




**T.C.**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# JET GROUT KOLONLARININ OLUŞUMU VE DAVRANIŞI ÜZERİNDE ÇOK İNCE TANELİ ÇİMENTO VE MİKRO SİLİKA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

**Askar KANAT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ağustos-2018**
**KONYA**
**Her Hakkı Saklıdır**

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

## JET GROUT KOLONLARININ OlUŞUMU VE DAVRANIŞI ÜZERİNDE ÇOK İNCE TANELİ ÇİMENTO VE MİKRO SİLİKA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

**Askar KANAT**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Murat OLGUN**

**2018, 97 Sayfa**

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

Jet grout enjeksiyonu zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan yöntemlerden biridir. Kolon çapı, kolon boyu, enjeksiyon (grout) basıncı, çekme hızı, dönme hızı, Jet grout tekniği, nozzle delik çapı ve adedi, su/çimento oranı, çimento özellikleri ve dozajı, zemin özellikleri ve tabaka sayısı, çimento tane çapı genel olarak jet grout kolonların performansını etkileyen başlıca faktörlerdendir. Bu tez çalışmasında labaratuvarda farklı çimento enjeksiyon çeşitleri, farklı Su/Çimento (W/C) oranları ve farklı enjeksiyon basınçlarını kullanarak yapılan model deneylerle Jet grout kolonlarının performansını etkileyen faktörlerden çimento tane çapı, silis dumanı katkısı ve su/çimento oranı araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada ince taneli (DMFC- 800) çimento, normal portland çimento ve normal portland çimentoya %10 oranında mikro silika (silis dumanı) eklenerek değişik su/çimento oranlarında hazırlanan enjeksiyonlar ile değişik enjeksiyon basınçları (25 Bar ve 40 Bar) altında jet grout kolonları oluşturulmuştur. Ayrıca malzemenin reolojik özelliklerinin belirlenmesi için Marsh hunisi, vicat iğnesi deneyi ve sedimantasyon deneyleri yapılmıştır. 28 gün sonunda oluşturulan kolonlardan karot numuneler alınmıştır. Alınan karot numuneler üzerinde serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyleri yapılarak sonuçlar karşılatırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre farklı çimento enjeksiyonlarının Jet grout kolonların performansına uygun parametrelerin seçilmesiyle başarılı olabileceği öngörülmüştür. Dayanım açısından en yüksek değer DMFC-800 ince taneli çimento kullanılmasıyla elde edilmişitir. W/C oranının sonuçları önemli derecede etkilediği belirlenmiştir. Aynı W/C oranları için kıyaslamalar yapıldığında; W/C=1.0 oranı en yüksek dayanım DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyon sıvısı kullanıldığı zaman elde edilmiştir ($\sigma_1$=24.6MPa). Ancak W/C oranlarının 1.25 ve 1.50 değerleri için en yüksek dayanımlar NPC+%10 SD katkılı enjeksiyon sıvıları kullanıldığı zaman elde edilmiştir.
DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyonu ile hazırlanan kolonlarda en düşük geçirimlilik W/C=1.25 oranı için elde edilmektedir. Bu durumda elde edilen permeabilite değeri aynı zamanda tüm deneysel çalışma kapsamında elde edilen en küçük permeabilite katsayısı ($k=0.1124\times10^{-8}$m/sn) olmuştur.
NPC enjeksiyonu ile hazırlanan kolonlarda en düşük geçirimlilik W/C=1.0 oranı için elde edilmiştir ($k=0.2279\times10^{-8}$m/sn). Bu değer DMFC-800 için elde edilen permeabilite katsayısının yaklaşık 2 katıdır.
.

**Anahtar Kelimeler:** Jet grout kolonu, İnce taneli çimento, Silis dumanı, Normal portland çimentosu, Serbest basınç dayanımı, permeabilite.

## ABSTRACT

## MS THESIS

# THE INVESTIGATION OF THE USE OF VERY FINE CEMENT AND MICRO SILICA ON THE FORMATİON AND BEHAVIOR OF JET GROUT COLUMNS

**Askar KANAT**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CIVIL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat OLGUN**

**2018, 97 Pages**

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

Jet grout injection is one of the methods used in ground improvement studies. Column diameter, column length, number of columns, grout pressure, pull speed, rotation speed, Jet grout technique, nozzle diameter and number of nozzles, water/cement ratio, cement features and dosage, foundation features and number of layers, cement particle diameter are main factors that affect performance of jet grout columns. In this thesis study, cement grain diameter, silica fume and water / cement ratio were investigated from the factors affecting the performance of the jet grout columns by model experiments using laboratory varieties of cement injections, watery cement ratios and variable injection pressures. In this experimental study, micro-fine (DMFC-800) cement, normal portland cement and normal portland cement +10% silica fume were injected at different water / cement ratios and jet grout columns were made under different pressure (25 and 40 bar) with different injections. In addition, marsh funnel, vital needle test and sedimentation experiments were carried out to determine the rheological properties of the materials. After 28 days, the core samples were collected from the columns and subjected to unconfined pressure test and permeability tests and the results were compared. Experimental results suggest that different cement injections can be successful by selecting appropriate parameters for the performance of Jet grout columns. The highest value for strength is obtained by using DMFC-800 fine-grained cement. When comparisons are made for the same W/C rates, W/C = 1.0 ratio was obtained when the highest strength for DMFC-800 fine-grained cement injection fluid was used ($\sigma_1$=24.6MPa). However, for W/C ratios of 1.25 and 1.50, the highest strengths were obtained when NPC + 10% SD injected liquids were used.

The lowest permeability is obtained for W/C = 1.25 ratio in columns prepared with DMFC-800 fine-grained cement injection. The permeability value obtained in this case was also the smallest permeability coefficient ($k=0.1124 \times 10^{-8}$ m / sec) obtained within the entire experimental study.

The lowest permeability in the columns prepared with NPC injection was obtained for the W / C = 1.0 ratio ($k = 0.2279 \times 10^{-8}$ m / s). This value is approximately 2 times the permeability coefficient obtained for DMFC-800.



**Keywords:** Jet grout column, Fine grained cement, Silica fume, Normal portland cement, Unconfined compression strength, Permeability.

## ÖNSÖZ

Yükseköğrenim hayatıma başladığım 2015 yılından bu yana sadece hoca değil Türkiyedeki abim gibi olabilen benim Türkiye'deki hayatım için her türlü yardımını esirgemeyen ve bu tez çalışmasının her aşamasında değerli fikir ve görüşlerinden yararlandığım, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Murat OLGUN'a teşekkürüm sonsuzdur. Çalışma kapsamındaki elde edilen verilere ulaşmamdaki yardımları ve tezin oluşturulmasında her türlü desteği sağlayan, başta Öğretim görevlisi Alican ŞENKAYA ve tüm Geoteknik Laboratuarı çalışanlarına, idealist kişiliği ve öğrencilerine göstermiş olduğu özen ile kendisine hayran bırakan ve örnek aldığım, Sayın Prof. Dr. Özcan TAN'a, tüm eğitim hayatımda yer alan öğretmenlerime, desteklerini her zaman hissettiğim dostlarıma ve son olarak, beni bugünlere kadar getiren aileme, teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Askar KANAT

KONYA-2018

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **v**

**ÖNSÖZ** ..... **vi**

**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **ix**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **3**

2.1. Literatür Özeti ..... 3
2.2. Enjeksiyon Yöntemleri ..... 7
2.2.1. Sıkıştırma enjeksiyonu ..... 9
2.2.2.Permeasyon enjeksiyonu ..... 10
2.2.3. Telafi enjeksiyonu ..... 11
2.3. Jet grout yöntemi ..... 11
2.3.1. Jet grout yönteminin gelişimi ..... 13
2.3.2. Jet enjeksiyon teorisi ..... 14
2.4. Jet grout kolonları için ortalama basınç dayanım kriterleri ..... 19
2.5. Jet grout yöntemini etkileyen parametreler ..... 20
2.6. Jet grout makina ve ekipmanları ..... 22

**3. MATERYAL VE YÖNTEM** ..... **23**

3.1.Kullanılan Malzeme Özellikleri ..... 23
3.1.1. İnce taneli çimento (DMFC-800) ..... 23
3.1.2. Normal portland çimentosu (CEM 1-42.5R) ..... 26
3.1.3. Silis dumanı (SD) ..... 26
3.1.4.Kum ..... 27
3.2. Süspansiyonların Hazırlanması ..... 28
3.3. Reolojik Özellik Deneyleri ..... 28
3.3.1. Marsh hunisi deneyi ..... 29
3.3.2. Sedimantasyon deneyi ..... 32
3.3.3.Vicat iğnesi deneyi ..... 34
3.4. Laboratuvarda Jet Grout Kolonların Üretilmesi ..... 36
3.4.1. Deney Programı ..... 36
3.4.2. Deney zemin ortamının hazırlanması ..... 38
3.4.3. Deneylerde kullanılacak enjeksiyon malzemesinin hazırlanması ..... 39
3.4.4. Ön çalışma esnasında deneme kazıklarının üretilmesi ..... 41
3.4.5. Deneysel çalışma kapsamında ki Jet grout kolonlarının üretilmesi ..... 44
3.5. Karot Numuneleri Üzerinde Laboratuar Deneyleri ..... 47
3.5.1. Serbest basınç deneyi ..... 47

3.5.2. Üç eksenli basınç deney aletinde permeabilite deneyi ..... 49

**4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA ..... 51**

4.1. Reolojik Özellik Deneyleri ..... 51
4.1.1. Marsh hunisi deneyleri ..... 51
4.1.2. Sedimantasyon deneyleri ..... 53
4.1.3. Vicat iğnesi deneyleri ..... 55
4.2. Jet Grout Kolonları Üzerinde Yürütülen Çalışmalar ..... 56
4.2.1. Jet grout kolonların boy ve çaplarının ölçülmesi ..... 56
4.2.2. Jet grout kolonlarından karot numunelerinin alınması ..... 59
4.3. Karot Numuneler Üzerinde Serbest Basınç Deneyleri ..... 63
4.4. Karot Numuneler Üzerinde Geçirimlilik Deneyleri ..... 84

**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 89**

5.1. Sonuçlar ..... 89
5.2. Öneriler ..... 92

**KAYNAKLAR ..... 93**

**ÖZGEÇMİŞ ..... 97**

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

Mpa : Megapaskal
sn : saniye
dk : dakika
m : metre
cm: santimetre
mm : milimetre
Vo : Nozülden başlangıç akış hız
$p_0$ : Nozülünün başlangıç basıncı
g : yerçekimi ivmesi
R :aşınma mesafesi
K : faktör
P : başlangıç dinamik basıncı
Q : akış hızı
N : erozyonun tekrarlama frekansı
Vn : Nozzle hareket hızı
$q_u$ : Serbest basınç dayanımı
kg : kilogram
μm : Mikrometre
Rpm: dakikada devrim sayı
$C_u$ : Uniformluluk katsayısı
$C_c$ : Derecelenme katsayısı
Dr : Rölatif sıkılık
V : Tij çekme hızı
D : Tij dönme hızı
P : Enjeksiyon basıncı
$e_{max}$ : Maksimum boşluk oranı
$e_{min}$ : Minimum boşluk oranı
γ : Birim hacim ağırlık
D: Çap
H: Yükseklik
P : Kuvvet (Yük) değeri
ΔL : Toplam Deformasyon değeri
ΔH : Toplam boy kısalma
$\sigma_1$ : Serbest Basınç Gerilmesi
$G_s$ : Zeminin özgül ağırlığı

**Kısaltmalar**

DMFC-800: İnce taneli çimento
NPC : Normal portland çimento
SD : Silis dumanı
S: Jet grouting tek sistem yöntemi
D:Jet grouting çifit sistem yöntemi
SPT : Standart penetrasyon
CPT : Koni penetrasyon
PMT : Presiyometre
BAP : Bilimsel Araştırma Projeleri
Jet 1 : Tek akışkanlı sistem
Jet 2 : Çift akışkanlı sistem
Jet 3 : Üç akışkanlı sistem
JG : Jet grout
SP : Kötü derecelenmiş kum

# 1. GİRİŞ

Yeni bir yapının inşası ve/veya mevcut bir yapının güçlendirilmesi için öncelikle yapının üstünde yer aldığı zeminin incelenmesi ve gerekiyorsa ıslahı gerekir. Yapı altındaki taşıyıcı zemin tabakası, yapının kendine ait yüklerin ve diğer ekstra yüklerin taşınmasını mümkün kılmıyorsa zeminde ilave bir takım çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu ilave çalışmalar yapı altındaki zemin özelliklerinin iyileştirilmesi veya derin temel sistemlerinin uygulanması şeklindedir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet-grouting yöntemi, zeminin taşıma kapasitesini artırmak, yeni ve mevcut temellerin oturmalarını azaltmak, açık kazı ve yer altı kazılarını desteklemek, barajlarda sızdırmazlık perdesi oluşturmak, vb. gibi mühendislik problemlerinin çözümünde bütün dünyada etkin ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Mondi ve ark.,2006).

Jet grout yöntemi; değişik karışım oranlarında hazırlanan çimento içerikli enjeksiyon malzemesinin özel ekipmanlar ve yüksek basınçlarla zemin içerisine sistematik bir şekilde enjekte edilerek gönderilmesi işlemidir. Enjeksiyon sırasındaki yüksek basınç nedeniyle, çimento-su karışımı şeklindeki enjeksiyon malzemesi mevcut zemini parçalar ve zemin taneleri ile enjeksiyon malzemesi karışımından oluşan zemin içerikli beton kolonlar oluşturulur.

Bu çalışmada; uygulamada standart olarak kullanılan Normal Portland çimentosu (OPC) yerine çok ince taneli çimento kullanılması veya da OPC ile birlikte belli bir miktarda mikro silika katkısı kullanılmasıyla oluşturulan Jet grout (JG) kolonların boyutsal anlamda oluşumu ve performans özellikleri hakkında gerekli bilgilerin verilmesi amaçlanmıştır. Jet grout kolonların oluşumu ve performans özellikleri; OPC ile oluşturulan kolonlar ve çok ince taneli çimentolar kullanılarak oluşturulan kolonların karşılaştırılması ile açıklanacaktır. Bunun için ilk olarak OPC çimento ve çok ince taneli çimento kullanılması ile çimento şerbetinin özelliklerinin nasıl değiştiğinin belirlenmesi için vicat iğnesi deneyi, Marshall hunisi deneyi ve sedimentasyon deneyleri yapılacaktır. Böylelikle jet grout kolonların oluşturulabilmesi için farklı çimento özellikleri için katılaşma süresi, viskozite ve çökelme özellikleri hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Bu deneylerin sonuçlarına göre en uygun su/çimento (W/C = 0.75 – 4.0) oranının ne seçilmesi gerektiği ve jet grout kolonların oluşturulabilirliği hakkında bir bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca OPC çimento içerisine %10 oranında silis dumanı ilave edilerek, ek katkı olarak pozzolanların

kullanılmasının JG kolonların özelliklerini nasıl değiştirdiğinin de araştırılması amaçlanmıştır.

Oluşturulan JG kolonların performans özelliklerinin belirlenmesi için; oluşturulan JG kolonlarından karotlar alınarak tek eksenli basınç dayanımı ve permeabilite deneyleri yapılacaktır. Bu deneylerin sonucunda; paratikte inşaat uygulamasında sağlanmak istenen amaca uygun olarak oluşturulacak JG kolonların oluşturulabilmesi için en uygun W / C oranının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmaların sonucunda; pratik uygulamalarda inşaatın amacına yönelik olarak oluşturulan JG kolonların performansları üzerinde hangi çimento ve katkı türünün kullanılabilir olduğu konusunda bilgi vermek amaçlanmıştır. Ayrıca, JG kolonların tasarım ve uygulamaları için geliştirilecek standart, yöntem vb. çalışmalara katkı sağlanması da amaçlanmıştır.

# 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

## 2.1. Literatür Özeti

**Wang ve ark. (1999),** jet grout yöntemlerinin iki farklı türünü karşılaştırmak için bir vaka çalışması sunmuşlardır (üç tüplü jet grouting ve Super jet groting yöntemi). Yumuşak kil bir zeminde temel bodrum yapısında jet grout kolonlar oluşturmuştur. İnklinometre okumaları alınmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapılmıştır. Geniş alanların iyileştirilmesi için Süper jet grouting yönteminin daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

**Hsiung ve ark. (2000),** Taipei Hızlı Transit inşaatı sırasında derin kazı sistemlerinin davranışlarını gözlemlemişlerdir. Bu derin kazı sistemlerinin inşasında istinat duvarlarının yanal yer değiştirmelerini azaltmak için jet grouting kolonları ve in-situ çapraz duvarlar kullanılmıştır.

**Wong ve Poh (2000),** Singapur Mesaj Merkezi için yapılan bodrum inşaat çalışmalarında jet enjeksiyonu yöntemi ile oluşturulan JG kolonları ve ayrıca diyafram duvarların davranışlarını incelemişlerdir. Oluşturulan bu sistemlerin arkasındaki zeminin hareketleri ve inşaat alanı yakınındaki yapıların performansını değerlendirmişlerdir.

**Hsieh ve ark. (2003),** 6 kat bodruma sahip bir yapıdaki diyafram duvarın yer değiştirmesini azaltmak için uygulanan jet grout kolonlu bir zemin iyileştirme şemasının tasarımını ve uygulamasını tarif etmişlerdir. Zeminin pasif direncini arttırmak için yapılan çalışmalarda eğimölçer okumaları alınmıştır. Sonuçlar, jet grout kolonlu tasarımın diyafram duvarın yer değiştirmelerini azaltmada etkili olduğunu göstermiştir.

**Shirlaw (2003),** jet grouting yönteminin, Singapur'daki yumuşak killerde uygulanan derin kazı çalışmalarında yanal yer hareketlerini azaltmak, tünellerin stabilitesini artırmak ve iyileştirmek için kullanıldığını belirtmiştir.

**Ayoubian ve Nasri (2004),** Quenens, New York City'deki bir raylı yol tüneli için önerilen bir yaklaşım yapısının sonlu eleman analizi sonuçlarını incelemişlerdir. Bu incelemelerde, hafriyat alanındaki temelin stabilitesi ve yeraltı suyunun kontrolü için diyafram duvarların ve için jet grout kolon geçirimsizlik kolonlarının bir kombinasyonu ele alınmıştır.

**Stoel (2001),** temel altındaki problemli zeminlerin derin olarak iyileştirilmesi için enjeksiyon yöntemlerinin kullanımını incelemiştir. Kumlu ve killi zemin

tabakalarında derin iyileştirme yöntemlerinden jet enjeksiyonu yöntemini araştırmıştır. Çalışmalarda oluşturulan karışımlardan elde edilen JG kolonlarının serbest basınç dayanımını belirlemiştir. Testlerde su / çimento oranı 0.8, 1.0 ve 1.2 şeklinde seçilmiştir.

**Stoel, (2001),** çeşitli zemin tiplerinde uygulanan jetgrout kolonlarının mukavemet değerlerinin imalat parametreleriyle değişim aralığını Çizelge 2.1.'de vermiştir.

**Çizelge 2.1 .** Çeşitli jet grout kolonların ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri

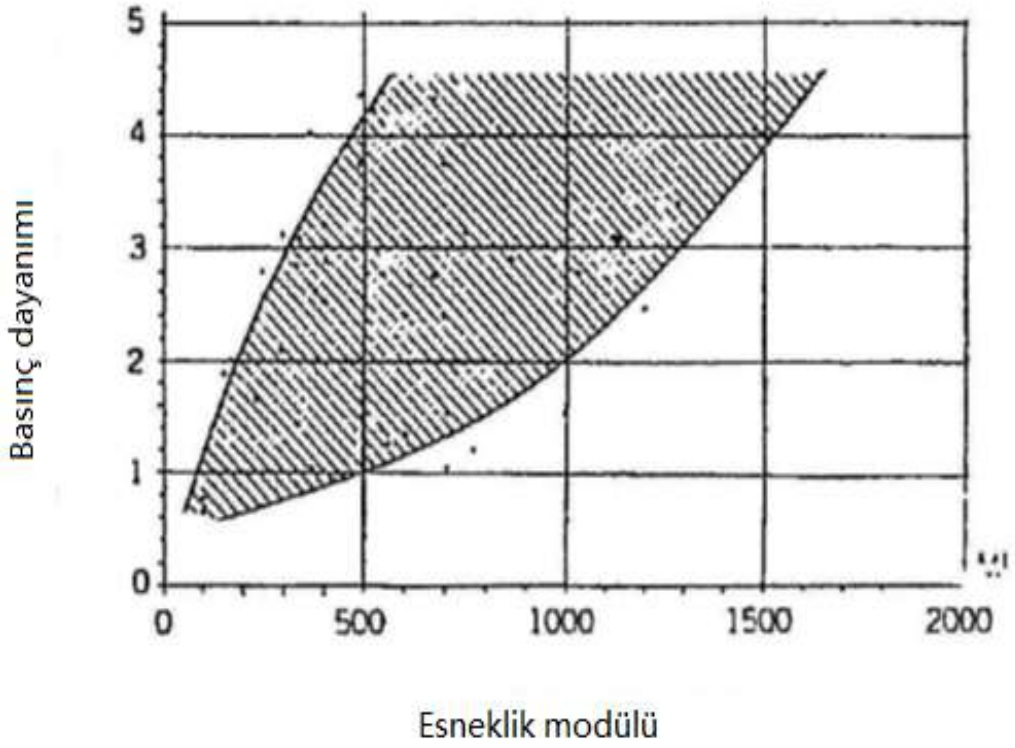
| Zemin Tipi | Serbest Basınç Mukavemeti (Mpa) | |
|---|---|---|
| | Alt Limit | Üst Limit |
| Organik Zemin | 1 | 6 |
| Kil | 3 | 7 |
| Silt | 5 | 15 |
| Kum | 10 | 40 |
| Çakıl | 10 | 40 |

**Modoni ve ark. (2006),** yaptıkları çalışmada jet enjeksiyonu ile yapılan iyileştirmede oluşan mekanik olayların teorik modellemesini açıklamışlardır. Analizler tek-akışkanlı metod için geliştirilmiştir. Püskürtme, püskürtme uçları ile bozulmamış zemin arasındaki boşluk boyunca enjeksiyonun yayılımı, önce su altındaki akış teorisi temelinde modellenmiştir. Daha sonra, önceki deneysel araştırmaların sonuçlarına göre çakıllar, kumlar ve killer için jet ile zemin arasındaki olası etkileşim modları farklı kabul edilmiştir. Zemin biriminin çakıl olması durumu, enjeksiyonun yayılması için en uygun mekanizmadır. Kumlu zeminlerde, enjekte edilen sıvının sınırlı bir derecede zemin iskeletine nüfuz ettiği ve gözenek basınçlarında önemli bir artış olduğu belirlenmiştir. Killi zeminlerde, jet enjeksiyonu olayı enjeksiyon-zemin arayüzüne uygulanan bir yük olarak kabul edilir ve erozyon süreci bozulmamış tanecik bağlantı yüzeylerinin değişen bir dizisi olarak modellenmiştir. Farklı zemin türleri için elde edilen teorik sonuçlar mevcut deney verileri ile karşılaştırılmış ve böylece modeller geriye analiz vasıtasıyla kalibre edilmiştir.

**Zebovitz ve ark. (1989)** ince ve orta dereceli kumlarda enjeksiyon için, kimyasal harçların kalıcılığı ve toksisitesi ile ilgili sorunların çözümü ve normal çimento harçlarının kaba kumdan daha ince olan zeminlere nüfuz etmede yetersiz kalmasının önüne geçilmesi için çok ince taneli çimento harçlarının kullanılmasını

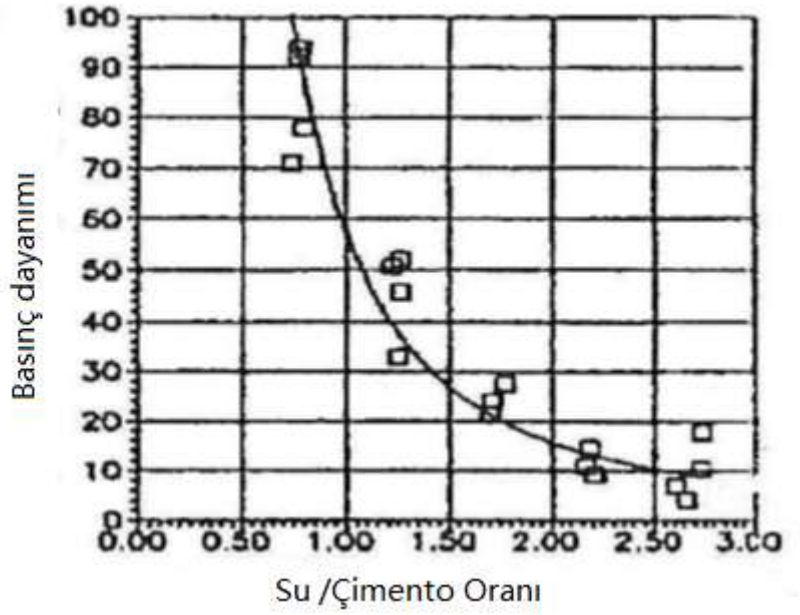
önermektedirler. Ticari olarak temin edilebilen çok ince taneli çimento ile hazırlanan enjeksiyonlar üzerinde yapılan bu laboratuar araştırmasının sonuçları, bu enjeksiyonların normal portland çimentosu ile hazırlanan enjeksiyonlardan daha iyi akış özellikleri ve kanama özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Çok ince taneli çimento enjeksiyonu, su / çimento oranına da bağlı olarak ince taneli kumlara nüfuz edebilmektedir. Deneysel sonuçlar ince kumun tane boyut dağılımının ve özellikle kumdaki ince toz miktarının enjeksiyonun enjekte edilebilirliğini kontrol edebileceğini göstermiştir. İnce kumun granülometrisi, enjeksiyon işlemi sonucunda elde edilen kolonların geçirgenlik ve mukavemet özelliklerini etkilemiştir.

**Trevi (1994),** siltli veya kumlu siltli formasyonuna sahip zeminlerde oluşturulan jet grout kolonların serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde araştırmalar yapmıştır. Siltli veya kumlu siltli formasyonun çeşitli bölgelerinden alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Esneklik modülü 100 MPa ila 1500 MPa arasında, Serbest Basınç dayanımı 0.6 MPa ila 4.5 MPa arasında değişmiştir.



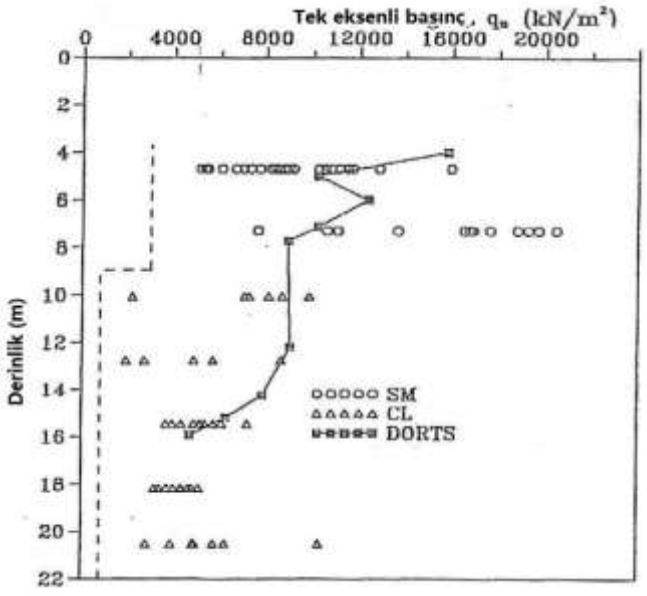

**Şekil 2.1.** Kumlu veya siltli kum zeminlerde oluşturulan jet grout kolonların serbest basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi (Trevi, 1994)

**Kauschinger ve ark. (1992)** jet grout kolonları oluşturularak özellikleri iyileştirilen Boston mavi kilinin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada % 12-45 oranlarında çimento kullanılmıştır. Çimento yüzdesi, çimento ağırlığının karışımın toplam ağırlığına oranıdır. Farklı su / çimento oranları kullanılmıştır. Oluşturulan kolonların basınç dayanımının su / çimento oranı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.2.'de gösterilmektedir.




**Şekil 2. 2.** Su / çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (Kauschinger ve ark., 1992).

**Fang ve ark. (1994),** Jet grout kolonlarının mekanik özelliklerini belirlemek için tek eksenli basınç dayanımı deneyi, Brezilya yarmada çekme deneyi ve ultrasonik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler; siltli kum ve siltli kil zemin birimleri üzerinde yapılan yol güzergahında oluşturulan kolonlar üzerinden alınan numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları; Tek eksenli basınç dayanımı artışları ile birlikte yoğunluğun, elastisite modolünün, yarmada çekme dayanımının ve zemin kütlesinin P dalgası hızının arttığını göstermiştir. Derinliğin bir fonksiyonu olarak elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değişimleri Şekil 2.3. de gösterilmiştir.




**Şekil 2. 3.** Jet grout kolonlarında Tek eksenli basınç dayanımı değişimi (Fang ve ark., 1994).

## 2.2. Enjeksiyon Yöntemleri

Bir enjeksiyon yöntemini seçmenin ilk adımı, enjeksiyonun uygulanacağı zemin malzemesinin sınıflandırılmasıdır. Bu malzeme zemin veya kayadır. Zemin veya kayadan oluşan bir malzemeyi tanımak ve iki malzemeyi sezgisel olarak ayırmak oldukça basittir. Bununla birlikte, açık bir tanımlama gereklidir. Herhangi bir iş kapsamında oluşturulan Teknik şartnamelerde, proje üzerinde karşılaşılması beklenen çeşitli zemin malzemelerinin ve beklenen davranışlarının tanımları verilmelidir. Tanımlamalardaki varyasyonlar, farklı kurumlar arasındaki kabuller ve bir coğrafi bölgeden bir başka coğrafi bölgeye göre de değişebilmektedir. Malzemenin zayıf bir kaya veya sert bir kil veya yıpranmış bir kaya olabileceği durumları gösteren gri alanlar da bulunabilir ( Abramovich, 1963)

Zemin ve kaya için basit tanımlamalar yeterli olmasına rağmen, uygulamada bir enjeksiyon yöntemini seçmek daha karmaşıktır ve ek bir değerlendirme gerektirir. Örneğin şantiye şartlarının değişkenliği veya şantiyede suyun kesilmesi gibi özelliklerin dikkate alınması oluşturulacak enjeksiyon malzemesinin işlevleri açısından önemlidir. Kayadaki süreksizliklerin boyutu ve aralıkları veya zeminin tanecik boyutuna göre enjeksiyon malzemesinin özellikleri kritik olabilmektedir.

Tek bir yeraltı projesi birkaç farklı enjeksiyon yöntemini gerektirebilir. Bu çeşitli yöntemler farklı ekipman gerektirebilir ve projede farklı aşamalarda ve zaman aralıklarında gerçekleştirilebilir. Örneğin, bir tünel inşaatının stabilizasyonu, gerçek

tünel kazısının başlangıcından önce jet enjeksiyonunu gerektirebilir. Daha sonra ise yerinde dökme beton tünel kaplaması ve astar betonu yerleştirildikten sonra beton ile kaya arasında kalan boşluğu doldurmak için kontakt enjeksiyonu gerekebilir. Bu iki farklı işlemin uygulanması arasında aylar hatta yıllar geçebilir. Ayrıca bu işlemler iki farklı yüklenici tarafından da gerçekleştirilebilir.

Bu kısımda, hem zeminde hem de kayaçtaki yeraltı uygulamalarında kullanılan ortak enjeksiyon yöntemleri ele alınmaktadır. Yumuşak zeminli kazılarda jet, sıkıştırma, nüfuz etme ve hidrofraktür enjeksiyon yöntemleri sıklıkla kullanılırken, sert kaya kazıları düzenli olarak permeasyon enjeksiyon yöntemlerini gerektirir. Zemin çivileri, kazılmış malzemenin üzerine beton veya çelik gibi bir kaplama takıldığında hem yumuşak zemin hem de kaya kazısında yaygın olarak kullanılır. Enjeksiyon işlemleri, özellikle yüksek basınçlı su taşıma şaftında ve tünel yapımında kullanılan özel uygulamalardır (Environment Agency, 2002).

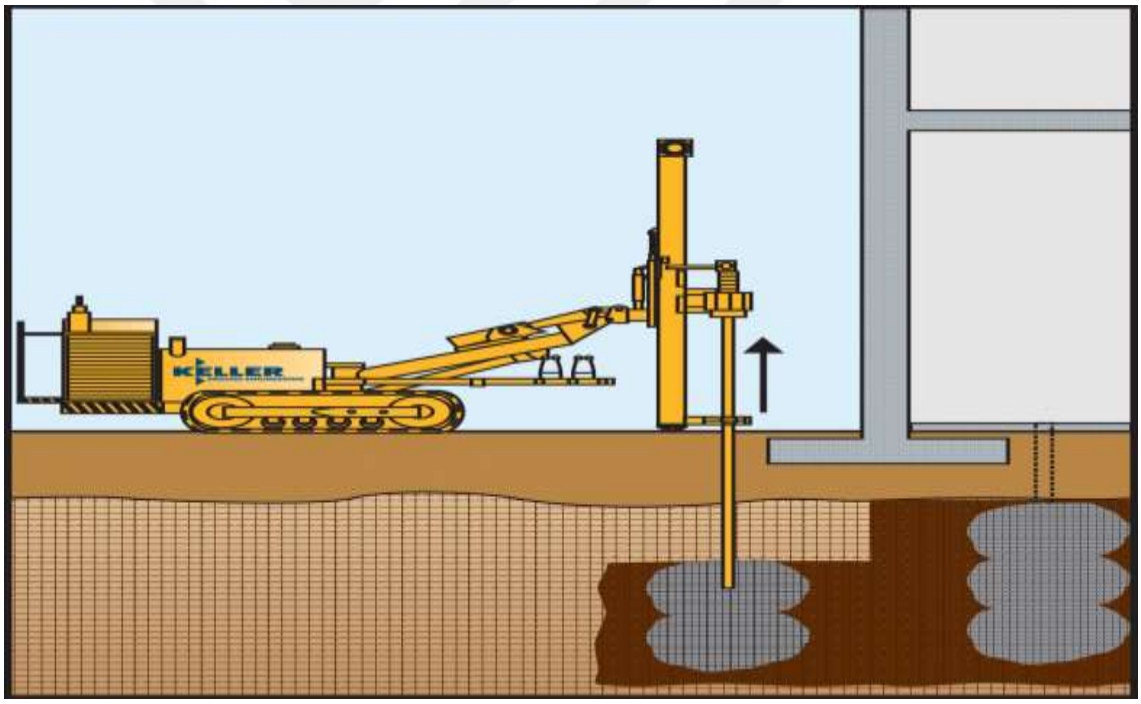
Enjeksiyon karışımlarında, su ve çimento ağırlığına göre verilen su / Çimento oranları (W / C) genellikle 0.6 ile 1.3 arasında değişmektedir. Her bir spesifik proje için, en uygun W / C oranı seçilmelidir. W / C oranının arttırılması enjeksiyon sıvısının ulaşilebilirliğinin ve hareket edebilirliğinin artmasına neden olacaktır. Ancak püskürtülecek malzemenin daha düşük mukavemette olmasına da sebep olacaktır. Genel olarak, hangi çimento tipinin kullanacağı noktasında özel bir sınırlama yoktur. Çimento tipi arazi koşulları dikkate alınarak seçilebilir ve özel durumlarda özel çimentolar seçilebilir. Örneğin, hızlı kür süreleri gerekliyse ince Portland çimento kullanmak uygun olabilir. Oysa ki kimyasal açıdan agresif bir ortamda puzolanik veya yüksek fırın cüruflu çimento kullanımı gerekebilir. Katkı maddelerinin ilavesi bazı uygulamalar için de yararlı olabilir. En çok kullanılan bentonit, özellikle enjeksiyonun W / C oranı yüksek olduğunda akışkanlığı azaltmak için süspansiyon halinde eklenebilir (Croce ve Flora, 2014).

Bazı durumlarda kullanılabilecek diğer katkılar ise kalsiyum klorür ve sodyum silikattır. Kalsiyum klorür süspansiyonun sertleştirmesini hızlandırmak amacı ile, sodyum silikat ise enjeksiyonun kür süresini hızlandırmak ve böylece yer altı su akışıyla yıkamayı önlemek için kullanılır. Bu katkılar çok dikkatli kullanılmalıdır; çünkü çok hızlı bir sertleşme oluşabilir. Bu katkıları enjeksiyona eklemek için iki yöntem vardır: birincisi, yüksek basınçlı pompadan hemen önce bir statik karıştırıcı yerleştirerek devrede jel ayarlama riskini azaltmaktır. İkinci yömtem ise sodyum silikatın ayrı bir

boru yoluyla enjekte edilerek karıştırılması ve çimento ile birlikte doğrudan zemine indirilmesidir (Croce ve Flora, 2014).

### 2.2.1. Sıkıştırma enjeksiyonu

Sıkıştırma enjeksiyon işlemi, zemine sürülen borular veya muhafazalar yardımıyla, 25-50 mm'lik (1-2 inç) bir çökme ile sert bir harç enjekte etme tekniğidir. Enjeksiyon borusunun çapı 50 ila 100 mm (2-4 inç) arasında tutulmalıdır. Tipik olarak, delik aralığı, projenin zemin koşullarına ve enjeksiyonun istenen sonuçlarına bağlı olarak merkezlerde 1.5 - 6.1 m (5 - 20 ft) arasında değişmektedir. Enjeksiyon sıvısı 1 - 7 MPa (150 - 1,000 psi) arasında nispeten yüksek basınçlarda pompalanır (Baker, 1985). Borunun dibinden çıkan harç; hacimce artan, böylece kütlenin etrafını saran yumuşak, gevşek veya bozulmuş olan zemini yoğunlaştıran ampul şeklinde bir kütle oluşturur (Şekil 2.4.).



**Şekil 2. 4.** Sıkıştırma enjeksiyonu (Baker, 1995)

Sıkıştırma enjeksiyonunda zayıf veya gevşek zeminlerin ayrı bölgelerini hızla iyileştirmek için düşük hareketlilik enjeksiyon sıvısı kullanır. Metot, alt yapı için düşük maliyetli, düşük riskli bir çözümdür. Sıvılaşabilen zeminlerin sıvılaşma riskini azaltma ve yapıların orijinal yüksekliklerine yeniden gelmesini sağlama amacıyla kullanılır.

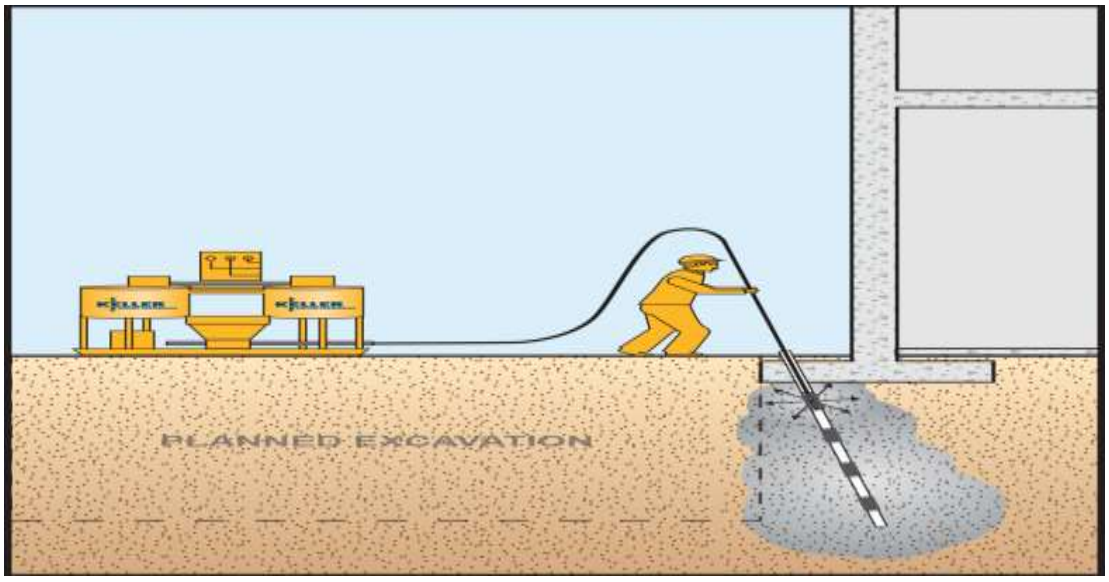
Yüksek kapasiteli tesislerle büyük projelerde kullanılabilmesinin yanı sıra el aletleri ile en kısıtlı yerlerde iyileştirme olanakları sağlayabilmektedir (Franz, 1972).

### 2.2.2.Permeasyon enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyon harcı zeminin gözenek boşluklarına enjekte edilir. Bu teknik, yeraltı suyunu kontrol etmek veya zeminin yapısını iyileştirmek için kullanılır. İlk olarak kullanılan ve en yaygın olan enjeksiyon türüdür. Tipik bir çimentolu harç karışımı çimento, bentonit ve sudan oluşur. Uçucu kül ve ince kum gibi dolgu maddeleri malzeme maliyetlerini azaltmak için sıklıkla kullanılır. Tip I ve II portland çimentosu en yaygın olarak kullanılan çimento tipleridir. Tip III yüksek fırın cüruf çimentosu ve ultra ince çimentolar iyi derecelenmiş zeminin iyileştirilmesinde kullanılmaktadırlar (Fritsch ve Kirsch, 2002).

Permeasyon enjeksiyonu zeminlerin mukavemetini iyileştirmek ve zeminlerin geçirgenliğini azaltmak için kullanılan, düşük basınçlı bir enjeksiyon yöntemidir. Genellikle baraj derz uygulamaları ve tünel projelerinde yeraltı suyu kontrolü için kullanılır. Enjeksiyon sıvısında çimento veya kimyasal bazlı harç kullanır ve hiç bir bozulmaya sebebiyet vermeme avantajına sahiptir (Şekil 2.5.).

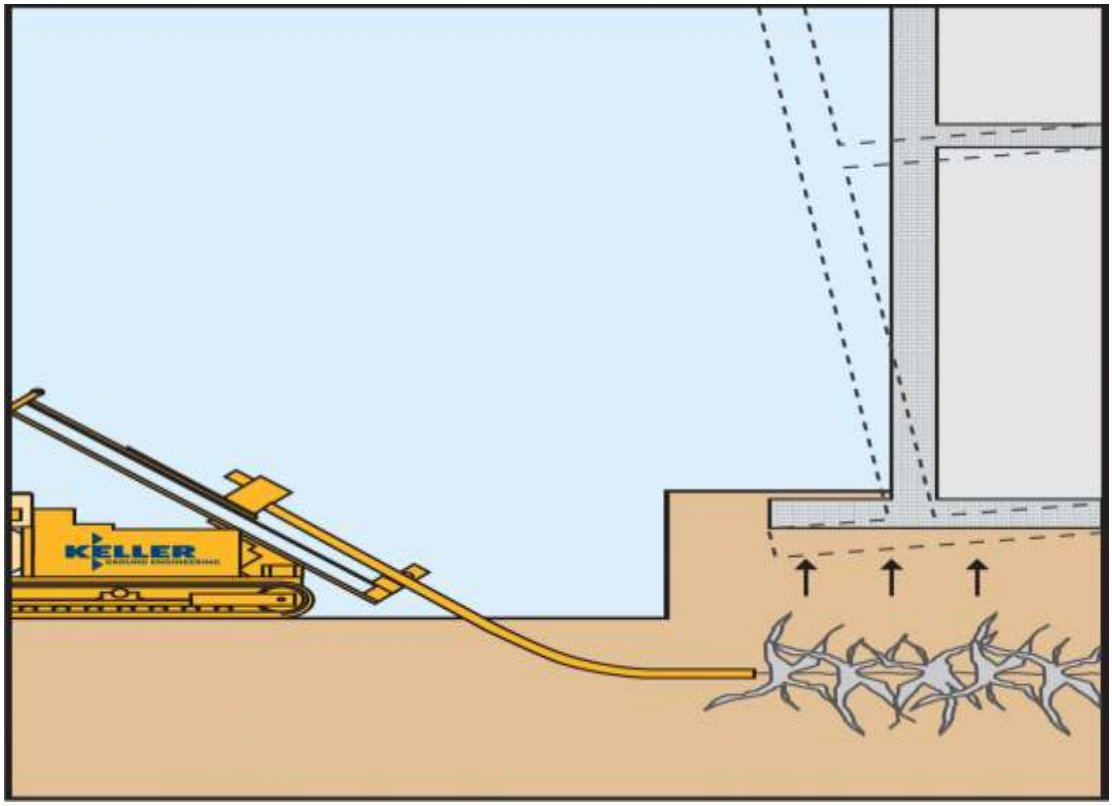
Mikro-ince taneli çimento harcı, çatlaklı kayaçlarda ve ince kumlarda küçük boşluklara nüfuz edebilen bir özelliğe sahiptir. GIN yöntemi (derz şiddeti sayısı), baraj hizalayıcılarının altındaki kot farkını önlemek için Baraj sıvası perdelerinde yaygın olarak kullanılır ( Fritsch ve Kirsch, 2002).




**Şekil 2. 5.** Permeasyon enjeksiyonu

### 2.2.3. Telafi enjeksiyonu

Telafi enjeksiyonu tekniği, zemini sağlamlaştırmak için zemin formasyonundaki çatlak dolgulu kırıkların yayılması yöntemini kullanır. Düşük hacimde çimento harcı pompalanması sırasındaki sıralı enjeksiyonlar, zemin formasyonunda 10 mm ila 20 mm kalınlığında harç dolgulu çatlaklar geliştirir (Şekil 2.6.). Tekrarlanan enjeksiyon ve kırılma zemin taneciklerini birleştirir. Yöntem; binaların ve diğer inşaat yapılarının sığ tünel kazısı veya yakındaki diğer kazılardan korunmasına olanak sağlar. Ayrıca oturma problemine maruz kalan yapıların asıl seviyelerine geri dönmesine izin verir. Yöntem, tünel açma işlemi sırasında eş zamanlı olarak gerçekleştirilebilir (Hermans, 1953).



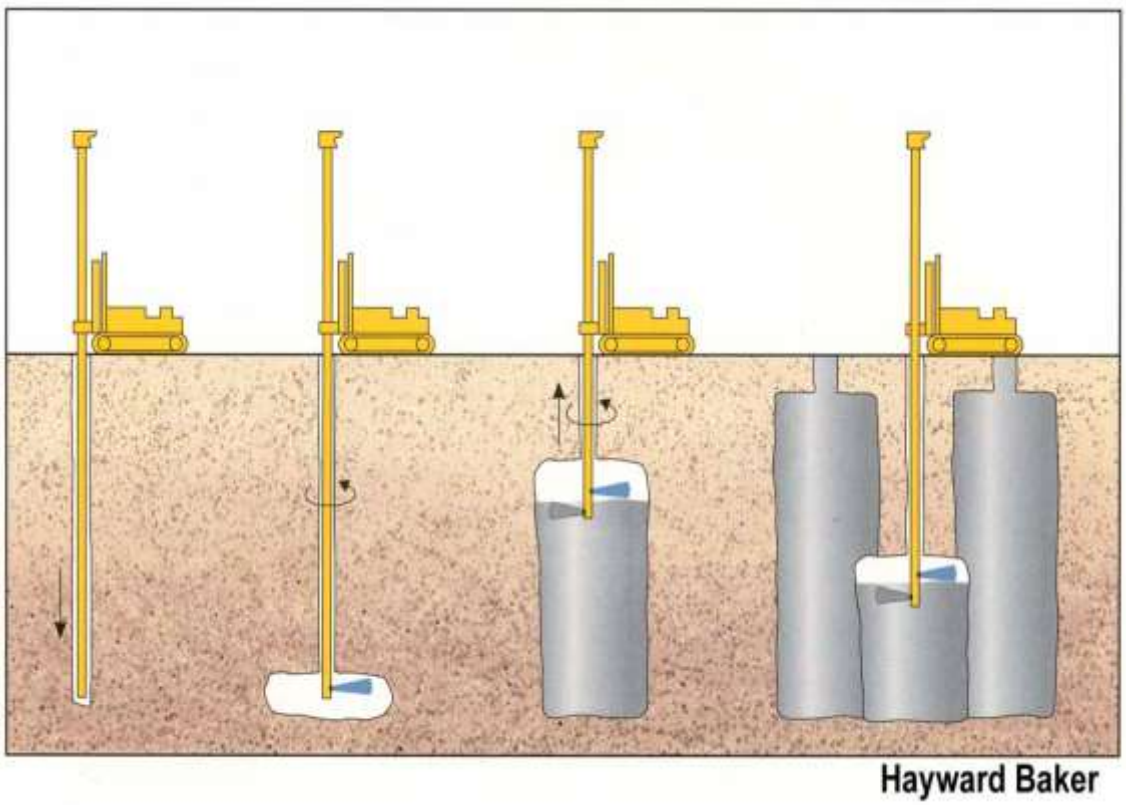

**Şekil 2. 6.** Telafi enjeksiyonu

## 2.3. Jet grout yöntemi

Zemin partiküllerini aşındırarak ve yüksek basınç altında çimentolu ürünlerle karıştırarak zemin özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmek için temel tasarımlarında uygulanan bir yöntemdir. Yöntem; silindirik olarak hareket eden bir tijin yanlarından ve ucundan yüksek basınç altında gönderilen enjeksiyon sıvısının gevşek zemin

tanecikleriyle karıştırılması şeklindedir. Yüksek basınçlı çimento şerbeti zemini fiziksel olarak bozarak, zeminle karışmaktadır. Normal çalışmada, jet grout makine tiji gerekli derinliğe kadar indirilir ve daha sonra tij çekilirken yüksek basınçla enjeksiyon şerbeti verilir (Şekil 2.7.). Böylece oluşan kompozit karışım bir "kazık tipi" yapısı şeklindedir. Elde edilen kompozit, çimentolu ürüne bağlı yüksek basınç ve artan yoğunluk nedeniyle katılaşmış bir harç, zemin silindiri ve sıkıştırılmış bir dış halkadır. Jet grouting tekniği çok yönlüdür, çok farklı zemin tiplerinde kullanılmaktadır, titreşimsizdir, uygun maliyetli bir zemin iyileştirme tekniğidir (Abramovich, 1963).

Jet grout kolonları dikeyle $45^0$C'lik açılar yapacak şekilde uygulanabilir. Bu yöntem tarihi yapıların desteklenmesi ve temel sistemlerinin takviye edilmesi için uygun olan bir yöntemdir. Bu yöntem ile yeraltı suyunun etkisinin azaltılması, su geçirimliğinin azaltması ve tek bir uygulama ile yapısal sertlik sağlanması mümkündür. (Hermans, 1953)

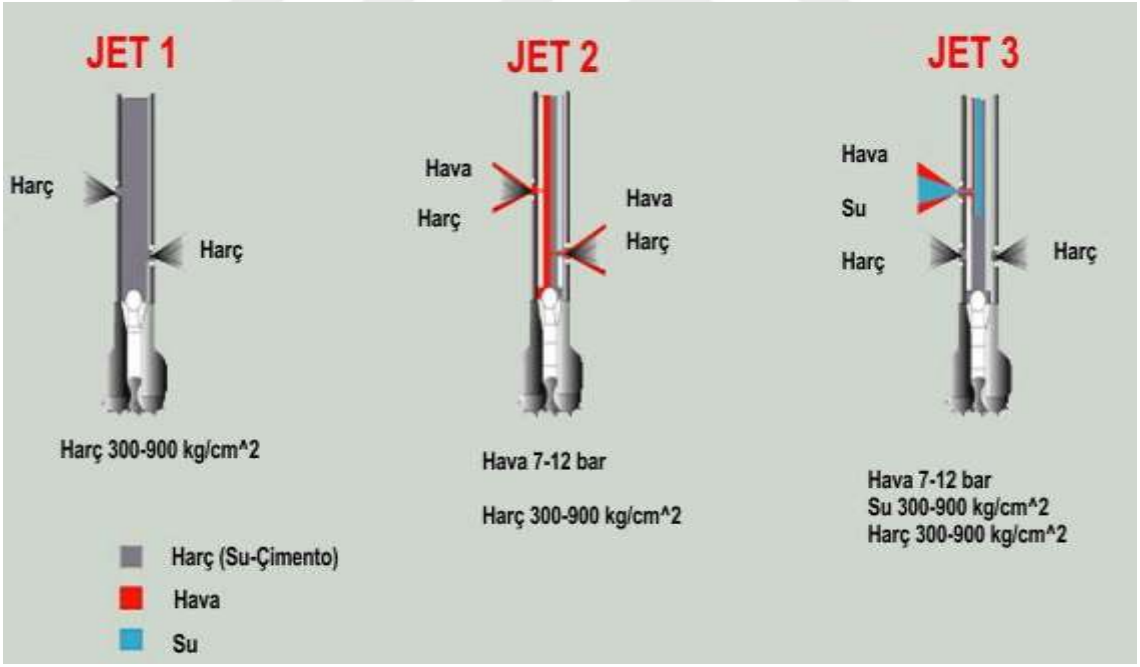



**Şekil 2. 7.** Jet grout yöntemi

### 2.3.1. Jet grout yönteminin gelişimi

Jet grout yöntemi ilk olarak 1950'lerde İngiltere'de uygulamıştır. Bununla birlikte gerçek pratik gelişimi Japonya'da gerçekleşmiş ve ilk olarak 1970'li yılların başında ince duvarlar oluşturmak için uygulanmıştır. Jet Grouting paneli, değişen kalınlık ve kırılganlık gücüne sahip tatmin edici ürünleri elde etmenin zor olduğu gerçeği nedeniyle ortaya çıkmıştır. Yöntem 1970'lerin ortalarında Avrupa'ya ihraç edilmiş ve o zamandan beri dünya çapında popüler olmuştur. 1980'lerde, Jet grouting ile deneyim ve güven çok geniş bir uygulama yelpazesine yayılmıştır. 1990'lı yılların başından bu yana, maliyet ve program gerekçesiyle önemli ölçüde daha büyük bir kolon geliştirmeye olanak tanıyan yeni Jet Grouting yöntemleri geliştirilmiştir (Kirsch ve Sondermann, 2002).

1970'lerin ortasında, Avrupa'ya ihraç edilen yöntem için aynı dönemde; kavramsal olarak üç ana jet grout uygulaması çeşidi ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerin şemaları Şekil 2.8'de gösterilmiştir.




**Şekil 2.8.** Jet grout uygulaması teknikleri

Bu yöntemlerden ilki, en basit olanı tek sistem (S) olarak adlandırılır. Yöntem enjeksiyon sıvısının zemin formunu aşındırmak ve zemine karıştırmak için püskürtülmesi esasına dayanmaktadır. Çift sistemli jet grout yönteminde (D), aşındırıcı

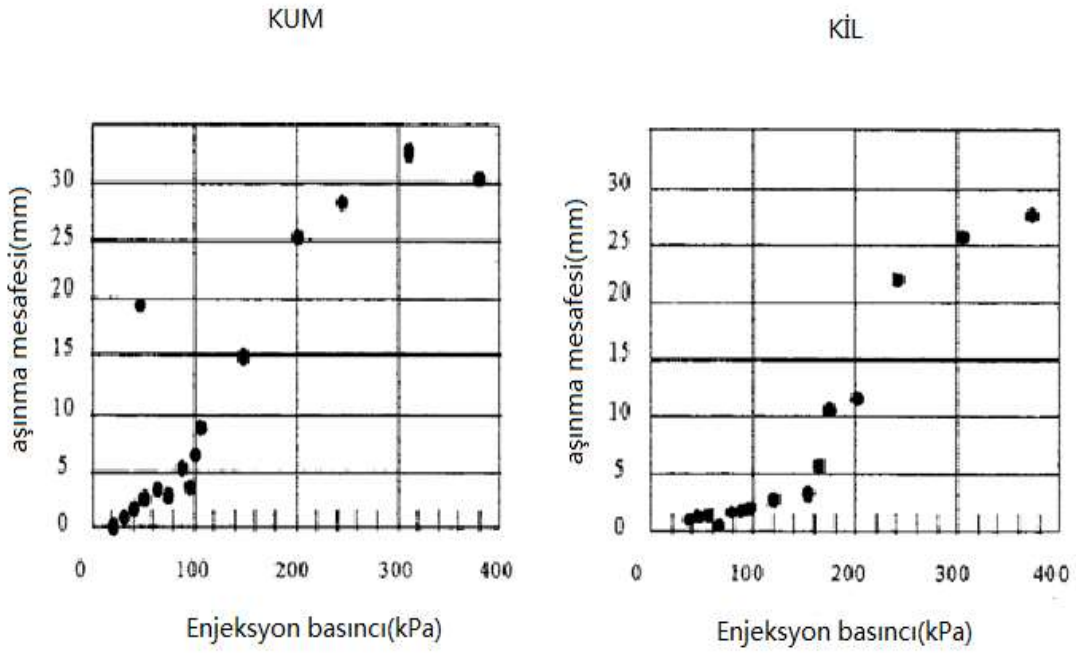
etkiyi arttırmak için harç jetini çevreleyen basınçlı hava sisteme eklenmiştir. Üç sistemli jet grout yönteminde ise sisteme havanın yanı sıra basınçlı su da gönderilmektedir.

### 2.3.2. Jet enjeksiyon teorisi

Jet grout prosesinin verimliliğini ve etkinliğini etkileyen pek çok faktör vardır ve bu faktörlerin jet grout kolonlarının tasarlanması ve inşa edilmesi gerektiğinde dikkate alınması gerekmektedir.

#### 2.3.2.1. Enjeksiyon basıncının etkisi

Yüksek basınçlı bir su jeti ile zemin erozyona uğradığında, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi su jeti basıncı zeminin sıkıştırılmamış basınç dayanımını aştığından aşınma mesafesi keskin olarak artar (aşınma mesafesi ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki). Daha düşük bir basınçla, daha uzun bir süre boyunca aynı mesafeyi aşmak mümkündür, ancak yüksek basınç çoğu pratik uygulama için zaman tasarrufu sağlar. Tipik olarak, silt, kum vb. gibi aşırı konsolide ve sıkı zeminler için 30 ila 60 MPa arasında ve kaya oluşumu için 200 MPa'dan daha fazla olan su basınçları kullanılmaktadır (Pollath, 2000) .




**Şekil 2.9.** Enjeksiyon basıncının jet enjeksiyonu verimliliğine etkisi (Pollath, 2000)

### 2.3.2.2. Enjeksiyon akış hızının etkisi

Basınçlı su dairesel bir nozülden geçtiğinde, aşağıdaki denklem enerji korunum kanundan elde edilir.

$$V_0 = \mathrm{m}\sqrt{2\mathrm{g}p_0} \qquad (2.1.)$$

Burada;

$p_0$: Nozzlenin başlangıç basıncı,

$V_0$: Nozzleden çıkan sıvının başlangıç akış hızı

g: yerçekimi ivmesi

m: nozul verimliliği.

Basınç etkisi ve akış etkisi için bir hesaplama örneği aşağıda verilmiştir.

Bir su jeti, 2 mm çapındaki ince bir nozül içinden 40 MPa'da sıkıştırılmış ve havanın hızı 100 m/sn olacak şekilde boşalırsa, Şekil 2.10.'a (Dinamik basınç 0,1 katı meme basıncı) bakarak 4MPa noktasında 1m'lik bir erozyon mesafesi elde edebiliriz. Bu değer pratik amaçlar için kolonun etkili limiti olarak kabul edilebilir.

Mükemmel bir nozulda, bir verimlilik katsayısı olarak m=0.92'ye sahip olduğundan, aşağıda bir akış oranı elde etmek için m=0.92'nin Denklem 2.1.'de yerine yerleştirilmesi ile;

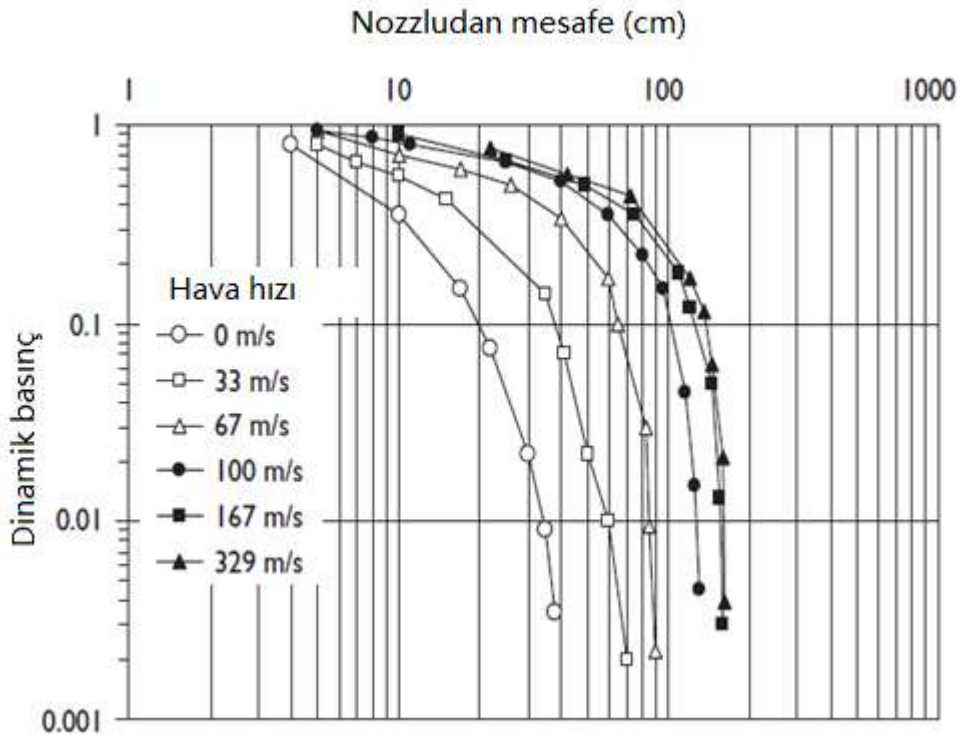
$$Q = V\,A \qquad (2.2.)$$

$$= \mathrm{m}\sqrt{2\mathrm{g}p_0\frac{\pi}{4}\mathrm{d}^2} = 491/\mathrm{dk}$$

Aynı etkinliğe sahip 5mm'lik bir meme kullanıldığında, aynı gerekli kolon çapını elde etmek için, akış oranının nozul çapının karesine göre değiştirilmesi gerekir:

$$\frac{Q1}{Q2} = \left(\frac{d1}{d2}\right)^2 \qquad (2.3.)$$

Bu nedenle gerekli akış oranı 306 l / dk




**Şekil 2.10.** Enjeksiyon akış hızının jet enjeksiyonu verimliliğine etkisi (Pollath, 2000)

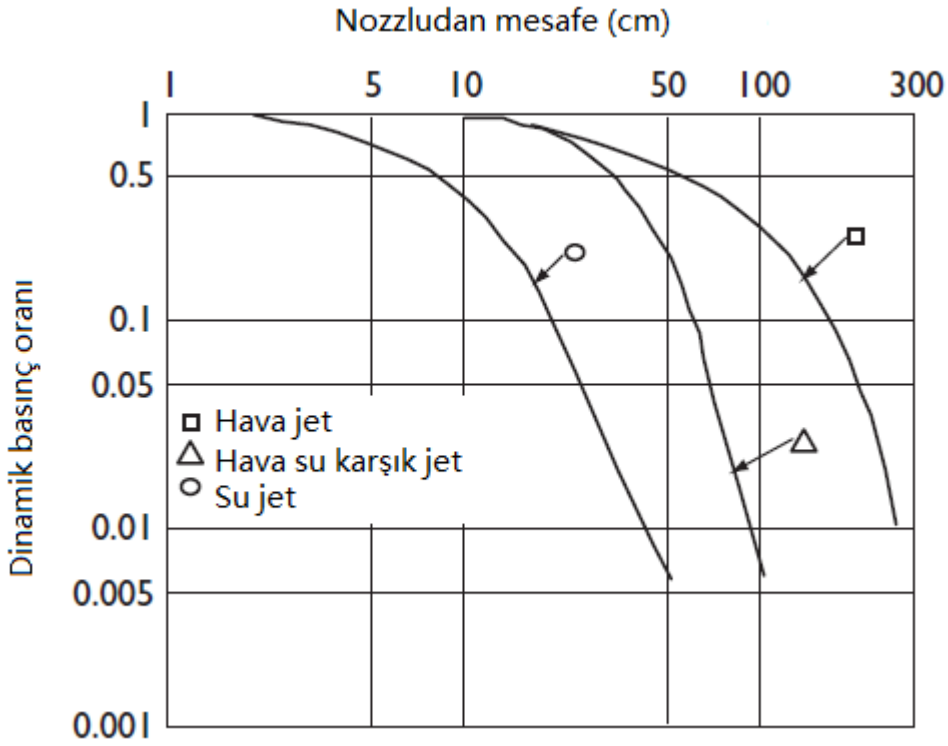
### 2.3.2.3. Basınçlı havanın etkisi

Düşük basınçta bile artan hava debisi, aşınma potansiyelini Şekil 2.11.'de gösterildiği gibi önemli ölçüde uzatabilir (dinamik su basınçları ve mesafe ile hava akış hızları arasındaki ilişki). Jet grout yönteminde, birçok açıdan başarılı çalışma için basınçlı hava gerekmektedir. Maksimum erozyon enerjisinin elde edilmesi ve daha sonra zemin yüzeyine kadar şerbetin taşınması için basınçlı hava olması önemli bir etkendir (Reichert ve ark., 2002).

Jet grout yöntemi çoğunlukla zemini, su seviyesinin altında ele aldığı için tek başına bir su jeti önemli ölçüde zemin iyileştirmesine neden olamaz. Bu bağlamda, sıvı jetlerinin basınçlı hava örtüsü, jetler etrafındaki yeraltı suyunun bertaraf edilmesinde birincil bir tekniktir ve böylece atmosferik bir durum oluşturur.

Şekil 2.11. havadaki, sudaki ve hava dahil su jetlerinin erozyon mesafesini göstermektedir. Burada, 2 mm'lik bir çapa sahip bir memeden 40MPa'lık bir basınca sahip bir hava jetinin, havada 3m'lik bir mesafeye ulaşabileceği, su içinde sadece yarım

metreye ulaşabildiği açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, su jeti etrafındaki sıkıştırılmış havanın eklenmesiyle bu mesafe tekrar 1.1 - 1.2 m'ye uzatılmaktadır.



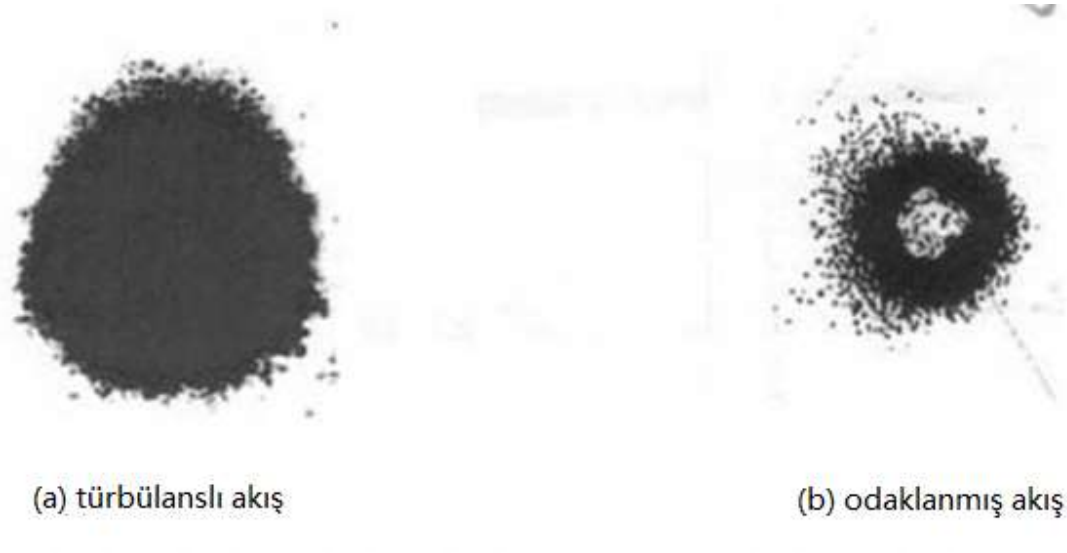

**Şekil 2.11.** Basınçlı havanın jet enjeksiyonu verimliliğine etkisi (Pollath, 2000)

Daha önce de belirtildiği gibi, sadece hava örtüsünün varlığı enjeksiyon uygulamasını her zaman başarılı kılmaz, fakat Şekil 2.11'de açıkça belirtildiği gibi, atmosferik bir durumun oluşmasını sağlamak için hava basıncı örtüsü gereklidir. Ayrıca, bir hava nozulu, tercihen hava boşaltma noktasından önce minimum düz bir uzunluğa sahip olan nozulu çevreleyen halka şeklinde olmalıdır. Bu halkanın genişliği standart olarak yaklaşık 1 mm kalınlığında olmalıdır. Bu kalınlık yeterli hava akışını sağlarken kum gibi yabancı parçacıkların yukarı akışına izin vermemektedir. Basınçlı hava, 20m derinliğe kadar 0,7 MPa değerinde düşük basınçlı bir kompresörle üretilebilir; bununla birlikte, daha derin işler için yeraltı su basıncına dayanacak yüksek basınçlı bir kompresör gereklidir.

### 2.3.2.4. Jet enjeksiyonunu etkileyen diğer faktörler

Nozzlenin kalitesi ve iç yüzeyi, boyutları ve geometrisi kadar hayati öneme sahiptir. Ayrıca, gerçekte kullanımdan önce mükemmel bir nozulun bile, topak

akışındaki ve / veya zemindeki yabancı partiküllerdeki safsızlıklar nedeniyle kolaylıkla zarar görebileceğine dikkat edilmelidir. Bunu hesaba katmak için her jet enjeksiyon işleminden önce ve sonra nozulların durumunun incelenmesi gerekir. Optimal bir inceleme tekniğinde, önceden belirlenmiş bir aralığa sahip basınca duyarlı filmler ile bağlantılı olarak özel bir dinamik test ölçüm sistemi kullanılır. Püskürtme sesi duyulursa, basınca duyarlı film, merkezi tahrip olan bir halkayı ortaya çıkarır. Arızalı bir jet için, film Şekil 2.12.'de (türbülanslı bir akış) çizilen orta penetrasyon olmaksızın tamamen renkli bir noktayı yansıtır (Reichert ve ark.,. 2002).




**Şekil 2.12.** Türbülanslı ve odaklanmış akış (Reichert ve ark.,. 2002)

Dinamik basınç ve akış hızından ayrı olarak, bir sıvı jetinin aşındırma gücü üzerinde etkisi olan başka parametreler de vardır. Deneysel bir denklem şöyledir:

$$R = KP^{\alpha}Q^{\beta}N^{\lambda}Vn^{\delta} \qquad (2.4.)$$

Burada;

R = aşınma mesafesi,

K = faktör,

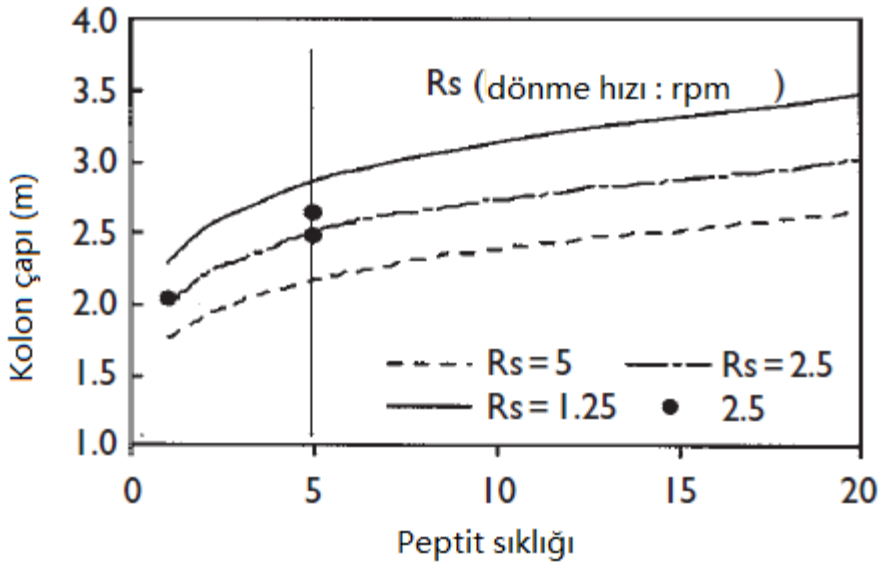
P = başlangıç dinamik basıncı,

Q = akış hızı,

N = erozyonun tekrarlama frekansı

Vn = nozulun hareket hızı.

Şekil 2.13. eroding jetinin optimal tekrarlama frekansı için deney sonuçlarını göstermektedir. Şekilden, peptit sıklığı 5'in üzerindeki frekansların kolon çapını marjinal olarak arttırdığı görülmektedir.



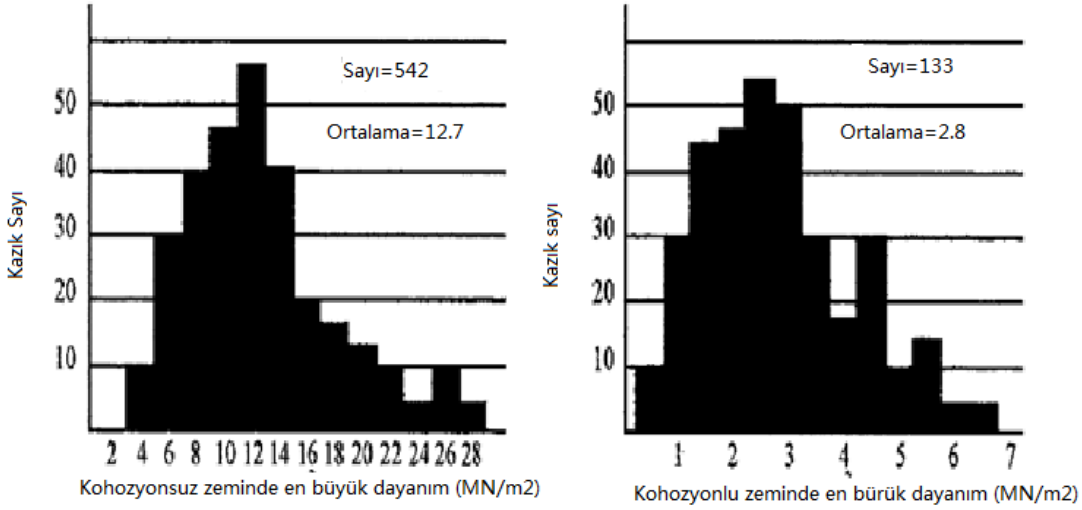

**Şekil 2.13.** Eroding jetinin optimal tekrarlama frekansı (Reichert ve ark. 2002)

## 2.4. Jet grout kolonları için ortalama basınç dayanım kriterleri

Jet grout kolonları ile iyileştirilmeye tabii tutulan zeminlerin mukavemeti genellikle, numuneler üzerinde uygulanan serbest basınç dayanımı testleri temelinde değerlendirilir. Şekil 2.14.'de gösterilen histogramlar, granüler ve kohezyonlu zeminlerde deneysel serbest basınç dayanımlarını göstermektedir. Japonya Jet Enjeksiyon Derneği, bu dağıtım tablolarını benimsemiş olup, tasarım için alınacak serbest basınç mukavemetini, tüm gruptaki en düşük değerlerden yüzde 1 ile 3 arasında değişen minimum güvenli değerler olarak tanımlamıştır (Shibazaki, 1996). Bu tanımlamaya göre, standart serbest basınç dayanımları aşağıdaki gibi verilmiştir; (enjeksiyonun su / çimento oranı 1 olduğunda).

$q_u$ = 1MN / $m^2$ (Kohezyonlu zeminlerde serbest basınç dayanımı)

$q_u$ = 3MN / $m^2$ (Kohezyonsuz zeminde serbest basınç dayanımı)




**Şekil 2.14.** Jet grout kolonların ortalama dayanımı (Shibazaki, 1996)

## 2.5. Jet grout yöntemini etkileyen parametreler

### a) Basınç

Jet-grout uygulamaları enjeksiyon basıncının çalışma aralıklarına göre sınıflandırılabilir.

200-250 bar aralığındaki çalışma düşük basınçlı,

300-400 bar aralığındaki çalışma orta basınçlı,

400-700 bar aralığında çalışma yüksek basınçlı,

olarak tanımlanabilir.

Basınç, elde edilmek istenen kolon çapının oluşmasında en önemli parametredir. Basınç ile jet grout kolon çapı arasında direk bir bağlantı vardır; basınç arttırıldığı zaman kolon çapı artar. Bununla beraber, ulaşılmak istenen çapta homojen bir kolon elde etmek için basınç değeri gerekli fakat yeterli değildir, aynı çap ve homojenlikte kolon oluşması zaman faktörü ile de ilişkilidir. Bazı zemin şartlarında basıncı arttırmak çapın artmasını sağlayamayabilir (Burke, G., 2012).

### b) Dönme ve Çekme Hızı

Zemin materyali ile bağlayıcı materyalin (grout) homojen bir karışım oluşturabilmesi için, takım dönüş hızı belirli bir değerden fazla olmamalı, takım çekme

hızı da ıslah edilen bölgenin tamamında sürekliliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Dönüş hızı genellikle 10-20 devir / dk değerleri arasında değişir, bazı özel durumlarda 30 devir / dk'ya kadar çıkabilir.

Takım çekme işlemi, iki şekilde olabilir;

1. Kademeli çekme.
2. Sürekli çekme.

Bu iki ayrı tip çekme metodu, genellikle delici makinenin imal yöntemine bağlı olarak seçilir. Bazı makinelerde sadece kademeli, bazılarında ise hem kademeli, hem sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır. Kademeli çekmede, her kademede 4 cm. ilerleme ve her kademede 6 - 10 sn. bekleme şantiye tecrübelerinde en iyi neticeyi sağlamıştır. Çekme hızı, zeminin özelliklerine ve birim hacime enjekte edilecek grout miktarına bağlıdır. Bağ dokusu kuvvetli (kohesyonlu) zeminler, jet hüzmesinin gerekli yırtma işlemini ve homojen karışım oluşumunu sağlayabilmesi için genellikle daha uzun süreler gerektirirler. Dönme ve çekme hızı adaptasyonu (optimizasyonu) ıslah edilecek zemine ve kullanılan jet-grouting metoduna bağlıdır. Jet 2 ve jet 3 metodlarında daha büyük çaplar hedeflendiği ve dolayısıyla ıslah edilen zemin hacmi daha büyük olduğu için daha uzun sürelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tüm jet grout kolonlar, uygulama projelerinde gösterilen konumlarından en fazla 75 mm mesafe içinde kalacak şekilde oluşturulmalıdır.

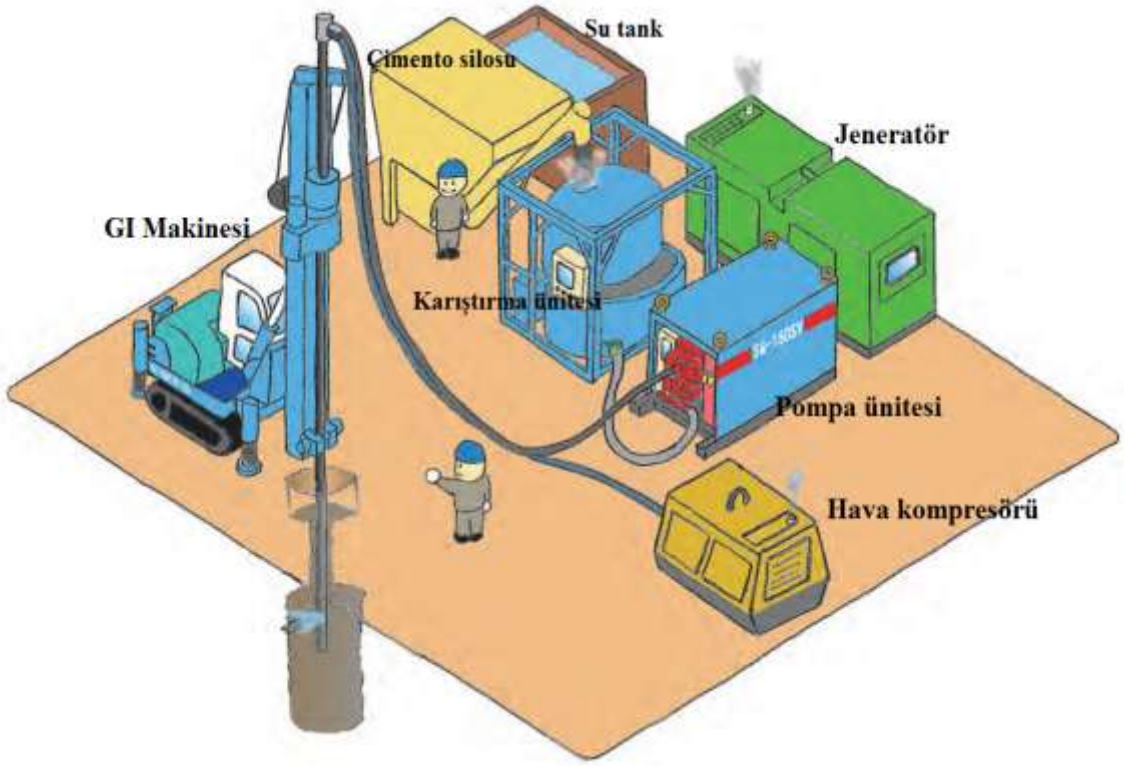
### c) Su/Çimento (W/C) Oranı

Jet-grout imalatı için saha uygulamalarında en çok kullanılan su/çimento oranı 1.0'dir. Enjeksiyonun su/çimento oranındaki artış dayanımda azalmaya neden olmaktadır. Ancak seçilen su/çimento oranı zemin tipine, uygulanan jet-grout yöntemine ve istenilen kolon dayanımına bağlı olarak değişebilir. Saha uygulamalarında enjeksiyon malzemesinin yoğunluğu genellikle 1410-1570 kg/$m^3$ alınmaktadır. Enjeksiyon malzemesinin yoğunluğu oluşturulan kolon geometrisini etkilemektedir. Yüksek viskoziteli akışkanlar, düşük viskoziteli akışkandan daha fazla dağılmaktadır. Bu da akışkanın odaklanmasını azaltmakta ve aşındırma enerjisini etkilemektedir. İyileştirilmiş 1 $m^3$ zemin içindeki çimento miktarı ise 350-700 kg arasında değişmektedir (Yağızatlı, 2012).

## 2.6. Jet grout makina ve ekipmanları

Tipik bir jet enjeksiyon tesisi Şekil 2.15'de gösterildiği gibidir. Tesisin temel elemanları; çimento silosu, su tankı, pompa, hava kompresörü, karıştırma ünitesi, sondaj kulesi, dize çubukları ve monitörden oluşmaktadır.

Şekil 2.15.'te gösterilen tesis çift akışkan sisteminin en basit örneğini göstermektedir. Çift akışkan sisteminde bir hava kompresörüne de ihtiyaç duyulurken, üçlü akışkan sistemi için bir hava kompresörü ve yüksek basınçlı su pompası da gereklidir.




**Şekil 2.15.** Jet grout makine ve ekipmanları

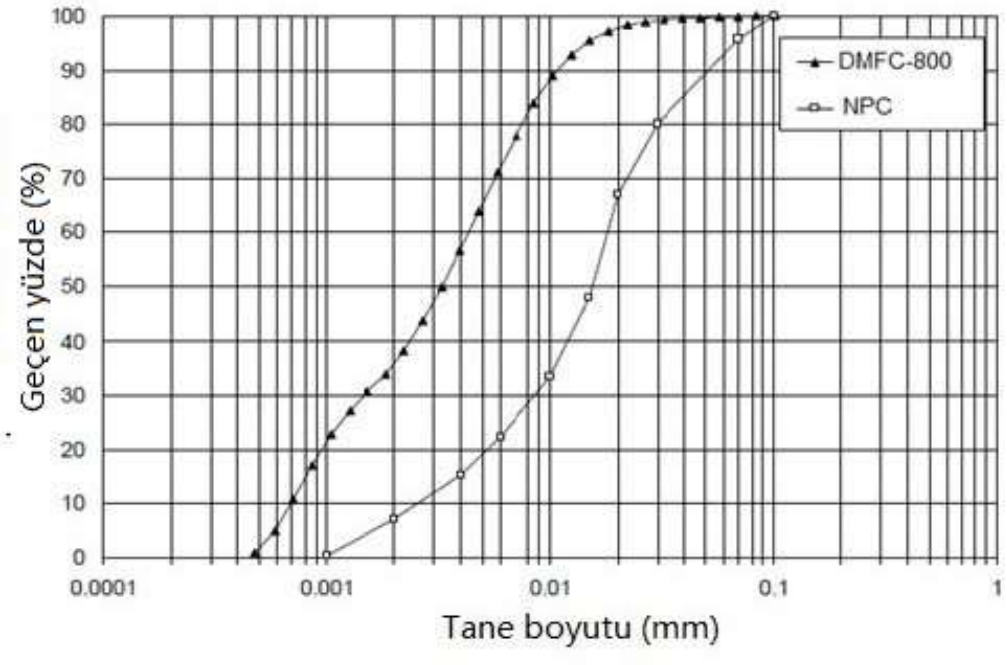
# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1.Kullanılan Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışma kapsamında Normal portland çimentosu (NPC), Normal portland çimento + %10 silis dumanı ve ince taneli çimento (DMFC-800) şeklindeki 3 farklı içerikteki enjeksiyon sıvısı karışımı için bir çalışma yürütülmüştür. Bu karışımların Jet grout kolonların oluşumu, dayanımı ve geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılacağı şekilde bir deney programı hazırlanmıştır.

### 3.1.1. İnce taneli çimento (DMFC-800)

İnce taneli çimento, ultra ince parçacıklardan oluşan Portland çimento esaslı çimentolardır ve gevşek zeminler, kaya ve beton içine enjeksiyon için tasarlanmıştır. Mikro ince çimento, küçük parçacık boyutundan dolayı ($D_{95}$ (elekten geçen %95 oran için en büyük tanecik boyutu <16.0 μm ve Blaine değeri > 600 $m^2$ / kg) enjeksiyon sıvısı olarak kullanıldığı zaman kaya veya zemin kütlesi içindeki fissür ve gözenek alanlarına nüfuz ederek ortamı su sızdırmaz hale getirme özelliğine sahiptir. İnce taneli çimento ve Normal portland çimentosunun boyut dağılımları Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.




**Şekil 3.1.** İnce taneli çimento ve normal portland çimentosunun tane boyut dağılımı

Şekil 3.1.'den görüldüğü gibi, ince taneli çimento normal portland çimentosundan daha ince parçacıklara ve dolayısıyla daha yüksek spesifik yüzey alanına sahiptir. Deneylerde kullanılan Mikro-ince taneli çimentonun (Şekil 3.2.) partikül büyüklüğü dağılımı, Mastersizer adı verilen partikül boyutlandırma cihazı ile belirlenmiştir. Parçacıkların boyutunu ölçmek için lazer kırınım tekniği kullanılır. Dağınık parçacık örneğinden bir lazer ışını geçtikçe saçılan ışığın yoğunluğu cihaz tarafından ölçülür. Bu veriler daha sonra saçılma paternini oluşturan parçacıkların boyutunu hesaplamak için analiz edilir. Deneysel çalışmada kullanılan mikro-ince taneli çimento (DMFC-800) yurt dışından bir firmadan elde edilmiş olup, çimentonun tane dağılımı özellikleri aynı firma tarafından belirlenerek tarafımıza verilmiştir.




**Şekil 3.2.** Deneysel çalışmada kullanılan ince taneli çimento

Deneysel çalışmada kullanılan ince taneli çimentonun üretici firma tarafından belirtilen bazı teknik özelliklerini şöyle sıralayabiliriz;

- İnce ve küçük parçacık boyutu
- Dayanıklı olması

- Ekonomik bir çözüm sunabilmesi
- Sağlık açısından tehlikesiz olması
- Uygulamada standart çimento enjeksiyon ekipmanlarının kullanılabilmesi
- Sıkı derz, çatlaklar ve gözenek alanlarında daha iyi penetrasyon sağlayabilmesi
- Daha fazla penetrasyon ve daha fazla su geçirmezlik özelliği kazandırması
- Daha iyi çalışma ortamı sunması ve içeriğinde zararlı bileşenlerin olmaması
- Geliştirilmiş enjeksiyon verimliliği ve daha az atık oluşması

Deneysel çalışmada kullanılan ince taneli çimentonun üretici firma tarafından belirtilen uygulamada ki kullanım alanları şöyledir;

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

DMFC-800 ince taneli çimentonun enjeksiyon işlemlerinde yüksek basınçlı pistonlu pompalar kullanılır. Harcın kalıcı olmasını sağlamak için karıştırıldıktan sonra enjektör 6 saat içerisinde çatlaklara püskürtülmelidir.

İnce taneli çimentonun enjeksiyon karışımlarını hazırlanırken karışım 1500rpm'de kolloidal karıştırıcı ile en az 5 dakika karıştırılmalıdır (Warner, J., 2004). Karıştırma işlemi için verimli bir mikserin kullanılması çok önemlidir. Koloidal karıştırıcılar en iyisidir, ancak yüksek hızlı kürek karıştırıcıları kabul edilebilir. Koloidal karıştırıcılar için minimum 1500 rpm. Raket karıştırıcıları için minimum devir sayısı: 400 dev / dk şeklindedir. Enjeksiyon karışımı gereğinden uzun süre karıştırılmamalıdır. Karıştırılma işlemi tavsiye edilenden daha uzun sürerse pompa ve hortumların arttırılıp ayarlanması gerekmektedir.

Mikro ince taneli çimento ile yapılan çalışmalarda herhangi bir fiziksel temastan (örneğin cilt veya göz) kaçınılmalıdır. Çünkü tahrişe veya yanıklara neden olabilir. Böyle bir temas meydana gelirse, etkilenen alan bol miktarda temiz su ile yıkanmalıdır. Göz temasında derhal tıbbi yardım istenmelidir.

DMFC-800 ince taneli çimento ve aynı firma tarafından üretilen diğer boyuttaki çimentoların bazı teknik verileri Çizelge 3.1.'de gösterilmektedir.

**Çizelge 3.1.** Bazı ince taneli çimentolara ait teknik veriler

| Ürün | | Birim | DMFC-600 | DMFC-800 | DMFC-1200 |
|---|---|---|---|---|---|
| Renk | | | Gri | Gri | Gri |
| Koku | | | Yok | Yok | Yok |
| Toksik madde | | | Yok | Yok | Yok |
| Spesifik yüzey alanı | | $m^2$ /kg | ≥ 600 | ≥ 800 | ≥ 1200 |
| Tanecik boyutu | $D_{50}$ | µm | < 8.96 | < 4.66 | < 3.26 |
| | $D_{90}$ | µm | < 26.92 | < 13.31 | < 7.55 |
| | $D_{95}$ | µm | < 32.00 | < 16.00 | < 10.51 |
| Priz alma süresi | | min (saat) | 60 | 120 | 60-120 |
| | | max (saat) | 120 | 150 | 120-150 |
| Dayanım | | MPa (3 gün) | 25 | 25 | 25 |
| | | MPa (7 gün) | 45 | 45 | 45 |
| | | MPa (28gün) | 60 | 60 | 60 |

### 3.1.2. Normal portland çimentosu (CEM 1-42.5R)

### 3.1.3. Silis dumanı (SD)

Silis dumanı silikon metal veya ferrosilikon alaşım endüstrisinin yan ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik ark fırınlarında kuvartzın silikona indirgenmesi sırasında oluşan, ortalama tane boyutu 0.1 µm olan malzeme, torba filtreler aracılığıyla toplanır.

Silis dumanı çimentonun suyla olan reaksiyonunun ürünü olan kalsiyum hidroksitle ($Ca(OH)_2$ ) tepkimeye girerek C-S-H jeli oluşturur. Silis dumanı çimentonun suyla olan reaksiyonunun ürünü olan kalsiyum hidroksitle ($Ca(OH)_2$) tepkimeye girerek C-S-H jeli oluşturur. C-S-H jeli betonda dayanımı sağlayan ve oluşması istenen üründür. $Ca(OH)_2$ is dayanıma katkısı olmayan, suda çözünen ve betonun boşluklu yapısından sorumlu fazdır.

Silis dumanının betonun içerisinde minimum miktarda olması tercih edilir. Silis dumanı, suyun çimento ile reaksiyonunun ürünü olan ($Ca(OH)_2$ ) ile uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi diğer puzolanik malzemelere göre daha hızlı tepkimeye girerek erken dayanım kazandırır.

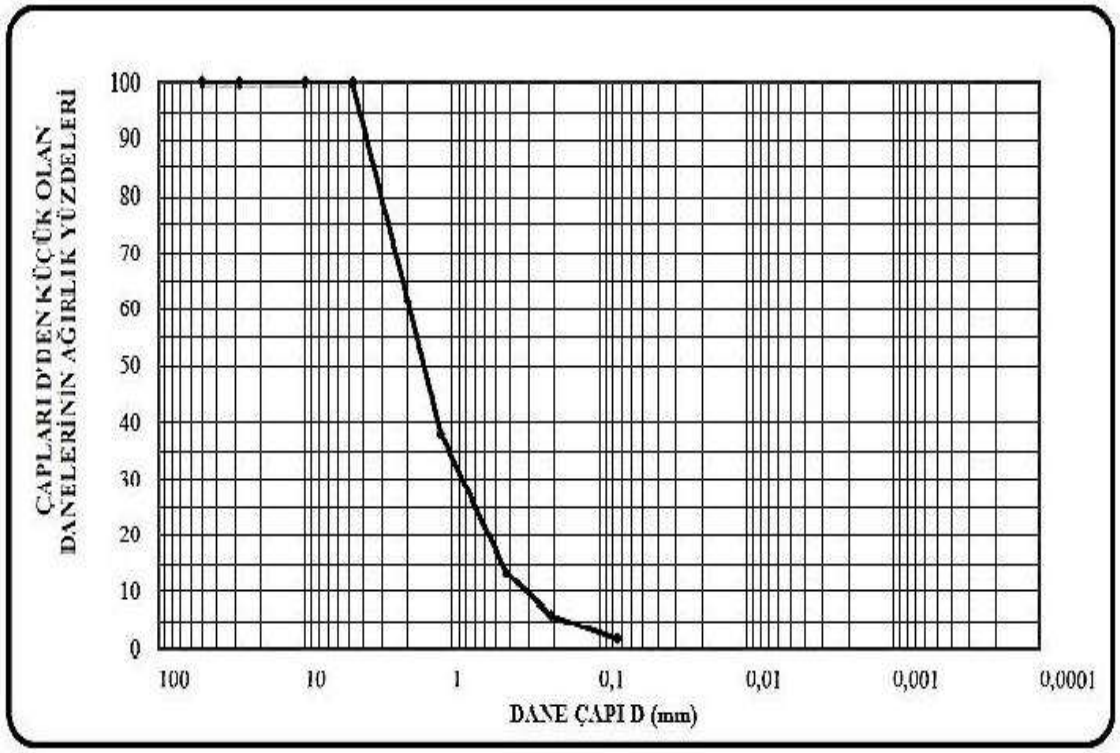
Silis dumanının çimentonun suyla olan reaksiyonuna kimyasal etkisinin yanında fiziksel etkisi de bulunmaktadır. Silis dumanı, ince tanecik boyutuna sahip olması ve

mineral yapısı sayesinde çimentonun su ile olan reaksiyonunu hızlandırarak betonun dayanım kazanma sürecini hızlandırmış olur.

### 3.1.4.Kum

Bu tez çalışmasında jet-grout kolonlarını oluşturmak için kullanılan zemin doğal kum ocağından temin edilmiş olan doğal kumdur. Bu doğal kum üzerinde yapılan elek analizine göre elde edilen granülometri eğrisi Şekil 3.3.'de verilmektedir. Bu grafik verilerine göre zeminde bulunan bileşenlerin yüzdece miktarı ve granülometri kriterleri sırasıyla;

- % Çakıl= 0.5
- % Kum= 99
- % Kil+Silt= 0.5
- Üniformluk Katsayısı, Cu= 1.91
- Derecelenme Katsayısı, Cc= 1.14




**Şekil 3.3.** Deneylerde kullanılan kum zemin numunesine ait granülometri eğrisi

Elek analizinden elde edilen verilere göre doğal kumun zeminin sınıfı kötü derecelenmiş temiz kum (SP) olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kum zeminin orta sıkı kum olduğu durum için araştırma yapılacaktır. Yapılan ön deneysel çalışmalar kapsamında kum zeminin Dr = %35 rölatif sıkılıkta olduğu belirlenmiştir. Bu durumda zeminin doğal boşluk oranı e=0.731, maksimum boşluk oranı $e_{max}$=0.950 ve min. boşluk oranı $e_{min}$=0.419 olarak belirlenmiştir. Kum zeminin tane birim hacim ağırlığı 27.1 kN/$m^3$ olarak elde edilmiştir.

### 3.2. Süspansiyonların Hazırlanması

Deneysel çalışma kapsamında yapılan reolojik deneyler (Marsh hunisi sedimentasyon ve vicat iğnesi deneyleri) ve jet grout kolonların oluşturulmasında kullanılan enjeksiyon sıvıları süspansiyonlar şeklinde hazırlanmıştır. Bu süspansiyonların hazırlanmasında aynı prosedür uygulanırken, farklı su/çimento oranları (0.75, 1.0, 1.25, 1.50 vb.) kullanılmıştır.

Karıştırıcının devir sayısı ve karıştırma süresi süspansiyon için son derece önemli olduğundan taneciklerin topaklanmasının ve erken hidratasyonun önüne geçmek için karıştırma işlemi özenle yürütülmüştür. Karıştırma süresi çok uzun tutulursa süspansiyon ısısı çok aşırı yükselip erken hidratasyon görülebilir. Karıştırıcının hızı da topaklanmanın olmaması ve önüne geçilmesi açısından önemlidir. Karıştırma süresi ve devir sayısı için üretici firmanın bilgi kataloğunda belirtilen hususlar göz önüne alınmıştır (Warner, J., 2004).

Çimento üretici firmaları tarafından minimum 1500 devir/dk'lık koloidal karıştırıcı kullanılması önerilmiştir. Süspansiyonlar 2800 devir/dk'lık matkap ve karıştırıcı uç kullanılarak hazırlanmıştır. Önce karıştırma kabı içerisine belirlenen su doldurulup mikser çalıştırılmıştır. Daha sonra mikser çalışırken Normal portland çimentosu ve ince taneli çimento azar azar sabit bir şekilde eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Toplam 3dk.'lık karıştırma süresinden sonra süspansiyon hazır hale gelmiştir.

### 3.3. Reolojik Özellik Deneyleri

Enjeksiyon için kullanılan Normal portland çimentosu ve DMFC- 800 ince taneli çimentosuna ait enjeksiyon karışımlarının uygun su/çimento (W/C) oranlarının

belirlenebilmesi için; 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5,2.75, 3.0, 3.5, 4.0 gibi farklı W/C oranlarında marsh hunisi, sedimantasyon ve vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır.

### 3.3.1. Marsh hunisi deneyi

Enjeksiyonun akışkanlığını bellirlemek için iki temel deney kullanılır: Marsh hunisi yöntemi ve viskozimetre yöntemi. Bu çalışmada birinci yöntem kullanılmıştır. Viskozite, moleküller arasındaki sürtünme nedeni ile akışkan malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir (Wanner, 2004). Newton kanununa göre viskozite sıvının kayma direncinin ($\tau$), hız eğimine (dv/dz) oranı olarak tanımlanır (Hausmann, 1990).

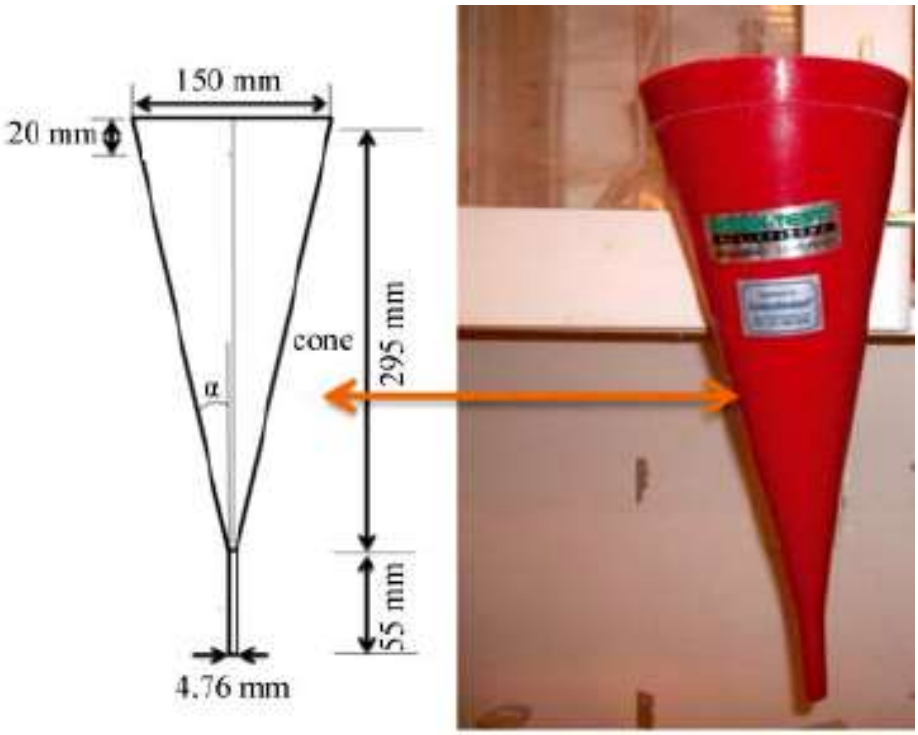
Sıcaklık, su/çimento oranı ve akışkanlaştırıcı gibi etkenler viskozite değerini etkilemektedir. Sıcaklık ve su/çimento oranı arttıkça viskozite düşer. Akışkanlaştırıcı olarak tabir edilen kimyasal katkı maddeleri de viskozite değerini düşürür (Wanner, 2004).

Marsh Hunisi, enjeksiyon sıvısının akışkanlık ve viskozite özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan en basit cihazdır. Marsh hunisi üst kısmı 152.4 mm ve alt kısmı 4.76 mm çaplarında, 304.8 mm yüksekliğinde olan bir kesik koniden oluşmaktadır. Alt kısmı 4.76 mm çaplı ve 55 mm yükseklikli bir orifistir (Şekil 3.4.). Mars hunisi deneyi, çimento enjeksiyonunun zaman içindeki viskozitesinin ölçülmesi (yani saniye) için kullanılır, sahadaki kalite kontrolü için genellikle çeşitli harç karışımlarının viskozite değerleriyle birlikte uygulanır.

ASTM C939'a göre Marsh hunisi deneyi asağıdaki adımları içermektedir (ASTM C939);

- Deney yapılacak ortamın sıcaklığı 23.0±2°C olmalıdır.
- Enjeksiyon sıvısı süspansiyon şeklinde üretim firmasının şartlarına göre karıştırılır. Sonra 1000 ml'lik mezüre aktarılır.
- Marsh hunisinin deliği kapatılarak, süspansiyon ölçü silindirinden huniye aktarılır.
- Süspansiyonun huniden akması için gereken zaman, kronometre ile belirlenir (Şekil 3.5 - 3.7).

Bu tez çalışmasında farklı çimento çeşitleri ve karışımları için toplam 26 adet Marsh hunisi deneyi yapılmıştır.




**Şekil 3.4.** Marsh hunisinin şematik gösterimi



**Şekil 3.5.** Marsh hunisi deneyinin yapılılışı



**Şekil 3.6.** Marsh hunisi deneyinde süspansiyonun boşaltılması



**Şekil 3.7.** Marsh hunisi deneyinde süspansiyonun orifisten akışı

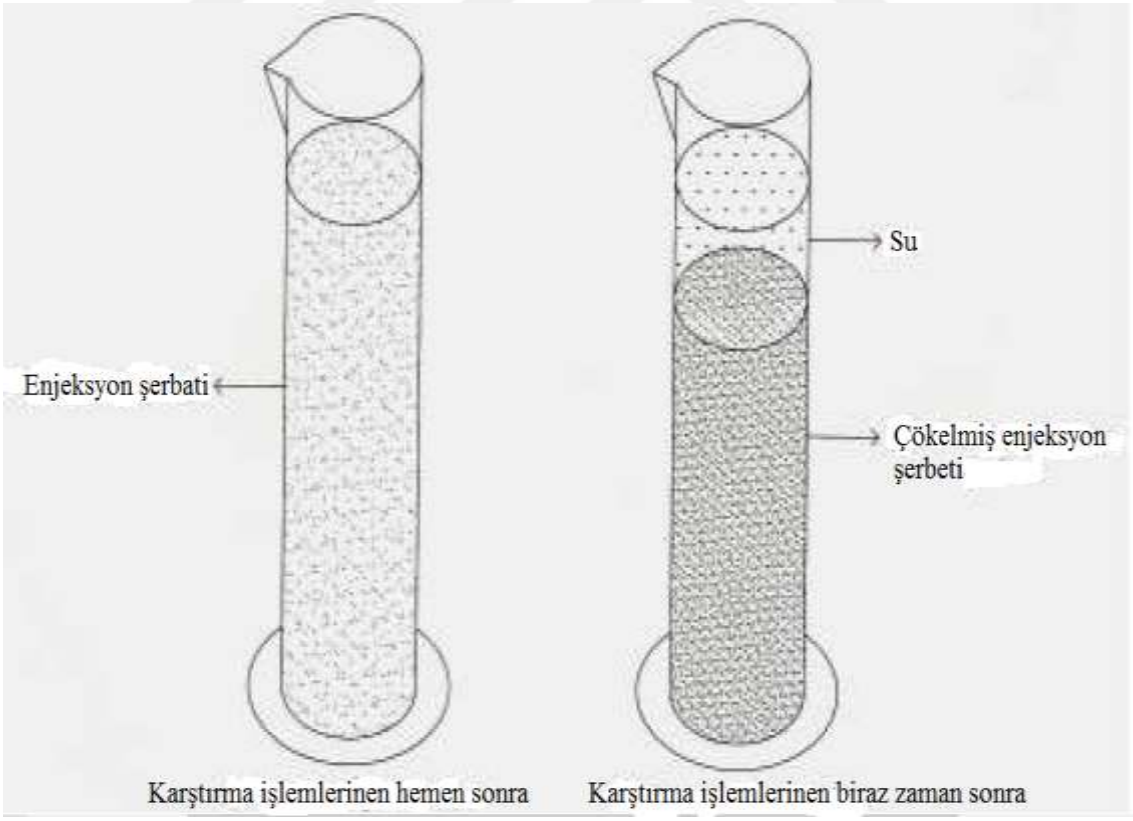
### 3.3.2. Sedimantasyon deneyi

Süspansiyon partikülleri serbest durumda çökelme eğilimi gösterirler. Bu eğilim sonucunda partiküller dibe çökelir, berrak su çöken malzemenin üzerinde kalır. Bu olaya sedimantasyon (bleeding) denir (Şekil 3.8.) (Warner, 2004).

Enjeksiyonda, çimento partiküllerinde çökelme olmuyorsa süspansiyon stabildir. Eğer, çimento partikülleri türbülanstan dolayı çökeliyorsa süspansiyon stabil değildir (Hausmann, 1990).

Büyük çaplı tanelerin çok hızlı olarak, küçük çaplı tanelerin ise yavaş bir şekilde dibe çökeleceği bilinen bir gerçektir. Sedimantasyon olayının temelini oluşturan bu gerçek Stokes (1981) tarafından incelenmiş ve taneciklerin çapları ile çökme hızları arasında bir bağıntı olduğu matematiksel olarak ifade edilmiştir. Ortaya çıkan bu ifadeye 'StokesKanunu' adı verilmektedir (Nonveiler, 1989).

ASTM C940'a göre sedimantasyon deneyinin yapılması aşağıdaki işlemlerden oluşmaktadır;




**Sekil 3.8.** Sedimantasyon deneyi

- Deney ortamının sıcaklığının (23.0±2ºC) arasında olması sağlanır.
- Deney yapılacak enjeksiyon şerbet miktarı 1000ml olmalı ve bu şerbet cam mezür şeklindeki silindirlere aktarılmalıdır (Şekil 3.9.).
- Enjeksyoin şerbetinin buharlanmasını engellemek için ölçü silindirin ağzı kapatılmalıdır.
- İlk bir saat içinde her 15 dakikada bir okuma alınır, ikinci saat için her 10 dakikada bir okuma alınır. Böylece çökelmiş enjeksisyon şerbeti seviyesi art arda iki okuma arasında sabitleninceye kadar devam edilmelidir.
- Sedimantasyon yüzdesi, toplanan berrak su hacminin toplam enjeksiyon hacmine bölünmesi ile bulunur.
- Sedimantasyon yüzdesi % 5' ten küçükse süspansiyon stabildir.

Bu tez çalışması kapsamında farklı çimento tipleri ve karışımları için toplam 26 adet sedimantasyon deneyi yapılmıştır.



**Sekil 3. 9.** 1000 ml'lik mezürlerle sedimantasyon deneyi

### 3.3.3.Vicat iğnesi deneyi

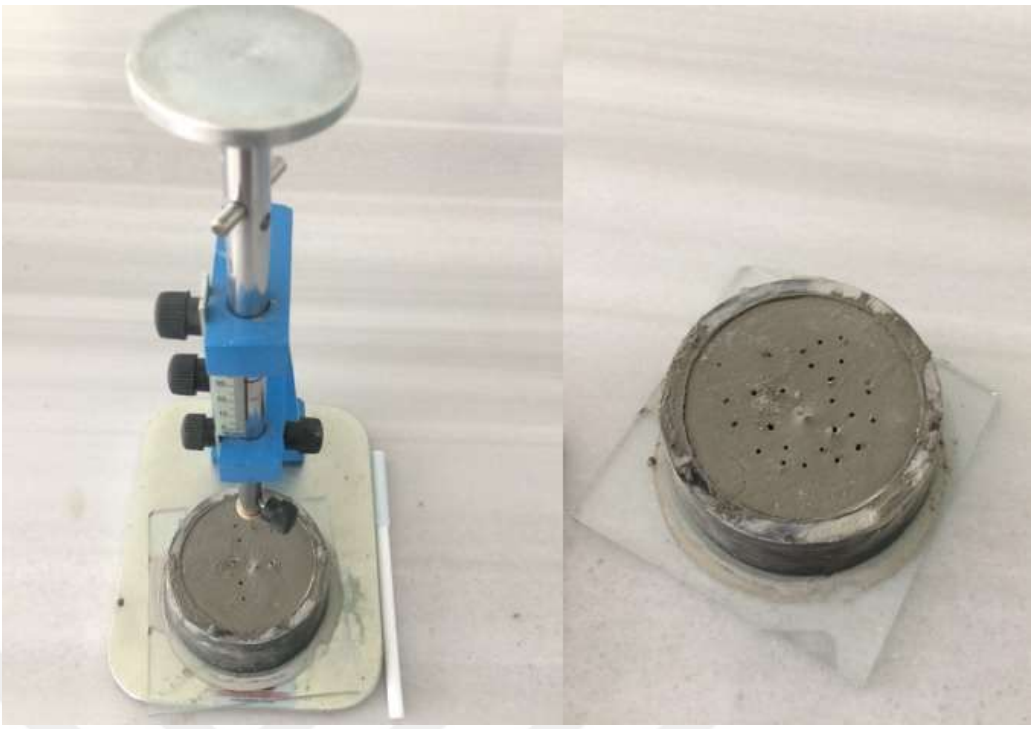
Bu test yöntemi ile çimento enjeksiyonunun priz süresi belirlenir. Vicat iğnesi yardımıyla hidrolik çimentonun priz süresini bellirlemek için iki yöntem vardır. Birinci yöntemle elle çalıştırılan standart Vicat aparatı kullanılarak, ikinci yöntemle ise otomatik bir Vicat makinesi kullanılarak priz süresi belirenebilir (ASTM-191). Tez çalışması kapsamında birinci yöntem kullanılmıştır.

Katılaşma (priz), çimento enjeksiyonundaki bağlayıcı maddelerin sertleşmesi veya plastik özelliklerini kaybetmesidir. Priz başlama süresi çimento şerbetinin fiziksel değişiklik göstererek katılaşmaya başladığı zaman için geçen süredir (Warner, 2004). Prizin bitiş süresi ise çimento şerbetinin sertleşmesinin bittiği zaman için geçen süredir (Warner, 2004).

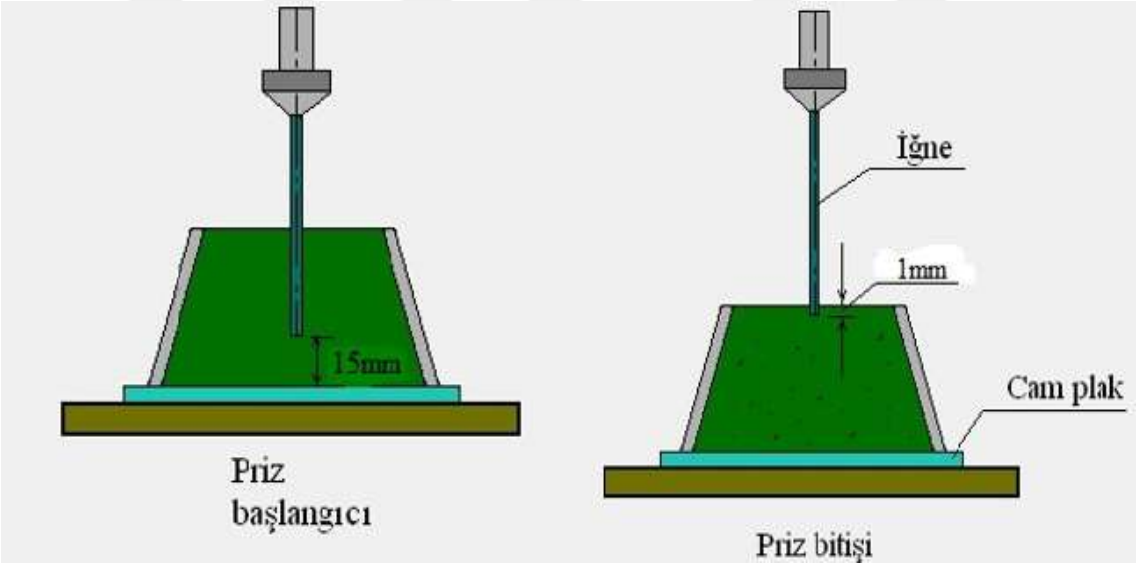
Enjeksiyon yapılabilmesi için priz süresi çok önemlidir. Eğer enjeksiyon yapılacak zeminde yer altı suyu bulunuyorsa enjeksiyon materyalinin hızlı priz alması istenir. Enjeksiyon materyalinin tüm boşluklara ulaşabilmesi için uzun zamana ihtiyaç vardır. Bu yüzden optimum sertleşme süresini öğrenmek çok önemlidir (Warner, 2004).

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

- Enjeksiyon karışımının sıcaklığı 20°C ile 27.5°C arasında olmalıdır.
- Vicat iğnesi çimento süspansiyonunun yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmeli ve ölçme sistemi bu noktaya göre alınmalıdır.
- İlk 30 dakika içinde okuma alınmaz.
- Sonraki her 15 dakikada bir defa 1 mm çapındaki Vicat iğnesi (Şekil 3.10.) serbest bırakılarak süspansiyon içerisine penetre olması sağlanır. Penetrasyon değeri 25 mm okunduğunda priz başlama süresi olur. Batma 25 mm' den az bir değer olursa 25mm batma olana kadar sürekli deney yapılır ve 25 mm'ye karşılık gelen değer bulunur.
- Batmanın 1mm olduğu duruma denk gelen süre priz bitiş süresidir (Şekil 3.11.).
- Her deney yapılan nokta arası mesafe 5mm'den yakın olmamalıdır.



**Şekil 3.10.** Vicat deney aleti




**Şekil 3.11.** Priz başlama ve bitiş süresi

Bu tez çalışması kapsamında farklı çimento çeşitleri ve karışımları için W /C oranı 0.5 ve 1.0 değerleri için vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır.

## 3.4. Laboratuvarda Jet Grout Kolonların Üretilmesi

### 3.4.1. Deney Programı

Jet grout kolonlarının oluşturulma çalışması kapsamında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda bulunan ve Erkan (2013) tarafından doktora tez çalışması kapsamında tasarlanan laboratuvar tipi özel jet-grout deney seti kullanılmıştır. Yine bu tez çalışması kapsamında da Erkan (2013) tarafından üretilen kolonlara benzer yöntemle kolonlar oluşturulmuştur.

Deneysel çalışmada kullanılan laboratuvar tipi özel jet-grout deney seti Şekil 3.12.'de yer almaktadır. Sistem arazide uygulanan Jet grout kolon sistemiyle benzer şekilde tasarlandığı için gerçek bir Jet grout kolon sistemiyle benzer özelliğe sahip kolonların oluşturulabilmesi mümkün olmaktadır.



**Şekil 3.12.** Laboratuvarda kullanılan jet-grout deney makinesi



**Şekil 3.13.** Jet-grout deney makinesine kalibrasyon yapılması

Laboratuvarda kullanılan jet grout sistemi deney yapılmadan önce dikkatli şekilde kontrol edilmiştir. Aletin çalışma prensibi ana eksende bulunan bir tijin ucundaki nozülden çıkan enjeksiyon sıvısının etrafındaki zemini yırtması prensibine dayanmaktadır. Zeminin yırtılması esnasında enjeksiyon sıvısı ile zemin karışmakta ve zamanla çimentonun prizini kazanmasıyla zemin-çimento karışımı kompozit bir malzeme oluşmaktadır. Bu nedenle tij ekseni içerisine gönderilen enjeksiyon sıvısının hangi basınçta gönderildiği, tijin kendi ekseni etrafındaki dönme hızı ve tijin düşey ekseni boyunca yukarı doğru hareket hızı (çekme hızı) oluşan jet grout kolonların oluşumu ve performansı üzerinde etkili olmaktadır.

Tez çalışması kapsamındaki laboratuvar deneylerine başlamadan önce aletin çalışması esnasındaki dönme hızı ve çekme hızının kalibre edilmesi (Şekil 3.13.) için ön çalışmalar yapılmıştır. Bu ön çalışmalar sonucunda deney aleti üzerindeki okuma değerleri ile gerçekte oluşan hareket miktarları belirlenerek oluşturulacak kolonlarda bir standartın oluşturulması sağlanmıştır (Çizelge 3.2.).

**Çizelge 3.2.** Jet grout aleti tiji dönme ve çekme hızı kalibrasyon sonuçları

| | **Saat okuması** | **Gerçek değer** |
|---|---|---|
| **V, Çekme hızı (cm/dak)** | 5.8 | 15.1 |
| | 6.0 | 16.1 |
| | 6.2 | 16.8 |
| | 7.2 | 20.3 |
| | 7.3 | 20.8 |
| | 7.5 | 21.5 |
| | 9.0 | 27.7 |
| | 9.2 | 28.5 |
| | 9.4 | 29.2 |
| | 9.5 | 29.6 |
| | 10.2 | 32.3 |
| | 11.2 | 37.1 |
| | 12.3 | 39.9 |
| **D, Dönme hızı (devir/dak)** | 1.5 | 5 |
| | 2 | 6 |
| | 2.5 | 7.5 |
| | 3 | 9.5 |
| | 3.2 | 10 |
| | 3.5 | 11 |
| | 4 | 12 |
| | 4.5 | 15 |
| | 5 | 16 |
| | 5.4 | 18 |
| | 6 | 19 |
| | 6.1 | 20 |

### 3.4.2. Deney zemin ortamının hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan deney kumunun özellikleri bellirledikten sonra laboratuvarda jet grout kolonları oluşturulmuştur. Jet grout kolonları 60cm çapında 90 cm yüksekliğinde plastik variller içerisinde oluşturulmuştur. Jet grout kolonlarının içerrisinde oluşturulacağı kum zeminin içerisine kuru zeminin %4'ü oranında su ilave edilmiştir. Bu işlem arazidekine benzer özellikte bir zemin ortamının elde edilebilmesi amacıyla yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan kum Demiral (2016) tarafından kullanılan kum ile aynı özellikte olup aynı rölatif sıkılık oranınını elde edecek şekilde

(Dr=%35), kum zeminin 30cm yükseklikten elekten elenmesi yöntemiyle plastik varillere yerleştirilmiştir (Şekil 3.14.).



**Şekil 3.14.** Deneysel çalışma için kum zemin ortamının hazırlanma aşamaları

### 3.4.3. Deneylerde kullanılacak enjeksiyon malzemesinin hazırlanması

Deneyde kullanılan enjeksiyonlara ilk olarak vicat deneyi, sedimantasyon deneyi ve Marsh hunisi deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarına farklı çimento ve karışımlar için, ağırlık cinsinden su/çimento oranları 0.85, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 ve 4.0 olan enjeksiyonlar hazırlanmıştır.

Çimento üreticileri tarafından enjeksiyon karışımları için minimum 1500 devir/dk'lık karıştırıcı kullanılması önerilmektedir. Çalışmada kullanılan enjeksiyon karışımları 2800 devir/dk'lık matkap ve karıştırıcı uç kullanılarak hazırlanmıştır. Önce karıştırma kabı içerisine miktarı belirlenen su doldurulup mikser çalıştırılmıştır. Daha sonra mikser çalışırken ince taneli çimento azar azar sabit bir şekilde eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Toplam 3dk.'lık karıştırma süresinden sonra süspansiyon hazır hale gelmiştir (Şekil 3.15.).



**Şekil 3.15.** Enjeksiyon malzemesinin hazırlanması ve hazneye doldurulması

Karıştırıcının devir sayısı ve karıştırma süresi enjeksiyon için son derece önemli olduğundan taneciklerin topaklanmasını engellemek için çimento taneleleri 1mm delik çaplı elekten elenerek hazırlanmıştır. Erken hidratasyonun önüne geçmek için

karıştırma işlemi çok dikkatli şekilde yapılmıştır. Enjeksiyonun karıştıma süresi çok uzun olursa enjeksiyon ısısı çok yükselip erken hidratasyon meydana gelebilir. Karıştırıcının hızı da topaklanmanın önüne geçilmesi açısından önemlidir. Bu sebeple enjeksiyonun karıştırma süresi ve devir sayısı için üretici firma tarafından verilen katalog değerlerine uyulmasına özen gösterilmiştir.

### 3.4.4. Ön çalışma esnasında deneme kazıklarının üretilmesi

Deneysel çalışma kapsamında ki jet grout kolonların oluşturulmasından önce bazı deneme kazıkları oluşturulmuştur (Şekil 3.16. ). Oluşturulan deneme kazıklarından 5 tanesi üzerinde bazı değerlendirmeler yapılarak gerçek deneysel çalışma kapsamı için değerlendirmeler yapılmıştır (Çizelge 3.3.);

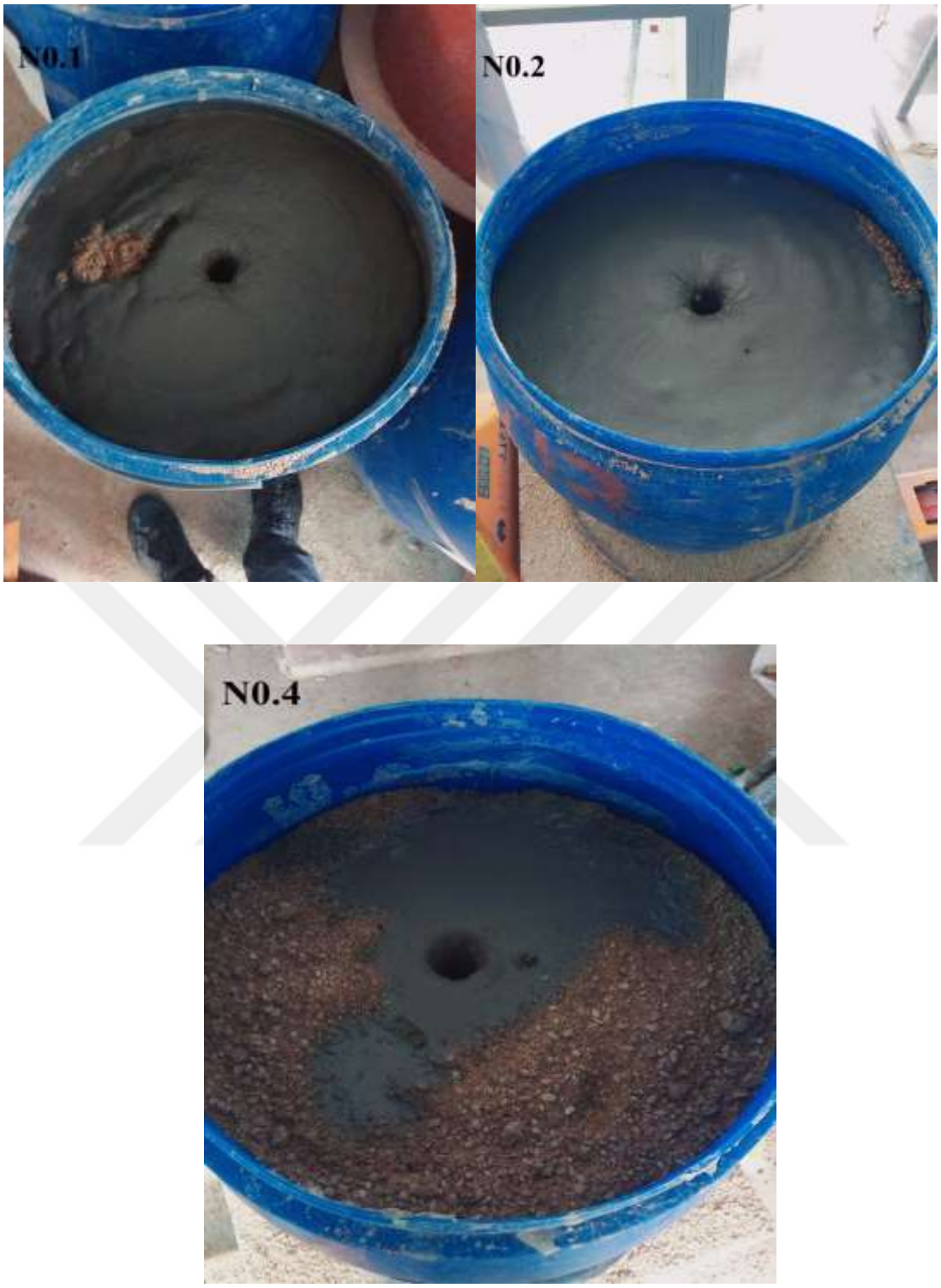
- İnce tane oranı az olan temiz kum (deneysel çalışma kapsamında kullanılan kum) içerisinde uygulanan enjeksiyonda tüm süspansiyon zeminle karışmıştır (No.5). Haznedeki enjeksiyon malzemesinin bitme süresi 1 dakika 12 saniyeye ulaşmıştır.
- İnce tane oranı yüksek olan, yuvarlak taneli kumda (deneysel çalışmada kullanılmaktan vazgeçilen kum) yapılan enjeksiyon çalışmasında (No.4) süspansiyonun bir kısmı yukarıya çıkmıştır. Yani süspansiyon zemine tam olarak enjekte edilememiştir (Şekil 3.17.). Haznedeki enjeksiyonun bitme süresi 1 dakika 14 saniyeye ulaşmıştır.
- İnce tane oranı yüksek olan, yuvarlak taneli kumda yapılan enjeksiyon çalışmasında (No.1, No.2 ve No.3) çalışmasında çok miktarda enjeksiyon kum üzerine çıkmış ve basınç arttıkça kum üzerindeki enjeksiyon miktarı da artmıştır.
- Ön çalışma kapsamında üretilen deneme kazıklarında karşılaşılan yukarıdaki durumlar dikkate alındığında kum zemin içerisinde ince tane miktarının artması ile jet grout kolon üretiminin zorlaştığı ve Jet 1 yönteminin başarısız olacağı kanaatine varılmıştır. Bu nedenle başlangıçta öngörülen ince tane oranı yüksek olan kumdan vazgeçilerek deneylerde temiz kum kullanılşmasına karar verilmiştir. İnce tane oranı yüksek olan kumlar için Jet 2 ve Jet 3 yöntemlerinin uygun olabileceği kanaatine varılmıştır.

**Çizelge 3.3.** Jet grout kolonu deneme kazık paremetreleri

| Deneme kazıkları | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Kazıklar** | **Basınç P (bar)** | **Su/Çimento Oranı W/C** | **Çekme Hızı V(cm/dk.)** | **Dönme Hızı D(dev/dk.)** |
| 1 | 25 | 1 | 20 | 10 |
| 2 | 30 | 1 | 20 | 10 |
| 3 | 20 | 1 | 15 | 10 |
| 4 | 20 | 3 | 20 | 10 |
| 5 | 20 | 3 | 20 | 10 |




**Şekil 3.16.** Ön çalışmada oluşturulan deneme kazıkları




**Şekil 3.17.** Farklı su / çimento oranlarında, ince tane oranı yüksek kumda uygulanan enjeksiyon çalışmaları

### 3.4.5. Deneysel çalışma kapsamında ki Jet grout kolonlarının üretilmesi

Bu deney çalışmasında Erkan'ın (2013) tez çalışmasında kullanmış olduğu laboratuvar tipi Jet grout sistemi kullanılmıştır. Sistem ile arazide yapılan Jet grout kolon sistemi birebir aynı şekilde tasarlanmıştır. Bu sebeple deneylerde kullanılan sistem gerçek bir jet grout kolon sistemiyle aynı şekilde çalışabilecek ve tüm işlevlerini yerine getirebilecek kapasitededir. Bu sistem ile laboratuvarda jet grout kolonların üretimi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan ön çalışmalardan anlaşılacağı gibi Jet grout kolon imalatını etkileyen parametrelerin en önemlileri enjeksiyonun basıncı (P), tijin çekme hızı (V), tijin dönme hızı (D) ve su/çimento oranıdır (W/C). Bu parametreler; önceki araştırmacılar tarafından (Erkan, 2013; Demiral, 2016) belirtilen değerler ve enjeksiyon süspansiyonunun zemine enjekte edilebilirliği de göz önüne alınarak bu deneysel çalışma için belli aralıklarda sabitlenmeye çalışılmıştır.

Deneysel çalışma kapsamında Normal portland çimentosu, Normal portland çimento + %10 silis dumanı ve ince taneli çimento (DMFC-800) şeklindeki 3 farklı içerikteki enjeksiyon sıvısı karışımı için bir çalışma yürütülmüştür. Bu karışımların Jet grout kolonların oluşumu, dayanımı ve geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılacağı şekilde bir deney programı hazırlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan deneysel program Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Erkan (2013) tarafından normal portland çimentosuyla yapılan deneylerde çekme hızının düşük (15 cm/dk) olduğu kolonların daha homojen bir çapa ve daha kompakt bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. Çekme hızının yüksek (45 cm/dk) olduğu kolonlarda kolon yapısında ve kolon çapında homojenlik sağlanamamış, spiral (yaprak) şeklinde kolonlar oluşmuştur. Bu kolonlarda enjeksiyonların zemin içerisinde homojen bir şekilde karışması ve zemindeki yırtılmanın da yeterli olmadığı görülmüştür. Çekme hızının (30 cm/dk) olduğu kolonlarda ise kısmi spirallenme görülmüştür. Çekme hızı 15cm/dak ve 30 cm/dak olan kolonlardan oldukça başarılı silindirik örnekler alınabilmiş, dağılma ve parçalanma çok az olmuştur. Çekme hızı 45 cm/dak olan kolonların spiral yapıda olması, homojen olmaması nedeniyle silindirik örnekler çok zor alınmış, bazı kolonlardan istenilen çap ve boyda karot örnekleri alınamamış, karot alma işlemi-esnasında dağılmalar ve parçalanmalar görülmüştür. Erkan (2013) yaptığı bu çalışma sonucunda, kolon çapı ve serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametrenin enjeksiyon basıncı olduğunu, enjeksiyon basıncı arttıkça

daha büyük çaplı kolonlar elde edilmesine rağmen serbest basınç mukavemetinde doğrusal olarak azalmanın görüldüğünü belirtmiştir. Bu sebeple mevcut tez çalışması kapsamında enjeksiyon basıncı iki grup halinde 25 bar ve 40 bar olarak seçilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Deneysel çalışma kapsamındaki Jet grout kolonları paremetreleri

| No | Kazık Tipi | W/C | Basınç (bar) | Dönme Hızı (dev/dk) | Çekme Hızı (cm/dk) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | DMFC-800 | 4 | 25 | 10 | 25 |
| 2 | DMFC-800 | 3 | 25 | 10 | 25 |
| 3 | DMFC-800 | 2.5 | 25 | 10 | 25 |
| 4 | DMFC-800 | 2 | 25 | 10 | 25 |
| 5 | DMFC-800 | 1.5 | 25 | 10 | 25 |
| 6 | DMFC-800 | 1.25 | 25 | 10 | 25 |
| 7 | DMFC-800 | 1 | 25 | 10 | 25 |
| 8 | DMFC-800 | 1 | 40 | 10 | 15 |
| 9 | NPC | 1.5 | 25 | 10 | 25 |
| 10 | NPC | 1.25 | 25 | 10 | 25 |
| 11 | NPC | 1.0 | 25 | 10 | 25 |
| 12 | DMFC-800 | 0.85 | 40 | 10 | 15 |
| 13 | NPC+%10 Silis dumanı | 1.5 | 25 | 10 | 25 |
| 14 | NPC+%10 Silis dumanı | 1.0 | 25 | 10 | 25 |
| 15 | NPC+%10 Silis dumanı | 1.25 | 25 | 10 | 25 |
| 16 | NPC+%10 Silis dumanı | 1.0 | 40 | 10 | 15 |
| 17 | NPC+%10 Silis dumanı | 0.85 | 40 | 10 | 15 |
| 18 | NPC | 1.0 | 40 | 10 | 15 |
| 19 | NPC | 0.85 | 40 | 10 | 15 |

Basıncın 25 ve 40 bar olarak seçildiği durumlarda oluşan kolonlar arasında çap, serbest basınç mukavemeti ve geçirimlilik katsayısı değerleri arasında karşılaştırmaların yapılması hedeflenmiştir.

Kolon çapında ikinci önemli parametrenin dönme hızı olduğu dönme hızı arttıkça daha küçük çaplı kolon oluştuğu ama aynı zamanda dönme hızının çok düşük seçilmesi durumunda spirallenmenin arttığı belirtilmiştir. Bu durum göz önüne alınarak dönme hızı bu tez çalışmasında optimum değer olan 10 dev/dk olarak seçilmiştir. Sonuç itibariyle parametreler seçilirken büyük çapta, homojen kolonlar üretilmesi hedeflenirken serbest basınç mukavemeti ve permeabilite özellikleri açısından da karşılaştırılabilir sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir.

Serbest basınç mukavemeti ve geçirimlilik katsayısı açısından değerlendirmeler yapılacağından dolayı çekme ve dönme hızları tüm deneyler için sabit seçilmiştir (Çizelge 3.4.).

Çalışma kapsamında yapılan reolojik özellik ve ön deney çalışma sonuçları da dikkate alınarak W /C oranları 0.85 – 4.0 aralığında seçilmek suretiyle bir çalışma yürütülmüştür.

Deneyde kolonları elde etmek için çap D= 60 cm ve yükseklik H= 90 cm olan plastik silindirik variller kullanılmıştır. Enjeksiyon şerbeti hazneye doldurulurken, deney setinde yer alan ve ucunda tek nozullu konik başlık yer alan tij takımı kum zemin içerisine 10 dev/dk dönme hızı ile döndürülerek indirilmiştir. Tij kum zemin içinde istenilen derinliğe indirildikten sonra 10 dev/dk dönme hızı ve 15 - 25 cm/dk çekme hızı ile yukarıya doğru hareket ederken 25 veya 40 bar enjeksiyon basıncı uygulanmak suretiyle jet-grout kolon imalatına başlanılmıştır. Şekil 3.18'de jet-grout kolon imalat aşamaları yer almaktadır.

Bu çalışmada farklı parametrelere ve su / çimento (W/C) oranlarına ait toplam 19 tane JG kolonu oluşturulmuştur. Oluşturulan kolonların prizini alması için 28 gün beklenilmiştir. Bu süreden sonra, her bir JG kolonundan ekseni boyunca karot numuneler alınmıştır.

Karotların jet grout aletinin tijinin dış kısmından eşit mesafelerden alınmasına özen gösterilmiştir.

Alınan karot numuneleri üzerinde serbest basınç deneyi ve üç eksenli deney cihazında permeabilite deneyleri uygulanmıştır.




**Şekil 3.18.** Jet grout kolonların yapım aşamaları

## 3.5. Karot Numuneleri Üzerinde Laboratuar Deneyleri

### 3.5.1. Serbest basınç deneyi

Çalışma kapsamındaki Serbest basınç deneyleri Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuarında yapılmıştır. Laboratuarda bulunan deney aleti yukarı yönde hareket edebilen ve numuneni iki plaka arasına yerleştirilmesi ile alttaki plakanın yukarı doğru hareketi ile numunelere basınç

uygulayan bir çalışma prensibine sahiptir (Şekil 3.19.). Deneyler ASTM D 2166-00 (2003) standardına göre yapılmış olup deney esnasında şu prensiplere uyulmuştur;

1) Deney numunesi alt tablanın merkezine yerleştirilmiştir. Alet çalıştırılarak örneğin üst tablaya temas etmesi sağlanmıştır. Numunenin alt ve üst yüzeyleri deney aygıtının alt ve üst tablalarının merkezlerine gelecek şekilde ayarlanmıştır.
2) Deformasyon okuması ve kuvvet halkası saatleri sıfırlanmıştır.
3) Yükleme hızı örnek boyunun mm cinsinden % 0,5-2'si arasında bir değer olacak şekilde ayarlanır. Yükleme hızı örneğin en çok 15-20 dk içinde kırılmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Deneysel çalışmada aletin hareket hızı 0.5mm/dk olarak seçilmiştir. Örneğin yüklenmesine başlanarak, belli deformasyon aralıklarında okumalar kuvvet değeri okumaları alınmıştır. Deneysel çalışma kapsamında yükleme-deformasyon verileri deney esnasında bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir.
4) Kırılmanın gözle görülebilir olması halinde; yüklemeler örnekde kırılma düzlemi görülünceye kadar devam ettirilmiştir.
5) Kırılma gerçekleştikten sonra eğer deformasyonlar devam ediyor ve numuneler yük alıyorsa deney devam ettirilmiştir.
6) Deney bittikten sonra numunenin kırıldığı andaki maksimum kırılma yükü kırılma anındaki enkesit alanına bölünerek Serbest basınç mukavemeti değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda şu işlem sırası takip edilmiştir;

- Kuvvet (Yük) değeri, P:

  P= (Kuvvet Halkası Okuması) x (Kuvvet Halkası Faktörü) (3.1.)

- Toplam Deformasyon değeri,ΔH:

  ΔH= (Deformasyon Okuması) x (Deformasyon Okuması 1 Birimi) (3.2.)

- Birim Deformasyon değeri, Ɛ:

  Ɛ= ΔH / Ho (3.3.)

- Düzeltilmiş Alan değeri, $A_f$:

  $A_f$= Ao / (1- Ɛ) (3.4.)

- Serbest basınç gerilmesi değeri, $\sigma_1$:

$$\sigma_1 = P / A_f \quad (3.5.)$$

- Örneğin serbest basınç direnci, $q_u$:

$$q_u = \sigma_1 \quad (3.6.)$$



**Şekil 3.19.** Laboratuar Serbest basınç deney aleti

### 3.5.2. Üç eksenli basınç deney aletinde permeabilite deneyi

Karot numunelerinin geçirimlilik katsayısının belirlenmesinde konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi prosedürüne benzer bir yol izlenmiştir. Yaklaşık 3 cm yüksekliğinde ve 4.7 cm çapındaki karot numuneleri üç eksenli deney düzeneğine yerleştirilmiş (Şekil 3.20.) ve numunenin stabilitesini sağlamak amacıyla 30 N 'luk sabit bir yük uygulanmıştır. Numuneye 500 kPa 'lık bir hücre basıncı ve 400 kPa 'lık bir geri basınç uygulanmıştır. ASTM D5084-16a standardı uyarınca hücre basıncı geri basınçtan büyük tutulmuş ve böylece geri basınçla verilen suyun numunenin dış yüzeyinden sızmaksızın numuneden geçmesi sağlanmıştır. Numuneler deneye başlanmadan önce 5 gün suda bekletilmiştir. Deneye başlandığı andan itibaren numuneden su çıkışına izin verilerek belirli zaman dilimlerinde numuneden çıkan su miktarı kaydedilmiştir. Belirli zaman aralıklarında çıkan su miktarı ölçümleri çok yakın değerlerde olup en az 3 ölçüm

alınarak, bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Geçirimsizlik katsayısı "k" aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

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

Q = Numuneden çıkan su ($m^3$)

A = Numune kesit alanı ($cm^2$)

t = Numuneden su çıkışına izin verilen süre (s)

L = Numune boyu (cm)

Δh = Basınç yüksekliği (cm)

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



**Şekil 3.20.** Üç eksenli deney düzeneğinde permeabilite deneyi

# 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

## 4.1. Reolojik Özellik Deneyleri

### 4.1.1. Marsh hunisi deneyleri

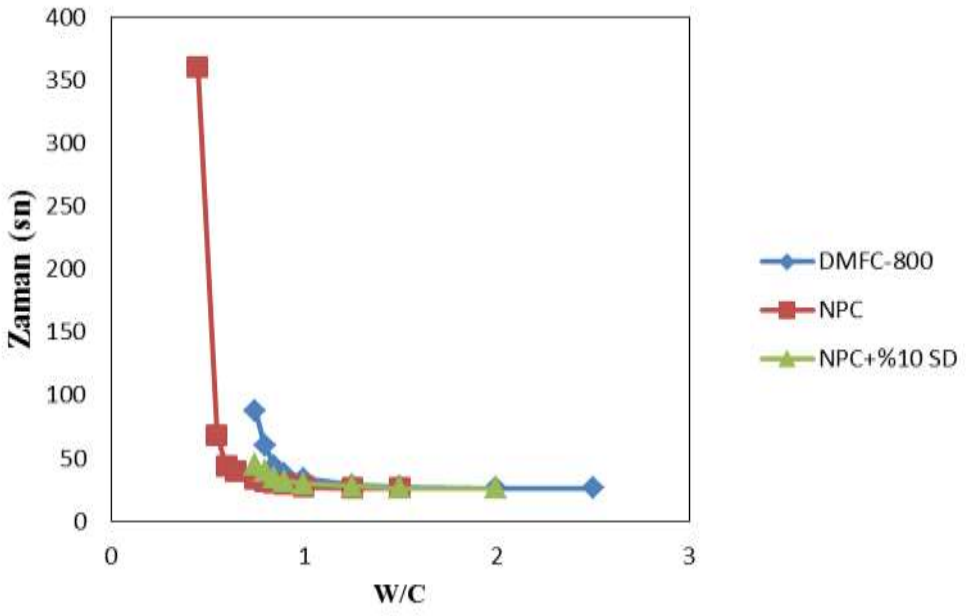
Bu tez çalışmasında farklı çimento tipi ve karışımlarına göre 26 adet Mars hunisi deneyi yapılmış ve süspansiyonların huniden akması için geçen zaman, kronometre ile belirlenmiştir (Çizelge 4.1.).

Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1.'de kıyaslamalı olarak verilmiştir. Sonuçlar birlikte değerlendirilirse;

- Normal portland çimentonun maksimun akışkanlığı (minimum viskozite) W/C oranı 1.25 olduğunda 26 saniye olarak elde edilmiştir. 26 sn değeri suyun akışkanlığına yakın bir değer olarak değerlendirilmektedir.
- Normal portland çimentosuna %10 silis dumanının eklenmesi çimentonun akışkanlığını azaltmaktadır. W/C oranı 0.75 olduğunda akışkanlık azalmakta, bu değerden daha küçük oranlarda enjeksiyonun akışkanlığı azalarak viskozite değeri artmaktadır. Bu durumda maxsimun akışkanlığı elde edebilmek için W/C oranının 1.5 olması gerekmektedir (26 saniye sınır değeri için).
- Aynı W/C oranlarında DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyonunun akışkanlığı en düşük değeri almıştır. Maxsimun akışkanlığı elde edebilmek için W/C oranının 2.0 olması gerekmektedir (26 saniye sınır değeri için).
- Bu veriler göstermektedir ki jet grout kolonların oluşturulabilmesi, kullanılan enjeksiyon süspansiyonlarının enjekte edilebilirliğinin sağlanması çimento tipiyle ilişkilidir. Normal portland çimentosu içerisine ilave edilen bir pozzolan (silis dumanı) veya da ince taneli çimento kullanımı (DMFC-800) durumunda aynı enjekte edilebilirliğin ve akışkanlığın sağlanması için enjeksiyon içerisine daha yüksek oranda su ilavesi gerekmektedir.
- Herhangi bir enjeksiyon işlemi uygulanması yapılmadan kullanılan çimentonun reolojik özelliklerin belirlenmesi, uygulamanın başarısı ve uygulanabilirliği açısından son derece önemli olmaktadır.

**Çizelge 4.1.** Marsh hunisi deney sonuçları

| | DMFC-800 | NPC | NPC + %10 Silis dumanı |
|---|---|---|---|
| **W/C oranı** | | Geçen zaman (saniye) | |
| 0.45 | | 360 | |
| 0.55 | | 68 | |
| 0.6 | | 44 | |
| 0.65 | | 40 | |
| 0.75 | 88 | 34 | 45 |
| 0.8 | 60 | 32 | 40 |
| 0.85 | 44 | 31 | 35 |
| 0.9 | 38 | 30 | 32 |
| 1 | 34 | 27 | 30 |
| 1.25 | 29 | 26 | 28 |
| 1.5 | 27 | 26 | 26 |
| 2 | 26 | | 26 |
| 2.5 | 26 | | |




**Şekil 4.1.** Marsh hunisi deney sonuçlarının değerlendirilmesi

### 4.1.2. Sedimantasyon deneyleri

Tez çalışmasında farklı çimento çeşitleri ve karışımları için toplam 26 adet sedimantasyon deneyi yapılmıştır (Çizelge 4.2. – 4.4.). Farklı çimento karışımlar için deneylerden elde edilen sedimantasyon yüzdeleri Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Sedimantasyon yüzdelerine göre enjeksiyon şerbetlerinin stabiliteleri hakkında şu yorumlar yapılabilir;

- Normal portland çimento şerbeti, W/C oranı 0.45 olduğu zaman stabil haldedir. Daha yüksek W/C oranlarında 2 saat süre zarfındaki sedimantasyon yüzdesi > %5 olmakta ve karışımların stabilitesi kaybolmaktadır.
- Çok ince taneli çimento (DMFC-800), W/C oranı 1.25 için stabil halde iken, daha yüksek W/C oranlarında karışımın stabilliği kaybolmaktadır.
- Silis dumanı NPC stabilitesini arttırmaktadır. NPC + %10 silis dumanı karışımında W/C oranı 0.9 için karışım stabil iken, W/C oranı 1.0 olduğu zaman enjeksiyon şerbetinin stabilitesi kaybolmaktadır.

**Çizelge 4.2.** Normal portland çimentosu (NPC) için sedimantasyon deney sonuçları (%)

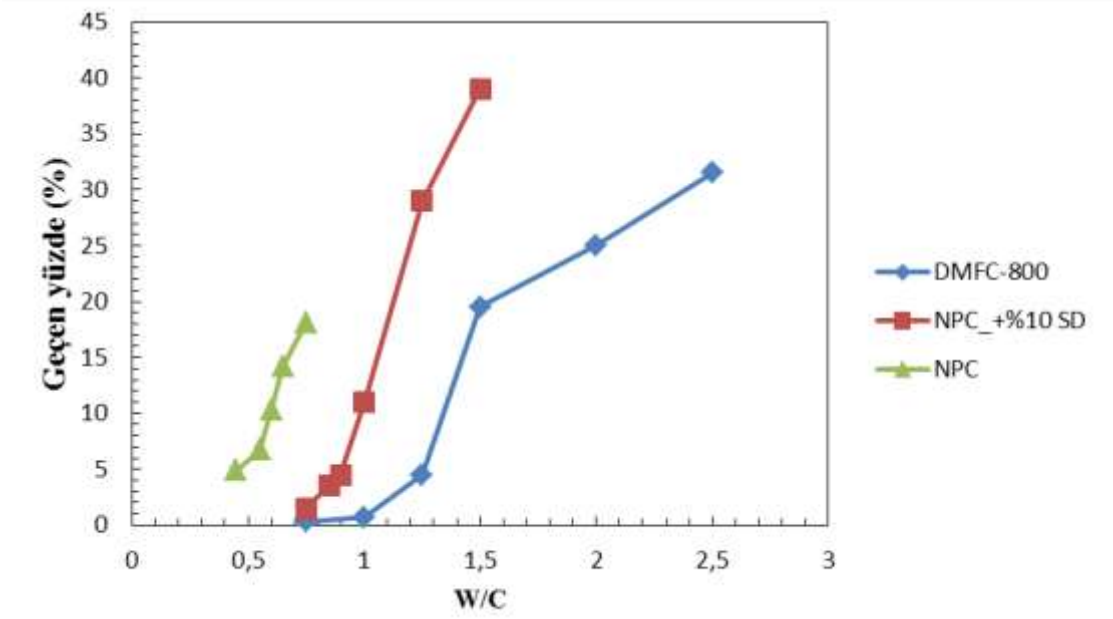
| **NPC (42.5R)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **W/C oranı** | **0.45** | **0.55** | **0.6** | **0.65** | **0.75** |
| **Zaman (dk)** | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **15** | 0 | 0.4 | 1 | 1 | 1.8 |
| **30** | 0.5 | 1.1 | 2 | 2.2 | 3.1 |
| **45** | 1 | 1.8 | 3.1 | 3.5 | 5.1 |
| **60** | 1.25 | 2.2 | 5 | 5 | 7 |
| **70** | 2 | 2.8 | 6 | 6.2 | 9 |
| **80** | 2.15 | 3 | 7.8 | 9 | 10.8 |
| **90** | 2.9 | 4 | 9.7 | 11.8 | 12 |
| **100** | 3.9 | 4.9 | 10 | 14 | 14 |
| **110** | 4.5 | 5.8 | 10.1 | 14.1 | 17.1 |
| **120** | 4.9 | 6.75 | 10.3 | 14.2 | 18.1 |

**Çizelge 4.3.** İnce taneli çimento (DMFC-800) için sedimantasyon deney sonuçları (%)

| **İnce taneli çimento (DMFC-800)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **W/C oranı** | **0.75** | **1** | **1.25** | **1.5** | **2** | **2.5** |
| **Zaman (dk)** | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **15** | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 4 | 4 |
| **30** | 0 | 0 | 2 | 3 | 6.3 | 8 |
| **45** | 0 | 0.3 | 2.5 | 5 | 8 | 11.5 |
| **60** | 0 | 0.3 | 3 | 8.5 | 10.3 | 15 |
| **70** | 0.1 | 0.3 | 3.3 | 11 | 13 | 17.5 |
| **80** | 0.2 | 0.4 | 3.7 | 13 | 16 | 20 |
| **90** | 0.2 | 0.5 | 4 | 15 | 17.5 | 21.5 |
| **100** | 0.2 | 0.6 | 4.2 | 17 | 20 | 24 |
| **110** | 0.2 | 0.6 | 4.3 | 18.5 | 22.5 | 27 |
| **120** | 0.3 | 0.7 | 4.5 | 19.5 | 25 | 31.5 |

**Çizelge 4.4.** NPC + %10 silis dumanı karışımı için sedimantasyon deney sonuçları (%)

| **NPC (42.5R) + %10 Silis dumanı** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **W/C oranı** | **0.75** | **0.85** | **0.9** | **1** | **1.25** | **1.5** |
| **Zaman (dk)** | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % | Çökelme, % |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **15** | 0 | 0.8 | 1.6 | 2.5 | 4 | 4.2 |
| **30** | 0.2 | 1.1 | 1.8 | 4 | 9 | 10 |
| **45** | 0.55 | 1.65 | 2.2 | 5.5 | 15 | 14 |
| **60** | 0.7 | 2 | 2.8 | 7 | 19.5 | 19 |
| **70** | 0.75 | 2.2 | 3 | 7.5 | 24 | 22 |
| **80** | 1.05 | 2.6 | 3.2 | 8.5 | 16 | 26 |
| **90** | 1 | 2.9 | 3.7 | 9.2 | 27.6 | 29.5 |
| **100** | 1.1 | 3 | 3.9 | 9.8 | 27.5 | 32 |
| **110** | 1.3 | 3.2 | 4.2 | 10.5 | 28.6 | 36 |
| **120** | 1.5 | 3.5 | 4.5 | 11 | 29 | 39 |




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

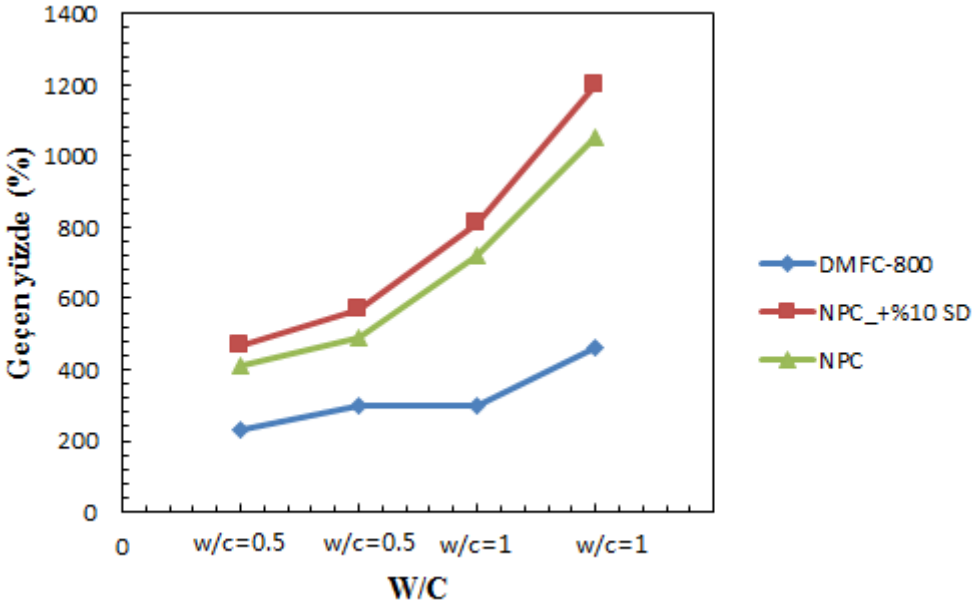
### 4.1.3. Vicat iğnesi deneyleri

Tez çalışması kapsamında farklı çimento tipleri ve karışımları için W /C oranının 0.5 ve 1.0 değerleri için vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır (Çizelge 4.5.). Sonuçların kıyaslaması Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Vicat iğnesi deney sonuçlarına göre;

- NPC enjeksiyonunun sertleşme süresi aynı W/C oranları için diğer iki enjeksiyon şerbeti için elde edilen değerlerin arasında değerler almaktadır.
- NPC'na silis dumanı ilavesi enjeksiyonun priz alma süresini artırmaktadır.
- İnce taneli çimento (DMFC-800) ile hazırlanan enjeksiyon şerbetinin priz başlangıç ve bitiş süreleri diğer iki enjeksiyon şerbetine göre daha hızlı olmaktadır.

**Çizelge 4.5.** Vicat iğnesi deney sonuçları

| W/C | DMFC-800 | | NPC | | NPC+%10 Silis dumanı | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Başlangıç (dk) | Bitiş (dk) | Başlangıç (dk) | Bitiş (dk) | Başlangıç (dk) | Bitiş (dk) |
| **0.5** | 230 | 300 | 410 | 490 | 470 | 570 |
| **1.0** | 300 | 460 | 720 | 1050 | 810 | 1200 |




**Şekil 4.3.** Vicat iğnesi deneyinde farklı karışımlar için priz başlama ve bitiş süreleri (dk)

## 4.2. Jet Grout Kolonları Üzerinde Yürütülen Çalışmalar

Tez çalışmasının bu bölümünde laboratuvarda oluşturulan JG kolonların çap ve yüksekliklerinin ölçülmesi, kendi aralarında karşılaştırılması, oluşan kazıklardan karot numunelerinin alınması, alınan karot numunelere serbest basınç deneyi ve geçirimlilik deneylerinin yapılması ve buluan sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Farklı çimento enjeksiyon tiplerinde ve aynı enjeksiyon için farıklı W/C oranlarında oluşan kolonların özelliklerinin araştırılması yapılmıştır. Bu araştırmaların amacı ise farklı W/C oranı ve diğer parametrelerin JG kolonların oluşumu ve performans özellikleri üzerindeki etkisini irdelemektir.

### 4.2.1. Jet grout kolonların boy ve çaplarının ölçülmesi

Plastik variller içerisinde üretilen JG kolonları 28 gün bekledikten sonra kalıplardan çıkarılarak kazıkların boy ve çapları ölçülmüştür. Farklı W/C oranlarında üretilen kolonların ölçüleri Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Üretilen kolonların resimleri ise orijinal boyutlarda olup, boy çap değişiminin anlaşılması için aynı mesafelerden çekilmiştir. Kolon resimleri herhangi bir büyütme veya küçültme uygulanmadan, farklı çimento şerbetleri için kendi grubunda Şekil 4.4., Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. ve Şekil 4.4. – Şekil 4.6.'daki bilgilerin birlikte değerlendirilmesiyle şu sonuçlar çıkarılmıştır;

- Aynı enjeksiyon basıncı, tij çekme hızı ve tij dönme hızlarında W/C oranı azaldıkça jet grout kolonların boyu artıyor, ancak oluşan kazıkların çapları da azalmaktadır.

**Çizelge 4.6.** Laboratuarda üretilen jet grout kolonların boy ve çap ölçüleri

| Kazık No | Enjeksiyon Tipi | W/C | Boy (cm) | Çap (cm) |
|---|---|---|---|---|
| **1** | DMFC-800 | 4 | **31** | **32** |
| **2** | DMFC-800 | 3 | **56** | **26** |
| **3** | DMFC-800 | 2.5 | **58** | **24** |
| **4** | DMFC-800 | 2 | **60** | **22** |
| **5** | DMFC-800 | 1.5 | **61** | **21** |
| **6** | DMFC-800 | 1.25 | **62** | **19** |
| **7** | DMFC-800 | 1(25 bar) | **63** | **18** |
| **8** | DMFC-800 | 1(40 bar) | **51** | **25** |
| **9** | NPC | 1.5 | **37** | **25** |
| **10** | NPC | 1.25 | **34** | **25** |
| 11 | NPC | 1.0 | **39** | **21** |
| 12 | DMFC-800 | 0.85 | **49** | **22** |
| 13 | NPC+%10 SD | 1.5 | **37** | **24** |
| 14 | NPC+%10 SD | 1.0 | **39** | **22.5** |
| 15 | NPC+%10 SD | 1.25 | **40** | **19** |
| 16 | NPC+%10 SD | 1.0 | **30** | **25.5** |
| 17 | NPC+%10 SD | 0.85 | **30** | **23** |
| 18 | NPC | 1.0 | **32** | **23** |
| 19 | NPC | 0.85 | **25** | **23** |

- Aynı enjeksiyon basıncı, tij çekme hızı, tij dönme hızı ve W/C oranlarında ince taneli çimento enjeksiyonu (DMFC-800) ile oluşturulan kazığın yüksekliğinin daha fazla olduğu ve çapının daha düşük olduğu görülmüştür.

- Aynı enjeksiyon basıncı, tij çekme hızı, tij dönme hızı ve W/C oranlarında NPC+%10 SD enjeksiyonu ile oluşturulan kazığın boyu NPC enjeksiyonu ile oluşturulan kazıktan daha fazla olmuştur. Ancak kazık çapı daha düşük elde edilmiştir.
- Aynı enjeksiyon basıncı, tij çekme hızı, tij dönme hızı ve W/C oranlarında farklı çimento karışım enjeksiyonları için oluşan kazıklarda enjeksiyon basıncı artıkça oluşan kazıkların boyu da artmaktadır.




**Şekil 4.4.** DMFC-800 enjeksiyon şerbeti kullanılarak oluşturulan jet grout kolonları




**Şekil 4.5.** NPC enjeksiyon şerbeti kullanılarak oluşturulan jet grout kolonlar



**Şekil 4.6.** NPC + %10 SD enjeksiyon şerbeti kullanılarak oluşturulan jet grout kolonlar

### 4.2.2. Jet grout kolonlarından karot numunelerinin alınması

Üretilen jet grout kolonlarda çap ve boy özellikleri üzerinde araştırmalar yapıldıktan sonra karot makinesi kullanılarak (Şekil 4.7.) her kazıktan serbest basınç deneyi için ortalama 8.8 cm boyunda, 4.4cm çapında ve su geçirimlik deneyi için ortalama 3 cm yüksekliğinde, 4.4cm çapında örnek numuneler alınmıştır. W/C oranları az olan kazıklardan karot alınması işlemi, W/C oranı fazla olan kolonlarınkinden daha başarılı olmuştur. Yani daha düzgün ve pürüzsüz karotlar alınabilmiştir. İnce taneli çimento enjeksiyonu ile oluşturulan kazıklarda W/C oranı 2.0’ den fazla olanlardan karot alınırken numunelerin ezilmesinden dolayı 8.8 cm boyunda, 4.4cm çapında

karotları almak mümkün olmamıştır. Bu sebeple çapı daha büyük olan karot ucu (D=9.2cm) kullanılarak numuneler alınmıştır.

Laboratuarımızda kendi imkanlarımızla alınan karot numunelerin alt ve üst yüzeylerinin düzgün bir şekilde kesilerek uygun boyuta getirilmesi işlemi özel bir firmadan destek alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8.). Kesilme sonucu elde edilen numunelerde mümkün olduğunca Boy/Çap (H/D=2) oranının 2 olmasına özen gösterilmiştir. Serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyleri için elde edilen numune örnekleri Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.7.** Oluşan jet grout kazıklarından karot numunelerinin alınması



**Şekil 4.8.** Alınan karot numunelerinin uygun boy ve çaplarda kesilmesi ve düzeltilmesi işlemi




**Şekil 4.9.** 1-6 numaralı kazıklardan alınan karot numuneler




**Şekil 4.10.** 7-19 numaralı kazıklardan alınan karot numuneler

## 4.3. Karot Numuneler Üzerinde Serbest Basınç Deneyleri

Jet grout kazıklardan alınan karot numuneler üzerinde Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında mevcut bulunan Tek eksenli basınç deney aletinde numuneler kırılmıştır. Alet yukarı yönlü 0.5mm/dk'lık bir hızda hareket ederek çalışmakta olup, veriler bilgisayar ortamına aktarılabilmektedir (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12.).




**Şekil 4.11.** Laboratuarda Serbest basınç deneyinin yapılması




**Şekil 4.12.** Serbest basınç deneyinin yapılması esnasında numunelerin kırılmasına ait fotoğraflar

19 adet jet grout kolonu üzerinden alınan karot numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyleri esnasında elde edilen veriler Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Çizelge üzerinde numuneye ait boy ve çap değerleri, numunenin kırılmadan önceki darası ve numunenin tam kırılma esnasında ulaşmış olduğu maksimum yük kapasitesi ($P_{max}$) verilmiştir. Her bir deney için iki numune alınmasına özen gösterilmiştir. Eğer iki numune alınabilmişse bunlardan karotu en iyi temsil edebilecek olan numune seçilerek deneysel kıyaslamalar bu numuneler üzerinde devam ettirilmiştir ($P_{max1}$).

**Çizelge 4.7.** Tek eksenli basınç deneyi esnasında alınan karotların özellikleri, gerilme değeri ve kırılma yükleri

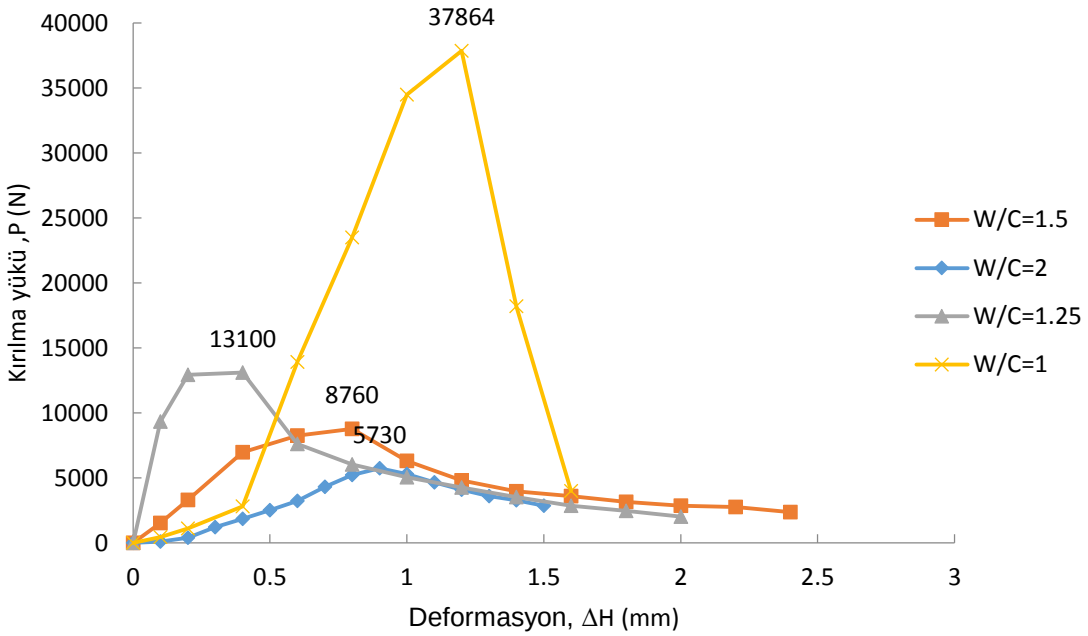
| Kazık No | $H_1$ (mm) | $D_1$ (mm) | $M_1$ (g) | $P_{max1}$ (N) | $\sigma_1$ (MPa) | $H_2$ (mm) | $D_2$ (mm) | $M_2$ (g) | $P_{max2}$ (N) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 117 | 92 | - | **700** | **-** | - | - | - | - |
| **2** | 85 | 92 | - | **1300** | **-** | - | - | - | |
| **3** | 140 | 92 | - | **2300** | **-** | - | - | - | - |
| **4** | 88 | 44 | 241.5 | **5730** | **3.7** | - | - | - | - |
| **5** | 88 | 44 | 249.5 | **8760** | **5.7** | 82 | 44 | 240.5 | 8648 |
| **6** | 92 | 44 | 295 | **13100** | **8.6** | 92 | 44 | 292 | 8450 |
| **7** | 92 | 44 | 292 | **37864** | **24.6** | 93 | 44 | 294 | 25850 |
| **8** | 92 | 44 | 296.5 | **26500** | **17.2** | 86 | 44 | 268 | 18450 |
| **9** | 86 | 44 | 221 | **8500** | **5.5** | 56 | 44 | 167 | 18212 |
| **10** | 86 | 44 | 250 | **6520** | **4.2** | 97 | 44 | 300 | 5257 |
| **11** | 90 | 44 | 239.5 | **19108** | **12.5** | 82 | 44 | 266.5 | 23200 |
| **12** | 86 | 4.4 | 240 | **25950** | **16.7** | 68 | 4.4 | 200 | 20800 |
| **13** | 86 | 44 | 252 | **22300** | **14.5** | - | - | - | - |
| **14** | 88 | 44 | 300 | **22690** | **14.7** | 94 | 44 | 310 | 14550 |
| **15** | 87 | 44 | 268 | **31800** | **20.7** | 86 | 44 | 264 | 35900 |
| **16** | 92 | 44 | 268.5 | **34200** | **22.4** | 90 | 44 | 268.5 | 30200 |
| **17** | 92 | 44 | 278 | **34910** | **22.6** | 94 | 44 | 290 | 30000 |
| **18** | 86 | 44 | 243 | **10096** | **6.8** | - | - | - | |
| **19** | 86 | 44 | 250 | **12492** | **8.2** | 87 | 44 | 260 | 11500 |

Deneysel çalışmada elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi için farklı çimento enjeksiyonlarının aynı W/C oranları ve aynı çimento enjeksiyonunun farklı W/C oranları olacak şekilde ayrı grafikler oluşturularak serbest basınç deneyleri değerlendirilmiştir. Ayrıca numunelerin toplamda ne kadar deformasyon yaptığının görülebilmesi amacı ile Kırılma yükü (P) – deformasyon (ΔH) ve Gerilme ($\sigma_1$) – birim deformasyon ($\varepsilon$) grafikleri ayrı ayrı verilmiştir. Kazık numaralarının ifade edilmesi durumunda anlam kargaşası olacağından, kıyaslamalar esnasında şekiller üzerinde çimento tipi veya W/C oranının gösterilmesinin daha doğru olacağı düşünülmüştür.

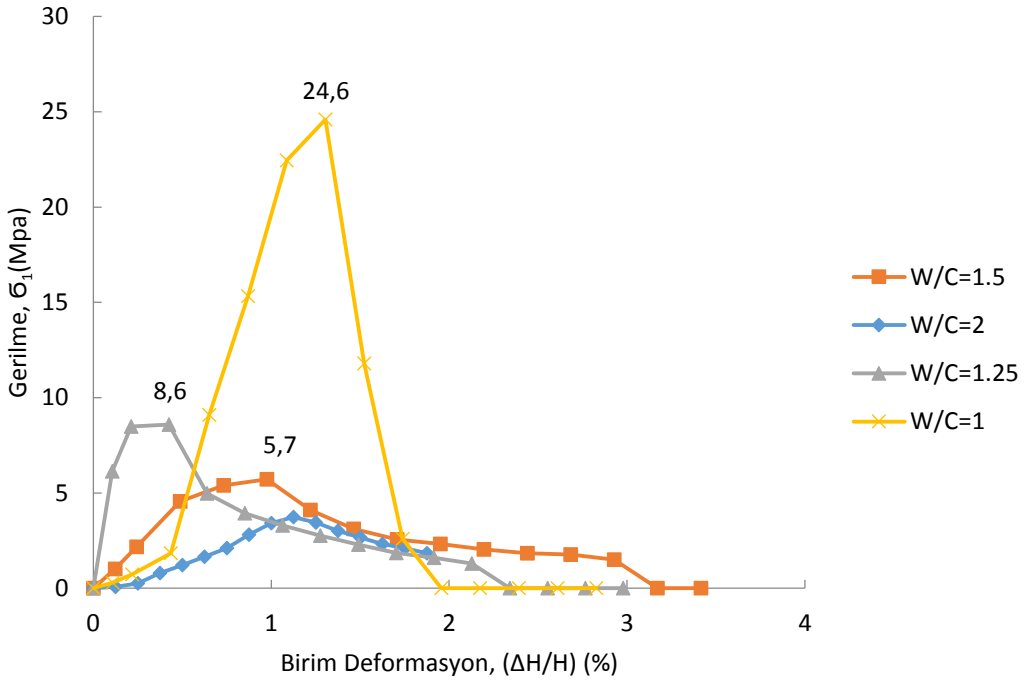
Şekil 4.13.' te ince taneli (DMFC-800) enjeksiyonu ile farklı W/C oranlarında hazırlanan kolonlardan alınan karotlar üzerinde yapılan deney sonuçları gösterilmektedir. W/C oranları arttıkça dayanım azalmıştır. Aynı deformasyon değerinde (ΔH=1.3mm) W/C oranı 1 olan enjeksiyondan oluşan kazığın kırılma yükü ve maksimum gerilme değerinin diğer kazıklardan alınan karotların dayanımının çok üzerinde olduğu gözlenmiştir. Bu sonucun aslında beklenen bir durum olduğu, ince taneli çimento kullanılması durumunda W/C oranı artışının dayanımı azalttığı gözlenmiştir.

Şekil 4.14.'te Normal portland çimentosu için verilen değerler incelenmiştir. NPC enjeksiyonundan oluşan jet grout kazıklarından alınan karot numunelerinde, W/C oranı 1.0 olan kolonların kırılma yükü ve ulaşılabilen maksimum gerilme değerinin en büyük olduğu belirlenmiştir. NPC enjeksiyonu ile oluşturulan kazıklarda en küçük dayanım W/C oranı 1.25 olan durumda oluşmuştur. W/C oranı 1.5 olan kolon için alınan karotun daha keskin bir şekilde kırıldığı ve deformasyon yapabilme özelliğinin daha az olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.15.'te Normal portland çimentosuna %10 silis dumanı ilavesi ile oluşturulan enjeksiyon karışımları kullanılarak olşturulan kolonlar için elde edilen kırılma yükü ve serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Şekilden W/C oranı 1.25 olan kolonun dayanımının en büyük olduğu görülmektedir. W/C 1.0 ve 1.5 oranları için daha düşük dayanımlar elde edilmişitir. Ancak bu oranlarda numune daha büyük deformasyon yapabilme özelliği kazanmıştır. Numuneler yaklaşık %2.5 birim deformasyon değerine kadar dayanım göstermişlerdir. Ancak W/C oranı 1.25 olan enjeksiyon şerbeti ile oluşturulan kolonlarda birim deformasyon seviyesi %1.2 seviyelerinde kalmıştır.

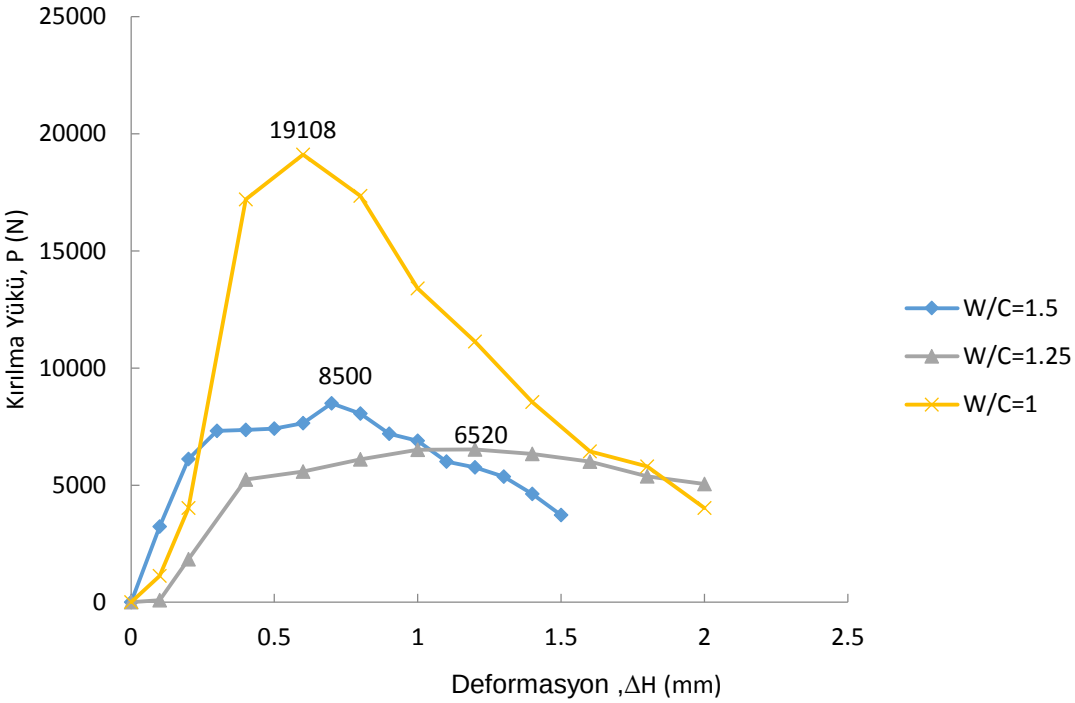



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

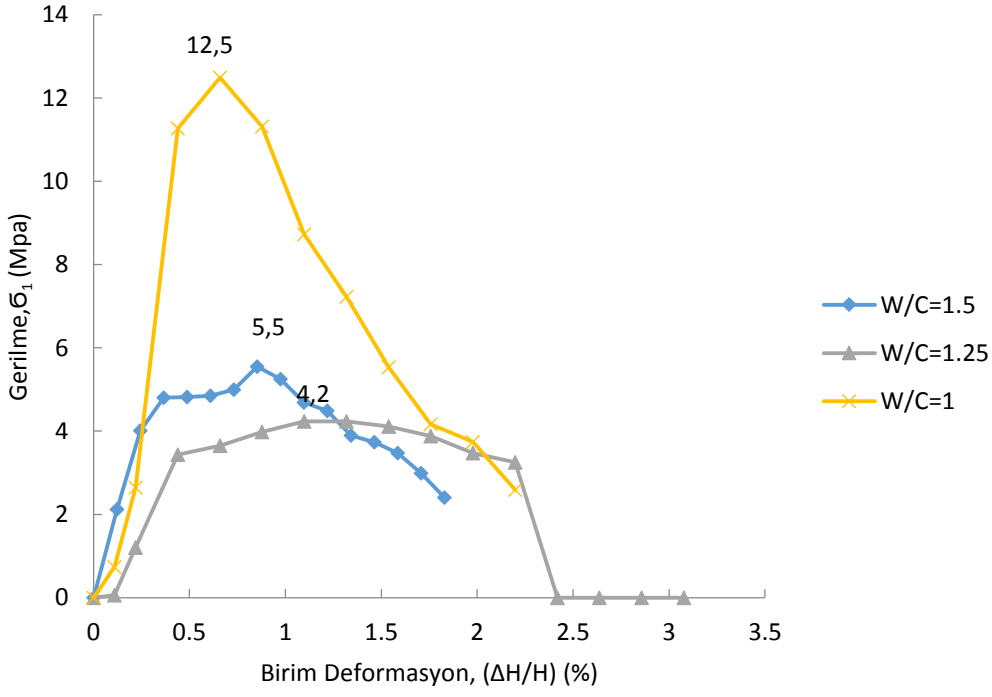



(b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.13.** İnce taneli çimento (DMFC-800) enjeksiyon şerbeti ile hazırlanan kolonların dayanımı

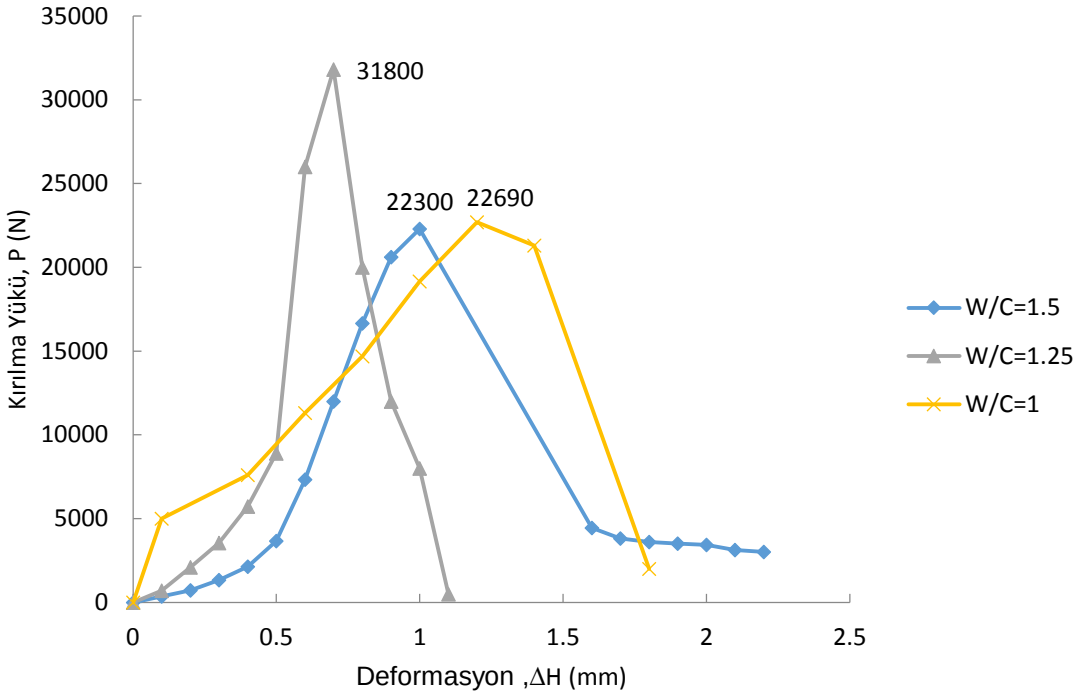



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

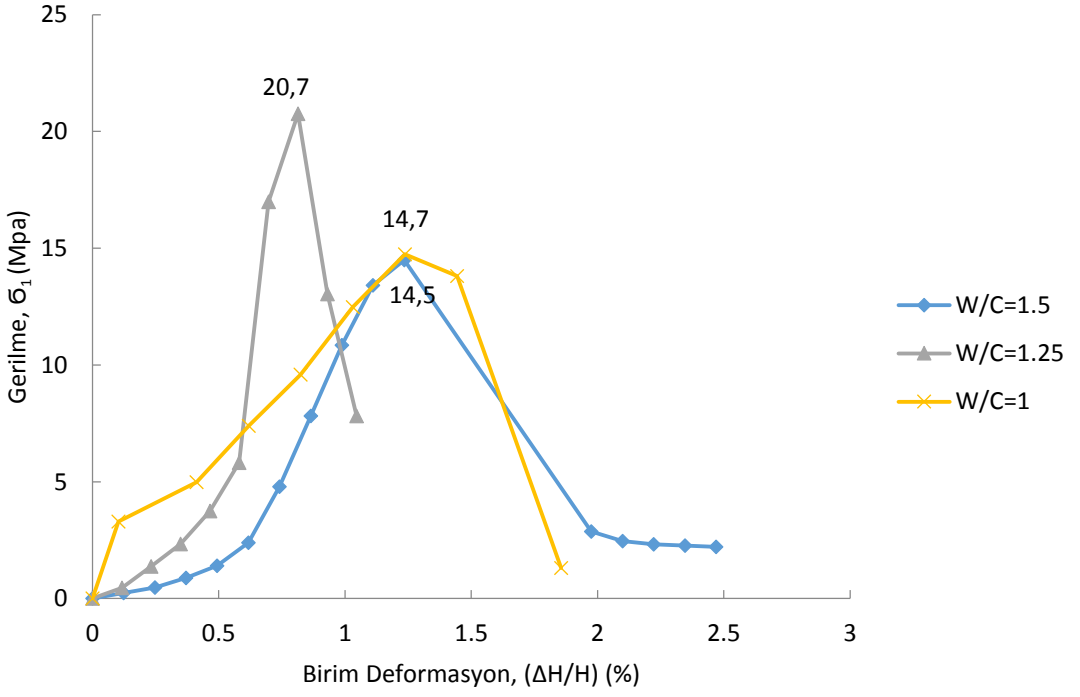



(b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.14.** NPC enjeksiyon şerbeti ile hazırlanan kolonların dayanımı




(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi




(b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

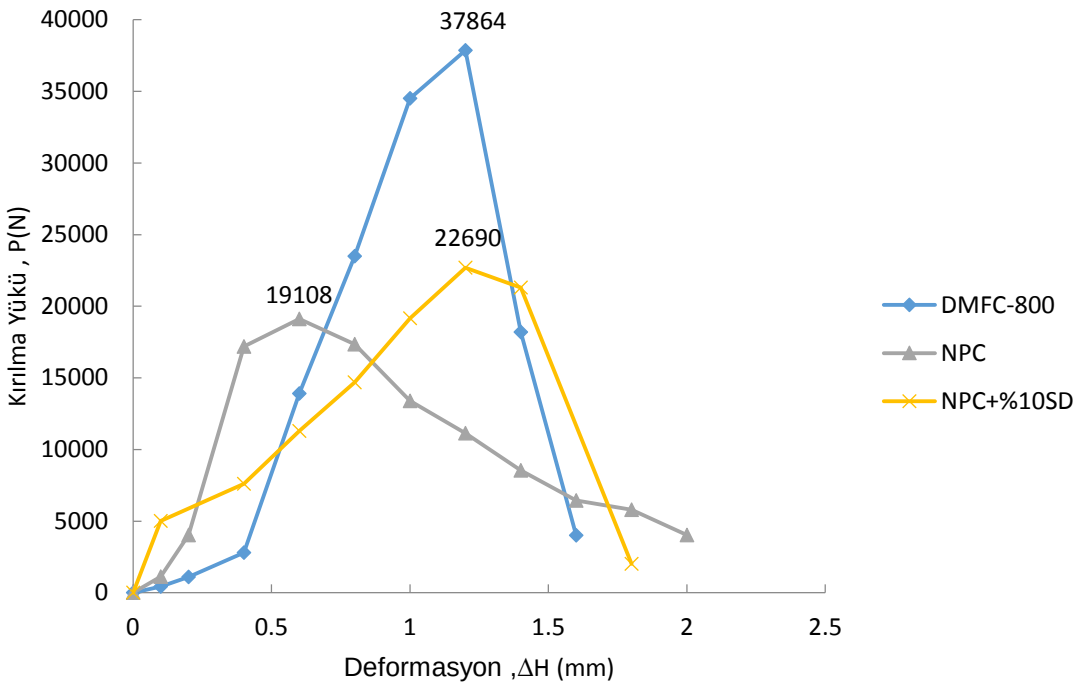
**Şekil 4.15.** NPC + %10 silis dumanı enjeksiyon şerbeti ile hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.16.'da farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların W/C oranı 1 olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. En fazla dayanım DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyonu ile hazırlanan kolonlarda elde edilmiştir. Daha sonra ise NPC + %10 silis dumanı karışımı için bir değer elde edilmiştir. Hem DMFC-800 hem de NPC+%10 silis dumanı enjeksiyon sıvısı kullanımında numuneleri daha büyük deformasyon seviyelerinde kırılma gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum ince taneli çimentonun ve NPC içerisine katılan silis dumanının küçük tanecik boyutu ile malzemelerin elastikiyet özelliğini arttırdığını göstermektedir. NPC içerikli numunelerde ise çok düşük deformasyon seviyelerinde kırılma gerçekleşmiş, yani kolonlar geverek bir davranış sergilemiştir.

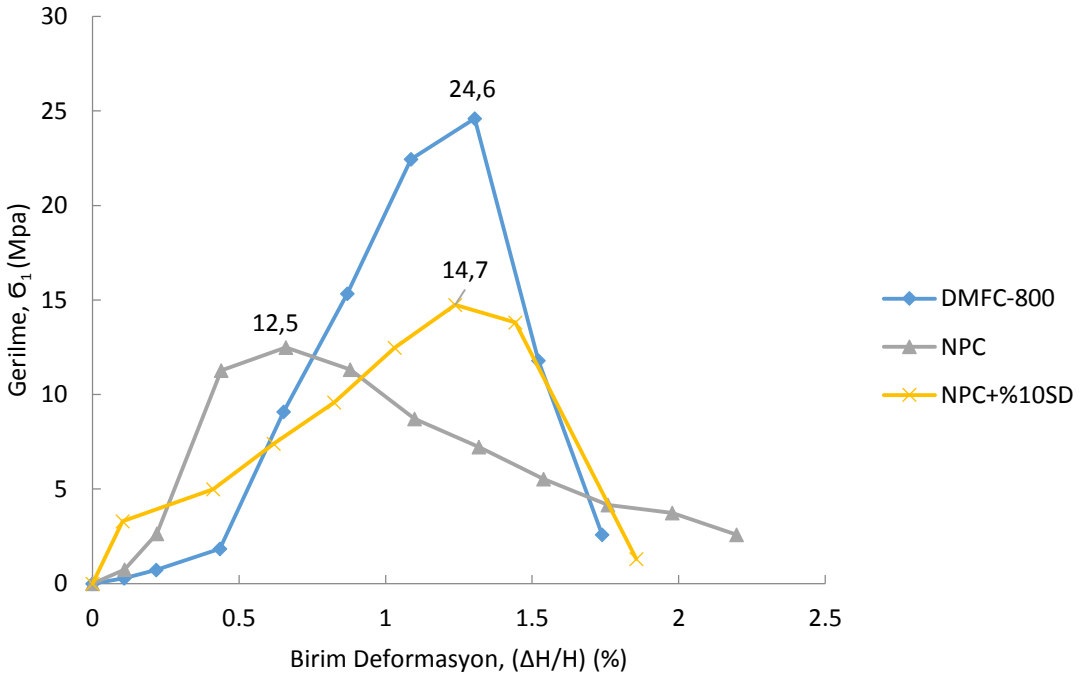
Şekil 4.17.'de farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların W/C oranı 1.25 olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. Bu durumda NPC+%10 SD katkılı enjeksiyon sıvısının ilavesi oluşturulan kolonların kırılma yükü ve ulaşılabilen maksimum gerilme değerinin diğer 2 kolon için elde edeğerlerden önemli derecede yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumda DMFC-800 içerikli kolon çok düşük deformasyon değerlerinde kırılmıştır (yaklaşık %0.3 gibi). NPC enjeksiyonu ile oluşturulan kolonda ise dayanım az olmakla birlikte malzemenin deformasyon özellliği kazandığı gözlenmiştir. Ancak özellikle silis dumanı ilavesinin oluşan kompozit elemanın hem deformasyon yapabilme kabiliyetini arttırması hem de yüksek dayanımlara ulaşmasını sağladığı net olarak görülmektedir.

Şekil 4.18.'de farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların W/C oranı 1.50 olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. NPC + %10 silis dumanı ilaveli enjeksiyon sıvıları ile hazırlanan kolonlar için elde edilen gerilme ve kırılma yükü değerlerinin diğer iki kolon için elde edilen değerlerden yine belirgin bir şekilde fazla olduğu görülmektedir. Diğer iki enjeksiyon karışımı için elde olunan kolonların dayanımı hemen hemen yakın bulunmuştur. Yani artan W/C oranlarında çimento boyutunun dayanım anlamında etkisinin azaldığı görülmüştür. Numunelerin deformasyon yapabilme kabiliyetleri birbirine yakın olup, yaklaşık %1.25 eksenel birim deformasyon seviyesinde pik mukavemet değerlerine ulaşılmıştır.

Bu üç farklı W/C oranı için elde edilen değerler silis dumanı kullanıldığı zaman karışımın başarılı olması yüksek W/C oranlarında hazırlanması gereltiğini göstermektedir. Düşük W/C oranlarında hazırlanan enjeksiyonlar kolonların dayanım performansını olması gerekenin çok altına çekebilmektedir.

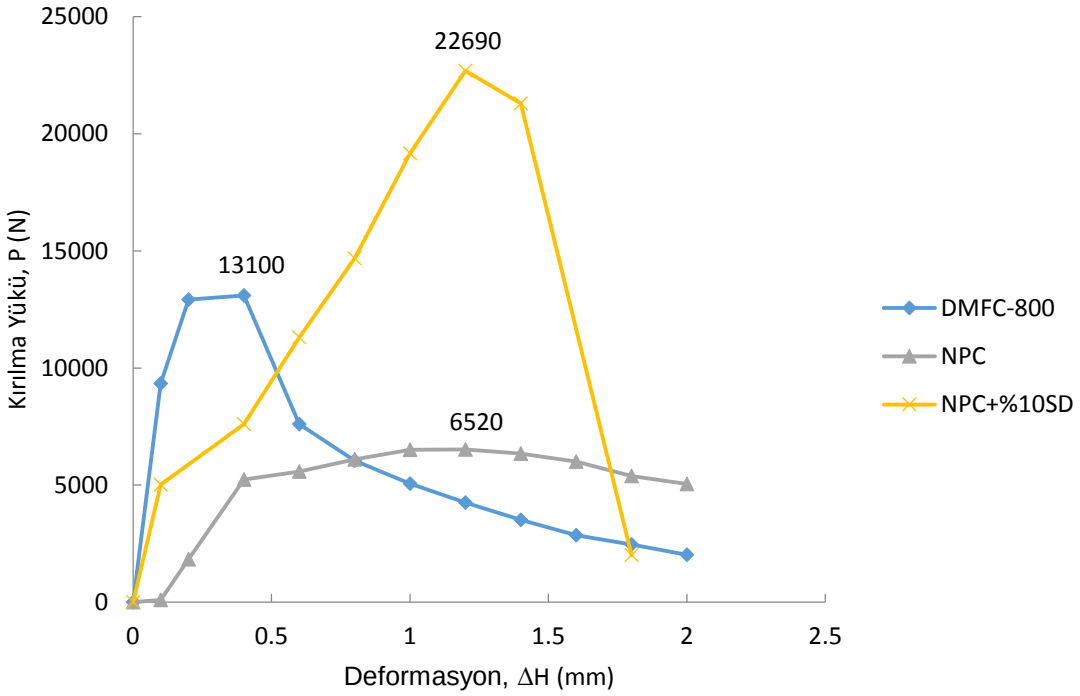



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

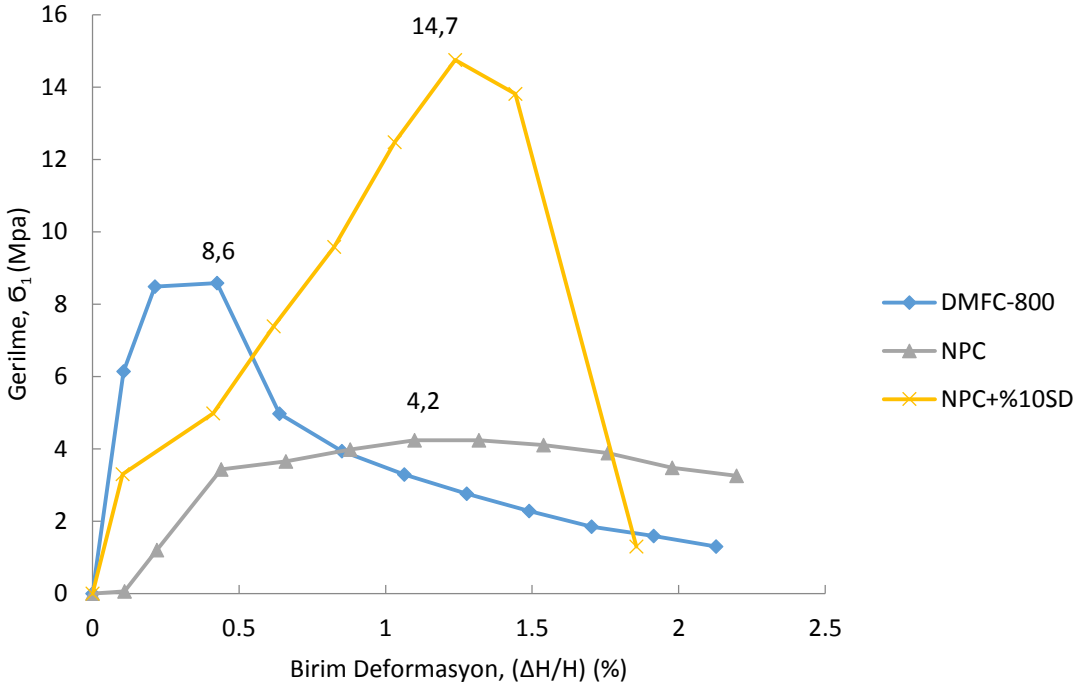



(b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.16.** W/C = 1.0 olan ve farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların dayanımı

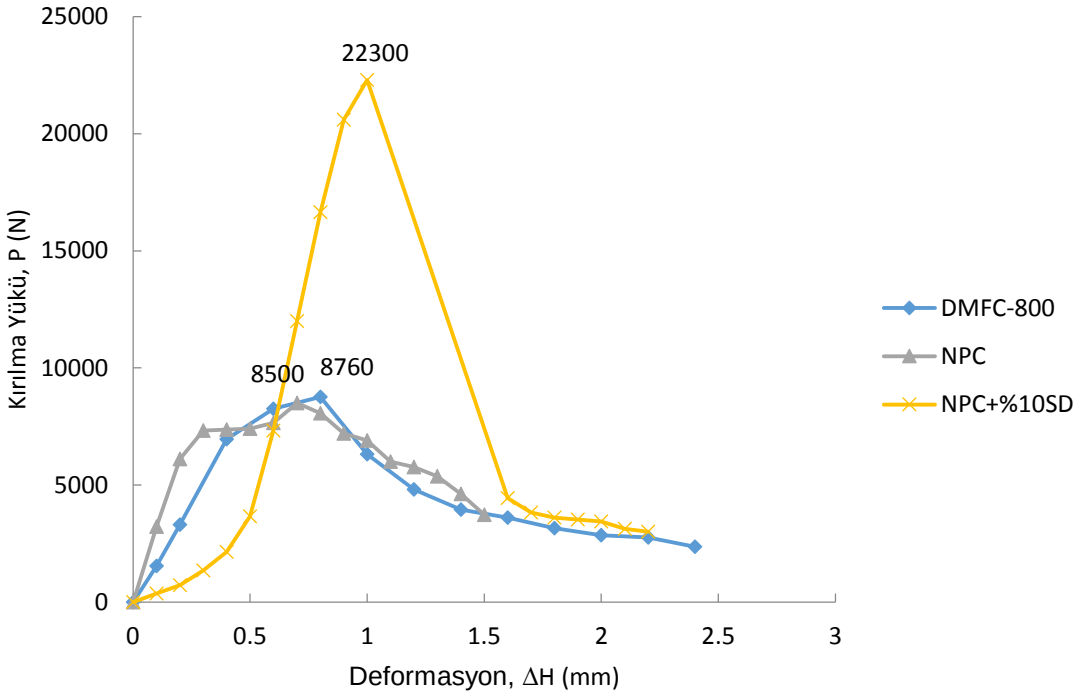



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

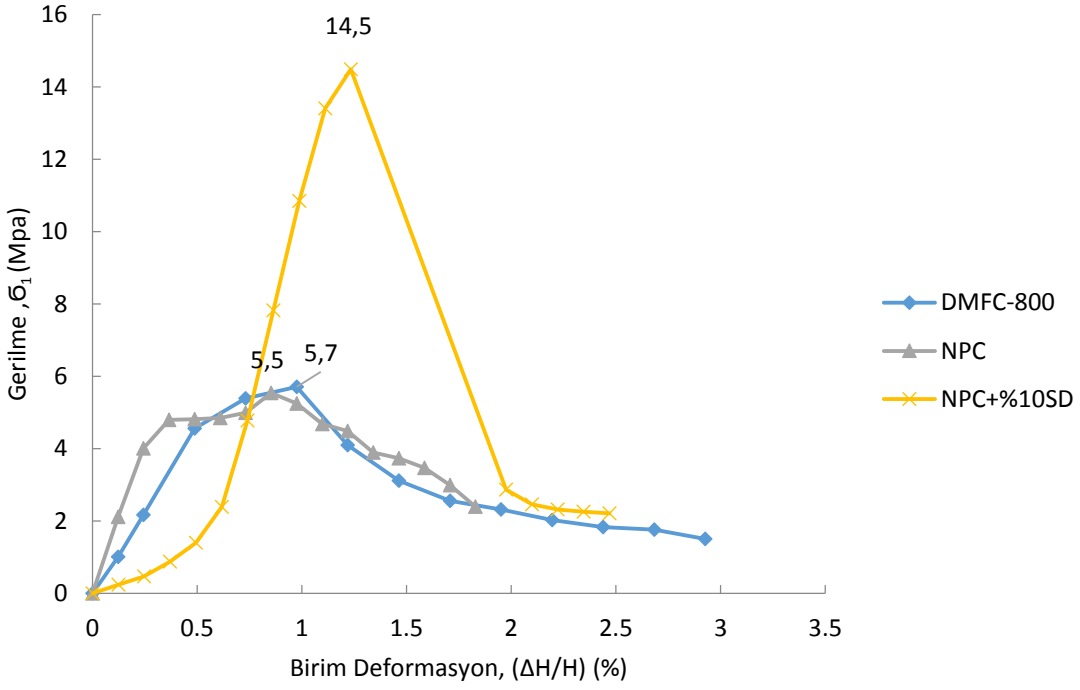



(b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.17.** W/C = 1.25 olan ve farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların dayanımı




(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi




(b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.18.** W/C = 1.5 olan ve farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların dayanımı

Şekil 4.19.'da farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların W/C oranı 1.0 ve enjeksiyon basıncı 40 bar olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. Normal portland çimentosuna %10 silis dumanı eklenen enjeksiyon karışımı ile oluşturulan jet grout kazıklarının dayanımı maksimum elde edilmiştir.

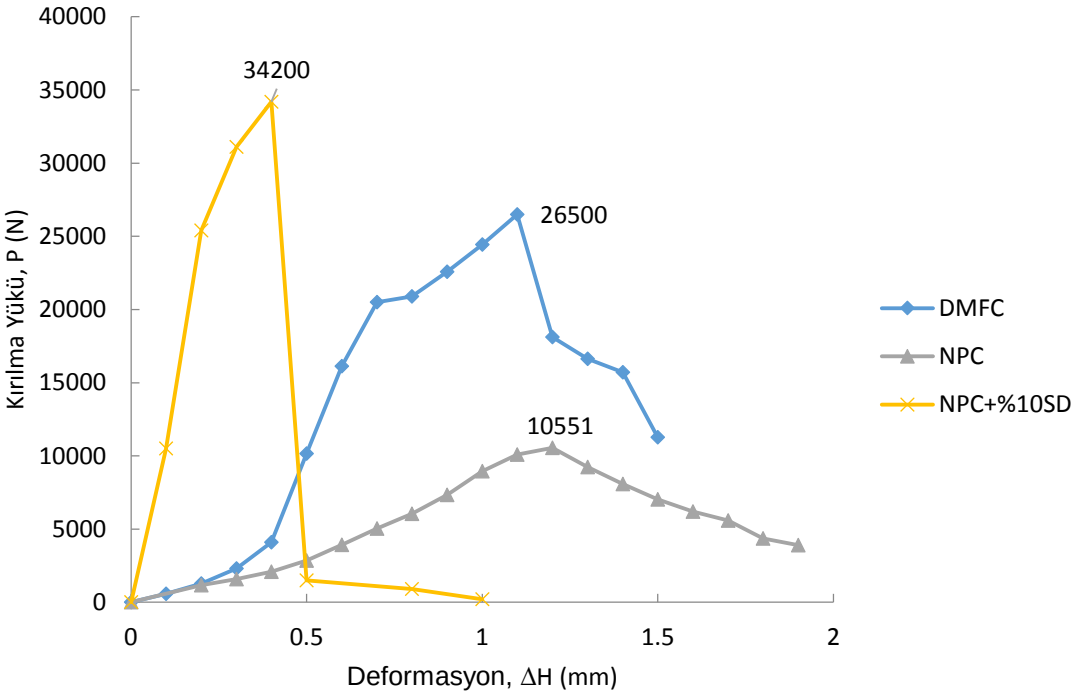
En düşük dayanım değeri NPC enjeksiyon şerbeti ile hazırlanan kolonlar için elde edilmiştir. Ancak artan dayanımla beraber kolonların elastikiyet özelliğinin azaldığı da görülmüştür. En fazla kırılgan davranış NPC+%10 Silis dumanı ile hazırlanan numuneler için elde edilmiştir.

Bu sonucu Şekil 4.19.'dan ulaşılan bir diğer sonuç ise; enjeksiyon basıcının artması NPC+ %10 silis dumanı ile hazırlanan kolonların dayanımı artarken, diğer çimento enjeksiyonlardan oluşan kolonlardan alınan numunelerde dayanımın azaldığı belirlenmiştir.

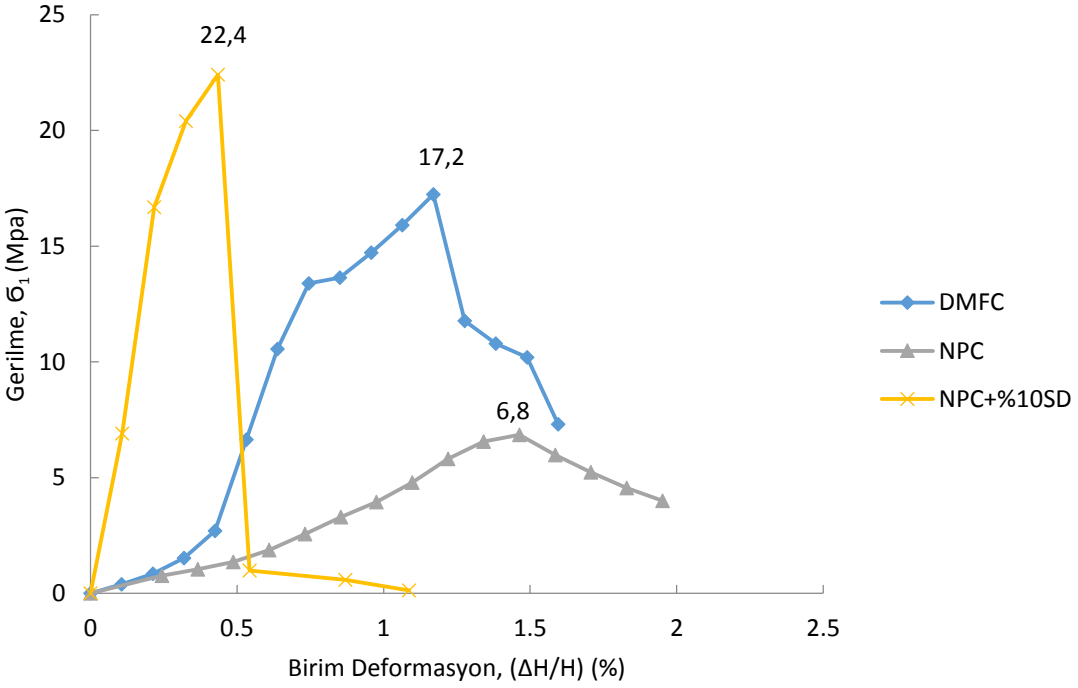
Şekil 4.20. farklı çimento enjeksiyon şerbetleri ile hazırlanan kolonların W/C oranı 0.85 ve enjeksiyon basıncı 40 bar olduğu durumdaki dayanımları karşılaştırılmıştır. W/C=1 ve 40 bar basınç için elde edilen değerlerde olduğu gibi yine maksimum dayanım NPC+%10 silis dumanı enjeksiyon karışımı için elde edilmiştir. Ancak bu defa DMFC-800 enjeksiyon şerbetli kolonların dayanımı bir miktar artış göstermiştir.

Şekil 4.19.'da ki değerlerin aksine NPC+%10 SD ve DMFC-800 enjeksiyonları ile hazırlanan kolonların deformasyon yapabilme özelliği sadece NPC ile hazırlanan kolonlarınkinden yüksek olmuştur. Birim deformasyon değerleri %1.5 – 2.0 miktarlarına ulaşmıştır.

Şekil 4.20.'de elde edilen sonuçları Şekil 4.19.'da elde edilen sonuçlarla karşılaştırısak; enjeksiyon basıcınının sabit (40 bar) tutulması halinde W/C oranının artması NPC+ %10 silis dumanı ve yalnız NPC enjeksiyonu ile hazırlanan kolonun maksimum kırılma yükü ve dayanımını azaldığını ve ince taneli çimento enjeksiyonu ile hazırlanan kolonun maksimum kırılma yükü ve dayanımını çok az da olsa arttığı görülmektedir.

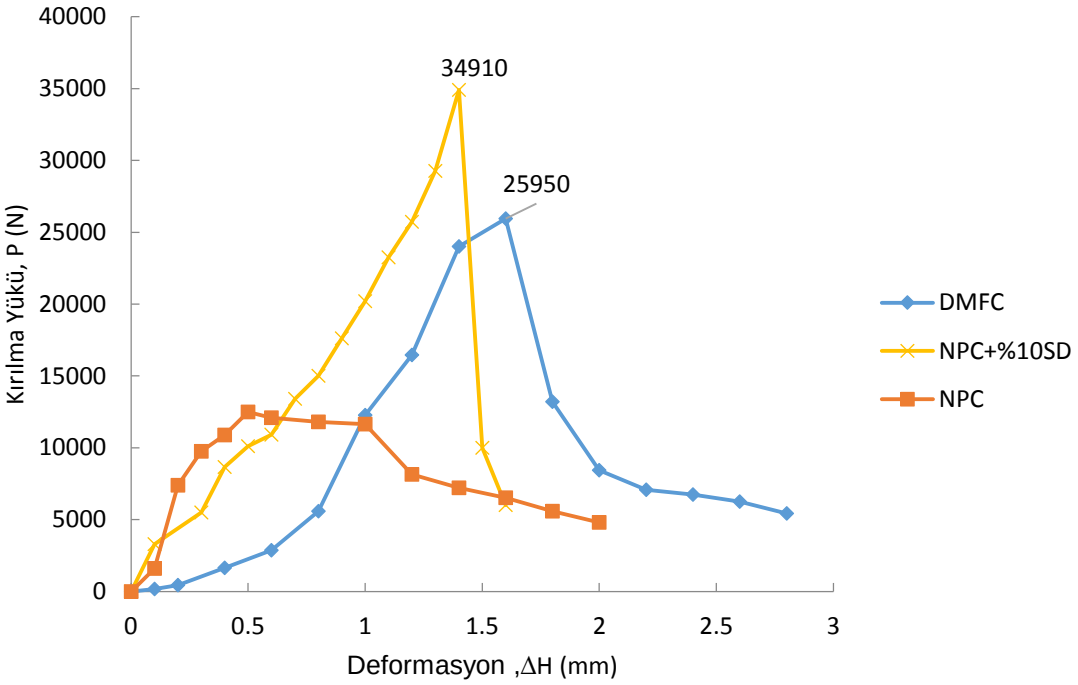



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

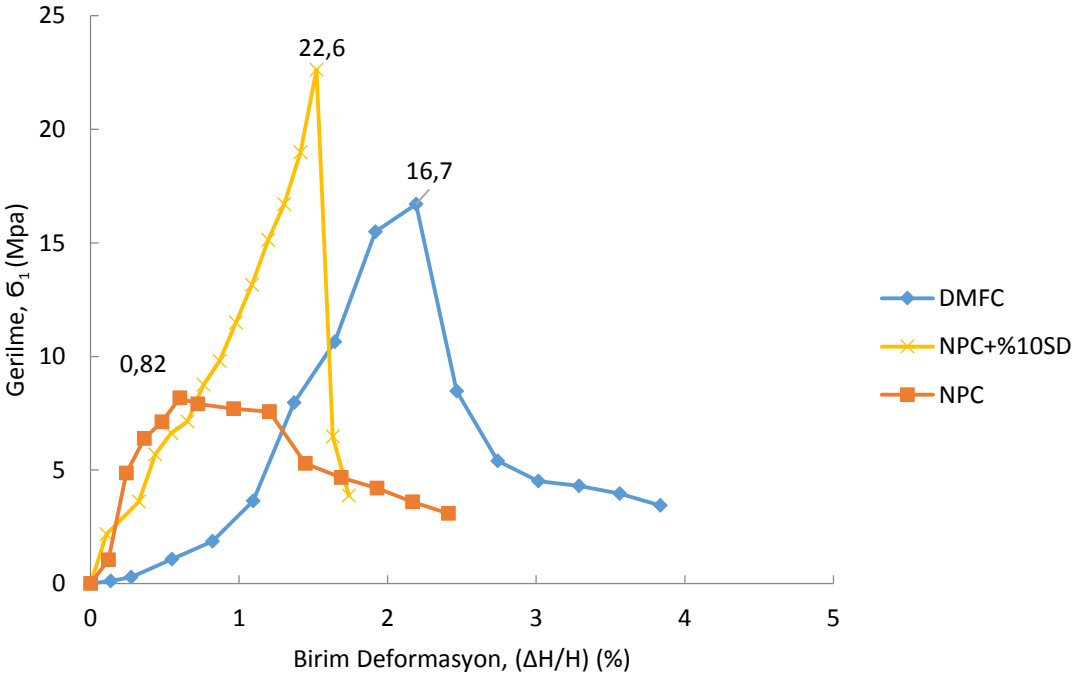



(b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.19.** Farklı enjeksiyonlar için W/C=1 ve 40 bar basınçla hazırlanan kolonların dayanımı




(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi



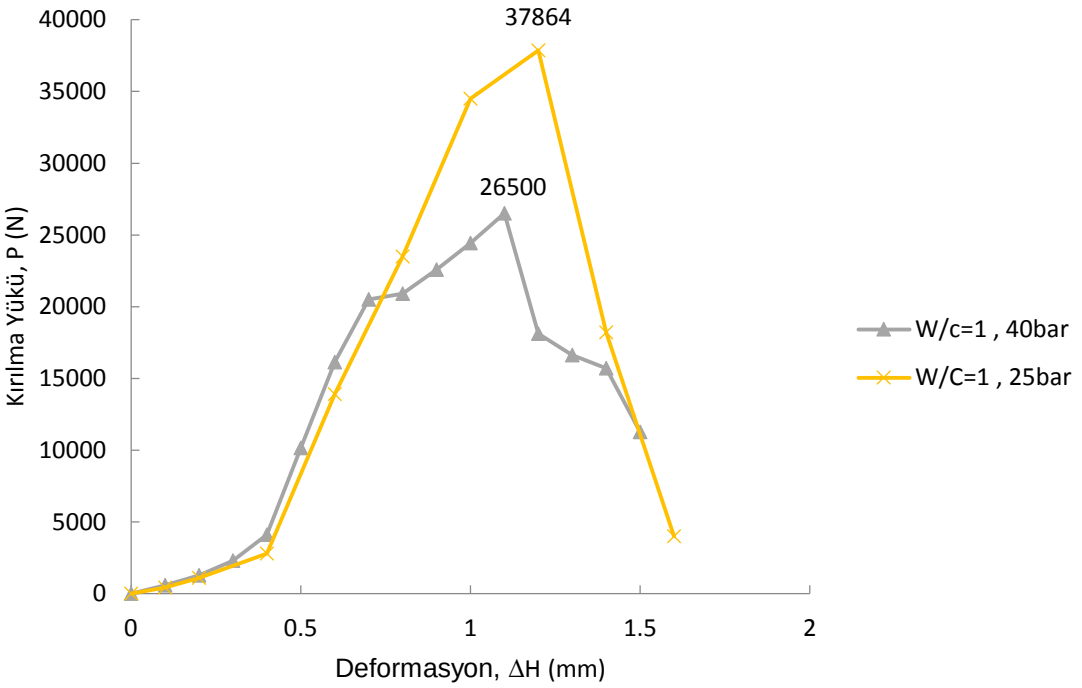

( b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.20.** Farklı enjeksiyonlar için W/C=0.85 ve 40 bar basınçla hazırlanan kolonların dayanımı

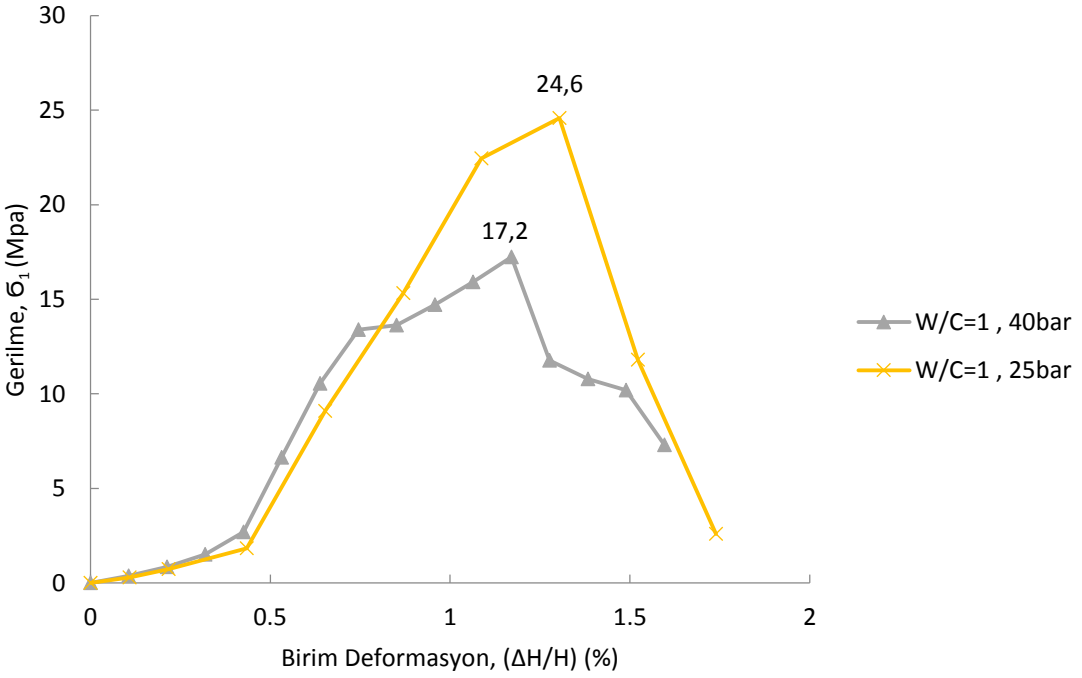
Şekil 4.21.'de DMFC-800 enjeksiyonu ile W/C oranı 1.0 için 40 ve 25 barlık basınçlar altında oluşan kolonların dayanımı gösterilmiştir. Enjeksiyon basıncı arttıkça dayanım azalmaktadır. Bu durum basınç artışı ile enjeksiyonun daha uzak mesafeler ulaşabilmesi, böylelikle daha geniş çapta kolon oluşturması ve oluşan kolonların dozajının daha düşük olması ile izah edilebilir.

Şekil 4.22.'de NPC enjeksiyonu ile W/C oranı 1.0 için 40 ve 25 barda oluşan kolonların dayanımı gösterilmiştir. Aynı DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyon şerbetinde olduğu gibi enjeksiyon basıncı artışı ile dayanımın azaldığı görülmektedir. Özellikle düşük basınç durumunda kolonun deformasyon yapabilme özelliği çok azalmakta kırılgan bir yapı oluşmaktadır.

Şekil 4.23.'de NPC+%10 SD enjeksiyonu ile W/C oranı 1.0 için 40 ve 25 barda oluşan kolonların dayanımı gösterilmiştir. DMFC-800 ve NPC enjeksiyon şerbeti ile hazırlanan numunelerin aksine basınç 25 bardan 40 bara arttığı zaman numunenin dayanımı artmıştır. Bu durum silis dumanı varlığında, silis dumanının ince tanecik boyutu viskozitesinin yüksek olması nedeniyle tanecikler arasına yüksek basınç durumunda daha iyi penetre edebilmesi, düşük basınç durumunda penetre olabilme özelliğinin az olması ve tam homojen bir karışım oluşturulamaması ile izah edilebilir.

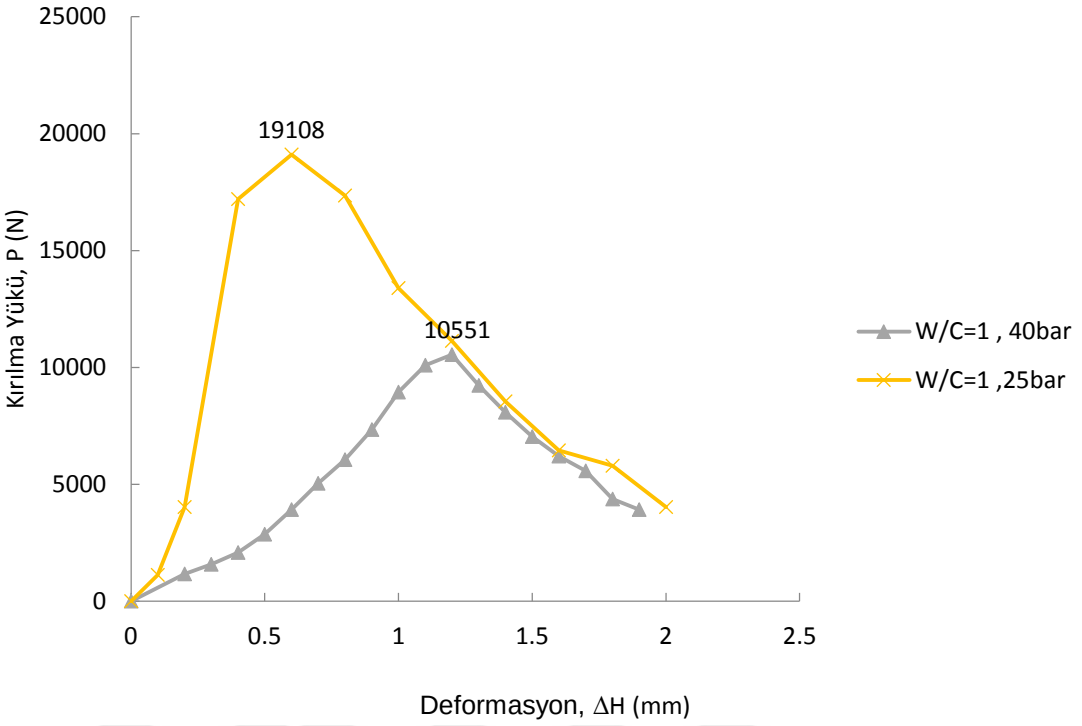



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

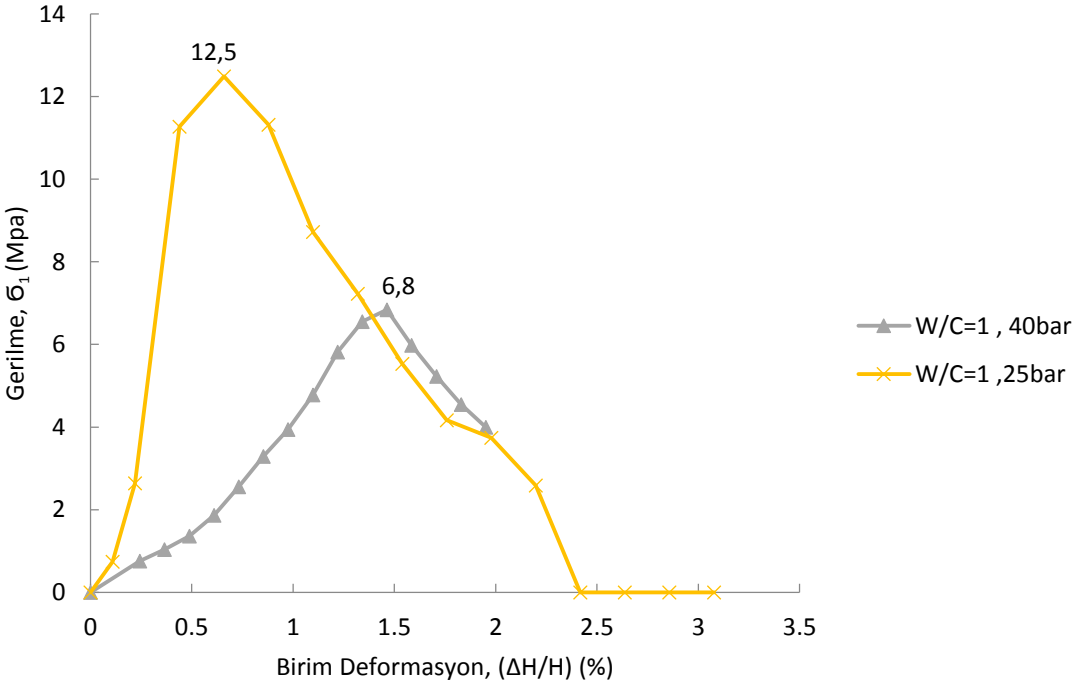



( b)Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.21.** DMFC-800 enjeksiyonu ile W/C oranı 1.0 için 40 ve 25 barda oluşan kolonların dayanımı

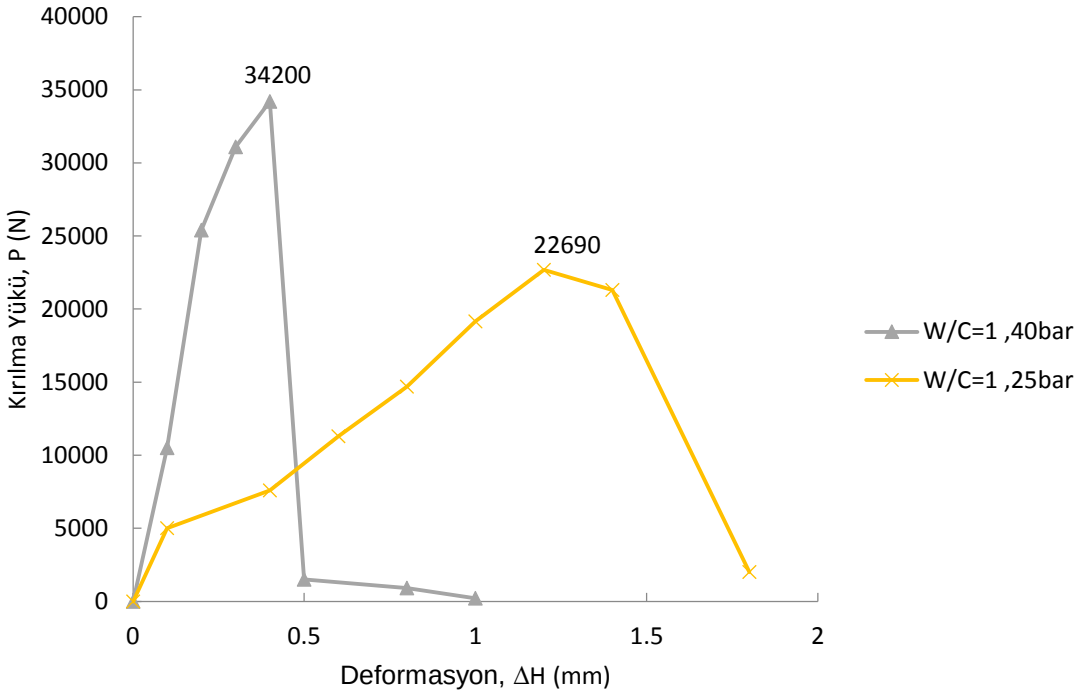



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

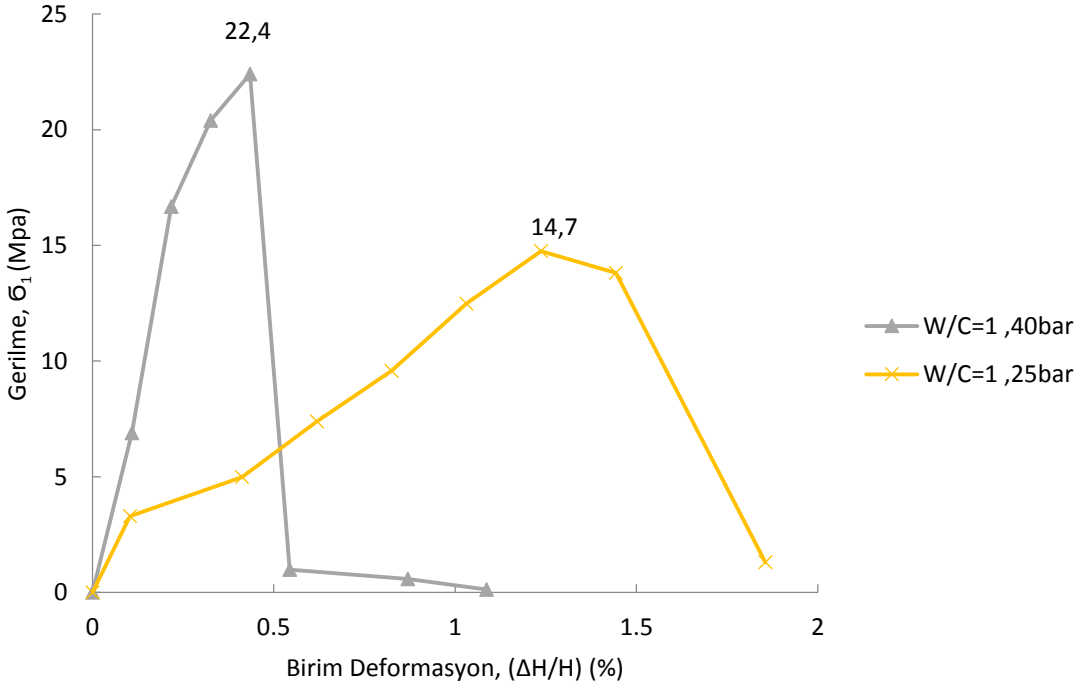



( b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.22.** NPC enjeksiyonu ile W/C oranı 1.0 için 40 ve 25 barda oluşan kolonların dayanımı




(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi



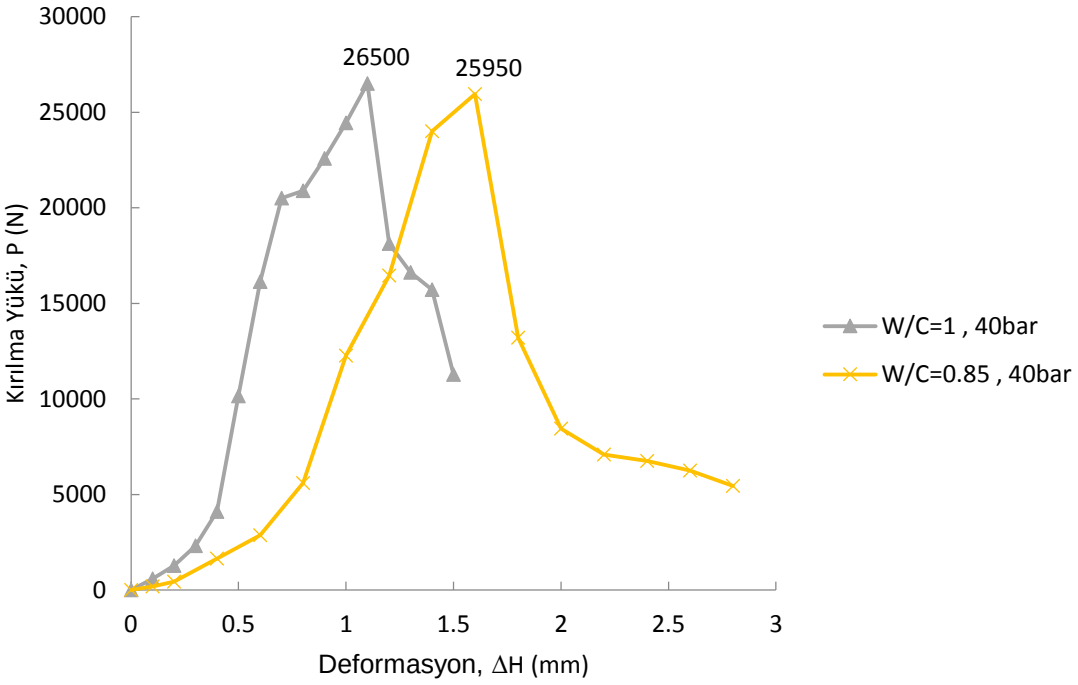

( b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.23.** NPC+%10 SD enjeksiyonu ile W/C oranı 1.0 için 40 ve 25 barda oluşan kolonların dayanımı

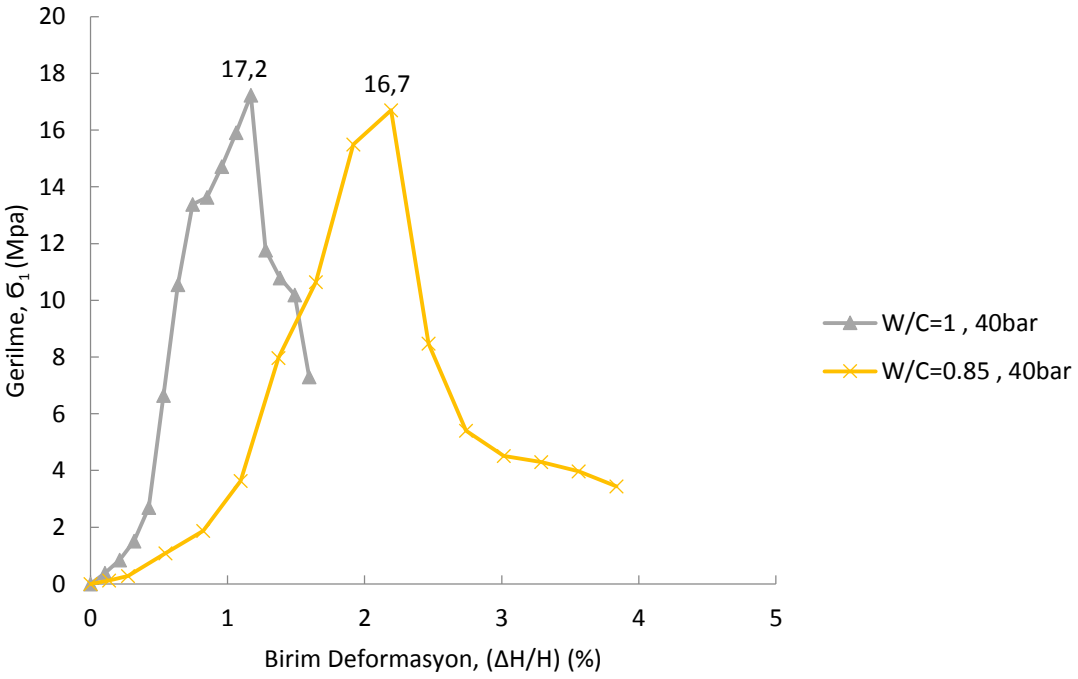
Şekil 4.24.'de 40 bar basınç altında farklı W/C oranları (0.85 ve 1.0) için DMFC-800 enjeksiyon karışımı ile oluşturulan kolonların dayanımları gösterilmiştir. Bu durumda farklı W/C oranı değişiminin dayanımı çok fazla değiştirmediği görülmüştür. Ancak W/C=1.0 değeri için daha düşük eksenel birim deformasyonda (ε=%1.15) kırılma meydana gelmiştir.

Şekil 4.25.'de 40 bar basınç altında farklı W/C oranları için NPC enjeksiyon karışımı ile oluşturulan kolonların dayanımları gösterilmiştir. İnce taneli çimento enjeksiyonu ile oluşturulmuş kolonların tersine W/C oranı arttıkça deformasyon yapabilme özelliği artmış ancak dayanım değerleri azalmıştır.

Şekil 4.26.'de 40 bar basınç altında farklı W/C oranları için NPC+%10 SD enjeksiyon karışımı ile oluşturulan kolonların dayanımları gösterilmiştir. W/C oranının 0.85 veya 1.0 olması dayanım bağlamında çok büyük bir değişikliğe sebep olmamıştır. Ancak düşük W/C oranı için kolonun deformasyon yapabilme özelliği önemli derecede artmıştır. Bu durum düşük W/C oranlarında eğer enjekte edilebilirlik sağlanabilirse silis dumanı ilavesinin kolona elastikiyet özelliği kazandırmada daha fazla katkısının olabileceğini göstermektedir.

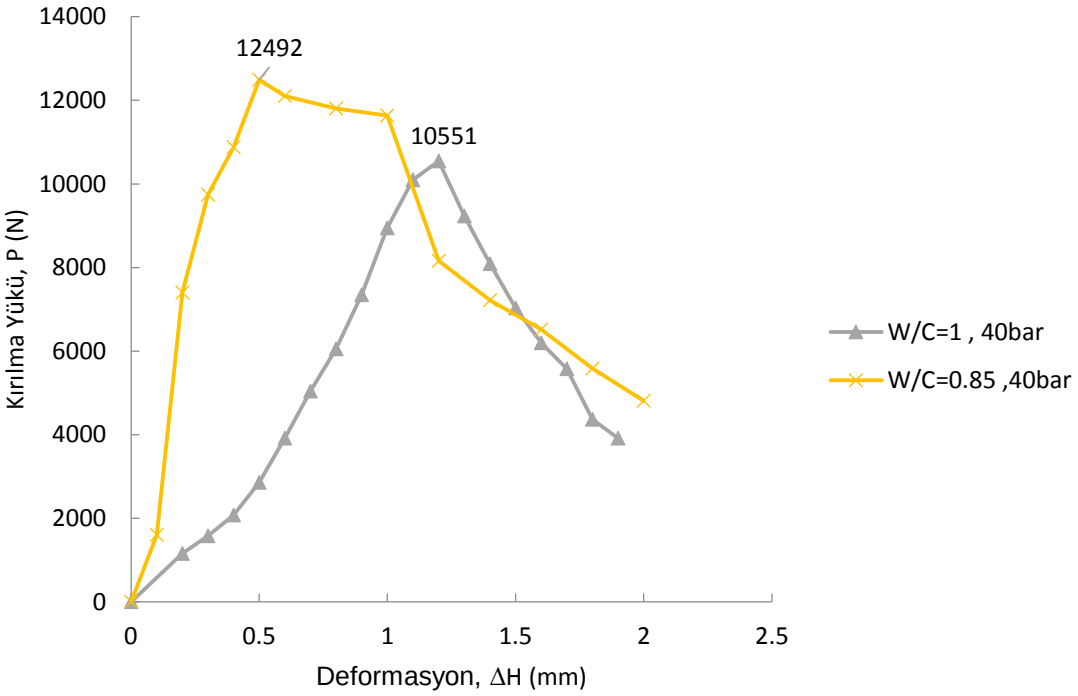



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

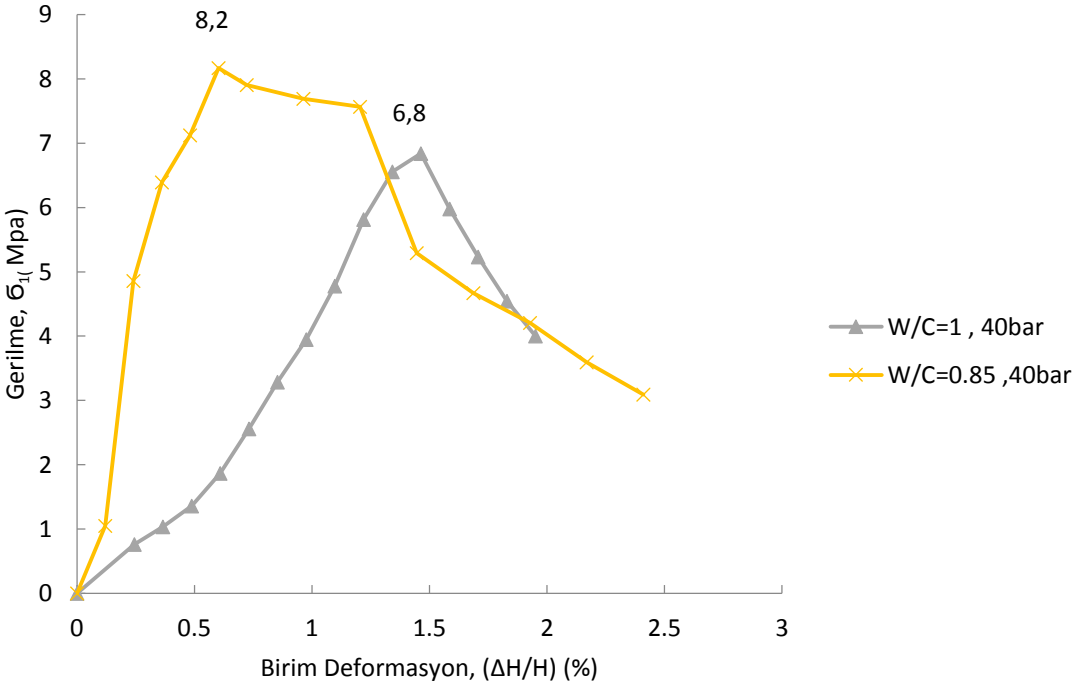



( b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.24.** 40 bar basınç altında farklı W/C oranları için DMFC-800 enjeksiyon karışımı ile oluşturulan kolonların dayanımı

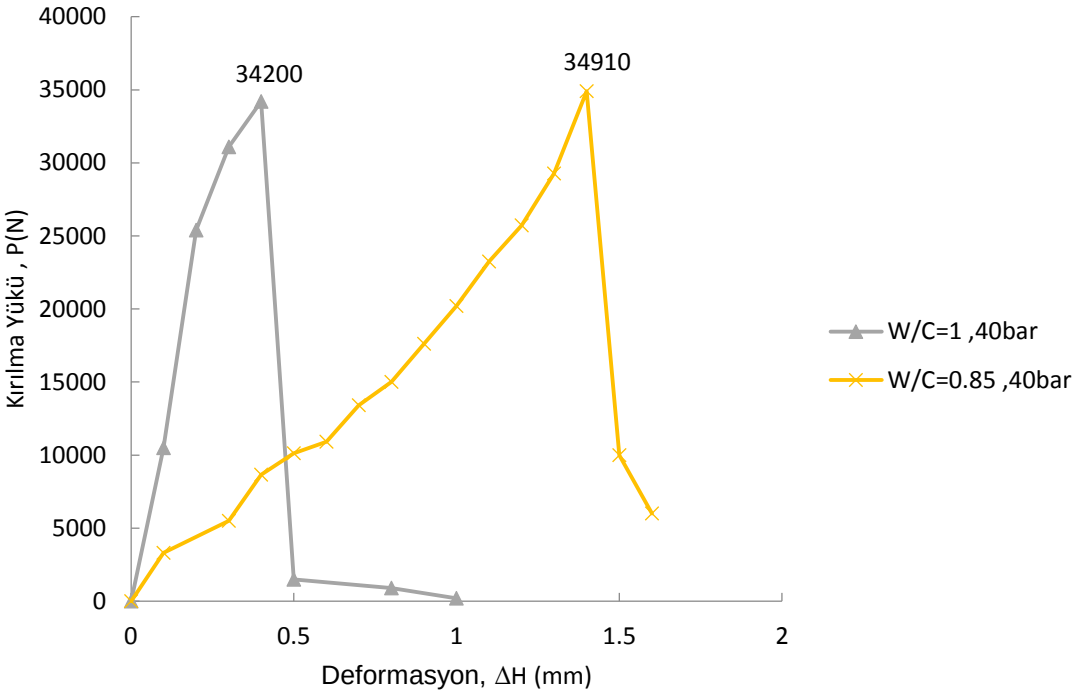



(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi

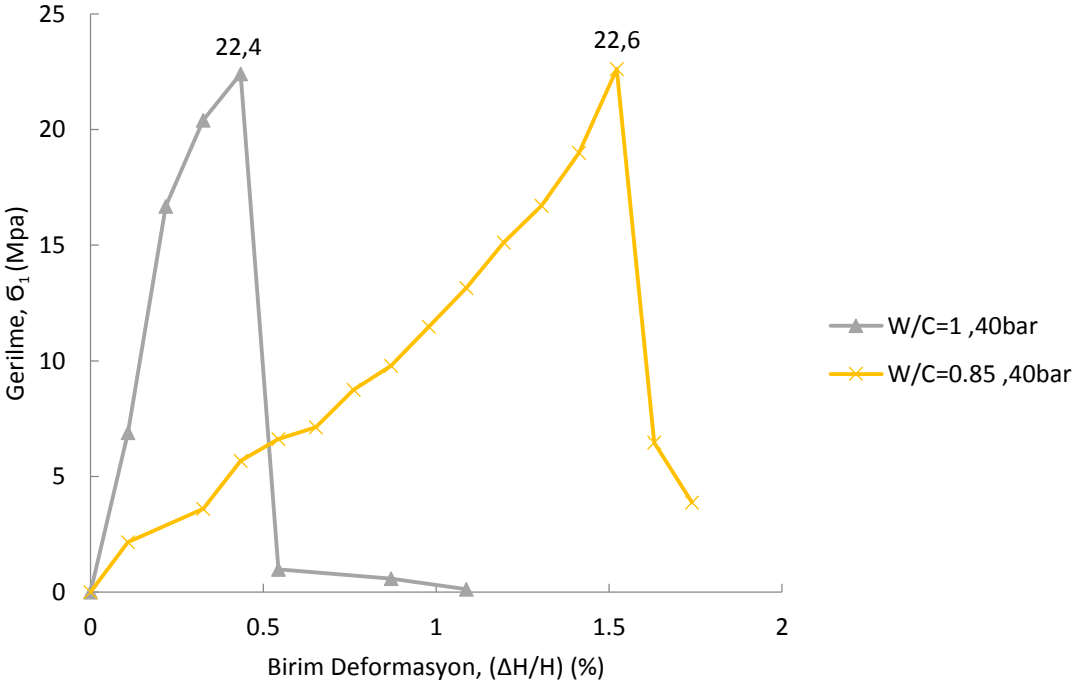



( b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.25.** 40 bar basınç altında farklı W/C oranları için NPC enjeksiyon karışımı ile oluşturulan kolonların dayanımı




(a) Kırılma yükü - Deformasyon ilişkisi




( b) Gerilme ($\sigma_1$) – Birim deformasyon ($\varepsilon$) ilişkisi

**Şekil 4.26.** 40 bar basınç altında farklı W/C oranları için NPC+%10 SD enjeksiyon karışımı ile oluşturulan kolonların dayanımı

## 4.4. Karot Numuneler Üzerinde Geçirimlilik Deneyleri

Jet grout kolonlarından alınan karot numuneler üzerinde Üç eksenli basınç deney düzeneği kullanılarak geçirimlik deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.27.). Deneyler 3.0cm yüksekliğinde ve 4.7cm çapındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelerin su geçirimliliği çok az olduğu üç eksenli basınç deney düzeneğinde hücre basıncı ve geri basınç uygulanarak, basınç altında suyun boşluklardan geçmesi sağlanmıştır. Numune kalınlığının küçük tutulmasının sebebi süre kaybının önlenmesi amacıyladır.



**Şekil 4.27.** Üç eksenli basınç deney düzeneğinde geçirimlik deneyinin yapılması

Farklı enjeksiyondan oluşan kazıklardan alınan karot numuneler üzerinden geri basınçla geçirilen su bir beherde topanarak miktarı ölçülmüştür. Bu suyun geçmesi için gereken zaman da kaydedilmektedir. Permeabilite deneyleri için her kolondan mümkünse iki adet numune alınmış ve sonuçlar kontrolü olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen bu deneysel verileri Bölüm 3'te verilen Eşitlik 3.7. ve Eşitlik 3.8.'te yerine yerleştirilerek her bir karot örneğinin dolayısıyla jet grout kolonunun permeabilite katsayısı belirlenmektedir (Çizelge 4.8.).

**Çizelge 4.8.** Farklı çimento ve enjeksiyon karışımları için geçirimlilik deney sonuçları

| Numune No | Numune tipi | W/C | Kap (gr) | Kap + Su (gr) | Zaman T (dk) | Numune boyu L (cm) | Geçirimlilik katsayısı k (m/sn) $\times 10^{-8}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | DMFC-800 | 4 | - | - | - | - | **-** |
| **1** | DMFC-800 | 4 | - | - | - | - | **-** |
| **2** | DMFC-800 | 3 | - | - | - | - | **-** |
| **2** | DMFC-800 | 3 | - | - | - | - | **-** |
| **3** | DMFC-800 | 2.5 | - | - | - | - | **-** |
| **3** | DMFC-800 | 2.5 | - | - | - | - | **-** |
| **4** | DMFC-800 | 2 | 35.70 | 61.77 | 1 | 2.61 | **18.294** |
| **4** | DMFC-800 | 2 | 35.71 | 60.65 | 1 | 3 | **20.104** |
| **5** | DMFC-800 | 1.5 | 35.70 | 47.23 | 5.5 | 3.12 | **1.757** |
| **5** | DMFC-800 | 1.5 | 35.77 | 38.75 | 1.5 | 3.12 | **1.663** |
| **6** | DMFC-800 | 1.25 | 29.88 | 31.96 | 15 | 3.01 | **0.1124** |
| **6** | DMFC-800 | 1.25 | 35.67 | 38.67 | 15 | 2.79 | **0.1497** |
| **7** | DMFC-800 | 1 | 35.65 | 66.53 | 4 | 3.08 | **6.389** |
| **7** | DMFC-800 | 1 | 29.86 | 67.37 | 8 | 2.8 | **3.527** |
| **8** | DMFC-800 | 1 | 29.87 | 34.98 | 8 | 2.85 | **0.4894** |
| **8** | DMFC-800 | 1 | 35.62 | 40.99 | 8 | 2.91 | **0.5252** |
| **9** | NPC | 1.5 | 35.63 | 45.89 | 1.0165 | 3.41 | **9.248** |
| **9** | NPC | 1.5 | 35.69 | 45.36 | 1.05 | 3.41 | **8.437** |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **10** | NPC | 1.25 | 29.79 | 48.76 | 1.17 | 3.18 | **13.857** |
| **10** | NPC | 1.25 | 35.62 | 54.21 | 1.17 | 2.98 | **12.722** |
| **11** | NPC | 1 | 29.78 | 31.43 | 5.67 | 3.6 | **0.2822** |
| **11** | NPC | 1 | 29.83 | 31.79 | 7.18 | 3.1 | **0.2279** |
| **12** | DMFC-800 | 0.85 | 35.65 | 54.63 | 27.5 | 3 | **0.5565** |
| **12** | DMFC-800 | 0.85 | 29.78 | 42.36 | 28 | 3 | **0.3623** |
| **13** | NPC+%10SD | 1.5 | 35.67 | 43.84 | 20 | 2.8 | **0.3073** |
| **13** | NPC+%10SD | 1.5 | 29.81 | 36.39 | 20 | 2.8 | **0.2471** |
| **14** | NPC+%10SD | 1 | 35.60 | 54.73 | 5 | 3.11 | **3.198** |
| **14** | NPC+%10SD | 1 | 29.81 | 48.10 | 5 | 3.11 | **3.058** |
| **15** | NPC+%10SD | 1.25 | 35.60 | 47.89 | 5 | 2.88 | **1.903** |
| **15** | NPC+%10SD | 1.25 | 35.60 | 43.26 | 5 | 2.96 | **1.219** |
| **16** | NPC+%10SD | 1 | 29.78 | 51.25 | 5 | 2.92 | **3.370** |
| **16** | NPC+%10SD | 1 | 35.65 | 56.36 | 5 | 2.92 | **3.249** |
| **17** | NPC+%10SD | 0.85 | 29.60 | 48.58 | 7 | 3.09 | **2.256** |
| **17** | NPC+%10SD | 0.85 | 35.83 | 50.59 | 5.25 | 3.09 | **2.334** |
| **18** | NPC | 1 | 35.60 | 46.43 | 6 | 3.37 | **1.634** |
| **18** | NPC | 1 | 35.60 | 42.89 | 6 | 3.41 | **1.114** |
| **19** | NPC | 0.85 | 35.75 | 43.73 | 2.5 | 3.4 | **2.913** |
| **19** | NPC | 0.85 | 29.78 | 38.14 | 2.5 | 3.38 | **3.036** |

Çizelge 4.8.'de elde edilen sonuçları şöylece yorumlayabiliriz;

- İnce taneli çimento (DMFC-800) enjeksiyonunun W/C oranı azaldıkça su geçirimliği azalmaktadır. Bu azalma W/C oranı 1.25 oluncaya kadar meydana gelmekte, W/C oranı 1.25 den daha küçük değerlerde kolonun su geçirimlilik değeri tekrar artmaya başlamaktadır. Bu durumda ince taneli çimento enjeksiyon karışımı kullanılarak oluşturulan kolonlarda dayanımda olduğu gibi permeabilite anlamında da en uygun W/C oranının 1.25 olduğu anlaşılmaktadır.

- DMFC-800 enjeksiyonu için W/C=1.0 oranı için enjeksiyon oluşturulmasında daha yüksek basınç (40 bar) kullanıldığı zaman kolonların su geçirimliliği azalmaktadır.
- DMFC-800 enjeksiyonu için yüksek basınçta (40 bar) W/C oranı 1.0'den 0.85'e düşürülmesi kolonların su geçirimliliğini önemli derecede etkilememektedir.
- Kolonların oluşturulmasında NPC enjeksiyonu kullanıldığı zaman W/C oranının 1.25 olduğu durumda kolonların su geçirimliği en yüksek olurken, W/C oranı 1.0 olduğunda en küçük su geçirimlilik değerleri elde edilmektedir.
- NPC enjeksiyonunda W/C oranının 1.0 olduğu durumda enjeksiyon basıncının 25 Bar'dan 40 Bar'a çıkarıldığı durumda kolonlar için karot numunelerinin su geçirimliliği artmaktadır.
- NPC enjeksiyonununda da aynı DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyonunda olduğu gibi yüksek basınçta (40 bar) W/C oranı 1.0'den 0.85'e düşerse su geçirimliliğinin çok değişmediği görülmüştür.
- Normal portland çimentoya %10 silis dumanı eklenen enjeksiyonunun su çimento oranı azaldıkça su geçirimliği artıyor.
- NPC+%10 silis dumanı katkılı enjeksiyonu ile hazırlanan numunelerde W/C oranı azaldıkça su geçirimliliği artmaktadır.
- NPC+%10 silis dumanı katkılı enjeksiyonu ile hazırlanan numunelerde W/C oranının 1.0 olduğu durumlarda enjeksiyon basıncının değişmesi kolonların su geçirimliliğini çok fazla etkilememektedir.
- NPC+%10 silis dumanı katkılı enjeksiyonu ile hazırlanan numunelerde yüksek basınçta (40 bar) W/C oranı 1.0'den 0.85'e azalırsa su geçirimliliğinin çok fazla değişmediği gözlenmiştir.
- Tüm enjeksiyon türleri birlikte değerlendirildiğinde en düşük permeabilite değerlerinin ince taneli çimentonun (DMFC-800) W/C=1.25 değeri için elde edildiği belirlenmiştir ($0.1124\times10^{-8}$ m/sn).
- Beklendiği gibi en yüksek permeabilite değerleri NPC enjeksiyonu ile hazırlanan kolonlar için elde edilmiştir ($13.857\times10^{-8}$ m/sn). Ancak DMFC-800 çimentosu ile hazırlanan W/C oranı 2.0 olan kolonlar için de yüksek geçirgenlik sayıları elde edilmiştir ($20.104\times10^{-8}$ m/sn).
- DMFC-800 için tasarlanan W/C oranları sırasıyla 4.0, 3.0 ve 2.5 olan Jet grout kolon tasarımlarından permeabilite deneylerini yapmak için gerekli deney

numunesi alma imkanı olmamıştır. Çünkü numuneler zayıf olup karot alma işlemi esnasında dağılmıştır.

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 5.1. Sonuçlar

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında farklı tipteki çimento enjeksiyon karışımlarının Jet grout kolonların performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Laboratuvarda plastik variller içerisinde imal edilen JG kolonlarında deney kumu olarak kötü derecelenmiş doğal kum (SP) seçilmiştir. %35 rölatif sıkılıkta tanklara yerleştirilen kum zemine %4 miktarında su ilave edilmişitr. Çalışmada birincisi Normal portland çimentosu (NPC), diğeri ince taneli çimento (DMFC-800) olmak üzere iki farklı çimento kullanılmıştır. Ayrıca üçüncü olarak NPC+%10 silis dumanı enjeksiyon karışımı çalışmada kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında ilk olarak kullanılan enjeksiyon karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek için Marsh hunisi, sedimantasyon ve vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bu reolojik veriler kullanılarak ve zemine enjekte edilebilirlik şartı göz önünde bulundurularak en uygun W/C oranları için 19 adet Jet grout kolonu laboratuarda üretilmiştir. Bu kolonların üretilmesinde ön deneme deney sonuçlarından yola çıkılarak dönme hızı 10 dev/dk, çekme hızı 15 – 25 cm/dk ve enjeksiyon basıncı 25 – 40 Bar olarak seçilmiştir. Üretilen kolonlar 28 gün kür süresinden sonra tanklardan çıkarılmıştır. Boy ve çap ölçümlerinin ardından serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyleri için kolonlardan uygun sayı ve özellikte karot numuneler alınarak deneyler yapılmıştır.

Enjeksiyon karışımları için yapılan Marsh hunisi deneylerinde en uygun akış süresinin 26sn olduğu belirlenmiştir. NPC enjeksiyonları için en uygun akışkanlık W/C oranı 1.25 olduğu durumda elde edilmiştir. NPC+%10 silis dumanı enjeksiyon karışımında akışkanlık azalmakta, viskozite artmaktadır. En uygun enjeksiyon karışımı yani maksimum akışkanlık W/C oranının 1.5 olduğu durumda elde edilmiştir. DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyonunun maksimum akışkanlık değeri W/C oranının 2.0 olduğu durumda elde edilmiştir. Çimento enjeksiyon karışımlarının akışkanlığının ve enjekte edilebilirliğinin sağlanabilmesi için her bir karışım için viskozite deneyinin yapılması önemlidir. Marsh hunisi deneyleri max akışkanlık elde etmek için W/C oranının farklı çimentolar için aşırı değişken olabileceğini göstermiştir.

Enjeksiyon karışımının stabilliğini belirlemek için yapılan sedimantasyon deneylerine göre NPC enjeksiyon karışımları için W/C=0.45, DMFC-800 enjeksiyon

karışımları için W/C=1.25 ve NPC+%10 SD enjeksiyon karışımları için W/C=0.9 oranlarında karışımlar stabil olmuştur.

Enjeksiyon karışımlarının priz alma sürelerini belirlemek için yapılan vicat iğnesi deneylerinde DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyon şerbetinin priz başlama ve bitiş süresinin en kısa süreli olduğu belirlenmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında kolonların dayanımını belirlemek için Serbest basınç deneyleri yapılmıştır. 19 adet kolondan alınan numuneler üzerinde en az ikişer adet deney numunesi için elde edilen değerlere göre;

DMFC-800 enjeksiyon karışımları ile elde edilen kolonlarda en yüksek dayanım W/C=1.0 oranı için elde edilmiştir ($\sigma_1$=24.6MPa). W/C oranı arttıkça dayanım azalmaktadır. NPC enjeksiyon karışımları içinde en yüksek dayanım aynı W/C oranında elde edilmiştir ($\sigma_1$=12.5MPa). DMFC-800'dekine benzer şekilde artan su/çimento oranı ile dayanım önemli miktarda azalmaktadır. NPC+%10 silis dumanı katkılı enjeksiyon karışımları kullanılarak elde edilen kolonlarda en yüksek dayanım W/C=1.25 değeri için elde edilmiştir ($\sigma_1$=20.7MPa). Elde edilen bu sonuçlar jet grout kolonlarının oluşturulmasında dayanım açısından en doğru seçimin DMFC-800 ince taneli çimento olduğunu göstermektedir.

Aynı W/C oranları için bir kıyaslamalar yapıldığında; W/C=1.0 oranı en yüksek dayanım DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyon sıvısı kullanıldığı zaman elde edilmiştir ($\sigma_1$=24.6MPa). Ancak W/C oranlarının 1.25 ve 1.50 değerleri için en yüksek dayanımlar NPC+%10 SD katkılı enjeksiyon sıvıları kullanıldığı zaman elde edilmiştir ($\sigma_1$=14.7MPa ve $\sigma_1$=14.5MPa). Bu da göstermektedir ki silis dumanı katkısı özellikle küçük tanecik boyutu sayesinde artan su muhtevalarında tanecikler arasındaki bağlantıyı ve jelleşmeyi (C-S-H bağ yapısı) açısından önemli olmaktadır. Ancak su muhtevası düşük olduğu zaman bu etkisi daha düşük seviyede kalmaktadır. Ayrıca DMFC-800 ve NPC+%10 SD katkılı enjeksiyon karışımları ile oluşturulan kolonlardan alınan numunelerin daha fazla deformasyon yapabilme kabiliyeti kazandıkları gözlemlenmiştir. Bu da yine tanecik boyutu ile ilişkili bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

DMFC-800 ve NPC enjeksiyon karışımları için enjeksiyonun basıncının 40 Bar'a yükseltilmesi ile hazırlanan kolonların dayanımı azalmıştır. Ancak NPC+%10 SD katkılı enjeksiyon karışımları hazırlanan kolonların dayanımları artan enjeksiyon basıncı ile artmıştır. Bunun sebebi; silis dumanının yüksek basınç durumunda tanecikler

arasındaki boşluklara daha iyi penetre edebilmesi ve daha homojen bir karışım oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Deneysel çalışma kapsamında DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyon sıvılarının W/C 2.5, 3.0 ve 4.0 oranları için JG kolonları oluşturulmuştur. Bu kolonlardan örselenme ve bozulma nedeniyle küçük boyutta karotlar alınamamış ancak büyük boyutta karotlar alınmıştır. Serbest basınç deneyleri yapılmış, diğer numuneler kadar olmasa da belirli bir dayanım artışı sağlanmıştır. Yapılacak işin önemine göre DMFC-800 ince taneli çimentosu ile yüksek W/C oranına sahip JG kolonlarının oluşturulabileceği görülmüştür.

Deneysel çalışma kapsamında üç farklı enjeksiyon sıvısı ile hazırlanan kolonlardan 3.0cm yüksekliğinde alınan karot numuneler üzerinde Üç eksenli basınç deney düzeneği kullanılarak geri basınç uygulaması ile karotların permeabilite katsayıları belirlenmiştir. Su geçirimliliği jet grout kolonların özellikle geçirimsizlik perdesi olarak kullanıldığı ve sıvılaşmayı önleme elemanı olarak bir derin temel sistemi olarak tercih edildiği durumlarda önemli olmaktadır. Jet grout kolonların geçirimsizlik özelliğini artırmak için bu çalışma kapsamında Normal Portland çimentosu yerine DMFC-800 ince taneli çimento ve NPC+%10 silis dumanı katkılı enjeksiyon karışımları kullanılmıştır. Ancak deneysel sonuçlar göstermiştir ki bu iki farklı enjeksiyon malzemesi su geçirimliliğini önemli miktarda azaltabilse de, bu enjeksiyonların Hangi W/C oranında ve bazende hangi enjeksiyon basıncı ile zemine enjekte edildiği çok önemli olabilmekedir. Uygun W/C oranları seçilmediği taktirde NPC enjeksiyon karışımı kullanılan durumdan bile daha yüksek su geçirgenliği ortaya çıkabilmektedir. Örneğin; DMFC-800 ince taneli çimentonun W/C=2.0 oranı için permeabilite katsayısı $k=20.104\times10^{-8}$m/sn iken NPC'nin W/C=1.25 oranı için permeabilite katayısı k= 0.2279 $\times10^{-8}$m/sn değerini almaktadır.

DMFC-800 ince taneli çimento enjeksiyonu ile hazırlanan kolonlarda en düşük geçirimlilik W/C=1.25 oranı için elde edilmektedir. Bu durumda elde edilen permeabilite değeri aynı zamanda tüm deneysel çalışma kapsamında elde edilen en küçük permeabilite katsayısı ($k=0.1124\times10^{-8}$m/sn) olmuştur. DMFC-800 için W/C oranının 1.25 ten büyük ve küçük değerlerinde geçirimlilik önemli oranda artmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında elde edilen en yüksek permeabilite değeri de yine DMFC-800 için W/C oranı 2.0 olduğu durumda elde edilmiştir. Daha yüksek enjeksiyon basıncı durumunda (40 bar) su geçirimliliği azalmıştır.

NPC enjeksiyonu ile hazırlanan kolonlarda en düşük geçirimlilik W/C=1.0 oranı için elde edilmiştir (k= 0.2279 $\times 10^{-8}$m/sn). Bu değer DMFC-800 için elde edilen permeabilite katsayısının yaklaşık 2 katıdır. Bu da geçirimsizlik perdesi oluşturulmasında ince taneli çimento kullanımının NPC çimentosu kullanımına göre büyük avantajlar sağladığını göstermektedir. NPC enjeksiyon karışımı ile oluşturulan kolonların oluşturulması sırasında DMFC-800 ince taneli çimentonun tersine artan enjeksiyon basıncı numunelerin su geçirimliliğini artırmaktadır.

Silis dumanının çok ince ve küçük boyutu ile tanecikler arasındaki boşlukları doldurarak su geçirimliliğini azaltması beklenmektedir. NPC+%10 silis dumanı katkılı enjeksiyon karışımları ile hazırlanan kolonların su geçirimliliğini azaltma oranları beklenildiği kadar iyi olmamıştır. En düşük geçirimlilik katsayısı W/C oranının 1.50 olduğu durumda elde edilmiştir (k= 0.2471$\times 10^{-8}$m/sn). Bu değer NPC ile hazırlanan kolonlarınkine hemen hemen eşdeğerken, DMFC-800 ile hazırlanan kolonların kinin 2 katından bile fazladır. Bu durum silis dumanı katkısının daha aktif rol oynayabilmesi için daha yüksek oranda kullanılması gerektiği veya da daha yüksek W/C oranlarında karışımın hazırlanması gerektiğine işaret etmektedir. Ancak bu durumda da mukavemet etkenlerinin sağlanamama durumunun olduğu unutulmamalıdır.

## 5.2. Öneriler

Farklı çimento enjeksiyon şerbetleri için oluşturulan kolonlardan alınan karot örnekleri üzerinde yapılan deneylerden özellikle deformasyon özellikleri açısından beklenilen sabit bir davranış özelliği belirlenememiştir. Bunun sebebinin numune oluşturma ve alma esnasındaki örselenmelerin olabileceği düşünülmektedir. Deformasyon özelliğinin küçük boyuttaki standart tüplerde hazırlanacak numuneler kullanılarak daha doğru belirlenebileceği düşünülmektedir. Farklı pozzolanlar veya farklı özellikteki çimentolarla yapılacak deneylerden elde edilecek sonuçların mevcut çalışmadaki sonuçlarla kıyaslanması bu tez çalışmasının devamı niteliğinde olacaktır. Özellikle; NPC+%10 silis dumanı katkılı enjeksiyonlarının daha yüksek W/C oranları için çalışmanın genişletilmesi uygun olacaktır.

**KAYNAKLAR**


Abramovich, G.N., 1963, The Theory of Turbulent Jet, MIT Press.

ASTM C939, 2003, Standart Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), *ASTM*, Pennsylvania, 4 (2), 1-3.

ASTM C940., 2003, Standart Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the laboratory, *ASTM*, Pennsylvania, 1-3.

ASTM C191., 2003, Standart Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement By Vicat Needle, *ASTM*, Pennsylvania, 4 (1), 179-184 .

ASTM D 2166-00, 2003, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strengt of Cohesive Soil, *In: Annual Book ASTM Standarts*, Volume 04.08, West Conshohocken, 201-206.

Ayoubian, A. & Nasri, V., 2004, Design of jet grout plugs for base stability and groundwater control, *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, 1905-1914.

Burke, G., 2012, The State of the Practice of Jet Grouting, *Proceedings of the '4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*,New Orleans, Louisiana, United States, February 15-18, 2012, ISBN (print): 978-0-7844-1235-0.

Stoel, A., 2001. Grouting for Pile Foundation Improvement, DUP Science, Delft.

Croce, P. and G. Modoni., 2010, Consolidamento delle fondazioni di rilevati stradalie ferroviari, *Rivista Italiana di Geotecnica*, Italian, 44(3), 30–45.

Croce, P., G. Modoni, and F. Palmisano., 2006, Progetto di fondazioni a pozzo realizzate con la tecnica del jet grouting, *Proceedings of the National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering*, Bari, Italy, September 3–4, 327–340 .

Croce, P., G. Modoni, and G. Russo., 2004, Jet grouting performance in tunnelling. *Proceedings of the Conference on Deep Foundations, Earth-Retaining Structures, Soil Improvement, and Grouting—Geo-Support 2004*, Orlando, FL, September 2003, 910–922.

Demiral, Ö. T., 2017, Sülfatlı su içerikli kum zeminlerde portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların taşıma gücüne sülfatın etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Fen bilimleri Enstitüsü,* Konya, 3 – 20.

Erkan, İ. H., 2013, Jet grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması, Doktora Tezi, *Fen bilimleri Enstitüsü,* Konya, 5 – 30.

Fang, Y. S., Liao J. J., & Lin, T. K., 1994, Mechanical Properties of Jet Grouted Soilcrete, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27, 257-265.

Farmer, W. and P. B. Attewell., 1965, Rock penetration by high-velocity jet., *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2, 135–153.

Franz, N.C., 1972, Fluid additives for improving high velocity jet cutting, *Proceedings 1st Symposium on Jet Cutting Technology*, BHRA, A7-93.

Fritsch, M. and Kirsch, F., 2002, Deterministic and probalilistic analysis of the soil stability above jet grouting columns, *5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, NUMGE, Paris, Presses de LENPC.

Hausmann, M., R., 1990, Modification at depth by grouting, *Engineering Principles of Ground Modification*, Mc Graw Hill, Singapur, 346-379.

Hermans, J.J., 1953, Flow properties of disperse systems, North Holland Publishing Company.

Hsieh, H. S., Wang, C. C. & Ou, C. Y., 2003, Use of jet grouting to limit diaphragm wall displacement of a deep excavation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129, 146-157.

Hsiung, B. C. B., Nash, D. F. T., Cheng, K. H., Huang, C. C. & Hwang, R. N. H, 2000, Effectiveness of jet-grout slabs and cross-walls in restricting wall movements in deep excavations,www.maa.com.tw/common/publications.

Kauschinger, J.L., Perry, E.B. & Hankour, R., 1992, Jet-Grouting:State-of-the Practice, Grouting, *Soil-Improvement and Geosynthetics*, New Orleans, 25-28 Feb. 1992, GSP No:30,169 -181.

Kirsch, F. and Sondermann, W., 2002, Zur Gewo¨ lbestabilita¨ t u¨ ber Soilcrete-Ko¨rpern. *9. Darmsta¨dter Geotechnik Kolloquium*, TUD.

Kirsch, K., 1997, Contractor's view on the risks involved with deep excavations in water bearing soils. *XIV ICSMFE*, Hamburg.

Lichtarowicz, A., 1995, Future of water jet technology basic research, *Proceedings 4th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology*, 13–26.

Melegari, C., & Garassino A.L., 1997, *Seminar on Jet Grouting*, Singapore.

Modoni, G. & Croce. P., 2006, Theoretical modelling of jet grouting, *Geotechnique*, 56,No.5, 335-337.

Noda, H. et al., 1996, Case of jet grouting for 10.8m diameter shield, In: Yonekura et al. (eds), *Grouting and Deep Mixing*, Balkema, Rotterdam.

Nonveiler, E., 1989, Grouting Suspensions, Solutions and Resin, *Elsevier Science Publisher*, New York, 35-68.

Paolo Croce., 2014, Giuseppe Modoni-Jet Grouting_ Technology, *Design and Control-CRC Press*, Alessandro Flora.

Pollath, K., 2000, Baugrube Schleuse Uelzen II. Deutsche Gesellschaft fu¨ r *Geotechnik*, Baugrundtagung, Hannover.

Reichert, D. et al.,2002, Baugrube Domquarree. Deutsche Gesellschaft fu¨ r *Geotechnik*, Baugrundtagung, Mainz.

Shavlovsky, D.S., 1972, *Proceedings of 1st International Symposium on Jet Cutting Technology*, BHRA.

Shibazaki, M., 1996, State of the art grouting in Japan, *Proceedings, 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, 857–862.

Shirlaw, J. N., 2003, Jet grouting soft clays for tunneling and deep excavations –design and construction issues, Grouting and Ground Treatment, *Proceeding of the Third International Conference,* New Orleans, Lousiana, 1, 257-268.

Stoel, A. E. C., 2001, Grouting for pile foundation improvement, Ph. D. Thesis, *Delf University of Technology*, Amsterdam, Holland, 233.

Trevi, K.,1994, Columnar Treatment, *Illustrative Report*, Cesena.

Wachholz, T. et al., 2000, Planung, Konzeption der Schleuse Uelzen II und Berechnung der Baugrube. *Deutsche Gesellschaft fu¨ r Geotechnik*, Baugrundtagung, Hannover.

Wang, J. G., Oh, B., Lim, S. W. & Kumar, G. S. 1999, Effect of different jetgrouting installations on neighboring structures, *Field Measurements in Geomechanics*, Rotterdam, 511-516.

Wang, Z. F., S. L. Shen, and J. Yang., 2012, Estimation of the diameter of jetgrouted column based on turbulent kinematic flow theory, *Proceedings of the Conference on Grouting and Deep Mixing 2, ASCE Geotechnical Special Publication*, 228, 2044–2051.

Wanik, L. and G. Modoni., 2012, Numerical analysis of the diffusion of submerged jets for jet grouting application, *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica (IARG)*, Paper 3.B.8, 6 .

Warner, J., 2004, Practical Handbook of Grouting Soil Rock and Structure, *Jhon Wiley&Sons*, New Jersey, 1-178, 207-295.

Wong, I. H. & Poh, T. Y., 2000, Effects of jet grouting on adjacent ground and structures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, 247-256.

YBM Co., ltd, http://www.ybm.jp/index-e.html, Japonya.

Zebovitz, S., Krizek, R. J., and Atmatzidis, D., K. ,1989, Injection of fine sands with very fine cement grout, *J. Geotech. Eng.,* Vol. 115, No. 12, 1717–173.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Askar KANAT
**Uyruğu** : Kazak
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Çin-1989
**Telefon** : 05541960191
**Faks** :
**e-mail** : Hanat0507@gmail.com

## EĞİTİM

| **Derece** | | **Adı, İlçe, İl** | **Bitirme Yılı** |
|---|---|---|---|
| Lise | : | **Tekes No.1** | **2008** |
| Üniversite | : | **Northeastern University** | **2014** |
| Yüksek Lisans | : | **Selçuk Üniversitesi** | **2018** |
| Doktora | : | | |

## İŞ DENEYİMLERİ

| **Yıl** | **Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 2014-2015 | **hengda** | **İnşaat Mühendisi** |

## YABANCI DİLLER

**Kazakça**
**Çince**
**Türkçe**
**İngilizce**

## BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

## YAYINLAR

1. Olgun, M. and Kanat, A., ‘’ Rheological Properties Of Micro Fine Cement (DMFC 800) Grouts ‘3$^{th}$ Intrenational Conference on Civil and Environmental Engineering Conference, 2018, İzmir.