

FARKLI ÇİMENTO TİPLERİ KULLANILARAK TEŞKİL EDİLEN MODEL JET GROUT KOLONLARININ DAYANIM ve GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ

STRENGTH AND PERMEABILITY PROPERTIES OF MODEL JET GROUTING COLUMNS FORMED USING DIFFERENT CEMENT TYPES

Alican ŞENKAYA¹, Murat OLGUN²

ÖZET

Geoteknik mühendisliğinde zemin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan Jet Grout (JG) yöntemi en yaygın uygulamalardan biridir. Bu çalışmada laboratuvar ortamında model JG kolonları teşkil edilmesini sağlayan bir düzenek kullanılmıştır. CEM I Portland çimentosu, CEM II kompoze çimento, CEM III yüksek fırın cürufu (YFC) katkı çimento ve DMFC-800 ince taneli çimento olmak üzere dört farklı tipte çimento kullanılarak kumlu zemin içerisinde model JG kolonları teşkil edilmiştir. Her çimento tipi için su/çimento (S/Ç) oranı 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 olan enjeksiyon karışımları hazırlanmıştır. İnce taneli çimento için ilave olarak S/Ç oranı 2.0, 2.5 ve 3.0 olan enjeksiyonlarla da JG kolonları üretilmiştir. Model JG kolonlarından 90 günlük kür süresinin sonunda alınan karot numuneleri üzerinde serbest basınç ve geçirimlilik deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyi sonuçlarına bakıldığında katkı çimentoların (CEM II, CEM III) ve ince taneli çimento (DMFC-800) normal Portland çimentosuna (CEM I) göre daha yüksek dayanım kazandırdığı görülmüştür. Özellikle YFC katkı CEM III çimentosu nispeten en düşük oranda klinker içermesine rağmen en yüksek dayanımı sağlamıştır. Geçirimlilik sonuçlarına bakıldığında ise ince taneli DMFC-800 çimentosuyla üretilen kolonların numuneleri genel olarak en düşük geçirimliliğe sahip olmuştur. Katkı çimentolar geçirimlilik testlerinde de katkısız Portland çimentosuna göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Jet Grout, Zemin iyileştirme, Hidrolik geçirimlilik, Basınç dayanımı, Puzolanik katkı malzemeleri.

ABSTRACT

Jet Grouting (JG) is a worldwide method used to improve soil properties in geotechnical engineering. In this study, an apparatus was used which enables to form model JG columns in the laboratory. Model JG columns were formed in the sandy soil by using four different

¹ Öğretim Görevlisi, Konya Teknik Üniversitesi, asenkaya@ktun.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Profesör, Konya Teknik Üniversitesi, molgun@ktun.edu.tr

types of cement: CEM I Portland cement, CEM II composite cement, CEM III which is a mixture of blast furnace slag (BFS)-Portland cement clinker and DMFC-800 fine grained cement. For each cement type, four different grout mixtures with water/cement (W/C) ratios of 0.75, 1.0, 1.25 and 1.50 were prepared. For fine grained cement, JG columns with W/C ratios of 2.0, 2.5 and 3.0 additionally was formed. At the end of the 90-day curing period, unconfined compressive strength and permeability tests were carried out. Considering the unconfined compressive strength results, it was seen CEM II, CEM III and DMFC-800 provide higher strength than CEM I. Especially, BFS admixed CEM III provided the highest strength even though it contained relatively the lowest amount of clinker. Considering the permeability results, the samples of the columns produced with fine-grained DMFC-800 generally had the lowest permeability. The admixture cements provided better impermeability compared to the ordinary Portland cement.

Keywords: *Jet grouting, Ground improvement, Hydraulic conductivity, Compressive strength, Pozzolan admixtures.*

1. GİRİŞ

Çimento enjeksiyonu ile zemini karıştırma işlemi, en yaygın zemin iyileştirme yöntemlerindendir. Birçok geoteknik problemin çözümü için betonarme derin temellerin kullanımı yerine çimento enjeksiyonlu iyileştirilmiş zemin elemanları tercih edilmektedir. Çünkü zemin iyileştirme maliyetleri düşürür, inşaat süresini kısaltır, kazı gerektirmez ve en önemlisi zeminin mühendislik parametrelerini etkin bir şekilde iyileştirir (Kirsh ve Bell, 2012). Jet grout (JG) yöntemi en yaygın zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir (Xanthakos vd., 1994). Yöntem başlangıçta kimyasal enjeksiyon malzemeleri ile uygulanmış, ancak zamanla çimento-su karışımı enjeksiyon malzemesi, çevreye olan olumsuz etkileri ve yüksek maliyeti nedeniyle kimyasal enjeksiyonların yerini almıştır. Diğer bazı yöntemlere göre JG yöntemi, makul ölçülerde ve hafif makine ekipmanı, hızlı uygulanması sayesinde kentsel alanlar, kapalı ve tüneller gibi dar şantiyelerde uygulamaya olanak sağlar. JG yöntemi derin kazılarda, temel altı zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde (Njock vd., 2018), tünel destek sistemlerinde (Shen vd., 2013) ve yeraltı suyu geçirimsiz bariyerlerinin yapımında kullanılmaktadır (Modoni vd., 2006; Karahan ve Sivrikaya, 2018). JG yöntemi, çok çeşitli zemin tiplerini iyileştirmek için uygundur. Bunun için farklı JG prosedürleri geliştirilmiştir. Bu işlemler tek akışkan sistemi, çift akışkan sistemi ve üçlü akışkan sistemi olarak bilinmekte ve tüm dünyada kullanılmaktadır (Flora vd., 2013). JG yöntemi dünya çapında kullanılmasına rağmen, JG kolonlarının mühendislik özellikleri hakkında isabetli öngörülerde bulunmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle yöntemin belirsizliklerini ortadan kaldırmak amacıyla çalışmalar devam etmektedir.

Oluşan JG kolonunun mekanik özelliklerinin doğal zemine göre iyileşme derecesi uygulamanın ne kadar başarılı olduğunun başlıca göstergesidir. Farklı zemin tipleri üzerinde enjeksiyon uygulanarak çeşitli çalışmalar yapılagelmiştir. Zebovitz vd. (1989), farklı tane boyutu dağılımlarına sahip kumlu zemin örneklerine emdirme enjeksiyonu uygulamışlar ve ince taneli çimentonun normal Portland çimentosuna göre zemine daha iyi nüfuz ettiğini belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada araştırmacılar, üç farklı çimento türü ile hazırlanan enjeksiyon karışımlarını, emdirme enjeksiyon yöntemiyle kumlu zemin örneklerine enjekte etmişlerdir. Enjeksiyon noktasından uzaklaştıkça dayanımın azaldığını ve geçirimsizliğin arttığını belirtmişlerdir (Markou ve Droudakis, 2013). Helson vd., (2017), yüksek fırın cürufu

(YFC) katkılı çimento kullanmış ve farklı dozajlarda üç çimento enjeksiyonu hazırlamışlardır. Enjeksiyon karışımlarını farklı miktarlarda kil içeren zemine enjekte etmişlerdir. Önemli bir iyileştirme sağlamak için minimum 100 kg/m^3 çimento dozajı kullanılması gerektiğini ve zeminde %15'ten fazla kil bulunmasının mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir.

Literatürdeki çalışmaların ve bilgilerin çoğu, laboratuvar ortamında küçük kalıplarda hazırlanmış harç numunelerine veya saha uygulama koşullarını tam olarak temsil etmeyen deney mekanizmalarıyla hazırlanmış numunelere dayanmaktadır. Bu nedenle, arazideki JG yönteminin mekanizmasını temsil edebilecek model deneylerle üretilen JG kolonlarına dayalı çalışmalar yapılması gereği görülmüştür. Bu amaçla laboratuvar ortamında, yerinde uygulama mekanizmasına benzer şekilde çalışan model JG düzeneği kurulmuş ve kumlu zeminde model JG kolonları üretilmiştir. Model kolonların üretilmesinde farklı özelliklere sahip dört çimento türü (CEM I, CEM II, CEM III ve DMFC-800 ince taneli çimento) ile çeşitli su/çimento (S/Ç) oranlarında hazırlanan enjeksiyon karışımları kullanılmıştır. Kolonlar doksan gün süreyle oluşturulduğu nemli zemin ortamında küre bırakılmış ve bu sürenin sonunda model kolonlardan karot numuneleri alınmıştır. Bu karot numunelerinin serbest basınç dayanımı (UCS) ve geçirimsizlik katsayısı (k) değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar bu bulgulara dayanarak değerlendirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Kum zemin doğal kum ocağından temin edilmiştir. ASTM D6913-04 standardına göre zeminin elek analizi yapılmıştır. Buna göre zemin; %3.75 çakıl, %94.5 kum ve %1.72 silt-kil boyutunda tanelerden oluşmaktadır. Ayrıca, üniformalite katsayısı (C_u) 6.8 ve süreklilik katsayısı (C_c) 0.84'tür. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre, kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmıştır. Maksimum kuru yoğunluk ASTM D698 standardına göre 1.98 g/cm^3 ve minimum kuru yoğunluk ASTM D4254 standardına göre 1.55 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında dört farklı tip çimento kullanılmıştır. Çimento çeşitlerinin bileşenleri ve kütlece oranları Tablo 1'de verilmiştir. CEM I 42.5 R, EN 197-1: 2002 standardına göre çimento klinkeri ve az miktarda alçıdan üretilen normal Portland çimentosudur. CEM II/A-M (P-L) 42,5 N, EN 197-1: 2002 standardına göre katkılı bir çimentodur ve Portland kompozit çimento olarak da adlandırılmaktadır. Bu tip çimento, doğal puzolanik malzemeler olan tras ve kalker içerir. CEM III/A 42,5 N tipi çimento yüksek miktarda YFC içerir. DMFC-800 çimentosu, ince taneli bir Portland çimentosudur. Maksimum tane boyutu sınırı (D95), mikro ince taneli çimentoyu normal çimentodan ayıran sınır değerdir. EN 12715:2000 standardına göre mikro ince taneli çimento, dikey ve homojen tane boyutu dağılımı ile tanımlanabilir. D95 değeri 20 mikronu geçmemelidir. DMFC-800 çimentosunun toplam kütlelerinin D95 değeri 16 mikrondan küçüktür. Küçük tane boyutu sayesinde, bu çimentonun enjeksiyonları, çok küçük çatlaklara, fisürlere ve taneler arasındaki boşluklara kolayca nüfuz edebilir ve gevşek zeminlere, çatlak kayalara enjekte edilebilir. Özgül yüzey alanı $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ ' dan fazladır (Tablo 2). Çimento ve sudan oluşan enjeksiyon karışımlarının reolojik özellikleri (dinamik viskozite ve sedimentasyon deneyinde kararlılık durumu) Şekil

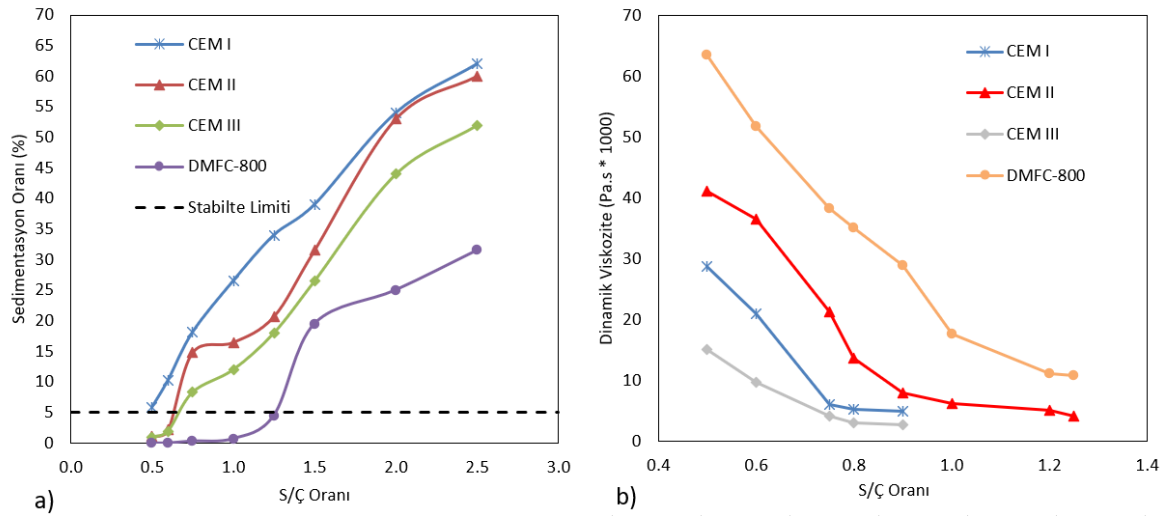
1' de verilmiştir. Çimento enjeksiyonlarının reolojik özellikleri ile ilgili kapsamlı araştırma sonuçları için Şenkaya, (2019)' a bakınız.

Tablo 1. Çimento türlerinin kütlece bileşen oranları

Bileşen türleri ve kütlece oranları (%)				
Çimento Türü	Klinker	Doğal Puzolan	Yüksek Fırın Cürufu	Diğer
CEM I	94	-	-	6
CEM II	80	20	-	-
CEM III	45	-	55	-
DMFC-800	95	-	-	5

Tablo 2. Çimento türlerinin indeks özellikleri

	CEM I	CEM II	CEM III	DMFC-800
Özgül yoğunluk (gr/cm ³)	3.12	3.11	2.97	3.0
Özgül yüzey alanı (m ² /kg)	345	450	469	800
Basınç dayanımı (MPa)				
2 günlük	29.5	29	16.7	25
28 günlük	59.8	58.8	53.5	60

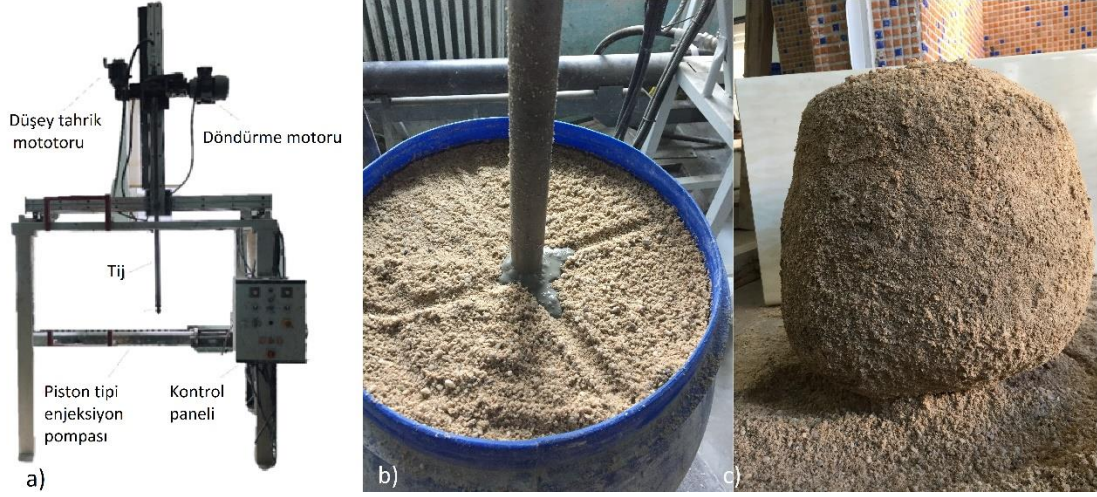


Şekil 1. Çimento ve sudan oluşan enjeksiyon karışımlarının reolojik özellikleri. a) Sedimentasyon deney sonuçları, b) dinamik viskozite değerleri

2.2. Model Jet Grout Kolonlarının Üretilmesi

Çimento-su karışımlarının pompa ile basılabilmesi ve reolojik özellikleri göz önünde bulundurularak; JG kolonları oluşturulacak her bir çimento tipi için S/Ç oranları 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 olarak seçilmiştir. DMFC-800 ince taneli çimento için ayrıca 2.00, 2.50 ve 3.00 oranları kullanılmıştır (Tablo 3). Çimento şerbetleri, belirlenen S/Ç oranlarında 1000 devir/dakika hızla en az 3 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır. JG kolonları, 90 cm çapında ve 110 cm yüksekliğinde varillere yerleştirilmiş kum zemin ile oluşturulmuştur (Şekil 2.b). Kum zemin varil içine %50 rölatif sıkılıkta yerleştirilmiştir. Kumun su içeriği %5 olarak

belirlenmiştir. JG kolonların üretiminde zemin ve çimento şerbeti özellikleri kadar düzenek ve sistem parametreleri de sonuca etki etmektedir. Bu nedenle, saha uygulamalarına benzer JG kolonlarının üretimi için uygun bir kolon üretim düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 2.a).



Şekil 2. a) Model JG oluşturma düzeneği, b) kolonun oluşturulduğu varil, c) oluşturulan model kolon

JG kolonlarının oluşmasını sağlayan sistem parametreleri ise ön deneylerle belirlenmiştir. Tijin çekme hızı 30 cm/dakika, dönüş hızı 10 devir/dakika ve enjeksiyon basıncı 35 bar olarak seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan enjeksiyon pompası saha ekipmanına benzer olarak piston tiptedir. Piston 12 litre kapasitelidir. Tij ucunda tek nozul bulunmakta olup, nozul çapı 2 mm'dir. Sistem mono akışkan Jet 1 sistemi prensibi ile çalışmaktadır. Sistem parametreleri tüm deneyler için sabit tutulmuştur. Farklı S/Ç oranlarına sahip enjeksiyon karışımları dört çimento tipi ile oluşturulmuş ve toplam 19 model JG kolon üretilmiştir (Şekil 2.c). Kolon Numaraları (KN) ve özellikleri Tablo 3' te verilmiştir.

Tablo 3. Model jet grout kolonlarının oluşturulduğu çimento tipi ve S/Ç oranı bilgileri

Kolon Nu.	Çimento Tipi	S/Ç Oranı
1	CEM I	0.75
2	CEM I	1.00
3	CEM I	1.25
4	CEM I	1.50
5	CEM II	0.75
6	CEM II	1.00
7	CEM II	1.25
8	CEM II	1.50
9	CEM III	0.75
10	CEM III	1.00
11	CEM III	1.25
12	CEM III	1.50
13	DMFC-800	0.75
14	DMFC-800	1.00
15	DMFC-800	1.25
16	DMFC-800	1.50
17	DMFC-800	2.00
18	DMFC-800	2.50
19	DMFC-800	3.00

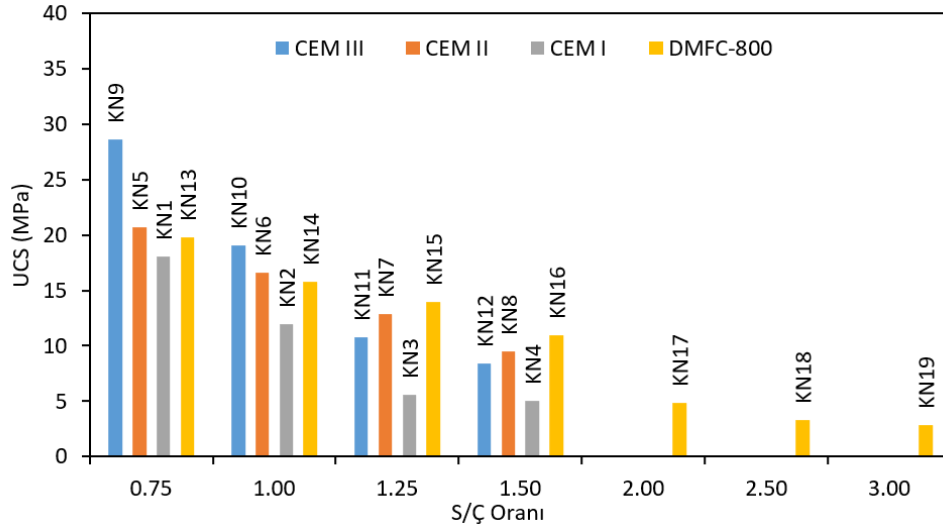
2.3. Karot Numune Alınması, Dayanım ve Geçirimlilik Deneyleri

JG kolonları üretildikten sonra kolonlar zemin içinde, zeminin su içeriği muhafaza edilerek, 90 gün boyunca küre bırakılmıştır. Mineral katkılı çimento türleri (CEM II ve CEM III) 28 günlük kür süresinden sonra önemli ölçüde dayanım artışı gösterdiğinden (İbrahim vd., 2018; Duxson vd., 2007; Duxson vd., 2005) kür süresi 90 gün olarak seçilmiştir. Kür sonunda kolonlar zeminden çıkarılarak, kolonların çap ve yükseklikleri ölçülmüştür. Kolon yüksekliklerinin hepsi yaklaşık 30 cm olarak ölçüldü, kolon çapları ise 28 cm ile 36 cm arasında değişiklik göstermiştir. Ölçümlerden sonra JG kolonlarından karot numuneler alınmış ve bu numunelerin serbest basınç dayanımları ASTM D 4219-02 standardına göre ve geçirimsizlik katsayısı değerleri ASTM D 5084-16a standardına göre belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Serbest Basınç Dayanımı Bulguları

Serbest basınç deneyleri, JG kolonları için ikişer karot numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çimento enjeksiyonunun S/Ç oranı arttıkça UCS değerleri azalmıştır. S/Ç oranı 0.75 olan kolonlarda (KN 1, 5, 9 ve 13), en yüksek UCS değeri CEM III ile oluşturulan KN9'a ait olmuştur (Şekil 3). CEM III' deki YFC puzolanik reaksiyonlar ile uzun vadede yüksek dayanım elde edilmesini sağlamıştır. CEM II çimentosu da puzolan katkılı bir çimento olmasına rağmen, S/Ç oranının 0.75 olduğu durum için CEM III çimentosu kadar basınç dayanımı sağlayamamıştır. KN9'un UCS değeri 28.62 MPa ve KN5'in (CEM II ve S/Ç = 0.75) UCS değeri 20.72 MPa olarak elde edilmiştir. Bu noktada, %28'lik farkın ortaya çıkmasında çimento enjeksiyon karışımlarının reolojik özellikleri belirleyici olmuştur (Şekil 3). S/Ç oranı 0.75 olan CEM III enjeksiyon karışımının dinamik viskozitesi ($4.20 \text{ Pa.s} \times 1000$), S/Ç oranı 0.75 olan CEM II enjeksiyon karışımının dinamik viskozitesinden ($21.30 \text{ Pa.s} \times 1000$) çok daha düşüktür (Şekil 1-b). CEM III çimento enjeksiyonu, düşük viskozitesi sayesinde CEM II çimento enjeksiyonuna göre zemine daha iyi nüfuz ederek daha homojen ve yüksek dayanımlı bir kolon oluşmasını sağlamıştır. Benzer bir ilişki, S/Ç oranı 1.00 olan enjeksiyonlar ile oluşturulan KN6 (16.59 MPa) ve KN10 (19.07 MPa) için de geçerlidir (Şekil 3). Ancak S/Ç oranının 1.00 olduğu durum için dayanım değerlerindeki fark %13'e düşmüştür. Bunun nedeni, S/Ç oranının 1.00 olduğu CEM II enjeksiyon karışımının viskozitesinin, S/Ç oranının 1.00 olduğu CEM III enjeksiyonunun viskozitesine daha yakın olmasıdır (Şekil 1-b). S/Ç oranları 0.75 ve 1.00 olan CEM II çimento enjeksiyonları kullanılarak oluşturulan JG kolonlarının (KN5 ve KN6) UCS değerlerinin, aynı S/Ç oranları dikkate alındığında, DMFC-800 çimento kolonlarından (KN13 ve KN14) biraz daha yüksek olduğu gözlenmiştir; ancak değerlerin oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 3). S/Ç oranının 0.75 ve 1.00 olduğu durumlarda DMFC-800 enjeksiyon karışımlarının viskozitesinin CEM II enjeksiyon karışımlarının viskozitesinden daha yüksek olmasına rağmen, DMFC-800 daha iyi nüfuz edebilme kabiliyeti sayesinde CEM II' ye yakın dayanım sonuçları elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 3. Model JG kolonlarının UCS değerlerinin S/Ç oranına göre değişimi

S/Ç oranı 1.25 ve 1.50 olan CEM II ve CEM III çimentolarının enjeksiyonları kullanılarak oluşturulan kolonların dayanımları dikkate alındığında, CEM II ile oluşturulan KN7 ve KN8 kolonlarının UCS değerleri CEM III ile oluşturulan KN11 ve KN12'nin UCS değerlerinden daha yüksek olmuştur (Şekil 3). CEM II çimentosunun pozolanik katkıları su ihtiyacını artırmış, bu da CEM II çimentolu kolonlarındaki fazla su miktarının CEM III çimento kolonlara göre daha az olmasına sebep olmuştur. Böylece, CEM II kolonlarında daha az gözenekli bir zemin-çimento harcı karışımı oluşturulabilmiştir. Bu nedenle CEM II çimentosu, yüksek miktarda su içeren enjeksiyonlarla oluşturulan kolonlarda CEM III çimentosuna göre daha yüksek dayanım sağlamıştır.

S/Ç oranlarının 1.25 ve 1.50 olduğu DMFC-800 çimento enjeksiyonları kullanılarak oluşturulan kolonların (KN15 ve KN16) UCS değerleri, aynı S/Ç oranlarına sahip olan CEM II (KN7, KN8) ve CEM III (KN11, KN12) enjeksiyonları kullanılarak oluşturulan kolonların UCS değerlerinden daha yüksek olmuştur (Şekil 3). Bu durum, DMFC-800 çimentosunun yüksek özgül yüzey alanı sayesinde hidrasyon reaksiyonlarında daha fazla su tüketmesi ve böylece daha az gözenekli zemin-çimento karışımı oluşmasına imkân sağlamasına bağlanabilir.

S/Ç oranları 0.75 ve 1.0 olan enjeksiyonlar kullanılarak oluşturulan kolonların UCS değerlerine bakıldığında en yüksek UCS değerleri CEM III çimentolu olanlarda elde edilmiştir. Enjeksiyondaki su miktarı arttığında DMFC-800 çimentosunun dayanıma katkısı diğer çimento türlerine göre daha yüksek olmuştur. S/Ç oranları 2.0, 2.5 ve 3.0 olan enjeksiyonlar kullanılarak oluşturulan DMFC-800 JG kolonlarının UCS değerleri, bu denli yüksek su içeriğine rağmen iyileştirilmiş zeminler için dikkate değer dayanım değerleri olduğu görülmektedir (Şekil 3). DMFC-800'ün kullanımı, su içeriği yüksek zeminler için etkili olabilir.

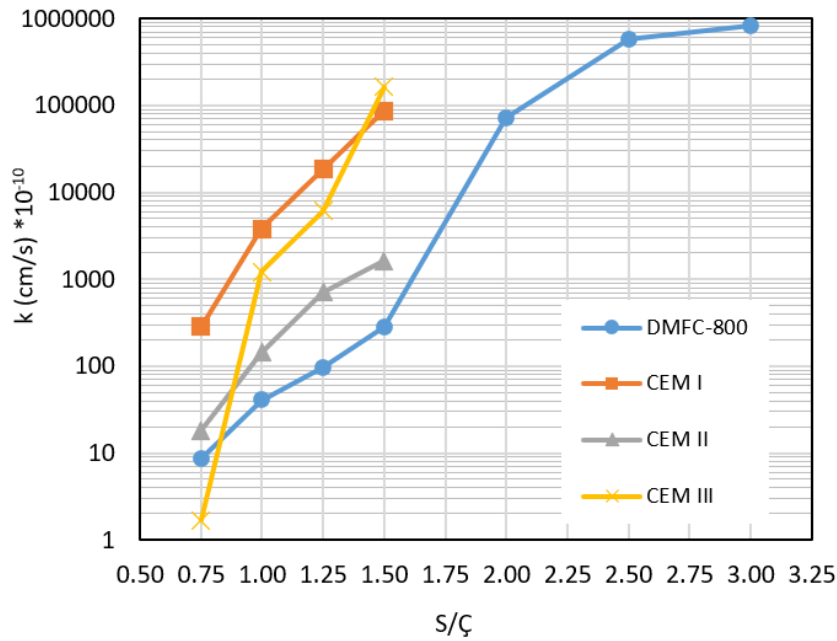
Normal Portland çimentosu olan CEM I kullanılarak oluşturulan JG kolonlarının UCS değerleri nispeten düşük olmuştur (Şekil 3). CEM II ve CEM III'ün pozolanik katkı içermesi uzun vadede yüksek dayanım kazanılmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, CEM II ve CEM III'ün özgül yüzey alanları CEM I'e göre daha yüksektir. DMFC-800 pozolanik katkı içermemesine rağmen, ince taneleri sayesinde diğer çimento türlerine göre zemine daha iyi nüfuz etmiş

ve iyileşmiş zemin yapısında hidratasyon fazlası suyun bıraktığı boşluk miktarı daha az olduğu için dayanımın yüksek olmasını sağlamıştır.

3.3. Geçirirlik Deney Bulguları

Geçirirlik deneyleri, JG kolonları için ikişer karot numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ortalama geçirirlik katsayısı değerleri Şekil 4’ te verilmiştir. Genel olarak, geçirirlik katsayıları S/Ç oranının artmasıyla artmış yani numuneler daha geçirirli hale gelmiştir. Literatürde; çimento enjeksiyonu ile özellikleri iyileştirilmiş kum zeminlerde, geçirirlik katsayısı değerinin azalmasının S/Ç oranı değişiminden ziyade tanecikler arasındaki boşlukların enjeksiyonla dolma yüzdesine bağlı olduğu, boşluklar tam anlamıyla kapanmadığı takdirde numunelerin geçirirlik durumlarında önemli bir azalma olmayacağı belirtilmiştir (Schwarz ve Krizek, 1994). Bu çalışmada rölatif sıklığı %50 civarında olan kumlu zemine yapılan enjeksiyon işlemi hemen her kolonda oldukça düşük geçirirlik elde edilmesini sağlamıştır.

Geçirirlik deneyleri sonuçlarına göre DMFC-800 ince taneli çimentosuyla hazırlanan numunelerin genel olarak daha geçirimsiz olduğu görülmektedir. Bu durum DMFC-800 çimentosunun enjeksiyonlarının zemine nüfuz etme kabiliyeti ile açıklanabilir. Çimento enjeksiyonlarının zemine nüfuz edebilme kabiliyetini etkileyen en önemli faktör çimentonun ortalama tane büyüklüğü ardından da enjeksiyonun reolojik özellikleridir.



Şekil 4. Model JG kolonlarının geçirirlik katsayısı değerlerinin S/Ç oranına göre değişimi

Şekil 5’ te aynı S/Ç oranına sahip iki farklı çimento enjeksiyonuyla iyileştirilmiş zeminin karşılaştırmalı görüntüsü verilmiştir. Şekilde DMFC-800 ince taneli çimento ve CEM I normal Portland çimentosunun S/Ç oranı 0.75 olan enjeksiyonlarıyla oluşturulmuş model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin yüzey görünüşleri verilmiştir. İyileştirilmiş ve sertleşmiş zeminden alınan silindirik birer kesit olan karot örneklerinin yüzeyleri iyileşmiş zeminin boşluk yapısı hakkında gözlem yapılmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 5. DMFC-800 ve CEM I çimentolarının S/Ç oranı 0.75 olan model JG kolonlarından alınan karot örneklerinin karşılaştırmalı görüntüsü.

İnce taneli çimentoya ait karot örneğinin yüzeyinde birkaç gözenek gözlemlenirken CEM I çimentosuyla hazırlanan kolonun karot örneği yüzeyinde çok daha fazla gözenek olduğu göze çarpmaktadır.

JG kolonlarının S/Ç oranı 0.75 olan geçirimsizlik katsayılarına bakıldığında CEM III çimentosuna ait numunenin ince taneli çimentonunkine göre daha geçirimsiz olduğu görülmektedir (Şekil 4). Fark oldukça az olmakla beraber bu durum enjeksiyonların reolojik özelliklerinden kaynaklanmıştır. CEM III çimentosu daha düşük viskoziteye sahip olduğundan zemine daha iyi nüfuz etmiş ve mikro yapıda taneler arası boşlukları daha iyi doldurmuştur.

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

CEM II çimentosu S/Ç oranı 1.0 değerinden itibaren CEM tipi çimentolar arasında en düşük geçirimsizlik değerlerinin elde edildiği çimento tipi olmuştur. CEM II çimentosunda da DMFC-800 çimentosunda olduğu gibi artan S/Ç oranına rağmen geçirimsizlikteki artış diğer CEM tipi çimentolarda olduğu kadar keskin olmamıştır (Şekil 4). CEM III çimentosuyla hazırlanan numunelerin geçirimsizlik katsayıları S/Ç oranının artmasıyla CEM II çimentosuna nispeten daha hızlı artmıştır. CEM III çimentosunun numunelerinin geçirimsizlik katsayısı k , S/Ç oranı 1.25 için 10^{-7} cm/s iken, 1.50 için 10^{-5} cm/s mertebesine düşmüştür. CEM II çimentosunun, enjeksiyonda artan su miktarıyla daha geçirimli hale gelme eğiliminin CEM III çimentosuna göre daha az olmasının nedeni çimento türüne göre değişen hidratasyon reaksiyonunda tüketilen su miktarıdır. Bu farkın tüketilen su miktarı üzerinde yarattığı etki çok küçük olsa da geçirimsizlik değerlerinin de çok küçük değerler olduğu ve birim zamanda numuneden geçen su miktarındaki mikrogramlık değişimlerle farkların oluştuğu unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, CEM III çimentosunun enjeksiyonlarının su ihtiyacı CEM II çimentosuna göre daha az olduğundan, enjeksiyondaki su miktarı arttıkça hidrasyon fazlası su iyileşmiş zemin yapısında daha fazla boşluk kalmasına neden olmuştur. Bu nedenle CEM III çimentosunun numuneleri artan su miktarıyla CEM II çimentosunun numunelerine göre daha geçirimsiz hale gelmiştir (Şekil 4).

CEM I çimentosuyla hazırlanan JG kolonlarından alınan karotlar en yüksek geçirimsizliğe sahip numuneler olmuştur. CEM I çimentosu hem en düşük özgül yüzey alanına sahip olması hem de enjeksiyonlarının yüksek viskoziteye sahip olması nedeniyle en yüksek geçirimsizlik katsayısı sonuçlarını vermiştir. Geçirimsizlik hususunda da katkısız Portland çimentosu olan CEM I, diğer çimentoların içeriklerinin ve özelliklerinin anlaşılmasında referans malzeme olmuştur. CEM II çimentosunun içeriğindeki doğal puzolanlar viskoziteyi artırarak düşük su içeren enjeksiyonlarda nüfuz etme kabiliyetini olumsuz etkilese de mikro yapıyı geliştirmeleri ve fazla su tuttukları için geçirimsizliği azaltmıştır. CEM III çimentosu içeriğindeki YFC enjeksiyon viskozitesini düşürdüğünden dolayı nüfuz etme kabiliyetini artırmış ayrıca mikro yapının gelişimini artırdığı için (puzolanik reaksiyonlar) CEM I' den daha geçirimsiz yapılar elde edilmesini sağlamıştır (Şekil 4).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört farklı çimento türünün ve çimentolar kullanılarak yapılan enjeksiyon karışımlarının Jet Grout kolonlarının dayanım ve geçirimsizlik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Puzolanik katkılar içeren çimentoların etkilerinin tam olarak ortaya çıkması için model JG kolonları 90 gün boyunca küre bırakılmıştır.

-Jet enjeksiyon işleminin mekanizması, zeminin mekanik olarak çimento enjeksiyonu ile karıştırılmasından çok farklıdır. Bu nedenle çimentonun ortalama tane çapı, diğer karakteristik özellikleri ve çimento enjeksiyonlarının reolojik özellikleri jet enjeksiyon ile iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri üzerinde etkili parametreler olmuştur.

-Çimentonun tane çapı küçüldükçe ve çimento enjeksiyonunun viskozitesi azaldıkça çimento enjeksiyonunun zemine nüfuz etme kabiliyeti artmıştır. Çimentonun zemine nüfuz etme kabiliyetinin artması zeminin enjeksiyonla daha homojen karışmasını, dolayısıyla dayanım ve geçirimsizlik özelliklerinin daha iyi olmasını sağlamıştır. CEM III çimentosu en düşük oranda su içeren enjeksiyon karışımında dahi düşük viskozitesi sayesinde zemine iyi nüfuz etmiş ve yüksek dayanım, düşük geçirimsizlik sağlamıştır. DMFC-800 ince taneli çimentosunun özgül yüzey alanının büyük olmasından dolayı enjeksiyon karışımlarının viskozitesi diğer çimentolardan daha yüksektir. Buna karşın küçük ortalama tane çapı sayesinde zemine iyi nüfuz etmiş katkılı çimentolara yakın dayanım değerleri sağlamıştır.

-DMFC-800 küçük tane yapısı sayesinde su içeriği çok yüksek olan enjeksiyon karışımlarında dahi düşük geçirimsizliğe sahip JG kolonları oluşturulmasını sağlamıştır. Geçirimsizlik sonuçlarını etkileyen diğer bir faktör ise çimento türünün suyla olan ilişkisi olmuştur. DMFC-800 ve CEM II çimentoları daha yüksek miktarda su içeren enjeksiyon karışımlarında diğer çimento türlerinden daha iyi sonuç vermiştir. Bunun nedeni bu iki çimento türünün priz sonrası yapılarında daha az serbest su boşluğu kalmasıdır. Bu durum mekanik özelliklerin daha iyi olmasını sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada „Farklı Çimento Tipleriyle Oluşturulmuş Jet Grout Kolonların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ultra Ses Yöntemiyle İncelenmesi“ isimli tez çalışmasında yer alan deneysel verilerden yararlanılmıştır. Deneysel araştırmalar için gerekli finansal desteği sağlayan Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkürlerimizi sunarız. (Proje No: 191004007)

KAYNAKLAR

- ASTM-C 939-02, Standard Test Method For Flow Of Grout For Preplaced aggregate Concrete (Flow Cone Method), Annual Book Of ASTM Standards, ASTM.
- ASTM-C 940-98a, Standard Test Method For Expansion And Bleeding Of Freshly Mixed Grouts For Preplaced Aggregate Concrete In The Laboratory, Annual Book Of ASTM, ASTM.
- ASTM-C 4219-02, Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength Index Of Chemical-Grouted, ASTM.
- ASTM-D 6913-04, Standard Test Methods For Particlesize Distribution (Gradation) Of Soils Using Sieve Analysis, West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM-D 698-12, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International.
- ASTM-D 4254-00, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International.
- ASTM-D5084-16a, Standard Test Methods For Measurement Of Hydraulic Conductivity Of Saturated Porous Materials Using A Flexible Wall Permeameter, ASTM International.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., vd. (2007), “Geopolymer Technology: The Current State Of The Art”, Journal of Material Science, Vol 42(9), 2917–2933.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., vd. (2005), “Understanding The Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure And Mechanical Properties”, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol 269(1-3), 47-58.
- EN197-1, Cement: Composition, Specifications and Conformity Criteria. European Committee for Standardization.
- EN-12715, Execution Of Special Geotechnical Work: Grouting. British-Adopted European Standard.
- Flora, A., Modoni, G., Lirer, S. (2013), “The Diameter Of Single, Double And Triple Fluid Jet Grouting Columns: Prediction Method And Field Trial Results”, Geotechnique, Vol 63(11), 934-945.
- Helson, O., Beaucour, A.L., Eslami, J., vd. (2017), “Physical And Mechanical Properties Of Soilcrete Mixtures: Soil Clay Content And Formulation Parameters” Construction and Building Materials, Vol (30)131, 775-783.
- Ibrahim, M., Johari, M.A.M., Rahman, M.K., vd. (2018), “Enhancing The Engineering Properties And Microstructure Of Room Temperature Cured Alkali Activated Natural Pozzolan Based Concrete Utilizing Nanosilica”, Construction and Building Materials, Vol 189, 352-365.
- Karahan, G.N., Sivrikaya, O. (2018). “Designing Singular Jet Grouting Column For Sandy Soils”, Environmental Earth Sciences, Environmental Earth Sciences, Vol 77(12), 458-469.

- Kirsch, K., Bell, A. (2012), "Ground Improvement", CRC Press, Londra.
- Lombardi, G. (1985), "The Role Of Cohesion In The Cement Grouting Of Rock", In: Proceedings, Fifteenth Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams, Lausanne 235–261.
- Markou, I., Droudakis, A. (2013), "Factors Affecting Engineering Properties Of Microfine Cement Grouted Sands", Geotechnical and Geological Engineering, Vol 31(4), 1041-1058.
- Modoni, G., Croce, P., Mongiovi, L. (2006), "Theoretical Modelling Of Jet Grouting", Geotechnique, Vol 56(5), 335-347.
- Njock, P.G.A., Shen, J.S., Modoni, G., vd., (2018), "Recent Advances In Horizontal Jet Grouting Overview". Arabian Journal of Science and Engineering, Vol 43(4), 1543-1560.
- Shen, S.L., Wang, Z.F., Yang, J., vd., (2013), "Generalized Approach For Prediction Of Jet Grout Column Diameter" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 139(12), 2060-2069.
- Schwarz, L.G., Krizek, R.J. (1994), "Effect Of Preparation Technique On Permeability And Strength Of Cement-Grouted Sand", Geotechnical Testing Journal, Vol 17(4), 434-443.
- Şenkaya, A. (2019), Farklı Çimento Tipleriyle Oluşturulmuş Jet Grout Kolonların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ultra Ses Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi.
- Xanthakos, P.P., Abramson, L.W., Bruce, D.A. (1994), "Jet Grouting. In: Ground Control and Improvement", John Wiley & Sons, Inc.
- Zebowitz, S., Krizek, R.J., Atmatzidis, D.K. (1989), "Injection Of Fine Sands With Very Fine Cement Grout", Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol 115(12), 1717-1733.