimentosundan bir miktar daha yüksek yarmada çekme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır. DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranı 0.75 ile 1.5 arasındaki kolonlarından alınan karot örneklerinin yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı ortalama %19 olmuştur. S/Ç oranı 2.0, 2.5 ve 3.0 olan enjeksiyonlarla hazırlanan kolonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı ise ortalama %39 olmuştur. DMFC-800 çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarının çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranı ortalama %22 olmuştur (Şekil 4.38.).

CEM III çimentosuyla hazırlanan model JG kolonlarının yarmada çekme dayanımları DMFC-800 çimentosunun yarmada çekme değerlerine yakın fakat DMFC-800 çimentosundan geride kalmıştır. YFC katkısının çekme dayanımına katkısı basınç dayanımına olan katkısı kadar olmamıştır. S/Ç oranı 0.75 ve 1.0 olan kolonlar kıyaslandığında CEM I katkısız çimentosuna yakın yarmada çekme değerleri veren CEM III çimentosu, enjeksiyondaki su miktarı arttığında yani S/Ç oranı 1.25 ve 1.5 değerleri için CEM I çimentosundan daha yüksek değerler vermiştir. CEM III çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarının çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranı ortalama %19 olmuştur (Şekil 4.39.).



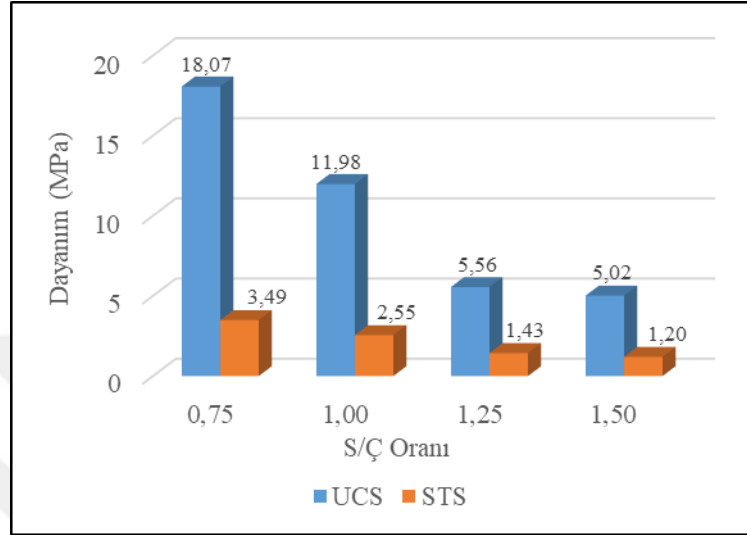
Şekil 4.38. DMFC-800 çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.39. CEM III çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

CEM I çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karotların yarmada çekme sonuçları basınç dayanımında olduğu gibi diğer çimentoların içeriklerinin sonuçlara etkileri daha iyi anlaşılmıştır. CEM II çimentosunun içerdiği doğal puzolanların yarmada çekme dayanımına katkısı, YFC'nin ve ince taneli çimentonun katkısından çok daha fazla olmuştur. YFC CEM II bünyesindeki doğal puzolanlar kadar olmasa da yarmada çekme dayanımını katkısız çimentoya göre önemli derecede artırmıştır. Özellikle YFC'nin klinkere ikame oranının %60 dolaylarında olduğu düşünülürse yarmada çekme dayanımına oldukça önemli katkı sağlamıştır. İnce

taneli çimento yüksek reaktifliği sayesinde normal Portland çimentosu olan CEM I' e göre yarmada çekme dayanımında etkili olmuştur. CEM I çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarının çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranı ortalama %22.5 olmuştur (Şekil 4.40.).



Şekil 4.40. CEM I çimentosuyla oluşturulan model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin yarmada çekme dayanımı - basınç dayanımı ilişkisi

4.3. Geçirimsizlik Deneyi Sonuçları

Model JG kolonlarından alınan karot numunelerine ve küçük ölçekli geçirimsizlik numunelerine uzun dönem kür süresinin sonunda bir kez geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Bu bölümde model JG kolonlarının ve küçük ölçekli numunelerinde deney sonuçları birlikte açıklanmıştır. Geçirimsizlik deneyi sonuçları Çizelge 4.22 ve 4.23' te verilmiştir.

Geçirimsizlik deneyleri sonunda belirlenen geçirimsizlik katsayısı değerleri incelendiğinde küçük ölçekli numunelerin model JG kolonlarından alınan karot örneklerine yakın sonuçlar vermekle birlikte istisnalar dışında bir miktar daha geçirimsiz oldukları görülmüştür. Kontrollü olarak hazırlanan ve kalıba yerleştirilen numunelerin büyük ölçekli deneylerle üretilen model kolonlardan bir miktar daha geçirimsiz olması beklenen bir durum olmuştur. Bununla beraber çimento tiplerine göre geçirimsizlik katsayısının değişim eğilimi oldukça benzer olmuştur. Geçirimsizlik katsayıları S/Ç oranının artmasıyla artmış yani numuneler daha geçirimsiz hale gelmiştir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda; çimento enjeksiyonu ile özellikleri iyileştirilmiş kum zeminlerde, geçirimsizlik katsayısı değerinin azalmasının S/Ç oranı değişiminden ziyade tanecikler arasındaki boşlukların enjeksiyonla dolma yüzdesine bağlı olduğu

belirtilmiştir. Boşluklar tam anlamıyla kapanmadığı takdirde numunelerin geçirimsizlik durumlarında önemli bir azalma olmadığı belirtilmiştir (Schwarz ve Krizek, 1994). Elde karıştırılarak hazırlanan küçük numunelerin daha geçirimsiz olmasının nedeni bu gerekçeyle açıklanabilir. Ancak bu tez çalışması kapsamında yapılan model JG kolonlarının geçirimsizlik katsayıları elde karıştırılan numunelerle büyük bir farklılık göstermemiştir. Rölatif sıklığı %50 civarında olan kumlu zeminin enjeksiyon işlemi düşük sıklıktan dolayı oldukça başarılı geçirimsizlik sonuçları vermiştir.

Geçirimsizlik deneyleri sonuçlarına göre en geçirimsiz numuneler DMFC-800 ince taneli çimentosuyla hazırlanan numuneler olmuştur. İnce taneli çimento büyük özgül yüzey alanı sayesinde oldukça düşük geçirimsizlik sonuçları elde edilmesini sağlamıştır. Çimento enjeksiyonlarının zemine nüfuz edebilme kabiliyetini etkileyen en önemli faktör çimentonun ortalama tane büyüklüğü ardından da enjeksiyonun reolojik özellikleridir ancak yukarıda da belirtildiği gibi bu tez çalışması kapsamında kullanılan kumlu zeminin sıklığı %50 olarak seçilmiştir. Bu orta sıkı zemin durumu çimento tane büyüklüğünün geçirimsizlik sonuçları üzerine etkisini bir miktar azaltmıştır.

Şekil 4.41'de aynı S/Ç oranına sahip iki farklı çimento enjeksiyonuyla iyileştirilmiş zeminin karşılaştırmalı görüntüsü verilmiştir. Şekilde DMFC-800 ince taneli çimento ve CEM I normal Portland çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonlarıyla oluşturulmuş model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin yüzey görüntüleri verilmiştir. İyileştirilmiş ve sertleşmiş zeminden alınan silindir birer kesit olan karot örneklerinin yüzeyleri iyileşmiş zeminin boşluk yapısı hakkında gözlem yapılmasına olanak sağlamıştır.

İnce taneli çimentoya ait karot örneğinin yüzeyinde birkaç gözenek gözlemlenirken CEM I çimentosuyla hazırlanan kolonun karot örneği yüzeyinde nispeten çok daha fazla gözenek olduğu göze çarpmaktadır. Küçük ölçekli numunelerde DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonuyla hazırlanan numunesi aynı S/Ç oranındaki CEM III çimentosunun numunesine göre daha geçirimsiz olurken, model JG kolonlarının S/Ç oranı 0.75 olan geçirimsizlik katsayılarına bakıldığında CEM III çimentosuna ait numunenin daha geçirimsiz olduğu görülmektedir. Fark oldukça az olmakla beraber bu durum enjeksiyonların reolojik özelliklerinden kaynaklanmıştır. CEM III çimentosu daha düşük viskoziteye sahip olduğundan zemine daha iyi nüfuz etmiştir.

DMFC-800 çimentosunun numunelerinin geçirimsizlik katsayıları S/Ç oranı arttıkça artmakla beraber artış düşük oranda olmuştur. S/Ç oranı 1.50 için geçirimsizlik katsayısı k , 10^{-8} cm/s mertebesinde olmuştur. S/Ç oranı 3.0 olduğu durumda dahi k , 10^{-5} cm/s mertebesinde kalmıştır. Bu değer CEM III çimentosunun S/Ç oranı 1.50 için ulaştığı mertebededir.

CEM III çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan numuneleri DMFC-800 çimentosundan sonra en geçirimsiz numuneler olmuştur. S/Ç oranı 1.0 olduğunda küçük numunelerde CEM II çimentosu CEM III çimentosuna göre daha geçirimsiz olurken model JG kolon karot örneklerinin geçirimsizlik katsayılarına bakıldığında S/Ç oranı 1.0 için CEM III çimentosu daha geçirimsiz olmuştur. Bu farklılık da enjeksiyonun reolojik özelliğinden kaynaklanmıştır, daha akışkan olan CEM III zemine daha iyi nüfuz etmiştir. Dikkat edilmelidir ki geçirimsizlik katsayıları oldukça küçük değerlerdir ve farklar da bu nispete küçüktür. CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin geçirimsizlik katsayıları S/Ç oranının artmasıyla CEM II çimentosuna nispeten daha hızlı artmıştır. CEM III çimentosunun numunelerinin geçirimsizlik katsayısı k , S/Ç oranı 1.25 için 10^{-7} cm/s iken, 1.50 için 10^{-5} cm/s mertebesine düşmüştür.

CEM II çimentosu S/Ç oranı 1.0' den sonra üst paragrafta belirtilen durum hariç en düşük geçirimsizlik değerlerinin elde edildiği çimento tipi olmuştur. CEM II çimentosunda da DMFC-800 çimentosunda olduğu gibi artan S/Ç oranına rağmen geçirimsizlikteki artış düşük oranda olmuştur. Geçirimsizlik katsayısı k , enjeksiyondaki su miktarının artmasıyla artmakla beraber 10^{-8} cm/s mertebesinde kalmıştır. CEM II çimentosunun, enjeksiyonda artan su miktarıyla daha geçirimsiz hale gelme eğiliminin CEM III çimentosuna göre az olmasının nedeni çimento enjeksiyonlarının su ihtiyacıdır.



Şekil 4.41. DMFC-800 ve CEM I çimentolarının S/Ç oranı 0.75 olan model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin karşılaştırmalı görüntüsü.

CEM III çimentosunun enjeksiyonlarının su ihtiyacı CEM II çimentosuna göre daha az olduğundan, enjeksiyondaki su miktarı arttıkça hidrasyon fazlası su iyileşmiş zemin yapısında daha fazla boşluk kalmasına neden olmuştur. Bu nedenle CEM III çimentosunun numuneleri artan su miktarıyla CEM II çimentosunun numunelerine göre daha geçirimli hale gelmiştir.

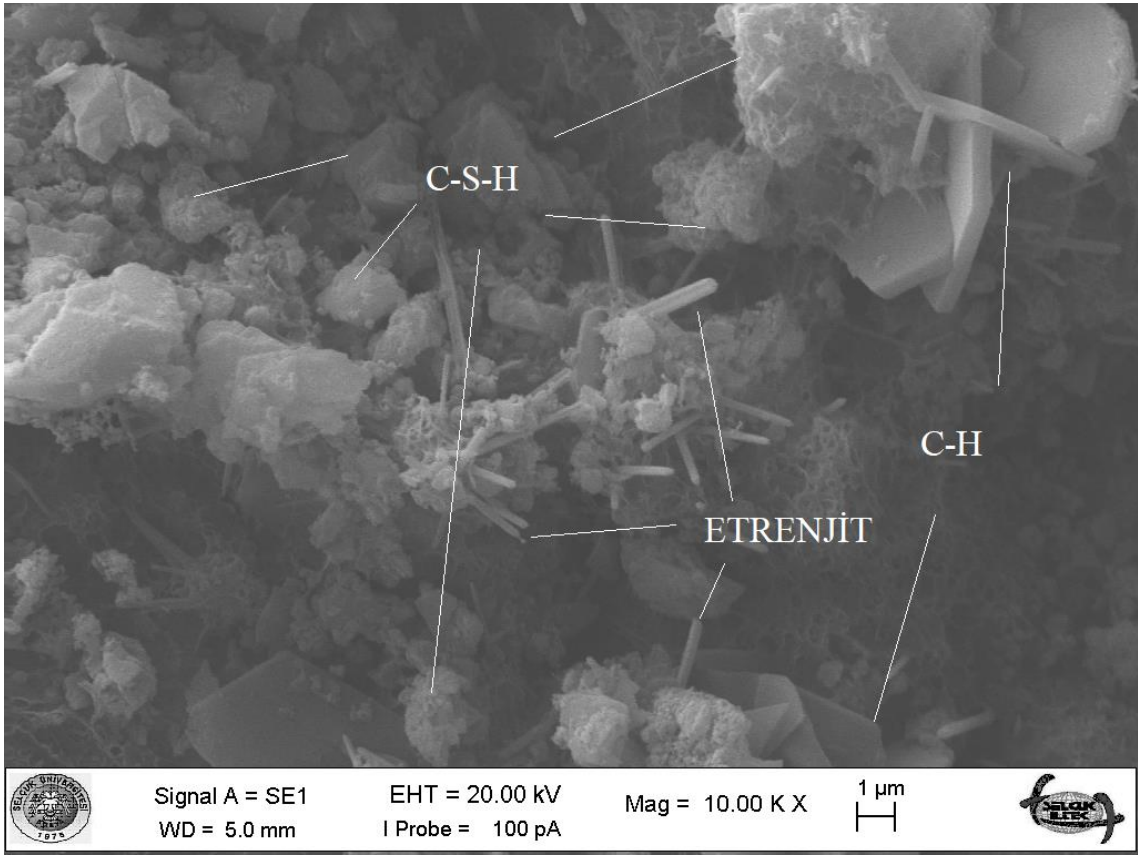
CEM I çimentosuyla hazırlanan küçük ölçekli numuneler ve model JG kolonlarından alınan karotlar en yüksek geçirimliliğe sahip numuneler olmuştur. CEM I çimentosu hem en düşük özgül yüzey alanına sahip olması hem enjeksiyonlarının yüksek viskoziteye sahip olması nedeniyle en geçirimli sonuçları vermiştir. Geçirimlilik hususunda da katkısız Portland çimentosu olan CEM I diğer çimentoların içeriklerinin ve özelliklerinin anlaşılmasında referans malzeme olmuştur. CEM III çimentosu içeriğindeki YFC enjeksiyon viskozitesini düşürdüğünden dolayı nüfuz etme kabiliyetini artırmış ayrıca mikro yapının gelişimini artırdığı için (puzolanşk reaksiyonlar) daha geçirimsiz yapılar elde edilmesini sağlamıştır. CEM II çimentosunun içeriğindeki doğal puzolanlar viskoziteyi artırarak düşük su içeren enjeksiyonlarda nüfuz etme kabiliyetini olumsuz etkilese de mikro yapıyı geliştirmeleri ve fazla su tuttukları için geçirimliliği azaltmıştır.

4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntü Analizleri

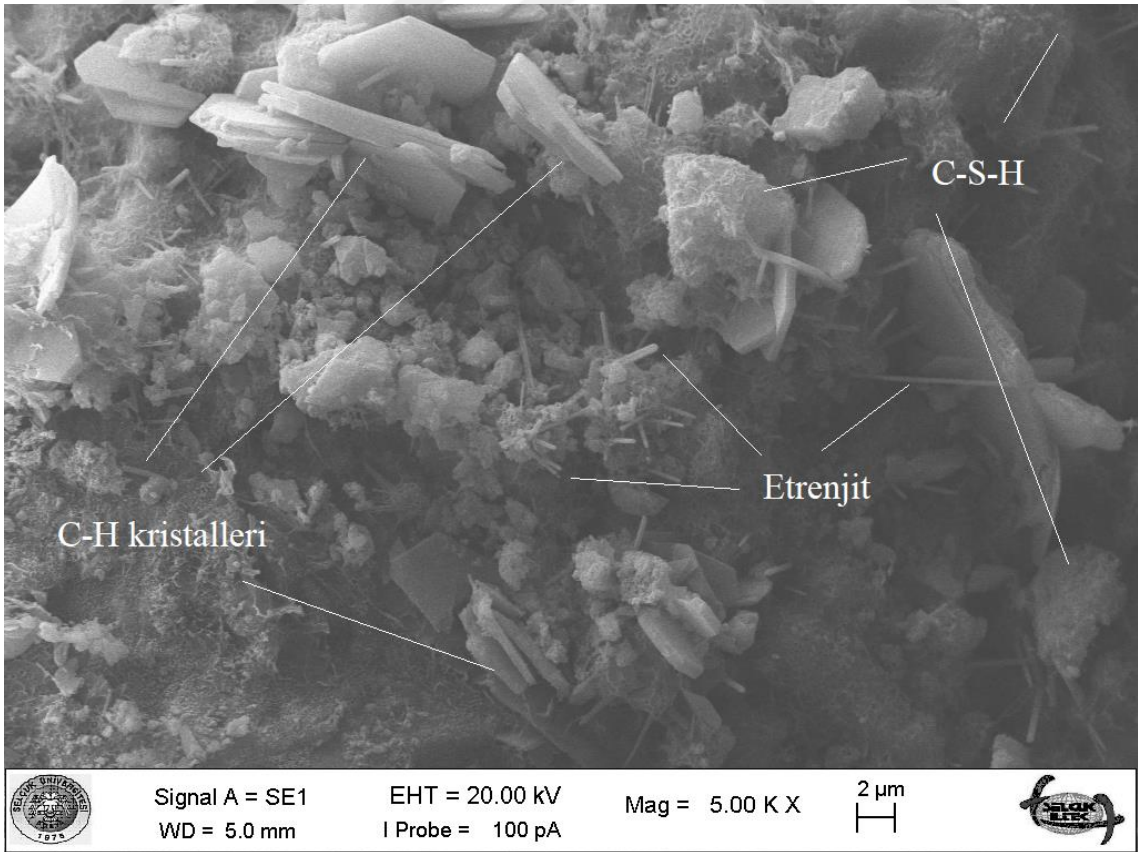
Kullanılan DMFC-800, CEM I, CEM II ve CEM III çimentolarıyla elde edilen mekanik sonuçlar önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır. Mekanik sonuçların daha net bir şekilde anlamlandırılabilmesi için iyileşmiş zeminin mikro yapısı incelenmiştir. SEM görüntüleri model JG kolonlarının dayanım deneyleri sonucu kırılan karot örneklerinden alınmıştır.

Hidratasyon reaksiyonu sonucu dayanım sağlayan en önemli mikro yapı C-S-H bileşimidir. Bu bileşik bulutsu ya da peteksi yapıya sahip olup düzgün geometrik bir formu yoktur. Bu yapıların sıklaşması ve yığınlar oluşturması halinde dayanım artar. Altıgen şeklinde oluşan mikro yapılar ise C-H kristalleridir. Bu yapılar tabakalı kristal yapılar olup puzolanik katkılarla reaksiyon verdiklerinde C-S-H yapılarına dönüşürler. Çimentonun kimyasal bileşenlerine bağlı olarak zemin taneleri arasında kristal yapıda matrisler de oluşabilir. Büyük kitleler halinde geniş alanlara yayılan kristal matrisler de dayanımı önemli ölçüde artırmaktadır.

DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranı 1.50 olan enjeksiyonuyla hazırlanmış model JG kolonundan alınan karot numunesinin SEM görüntüleri Şekil 4.42.'de verilmiştir. SEM görüntüsüne bakıldığında C-S-H yapılarının oluştuğu fakat dağınık halde olduğu göze çarpmaktadır. Çok sıkı bir C-S-H kümelenmesi olmasa da büyük yapısal boşluk ve çatlaklar gözlenmemiştir. Görüntüler daha genel bir açıdan incelendiğinde altıgen formdaki C-H kristalleri ve iğne formunda etrenjit yapıları görülmektedir (Şekil 4.43).



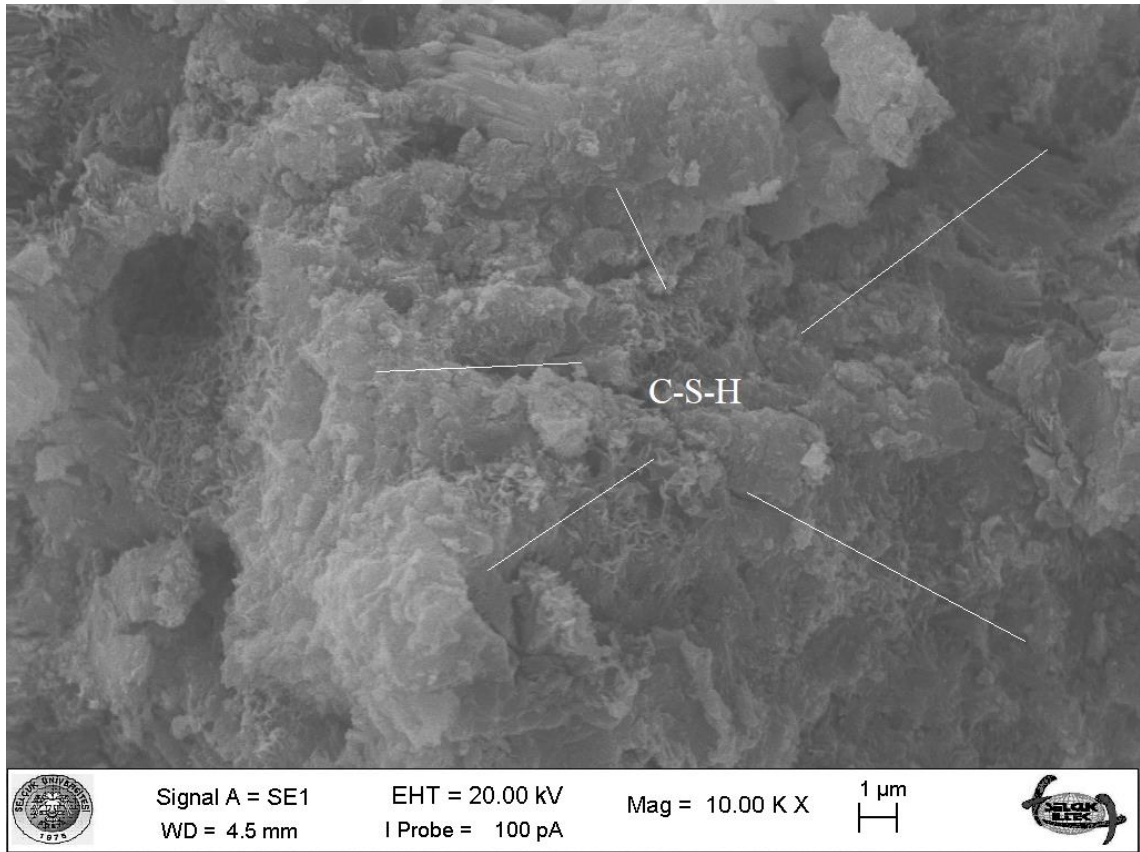
Şekil 4.42. DMFC-800, S/Ç oranı 1.50 olan model JG kolonu mikro yapısı. (x10,000)



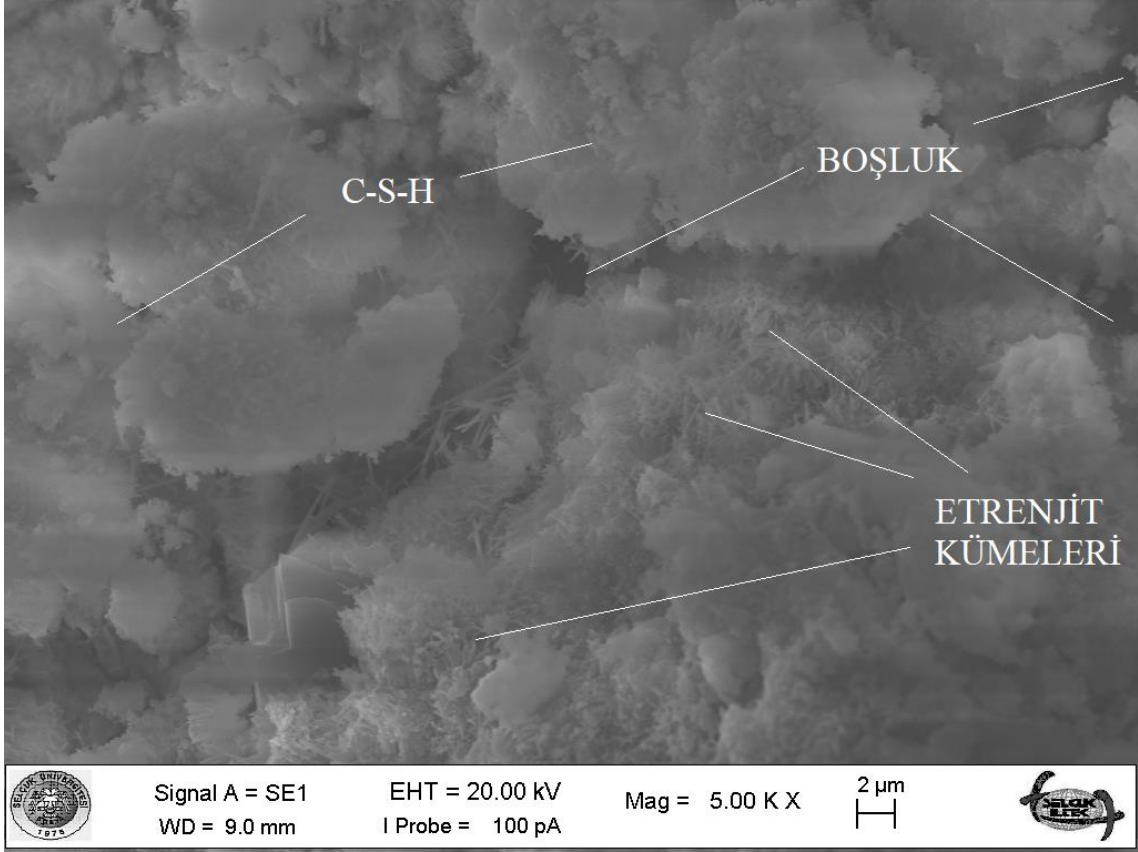
Şekil 4.43. DMFC-800, S/Ç oranı 1.50 olan model JG kolonu mikro yapısı (x5,000)

DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonuyla hazırlanmış model JG kolonundan alınan karot numunesinin SEM görüntülerine bakıldığında yoğun C-S-H kümelenmesi görülmektedir. Bu görüntü analizinde etrenjit ya da C-H kristali görülmemiştir. Bu durum hidrasyon reaksiyonlarının iyi bir şekilde tamamlandığını göstermektedir (Şekil 4.44.).

CEM II çimentosunun S/Ç oranı 1.50 olan enjeksiyonuyla hazırlanmış model JG kolonundan alınan karot numunesinin SEM görüntüleri Şekil 4.45.'de verilmiştir. Görüntüye bakıldığında C-S-H jelimsi yapılarının ayırık kümeler şeklinde olduğu görülmektedir. Ayrıca etrenjit kümelerinin olduğu göze çarpmaktadır. Etrenjit kümeleri az miktarda da olsa dayanıma katkı sağlayabilmektedir. Bu numunede bazı yapısal boşluklar da göze çarpmaktadır. Bu yapısal boşluklar enjeksiyonda bulunan fazla suyun bıraktığı boşluklardır.



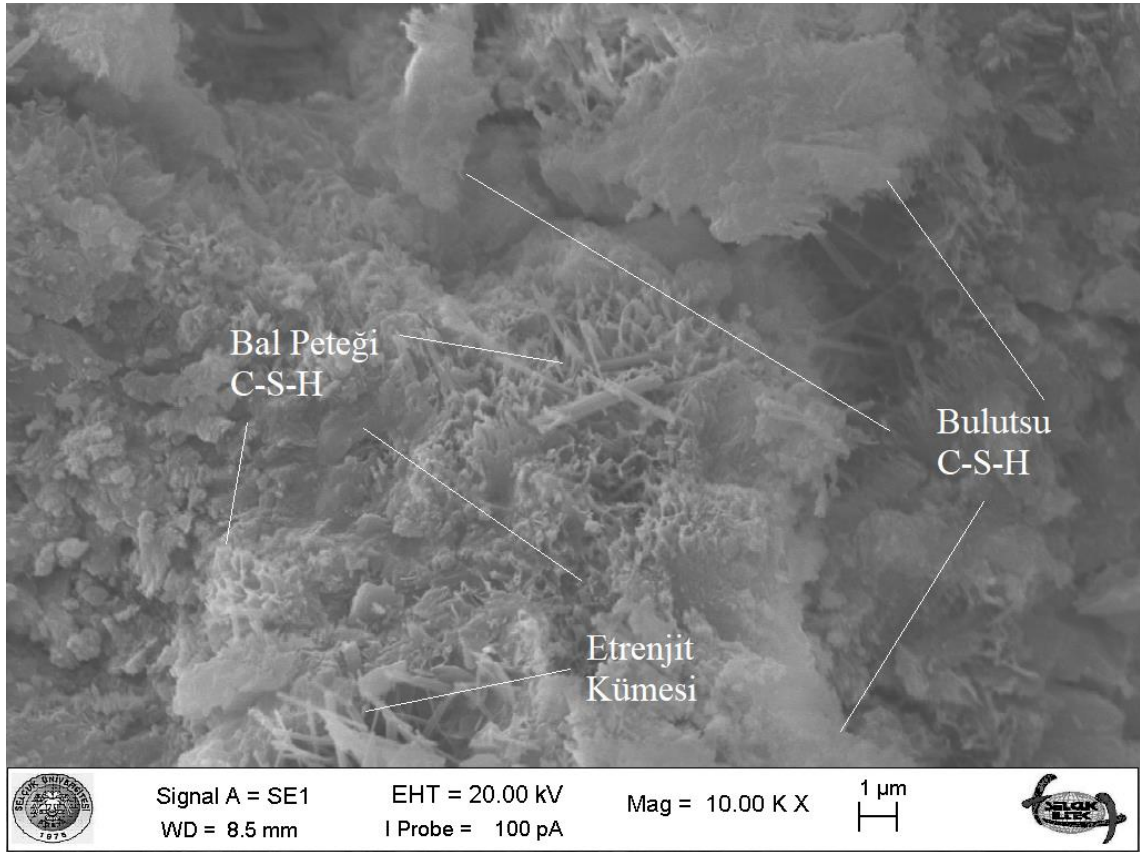
Şekil 4.44. DMFC-800, S/Ç oranı 0.75 olan model JG kolonu mikro yapısı (x10,000)



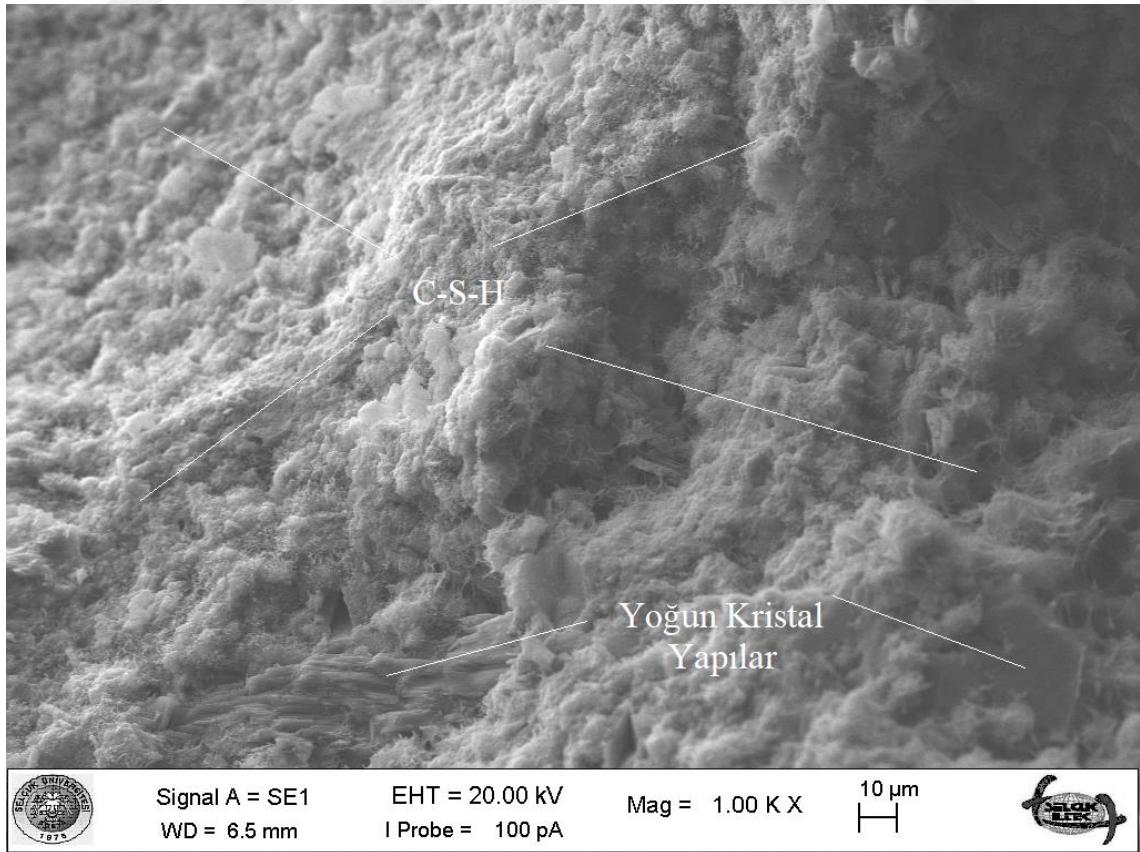
Şekil 4.45. CEM II, S/Ç oranı 1.50 olan model JG kolonu mikro yapısı. (x5,000)

CEM II çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonuyla hazırlanan model JG kolonundan alınan karot numunesinin SEM görüntüleri Şekil 4.46.'da verilmiştir. Mikro yapı incelendiğinde C-S-H jelimsi yapılarının, S/Ç oranı 1.50 olan kolonun mikro yapısına göre (Şekil 4.45.) daha geniş alanlarda oluşmuş olduğu ve bütünleşik bir yapı elde edildiği görülmektedir. Bulut formundaki C-S-H yapılarını yanı sıra bal peteği formunda C-S-H yapıları da gözlemlenmiştir. Mikro yapıda etrenjit kümeleri görülmektedir.

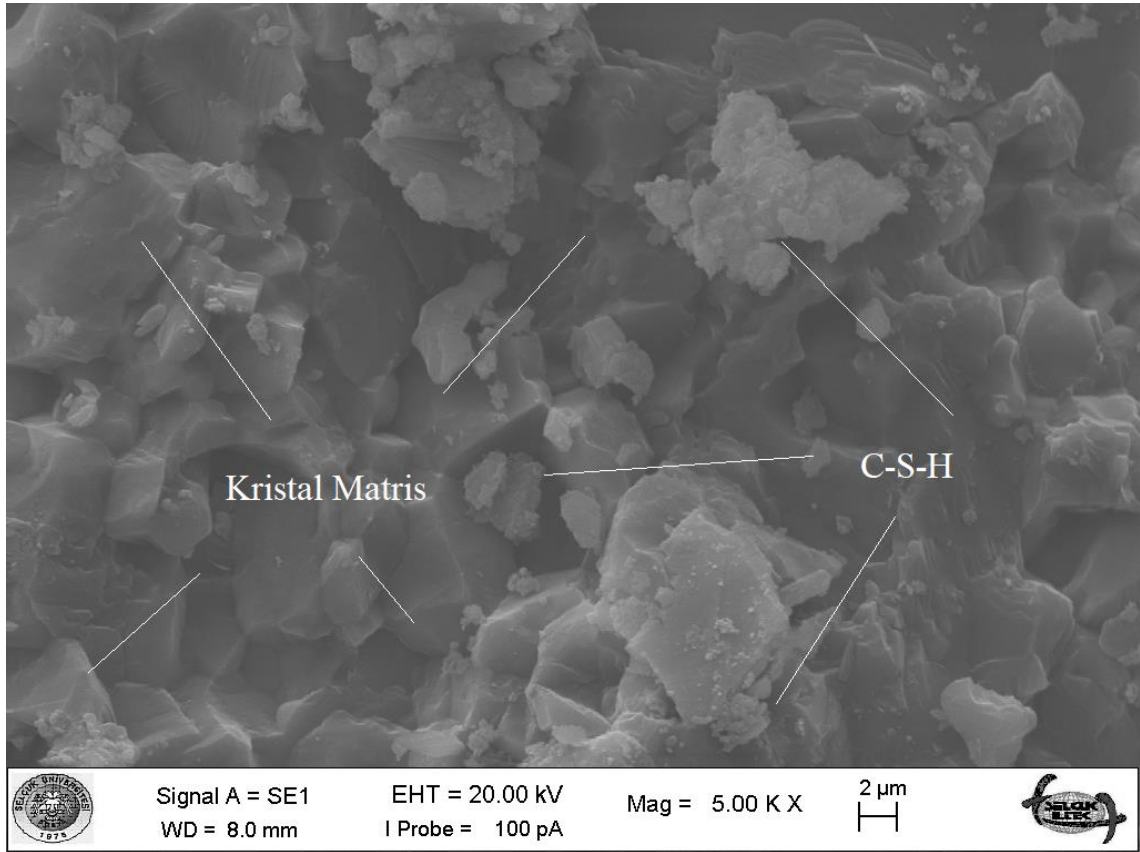
Şekil 4.47.'de CEM III çimentosunun S/Ç oranı 1.0 olan enjeksiyonuyla hazırlanmış model JG kolonunun SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntünün daha geniş bakış açısı sağlaması açısından 1000 kez büyütülmüş hali sunulmuştur. Mikro yapıya bakıldığında çok iyi bir C-S-H jelimsi yapısının elde edildiği ve jel yapısının oldukça yoğun bir şekilde yığınlar oluşturduğu görülmektedir. Mikro yapıda geniş alan kaplayan kristal matrislere de rastlanmıştır. Bu yoğun ve büyük kütleler halinde oluşan kristal matrisler de dayanım ve geçirimsizliğe önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.46. CEM II, S/Ç oranı 0.75 olan model JG kolonu mikro yapısı. (x10,000)



Şekil 4.47. CEM III, S/Ç oranı 1.0 olan model JG kolonu mikro yapısı. (x1,000)

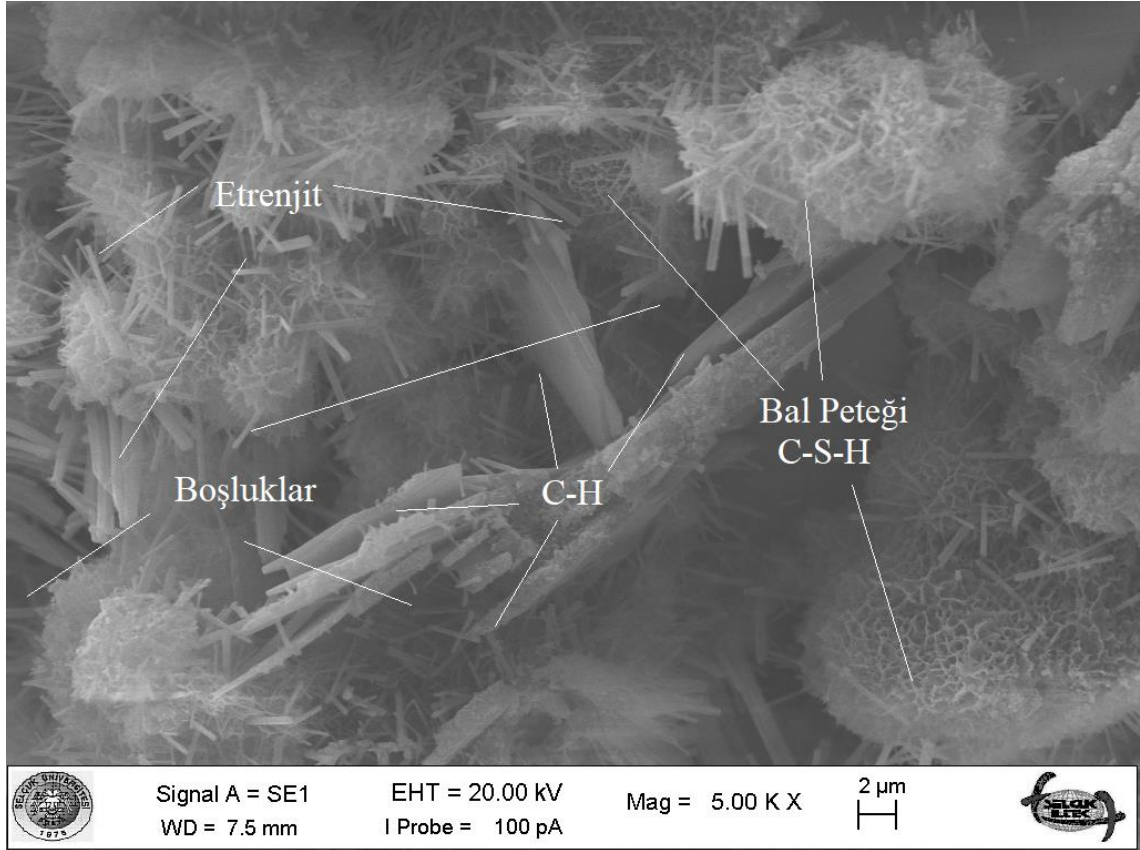


Şekil 4.48. CEM III, S/Ç oranı 0.75 olan model JG kolonu mikro yapısı. (x5,000)

Şekil 4.48.'de CEM III çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonuyla hazırlanmış model JG kolonunun SEM görüntüsü verilmiştir. Mikro yapının yoğun kristal matristen oluştuğu görülmektedir. Dağınık olarak C-S-H jel yapıları mevcuttur. Genel yapıyı oluşturan kristal matrisin boşluksuz, sıkı bir şekilde yığınlar oluşturmuş yapısı CEM III çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan model kolonunda elde edilen yüksek dayanımı sağlamıştır.

CEM I çimentosunun S/Ç oranı 1.50 olan enjeksiyonuyla hazırlanmış model JG kolonunun SEM görüntüsü Şekil 4.49.'da verilmiştir. Mikro yapıda yaprak tabaka formunda pek çok C-H kristali görülmektedir. C-H plakalarının çok olması puzolanik bir reaksiyon gerçekleşmediğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. C-S-H yapıları bal peteği formunda oluşmuştur, bu peteksi yapılardan etrenjit iğnelerinin uzandığı görülmektedir. Dayanım sağlayan C-S-H yapılarının dağınık olması ve etrenjit iğnelerinin görülmesi hidratasyon reaksiyonunun yeterli ölçüde gerçekleşmediğinin göstergesidir. Buna bağlı olarak dayanımın düşük olmuştur. Yapısal boşlukların

çokluğu ise geçirimli bir yapı olduğunun göstergesidir. Şekil 4.42.'de verilmiş olan DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranı 1,50 olan numunesinin mikro yapısıyla karşılaştırıldığında CEM I çimentosunun aynı S/Ç oranındaki numunesinin mikro yapısının daha boşluklu ve dağınık yapıda olduğu görülmektedir. Dayanım ve geçirimlilik sonuçları arasındaki farkın mikro yapıdaki oluşumların durumlarıyla ilişkisi net bir biçimde görülebilmektedir.



Şekil 4.49. CEM I, S/Ç oranı 1.50 olan model JG kolonu mikro yapısı (x5,000)

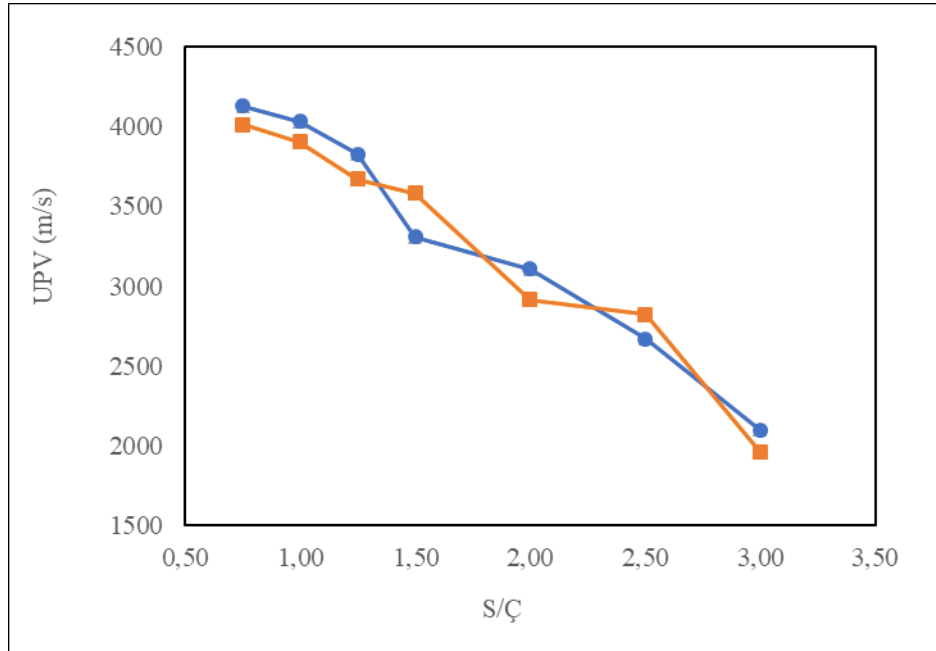
4.5. Ultra Ses Dalgası İletim Hızı Test Sonuçları

Ultra ses dalgası iletim hızı (UPV) testi model JG kolonlarından alınan karot numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Her tasarıma ait iki farklı karot numunesi üzerinde ölçümler yapılmış ve ses hızı verileri elde edilmiştir. Elde edilen ses verileri Çizelge 4.24.'de verilmiştir.

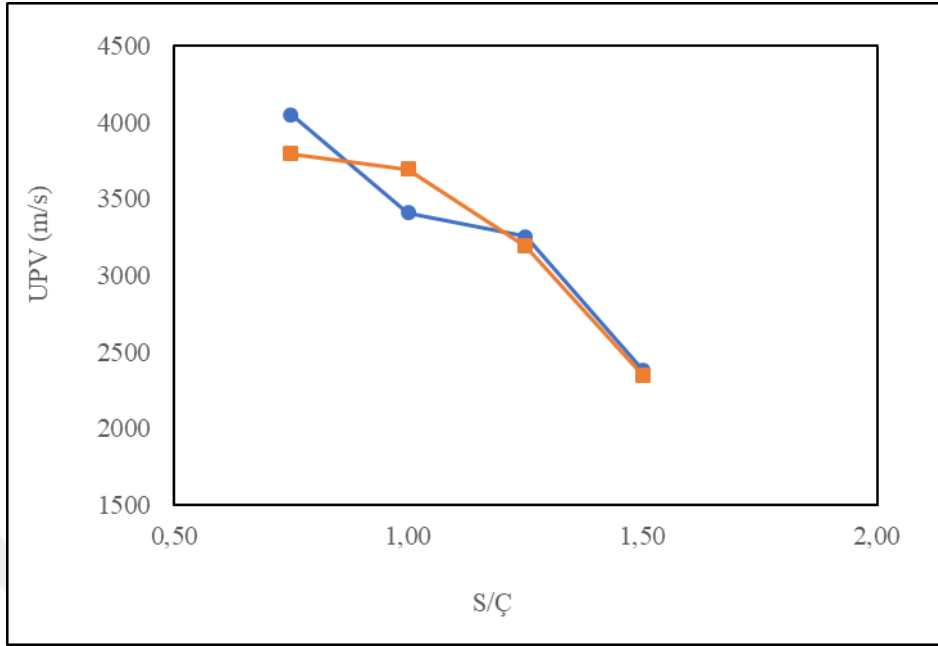
Çizelge 4.24. Model JG kolonlarından alınan karot örneklerine ait UPV (Ultrasonik Ses Dalgası İletim Hızı) verileri.

	DMFC-800			CEM I			CEM II			CEM III		
Ultrasonik Ses Dalgası İletim Hızı, UPV (m/s)												
S/Ç	V ₁	V ₂	V _{ORT}	V ₁	V ₂	V _{ORT}	V ₁	V ₂	V _{ORT}	V ₁	V ₂	V _{ORT}
0.75	4128	4011	4070	4049	3795	3922	4268	4320	4294	4363	4581	4472
1.00	4031	3903	3967	3408	3694	3551	4044	4142	4093	4339	4239	4289
1.25	3828	3668	3748	3253	3191	3222	3910	3915	3913	3768	3824	3796
1.50	3307	3581	3444	2380	3377	2879	3745	3581	3663	3689	3598	3644
2.00	3106	2916	3011									
2.50	2670	2821	2746									
3.00	2101	1964	2033									

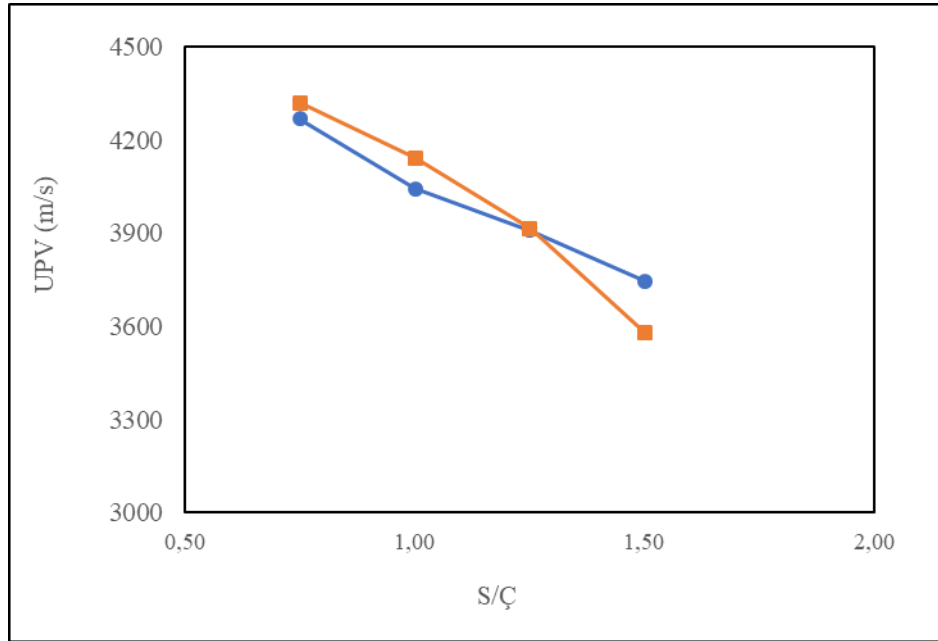
Ultra ses dalga iletim hızı verilerine bakıldığında S/Ç oranı arttıkça hız değerlerinin düştüğü görülmektedir. Buradan UPV enjeksiyondaki su miktarına göre değişiminin, dayanımın verilerinin enjeksiyondaki su miktarına göre değişimiyle benzer eğilimde olduğu anlaşılmaktadır. Sırasıyla DMFC-800, CEM I, CEM II ve CEM III çimentolarıyla oluşturulmuş olan model JG kolonlarına ait ikişer karot numunesi üzerinde yapılan UPV ölçümü sonuçlarının S/Ç oranına göre değişimi Şekil 4.50, 4.51, 4.52 ve 4.53’de verilmiştir.



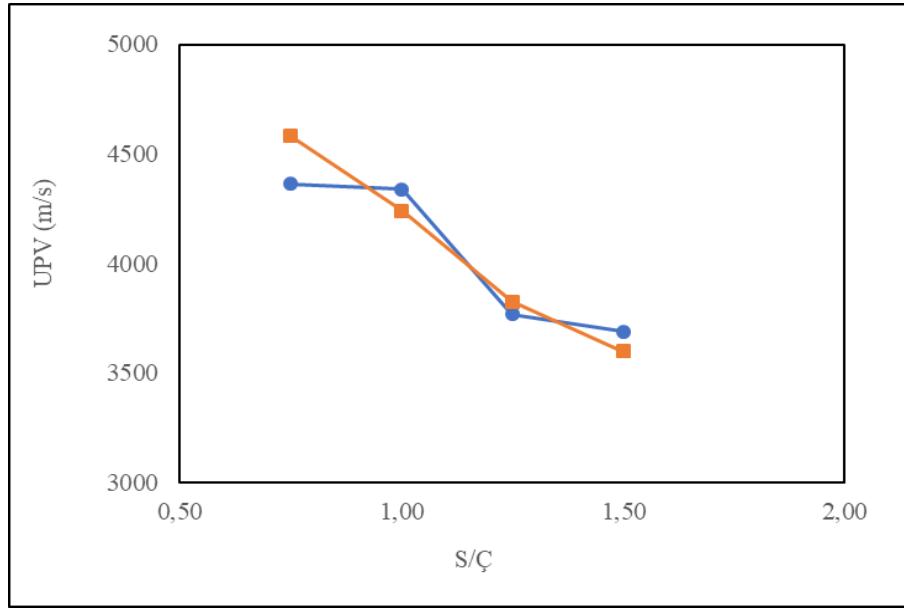
Şekil 4.50. DMFC-800 çimentosunun karot örneklerine ait UPV verilerinin S/Ç oranına göre değişimi



Şekil 4.51. CEM I çimentosunun karot örneklerine ait UPV verilerinin S/Ç oranına göre değişimi

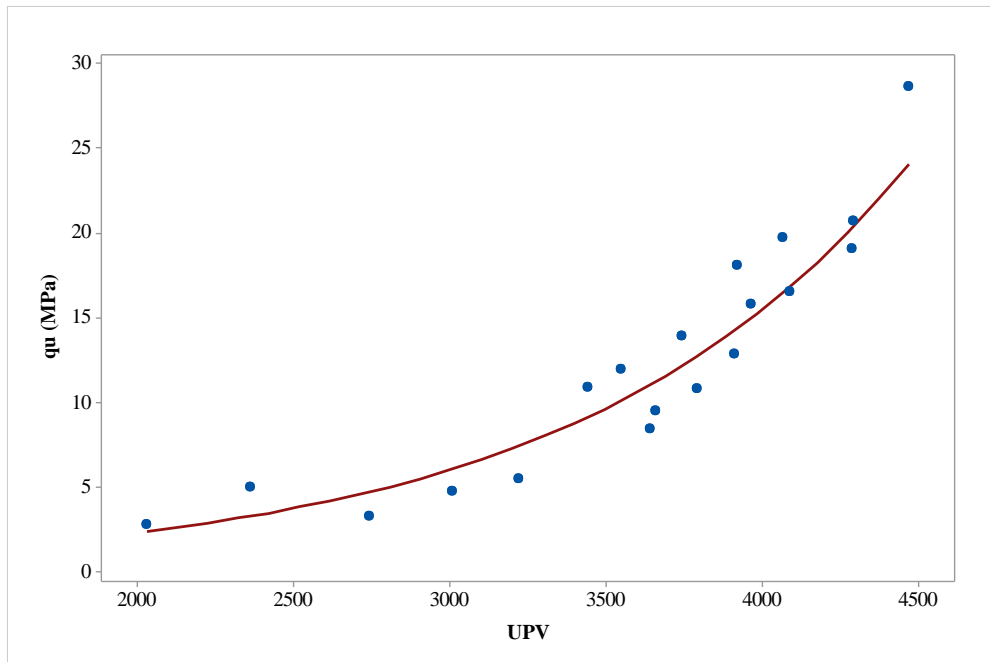


Şekil 4.52. CEM II çimentosunun karot örneklerine ait UPV verilerinin S/Ç oranına göre değişimi



Şekil 4.53. CEM III çimentosunun karot örneklerine ait UPV verilerinin S/Ç oranına göre değişimi

Aynı tasarıma ait farklı karot numunelerinden alınan UPV sonuçlarının oldukça yakın olduğu görülmüştür. UPV verileri arasındaki fark dayanım testlerinde de karşılaşılan düzeyde olmuştur. Beton dayanımı ve UPV verileri üzerine yapılan pek çok çalışmada bu iki veri takımının paralellik gösterdiği belirtilmektedir. JG metoduyla iyileştirilen kumlu zeminde de bu verilerin paralellik gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.54.' de verilen model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin serbest basınç dayanımları ile UPV hız verileri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 4.54. Karot numunelerinin serbest basınç dayanımları ile UPV verileri arasındaki logaritmik ilişki.

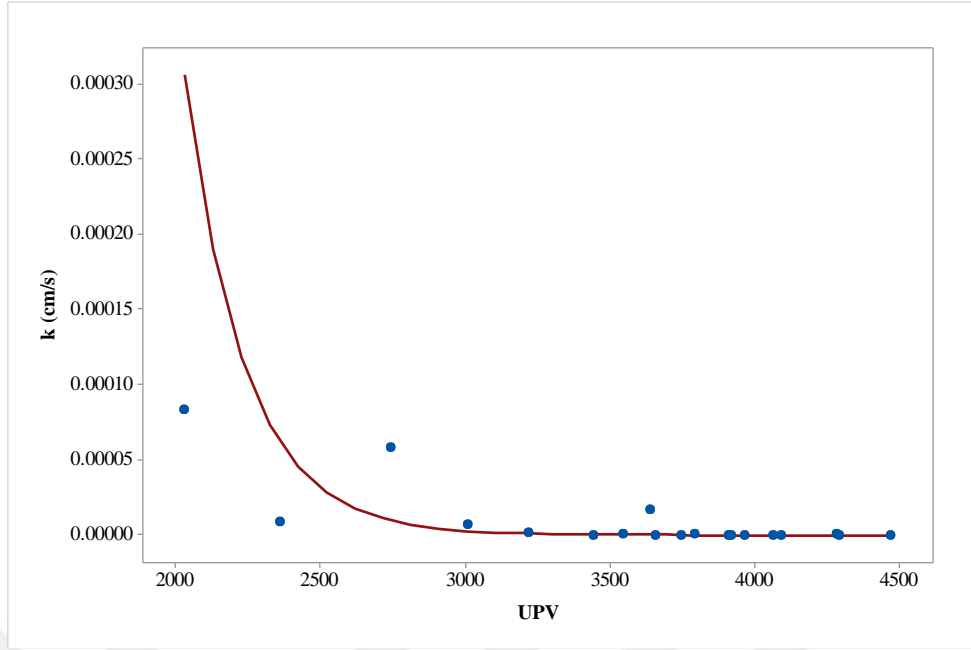
Veriler istatistiksel olarak incelendiğinde aralarında logaritmik bir ilişki olduğu görülmüştür. Serbest basınç dayanımı ve UPV hız verileri arasındaki matematiksel ilişki Denklem 4.1.' de verilmiştir.

$$\log(q_u) = - 0.4431 + 0.000408.UPV \quad (4.1.)$$

Oluşturulan istatistiksel modelin sonucunda determinasyon katsayısı R^2 değeri %89.5 olarak, düzeltilmiş determinasyon katsayısı olan R^2_{adj} değeri ise %88.9 olarak hesaplanmıştır. Determinasyon katsayısının bu denli yüksek olması veriler arasındaki ilişkinin anlamlı ve tutarlı olduğunu göstermektedir.

Dayanım sonuçları SEM analizleriyle ilişkilendirilirken mikro yapının dayanıma etkisi önceki bölümde anlatılmıştı. Çimentonun kimyasal özelliklerine ve S/Ç oranına bağlı olarak değişen mikro yapı ultra ses dalga hızını da doğrudan etkilemektedir. Puzolanik reaksiyonlar C-S-H yapılarının sıklaşmasını sağlamış ve mikro yapıyı daha kompakt hale getirmiştir. Bu sayede UPV hız verileri artmıştır. Enjeksiyondaki su miktarının azalması da boşluk oranının azalmasını sağlayarak ses dalgası iletim hızını olumlu yönde etkilemiştir. Bu etkenler dayanım ve UPV verilerinin arasında yüksek bir korelasyon olmasını sağlamıştır.

Şekil 4.55.' de verilen model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin geçirimsizlik katsayıları ile UPV hız verileri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Geçirimsizlik katsayısı verileri ile UPV hız verileri arasındaki ilişki incelendiğinde logaritmik bir ilişki olduğu görülmüştür.



Şekil 4.55. Karot numunelerinin geçirimsizlik katsayıları ile UPV verileri arasındaki logaritmik ilişki.

Geçirimsizlik katsayısı k ve UPV hız verileri arasındaki matematiksel ilişki Denklem 4.2.' de verilmiştir.

$$\log(k) = 0.779 - 0.002113 \cdot \text{UPV} \quad (4.2.)$$

Oluşturulan istatistiksel modelin sonucunda determinasyon katsayısı R^2 değeri %71.4 olarak, düzeltilmiş determinasyon katsayısı olan R^2_{adj} değeri ise %69.7 olarak hesaplanmıştır. Determinasyon katsayısının değerine bakıldığında geçirimsizlik verileri ile UPV verileri arasındaki tutarlılığın, dayanım verileri ile UPV verilerinin olduğu kadar tutarlı olmadığı görülmüştür. Ancak determinasyon katsayısının %70 oranından yüksek olması ilişkinin anlamlı olduğunu göstermektedir.

İyileştirilmiş zeminlerin mikro yapısında bulunan peteksi C-S-H yapıları, C-H kristalleri ve etrenjit kümeleri gibi dayanıma bir miktar katkı sağlayan fakat boşluklu yapıda olan oluşumlar önceki bölümde SEM analizi sonuçlarında verilmişti. Bu oluşumların boşluklu yapılarının, numunelerin geçirimsizlik durumlarının dayanım durumları kadar iyi olmamasına neden olduğu sanılmaktadır. Bu bağlamda UPV verileri geçirimsizlik verileriyle dayanım verilerine nispeten daha düşük oranda örtüşmüştür fakat yine de %71.4' lük bir determinasyon katsayısının anlamlı bir ilişkiyi gösterdiğini yeniden vurgulamak gerekir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında dört farklı tipte çimentonun Jet Grout yöntemi ile iyileştirilmiş kumlu zeminde gösterdiği performans özellikleri araştırılmıştır. Seçilen çimento tipleri; DMFC-800 ince taneli çimento, CEM I 42.5 R normal Portland çimentosu, CEM II 42.5 A-M (P-L) Portland kompoze çimento ve CEM III A 42.5 N yüksek fırın cüruf katkılı çimentodur. Çimentoların iyileştirme performanslarını incelemek amacıyla şu araştırma adımları incelenmiştir:

- Çimentoların reolojik özellikleri incelenmiştir. Çimentolar üzerinde Marsh hunisi deneyi, Lombardi basit plaka kohezyon ölçer deneyi, sedimentasyon ve vicat priz süresi tayini deneyleri yapılmıştır. Çimento enjeksiyonlarının akışkanlık özelliklerine bakıldığında viskozite değerleri büyükten küçüğe sırasıyla DMFC-800, CEM II, CEM I ve CEM III şeklinde olmuştur. Enjeksiyonların kararlılığı açısından sonuçlara bakıldığında en kararlı çimento enjeksiyonları DMFC-800 çimentosuna ait enjeksiyonlar olmuştur. CEM II ve CEM III çimentoları düşük su içeriklerinde kararlı kalabilirken CEM I çimentosunun hiçbir enjeksiyon karışımı kararlı özellik göstermemiştir. Priz sürelerine bakıldığında en erken priz alan DMFC-800 ardından sırasıyla CEM I, CEM II ve CEM III çimentoları gelmiştir. Geniş bir S/Ç aralığı için yapılan bu deneyler sonucunda enjeksiyonlarda 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 S/Ç oranlarının kullanılmasına karar verilmiş, DMFC-800 çimentosu için ilaveten 2.0, 2.5 ve 3.0 S/Ç oranları da kullanılmıştır.
- Enjeksiyonların tasarımına karar verilmesinin ardından numunelerin hazırlanmasına geçilmiştir. Kumlu zeminin sıklığı %50 olarak seçilmiş ve hem elde karışım yapılan küçük numunelerde hem de büyük ölçekli model kolonların oluşturulmasında kullanılan büyük varillerde yaklaşık %50 sıklıkta kumlu zemin kullanılmıştır. Bu sıklık değeri laboratuvar ortamında model kolonların üretimini kolaylaştırmak amacıyla tercih edilmiştir.
- Hazırlanan numuneler üzerinde dayanım testleri yapılmıştır. Elde hazırlanan küçük numunelerine 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç ve yarmada çekme dayanım testleri uygulanmıştır. 7 günlük dayanım sonuçlarına bakıldığında DMFC-800 ince taneli çimentosu en yüksek dayanımı vermiştir. DMFC-800 çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonuyla hazırlanan numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı 9.41 MPa olarak belirlenmiştir.

İnce taneli çimentonun ardından CEM I çimentosunun 7 günlük numunelerinin maksimum serbest basınç dayanımı ortalama 8.65 MPa olarak belirlenmiştir. CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerin maksimum dayanımı 7.96 MPa, CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı ise 6.42 MPa olarak belirlenmiştir. 7 günlük dayanımlarda çimentoların içerdiği klinker oranı etkili olmuştur. İçerisinde klinkere ikame katkı içeren CEM II ve CEM III çimentoları nispeten düşük sonuçlar vermişlerdir. CEM III çimentosunun ikame katkı oranı en fazla olduğundan en düşük sonuçları veren çimento tipi olmuştur. DMFC-800 ince taneli çimentosu ise yüksek özgül yüzey alanı sayesinde daha hızlı hidrasyon sağlamış ve erken dayanım kazanmıştır. 28 günlük dayanım sonuçlarına bakıldığında katkılı çimentoların dayanımlarının 7 günlük dayanıma göre CEM I ve DMFC-800 çimentolarına göre daha fazla arttığı ve yüksek dayanımlar verdikleri görülmüştür.

- 28 günlük kür süresinin sonunda en büyük dayanımı DMFC-800 çimentosuna ait S/Ç oranı 0.75 olan numunelerden 21.39 MPa olarak elde edilirken CEM III çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan numunelerinin ortalama dayanımı 21.25 MPa olarak belirlenmiştir. CEM II çimentosuna ait maksimum dayanım 20.21 MPa, CEM I çimentosuna ait maksimum dayanım ise 18.05 MPa olarak belirlenmiştir. Sonuçlar CEM II çimentosunda bulunan doğal puzolanların ve CEM III çimentosunda bulunan yüksek fırın cürufunun etkili olduğunu göstermiştir. DMFC-800 yüksek reaktifliği sayesinde etkili olurken katkısız Portland çimentosu CEM I diğer çimento tiplerine göre daha düşük sonuçlar vermiştir.
- Uzun dönem dayanım sonuçlarında dayanım sıralaması bir kez daha değişmiştir. 56 günlük kür süresinin sonunda CEM III çimentosuyla hazırlanan numuneler en yüksek sonuçları vermiştir. CEM III çimentosundan elde edilen ortalama dayanım değeri 25 MPa olmuştur ardından gelen CEM II çimentosunun maksimum dayanımı 23.50 MPa olmuştur. DMFC-800 çimentosu 22.40 MPa dayanım sağlarken CEM I çimentosunun maksimum dayanımı 19.00 MPa olmuştur. Özetle küçük numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerine bakıldığında; katkılı çimentolar kısa vadede dezavantajlı olurken uzun vadede katkısız çimentolara göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Yüksek fırın cürufu katkısı uzun vadede doğal puzolanlardan daha etkili olmuştur.
- Model JG kolonlarının uzun vadeli dayanım sonuçlarına bakıldığında küçük numunelerden elde edilen sonuçlara göre bazı farklılıkların olduğu görülmüştür.

Sonuçlar genel olarak elde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlara göre bir miktar daha düşük olmuştur. Zemin-enjeksiyon karışımının oluşturulması küçük numunelerde olduğu kadar kontrollü olmadığı için böyle bir fark ortaya çıkmıştır. Küçük numuneler elde karıştırılarak hazırlandığı için sonuçlarda çimentonun karakteristik özellikleri ve S/Ç oranı başlıca etken olmuştur. Arazideki JG sisteminin bir replikası olan sistem kullanılarak üretilen model JG kolonlarında ise çimento enjeksiyonlarının reolojik özellikleri oldukça etkili olmuştur. Reolojik özellikler çimento enjeksiyonlarının zemine nüfuz etme kabiliyetini etkilemiştir. S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonlar kullanılarak hazırlanan JG kolonlarının serbest basınç dayanımları kıyaslandığında CEM III çimentosuyla oluşturulan kolon dayanımının belirgin şekilde en yüksek olduğu görülmektedir. Çimentoların karakteristik özelliklerinin kıyaslanması amacıyla yapılan küçük ölçekli deney sonuçlarında da CEM III çimentosu uzun vadede en yüksek dayanımı veren çimento tipi olmuştur. Ancak dayanımlar arası fark bu denli bariz olmamıştır. Diğer puzolanik katkı içeren çimento tipi olan CEM II çimentosunun model deneylerde CEM III çimentosu kadar etkili olamamasının en temel nedeni enjeksiyonların reolojik özellikleridir. CEM III çimentosunun S/Ç oranı 0.75 için belirlenen viskozitesine bakıldığında CEM II çimentosunun enjeksiyonuna göre çok daha akışkan özellikte olduğu reolojik özellik deneylerinde belirlenmiştir. CEM III çimentosunun enjeksiyonu bu özelliği sayesinde CEM II çimentosuna kıyasla zemine daha iyi nüfuz etmiş ve daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

- DMFC-800 ince taneli çimentoyla oluşturulan JG kolonlarının dayanım sonuçlarına bakıldığında S/Ç oranı 0.75 ve 1.0 olan enjeksiyonlar kullanılarak oluşturulan kolonlardan elde edilen değerlerin (19.77 MPa ve 15.82 MPa) CEM II çimentosuyla aynı S/Ç oranındaki enjeksiyonlarla oluşturulan kolonlardan elde edilen sonuçlara (20.72 MPa ve 16.59 MPa) yakın değerler olduğu görülmüştür. CEM II çimentosunda olduğu gibi DMFC-800 çimentosunun enjeksiyonlarında da su ihtiyacı CEM I ve CEM III çimentolarının enjeksiyonlarının su ihtiyacından fazladır. Yüksek özgül yüzey alanı suyla karışığında reaktif yüzey alanı fazla olmakta ve enjeksiyonun su ihtiyacı artmaktadır. İnce taneli çimentonun özgül yüzey alanı CEM II çimentosunun yaklaşık iki katıdır ve su ihtiyacı da CEM II çimentosuna göre çok daha fazladır.

Bu nedenle CEM II çimentosunun S/Ç 0.75 ve 1.0 olan enjeksiyonlarında DMFC-800 çimentosundan bir miktar üstün olmuştur.

- Enjeksiyonlardaki su miktarı arttığında DMFC-800 çimentosu CEM II ve CEM III çimentolarından daha yüksek sonuçlar vermiştir. İnce taneli çimentonun su ihtiyacının fazla olması hidrasyon fazlası su miktarının diğer çimentolara göre az olmasını sağlamıştır. Fazla su iyileşmiş zemin bünyesinde boşluklara neden olduğundan CEM II ve CEM III çimentolarının artan S/Ç oranlarındaki performansı düşmüştür.
- Yarmada çekme dayanımlarına bakıldığında erken dönem dayanımlarında basınç deneylerinde olduğu gibi katkılı çimentolar etkili olmamıştır. Orta ve uzun vadeli çekme dayanımlarına bakıldığında CEM II çimentosunun numunelerinden elde edilen çekme dayanımları CEM III çimentosuna göre daha yüksek olmuştur. Özellikle elde hazırlanan küçük numunelerin çekme dayanımları incelendiğinde CEM II çimentosunun en etkili olduğu görülmüştür.
- Geçirimsizlik deneyi sonuçlarına bakıldığında dayanım sonuçlarında olduğu gibi küçük numunelerin bir miktar daha geçirimsiz olduğu görülmüştür. Burada da bu farkın kontrollü numune hazırlamaktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Geçirimsizlik katsayıları S/Ç oranının artmasıyla artmış yani numuneler daha geçirimsiz hale gelmiştir. Geçirimsizlik deneyleri sonuçlarına göre en geçirimsiz numuneler DMFC-800 ince taneli çimentosuyla hazırlanan numuneler olmuştur. Elde hazırlanan numunelerde geçirimsizlik katsayısı (k), 9.54×10^{-11} cm/s, model kolonlarda 8.52×10^{-11} cm/s olarak belirlenmiştir. İnce taneli çimento büyük özgül yüzey alanı sayesinde oldukça düşük geçirimsizlik sonuçları elde edilmesini sağlamıştır. Çimento enjeksiyonlarının zemine nüfuz edebilme kabiliyetini etkileyen en önemli faktör çimentonun ortalama tane büyüklüğü ardından da enjeksiyonun reolojik özellikleridir ancak bu tez çalışması kapsamında kullanılan kumlu zeminin sıklığı %50 olarak seçilmiştir. Bu orta sıkı zemin durumu çimento tane büyüklüğünün geçirimsizlik sonuçları üzerine etkisini bir miktar azaltmıştır.
- CEM III çimentosuna ait numuneler S/Ç oranı 0.75 için ince taneli çimentodan sonra en geçirimsiz numuneler olmuştur ($k= 1.50 \times 10^{-10}$). Ancak S/Ç oranı arttıkça CEM II çimentosunun numunelerinden daha geçirimsiz hale gelmişlerdir.

- CEM II çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan numunelerinin geçirimsizlik katsayıları model kolonlarda 1.81×10^{-9} küçük ölçekli numunelerde ise 1.69×10^{-9} cm/s olarak bulunmuştur. Bu geçirimsizlik katsayılarıyla DMFC-800 ve CEM III çimentolarının ardından en geçirimsiz numune olmuştur. Çimento enjeksiyonlarının S/Ç oranı arttıkça geçirimsizlik artmasına rağmen CEM II çimentosunun numunelerindeki geçirimsizlik artışı DMFC-800 çimentosunda olduğu gibi az miktarda olmuştur.
- UPV sonuçları dayanım ve geçirimsizlik test sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. S/Ç oranındaki artışla birlikte ultra ses iletim hızı değerleri düşmektedir. UPV testinin hasarsız olarak iyileştirilmiş zemin numunelerinin dayanım özellikleri hakkında fikir edinmek ve numuneleri kıyaslamak için kullanılabilmesi kanısına varılmıştır.

5.2. Öneriler

Zemin iyileştirmede kullanılacak çimento tipinin seçilmesi için çimento tipinin karakteristik özelliklerinin incelenmesi önemlidir fakat yalnızca çimentonun karakteristik özellikleri karşılaştırılarak seçim yapılması derinliği olmayan bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. İyileştirilecek zeminin özellikleri de dikkate alınmalı ve buna göre tasarım yapılmalıdır.

- İyileştirilecek zeminin su muhtevası, sıkılık durumu ve hatta zeminin minerolojik yapısı çimento tercihinde etkili olabilir. Bu özellikler dikkate alınarak seçim yapılmalıdır. Zemin yapısına uygun puzolanik katkıının seçilmesi ve kullanılmasının pek çok avantajları olacaktır. Puzolanik katkılar önemli performans artışı sağlamıştır ve büyük ölçüde ekonomiklik sağlamaktadır.
- Enjeksiyonun reolojik özellikleri sonuçlarda önemli etkilere sahiptir. Genel olarak uygulamalarda reolojik özelliklerin istenen seviyeye gelmesi için S/Ç oranı değiştirilmektedir. Çoğunlukla jet enjeksiyonlarında hemen her tür zemin için S/Ç oranı 1.0 olarak seçilmektedir. S/Ç oranının artırılması yerine reolojik özellikleri olumlu etkileyen katkılar kullanılması daha yüksek verim alınmasını sağlayacaktır. Reolojik özelliklerin iyileşmesi atık enjeksiyon miktarını azaltacak, kolon çapını artıracak ve enjeksiyonun zeminde daha homojen dağılmasını sağlayacaktır.
- Çeşitli puzolanik katkıların farklı zeminlerle etkileşimleriyle ilgili çalışmalar artırılması ve zemin tipine göre puzolanik katkıların önerilmesi gerekmektedir. Bu sayede çimentoya ikame geri dönüşüm katkıların kullanımı artırılmalıdır. Çimento üretimi en çok karbon salınımına neden olan sanayi üretimlerinden biridir. Bu katkıların kullanımı geri dönüşüm sağlayacağından hem çevreye hem de ekonomiye katkı sağlayacaktır.
- Geçirimlilik verileri ile UPV verileri arasındaki ilişkinin, dayanım verileri ile UPV verileri arasındaki ilişkiye göre daha az tutarlı olması geçirimlilik katsayısının ölçülmesiyle ilişkili olabilir. Üç eksenli basınç testi deney seti kullanılarak yapılan geçirimlilik testleri iyileştirilmemiş, doğal zeminlere daha uygun bir ekipman olabilir. Bu çalışma kapsamında üretilen iyileştirilmiş zemin numuneleri çok yüksek derecede geçirimsiz olduğundan gerçek geçirimlilik katsayılarının ölçülebilmesi için kaya ya da beton numunelerinin geçirimlilik katsayılarının kullanılması daha doğru sonuçlar verebilir.

- Elde edilen sonuçlara bakıldığında Ultra Ses İletim Hızı (UPV) test yönteminin iyileştirilmiş zemin örnekleri üzerinde anlamlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu test yönteminin iyileştirilmiş zeminler üzerinde uygulaması üzerinde çalışmalar ilerletilerek arazi uygulamalarında karot alınarak yapılan dayanım testleri yerine kullanılabilceği, hızlı ve güvenilir sonuçlar alınabileceği kanaatine varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Ahari, R.S., Erdem, T.K. and Ramyar, K., 2015, Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*, 59, 26-37.
- Ahari, R.S., Erdem, T.K. and Ramyar, K., 2015, Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 75, 89-98.
- ASTM. D6913-04, 2009. Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. West Conshohocken, PA, USA: ASTM international.
- ASTM. C597, 2009. Standard test method for pulse velocity through concrete. PA, USA: ASTM international
- ASTM. D4253-00, 2006. *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. PA, USA: ASTM international
- ASTM. D4254, 2006. *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density..* PA, USA: ASTM international
- ASTM. C939-02, 2002. *Standard test method for flow of grout for preplaced aggregate concrete (flow cone method)*, Annual Book of ASTM Standards. ASTM.
- ASTM. C940-98a, 2002. *Standard test method for expansion and bleeding of freshly mixed grouts for preplaced aggregate concrete in the laboratory*. Annual Book of ASTM Standards. ASTM.
- ASTM. C191, 2004. *Standard Test Method For Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. Annual Book of ASTM Standards. ASTM.
- ASTM C4219-02, 2002. *Standard test method for unconfined compressive strength index of chemical-grouted*, Annual Book of ASTM Standards. ASTM.
- ASTM C496-90, 1990. *Test for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*, Annual Book of ASTM Standards. ASTM.

- ASTM D5084-16a, 2016. *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*, ASTM International. ASTM.
- Barnes, H.A., Hutton, J.F. and Walters, K., 2001. *An Introduction To Rheology*. Rheology series 3 *Elsevier*.
- Benaicha, M., Roguiez, X., Jalbaud, O., Burtschell, Y. and Alaoui, A.H., 2015, Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 84(1), 103-110.
- Blitz, J., 1971, *Ultrasonics: Methods and Applications*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Brown, A.E., 1997, *The Report on Rationale and Summary of Methods for Determining Ultrasonic Properties of Materials*, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-119958, 1997.
- Chen, J.J. and Kwan, A.K.H., 2012, Superfine Cement for Improving Packing Density, Rheology and Strength of Cement Paste, *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 1-10.
- Collins, F. and Sanjayan, J.G., 1999, Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder, *Cement and Concrete Research*, 29(3), 459-462.
- Croce, P. and A. Flora. 2001, Analysis of Single Fluid Jet-Grouting, *Geotechnique*, London, 51(10), 905–906.
- Croce, P. and A. Flora. 2001, Analysis of Single Fluid Jet-Grouting, *Geotechnique*, London, 51(10), 905–906.
- Croce, P., Flora, A. ve Modoni, G., 2014, *Jet Grouting Technology, Design and Control*, CRC Press: Taylor & Francis Group.
- Dils, J., Boel, V. and De Schutter, G., 2013, Influence of Cement Type and Mixing Pressure on Air Content, Rheology And Mechanical Properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, 41(1), 455-463.
- Draganovic, A., Stille, H. 2011, Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 548–559.
- EN, BS. 12715, 2000. *Execution of special geotechnical work: Grouting*. British-Adopted European Standard.

- Erkan, İ. H., 2013, "Jet grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması", Doktora tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 15-45.
- Erol, O. ve Bayram, Z.Ç., 2018, Jet Enjeksiyon Yöntemi, Yüksel Proje, Ankara
- Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y., 2007, Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, 263-275.
- Havard, J. and Gjørsv, O.E., 1997, Effect Of Gypsum-Hemihydrate Ratio in Cement on Rheological Properties of Fresh Concrete, *Materials Journal*, 94(2), 142-146.
- Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y. and Li, H., 2017, Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review, *Cement and Concrete Composites*, 83, 146-159.
- Kovačević, M.S., Jurić-Kaćunić, D. and Ivanković, A., 2019, Interactive Geotechnical Design of Bridge Foundations. In *International Conference on Bridges*, January 2019.
- Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H., 1983, Ultrasonic Testing of Materials, *Springer-Verlag*, Berlin, 22-38.
- Kutlu, O. ve Demiriz, M., 2007, Cem III Tipi Çimentoların Betonda Kullanımının Teknik ve Ekonomik Yönlerinin Değerlendirilmesi, *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 28-30.
- Küçükali, N., 2008, Demiryolu altyapısının jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, , Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., & Kaczmarek, M., 2006, Correlation Between Porosity, Permeability And Ultrasonic Parameters Of Mortar With Variable Water/Cement Ratio And Water Content, *Cement and Concrete Research*, 36(4), 625-633.
- Lange, F., Mörtel, H., & Rudert, V., 1997, Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties, *Cement and Concrete Research*, 27(10), 1481-1488.
- Lombardi, G., 1985, The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock, *15th International Congress On Large Dams*, Lausanne, 235-260.
- Lunardi, P., 1997. "Ground improvement by means of jet-grouting." *Ground improvement*, ISSMFE Thomas Telford Services Ltd., Vol 1 No:2, pp.65-85.
- Markou, I.N., Christodoulou, D.N. and Atmatzidis, D.K., 2012, Effect of sand gradation on the groutability of cement suspensions, In *Grouting and Deep Mixing*, 2003-2012.

- Mehta PK., 1986, In: Hall WJ editör, *Concrete, structure properties and materials*.
- Miki, G., 1973, Chemical Stabilization of Sandy Soils by Grouting in Japan. *Proceedings of the 8th ICSMFE*, Moscow, Russia, June, 395–405.
- Mollamahmutoğlu, M., 2003, Treatment of Medium-to Coarse-Grained Sands by Fine-Grained Portland Cement (FGPC) as an Alternative Grouting Material to Silicate-Ester Grouts, *Cement, Concrete and Aggregates*, 25(1), 1-6.
- Mollamahmutoglu, M. and Yilmaz, Y., 2011, Engineering properties of medium-to-fine sands injected with microfine cement grout, *Marine Georesources and Geotechnology*, 29(2), 95-109.
- Mollamahmutoğlu, M. Ve Avcı, E., 2015, Effectiveness of Microfine Portland Cement Grouting on the Strength and Permeability of Medium to Fine Sands, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 319-326.
- Nakanishi, W., 1974, Method for Forming an Underground Wall Comprising a Plurality of Columns in the Earth and Soil Formation, *U.S. Patent 3,800,544*: 8 p.
- Pantazopoulos, I. A., Markou, I. N., Christodoulou, D. N., Droudakis, A. I., Atmatzidis, D. K., Antiohos, S. K., & Chaniotakis, E., 2012, Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements, *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 593-603.
- Park, C.K., Noh, M.H. and Park, T.H., 2005, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, 35(5), 842-849.
- Perret, S., Ballivy, G., Khayat, K., & Mnif, T., 1997, Injectability of fine sand with cement-based grout, In *Grouting: Compaction, Remediation and Testing*, ASCE, 289-305.
- Pozzi, S., 2015, “High Intensity Focused Ultrasound (HIFU): computing tools for medical applications”, Yüksek Lisans Tezi, *University of Rome*, Roma, 30-75.
- Roussel, N. and Le Roy, R., 2005, The Marsh cone: a test or a rheological apparatus, *Cement And Concrete Research*, 35(5), 823-830.
- Rawya, A.A., 2018, “Nondestructive Evaluation Of Corrosion Damage In Reinforced Concrete Aged Slab Specimen” Yüksek lisans tezi, *University of South Carolina*, İngilizce, 30-35.
- Schwarz LG, Krizek RJ.,1994, Effect of Preparation Technique on Permeability and Strength of Cement-Grouted Sand., *Geotech Test Journal*, 17(4), 434-43.
- Shibazaki M., 2003, State of practice of jet grouting, *Grouting and Ground Treatment*, ASCE, 198-217.
- Szilard, J.,1982, Ultrasonic Testing, *John Wiley & Sons*, New York, USA, 10-40.

- Tomuolo A., 1982, Principles of Grouting, Short Course on Soil & Rock Improvement, Techniques Including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Method, *Asian Institute of Technology*, Thailand.
- Tomuolo, K.D., 1991, Dam foundation grouting. *American Society of Civil Engineers*, New York, 157-158.
- TS EN 197-1 (2002). “Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standardları Enstitüsü.
- Vipulanandan, C., & Shenoy, S., 1992, Properties of cement grouts and grouted sands with additives, In *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*. ASCE, 500-511.
- Wallevik, J. E., 2009, Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown, *Cement and Concrete Research*, 39(1), 14-29.
- Warner, J., 2004, Practical handbook of grouting: soil, rock, and structures, *John Wiley & Sons*, 22-65.
- Weidinger, D.M., Ge, L. and Stephenson, R.W., 2009, Ultrasonic pulse velocity tests on compacted soil, *Characterization, modeling, and performance of geomaterials. Selected papers from the 2009 Geohunan International Conference*, Changsha, Hunan, China, 3-6 August 2009, ASCE, 150-155.
- Yaman, İ.Ö., Udegbuman, O. and Aktan H., 1998, The Report on Evaluation of Concrete Permeability by Ultrasonic Testing Techniques, *Department of Civil and Environmental Engineering Wayne State University*, 15-35.
- Yaman, İ.Ö., 2000, “Finite Element Simulation of Wave Propagation in Concrete for the Evaluation of Ultrasonic Testing Procedures”, Doktora Tezi, *Wayne State University*, Detroit, 15-90.
- Yağızatlı, E., 2012, “Jet-grout kolonların SEM analizi ve etkin parametrelerin optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi*, Şanlıurfa, 20-75.
- Zaimoğlu, A. Ş., 2003, “Bentonit, uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu karşılımlarında fiziksel ve mekanik özelliklerin Taguchi yöntemi ile incelenmesi”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 25-95.
- 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.
- Zhang, X. and Han, J., 2000, The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, *Cement and Concrete Research*, 30(5), 827-830.

[URL 2] <http://www.railsystem.net> 25.02.2019

[URL 3] <http://www.anchordrillinggrig.com> 26.02.2019

[URL 4] <http://www.ndt-ed.org/>, Nondestructive Testing Resource Center 11.06.2019



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Alican ŞENKAYA
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Selçuklu/KONYA-15.10.1991
Tel. : 0532 252 10 91
e-posta : asenkaya@ktun.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Diltaş Anadolu lisesi	2010
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi Müh. Fak. İnş. Müh. Böl.	2014
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, Geoteknik B.D.	Devam ediyor

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015-2016	Alp Planlama-İnşaat Ltd.Şti.	Şantiye Şefi
2016-2018	DEHA G.Y.İ	Saha
Mühendisi		
2018-2019	Konya Teknik Üniversitesi	Öğretim
Görevlisi		

UZMANLIK ALANI

Geoteknik saha uygulamaları, deneysel zemin mekaniği

YABANCI DİLLER

İngilizce -iyi derecede (YDS: 77,50)

YAYINLAR

1. Alican ŞENKAYA, Murat OLGUN, Comparison rheological characteristics of different types of cements, Proceedings of the International Civil Engineering & Architecture Conference, 17 – 20 April 2019, Trabzon, Turkey Advancements in Civil Engineering and Architecture, 1,601-607.

2. Askar KANAT, **Alican ŞENKAYA**, Murat OLGUN, Effect of binder grain size on jet grout column strength, Proceedings of the International Civil Engineering & Architecture Conference, 17 – 20 April 2019, Trabzon, Turkey Advancements in Civil Engineering and Architecture, 1607-613.

