



## The effect of different curing temperatures and different curing conditions on the permeability of microfine cement grouted sands

Eyübhan Avcı<sup>1\*</sup>, Emre Deveci<sup>1</sup>, Aydın Gökçe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Science, Department of Civil Engineering, Bursa, 16310, Turkey

<sup>2</sup>Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ankara, 06570, Turkey

### Highlights:

- Rheological properties of microfine cement suspensions
- Groutability of microfine cement suspensions into fine to medium sands
- Effect of curing conditions and temperatures on the permeability coefficients of grouted sands

### Keywords:

- Curing temperature
- Curing condition
- Microfine cement
- Permeability

### Article Info:

Research Article  
Received: 23.03.2021  
Accepted: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.900487

### Correspondence:

Author: Eyübhan Avcı  
e-mail:  
eyubhan.avci@btu.edu.tr  
phone:+90 507 465 6336

### Graphical/Tabular Abstract

In this experimental study, the effect of different curing temperatures and different curing conditions on the permeability coefficient of the microfine cement grouted sand was investigated. Falling head permeability tests were carried out on days 3, 7, 14, 28, 56 and 120 by keeping the samples that are successful in injection at different curing temperatures and different curing conditions. While the permeability coefficients of the samples injected with microfine cement and kept in the wet cured decreased with time, the permeability coefficients of the samples kept in the air dried increased with time. Increasing the temperature increased the permeability coefficient of the samples kept in the wet cured, while reducing the permeability coefficient of the samples kept in the air dried. As a result of injection with microfine cement to sand mixtures, the permeability coefficients of the sand samples decreased between  $10^{-6}$  and  $10^{-8}$  times.

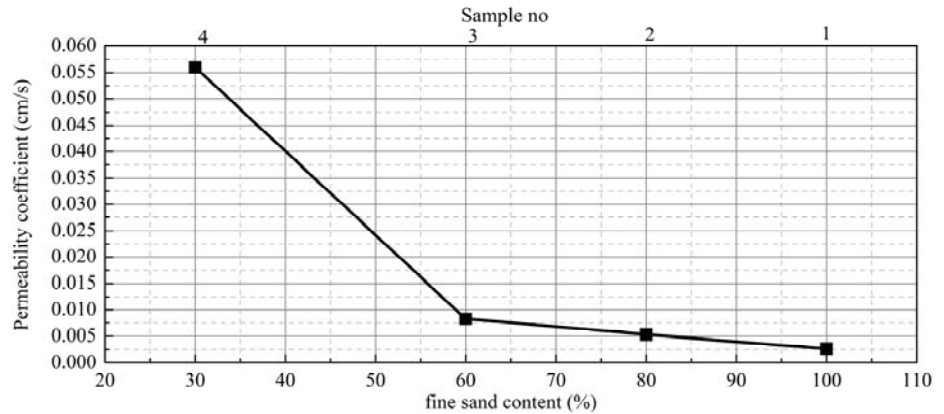


Figure A. Permeability coefficients of sand samples before injection

**Purpose:** In this experimental study, the effect of different curing temperatures and curing conditions on the permeability coefficients of microfine cement grouted sands was investigated.

### Theory and Methods:

The samples that were successful in the injection experiments were kept under different curing conditions and temperatures, and the falling head permeability tests were carried out on the samples.

### Results:

The permeability coefficients of sand samples, which were injected with microfine cement and kept in an air-dried, increased with the increase in temperature. The permeability coefficients of the sand samples kept in the wet-cured decreased with the increase of the temperature.

### Conclusion

Experimental studies have shown that different curing conditions and temperatures affect the permeability coefficient of microfine cement grouted sands.



## Farklı kür sıcaklıkları ve kür koşullarının ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum zeminlerin permeabilite katsayısına etkisi

Eyüphan Avcı<sup>1\*</sup>, Emre Deveci<sup>1</sup>, Aydın Gökçe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İnce taneli çimento süspansiyonlarının reolojik özellikleri
- İnce taneli çimento süspansiyonlarının ince ve orta kum karışımlarına enjekte edilebilirlikleri
- Enjeksiyon yapılmış kum numunelerin permeabilite katsayılarına kür koşullarının ve kür sıcaklıklarının etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 23.03.2021  
Kabul: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.900487

### Anahtar Kelimeler:

Kür sıcaklığı,  
kür koşulları,  
ince taneli çimento,  
permeabilite

### ÖZ

Bu deneysel çalışmada farklı kür sıcaklıkları ve farklı kür koşullarının ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum numunelerin permeabilite katsayısına etkisi araştırılmıştır. Deneylere farklı Su/Çimento (S/Ç) oranlarında hazırlanmış ince taneli çimento süspansiyonlarının reolojik özelliklerinin (sedimentasyon, viskozite ve katılma süresi) belirlenmesi deneyleri ile başlanmıştır. Reolojik özellikler belirlendikten sonra S/Ç oranları 1,5, 1,8, 2,1 ve 2,5 olan ince taneli çimento süspansiyonları ile farklı gradasyonda ve %30 rölatif sıklıkta hazırlanmış kum numunelere enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numuneler farklı kür sıcaklıkları ve farklı kür koşullarında bekletilerek 3, 7, 14, 28, 56 ve 120. günlerde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış ve kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları zamana bağlı olarak azalırken, açık ortamda bekletilen numunelerin permeabilite katsayısını artırırken, açık ortamda bekletilen numunelerin permeabilite katsayısını azaltmıştır. İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış ve açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayı değerleri kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayı değerlerinden yüksek çıkmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar farklı kür süresi ve sıcaklığının ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum numunelerin permeabilite katsayısını etkilediğini göstermiştir.

## The effect of different curing temperatures and different curing conditions on the permeability of microfine cement grouted sands

### H I G H L I G H T S

- Rheological properties of microfine cement suspensions
- Groutability of microfine cement suspensions into fine to medium sands
- Effect of curing conditions and temperatures on the permeability coefficients of grouted sands

### Article Info

Research Article  
Received: 23.03.2021  
Accepted: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.900487

### Keywords:

Curing temperature,  
curing condition,  
microfine cement,  
permeability

### ABSTRACT

In this experimental study, the effect of different curing temperatures and different curing conditions on the permeability coefficient of the microfine cement grouted sand was investigated. The experiments started with the determination of the rheological properties of the microfine cement suspensions prepared with different Water/Cement (W/C) ratios. After determining the rheological properties, injection experiments were carried out on sand samples prepared in different gradations and 30% relative densities with microfine cement suspensions with W/C ratios of 1.5, 1.8, 2.1 and 2.5. Falling head permeability tests were carried out on days 3, 7, 14, 28, 56 and 120 by keeping the samples that are successful in injection at different curing temperatures and different curing conditions. While the permeability coefficients of the samples injected with microfine cement and kept in the wet cured decreased with time, the permeability coefficients of the samples kept in the air dried increased with time. Increasing the temperature increased the permeability coefficient of the samples kept in the wet cured, while reducing the permeability coefficient of the samples kept in the air dried. The permeability coefficients of the samples that were injected with microfine cement and kept in the air dried were higher than the permeability coefficients of the samples that were kept in the wet cured. Experimental studies have shown that different curing time and temperature affect the permeability coefficient of the injected sand samples with microfine cement.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enjeksiyon, zemin veya kaya içindeki boşluklara enjeksiyon malzemesinin basınç altında enjekte edilmesi işlemidir. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında birçok enjeksiyon tekniği kullanılmaktadır [1, 2]. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı permeasyon enjeksiyonudur [3]. Permeasyon enjeksiyonu, düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesinin, düşük basınçlar altında, zeminde herhangi bir hidrolik kırılma, öteleme ve yer değiştirme yapmadan zemin içindeki boşluklara enjekte edilmesi işlemidir [4, 5]. Zemin içindeki boşluklara enjekte edilen enjeksiyon malzemesi zamanla sertleşerek zeminin dayanım ve geçirgenlik özelliklerini iyileştirmektedir [3-5].

Permeasyon enjeksiyonunda suspansiyon ve solüsyon türü enjeksiyon malzemeleri kullanılmaktadır. Permeasyon enjeksiyonu uygulamalarında Portland çimentoları yaygın olarak kullanılmaktadır. Portland çimentosunun partikül boyutunun büyük olması sebebiyle çalışma alanları iri kumlara kadar olan gradasyonla sınırlı kalmıştır. Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin de çevrede toksik etki oluşturmaları sebebiyle kullanım alanları çoğu ülkede yasaklanmıştır. Daha küçük gradasyonlara sahip olan zeminlere enjekte olabilecek malzeme arayışı ile ortaya ince taneli çimentolar çıkmıştır. İnce tane çimentolar ACI (American Concrete Institute) tarafından partikül dane çapı 15 µm den küçük olan çimentolar olarak tanımlanmaktadır [6]. Piyasada birçok firma tarafından birçok değişik ad altında ve birbirinden farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip ince taneli çimentolar üretilmiştir [7, 8]. Bunlardan bazıları MC-100, Micromix, Microdur RX, Finosol X, Microcem B, Superfine L, Spinor A12 ve Allofix MS dir [9, 10]. Avcı, Perret vd., Håkansson vd., Schwarz ve Krizek, Zhang vd. tarafından ince taneli çimentoların reolojik özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır [5-9]. Yapılan çalışmalarda ince taneli çimentoların reolojik özelliklerinin Portland çimentolara oranla daha iyi özellik gösterdiği görülmüştür [7-10]. İnce taneli çimentoların kum zeminlere enjekte edilebilirliği üzerine de birçok araştırma yapılmıştır [11, 12]. Yapılan çalışmalarda ince taneli çimentolar ile ince kumlara kadar enjeksiyon yapılabileceği görülmüştür [13, 14]. Ayrıca araştırmacılar tarafından enjeksiyon yapılmış numunelerin mühendislik özellikleri de incelenmiştir [15, 17]. Yapılan çalışmalarda, ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum zeminlerin dayanım değerlerinin arttığı ve geçirgenlik özelliklerinin azaldığı görülmüştür [17, 18]. Mirza vd. [19] tarafından farklı ortam sıcaklıklarının ince taneli çimento süspansiyonlarının reolojik özelliklerini etkileri

incelenmiştir. Literatürde ince taneli çimentolar ile kum zeminlerin mühendislik özelliklerini belirlemeye yönelik birçok çalışma bulunmasına rağmen farklı kür sıcaklıkları ve farklı kür koşullarının, ince taneli çimentolar ile enjeksiyon yapılmış zeminlerin mühendislik özelliklerine etkileri üzerine bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu deneysel çalışmada farklı kür sıcaklıkları ve farklı kür koşullarının ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum zeminlerin permeabilite katsayılarına etkisi araştırılmıştır. Yapılan bu çalışma ile arazideki zemin yüzeyinde kalan bölgeler ile yeraltı suyu altında kalan bölgeler (farklı zemin koşulları) laboratuvar koşullarında oluşturulmaya çalışılmıştır. Ayrıca enjeksiyon sonrası arazide oluşabilecek mevsimsel sıcaklık farklılıkları ve zeminlerdeki sıcaklık değişimleri de göz önüne alınarak farklı sıcaklıklar altında permeabilite katsayılarındaki değişim de araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Deneylerde Kullanılan Kum Numunelerin Özellikleri (The Properties of Sand Samples Used in Experiments)

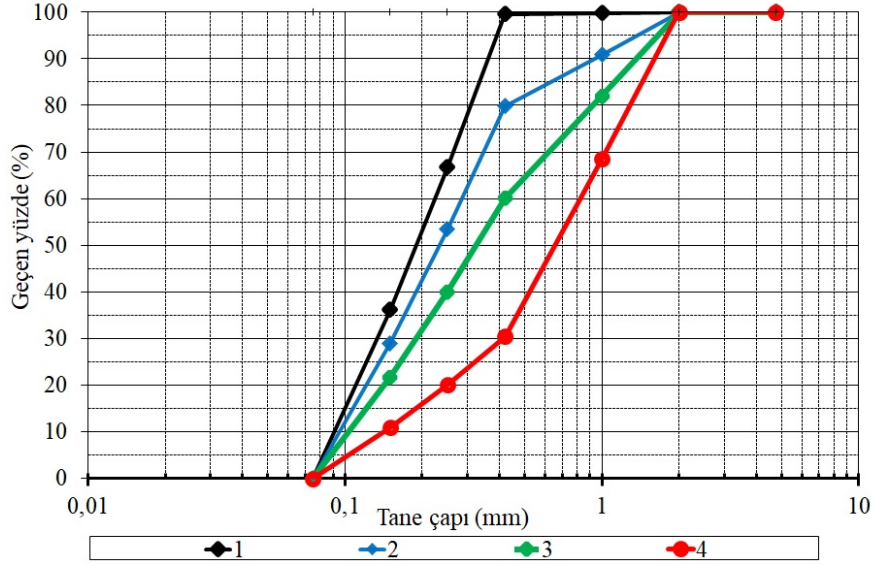
Enjeksiyon deneylerinde Çorum ili Osmaniye ilçesinden geçen Kızılırmak nehir kumu kullanılmıştır. Elde edilen kumlar elekler yardımıyla iki guruba ayrılmıştır. 10 nolu elekten geçen ve 40 nolu elek üzerinde kalan malzemeler orta kum, 40 nolu elekten geçen ve 200 nolu elek üzerinde kalan malzemeler ise ince kum olarak gruplandırılmıştır. Elek analizi deneylerinin yapılması ve zeminlerin gruplandırılmasında (ince kum ve orta kum) ASTM D6913M-17 ve ASTM D2487 - 17e1'de belirtilen standartlara uyulmuştur [20, 21]. Elekler yardımıyla elde edilen ince ve orta kum zeminler enjeksiyon deneylerinde kullanılmak üzere 4 farklı gradasyon oluşacak şekilde farklı karışım oranlarında karıştırılmıştır. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kum zeminlerin karışım oranları ve USCS zemin sınıfları Tablo 1'de, gradasyon eğrileri Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan kumların maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıkları ve boşluk oranları da belirlenmiştir [22, 23].

### 2.2. İnce Taneli Çimento (Microfine Cement)

Yapılan deneysel çalışmada Holcim firması tarafından üretilmiş Spinor A6 ince taneli çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun maksimum partikül boyutu (D100) 6 µm olup spesifik yüzey alanı 11,800 cm<sup>2</sup>/g dir. Spinor A6 ince taneli çimentosu cüruf kökenli bir çimento olup içeriğinde %80

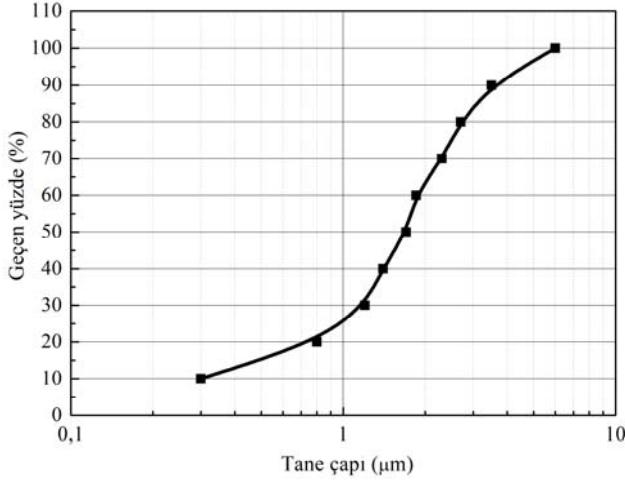
**Tablo 1.** Enjeksiyon deneyinde kullanılan kum numuneler (The sand samples used in grouting tests)

Örnek No	Tane boyu yüzdesi (%)		$\gamma_{k(max.)}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{k(min.)}$ kN/m <sup>3</sup>	$e_{mak.}$	$e_{min.}$	USCS
	İnce	Orta					
1	100	0	15,82	12,65	1,145	0,716	SP
2	80	20	15,74	12,73	1,132	0,724	SP
3	60	40	15,61	12,78	1,125	0,736	SP
4	30	70	15,38	13,05	1,079	0,762	SP



Şekil 1. Deneysel kumların gradasyon eğrileri (Grain-size distribution of sand samples used in experiments)

cüruf, %20 Portland çimentosu bulunmaktadır. Deneysel kullanılan Spinor A6 ince taneli çimentosuna ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Deneysel kullanılan ince taneli çimentonun granülometri eğrisinin belirlenmesinde 'Mastersizer 3000' marka tane boyu dağılımı belirleme cihazı kullanılmıştır. İnce taneli çimento için granülometri eğrisi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. İnce taneli çimento için granülometri eğrisi (Grain-size distributions of microfine cement)

### 2.3. İnce Taneli Çimentonun Reolojik Özellikleri (The Rheological Properties of Microfine Cement)

S/Ç oranı 1,5, 1,8, 2,1 ve 2,5 olan ince taneli çimento enjeksiyonları üzerinde reolojik özellik belirleme deneyleri yapılmıştır. Reolojik özellik belirleme deneyleri kapsamında ince taneli çimento süspansiyonlarına Sedimentasyon, Viskozite ve Priz süresi belirleme deneyleri yapılmıştır. Tüm reolojik özellik belirleme deneyleri +20°C sıcaklıkta yürütülmüştür.

1158

Tablo 2. İnce taneli çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

(Physical and chemical properties of microfine cement)

Kimyasal Özellikler	SiO <sub>2</sub>	30,0
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,5
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,25
	CaO	45,0
	MgO	5,6
	SO <sub>3</sub>	—
Fiziksel Özellikler	İçeriği	%80 Cüruf+%20 Portland
	D <sub>50</sub> (µm)	1,7
	D <sub>95</sub> (µm)	4,0
	Özgül ağırlık	2,94
	İncelik (cm <sup>2</sup> /g)	11.800

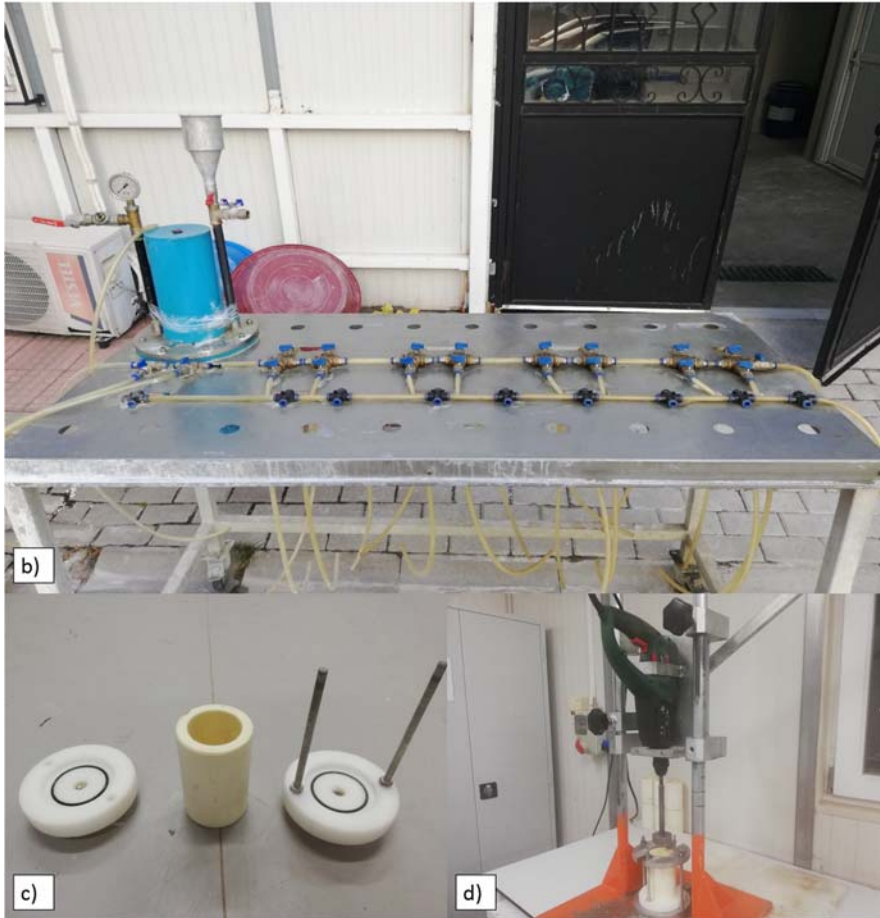
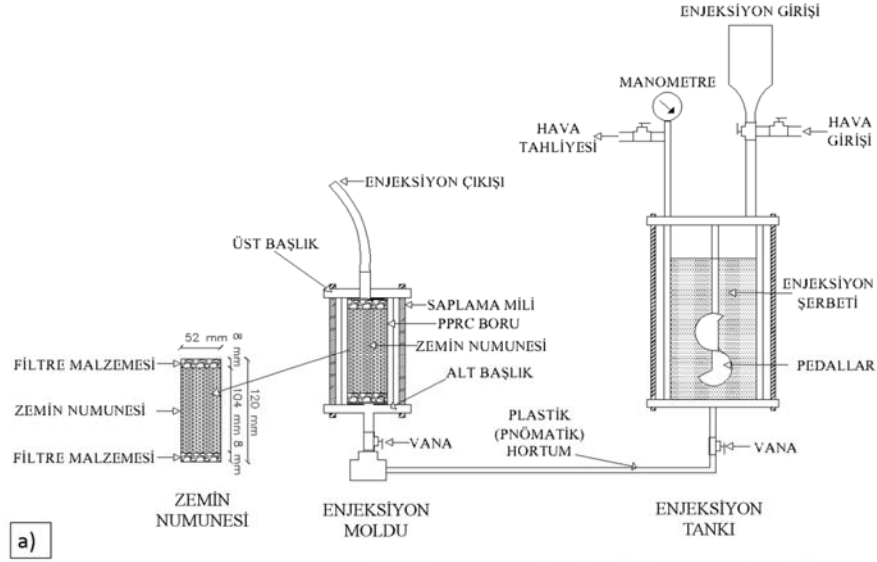
Sedimentasyon deneyi, çimento süspansiyonlarındaki partiküllerin zamanla çökmesi ve çökmesi sonrasındaki yüzdeye dayanır. 2 saatin sonunda 1000 ml'lik cam mezür üzerinde berraklaşan su hacmi belirlenir ve bu değer toplam hacme bölünür. Hesaplanan bu oran %5 den küçük ise süspansiyon "stabil" olarak tanımlanır. Bu oranın %5'den büyük olması ise süspansiyona "stabil değil" denir. Sedimentasyon deneyleri yapılırken ASTM C940-16 standartına uyulmuştur [24].

Farklı S/Ç oranında hazırlanmış ince taneli çimento süspansiyonları üzerinde akışkanlık özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla ASTM D 2196-18e1 [25] standartına göre viskozite deneyleri yapılmıştır. İnce taneli çimento süspansiyonlarının viskozite değerlerinin belirlenmesinde Brookfield DV-III marka reometre cihazından yararlanılmıştır. Viskozite değerleri ölçülürken kayma hızı 100 1/sn alınmıştır. Farklı S/Ç oranlarında hazırlanmış ince taneli çimento süspansiyonlarının priz başlangıç ve priz bitiş sürelerinin bulunması için ince taneli çimento süspansiyonları üzerinde ASTM C191-19 [26] standartına göre Vicat iğnesi deneyi yapılmıştır.

#### 2.4. Enjeksiyon Deneyleri (Grouting Tests)

Enjeksiyon deneyleri için enjeksiyon deney düzeneği yaptırılmıştır. Enjeksiyon deney düzeneği enjeksiyon

masası, mikserli enjeksiyon tankı, 80 adet enjeksiyon kalıbı, kompresör, manometre ve ara bağlantı elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 3). Enjeksiyon kalıbı 52 mm çapında, 120 mm yüksekliğinde PPRC (Polipropilen Random



**Şekil 3.** Enjeksiyon ekipmanı: a) Deney düzeneği şematik gösterim; b) Deney düzeneği fotoğrafı; c) Enjeksiyon kalıbı; d) Titresimli tokmak

(Injection equipment: a) Schematic representation of experimental setup; b) Experimental setup photo; c) Injection mold; d) Vibratory rammer)

Copolimer) malzemeden ve alt ve üst başlık kestamit malzemeden üretilmiştir (Şekil 3). Enjeksiyon kalıpları hem dayanım hem de permeabilite deneylerinde kullanılabilir. Kalıplara yerleştirilecek kum karışımlarının rölatif sıklıklarının ayarlanmasında özel tasarım titreşimli tokmaktan yararlanılmıştır. Enjeksiyon düzeneği içerisinde yer alan enjeksiyon tankı içinde 100 dev/dak hızla dönen redüktörlü motor ve iç kısımda motora bağlı pedallar bulunmaktadır. Enjeksiyon malzemesinin enjeksiyon tankı ve kalıplar arasındaki ana bağlantısını sağlamak için takılıp sökülebilmeye kolay plastik (pnömatik) borular kullanılmıştır. Her bir enjeksiyon kalıbının ana plastik boruya bağlantısı vanalarla sağlanmaktadır. Vanalardan çıkan enjeksiyon şerbeti plastik (pnömatik) borular vasıtasıyla kalıplara geçiş yapmaktadır (Şekil 3).

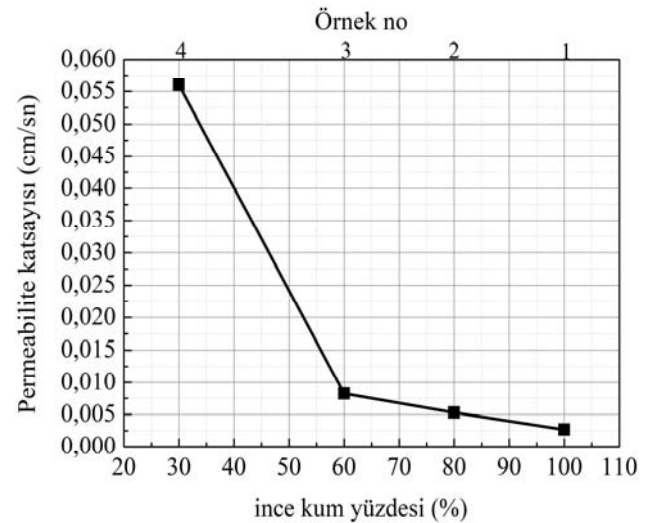
Kalıplar içine numuneler %30 rölatif sıklıkta 3 tabaka halinde yerleştirilmiştir. Kalıp içine kum numuneler yerleştirilmeden önce enjeksiyon işleminden sonra numunelerin kalıplardan çıkışını sağlamak amacıyla kalıbın içi ve başlıklar yağlanmıştır. Kalıba kum numuneler yerleştirilmeden önce kalıbın altına 0,8 cm olan iri kumdan oluşan filtre malzeme yerleştirilmiştir. Filtrenin üzerine hesaplanan miktardaki numuneler belirlenen rölatif sıklıkta 3 tabaka halinde yerleştirilip, titreşimli tokmak ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma esnasında tabakaların istenilen rölatif sıklığa ulaşip ulaşmadığı ölçülmüştür. Kum karışımlarının kalıba yerleştirilmesinden sonra en üste tekrar tabaka kalınlığı 0,8 cm olan iri kumdan oluşan filtrasyon malzemesi yerleştirilmiş ve kalıp üst başlığı kapatılarak sabitlenmiştir (Şekil 3). Kalıp içine yerleştirilecek ince ve orta kum karışımlarının miktarlarının hesaplanmasında maksimum ve minimum boşluk oranları yardımı ile bulunan gerekli boşluk oranından ( $e_o$ ) yararlanılmıştır. Belirlenen hacim (V) ve boşluk oranı için ( $e_o$ ) kalıbın içine ne kadar numune (M) yerleştirileceği ilgili formüller yardımıyla hesaplanmıştır. Numunelerin kalıpların içine yerleştirilmesinden sonra kalıplar enjeksiyon deney düzeneğine bağlanmıştır. Enjeksiyon öncesi numunelere kalıpların altından 0.030 MPa basıncında su verilerek numuneler hem suya doyurulmuş hem de hiç hava kabarcığı oluşmayana kadar suyun numunelerden akmasına izin verilmiştir (Şekil 3).

İnce taneli çimento ve su yaklaşık üç dakika boyunca 3000 rpm'de hızda çalışan çimento mikserinde karıştırılmış ve daha sonra enjeksiyon tankına boşaltılmıştır. Daha sonra enjeksiyon tankında bulunan 100 rpm hızda çalışan redüktörlü motor enjeksiyon tamamlanana kadar süspansiyon içinde herhangi bir çökme oluşmaması için çalıştırılmıştır. Kompresör yardımıyla enjeksiyon tankına basınç verilerek her numunenin minimum enjeksiyon basınç değerleri belirlenmiştir. Minimum enjeksiyon basınç değerleri belirlenirken permeasyon enjeksiyonu sınır değerinin (0,5 MPa) aşılmasına özen gösterilmiştir. Enjeksiyon basınç ölçümlerinde hassas manometre kullanılmıştır.

## 2.5. Permeabilite Deneyleri (Permeability Tests)

Deneylerde kullanılacak farklı gradasyondaki kum numunelere ASTM D2434-68 [27] standartına göre sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılarak kum numunelerin permeabilite katsayıları belirlenmiştir (Şekil 4). Yapılan deneylerde kum numunelerin permeabilite katsayıları  $2,67 \times 10^{-3}$  cm/s ile  $5,55 \times 10^{-2}$  cm/s arasında bulunmuştur.

Enjeksiyon sonrası priz süreleri tamamlandıktan sonra kalıpların alt ve üst başlıkları çıkartılmış ve numuneler kalıplardan çıkartılmadan kür odasına taşınmıştır. Kür odasına alınmış numunelerin bir kısmı açıkta bırakılmış bir kısmı ise sıcaklığı ayarlanmış kür tankına alınmıştır. Numuneler +10°C, +20°C ve +30°C kür sıcaklıkları olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta ve açık ortam ve kür tankı olmak üzere 2 farklı kür koşulunda bekletilmiştir. Kür süresi boyunca kür odasının sıcaklık ayarı Dijital Oda Termostatı ile kür tankının sıcaklık ayarı ise termostat kontrollü ısıtıcı ve sirkülasyon pompası ile sağlanmıştır. Kür odasının sıcaklık kontrolü oda içerisinde yerleştirilmiş olan termometre ile kür tankının sıcaklık ölçümü ise sıvı termometresi ile ölçülmüştür. Enjeksiyon deneylerinde başarılı olan ve iki farklı kür koşulunda bekletilen numunelere 3., 7., 14., 28., 56 ve 120. günlerde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılırken ASTM D5856-95 [28] standartına uyulmuştur. Düşen seviyeli permeabilite deneyleri için 80 numuneye aynı anda deney yapabilecek kapasitede düşen seviyeli permeabilite deney düzeneği kurulmuştur. Düşen seviyeli permeabilite deneylerinde hidrolik eğim 19 alınmıştır. Hidrolik eğim değeri belirlenirken ASTM D5856-95'de [28] belirtilen referans değer aralıkları dikkate alınmıştır. Permeabilite deneyleri numunelere kür ortamında bekletildikleri sıcaklıklarda yapılmıştır. Permeabilite deneyi öncesi numunelerin alt ve üst başlıkları takılarak numuneler permeabilite deney düzeneğine yerleştirilmiş ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.

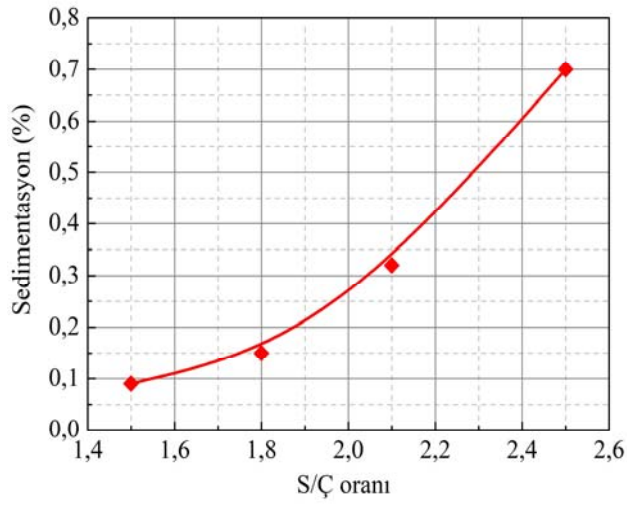


Şekil 4. Kum numunelerin permeabilite katsayıları (Permeability coefficients of sand samples)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Sedimentasyon, Viskozite ve Katılaşma Süreleri (Bleeding, Viscosity and Setting Times)

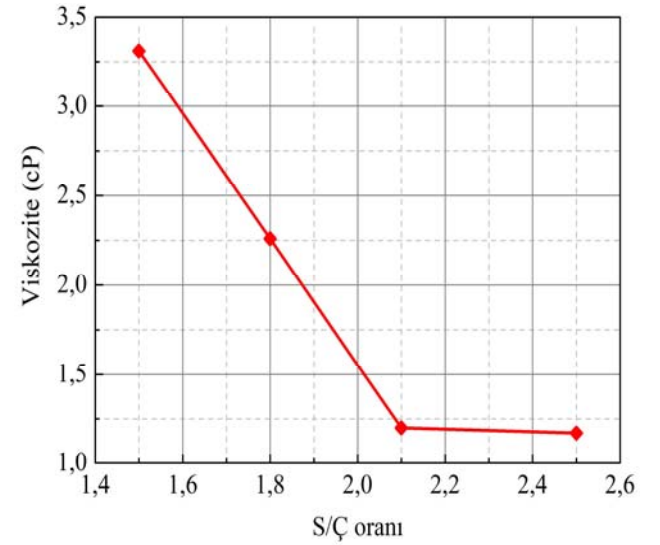
Farklı S/Ç oranlarında hazırlanan ince taneli çimento süspansiyonlarına ait Sedimentasyon deney sonuçları Şekil 5’de görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde ince taneli çimento süspansiyonlarının sedimentasyon yüzdelерinin S/Ç oranları 1,5, 1,8, 2,1 ve 2,5 için sırasıyla 0,09, 0,15, 0,32 ve 0,7 olduğu görülmektedir. Sedimentasyon deneyi sonucunda tüm ince taneli çimento süspansiyonlarının sedimentasyon yüzdeleri %5’in altında ve stabil olduğu görülmüştür. (Şekil 5). S/Ç oranının artması ile sedimentasyon yüzdesi artmıştır.



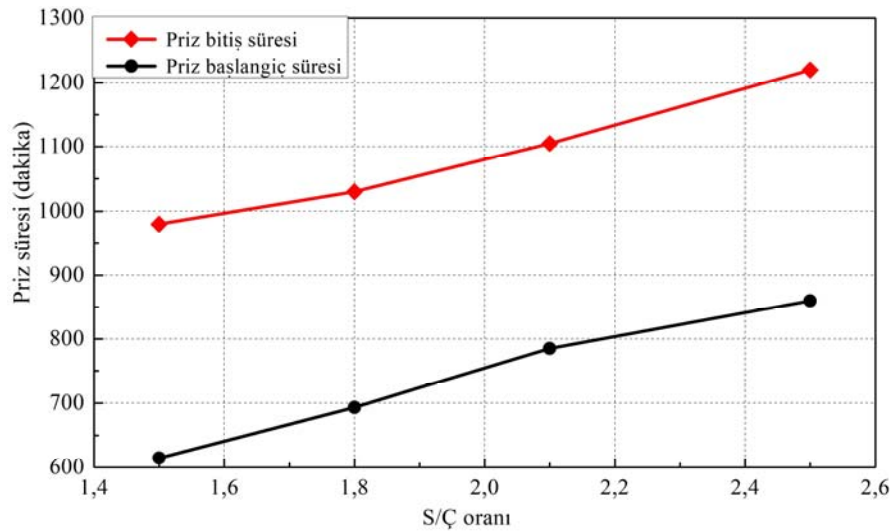
**Şekil 5.** Farklı S/Ç oranlarında hazırlanmış ince taneli çimento süspansiyonlarının sedimentasyon yüzdeleri (Bleeding percentages of microfine cement suspensions with different W/C ratios)

S/Ç oranı 1,5, 1,8, 2,1 ve 2,5 olan ince taneli çimento süspansiyonlarının viskozite deney sonuçları Şekil 6’da verilmiştir. Viskozite deney sonuçlarına göre ince taneli çimento süspansiyonlarının viskozite değerleri S/Ç oranları 1,5, 1,8, 2,1 ve 2,5 için sırasıyla 3,31, 2,26, 1,20 ve 1,17 cP olarak bulunmuştur. S/Ç oranının artması viskozite değerlerini azaltmıştır (Şekil 6).

Şekil 7’de farklı S/Ç oranında hazırlanmış çimento süspansiyonlarının priz başlangıç ve priz bitiş süreleri verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde S/Ç oranının artması ile priz başlangıç ve priz bitiş sürelerinin uzadığı görülmektedir. S/Ç oranları 1,5, 1,8, 2,1 ve 2,5 için priz başlangıç süreleri sırasıyla 615, 693, 785 ve 860 dakika ve priz bitiş süreleri sırasıyla 980, 1030, 1105 ve 1220 dakika olarak bulunmuştur.



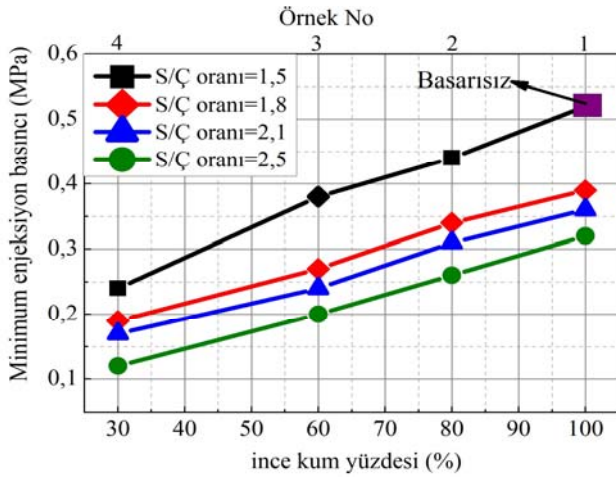
**Şekil 6.** Farklı S/Ç oranlarında hazırlanmış ince taneli çimento süspansiyonlarının viskoziteleri (Viscosities of microfine cement suspensions with different water/cement ratios)



**Şekil 7.** Farklı S/Ç oranlarında hazırlanmış ince taneli çimento süspansiyonlarının katılaşma süreleri (Setting times of microfine cement suspensions with different W/C ratios)

### 3.2. Enjektte Edilebilirlik (Injectability)

S/Ç oranları 1,5, 1,8, 2,1 ve 2,5 olan ince taneli çimento süspansiyonları ile ince ve orta kum karışımları üzerinde enjeksiyon deneyleri yapılmış ve deney sonuçları Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde enjeksiyon deneylerinde S/Ç oranı 1,5 da 1 nolu numune dışında tüm numunelerde başarı sağlandığı görülmektedir. S/Ç oranı 1,8, 2,1 ve 2,5 ile yapılan enjeksiyonlarda ise tüm numunelerde başarı sağlanmıştır. Enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numunelerin minimum enjeksiyon basınç değerleri S/Ç oranı 1,5 için 0,44 MPa ile 0,24 MPa arasında, S/Ç oranı 1,8 için 0,39 MPa ile 0,19 MPa arasında, S/Ç oranı 2,1 için 0,36 MPa ile 0,17 MPa arasında ve S/Ç 2,5 oranı için 0,32 MPa ile 0,12 MPa arasında bulunmuştur. (Şekil 8). S/Ç oranının artması enjektte edilebilirliği artırırken ince kum yüzdesinin artması enjektte edilebilirliği azaltmıştır (Şekil 8). Benzer davranışlar Zebovitz vd., Eklund ve Stille ve Markou vd. tarafından yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir [3,29-30]. İnce kum yüzdesinin artması ile minimum enjeksiyon basınçları artmıştır.



Şekil 8. Minimum enjeksiyon basınç değerlerinin ince kum yüzdesi ile değişimi

(Variation of minimum injection pressure values with fine sand content)

Kullanılan enjeksiyon malzemesinin enjektte edilebilirliği Burwell kriterlerine göre de değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir. Burwell enjektte edilebilirliğin değerlendirilmesinin yapılmasında enjektte edilebilirlik katsayıları N ve N\*’nü tanımlamıştır (Eş. 1 ve Eş. 2) [31].

$$N = D_{15(ze\ min)} / D_{85(enjeksiyon)} \quad (1)$$

$$N^* = D_{10(ze\ min)} / D_{95(enjeksiyon)} \quad (2)$$

Burada,

D<sub>10</sub> =%10 geçen zemine karşılık dane çapını,

D<sub>15</sub> =%15 geçen zemine karşılık dane çapını,

D<sub>85</sub> =%85 geçen enjeksiyon materyaline karşılık gelen tane çapını,

D<sub>95</sub> =%95 geçen enjeksiyon materyaline karşılık gelen tane çapını ifade etmektedir.

Burwell kriterlerine göre N>25 olması durumunda enjeksiyonun yapılabileceği, N<11 olması durumunda ise enjeksiyonun yapılamayacağı ifade edilmektedir. Ayrıca Burwell kriterlerinde karışımın N değerine tek başına güvenilmemesi gerektiği, enjektte edilebilirlikte limit değerlere yaklaşıldığı zaman, karışımın uygun olduğundan emin olmak için enjektte edilebilirliğin N\* değerlerine göre yeniden kontrol edilmesi gerektiği belirtilmektedir. N\* değerinde yapılan kontrolde ise N\*>11 olması durumunda enjeksiyonun mümkün olabileceği, N\*<5 durumunda ise enjeksiyon mümkün olamayacağı ifade edilmektedir.

Tablo 3’e bakıldığında Burwell kriterlerine göre deneylerde kullanılan ince taneli çimento enjeksiyon malzemesi ile bütün S/Ç oranlarında kum numunelerin tamamına enjeksiyon yapılabileceği görülmektedir. Yapılan enjeksiyon deneylerinde ise sadece S/Ç oranı 1,5’da 1 nolu numunede (%100 ince kum) başarı sağlanamamıştır. Deney sonuçlarından Burwell kriterlerinin enjektte edilebilirliğin belirlenmesinde tek başına yeterli olmadığı görülmektedir. Burwell kriterleri formülasyonlarında S/Ç oranı, enjeksiyon basıncı ve rölatif sıklığın enjektte edilebilirliğe etkisi dikkate

Tablo 3. Burwell kriterlerine göre enjektte edilebilirlik (Injectability according to Burwell’s criteria)

Örnek no	İnce kum (%)	Orta kum (%)	(D <sub>10</sub> )zemin (mm)	(D <sub>15</sub> )zemin (mm)	N=(D <sub>15</sub> ) zemin/ (D <sub>85</sub> ) enjeksiyon	N*=(D <sub>10</sub> ) zemin/ (D <sub>95</sub> ) enjeksiyon	Burwell Kriterine göre değerlendirme	S/Ç oranı=1,5 Deneysel sonucuna göre değerlendirme	S/Ç oranı= 1,8, 2,1 ve 2,5 Deneysel sonucuna göre değerlendirme
1	100	0	0,09	0,10	31	20	Enjektte edilebilir	Enjektte Başarısız	Enjektte Başarılı
2	80	20	0,10	0,12	37	22	Enjektte edilebilir	Enjektte Başarılı	Enjektte Başarılı
3	60	40	0,12	0,14	44	27	Enjektte edilebilir	Enjektte Başarılı	Enjektte Başarılı
4	30	70	0,16	0,19	59	36	Enjektte edilebilir	Enjektte Başarılı	Enjektte Başarılı



alınmamıştır. Huang vd. yapmış oldukları deneysel çalışmalarda enjekte edilebilirliği zemin ve çimento boyutları yanında S/Ç oranı ve ince kum yüzdesinin etkilediğini belirtmişlerdir [30]. Yine Akbulut ve Sağlamer yaptıkları çalışmalarda Huang vd. belirtmiş olduğu parametrelere ek olarak enjeksiyon basıncının da enjekte edilebilirlik üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir [33].

### 3.3. Enjeksiyon Yapılmış Kum Zeminlerin Permeabilite Katsayıları (Permeability Coefficients of Grouted Sands)

Farklı S/Ç oranında hazırlanan ince taneli çimento süspansiyonları ile enjeksiyon yapılan ve farklı kür koşulları ile farklı kür sıcaklıklarında bekletilen numunelere 3, 7, 14, 28, 56 ve 120. günlerde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon yapılmış kum numunelerin düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları Şekil 9-Şekil 11'de verilmiştir.

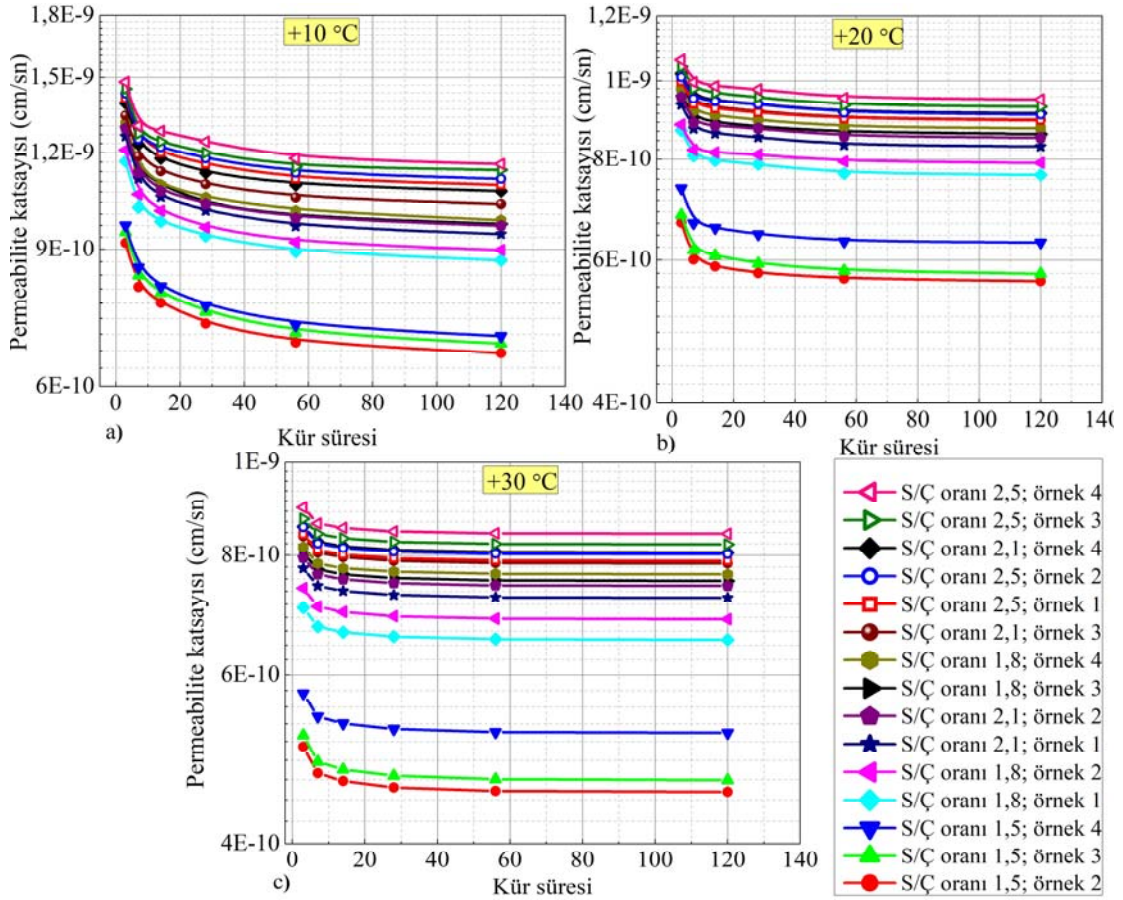
S/Ç oranı 1,5 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $6,62 \times 10^{-10}$  ile  $6,96 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan numunelerde  $5,65 \times 10^{-10}$  ile  $6,31 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında ve

+30°C'de bekletilmiş numunelerde  $4,53 \times 10^{-10}$  ile  $5,22 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında bulunmuştur (Şekil 9).

S/Ç oranı 1,8 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $8,71 \times 10^{-10}$  ile  $9,82 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan numunelerde  $7,65 \times 10^{-10}$  ile  $8,74 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında ve +30°C'de bekletilmiş numunelerde  $6,53 \times 10^{-10}$  ile  $7,64 \times 10^{-10}$  arasında bulunmuştur (Şekil 9).

S/Ç oranı 2,1 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $9,42 \times 10^{-10}$  ile  $1,07 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan numunelerde  $8,30 \times 10^{-10}$  ile  $9,12 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında ve +30°C'de bekletilmiş numunelerde  $7,22 \times 10^{-10}$  ile  $8,05 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında bulunmuştur (Şekil 9).

S/Ç oranı 2,5 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $1,09 \times 10^{-9}$  ile  $1,16 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan numunelerde  $8,94 \times 10^{-10}$  ile  $9,48 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında ve



Şekil 9. Enjeksiyon yapılmış ve kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayılarının kür süresi ile değişimi

(Variation of permeability coefficients of samples kept in curing tank with the curing time)

+30°C'de bekletilmiş numunelerde  $7,89 \times 10^{-10}$  ile  $8,42 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında bulunmuştur (Şekil 9).

S/Ç oranı 1,5 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $7,76 \times 10^{-10}$  ile  $8,52 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan numunelerde  $8,89 \times 10^{-10}$  ile  $9,57 \times 10^{-10}$  cm/sn arasında ve +30°C'de bekletilmiş numunelerde  $9,88 \times 10^{-10}$  ile  $1,04 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında bulunmuştur (Şekil 10).

S/Ç oranı 1,8 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $9,95 \times 10^{-10}$  ile  $1,12 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan numunelerde  $1,12 \times 10^{-9}$  ile  $1,20 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında ve +30°C'de bekletilmiş numunelerde  $1,18 \times 10^{-9}$  ile  $1,30 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında bulunmuştur (Şekil 10).

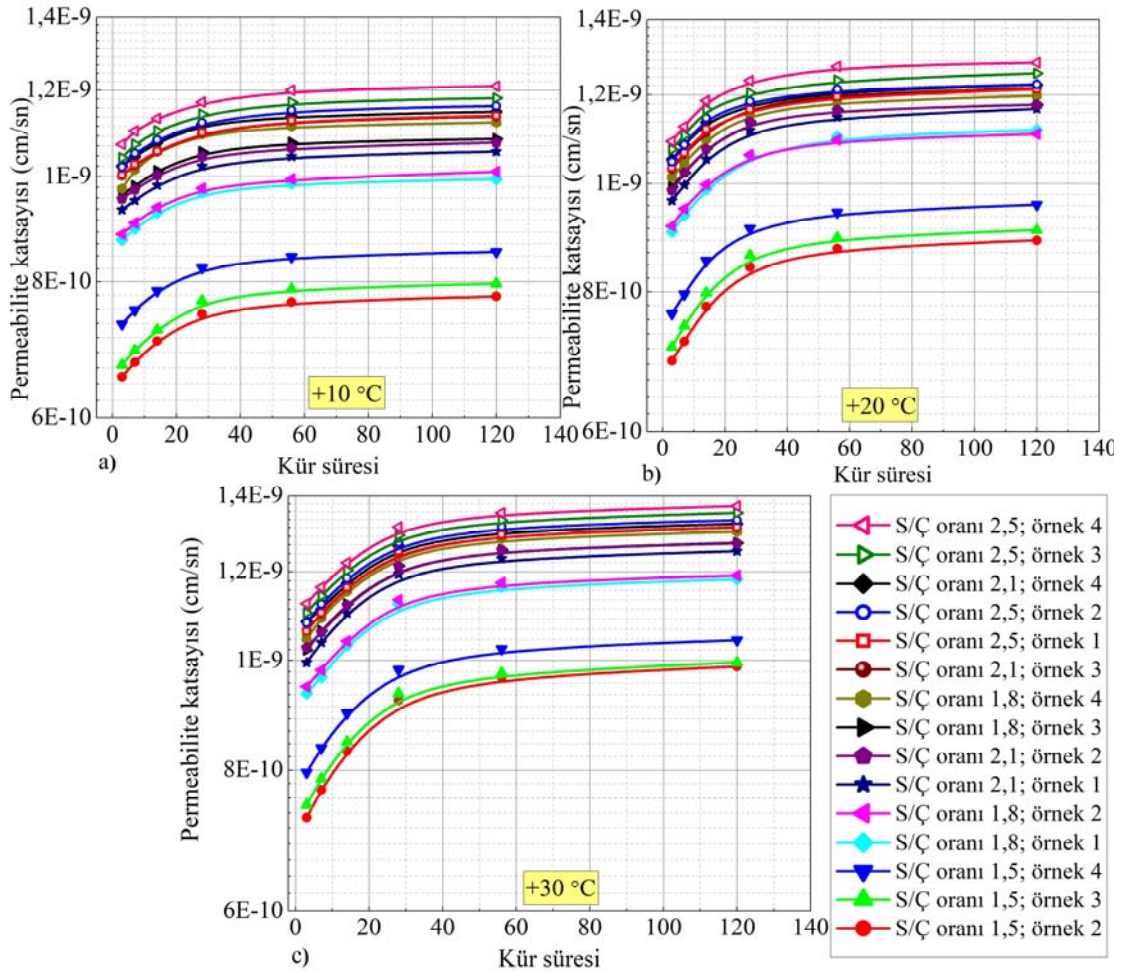
S/Ç oranı 2,1 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $1,05 \times 10^{-9}$  ile  $1,15 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan

numunelerde  $1,17 \times 10^{-9}$  ile  $1,23 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında ve +30°C'de bekletilmiş numunelerde  $1,25 \times 10^{-9}$  ile  $1,33 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında bulunmuştur (Şekil 10).

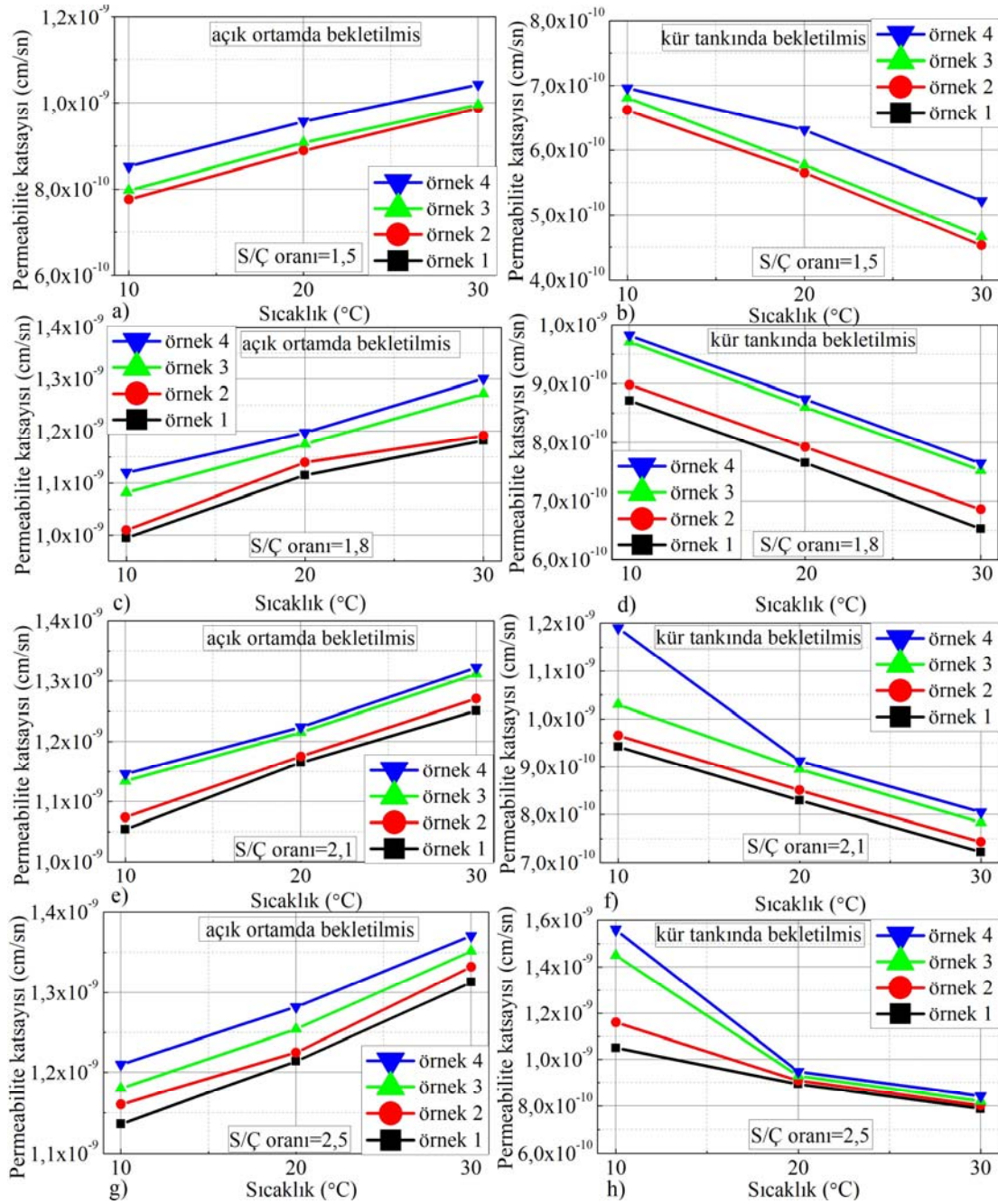
S/Ç oranı 2,5 ile enjeksiyon yapılmış ve 120 gün açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları; +10°C'de bekletilmiş numunelerde  $1,14 \times 10^{-9}$  ile  $1,21 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında, +20°C'de bekletilmiş olan numunelerde  $1,21 \times 10^{-9}$  ile  $1,28 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında ve +30°C'de bekletilmiş numunelerde  $1,31 \times 10^{-9}$  ile  $1,37 \times 10^{-9}$  cm/sn arasında bulunmuştur (Şekil 10).

Şekil 9 incelendiğinde, ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılan ve kür tankında bekletilen numunelerin permeabilite katsayılarının zamana bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bu azalma +10°C'de bekletilmiş numunelerde 56. günden sonra, +20°C'de bekletilmiş numunelerde 28. günden sonra ve +30°C'de bekletilmiş numunelerde 14. günden sonra yavaşlamıştır (Şekil 9).

Şekil 10 incelendiğinde, enjeksiyon yapılan ve açık ortamda bekletilen numunelerde permeabilite katsayılarının zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. Bu artış +10°C'de



Şekil 10. Enjeksiyon yapılmış ve açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayılarının kür süresi ile değişimi (Variation of permeability coefficients of samples kept in air-dried with the curing time)

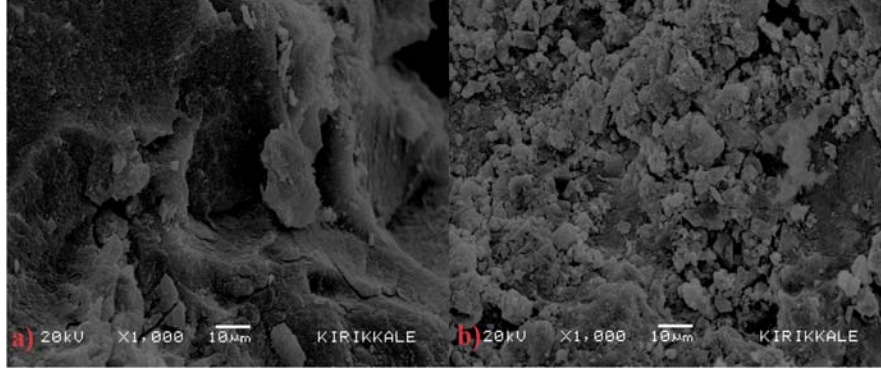


**Şekil 11.** Farklı S/Ç oranında hazırlanan ince taneli çimento süspansiyonları ile enjeksiyon yapılmış ve farklı kür koşullarında bekletilmiş olan kum numunelerin permeabilite katsayılarının kür sıcaklığı ile değişimi (Variation of permeability coefficients of grouted sands with different water/cement ratios and kept various curing condition with the curing temperature)

bekletilmiş numunelerde 56. günden sonra, +20°C’de bekletilmiş olan numunelerde 28. günden sonra ve +30°C’de bekletilmiş olan numunelerde 20. günden sonra yavaşlamıştır.

Şekil 11b, Şekil 11d, Şekil 11f ve Şekil 11h incelendiğinde, ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılan ve kür tankında bekletilen (120 gün) numunelerde sıcaklığın artması ile permeabilite katsayılarının azaldığı görülmektedir. Permeabilite katsayılarında meydana gelen bu azalma +10°C

ile +20°C sıcakları arasında ortalama %13 iken +20°C ile +30°C sıcaklıkları arasında ortalama %14 dür. Şekil 12’de +10°C ve +30°C’de kür tankında bekletilmiş (120 gün) Örnek 3 üzerinde yapılmış olan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri görülmektedir. Şekil 12’den görüldüğü gibi sıcaklığın artması ile C3S hidrasyonu hızlanmış ve ince taneli çimento partikülü etrafında daha fazla ve daha yoğun miktarda C-S-H jeli oluşmuştur. Bu da enjeksiyon yapılmış kum numunelerde permeabilite katsayısını düşürmüştür. Numunelerin suda bekletilmesi



**Şekil 12.** Kür tankında bekletilmiş (120 gün) Örnek 3 üzerinde yapılmış olan Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüleri a) +10°C’de bekletilmiş olan numune ; b) +30°C’de bekletilmiş olan numune  
(Scanning Electron Microscope (SEM) images of Sample 3 kept in the curing tank (120 days) a) kept at +10°C; b) kept at +30°C)

sayesinde hidrasyon sebebi ile oluşan su kaybı yerine koyulabilmiştir. Şekil 11a, Şekil 11c, Şekil 11e ve Şekil 11g incelendiğinde, ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılan ve açık ortamda bekletilen numunelerin permeabilite katsayılarının sıcaklığın artması ile arttığı görülmektedir. Bu artış 120 gün sonunda +10°C ile +20°C sıcaklıkları arasında ortalama %10, +20°C ile +30°C sıcaklıkları arasında ortalama %8 olarak bulunmuştur (Şekil 11). Açık ortamda bekletilen numunelerde sıcaklığın artması ile hidrasyon hızlanmıştır. Hidrasyonla beraber hızlı su kaybı oluşmuş ve bu su kaybının yerine koyulamaması sebebiyle zemin boşlukları içindeki enjeksiyon malzemesi matrisinde büzülme ve küçük çatlaklara neden olmuş bu da enjeksiyon yapılmış kum numunelerde permeabiliteyi artırmıştır.

İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum zeminlerde farklı kür koşulları permeabilite katsayısını etkilemiştir. Yapılan düşen seviyeli permeabilite deneylerinde açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayı değerleri kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayı değerlerinden daha yüksek çıkmıştır (Şekil 11). Bu fark 120 gün sonunda +10°C’de bekletilmiş olan numunelerde ortalama %10, +20°C’de bekletilmiş olan numunelerde ortalama %29 ve +30°C’de bekletilmiş olan numunelerde ortalama %43 dür. (Şekil 11). Kum karışımlara ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılması ile kum numunelerin permeabilite katsayıları  $10^{-6}$  ile  $10^{-8}$  kat arasında azalmıştır (Şekil 9-Şekil 11).

Şekil 9-Şekil 11 incelendiğinde enjeksiyon yapılmış kum numunelerin permeabilite katsayısı değerlerinin kum numunelerin gradasyonlarından ve çimento süspansiyonunun S/Ç oranlarından da etkilendiği görülmektedir. İnce kum yüzdesinin artması ile permeabilite katsayıları azalırken, S/Ç oranının artması ile permeabilite katsayıları artmıştır. Literatürde ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum numunelerin permeabilite katsayılarının belirlenmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış kum zeminlerin permeabilite katsayılarını Zebovitz vd.  $10^{-3}$  ile  $10^{-6}$  cm/sn arasında, Schwarz ve Chirumalla  $10^{-4}$  ile  $10^{-8}$  cm/sn arasında,

De Paoli vd.  $10^{-3}$  ile  $10^{-7}$  cm/sn arasında ve Markou ve Droudakis  $10^{-4}$  ile  $10^{-6}$  cm/sn arasında olduğunu belirtmişlerdir [3, 13, 34-35]. Ayrıca Markou ve Droudakis Normal Portland çimentosu ile enjeksiyon yapılmış kum zeminlerin permeabilite katsayı değerlerinin  $10^{-3}$  ile  $10^{-4}$  cm/sn arasında değiştiğini ve enjeksiyon sonrası permeabilite katsayısında  $10^{-1}$  ile  $10^{-3}$  kat azalma olduğunu ifade etmişlerdir [13]. Diğer araştırmacılar ile yapılan bu çalışma arasındaki farkın büyük olmasının sebebi kullanılan ince taneli çimentonun kimyasal yapısı ve boyutu, zeminin gradasyonu, rölatif sıklık, kür sıcaklığı, kür koşulları vb. nedenlerdir. Schwarz ve Krizek enjeksiyon yapılmış zeminlerin permeabilite katsayı değerlerinin çimento süspansiyonunun S/Ç oranından ziyade çimento süspansiyonunun zemin içindeki boşlukları doldurma yüzdesi ile alakalı olduğunu belirtmişlerdir [8]. Schwarz ve Chirumalla enjeksiyon basıncının da enjeksiyon yapılmış kum zeminlerin permeabilite katsayı değerlerini etkilediğini ifade etmişlerdir [34]. Markou ve Droudakis yaptıkları çalışmalarda çimentonun partikül boyutunun ve sedimentasyon yüzdesinin artmasının enjeksiyon yapılmış zeminlerin permeabilite katsayısı değerlerini artırdığını belirtmişlerdir [13].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmadan çıkarılan ana sonuçlar şunlardır:

- S/Ç oranının artması ile priz süreleri ve sedimentasyon yüzdesi artarken viskozite değerleri azalmıştır.
- S/Ç oranının artması ile enjekte edilebilirlik artarken, ince kum yüzdesinin artması enjekte edilebilirlik azalmıştır.
- İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış ve kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları zamana bağlı olarak azalmıştır.
- İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış ve açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları zamana bağlı olarak artmıştır.
- İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış ve kür tankında bekletilmiş olan kum numunelerde sıcaklığın artması ile permeabilite katsayıları azalmıştır.

- İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış ve açık ortamda bekletilmiş olan kum numunelerde sıcaklığın artması ile permeabilite katsayıları artmıştır.
- İnce taneli çimento ile enjeksiyon yapılmış ve açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayıları kür tankında bekletilmiş olan numunelerin permeabilite katsayılarından daha yüksek bulunmuştur.
- Kum karışımlara ince taneli çimento ile enjeksiyon yapılması ile kum numunelerin permeabilite katsayıları  $10^{-6}$  ile  $10^{-8}$  kat arasında azalmıştır.
- İnce kum yüzdesinin artması ile permeabilite katsayıları azalırken, S/Ç oranının artması ile permeabilite katsayıları artmıştır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karol, R. H., Chemical grouting and soil stabilization, Marcel Dekker, Brunswick, NJ 2003.
2. Tunçdemir, F., Kompaksiyon Enjeksiyonuna Teorik Ve Pratik Yaklaşımlar, Teknik Dergi, 18 (86), 4069-4080, 2007.
3. Zebovitz, S., Krizek, R. J. and Atmatzidis, D. K., Injection of fine sands with very fine cement grout, J. Geotech. Eng., 115 (2), 1717–1733, 1989.
4. Nguyen, V. H., Remond, S., and Gallias, J. L., Influence of cement grouts composition on the rheological behavior, Cement and Concrete Research, 41 (3), 292-300, 2011.
5. Avcı, E., Silica Fume Effect on Engineering Properties of Superfine Cement-Grouted Sands, Journal of Materials in Civil Engineering, 31 (11), 04019269-1-13, 2019.
6. Perret, S., Palardy, D., and Ballivy, G., Rheological behavior and setting time of microfine cement-based grouts, ACI Mater. J., 97 (4) 472–478, 2000.
7. Håkansson, H., Hässler, L., and Stille, Rheological properties of microfine cement grouts, Tunnelling and Underground Space Technology, 7 (4), 453-458, 1992.
8. Schwarz, L. G., and Krizek, R. J., Effect of preparation technique on permeability and strength of cement-grouted sand, Geotechnical Testing J., 17(4), 434–443, 1994.
9. Zhang, S., Qiao, W., Li, Y., Xi, K., and Chen, P., Effect of Additives on the Rheological and Mechanical Properties of Microfine-Cement-Based Grout, Advances Material Science and Engineering, 2019, 1-10, 2019.
10. Tekin E., Rheological Properties of Micro Fine Cement (Rheocem 900) Grouts, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (4), 777–785, 2011.
11. Tekin E., Akbaş S.O., Estimation of Groutability of Granular Soils With Cement-Based Grouts Using Discriminatory Analysis, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (3), 625–633, 2010.
12. Warner, J., Soil solidification with ultrafine cement grout. Grouting and ground treatment, Proceedings of the third International Conference on Grouting and Ground, New Orleans, USA, 2003.
13. Markou, I. N., and Droudakis, A. I., Shear Strength of Microfine Cement Grouted Sands, Ground Improvement, 166 (3), 177-186, 2013.
14. Christodoulou, D., Droudakis, A., Pantazopoulos, I. A., and Atmatzidis, D. K., Groutability and Effectiveness of Microfine Cement Grouts, Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Egypt, 2009.
15. Pantazopoulos, I. A., and Atmatzidis, D. K., Dynamic properties of microfine cement grouted sands, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 42 17–31, 2012.
16. Hashimoto, K., Nishihara, S., Oji, S., Kanazawa, T., Nishie, S., Seko, I., Hyodo, T., Tsukamoto, Y., Field testing of permeation grouting using microfine cement, Ground Improvement, 169 (2), 134-142, 2016.
17. Chen, J., Hagan, P. C., and Saydam, C., Shear behaviour of a cement grout tested in the direct shear test, Construction and Building Materials, 166, 271-279, 2018.
18. Jaforpour, P., Moayed, R. Z., and Kordnaeij, A., Yield stress for zeolite-cement grouted sand, Construction and Building Materials, 247 (30), 1-12, 2020.
19. Mirza, J., Saleh, K., Langevin, M. A., Mirza, S., Aamer, M., Bhutta, R., and Tahir, M. M., Properties of microfine cement grouts at 4 °C, 10 °C and 20 °C, Construction and Building Materials, 47, 1145-1153, 2013.
20. ASTM D6913M-17, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2017.
21. ASTM D2487-17e1, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2017.
22. ASTM D4253-16e1, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2016.
23. ASTM D4254-16, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2016.
24. ASTM C940-16, Standard test method for expansion and bleeding of freshly mixed grouts for preplaced aggregate concrete in the laboratory, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2016.
25. ASTM D2196-18e1, Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2018.
26. ASTM C191-19, 21., Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2019.

27. ASTM D 2434-68, Standard test method for permeability of granular soils (constant head), American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2002.
28. ASTM 5856-95, Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2002.
29. Eklund, D. and Stille, H., Penetrability due to filtration tendency of cement based grouts, *Tunneling and Underground Space Technology*, 23 (4), 389-398, 2008.
30. Markou, I., Christodoulou, D., and Atmatzidis, D., Effect of sand gradation on the groutability of cement suspensions, *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Grouting and Deep Mixing*, ASCE, New Orleans, 2012.
31. Burwell, E. B., Cement and clay grouting of foundations: Practice of the corps of engineering, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84 (1), 1-22, 1958.
32. Huang, C. L., Fan, J. C., Liao, K. W, Lien, T. H., A Methodology to Build a Groutability Formula via a Heuristic Algorithm, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 106-116, 2013.
33. Akbulut, S., Sağlamer, A., Daneli Zeminlerde Enjeksiyon Basıncı ve Dane Çapının Enjeksiyon Edilebilirlik Açısından Etkileri, *Teknik Dergi*, 14 (68), 2985-2995, 2003.
34. Schwarz, L. G., and Chirumalla, M., Effect of injection pressure on permeability and strength of microfine cement grouted sand, *Grouting for Ground Improvement: Innovative Concepts and Applications, Geo-Denver 2007*, ASCE, Colorado, 1, 2007.
35. De Paoli, B., Bosco, B., Granata, R., and Bruce, D. A. Fundamental observations on cement based grouts (2): Microfine cements and the Cemill1 process, *Proceedings of the Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, New Orleans, 1992.