

**ZEMİNLERİN TAŞIMA GÜCÜNÜN ÇİMENTO  
ENJEKSİYONU İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Esen İNAL**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Programı: Geoteknik**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. H. Suha AKSOY**

**MART-2015**

**T.C**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİNLERİN TAŞIMA GÜCÜNÜN ÇİMENTO ENJEKSİYONU**  
**İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Esen İNAL**

**(122115107)**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Programı: Geoteknik**

**Danışman: Yrd. Doc. Dr. H. Suha AKSOY**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 4 Mart 2015**

**MART-2015**

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİNLERİN TAŞIMA GÜCÜNÜN ÇİMENTO ENJEKSİYONU  
İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esen İNAL

(122115107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04.03.2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 25.03.2015

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. H. Suha AKSOY (F.Ü. İnşaat Müh.)

Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Taha TAŞKIRAN (D.Ü. Müh. Mim. F.)

Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARATON (F.Ü. İnşaat Müh. )

MART-2015

## **ÖNSÖZ**

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan, geoteknik mühendisliği alanında ufkumu açan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. H. Suha AKSOY'a teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimi süresince yakın ilgi ve görüşlerini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARATON'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Laboratuvar çalışmalarında beni yalnız bırakmayıp yardımcı olan Arş. Gör. Mesut GÖR'e, deneylerin yürütülmesinde sağladığı kimyasal katkı ile yardımlarını gördüğüm Polisan Yapı Kimyasalları A. Ş. Personellerinden Kimya Müh. İsmail KILINÇ'a teşekkür ederim.

Desteklerini hayatımın her aşamasında hissettiğim ve varlıkları ile bana güç veren sevgili aileme ve değerli dostlarıma saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

**Esen İNAL**  
**ELAZIĞ - 2015**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                                             | <b>I</b>        |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                                       | <b>II</b>       |
| <b>ÖZET .....</b>                                                              | <b>IV</b>       |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                           | <b>V</b>        |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>                                                  | <b>VI</b>       |
| <b>TABLolar LİSTESİ .....</b>                                                  | <b>IX</b>       |
| <b>SEMBOLLER LİSTESİ .....</b>                                                 | <b>X</b>        |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                          | <b>1</b>        |
| <b>2. ZEMİN ENJEKSİYONU .....</b>                                              | <b>3</b>        |
| 2.1. Enjeksiyonun Tarihçesi .....                                              | 3               |
| 2.2. Enjeksiyon Türleri .....                                                  | 4               |
| 2.2.1. Çimento Enjeksiyonu .....                                               | 4               |
| 2.2.2. Kimyasal Enjeksiyon .....                                               | 5               |
| 2.3. Enjeksiyon Teknikleri .....                                               | 6               |
| <b>3. KONUS İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR .....</b>                           | <b>11</b>       |
| <b>4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI .....</b>                                        | <b>14</b>       |
| 4.1. Zemin Enjeksiyonunda Kullanılan Zemin ve Karışımların Özellikleri .....   | 15              |
| 4.1.1 Enjeksiyonda Kullanılan Zemin Numunelerinin Özellikleri .....            | 15              |
| 4.1.2 Enjeksiyonda Kullanılan Çimento ve Akışkanlaştırıcının Özellikleri ..... | 17              |
| 4.2 Enjeksiyonda Kullanılan Deney Düzeneginin Özellikleri .....                | 18              |
| 4.3 Enjeksiyon Uygulaması .....                                                | 21              |
| 4.4. Serbest Basınç Deneyinin Yapılması .....                                  | 23              |
| 4.5. Kayma ve Basınç Dalga Hızlarının Belirlenmesi .....                       | 24              |
| 4.6. Zemin Örneklerinin Yüzey Alanlarının Belirlenmesi .....                   | 26              |
| <b>5. LABORATUVAR SONUÇLARI .....</b>                                          | <b>27</b>       |
| 5.1. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....                                     | 27              |
| 5.2. Kayma ve Basınç Dalga Hızı Deney Sonuçları .....                          | 32              |
| 5.3. N <sub>2</sub> -BET Analizi Sonuçları .....                               | 38              |

|    |                                                        |    |
|----|--------------------------------------------------------|----|
| 6. | DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA .....                        | 39 |
| 7. | SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....                              | 42 |
|    | KAYNAKLAR .....                                        | 44 |
|    | EKLER (Gerilme-Eksenel Şekil Değiştirme Eğrileri)..... | 47 |
|    | ÖZGEÇMİŞ .....                                         | 65 |

## ÖZET

Zemin enjeksiyonu, zeminin permeabilite değerinin düşürülmesinde, kayma dayanımının arttırılmasında veya deformasyonlarının azaltılmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu tez çalışmasında, GP sınıfına ait dere kumu ve kırmataş zemin türleri %40, %60 ve %80 relatif sıkılıkta hazırlanmıştır. Bu zeminlere, 150kPa'lık sabit bir basınç altında çimento enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon harcı su/çimento oranı 0.8, 1.0 ve 1.5 olacak şekilde hazırlanmıştır. Enjeksiyon yapılan toplam 216 adet numune 7 ve 28 gün boyunca suda kür edilmiştir. Kür süreleri sonunda enjeksiyon numunelerinin üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Bunun yanı sıra kayma ve basınç dalga hızları kullanılarak elastisite modülleri hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda, dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinde maksimum dayanım değerleri, relatif sıkılığı %80 ve su/çimento oranı 0.8 olan enjeksiyon numunelerinde elde edilmiştir. Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinde ise maksimum dayanım değerleri, relatif sıkılığı %60 ve su/çimento oranı 0.8 olan enjeksiyon numunelerinde elde edilmiştir. Genel olarak dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numuneleri, kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinden daha yüksek dayanıma sahiptir. Bu enjeksiyon numunelerinde, relatif sıkılığın artması ve su/çimento oranının azalması ile hesaplanan elastisite modül değerleri artmıştır. Her iki zemin türünden üretilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımları ve elastisite modülleri arasında lineer bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çimento Enjeksiyonu, Dere Kumu, Kırmataş, Zemin İyileştirme, Dayanım, Elastisite Modülü

## SUMMARY

### Use of Grouting Method To Improve Soil Bearing Capacity

Soil injection is a method which used for decreasing permeability, increasing shear strength and decreasing deformations of soil. In this thesis, soil types with 40, 60, and 80% relative density are prepared for river sand and crushed stone in GP classes. Cement grout are injected to these soils at 150kPa pressure. Cement grout is prepared at 0.8, 1.0 and 1.5 of water/cement ratio. 216 soil samples are prepared by using grouting. These samples are cured in water during 7 and 28 days. After cure stage, unconfined compression tests are performed on injected samples. However, elasticity modules of samples are determined by using shear and pressure wave velocity. Maximum strength values of river sand and crushed stone samples are respectively, obtained at  $Dr=80\%$ ,  $w/c=0.8$  and at  $Dr=60\%$ ,  $w/c=0.8$  according to laboratory study results. In generally, river sand samples have higher strength values than crushed stone samples. Calculated elasticity modules are increased due to increasing relative density values and decreasing water/cement ratio for these injection samples. A linear relation is determined between elasticity modulus and unconfined strength values of river sand and crushed stone injection samples.

**Key Words:** Cement Injection, River Sand, Crushed Stone, Soil Improvement, Strength, Elasticity Modulus.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                 | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Şekil 2.1. Enjeksiyon teknikleri.....                                                                                                                                                           | 6                      |
| Şekil 4.1. Çalışmada üretilen enjeksiyon numuneleri .....                                                                                                                                       | 14                     |
| Şekil 4.2. JSCE (1977) ve Ishihara vd. (1989) önerdiği sıvılaştırılabilir zeminlerin dane dağılımı ve enjeksiyon uygulanan zeminlerin dane dağılımı .....                                       | 16                     |
| Şekil 4.3. Deney düzeneğinin şematik gösterilmesi .....                                                                                                                                         | 19                     |
| Şekil 4.4. Basınçlı mikser .....                                                                                                                                                                | 20                     |
| Şekil 4.5. Deney hücreleri .....                                                                                                                                                                | 20                     |
| Şekil 4.6. Deney düzeneği .....                                                                                                                                                                 | 20                     |
| Şekil 4.7. Karıştırıcı aparat .....                                                                                                                                                             | 21                     |
| Şekil 4.8. Hidrolik numune çıkarıcı .....                                                                                                                                                       | 22                     |
| Şekil 4.9. Enjeksiyon numunesi .....                                                                                                                                                            | 22                     |
| Şekil 4.10. Taş kesme makinası ile numunelerin kesilmesi .....                                                                                                                                  | 23                     |
| Şekil 4.11. Serbest basınç deneyi .....                                                                                                                                                         | 22                     |
| Şekil 4.12. Serbest basınç deneyi ile kırılmış numune .....                                                                                                                                     | 24                     |
| Şekil 4.13. Pundit Plus cihazı ile yapılan deney .....                                                                                                                                          | 25                     |
| Şekil 4.14. P dalga hızının belirlenmesi için kullanılan transdüserler .....                                                                                                                    | 25                     |
| Şekil 4.15. S dalga hızının belirlenmesi için kullanılan transdüserler .....                                                                                                                    | 25                     |
| Şekil 5.1. Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (7 Günlük) .....                | 28                     |
| Şekil 5.2. Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (28 Günlük) .....               | 28                     |
| Şekil 5.3. Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (7 Günlük) .....                 | 29                     |
| Şekil 5.4. Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (28 Günlük) .....                | 29                     |
| Şekil 5.5. Farklı s/ç oranlarına göre %40 relatif sıkılıkta hazırlanmış dere kumu ve kırmataş kullanılarak elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları ..... | 30                     |
| Şekil 5.6. Farklı s/ç oranlarına göre %60 relatif sıkılıkta hazırlanmış dere kumu ve kırmataş kullanılarak elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları ..... | 31                     |

|                    |                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.7.</b>  | Farklı s/ç oranlarına göre %80 relatif sıkılıkta hazırlanmış dere kumu ve kırmataş kullanılarak elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları ..... | 32 |
| <b>Tablo 5.3.</b>  | Değişen s/ç ve relatif sıkılıklarına göre dere kumu zemininden elde edilen enjeksiyon numunelerinin $V_p$ , $V_s$ , $v$ ve E değerleri .....                                         | 33 |
| <b>Şekil 5.8.</b>  | Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre $V_p$ değişimleri (7 Günlük).....                                  | 34 |
| <b>Şekil 5.9.</b>  | Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre $V_p$ değişimleri (28 Günlük).....                                 | 34 |
| <b>Şekil 5.10.</b> | Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre $V_p$ değişimleri (7 Günlük).....                                   | 35 |
| <b>Şekil 5.11.</b> | Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre $V_p$ değişimleri (28 Günlük).....                                  | 35 |
| <b>Şekil 5.12.</b> | Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (7 Günlük) .....                                     | 36 |
| <b>Şekil 5.13.</b> | Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (28 Günlük) .....                                    | 36 |
| <b>Şekil 5.14.</b> | Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (7 Günlük) .....                                      | 37 |
| <b>Şekil 5.15.</b> | Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (28 Günlük) .....                                     | 37 |
| <b>Şekil 5.16.</b> | Dere kumu ve kırmataş zemin türlerinin numune çap aralıklarına göre yüzey alanları değişimi.....                                                                                     | 38 |
| <b>Şekil 6.1.</b>  | Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (28 Günlük) .....                | 39 |
| <b>Şekil 6.2.</b>  | Dere kumu ve kırmataş zemin türlerinin numune çap aralıklarına göre yüzey alanları değişimi.....                                                                                     | 40 |
| <b>Şekil 6.3.</b>  | Enjeksiyon numunelerin serbest basınç dayanımı ile E arasındaki ilişki.....                                                                                                          | 41 |
| <b>Şekil 6.4.</b>  | 28 günlük enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımı ile E arasındaki ilişki .....                                                                                             | 41 |
| <b>Şekil E.1.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %40) .....                                 | 47 |
| <b>Şekil E.2.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %60) .....                                 | 48 |
| <b>Şekil E.3.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %80) .....                                 | 49 |
| <b>Şekil E.4.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç:1.0, Dr: %40) .....                                  | 50 |

|                    |                                                                                                                                                           |    |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil E.5.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %60) .....      | 51 |
| <b>Şekil E.6.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %80) .....      | 52 |
| <b>Şekil E.7.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %40) ..... | 53 |
| <b>Şekil E.8.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %60) .....      | 54 |
| <b>Şekil E.9.</b>  | a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %80) .....      | 55 |
| <b>Şekil E.10.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %40) .....       | 56 |
| <b>Şekil E.11.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %60) .....       | 57 |
| <b>Şekil E.12.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %80) .....       | 58 |
| <b>Şekil E.13.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %40) .....       | 59 |
| <b>Şekil E.14.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %60) .....       | 60 |
| <b>Şekil E.15.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %80) .....       | 61 |
| <b>Şekil E.16.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %40) .....       | 62 |
| <b>Şekil E.17.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin; gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %60) .....      | 63 |
| <b>Şekil E.18.</b> | a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %80) .....       | 64 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 4.1.</b> Zemin karışımların dane çapına göre ağırlık yüzdesi.....                                                                                     | 16              |
| <b>Tablo 4.2.</b> Numunelerin indeks özellikleri.....                                                                                                          | 17              |
| <b>Tablo 4.3.</b> Numunelerin relatif sıkılığına göre boşluk oranları.....                                                                                     | 17              |
| <b>Tablo 4.4.</b> Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri .....                                                                                            | 18              |
| <b>Tablo 4.5.</b> Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri .....                                                                                           | 18              |
| <b>Tablo 5.1.</b> Değişen parametrelere göre kırmataş ve dere kumundan elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımı .....       | 27              |
| <b>Tablo 5.2.</b> Değişen s/ç ve relatif sıkılıklarına göre dere kumu zemininden elde edilen enjeksiyon numunelerinin $V_p$ , $V_s$ , $v$ ve E değerleri ..... | 33              |
| <b>Tablo 5.4.</b> Dere kumu ve kırmataş zemin numuneleri üzerinde yapılan $N_2$ -BET analizi sonuçları .....                                                   | 38              |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|                          |                                     |
|--------------------------|-------------------------------------|
| <b>C<sub>c</sub></b>     | : Sıkışma katsayısı                 |
| <b>C<sub>u</sub></b>     | : Üniformaluluk katsayısı           |
| <b>D<sub>10</sub></b>    | : %10 geçene karşılık gelen çap     |
| <b>D<sub>15</sub></b>    | : %15 geçene karşılık gelen çap     |
| <b>D<sub>30</sub></b>    | : %30 geçene karşılık gelen çap     |
| <b>D<sub>60</sub></b>    | : %60 geçene karşılık gelen çap     |
| <b>D<sub>85</sub></b>    | : %85 geçene karşılık gelen çap     |
| <b>D<sub>r</sub></b>     | : Relatif sıklık                    |
| <b>e</b>                 | : Boşluk oranı                      |
| <b>E</b>                 | : Elastisite modülü                 |
| <b>e<sub>maks</sub></b>  | : Maksimum boşluk oranı             |
| <b>e<sub>min</sub></b>   | : Minimum boşluk oranı              |
| <b>GP</b>                | : Üniform çakıl                     |
| <b>PC</b>                | : Portland çimentosu                |
| <b>s/ç</b>               | : Su/çimento oranı                  |
| <b>t<sub>p</sub></b>     | : Basınç dalgası yayılma süresi     |
| <b>t<sub>s</sub></b>     | : Kayma dalgası yayılma süresi      |
| <b>UCS</b>               | : Serbest basınç dayanımı           |
| <b>V</b>                 | : Hücre hacmi                       |
| <b>V<sub>p</sub></b>     | : Basınç dalgası hızı               |
| <b>V<sub>s</sub></b>     | : Kayma dalgası hızı                |
| <b>w/c</b>               | : Su/çimento oranı                  |
| <b>γ<sub>kmaks</sub></b> | : Maksimum kuru birim hacim ağırlık |
| <b>γ<sub>kmin</sub></b>  | : Minimum kuru birim hacim ağırlık  |
| <b>γ<sub>s</sub></b>     | : Zemin dane birim hacim ağırlığı   |
| <b>ν</b>                 | : Poisson oranı                     |

## 1. GİRİŞ

Basınç ile zamana bağılı olarak sertleşebilen bir akışkanın boşluklu kaya veya kaba daneli zemin içerisine gönderilmesi işlemine enjeksiyon denilmektedir. Enjeksiyon uygulaması, zeminin mekanik ve hidrojeolojik (geçirimsizlik gibi) özelliklerinin iyileştirilmesi, temel takviyesi, oturma ve deformasyonların azaltılması için özellikle çatlaklı kaya ve granüler zeminlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca deprem esnasında sıvılaşma riski olan granüler malzemenin sıvılaşma riskini azaltmak için de kullanılmaktadır.

Enjeksiyon çok kullanılan bir yöntem olmasına rağmen, farklı zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkileri ile ilgili çalışmalara çok fazla rastlanılmamaktadır. Enjeksiyon ile ilgili daha önce yapılmış laboratuvar çalışmalarında, genellikle enjeksiyon harcının özellikleri ve bu harcın zemine enjekte edilebilirliği incelenmiştir. Özellikle çimento karışımı harçların, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda, kil, uçucu kül, silis dumanı, cüruf gibi katkılar çimento harcına katılarak, harçların viskozitesi, dayanımı ve çökme miktarı ile ilgili özellikleri araştırılmıştır.

Son yıllarda yaşanan deprem felaketleri sonrasında can kaybının çok olduğu konut amaçlı yapılarda zemin iyileştirmesinin önemi daha fazla anlaşılmıştır. Ülkemizde inşaat yapım maliyetini artırdığı için küçük projelerde zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasından kaçınılmasına rağmen yakın gelecekte iyileştirme maliyetlerinin düşüşü ile birlikte özellikle yüksek katlı konut yapılarında iyileştirmenin yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir.

Bu çalışmada, farklı ocaklardan elde edilmiş dere kumu ve kırmataş kullanılmıştır. Dere kumu ve kırmataştan aynı granülometriye sahip zemin numuneleri hazırlanmış ve bu zeminlerde çimento enjeksiyonu ile yapılan iyileştirme sonucunda meydana gelen değişimlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Enjeksiyon ile elde edilen numunelerin 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları ve elastisite modülleri belirlenmiştir. Bu parametrelerde, çimento enjeksiyonu neticesinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Literatürde zeminlerin enjeksiyon yapılabilirliği ile ilgili pek çok bağıntı önerilmektedir. Bu bağıntıların hepsi granülometrik özelliklere ve basınca bağlı ifadelerdir.

Bu çalışmada ise dere kumu ve kırmataştan elde edilen numuneler, enjeksiyon için ideal granülometride %40, %60 ve %80 relatif sıklıkta (Dr) hazırlanmıştır.

Laboratuvarda yapılan enjeksiyon uygulamasında, PÇ42.5 portland çimentosu ile hazırlanan çimento harcı kullanılmıştır. Enjeksiyon harcı 0.8, 1.0 ve 1.5 olmak üzere ağırlıkça üç farklı su/çimento (s/ç) oranında hazırlanmıştır. Hazırlanan bu harçlar, belirli relatif sıklıkta olan zemin numunesine 150kPa basınç ile enjekte edilmiştir.

Yapılacak enjeksiyon deneyleri için farklı zemin cinsi, su/çimento oranı ve relatif sıklığa göre gruplar oluşturulmuştur. Örneğin; kırmataş zemini, %80 relatif sıklıkta, su/çimento oranı 0.8 olacak şekilde bir grup olarak değerlendirilmiştir. Her gruptan 12 adet üretilen enjeksiyon numuneleri 7 gün ve 28 gün su içerisinde oda sıcaklığında kür edilmiştir. Bu 12 numuneden 3 tanesi 7 gün sonra kırılarak serbest basınç dayanımları (UCS) belirlenmiş olup 7 gün kür ortamında bekletilen diğer 3 numune ise kayma dalgası ve basınç dalgası hızlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Her gruptan geriye kalan 6 numunenin 3 tanesi 28 gün sonra kırılmış olup kalan 3 numune kayma dalgası ve basınç dalgası hızlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Elde edilen bu dalga hızı değerlerinin yardımı ile numunelerin elastisite modülleri belirlenmiştir. Daha sonra N<sub>2</sub>-BET yöntemi ile dere kumu ve kırmataş zeminlerinin yüzey alanları belirlenmiştir. Tüm bu deneyler sonucunda elde edilen farklı iki zemine ait parametreler karşılaştırılarak incelenmiştir.

## **2. ZEMİN ENJEKSİYONU**

Zemin enjeksiyonu, zeminin permeabilite değerinin düşürülmesi, kayma dayanımlarının arttırılması veya deformasyonların azaltılması için kullanılır. Zeminde açılan delikten harcın basınç ile verilerek zemin içerisindeki boşlukların doldurulması şeklinde yapılır. Enjeksiyon ile sondaj kuyuları içerisinde zemin boşlukları, kaya içindeki çatlaklar veya insan yapımı tüneller, şaftlar, mağaralar ve diğer doğal boşluklar doldurulmaktadır. Enjeksiyon sonucunda boşluklu zemin veya çatlaklı kaya, daha sıkı ve geçirimsiz hale getirilerek, enjeksiyon yapılan ortamın akış özellikleri ve dayanımı başlangıcından daha iyi hale getirilebilir. Enjeksiyon sırasında penetrasyonun gerçekleşmesi için katı danecikler çökelmemeli ve karışım sertleşmemelidir (Scheidegger ve Johnson, 1969). Geoteknik mühendisliğinde enjeksiyon tek başına kullanıldığı gibi diğer bazı zemin iyileştirme yöntemlerini desteklemek amacı ile de kullanılabilir. Örneğin; kazık temel sistemlerinde ve zemin ankrajlarında taşıma kapasitelerini arttırmak, derin kazılarda yanal gerilmeleri karşılamak için kullanılır (Nonveiller, 1989).

Enjeksiyon işleminde çimento veya farklı reçinelerden oluşan kimyasal harçlar kullanılabilir. Zemin enjeksiyonunda, genellikle iki veya daha fazla malzemenin karışımından oluşan harçlar kullanılır. Enjeksiyon harcı, uygulamanın amacına göre akıcı halden katı hale kadar değişik kıvamda olabilir. Harç enjeksiyondan sonra zemindeki bazı bölgelerde daneleri birleştirerek kayma dayanımını artırır. Enjeksiyon harcı kullanılan karışım malzemelerine ve amaca uygun olarak sertleştiğinde katı, esnek, jel veya hafif formda olabilir (Warner, 2004).

### **2.1. Enjeksiyonun Tarihçesi**

Enjeksiyon teknolojisinin uygulama alanları her ne kadar son yıllarda artış göstermiş olsa da geçmişi yaklaşık yüz yıl öncesine dayanır. İlk olarak su sızdırmazlığını sağlamak için maden endüstrisinde ve baraj temelleri altında geçirimsiz blokların elde edilmesi amacıyla kireç ve kil enjeksiyonları yapılmıştır (Mutman ve Kavak, 2007). Teknolojinin gelişmesiyle beraber 1933 yılından itibaren güçlü pompalar kullanılmaya başlanmış ve enjeksiyonun kullanım alanları hızla artmıştır. 1950'li yıllarda ABD'de kompaksiyon enjeksiyonu uygulanmaya başlanmış ve 1980 yılında bu yöntemin sınırları ASCE Enjeksiyon Komitesi tarafından çizilmiştir (Tunçdemir, 2004). 1960-1970 yılları arasında

Japonya’da jet enjeksiyonu geliştirilmiş olup ve bu uygulama günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 2007). Ayrıca enjeksiyon malzemesindeki yeni gelişmeler de enjeksiyon yönteminin daha yaygın kullanılmasına olanak vermiştir. Enjeksiyon teknolojisinin kökeni diğer zemin iyileştirme teknikleri gibi eskiye dayanmakla beraber bu teknoloji hem yeni enjeksiyon malzemeleri hem de bu malzemelerin zemin içerisine nüfuz ettirilmesi bakımından sürekli bir gelişim içerisinde. Burada dikkatle üzerinde durulması gereken nokta, bütün bu uygulamalar için aynı enjeksiyon malzemesinin ve enjeksiyon parametrelerinin kullanılamayacağıdır (Wallance, 1982).

## **2.2. Enjeksiyon Türleri**

Yapılan inceleme ve araştırmalar, zeminlerin geoteknik özelliklerinin birbirinden çok farklı olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla zemin iyileştirilmesi için kullanılan malzemelerin türleri de birbirinden farklı olmaktadır. Enjeksiyon malzemeleri, parametreleri (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjekte edilen hacim vs.) ve yöntemleri zemin koşullarına (dane çapı dağılımı, relatif sıkılık, geostatik gerilmeler vs.) ve uygulama amacına yönelik olarak tasarlanmalıdır. Enjeksiyon teknikleri enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilmesi biçimine bağlı olarak değişmektedir. Fakat enjeksiyon malzemesinin özelliğine bağlı olarak da (çimento enjeksiyonu, çimento–zemin karışımları veya kimyasal enjeksiyon) bir ayırım yapılabilir. En genel haliyle enjeksiyon türlerini çimento ve kimyasal enjeksiyon diye iki ana başlıkta toplayabiliriz.

### **2.2.1. Çimento Enjeksiyonu**

Suya, toprağa karşı duyarlı yeraltı yapılarında kullanılan çimento enjeksiyonu birçok inşaat projelerinde uygulanan enjeksiyon sistemidir. Çimento enjeksiyonu, büyük yapılarda (fabrika, üniversite, kilise, camii, büyük binalar, barajlar vs.) deprem ve korozyona karşı dayanıklılığı artırmak için kullanılır. Ayrıca zeminde oluşabilecek sıvılaşmayı engellemek, azaltmak maksadıyla gradasyonunda 0.5mm’den az ufak daneleri olmayan zeminlere düşük basınçlı çimento enjeksiyon uygulaması yapılmaktadır.

Çimento enjeksiyonu su-çimento malzemesinin belirli oranda karıştırılarak zemine enjekte edilmesidir. Su/çimento oranları zemin yapısına da bağlı olarak ağırlıkça 1.0 ile 4.0 arasında değişmektedir (Yıldırım, 2004). Düşük su/çimento oranları kullanarak segregasyonu düşük, dayanım değerleri yüksek zemin elde edilmektedir. Fakat düşük su/çimento oranında enjeksiyonun uygulama zorluğu ortaya çıkmaktadır.

Enjeksiyon maliyetini düşürmek amacıyla çimento şerbetine bentonit, kum, uçucu kül, kireç gibi granüler malzemeler ilave edilerek zemine enjekte edilebilmektedir. Diğer yandan, priz hızlandırıcı (sodyum klorür, kalsiyum klorür, sodyum silikat), priz geciktirici (odun özü, selüloz bileşimleri, alçıtaşı), yoğunluk arttırıcı ve yoğunluk azaltıcı katkı maddeleri de çimento şerbetine ilave edilebilir. Şerbetin  $D_{85}$  boyutu, içine gireceği zeminin ya da çatlakların 1/3'ünden küçük olmalıdır. Zeminler için enjekte edebilirlik oranı ( $N$ ) Eşit. 1.1 ile hesaplanabilir.

$$N = \frac{(D_{15})_{zemin}}{(D_{85})_{enjeksiyon\ malzemesi}} \quad (1.1)$$

$D_{15}$ : %15 geçene karşılık gelen çap

$D_{85}$ : %85 geçene karşılık gelen çap

Enjekte edilebilirlik oranının 15 den büyük olması durumunda enjeksiyonun verimli olduğu kabul edilir (Genç, 2008). Diğer yandan Tip I ve Tip II Portland çimentosu 0.6mm'den, Tip III Portland çimentosu da 0.42mm'den büyük zeminler için uygundur (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

### 2.2.2. Kimyasal Enjeksiyon

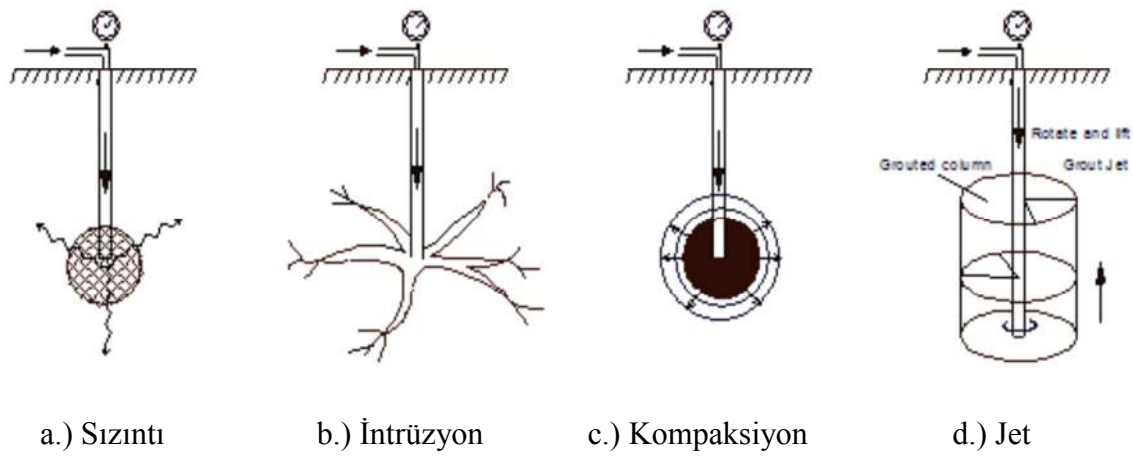
Kimyasal enjeksiyonlar, çimento enjeksiyonuna göre daha ince daneli zemin içine enjekte edilebilir. Kimyasal enjeksiyonlar genellikle %10 ile %20 arasında ince dane içeren zeminlere permeasyon (emdirme) tekniğiyle enjekte edilmektedir. Fakat ekonomik olarak çimento enjeksiyonundan daha pahalıdır. Kimyasal enjeksiyonların bir kısmı zehirlidir ve korozyona sebep olmaktadır. Bundan dolayı zorunlu haller dışında kullanılmaması daha uygundur. Kimyasal maddelerin formasyona girmeden önce bir araya geleceği gibi formasyon içinde de karışabilir (Şekercioğlu, 2007). Diğer yandan kimyasal maddenin düşük viskoziteye sahip olması ve daha kolay kontrol edilebilmesi gibi üstün yanları vardır.

Başlıca kimyasal enjeksiyon maddeleri silikatlar, reçineler, polimerler ve akrilamitlerdir. En yaygın olarak kullanılanı silikat enjeksiyonlarıdır. Yeraltı suyu içinde bulunan minerallerin karışımı seyreltmesi ve kumun katalizör özellikleri göz önüne alınarak kimyasal enjeksiyonların mutlaka ön laboratuvar testinden geçirilmesi gereklidir.

Kimyasal enjeksiyon kuyularının aralıkları çimento enjeksiyonuna göre (1.5-3.5m) daha kısadır. Tipik kuyu açıklıkları 1.3m ile 2.5m aralığındadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

### 2.3. Enjeksiyon Teknikleri

Zemin değerlerine ve uygulama biçimine göre farklı enjeksiyon teknikleri ortaya çıkmıştır. Bunlar sızıntı enjeksiyonu, intrüzyon (çatlatma) enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu, jet enjeksiyonu olmak üzere 4 ana başlıkta toplanabilmektedir.



Şekil 2.1. Enjeksiyon teknikleri

#### a) Sızıntı Enjeksiyonu

Bu enjeksiyon, zemin boşlukların doldurularak geçirimsizliğin azaltılması amacıyla yapılır. Genellikle zemine su ve çimento karışımı enjekte edilir. Enjeksiyon şerbetinin küçük boşluklara girerek etki edebilmesi için viskozitesinin düşük olması gerekmektedir. Ayrıca kullanılan çimentonun da ince olması çatlak ve boşluklara daha kolay ulaşması açısından önemlidir. Sızıntı enjeksiyonunda, düşük basınç değerleri kullanılarak enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir. Zemin içine enjekte edilen malzeme zamanla sertleşerek zeminin mekanik ve hidrojeolojik özelliğini değiştirmektedir. Diğer yandan kimyasal malzemeler kullanılarak benzer iyileştirilmeler de yapılmaktadır. Sızıntı enjeksiyonunun sıvılaşmaya karşı etkili olduğu yapılan deneylerde kanıtlanmıştır. Bu yöntem hem uygulama kolaylığı hem de ekonomik olmasından dolayı diğer yöntemlerden öne çıkar (Mutman ve Kavak, 2007). Bu yöntem yer altı suyu bariyerlerinin oluşturulmasında, kazı ve tünel yapımı esnasında kullanılır.

## **b) İntrüzyon (Çatlatma) Enjeksiyonu**

Özellikle sızıntı enjeksiyonlarının uygulamasının mümkün olmadığı yerlerde intrüzyon enjeksiyonu kullanılır. Çatlatma enjeksiyonunda, zeminin kontrollü bir şekilde düşük viskoziteli çimento enjeksiyonu ile yüksek basınçlarda (20-40bar) çatlatılması söz konusudur. Çatlatma enjeksiyonu sonucu zemin içinde ağaç dallarına benzer bir şekilde sertleşmiş çimento kanalları oluşturulur. Bu sayede zemin, kontrollü bir şekilde bölgesel olarak sıkıştırılır. Bu metot daha çok zeminin sıkıştırılmasında ve sertleştirilmesinde kullanılır. Çimento şerbetinin permeasyon ile ulaşamadığı boşluklara çatlatma yolu ile ulaşılarak boşluklar doldurulabilir. Bu durum permeabilitenin kontrolünü sağlar. Uygulama kolaylığı olması amacıyla karışıma belirli oranlarda bentonit ve benzeri katkı malzemeleri de ilave edilebilmektedir. Çatlatma enjeksiyonu, yapı temellerinin kontrollü bir şekilde kaldırılmasında kullanılmakla beraber özellikle baraj yamaçlarında ve temelleri altında suyun kaçışını önlemek için kullanılır.

## **c) Kompaksiyon Enjeksiyonu**

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

Kompaksiyon enjeksiyonu diğer tüm enjeksiyon yöntemlerinden farklıdır. Enjeksiyon karışımı zemin boşluklarına nüfuz etmeyecek şekilde ve zemin daneleri ile karışmayacak şekilde tasarlanır. Hazırlanan düşük slamp değerine sahip yüksek viskoziteli enjeksiyon materyali zemine yüksek basınçlarda enjekte edilir. Hazırlanan bu enjeksiyon materyali zemine yaklaşık 35bar basınçla enjekte edilir (Tunçdemir, 2004). Enjeksiyon materyali ile enjeksiyon yapılan ortamda ampul şeklinde kütleler oluşturulur. Burada penetrasyondan ziyade oluşturulan enjeksiyon kütleleri etkisi ile etraftaki gevşek zeminin yanal ötelenmesi sonucu zemin danelerinin birbirine yaklaşması sağlanır. Böylece daha sıkı formlar elde edilir. Bu uygulama sonucunda zeminin orjinal yapısı bozularak radyal olarak sıkıştırılır. Bu yöntem aşırı oturma problemi olan zeminin iyileştirilmesinde, farklı oturma problemi olan mevcut yapıların rehabilitasyonunda, yumuşak zeminlerin sıkıştırılarak

geçirimsizliğinin azaltılmasında aktif olarak kullanılmaktadır. Kompaksiyon enjeksiyonu tüm zeminler için kullanılabilir. Kompaksiyon enjeksiyonu, zemin türü ve yapısına göre genellikle 2m ile 4m aralığında uygulanmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

#### **d) Jet Enjeksiyonu**

Jet enjeksiyonu diğer bilinen enjeksiyon yöntemlerine göre oldukça yenidir. Zeminin, yerinde enjeksiyon materyali ile karıştırılması işlemidir. Bu enjeksiyon işleminde ilk önce tasarım derinliğine kadar inilmektedir. Daha sonra delgi için kullanılan tijlerin uçlarındaki nozullardan yüksek basınçla (>300bar), çimento şerbeti enjekte edilmektedir. Bu enjeksiyon sırasında tijler de belirli hızla döndürülerek aşağıdan yukarıya doğru çekilmektedir. Böylece zemin içinde tij boylarına bağlı olarak belirli çapta silindirik kolonlar elde edilmektedir. Jet uygulaması tam enjeksiyon olmayıp bir karıştırma yöntemidir. Tijlerin dönmesi sonucunda hareket eden zeminle enjeksiyon malzemesi birbirine karışmaktadır. Sonuç olarak belirli çapta ve boyda kolonlar oluşturulur. Oluşturulan kolonlar ile zemin iyileştirilerek düşük permeabiliteli ve/veya yüksek dayanıma sahip formasyonlar elde edilir. Jet enjeksiyonu, neredeyse her tür zayıf zemin tiplerinde ve kum, çakıl, kil gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda, diğer iyileştirme metotlarından daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm alternatifidir. Oturma sorununu gidermek, taşıma gücünü arttırmak için kullanıldığı gibi yeraltı su kontrolü, şev stabilitesi gibi alanlarda da kullanılır. Diğer yandan jet enjeksiyonu killerin şişme potansiyelini de düşürür. Jet enjeksiyonunda elde edilen kolonların çapı 3m'ye kadar çıkabilmektedir.

Jet enjeksiyonu teknikleri zemin koşullarına, istenen kolon özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Amaçlarına ve kullanım şekline göre Jet 1, Jet 2, Jet 3 ve Süper Jet yöntemleri olmak üzere dört çeşit jet enjeksiyonu tekniği bulunmaktadır.

Jet 1; En basit ve yaygın kullanılan tekniktir. İlk olarak 70'li yılların başında Japonya'da, 70'lerin ortalarında ise İtalya'da denenmiştir. Zeminin parçalanma ve çimentolanmasının, genellikle çimento şerbeti ile sağlandığı ve tek bir akışkanın yüksek enerji jeti şeklinde uygulandığı jet enjeksiyon işlemidir. Bu metotta delme-enjeksiyon takımı tek çeperli bir borudan ibaret olup, çimento şerbeti bu borudan yaklaşık 200m/s hızla, 300-600bar basınçla basılır. Bu metotla oluşan kolonlar, zemin türlerine ve

parametre aralıklarına göre, çakıllı zeminlerde 0.6m'den 1.2m çapına kadar ulaşabilmektedir. Bu yöntem kohezyonlu zeminlerde çakıllı zeminlerdeki kadar etkin değildir. Jet 1, özellikle tünellerde, yatay veya yataya yakın doğrultularda başarı ile uygulanabilir.

Jet 2; Zeminin parçalanması ve çimentolanmasının ikinci bir akışkan olarak hava jeti, yüksek enerjili bir sıvıyla (genellikle bir çimento şerbeti) gerçekleştirildiği jet enjeksiyon sistemidir. Çimento şerbeti orta borudan, basınçlı hava (10-12bar) ise dış borudan geçer. Basınçlı hava, kinetik enerji sürtünme kayıplarını kısmen azalttığı için, bu metotta oluşan kolon çapları jet 1'e kıyasla %60-80 daha büyük olur. Kolon çaplarının bu şekilde artmasının nedenleri şu şekilde açıklanabilir:

- ✓ Basınçlı hava, harç jeti ile yeraltı suyu arasında bir tampon bölge oluşturur. Böylece, daha geniş bir zemin hacmini etkilemek mümkün olur.
- ✓ Kesilen zeminin doğurduğu çalkantıyı yenmek için harcanması gereken enerjiden tasarruf edilir.
- ✓ Kesilen zeminin uzaklaştırılması kolaylaşır.

Bu yöntemle kolon çapları orta sıkı zeminlerde 1.0m'den, gevşek zeminlerde ise 1.8m'den fazla kalınlığa ulaşabilmektedir. Jet 2 yöntemi kohezyonlu zeminlerde Jet 1 yöntemine göre daha etkili sonuçlar vermektedir.

Jet 3; Zeminin parçalanmasının yüksek enerjili su jeti ile sağlandığı, çimentolanmasının ise eş zamanlı olarak ayrı bir enjeksiyon karışımı jeti ile elde edildiği jet enjeksiyon işlemidir. İç içe üç borulu takım kullanılan bu metotta, 400-600bar basınçlı su ortadaki borudan, 10-12bar basınçlı hava ara borudan, tıpkı jet 2'deki gibi, nozullardan basılmaktadır. 50-100bar basınçlı çimento şerbeti ise en dış borudan ayrı bir nozuldan hava karışımı içine enjekte edilmektedir. Jetgrout kolonları bu metotla 2m'den fazla boyuta kadar ulaşabilmektedir. Jet 3 yöntemi kohezyonlu zeminlerde en etkili yöntemdir. Ancak, nihai kolon basınç dayanımı diğer tekniklerle oluşturulan kolonlara göre daha düşüktür (Toğrol, 1994; Durgunoğlu vd., 1998).

Süper Jet; Son dönemlerde büyük kolon çaplarını yüksek hızda ve düşük maliyetlerle elde edebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de Süper Jet olarak adlandırılan yöntemdir. Bu metot ile 3-5m çapa kadar zemin-çimento karışımı içeren kolonlar elde edilmektedir. Kolon yapım aşaması ilk olarak 15cm çapa sahip tijin

istenilen noktaya indirilmesi ile başlamaktadır. Tijlerin ucundaki yüksek çaplı nozullardan çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçta püskürtülür ve zemin ilk önce parçalanarak zemin-çimento karışımı kolonlar oluşur. Özel durumlarda, su yerine diğer uygun sıvılar veya süspansiyonlar kullanılabilir. Bu yöntemde tijlerin dönme ve çekme hızları standart jetgrouting yöntemindekine göre çok daha azdır. Süper jet kolonları imalatında işletim parametreleri olarak 3–4 devir/dakika dönüş hızı, 7mm/dakika çekme hızı, 400bar enjeksiyon basıncı ile 4m çapa kadar ulaşabildiği görülmektedir (Bell, 1993). Süper jet yöntemiyle oluşturulan kolonlarda kolon kesitlerinin büyüdüğü görülmektedir. Bu yöntem; yatay zemin suyu kontrolünde, sıvılaştırılabilir tabaka stabilizasyonunda, geçirimsiz perde duvar imalatında, kazı yan yüzleri desteklenmesinde kullanılmaktadır.

### 3. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Enjeksiyon deyimi yaklaşık 1800'lü yıllardan bu yana kumlu, çakıllı zeminleri, boşluklu ya da çatlaklı kayaları doldurup mühendislik özelliklerini değiştirmek ve sağlamlaştırmak amacıyla zemine çeşitli maddeleri basınçla vermek anlamında kullanılır. İçitim, şerbetleme ve grouting kelimeleri de enjeksiyon yerine kullanılabilir. Bu kadar eski bir tarihe sahip olan zemin enjeksiyonu ile ilgili olarak literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Bunlardan bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Schwarz ve Krizek (1992) yaptıkları çalışmada, su/çimento oranlarını 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 olarak dört farklı şekilde seçmişlerdir. Çimento sınıfı olarak normal Portland, ince daneli MC-100, MC-300, MC-500 kullanmakla beraber, kullanılan bu çimentoları belirlenen su miktarları ile karıştırıcılarda 1 ve 10 dakika karıştırmışlardır. Sonuç olarak 10 dakika karıştırılarak yapılan çimento şerbetinin 1 dakika karıştırılarak hazırlanan çimento şerbetine göre daha hızlı çöktüğü ve en nihayetinde aynı çökelme yüzdesine ulaştıklarını gözlemlemişlerdir. Ayrıca karıştırma sürelerinin priz süresini etkilemediğini sadece karıştırma süresinin artması ile viskozitenin de arttığını belirlemişlerdir.

Krizek ve Helal (1992), su/çimento oranı 2.0 olacak şekilde hazırladıkları ince daneli çimento ve sodyum silikat karışımlarını kum numunelere enjekte etmişlerdir. Hazırlanan bu numunelere basınç, çekme, drenajlı ve drenajsız üç eksenli deneyler uygulamışlardır. Üç farklı boşluk oranı seçilerek yapılan deneyler sonucunda basınç dayanımının harcın kür süresi ve başlangıçtaki yoğunluğu ile artış gösterdiğini, relatif sıkılığı %21'den %81'e çıkan numunelerde basınç dayanımının 3.2MPa'dan 3.5MPa'ya çıktığını ve çekme dayanımının 0.35MPa'dan 0.43MPa'ya yükseldiğini belirtmişlerdir.

Liao vd. (1992), su/çimento oranlarının 1.0 ve 2.0 olduğu MC-500 ince daneli çimento ile farklı oranlarda (%10 ile %80 ) sodyum silikat katkılarını deneylerinde kullanmışlardır. 28 günlük serbest basınç dayanımları incelendiğinde sodyum silikat oranının artması ile serbest basınç dayanımının %30 oranında artış gösterdiği açıklanmıştır.

Mori vd. (1992) yaptıkları çalışmada, farklı renklerde karışımlar kullanarak, farklı dane dağılımına sahip zeminlerde, farklı enjeksiyon basınçlarında enjeksiyon işlemini uygulamışlardır. Enjeksiyon uygulanabilen numunelerin şekillerinden yola çıkılarak zeminlerin enjeksiyon edilebilirliğini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda enjeksiyon basıncı, zeminlerin permeabilitesi, karşının priz süresi ve çevre basıncının zemin enjeksiyonunun başarısına etki ettiği belirtilmiştir.

İncecik ve Ceren (1995), farklı su/çimento oranına sahip çimento şerbetlerine çimento ağırlığının %4'ü kadar bentonit, %1'i kadar akışkanlaştırıcı ve yine çimento ağırlığının %1'i kadar hava sürükleyici katkıları ilave ederek deney yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde 15cm çapında 30cm yüksekliğinde ki silindirik hücrelere relatif sıkılığı %50 olacak şekilde çakıl yerleştirip 100kPa basınç altında enjeksiyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Enjeksiyon uygulanmış numuneler 7 ve 28 gün kür ortamında bekletildikten sonra kırılmışlardır. Hazırlanan bu numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve değişen su/çimento oranının basınç dayanımına ve viskoziteye olan etkisi incelenmiştir. Akışkanlaştırıcı katılan çimento ile yapılan enjeksiyon numunelerinde maksimum basınç dayanımı gözlenmiş olup minimum basınç dayanımının ise %4 bentonit katkılı numunelerde gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca basınç dayanımının su/çimento oranının artması ile azaldığını fakat zamanla arttığını belirtmişlerdir.

Perred vd. (1997), farklı su/çimento oranlarında normal Portland çimentosu ve ince daneli çimento kullanarak harçlar hazırlamış ve bu harçlara farklı miktarlarda su tutucu katkıları, süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı ekleyerek deney yapmışlardır. Kullanılan bu harçların reolojik özellikleri ve enjeksiyon edilebilirliklerini incelemişlerdir. İnce daneli çimento harcının viskozitesini normal Portland çimentosuna göre daha yüksek bulmuşlardır. Su/çimento oranının 1.2 ve 2.0 olduğu ince daneli çimento karışımlarında enjeksiyon işleminin başarılı olduğunu, çimento ağırlığının %6'sı kadar silis dumanının eklenmesi ile de enjeksiyon edilebilirliğin ve sulanmanın azaldığını fakat viskoziteyi ise arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Mnif (1997), farklı su/çimento oranına sahip karışımları kuru kuma enjeksiyon yapmış ve enjeksiyon basıncı ve kumdaki filtrasyon nedeni ile su miktarının önemli olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde kuru ve yaş kuma yapılan enjeksiyon deneyi sonucunda kısmen suya doygun kumların enjeksiyon edilebilirliğinin kuru kuma göre daha iyi seviyede olduğunu ortaya koymuştur.

Akbulut (1999), %50 sıklıkta yerleştirdiği daneli zeminlere, çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento-kil harçlarını kullanarak enjeksiyon işlemini gerçekleştirmiştir. Silis dumanı ile enjeksiyon yapılmış numunelerde basınç dayanımının yüksek olduğunu fakat geçirgenliğin düştüğünü belirtmiştir. Uçucu kül ile yapılan enjeksiyon da basınç dayanımının biraz düştüğünü geçirgenliğin arttığını, kil katkılı numunelerde ise basınç dayanımının düştüğünü belirtmiştir.

Toumbakari vd. (1999), hazırlamış oldukları enjeksiyon harçlarını iki farklı yöntem ile karıştırıp zemine enjeksiyon yöntemi ile nüfuz ettirmişlerdir. Bu yöntemler mekanik karıştırma ve ultrasonik mikser ile karıştırma olup mekanik karıştırma işlemi sonucunda enjeksiyon harçlarının zemine nüfuz edemediğini belirtmişlerdir. Fakat ultrasonik karıştırma işleminde sınırlı su/çimento oranında bile çok yüksek nüfuz edilebilirliğini belirtmişlerdir.

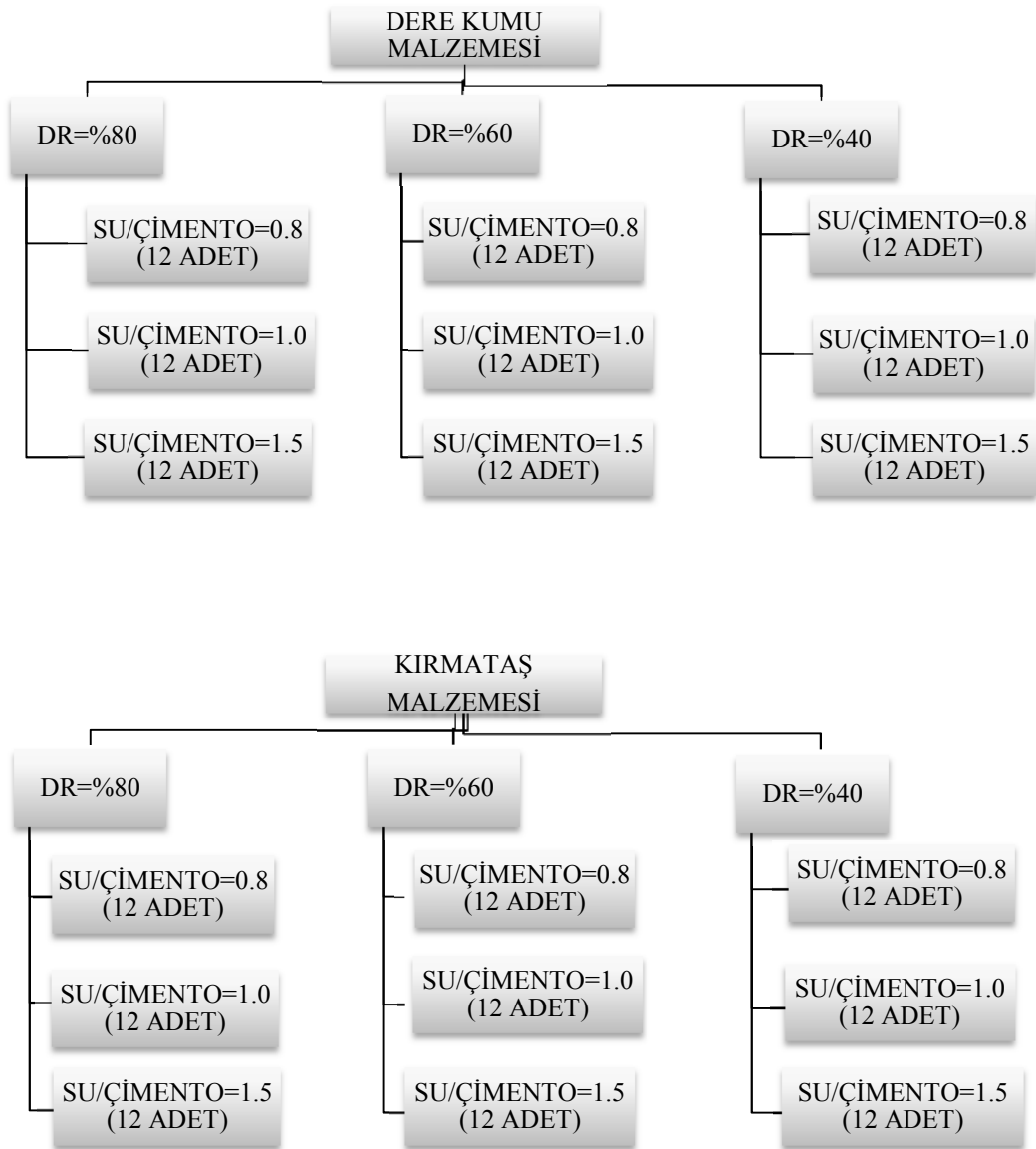
Akbulut ve Sağlamer (2002) yaptıkları çalışmada, relatif sıklığı %30 ve %80 olarak hazırlanan numunelere, enjeksiyon basıncı 50kPa ve 250kPa olacak şekilde farklı su/çimento oranlarına sahip çimento şerbetleri ile enjeksiyon yapmışlardır. Sonuç olarak enjeksiyonun başarılı olarak gerçekleşmesi için üç farklı parametrenin göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu üç parametreye bağlı olarak amprik bir bağıntı elde edip bu bağıntıdan elde edilen sonucun ancak 28'den büyük olması halinde enjeksiyonun başarılı olabileceğini belirtmişlerdir.

Akbulut ve Sağlamer (2003) yaptıkları çalışmada, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 olacak şekilde belirledikleri su/çimento oranına sahip çimento şerbetlerini, hücrelere %30 ve %80 sıklıkta yerleştirilmiş zemin numunelerine 50-250kPa arasında değişen basınç değerleri ile enjekte etmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda enjeksiyon üzerinde zeminin dane çapının önemli olduğunu belirlemişlerdir. Zeminin dane çapının küçülmesi ile zemin enjeksiyonun zorlaştığını, enjeksiyon basıncının artırılmasına rağmen, dane çapı 0.6mm'den daha küçük olan kumlu ortamlara enjeksiyon yapılamadığını belirtmişlerdir.

Kavak ve Mutman (2005) yaptıkları çalışmada, Japonya İnşaat Mühendisleri Birliği'nin sunduğu, sıvılaşma riski bulunan bölgede kalan gradasyona sahip zemin numunesini relatif sıklığı %25 olacak şekilde kalıplara yerleştirmişlerdir. Su/çimento oranı 1.0, 1.5 ve 2.0 olacak şekilde hazırlanan çimento şerbetini 100, 150 ve 200kPa basınç altında zemin numunelere enjekte etmişlerdir. Enjeksiyon deneyleri sonucunda elde edilen numunelere 7 gün ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyleri uygulamışlardır. Deneyler sırasında çimento karışımının su oranı arttıkça enjeksiyon işleminin başarılı olmadığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca 7 günlük serbest basınç dayanımları ile 28 günlük serbest basınç dayanımları arasında tüm numunelerde doğru orantılı bir artış olduğunu belirtmişlerdir.

#### 4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Laboratuvar çalışması için farklı ocaklardan elde edilmiş, aynı granülometriye sahip iki farklı zemin numunesi (dere kumu ve kırmataş) kullanılmıştır. Elde edilen bu zemin örnekleri deney sisteminde kullanılan hücrelere %40, %60 ve %80 relatif sıkılıkta yerleştirilmiş olup 150kPa'lık bir basınç değeri altında enjeksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çimento harcında üç farklı su/çimento oranı seçilmiş olup bunlar; 0.8, 1.0 ve 1.5'tur. Çalışmada 216 adet numune üretilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmada üretilen enjeksiyon numuneleri

Her bir gruptan 12 adet üretilen enjeksiyon numunelerinin 6 adeti 7 gün sonra kür ortamından çıkartılmıştır. Bunlardan 3 adedi serbest basınç dayanımının belirlenmesi için kullanılmış olup kalan 3 adet numune ise kesme ve basınç dalga hızlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Geriye kalan 6 adet numune ise 28 gün sonra kür ortamından çıkartılıp 3 adedi serbest basınç dayanımının belirlenmesi, 3 adedi ise kesme ve basınç dalga hızının belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu sayede değişen su/çimento oranının ve relatif sıklığın serbest basınç dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen dalga hızlarından da yola çıkılarak zeminlerin elastisite modülleri belirlenmiştir. Daha sonra N<sub>2</sub>-BET yöntemi ile dere kumu ve kırmataş zeminlerinin yüzey alanları belirlenmiştir.

#### **4.1. Zemin Enjeksiyonunda Kullanılan Zemin ve Karışımların Özellikleri**

Laboratuvar deneylerinde, Elazığ ili Murat Nehri yatağında kurulmuş olan kum ocağından temin edilen dere kumu ve Harput bölgesinden temin edilen kırmataş kullanılmıştır. Kırmataş malzemesi beyaz tonda kireç taşının konkasörde kırılması ile elde edilmiştir. Dere kumu malzemesi ise siyah tonda olup bazalt kökenlidir. Bağlayıcı malzeme olarak kullanılan çimento, Elazığ Altınova-Çimentaş Çimento Fabrikasından alınan Portland (PÇ42.5) çimentosudur. Katkı malzemesi olarak ise Polisan şirketinden alınan süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çimento ve süper akışkanlaştırıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri üretici firmalardan alınmıştır.

##### **4.1.1 Enjeksiyonda Kullanılan Zemin Numunelerinin Özellikleri**

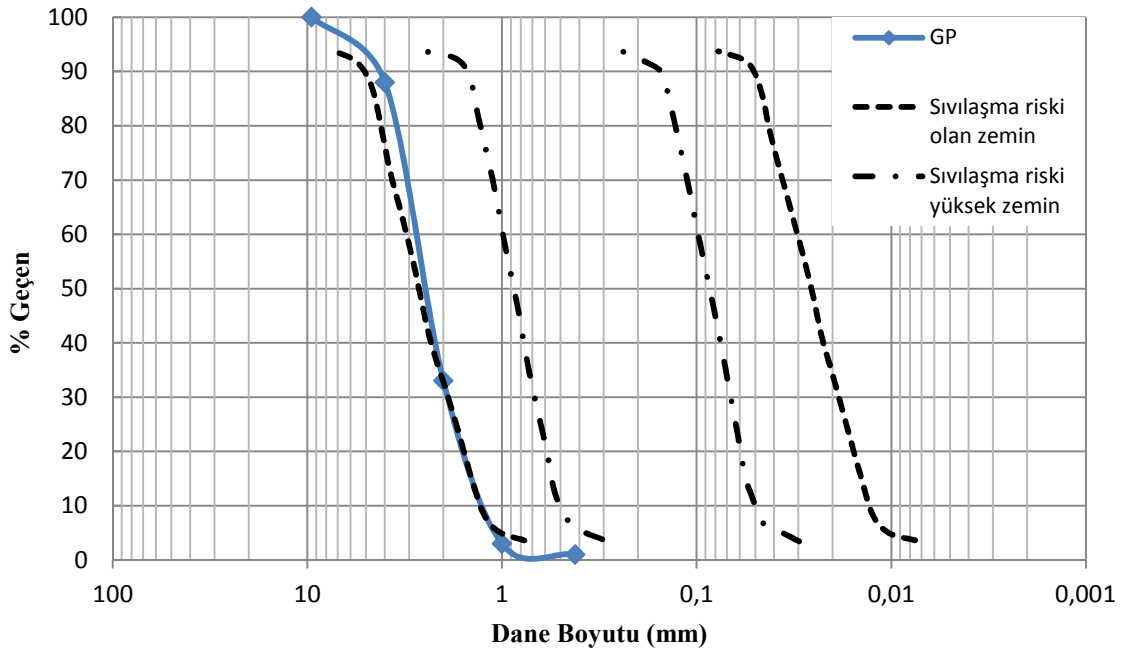
Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen enjeksiyon işleminde aynı granülometriye sahip iki farklı kaynaktan elde edilmiş kırmataş ve dere kumu kullanılmıştır. Enjeksiyon uygulaması için JSCE (1977) ve Ishihara vd. (1989) önerdiği sıvılaştırılabilir zeminler için tespit edilmiş dane dağılımı sınırları dikkate alınmıştır (Şekil 4.2). Akbulut ve Sağlamer (2002) yaptıkları çalışmada, başarılı bir enjeksiyon uygulaması için 0.6mm elekten geçen dane miktarının %10'dan az olması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu nedenle sıvılaştırma riski olan zeminler için önerilmiş dane dağılımının üst sınırı seçilmiştir. Ayrıca 0.6mm elekten geçen dane miktarı %10'dan az olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Kuru ve temiz olarak elenen zeminden, 4.75 mm elek üzerinde kalan malzemeden %12, 2 mm elek üzerinde kalan malzemeden %55, 1 mm elek üzerinde kalan malzemeden %30, 0.425 mm elek üzerinde kalan malzemeden %2, 0.15 mm elek üzerinde kalan

malzemeden ise %1 oranında karıştırılmıştır (Tablo 4.1). ASTM D422–63 standardına uygun olarak yapılan elek analizi sonucunda zemin numunelerimizin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre üniform çakıl (GP) olduğu belirlenmiştir. Zemin numunelerinin ASTM C127-12'ye uygun olarak belirlenen indeks özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Numunelerin değişik relatif sıkılıktaki boşluk oranları Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Zemin karışımların dane çapına göre ağırlık yüzdesi

| Elek No    | Delik Çapı (mm) | Elek Üstünde Kalan (g) | Elekten Geçen (g) | Elekten Geçen (%) |
|------------|-----------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| 3/8        | 9.51            | 0.00                   | 110.0             | 100               |
| 4          | 4.00            | 13.2                   | 96.8              | 88                |
| 10         | 2.00            | 60.5                   | 36.3              | 33                |
| 18         | 1.00            | 33.0                   | 3.3               | 3                 |
| 40         | 0.42            | 2.20                   | 1.1               | 1                 |
| 100        | 0.15            | 1.10                   | 0.0               | 0.0               |
| TOPL. KABI |                 | 110.0                  |                   |                   |



**Şekil 4.2.** JSCE (1977) ve Ishihara vd. (1989) önerdiği sıvılaştırılabilir zeminlerin dane dağılımı ve enjeksiyon uygulanan zeminlerin dane dağılımı

**Tablo 4.2.** Numunelerin indeks özellikleri

| Numune          | $\gamma_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_{kmaks}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_{kmin}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $e_{maks}$ | $e_{min}$ | D <sub>10</sub><br>(mm) | D <sub>30</sub><br>(mm) | D <sub>60</sub><br>(mm) | Cu   | Cc   |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| <b>KIRMATAŞ</b> | 2.56                               | 1.82                                     | 1.54                                    | 0.66       | 0.41      | 1.30                    | 2.0                     | 3.0                     | 2.30 | 1.02 |
| <b>DEREKUMU</b> | 2.81                               | 1.98                                     | 1.71                                    | 0.64       | 0.42      | 1.30                    | 2.0                     | 3.0                     | 2.30 | 1.02 |

**Tablo 4.3.** Numunelerin relatif sıklığına göre boşluk oranları

| Numune           | Relatif sıklık<br>(%) | Boşluk oranı, e |
|------------------|-----------------------|-----------------|
| <b>KIRMATAŞ</b>  | 40                    | 0.560           |
|                  | 60                    | 0.509           |
|                  | 80                    | 0.458           |
| <b>DERE KUMU</b> | 40                    | 0.550           |
|                  | 60                    | 0.510           |
|                  | 80                    | 0.460           |

#### 4.1.2 Enjeksiyonda Kullanılan Çimento ve Akışkanlaştırıcının Özellikleri

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen enjeksiyon işleminde Elazığ Altınova-Çimentaş Çimento Fabrikasının ürettiği CEM1-42.5-R (PÇ42.5R) Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri üretici firmadan temin edilmiş olup Tablo 4.4’de verilmiştir. Deneylerde su/çimento oranının özellikle 0.8 olduğu çimento şerbetlerinde viskoziteyi düşürerek enjeksiyon işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak amacıyla Polisan şirketinin ürettiği Politon SA1 314 isimli süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri Tablo 4.5’te verilmiştir.

**Tablo 4.4.** Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

| PÇ42.5R | KİMYASAL ANALİZ         |                                       |                                       |              |                                          |                                 |                    |                                       |                                       |                                        |
|---------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
|         | SiO <sub>2</sub><br>(%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | CaO<br>(%)   | MgO<br>(%)                               | SO <sub>3</sub><br>(%)          | K.K<br>(%)         | Ç.K<br>(%)                            | T.E<br>(%)                            | Cl <sup>-</sup><br>(%)                 |
|         | 20.8                    | 6.05                                  | 3.23                                  | 61           | 3.85                                     | 2.33                            | 1.39               | 0.80                                  | 2.07                                  | 0.007                                  |
|         | FİZİKSEL ANALİZ         |                                       |                                       |              |                                          |                                 |                    |                                       |                                       |                                        |
|         | 45 µ<br>geçen<br>%      | Blaine<br>(cm <sup>2</sup> /g)        | Priz<br>Bas.                          | Priz<br>Son. | Özgül<br>Ağırlık<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Yoğunluk<br>(t/m <sup>3</sup> ) | H.<br>gen.<br>(mm) | 2 Gün.<br>basınç<br>dayanımı<br>(MPa) | 7 Gün.<br>basınç<br>dayanımı<br>(MPa) | 28 Gün.<br>basınç<br>dayanımı<br>(MPa) |
|         | 2.0                     | 3493                                  | 03:20                                 | 04:20        | 3.06                                     | 980                             | 6                  | 26                                    | 46.80                                 | 61.10                                  |

**Tablo 4.5.** Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

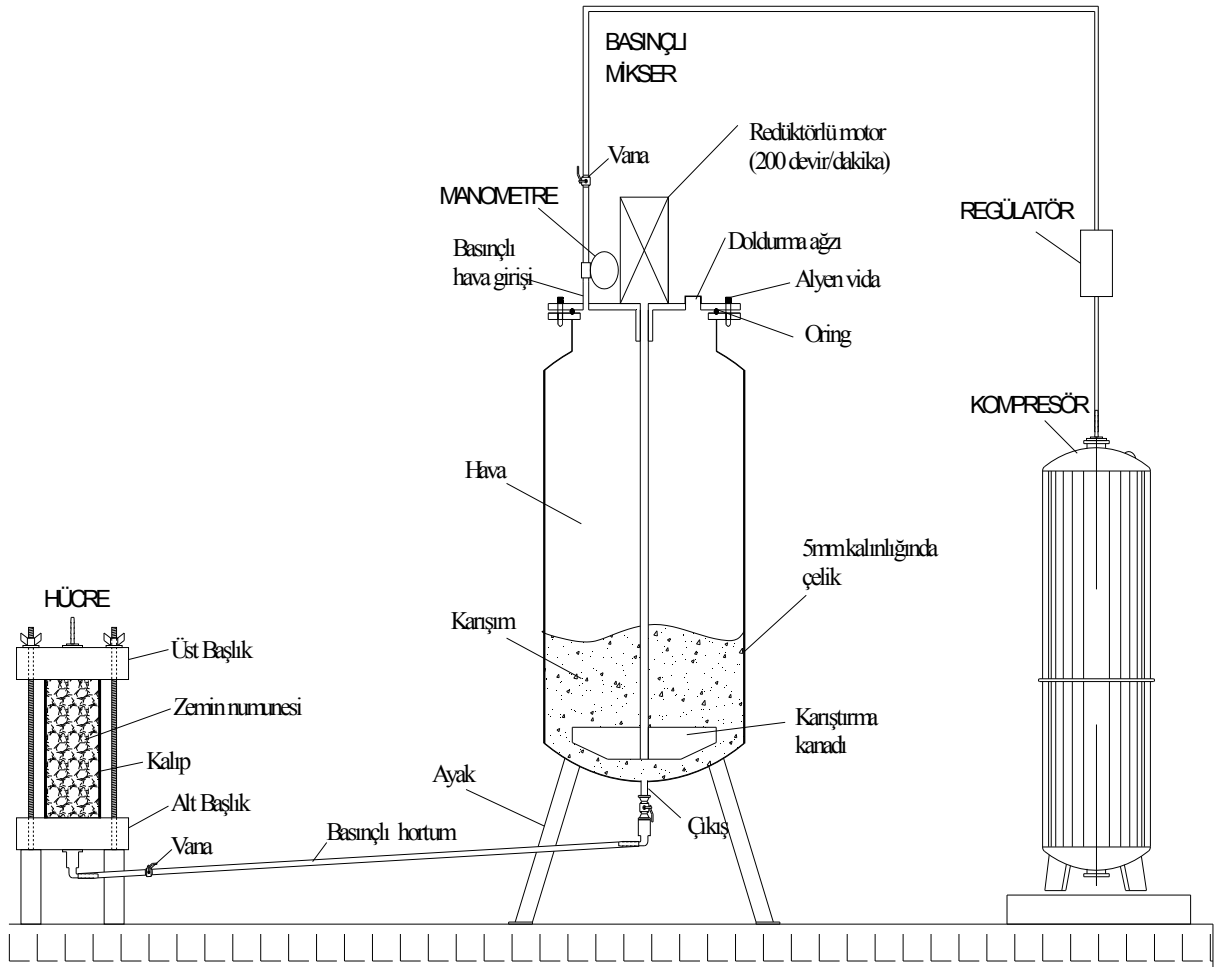
|                                             |                                        |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Kimyasal İçerik</b>                      | Ligno+ Naftalin Sülfonat Bazlı Polimer |
| <b>Renk/homojenlik</b>                      | Koyu Kahverengi Sıvı/Homojen           |
| <b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>) ( 20 °C)</b> | 1.195±0.015                            |
| <b>PH (20 °C)</b>                           | 9.0 ±1.0                               |
| <b>Toplam klor yüzdesi (%)</b>              | <0.1                                   |
| <b>Suda çözünebilen klor yüzdesi (%)</b>    | <0.1                                   |
| <b>Eşdeğer Alkali Miktarı (%)</b>           | <9.0                                   |

## 4.2 Enjeksiyonda Kullanılan Deney Düzeneğinin Özellikleri

Şekil 4.3'te şematik olarak gösterilen enjeksiyon deney düzeneği kompresör, basınçlı mikser ve hücrelerden oluşmaktadır. Düzenekte 10bar basınç verebilen bir kompresör bulunmaktadır. Basınçlı mikser, 15bar basınca dayanıklı olup 20lt kapasiteye sahiptir. Basınçlı mikserin üst kapak açıklığı 180mm'dir. Basınçlı mikserin kapağında doldurma ağız ve hava giriş vanası yer almaktadır. Basınçlı mikserin girişinde basıncı ayarlamak için regülatör bulunmaktadır. Enjeksiyon sırasında manometreli bir regülatör yardımı ile istenilen enjeksiyon basıncı ayarlanmıştır, ayrıca basınçlı mikserin kapağında içerideki basıncı ölçmek için ikinci bir manometre bulunmaktadır.

Kapak ile gövde arasına sızdırmazlığın sağlanması için conta konulmuştur. Basınçlı mikserin tabanında bir adet 3/8 çıkış yer almaktadır. Basınçlı mikserin kapağında bir adet

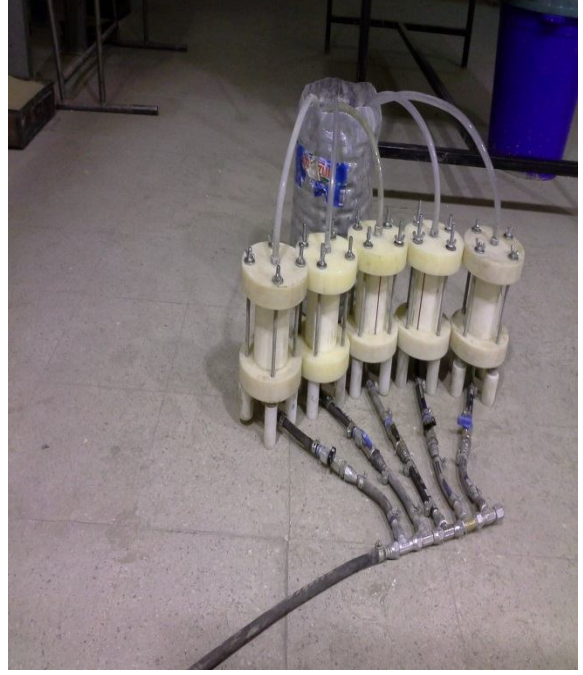
200 devir/dk karıştırma motoru yer almaktadır. Bu karıştırma motoruna bağlı olan bir adet karıştırma kanadı yer almaktadır. Sistemin çalışma prensibi, basınçlı tüpün bir motor yardımıyla karıştırılmasından ibarettir. Hücreler, sert plastikten imal edilmiş olup, iç çapı 50mm ve yüksekliği 250mm'dir. Hücreler 15bar basınca dayanıklı olacak şekilde üretilmiştir. Hücrelerin alt ve üst başlıkları arasında, 120mm yüksekliğine sahip kalıp bulunmaktadır. Alt ve üst başlıklar dört adet elle sıkıştırılabilen kelebek vida yardımı ile sabitlenmiştir. Alt başlığın merkezinde basınçlı mikser ile bağlantının sağlandığı kelepçeli rakor bulunmaktadır. Kalıp ile başlıklar arasında sızdırmazlığın sağlanması için o-ring kullanılmıştır. Deney düzeneğinin resmi Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.3. Deney düzeneğinin şematik gösterilmesi



Şekil 4.4. Basınçlı mikser



Şekil 4.5. Deney hücreleri



Şekil 4.6. Deney düzeneği

### 4.3 Enjeksiyon Uygulaması

Laboratuvar deneylerinde dere kumu ve kırmataş zemin numuneleri yağlanmış olan kalıplara %40, %60 ve %80 relatif sıkılıkta yerleştirilmiştir. Numuneler, kalıplara huni yardımı ile dökülmüş ve şişlenerek yerleştirilmiştir. İstenilen relatif sıkılığa göre bir kalıba yerleştirilmesi gereken numune ağırlığı Eşit. 4.1’de verilen bağıntı yardımı ile bulunmuştur.

$$M = \frac{V \cdot \gamma_{kmaks} \cdot \gamma_{kmin}}{\gamma_{kmaks} - Dr \cdot (\gamma_{kmaks} - \gamma_{kmin})} \quad (4.1)$$

V: Hücre hacmi

Dr: Relatif sıkılık

$\gamma_{kmaks}$ : Maksimum kuru birim hacim ağırlık

$\gamma_{kmin}$ : Minimum kuru birim hacim ağırlık

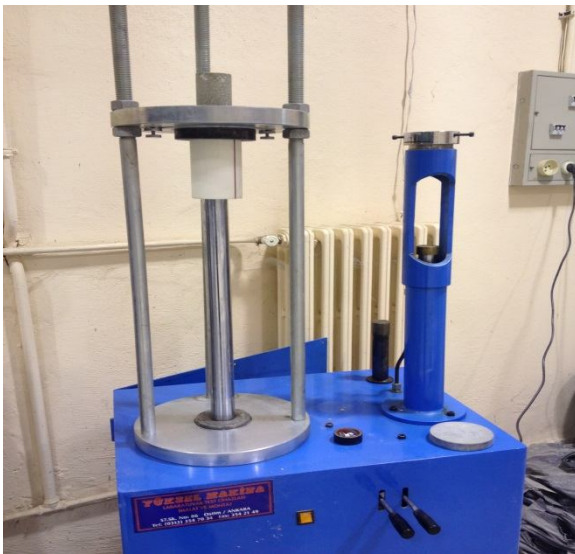
Enjeksiyon harcı ağırlıkça 0.8, 1.0 ve 1.5 su/çimento oranında hazırlanmıştır. Daha homojen bir karışım elde edilebilmesi için hesaplanan miktarlardaki su ve çimento miksere eklenmeden önce bir kova içerisinde matkabın ucuna takılmış karıştırıcı aparat yardımı ile yaklaşık 10 dakika boyunca karıştırılmıştır (Şekil 4.7). S/Ç oranı 0.8 olan çimento harcına çimento ağırlığının %1’i kadar, s/ç oranı 1.0 olan çimento harcına çimento ağırlığının %0.4’ü kadar, s/ç oranı 1.5 olan çimento harcına ise çimento ağırlığının %0.2’si kadar süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Kovaya konulmuş olan suya yukarıda belirtilen oranlarda süper akışkanlaştırıcı eklenmiş sonra çimento ilave edilerek karıştırılmıştır.



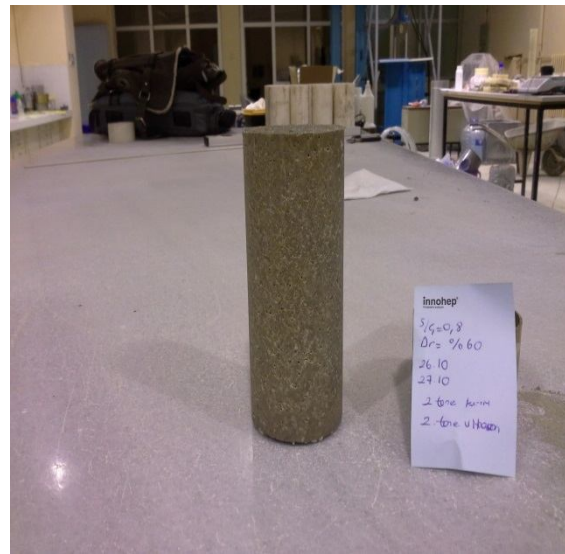
Şekil 4.7. Karıştırıcı aparat

Çimento harcı, hazırlandıktan sonra basınçlı mikserin doldurma ağzından dökülmüştür. Ekleme işlemi tamamlandıktan sonra mikserde bulunan karıştırma kanadı çalıştırılmıştır. Kompresör yardımı ile basınçlı mikserde istenilen basınç verilmiştir. Enjeksiyon basıncı 150kPa olarak belirlenmiş olup, bu basınç değerinin istenilen seviyede sabit kalması, basınçlı mikserin girişindeki regülatör yardımı ile sağlanmıştır. Basınçlı mikserin kapağında bulunan manometre yardımı ile de mikserin içerisindeki basıncın uygulama boyunca kontrolü sağlanmıştır. Enjeksiyon düzeneğinde gerekli olan hazırlıklar tamamlandıktan sonra her bir hücreye giden hortum üzerinde bulunan vanalar teker teker açılmıştır. Uygulama sırasında kalıp içerisindeki havanın sıkışıp başarısız enjeksiyona neden olmasını önlemek amacıyla hücrelerin üst başlığının merkezinde bulunan tahliye vanaları açık bırakılmıştır. Bu sayede kalıp içerisinde bulunan havanın tahliyesi sağlanmıştır. Bu vanaların ağız kısmına takılan şeffaf hortum yardımı ile de kalıplardan çıkan hava kabarcıkları kontrol edilmiştir. Bu tahliye vanalarından çimento harcı çıkmaya başladıktan bir süre sonra hücrelere giden vanalar kapatılmıştır.

Kalıpların hücreler ile bağlantısının yapıldığı ekipmanlar sökülmeden, kalıplar 1 gün bekletilmiştir. 1 gün bekletildikten sonra numuneler kalıpları ile beraber kür tankına bırakılmıştır. 7 gün ve 28 gün süresince numuneler su içerisinde 21°C sıcaklıkta kür edilmiştir. Her bir gruptan altı numune 7 gün, diğer altı numune ise 28 gün kür edilmiştir. Kür süresi dolan numuneler, kalıplarından hidrolik numune çıkarıcı ile çıkarılmıştır (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9).



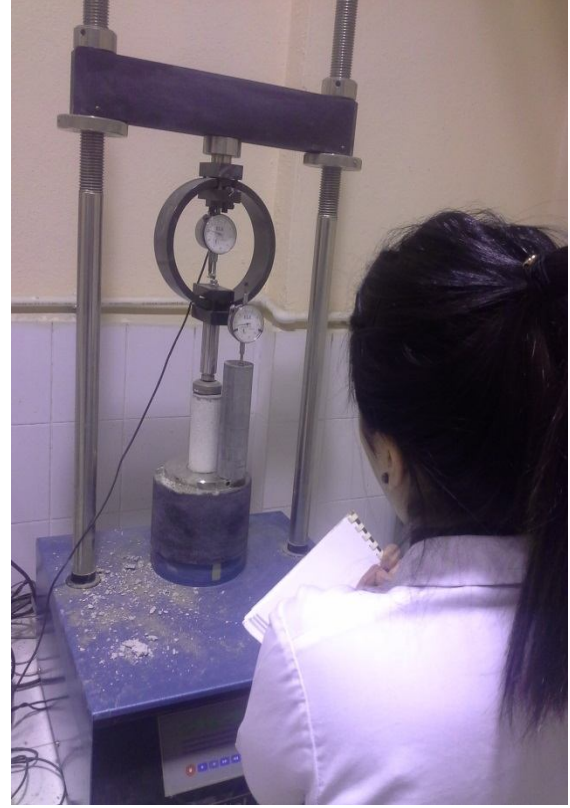
Şekil 4.8. Hidrolik numune çıkarıcı



Şekil 4.9. Enjeksiyon numunesi

#### 4.4. Serbest Basınç Deneyinin Yapılması

Hidrolik numune çıkarıcı yardımı ile kalıplarından çıkartılan 5 cm çapında ve 12 cm boyunda olan enjeksiyon numuneleri, serbest basınç deneyi öncesinde boyu çapının iki katı olacak şekilde taş kesme makinası yardımı ile kesilmiştir (Şekil 4.10). 5 cm çapında ve 10 cm boyunda olacak şekilde kesilen numuneler serbest basınç deneyi öncesi kurutulmuştur. Kurutulan bu numunelere uygulanacak olan kuvvetin üniform olarak dağılması için başlık yapılmıştır. Serbest basınç (tek eksenli) deneyi, ELE marka Tritest 50 deney aleti kullanılarak, American Society of Testing Materials (ASTM) C597-09 (2009) standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 4.11). Serbest basınç deney aletinin yük halkası, kalibrasyonu yapılmış olup 28kN kapasiteye sahiptir. 0.5mm/dak hızla yapılan serbest basınç deneyi süresince numuneye uygulanan yük ve bu yüklemede, oluşan deformasyonlar okunmuştur. Deney sonucunda numunelerin serbest basınç dayanımı bulunmuştur. Serbest basınç deneyi yapılmış numunelerden biri Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.10. Taş kesme makinası ile numunelerin kesilmesi      Şekil 4.11. Serbest basınç deneyi



**Şekil 4.12.** Serbest basınç deneyi ile kırılmış numune

#### **4.5. Kayma ve Basınç Dalga Hızlarının Belirlenmesi**

Bu deney kaya, beton, asfalt vb. yerlerden elde edilen karot örneklerinin basınç ve kayma sismik hızlarının ölçülerek, mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem diğer deney yöntemlerine göre daha kolay, daha ucuz olduğu için ve kısa zamanda yapıldığı için yoğun olarak tercih edilmektedir. Ayrıca deney yapılan numunelerde deformasyona neden olmamaktadır. Bu çalışmada enjeksiyon numunelerinin P (Basınç) ve S (Kayma) dalga hızları ISRM (1981)'de belirtilen test metodu kullanılarak bulunmuştur. Ölçümler Pundit Plus cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13). Her bir gruptan 12 adet üretilen enjeksiyon numunelerin 6 adeti dalga hızlarının belirlenmesi için ayrılmış olup 3 adeti 7 gün ve 3 adeti 28 gün boyunca kür ortamında bekletildikten sonra kalıplarından çıkartılmıştır. Kalıplarından çıkartılan bu numunelerin alt ve üst yüzeyleri deneyin daha doğru yapılabilmesi için taş kesme makinası yardımıyla kesilerek daha pürüzsüz yüzeyler elde edilmeye çalışılmıştır. Numunelerin alt ve üst yüzeyleri pürüzsüzleştirildikten sonra boyları ölçülmüştür. Dalga hızlarının belirlenmesi için ayrılan numuneler 1 gün boyunca etüvde düşük sıcaklıkta (40°C) bekletilmiştir. Bu sayede deney öncesinde numunelerin kurutulması sağlanmıştır. Kurutma işleminin nedeni, kür ortamında bekletilen numunelerin doygun olması ve doygun numuneler üzerinde ultrason dalgaları ile ölçüm yapılırken boşluklarda su olduğundan yüksek değerler elde edilmesidir.



**Şekil 4.13.** Pundit Plus cihazı ile yapılan deney

Çalışma parametrelerinden olan frekans, P dalga hızının belirlenmesi için 54kHz, S dalga hızının belirlenmesi için ise 250kHz alınmıştır. Numunenin alt ve üst yüzeylerine alıcı ve verici elemanların temas etmesi için ultrason jeli sürülmüştür. P dalga hızının belirlenmesi için Şekil 4.14’de ve S dalga hızının belirlenmesi içinde Şekil 4.15’de gösterilen alıcı ve verici elemanlar (transdüserler) kullanılmıştır.



**Şekil 4.14.** P dalga hızının belirlenmesi için kullanılan transdüserler



**Şekil 4.15.** S dalga hızının belirlenmesi için kullanılan transdüserler

Cihazın göstergesinden okunan dalgaların yayılma süreleri (  $t_p$  ve  $t_s$  ) Eşit. 4.2’de ve Eşit. 4.3’te belirtildiği şekilde numunenin boyuna bölünerek her bir numune için yayılma hızları (  $V_P$  ve  $V_S$  ) tespit edilmiştir.

$$V_p = L/t_p \quad (4.2)$$

$$V_s = L/t_s \quad (4.3)$$

Burada;

$V_p$ = P Dalga hızı (m/s),

$V_s$ = S Dalga hızı (m/s),

L= Numune boyu (m),

$t_s$ = S Dalgası yayılma süresi (s),

$t_p$ = P Dalgası yayılma süresidir. (s)

Yayılma hızları belirlenen her bir numunenin poisson oranı ve elastisite modülü Eşit. 4.4 ve 4.5’de verilen formüller kullanılarak belirlenmiştir.

$$\nu = \frac{0.5*(V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (4.4)$$

$$E = \frac{\rho * V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (4.5)$$

Burada;

$\rho$ : Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>),

$\nu$ : Poisson oranı,

E: Elastisite modülüdür. (MPa)

#### 4.6. Zemin Örneklerinin Yüzey Alanlarının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında dere kumu ve kırmataş zemin örneklerinin yüzey alanlarının belirlenmesi için, Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü’nde bulunan Micromeritics ASAP 2020 cihazı kullanılmıştır. Dere kumu ve kırmataş zemin türlerinden 0.15-0.18mm, 0.18-0.42mm ve 0.42-1.00mm aralıklarında dane boyutuna sahip numunelerin yüzey alanları ölçülmüştür. Her iki zemin türünden belirlenen çaplarda 2 adet numune alınmış olup hesaplamalarda bunların ortalaması kullanılmıştır. Yaklaşık olarak 1g kadar alınan numuneler analiz balonlarına alındıktan sonra degaz operasyonuna tabi tutulmuştur. Bu operasyon 100°C sıcaklık, 200µm-Hg vakum basıncında 120dk boyunca uygulanmıştır. Degaz operasyonundan sonra analiz kısmına alınan numune balonuna tekrardan 30dk süren ön degaz işlemi uygulanmıştır. Bu operasyonun ardından >%99.99 saflığında N<sub>2</sub> gazı vasıtası ile analiz işlemi yapılmış ve BET teoremine göre yüzey alanları ölçülmüştür.

## 5. LABORATUVAR SONUÇLARI

### 5.1. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

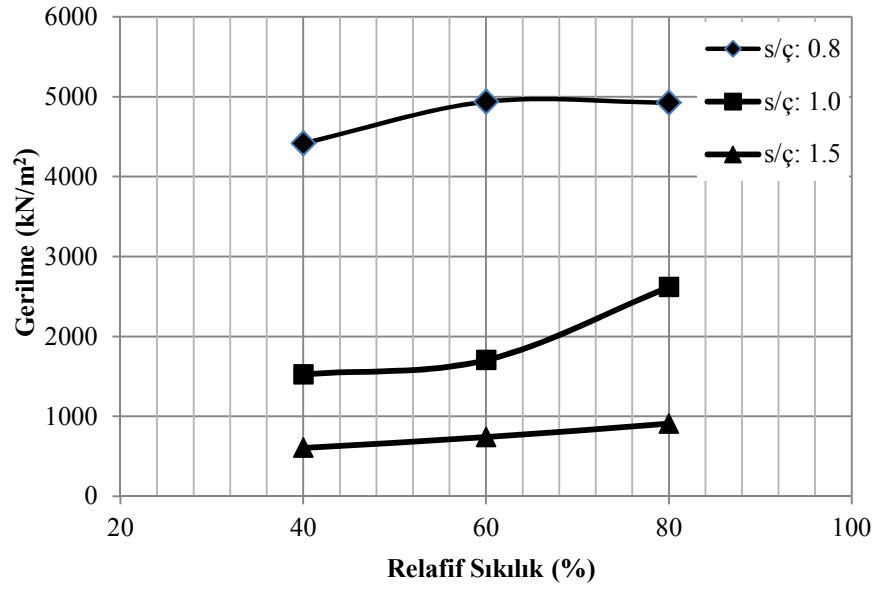
GP sınıfına ait kırmataş ve dere kumu zeminleri ile yapılan enjeksiyon deneylerinde 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonrasında üçer numune üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Değişen s/ç ve relatif sıkılıklarına göre dere kumu ve kırmataş zeminlerinden elde edilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımları Tablo 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.1.**Değişen parametrelere göre kırmataş ve dere kumundan elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımı

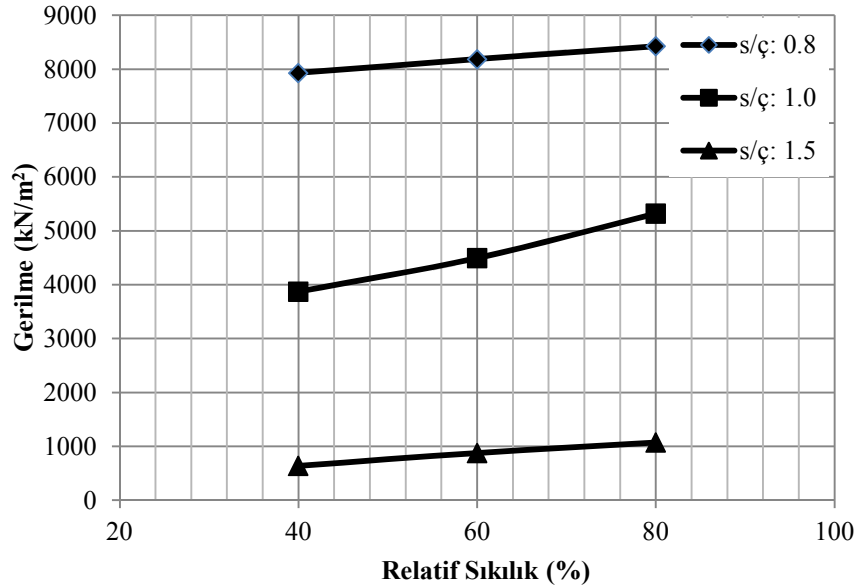
| Değişen Parametreler |                    | 7 Günlük Serbest Basınç Dayanımları (UCS) (kN/m <sup>2</sup> ) |          | 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımları (UCS) (kN/m <sup>2</sup> ) |          |
|----------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------|----------|
| s/ç oranı            | Relatif Sıklık (%) | Dere Kumu                                                      | Kırmataş | Dere Kumu                                                       | Kırmataş |
| 0.8                  | 40                 | 4416.9                                                         | 3805.9   | 7929.6                                                          | 7100.0   |
| 0.8                  | 60                 | 4937.6                                                         | 3620.6   | 8186.5                                                          | 8126.7   |
| 0.8                  | 80                 | 4923.9                                                         | 3810.8   | 8424.9                                                          | 6156.6   |
| 1.0                  | 40                 | 1525.9                                                         | 2115.3   | 3871.6                                                          | 3426.4   |
| 1.0                  | 60                 | 1704.4                                                         | 2015.3   | 4494.4                                                          | 4463.0   |
| 1.0                  | 80                 | 2616.4                                                         | 1697.5   | 5320.1                                                          | 3461.7   |
| 1.5                  | 40                 | 605.1                                                          | 750.2    | 640.4                                                           | 1433.7   |
| 1.5                  | 60                 | 740.4                                                          | 1080.7   | 877.7                                                           | 2559.5   |
| 1.5                  | 80                 | 908.1                                                          | 937.5    | 1073.8                                                          | 1352.3   |

Dere kumu ve kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinde, enjeksiyon harcında s/ç oranı yükseldikçe sünek kırılmanın olduğu, harcın s/ç oranı azaldıkça kırılmanın gevrekleştiği gözlemlenmiştir. Özellikle s/ç oranının 0.8 olduğu enjeksiyon numunelerinin bir kısmında gevrek davranış gözlemlenmesinden dolayı kırılma noktasından sonra okuma zorlukla alınmıştır.

Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değişimleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

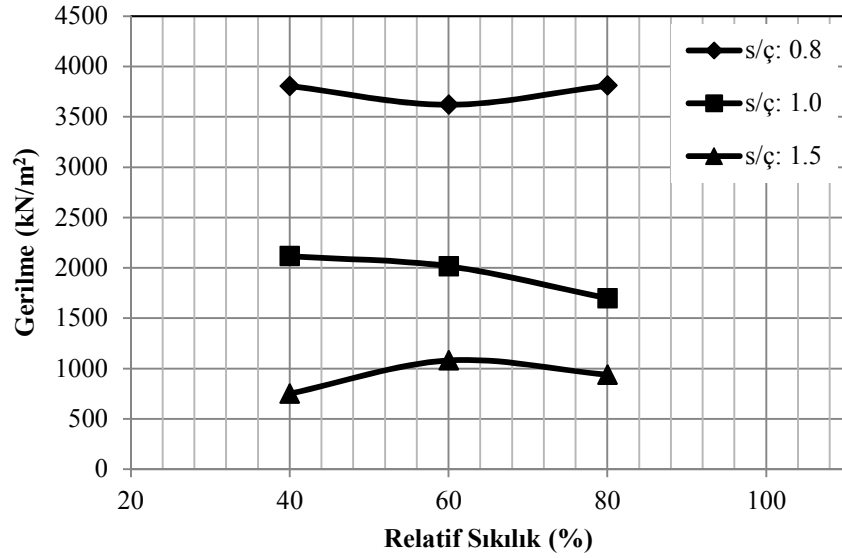


**Şekil 5.1.** Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (7 Günlük)

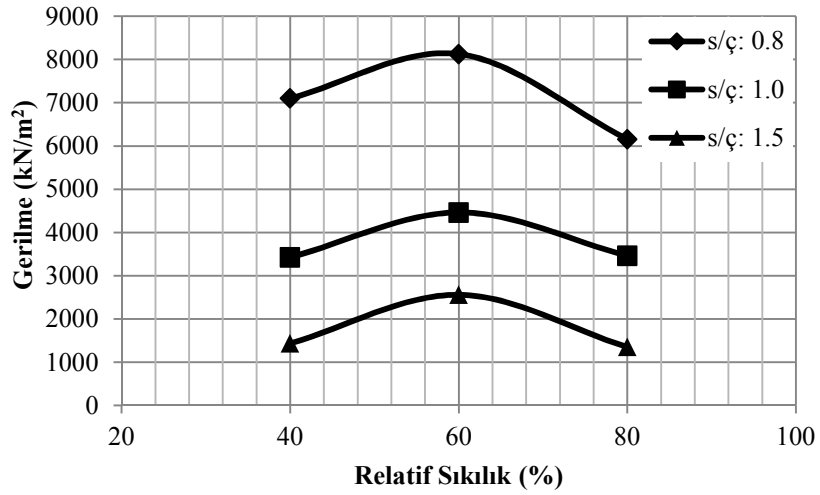


**Şekil 5.2.** Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (28 Günlük)

Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değişimleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

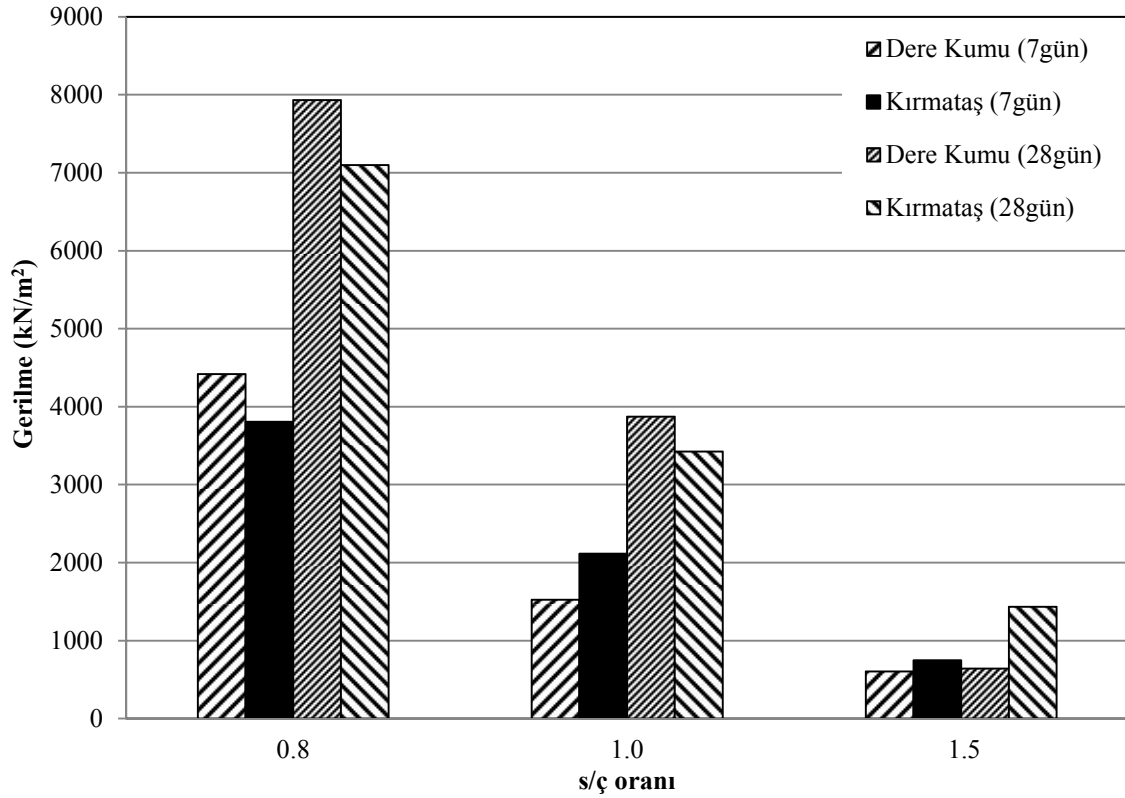


**Şekil 5.3.** Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (7 Günlük)



**Şekil 5.4.** Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (28 Günlük)

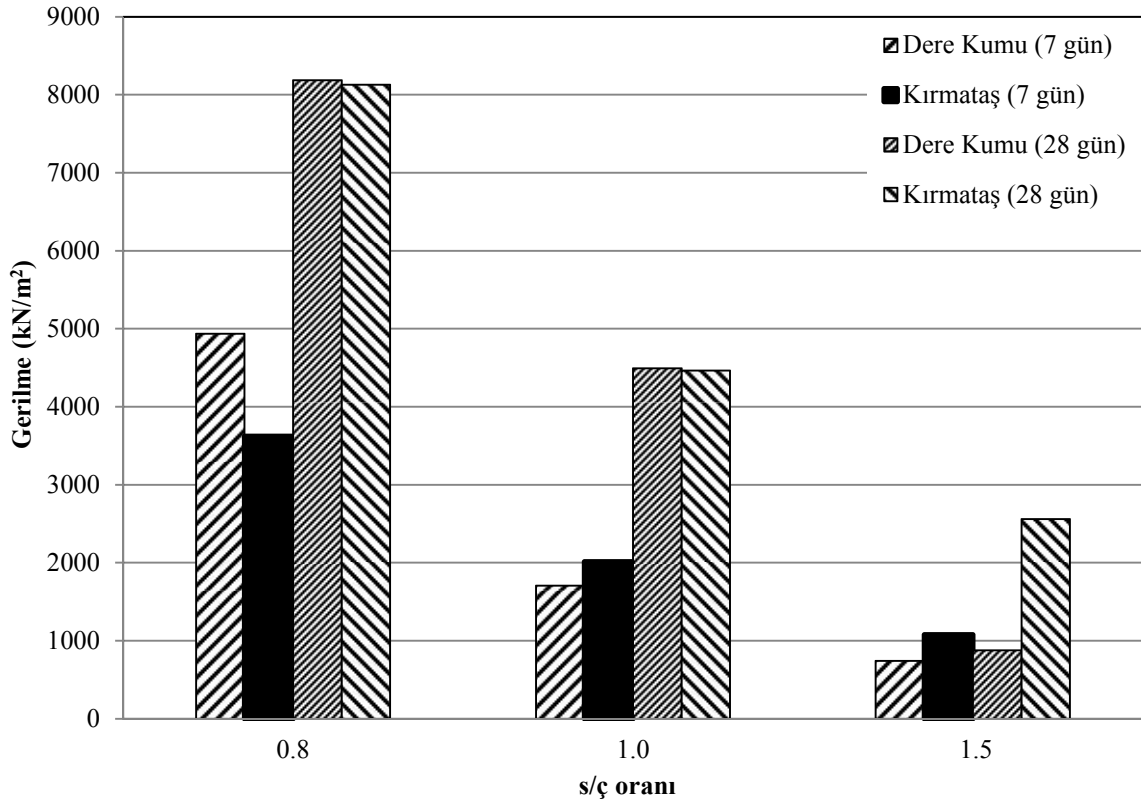
%40 relatif sıkılığa sahip olacak şekilde farklı s/ç oranları seçilerek dere kumu ve kırmataştan üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değişimleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 5.5.** Farklı s/ç oranlarına göre %40 relatif sıkılıkta hazırlanmış dere kumu ve kırmataş kullanılarak elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları

Şekil 5.5 incelendiğinde % 40 relatif sıkılıkta s/ç oranı 0.8 olacak şekilde hazırlanmış kırmataş ve dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Hem 7 gün hem de 28 gün kür ortamında bekletilen numunelerde s/ç oranı arttıkça serbest basınç dayanımı düşmektedir. S/Ç oranı 0.8 olacak şekilde dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri aynı şartlarda kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük dayanım değerlerine göre daha yüksek olduğu yapılan deneyler neticesinde belirlenmiştir. Fakat aynı ilişkinin s/ç oranı 1.5 olacak şekilde hazırlanan enjeksiyon numunelerinde gözlemlenmediği açıktır.

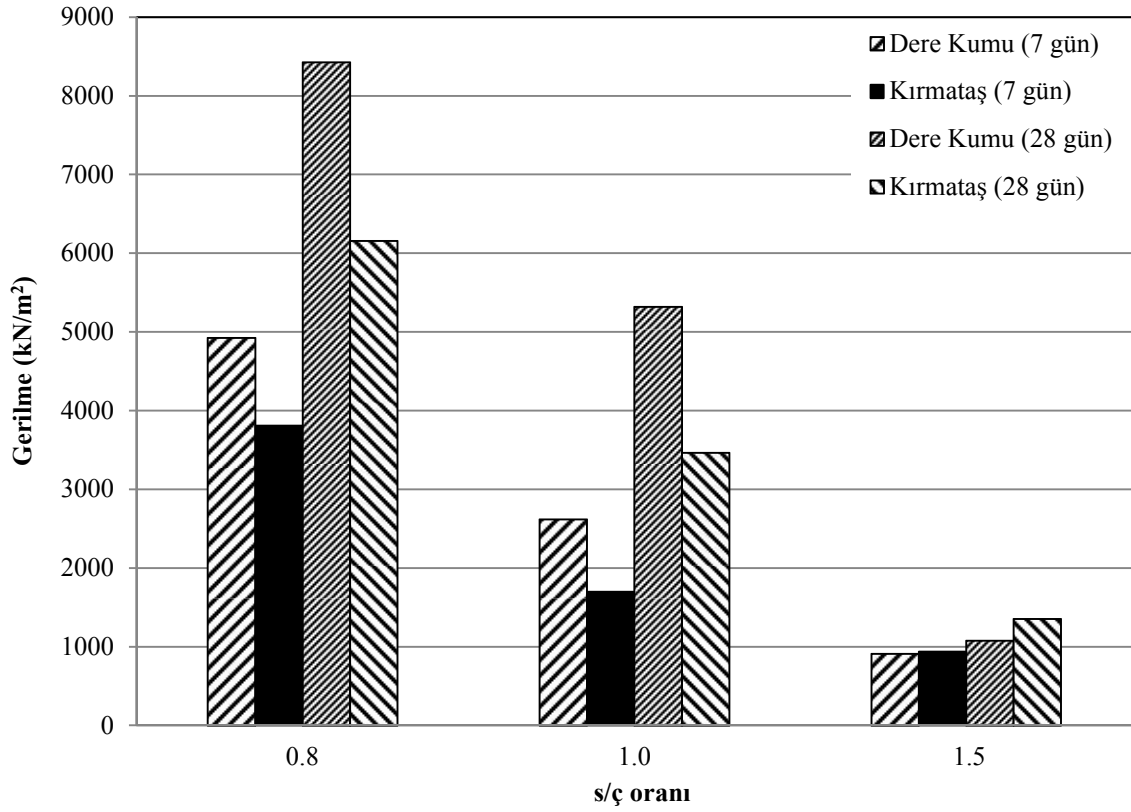
%60 relatif sıkılığa sahip olacak şekilde farklı s/ç oranları seçilerek dere kumu ve kırmataştan üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değişimleri Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



**Şekil 5.6.** Farklı s/ç oranlarına göre %60 relatif sıkılığa hazırlanmış dere kumu ve kırmataş kullanılarak elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları

Şekil 5.6 incelendiğinde % 60 relatif sıkılığa s/ç oranı 0.8 olacak şekilde hazırlanan dere kumu ve kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 günlük serbest basınç dayanım değerleri incelendiğinde dere kumu ile üretilen enjeksiyon numunelerinin dayanım değerlerinin kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin dayanım değerlerine oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat 28 günlük dayanım sonuçlarının ise birbirine çok yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. S/Ç oranı 1.0 ve 1.5 olan numunelerin 7 günlük serbest basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında kırmataştan üretilen enjeksiyon numunelerinin dayanım değerlerinin dere kumundan üretilen enjeksiyon numunelerinin dayanım değerlerine göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

%80 relatif sıkılığa sahip olacak şekilde farklı s/ç oranları seçilerek dere kumu ve kırmataştan üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç değişimleri Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.7.** Farklı s/ç oranlarına göre %80 relatif sıkılıkta hazırlanmış dere kumu ve kırmataş kullanılarak elde edilen enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları

Şekil 5.7 incelendiğinde % 80 relatif sıkılıkta s/ç oranı 0.8 ve 1.0 olacak şekilde hazırlanan dere kumu ve kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri incelendiğinde dere kumu ile üretilen enjeksiyon numunelerinin dayanım değerlerinin kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin dayanım değerlerine oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. S/Ç oranı 1.5 olan numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında ise kırmataştan üretilen enjeksiyon numunelerinin dayanım değerlerinin dere kumundan üretilen enjeksiyon numuneleri dayanım değerlerine göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

## 5.2. Kayma ve Basınç Dalga Hızı Deney Sonuçları

GP sınıfına ait kırmataş ve dere kumu zeminleri ile yapılan enjeksiyon deneylerinde 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonrasında bir gün 40°C sıcaklığa sahip etüvde bekletilen üçer numune üzerinde Pundit Plus cihazı ile kayma ve basınç dalga hızlarının belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında elde edilen  $V_p$  ve  $V_s$  değerleri kullanılarak enjeksiyon numunelerine ait  $\nu$  ve  $E$  değerleri bulunmuştur. Değişen s/ç ve

relatif sıkılıklarına göre dere kumu zemininden elde edilen enjeksiyon numunelerinin  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $\nu$  ve  $E$  değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2.** Değişen  $s/\phi$  ve relatif sıkılıklarına göre dere kumu zemininden elde edilen enjeksiyon numunelerinin  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $\nu$  ve  $E$  değerleri

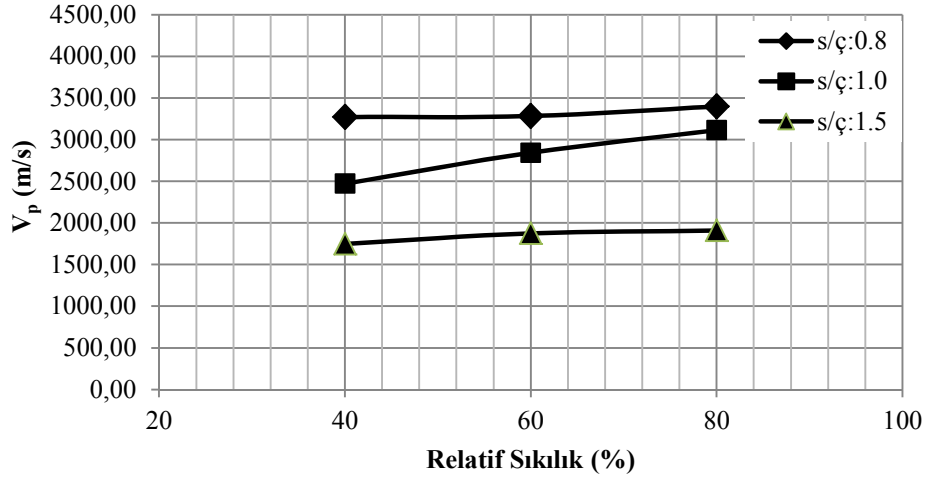
| Değişen Parametreler |                    | 7 Günlük Deney Sonuçları |             |       |           | 28 Günlük Deney Sonuçları |             |       |           |
|----------------------|--------------------|--------------------------|-------------|-------|-----------|---------------------------|-------------|-------|-----------|
| $s/\phi$ oranı       | Relatif Sıklık (%) | $V_p$ (m/s)              | $V_s$ (m/s) | $\nu$ | $E$ (MPa) | $V_p$ (m/s)               | $V_s$ (m/s) | $\nu$ | $E$ (MPa) |
| 0.8                  | 40                 | 3271.3                   | 2021.0      | 0.20  | 23344.2   | 3905.8                    | 2486.5      | 0.19  | 2486.5    |
| 0.8                  | 60                 | 3284.4                   | 2042.5      | 0.19  | 23723.0   | 3966.7                    | 2456.5      | 0.19  | 2456.5    |
| 0.8                  | 80                 | 3398.6                   | 2093.0      | 0.22  | 23057.0   | 4037.0                    | 2353.5      | 0.21  | 2353.5    |
| 1.0                  | 40                 | 2471.0                   | 1530.0      | 0.19  | 13699.5   | 3299.8                    | 2009.5      | 0.21  | 2009.5    |
| 1.0                  | 60                 | 2843.2                   | 1770.0      | 0.19  | 15807.1   | 3358.3                    | 2058.0      | 0.20  | 2058.0    |
| 1.0                  | 80                 | 3114.4                   | 1926.5      | 0.19  | 21209.6   | 3564.6                    | 2176.0      | 0.20  | 2176.0    |
| 1.5                  | 40                 | 1749.5                   | 1080.0      | 0.19  | 6694.3    | 1831.8                    | 1130.0      | 0.19  | 1130.0    |
| 1.5                  | 60                 | 1749.5                   | 1155.0      | 0.19  | 7647.4    | 1906.0                    | 1175.0      | 0.19  | 1175.0    |
| 1.5                  | 80                 | 1910.2                   | 1180.0      | 0.19  | 8086.7    | 1915.6                    | 1180.0      | 0.19  | 1180.0    |

Değişen  $s/\phi$  ve relatif sıkılıklarına göre kırmataş zemininden elde edilen enjeksiyon numunelerinin  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $\nu$  ve  $E$  değerleri Tablo 5.3’de verilmiştir.

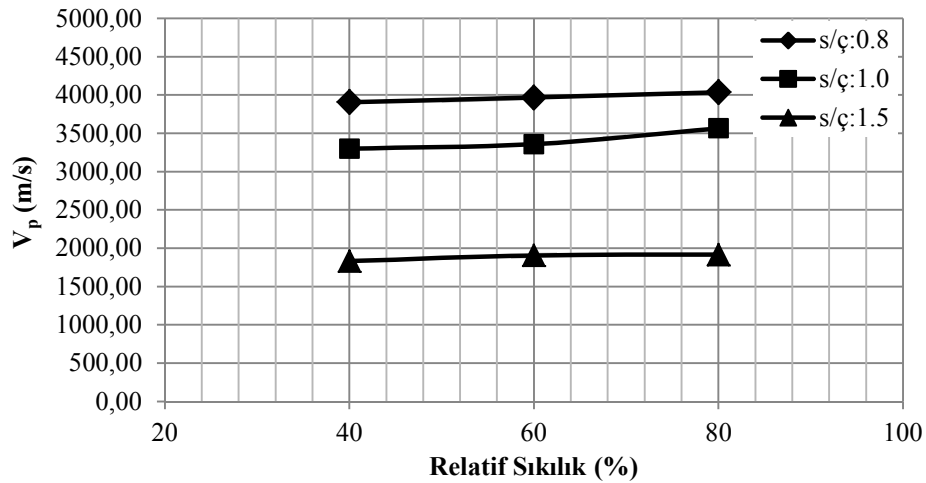
**Tablo 5.3.** Değişen  $s/\phi$  ve relatif sıkılıklarına göre dere kumu zemininden elde edilen enjeksiyon numunelerinin  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $\nu$  ve  $E$  değerleri

| Değişen Parametreler |                    | 7 Günlük Deney Sonuçları |             |       |           | 28 Günlük Deney Sonuçları |             |       |           |
|----------------------|--------------------|--------------------------|-------------|-------|-----------|---------------------------|-------------|-------|-----------|
| $s/\phi$ oranı       | Relatif Sıklık (%) | $V_p$ (m/s)              | $V_s$ (m/s) | $\nu$ | $E$ (MPa) | $V_p$ (m/s)               | $V_s$ (m/s) | $\nu$ | $E$ (MPa) |
| 0.8                  | 40                 | 3177.5                   | 1837.5      | 0.19  | 21395.4   | 3776.3                    | 2318.0      | 0.20  | 32382.3   |
| 0.8                  | 60                 | 3272.0                   | 1975.5      | 0.18  | 23355.3   | 3940.8                    | 2385.0      | 0.20  | 33976.8   |
| 0.8                  | 80                 | 3353.8                   | 1981.0      | 0.19  | 22492.3   | 3950.6                    | 2456.5      | 0.19  | 34313.5   |
| 1.0                  | 40                 | 2634.6                   | 1590.0      | 0.19  | 15172.3   | 3399.4                    | 2094.5      | 0.20  | 25142.4   |
| 1.0                  | 60                 | 3068.6                   | 2018.5      | 0.19  | 22976.9   | 3537.4                    | 2185.5      | 0.19  | 27405.0   |
| 1.0                  | 80                 | 3146.1                   | 2130.0      | 0.20  | 21555.6   | 3645.9                    | 2227.5      | 0.20  | 28672.1   |
| 1.5                  | 40                 | 1942.6                   | 1200.0      | 0.19  | 8233.4    | 2316.3                    | 1366.5      | 0.19  | 10674.2   |
| 1.5                  | 60                 | 2194.6                   | 1390.0      | 0.19  | 11049.1   | 2808.4                    | 865.1       | 0.19  | 17154.4   |
| 1.5                  | 80                 | 2328.9                   | 1440.0      | 0.19  | 11845.8   | 2800.0                    | 1730.0      | 0.19  | 17113.7   |

Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre 7 ve 28 günlük  $V_p$  değişimleri Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



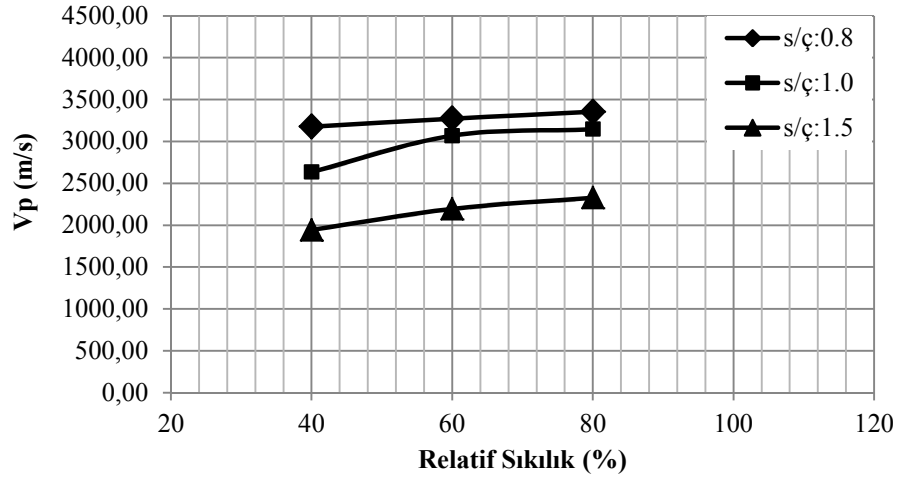
**Şekil 5.8.** Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre  $V_p$  değişimleri (7 Günlük)



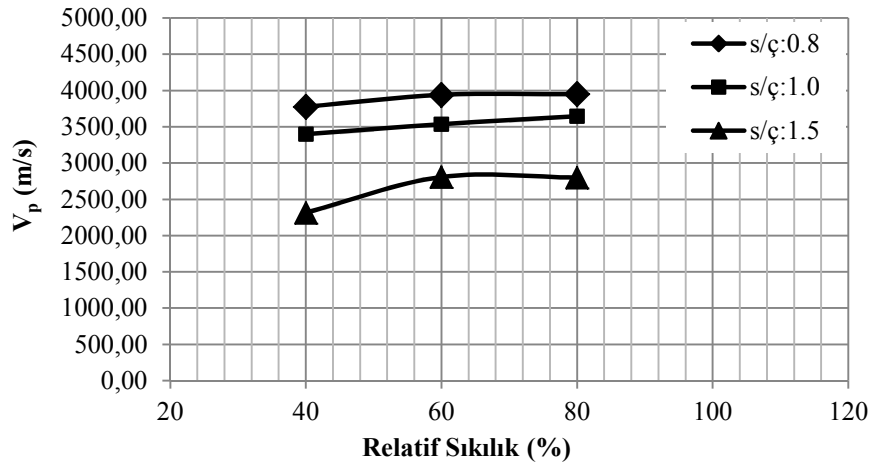
**Şekil 5.9.** Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre  $V_p$  değişimleri (28 Günlük)

Genel olarak; hem 7 gün hem de 28 gün kür ortamında bekletilen dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinde artan relatif sıkılıkla beraber hesaplanan basınç dalga hızı değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. S/Ç değeri 0.8 olacak şekilde üretilen enjeksiyon numunelerinin tüm relatif sıkılık değerlerinde basınç dalga hızı maksimum noktalara ulaşmıştır.

Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre 7 ve 28 günlük  $V_p$  değişimleri Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



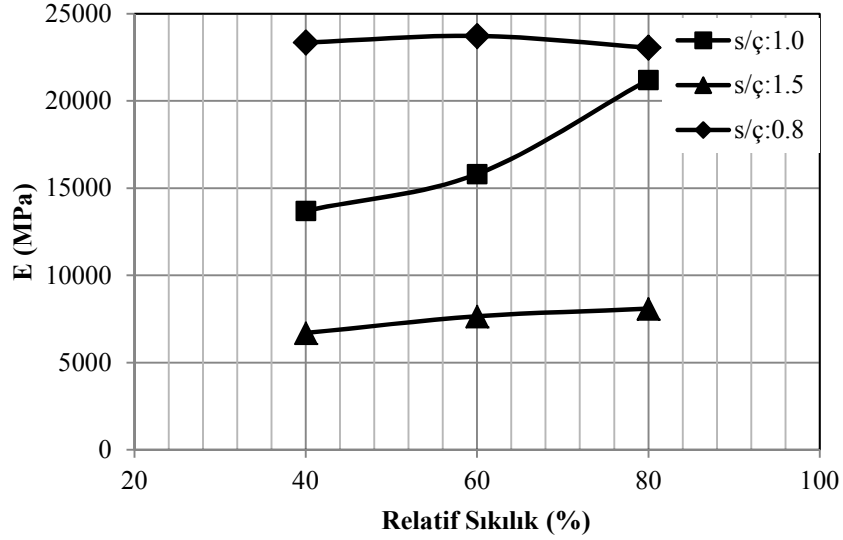
**Şekil 5.10.** Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre  $V_p$  değişimleri (7 Günlük)



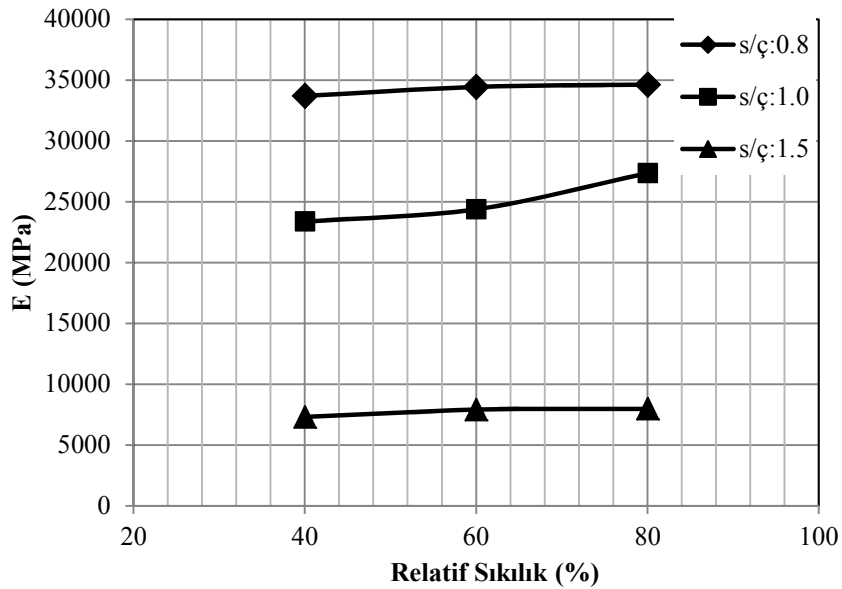
**Şekil 5.11.** Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre  $V_p$  değişimleri (28 Günlük)

Kırmataş malzemesi kullanılarak üretilen enjeksiyon numuneleri, kum malzemesi kullanılarak üretilen enjeksiyon numuneleri ile benzer davranış göstererek hem 7 günlük hem de 28 günlük enjeksiyon numunelerinde relatif sıklığın artması ile  $V_p$  değerleri de artmıştır. Bunun tek bir istisnası s/ç oranı 1.5 olacak şekilde kırmataş malzemesinden üretilen %60 ve %80 relatif sıklığa sahip enjeksiyon numuneleridir. Bu iki numunenin  $V_p$  değerlerinin neredeyse aynı olduğu görülmüştür.

Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre 7 ve 28 günlük E değişimleri Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de gösterilmiştir.

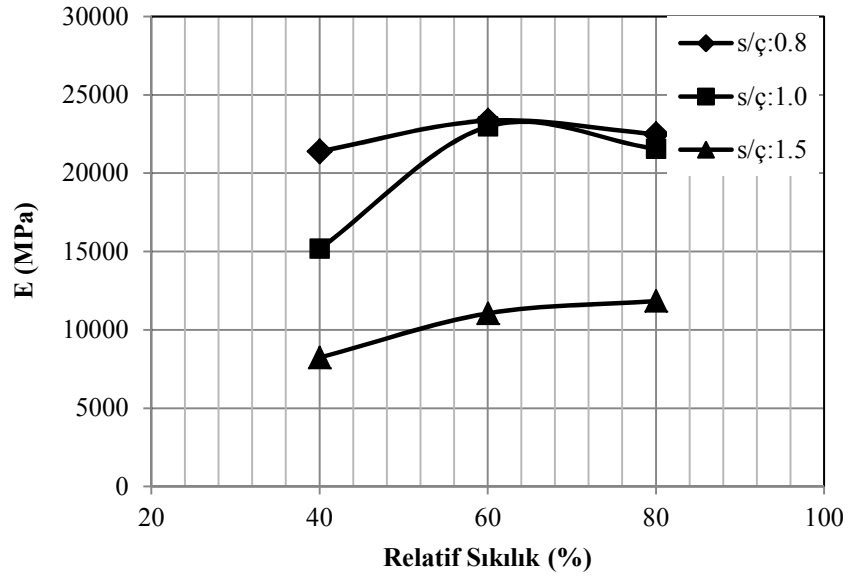


**Şekil 5.12.** Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (7 Günlük)

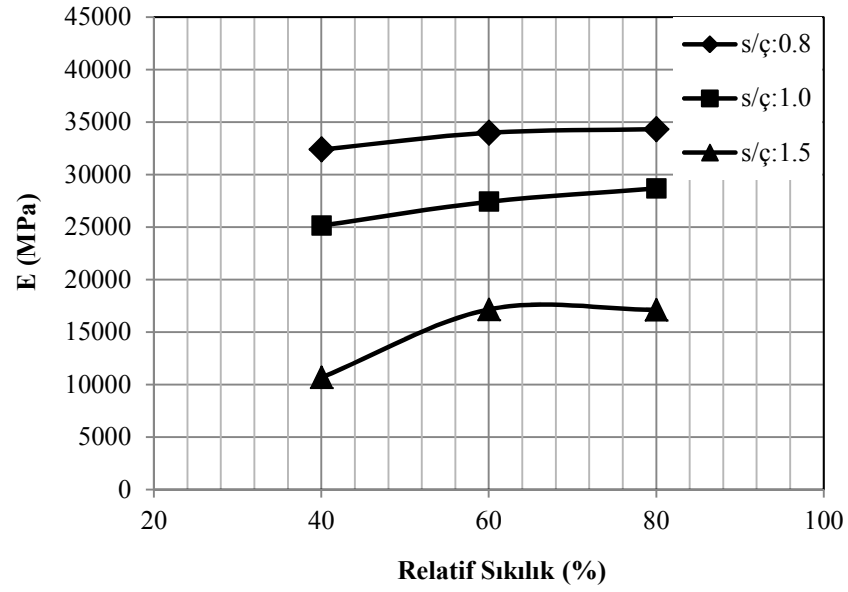


**Şekil 5.13.** Dere kumu kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (28 Günlük)

Kırmetaş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıkılık ve değişen s/ç oranlarına göre 7 ve 28 günlük E değişimleri Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.14.** Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (7 Günlük)



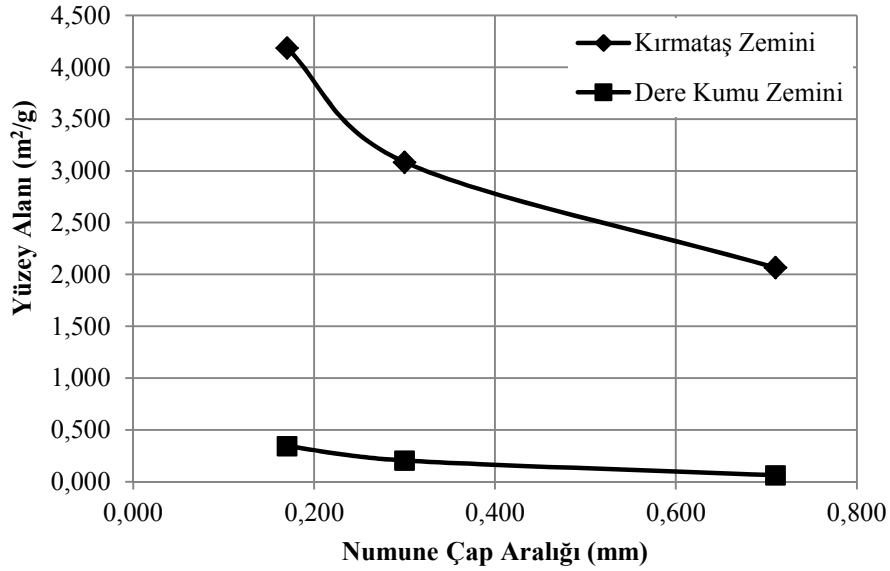
**Şekil 5.15.** Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre E değişimleri (28 Günlük)

### 5.3. N<sub>2</sub>-BET Analizi Sonuçları

Dere kumu ve kırmataş zemin numuneleri üzerinde yapılan N<sub>2</sub>-BET analizi sonuçları Tablo 5.4’de verilmiştir. Şekil 5.16’da Dere kumu ve kırmataş zemin türlerinin numune çap aralıklarına göre yüzey alanları değişimi gösterilmiştir. Kırmataş zemin numunesinin bütün çap aralıklarında dere kumu zemininden çok daha fazla yüzey alanına sahip olduğu ve her iki zemin türünün numune çap aralığı arttıkça yüzey alanının azalmakta olduğu görülmüştür.

**Tablo 5.4.** Dere kumu ve kırmataş zemin numuneleri üzerinde yapılan N<sub>2</sub>-BET analizi sonuçları

|                         | DERE KUMU ZEMİNİ                         |                                          |                                          | KIRMATAŞ ZEMİNİ                          |                                          |                                          |
|-------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Numune Çap Aralığı (mm) | 1.Numune Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | 2.Numune Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | Ortalama Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | 1.Numune Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | 2.Numune Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | Ortalama Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) |
| 0.15-0.18               | 0.405                                    | 0.282                                    | 0.344                                    | 4.412                                    | 3.958                                    | 4.185                                    |
| 0.18-0.42               | 0.199                                    | 0.210                                    | 0.205                                    | 2.505                                    | 3.663                                    | 3.084                                    |
| 0.42-1.00               | 0.039                                    | 0.086                                    | 0.063                                    | 2.162                                    | 1.970                                    | 2.066                                    |

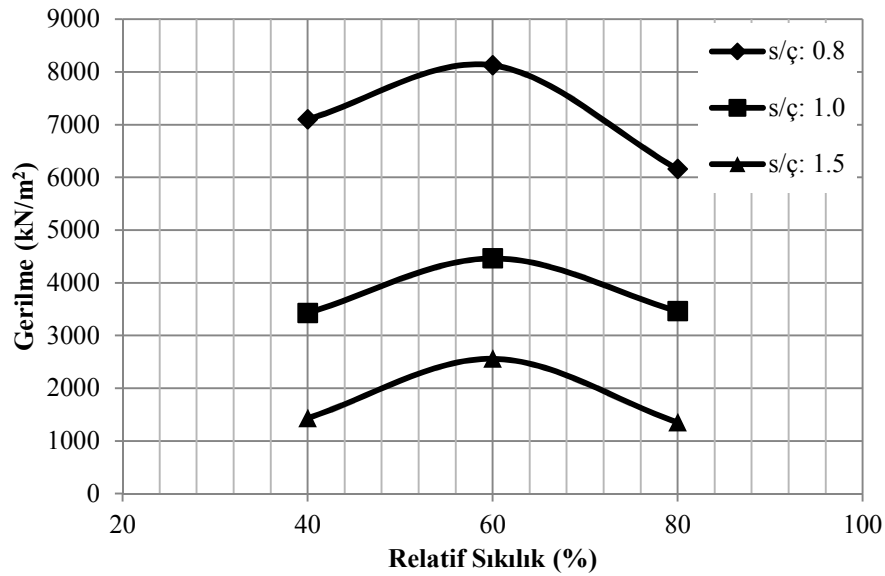


**Şekil 5.16.** Dere kumu ve kırmataş zemin türlerinin numune çap aralıklarına göre yüzey alanları değişimi

## 6. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

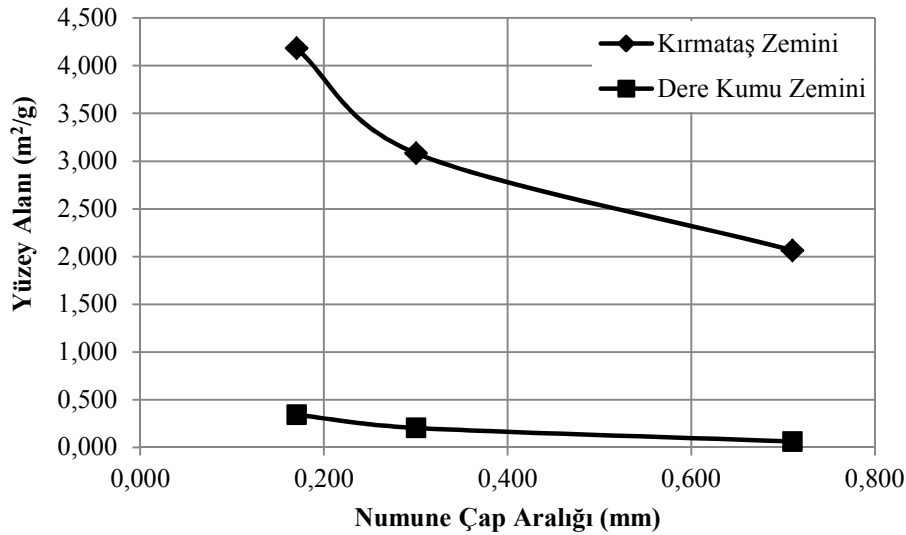
Farklı s/ç oranı ve relatif sıklığa sahip, dere kumu ve kırmataştan üretilen enjeksiyon numunelerine uygulanan serbest basınç deneyi sonuçları değerlendirildiğinde 7 günlük serbest basınç dayanımlarının beklenildiği gibi olmadığı görülmüştür. Bu beklenmedik davranışların sebebi kullandığımız kimyasal katkı nedeni ile enjeksiyon numunelerinin 7 günde kazanması gereken dayanım değerlerini daha sonraki günlerde kazanmasıdır. Bu nedenle yapılan değerlendirmelerde 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri göz önüne alınmıştır.

Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinde relatif sıklığın artması ile serbest basınç dayanımında da artış gözlemlenmiştir. Fakat kırmataş malzemesi ile üretilen enjeksiyon numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımları dikkate alındığında %60 relatif sıklıkta hazırlanan enjeksiyon numunelerinin %80 relatif sıklıkta hazırlanan enjeksiyon numunelerinden daha fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Şekil 6.1). Bunun nedeni, kırmataş malzemesinin yüzey alanının (pürüzlülük) fazla olması nedeni ile çok sıkı ( $D_r = \%80$ ) olacak şekilde hazırlanan enjeksiyon numunelerinde çimento şerbetinin daneler arası boşluklarda hareket ederken, zemin danelerine yapışması ve homojen bir enjeksiyon yapılamaması olduğu düşünülmüştür.



**Şekil 6.1.** Kırmataş kullanılarak elde edilmiş enjeksiyon numunelerinin artan relatif sıklık ve değişen s/ç oranlarına göre serbest basınç dayanım değişimleri (28 Günlük)

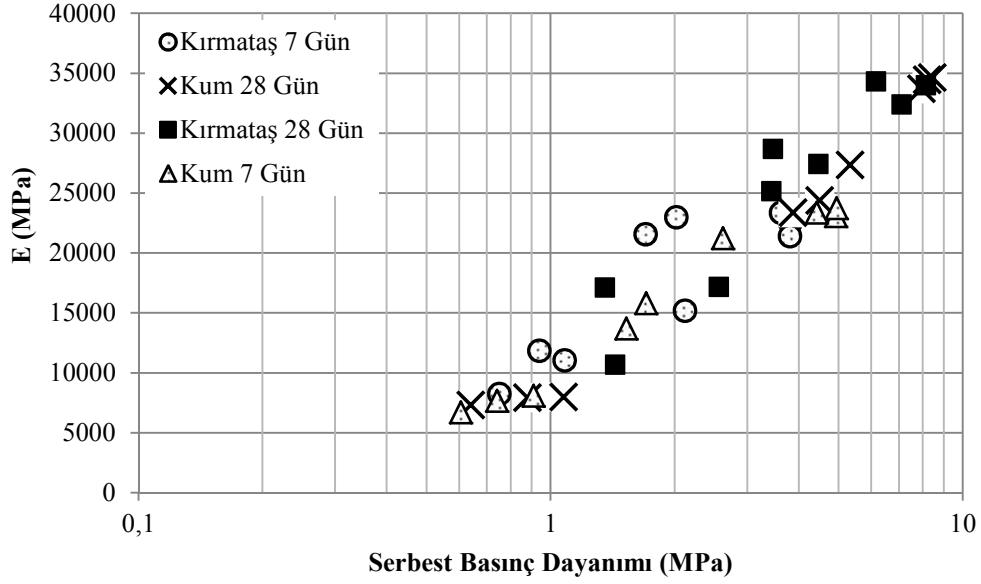
28 günlük serbest basınç dayanımları değerlendirildiğinde s/ç oranı 0.8 ve 1.0 olacak şekilde dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımlarının aynı s/ç oranları ile kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımlarından yüksek olduğu görülmüştür. Fakat s/ç oranı 1.5 olan enjeksiyon numunelerinde bu durumun tersi gözlemlenmiş olup kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımları dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerin serbest basınç dayanımlarına oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni s/ç oranı 1.5 olan enjeksiyon numunelerinde, çimento harcının basınç dayanımına katkısının az olduğu ve bu noktada kullanılan kırmataşın yüzey pürüzlülüğünün dere kumuna oranla fazla olması nedeni ile yüzey pürüzlülüğünün basınç dayanımını arttırdığı düşünülmüştür. Kırmataş ve dere kumu zemin türlerinin numune çap aralıklarına göre yüzey alanları değişimi Şekil 6.2’de verilmiştir.



**Şekil 6.2.** Dere kumu ve kırmataş zemin türlerinin numune çap aralıklarına göre yüzey alanları değişimi

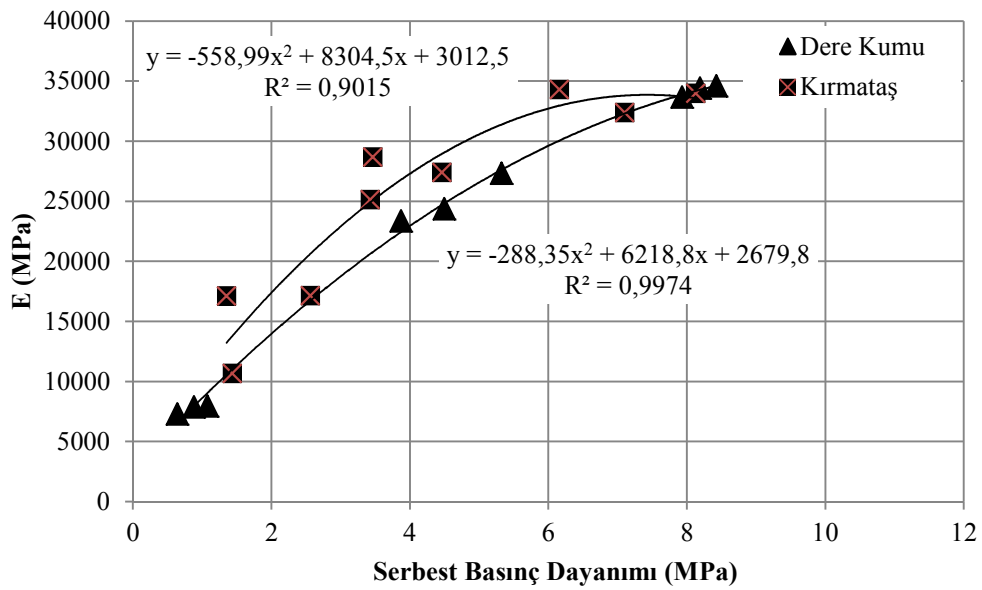
Normal şartlar altında üretilen beton numunelerinde s/ç oranı 0.5 civarındadır. Ancak üretilen enjeksiyon numunelerin bazılarında bu oran 1.5 olarak seçilmiştir. Bu nedenle numunenin bünyesindeki çimento oranı azdır ve priz süresi sonunda enjeksiyon numunelerinin oldukça boşluklu bir yapıya sahip olması kaçınılmazdır. Beton numunelerinde dayanımı etkileyen parametrelerden ikisi çimento oranı ve agrega sürtünmesidir. S/Ç oranı 1.5 olan enjeksiyon numunelerinde dayanımı etkileyen faktörlerden agrega sürtünmesinin öne çıktığı gözlemlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda dere kumu ve kırmataştan üretilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımları ve elastisite modülleri arasında lineer bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımı ile E arasındaki ilişki

Dere kumu ve kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımları ve elastisite modülleri arasındaki ilişki Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. 28 günlük enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımı ile E arasındaki ilişki

## 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Laboratuvarda yapılan enjeksiyon işleminde iki farklı çimento fabrikasından temin edilen PÇ42.5 kullanılarak deneme enjeksiyonları yapılmıştır. İlk denemeler Limak Ergani Çimento fabrikasından temin edilen çimento ile yapılmıştır ancak bu çimento kullanılarak yapılan denemeler başarısız olmuştur. Daha sonra Altınova-Çimentaş fabrikasından alınan çimento ile yapılan enjeksiyon işleminde başarı sağlanmıştır. Bu olayın nedeninin araştırılması için çimentoların 200 nolu (0.074mm) elek üzerinde kalan yüzdeleri belirlenmiştir. Bu yüzdeler Limak Ergani Çimento fabrikasından temin edilen çimento için %4.5, Altınova-Çimentaş fabrikasından alınan çimento için ise %1.5 olduğu belirlenmiştir. Bu yüzdeler TS EN 197-1'e uygun olmasına rağmen küçülen çimento dane boyutunun enjeksiyon işleminin başarılı olmasında katkısı olduğu anlaşılmıştır.

Laboratuvar ortamında üretilen enjeksiyon numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları değerlendirildiğinde, enjeksiyon numunelerinin 7 günde kazandığı dayanım değerlerinin güvenilir olmadığı anlaşılmıştır.

GP sınıfına ait dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinde relatif sıklık arttıkça serbest basınç dayanımı da artmıştır. Ayrıca, su/çimento oranı arttıkça harçta çökme miktarı artmakta ve serbest basınç dayanımında düşük değerler elde edilmiştir. Arazide yapılacak uygulamalarda doğal zeminde yeraltı suyunun varlığı da göz önünde bulundurularak düşük s/ç oranında çimento şerbeti kullanılması daha uygundur. Relatif sıklığı %80 ve su/çimento oranı 0.8 olacak şekilde dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 28 günlük ortalama dayanımı  $8424.9 \text{ kN/m}^2$ 'dir.

GP sınıfına ait kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numuneleri, dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinden farklı davranış göstererek relatif sıklığı %60 olacak şekilde hazırlanan numunelerde maksimum dayanımlar elde edilmiştir. Kırmataştan üretilen enjeksiyon numuneleri dere kumundan üretilen enjeksiyon numuneleri ile benzer davranış göstererek su/çimento oranının azalması ile yüksek dayanımlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Relatif sıklığı %60 ve su/çimento oranı 0.8 olacak şekilde kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin 28 günlük ortalama dayanımı  $8126.7 \text{ kN/m}^2$ 'dir.

Yapılan serbest basınç deneyi sonuçları değerlendirildiğinde, genel olarak dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerin kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinden daha fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, enjeksiyon numunelerinde kullanılan zemin türlerinin kökenleri incelendiğinde bazaltın, kireç taşına oranla daha yüksek dayanıma sahip olmasındandır. S/Ç oranı 1.5 olan enjeksiyon numuneleri bu durumun istisnasıdır.

Dere kumu ve kırmataş kullanılarak üretilen 28 günlük enjeksiyon numunelerinin elastisite modülü değerleri, relatif sıkılığın artması ile beraber artmış olup s/ç oranının artması ile azalmıştır.

28 günlük serbest basınç değerleri ile elastisite modülü değerlerinin ilişkisi incelendiğinde, enjeksiyon numunelerinde sadece serbest basınç deneyi yapılarak elastisite modülü değerlerinin tahmin edilmesine yönelik bir ilişki elde edilebileceği görülmüştür. Bu ilişki dere kumu için  $E = -288.35x(UCS)^2 + 6218.8x(UCS) + 2679.8$  şeklindedir. Bu bağıntının deney sonuçlarına olan uyumu için  $R^2$  değeri kıstas alınmıştır. Dere kumu için  $R^2 = 0.99$  olarak elde edilmiştir. Kırmataş kullanılarak üretilen numunelerin, 28 günlük serbest basınç değerleri ile elastisite modülü değerlerinin ilişkisi incelendiğinde,  $E = -558.99x(UCS)^2 + 8304.5x(UCS) + 3012.5$  şeklinde bir ilişki belirlenmiştir. Bu bağıntının deney sonuçları ile istatistiksel ilişkisinden  $R^2 = 0.90$  olarak elde edilmiştir.

Laboratuvar deneyleri sonucunda fiziksel ayrışma ile oluşmuş zeminlere enjeksiyon yapmanın daha zor olduğu görülmüştür. Pürüzsüz yüzeye sahip ve küresel danelerden oluşmuş zeminlerde enjeksiyon işlemi çok daha rahat bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

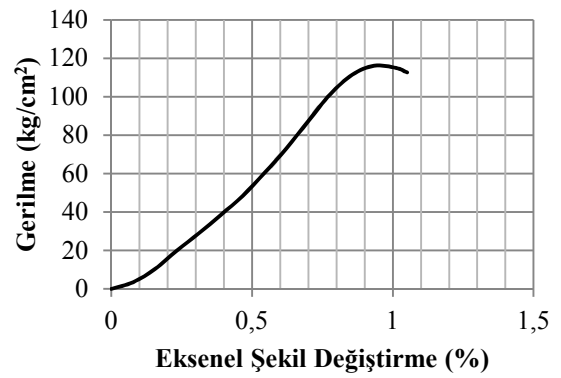
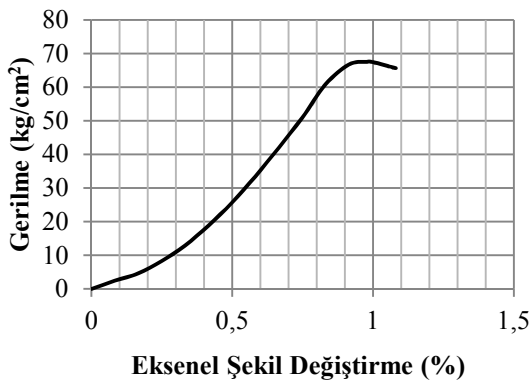
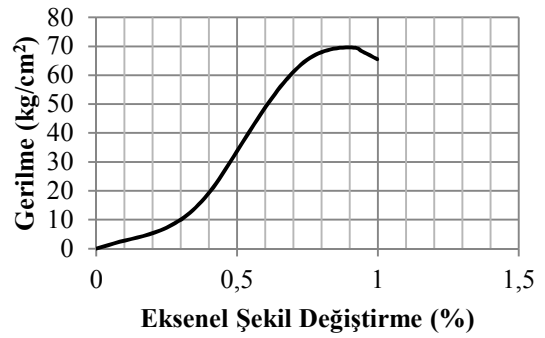
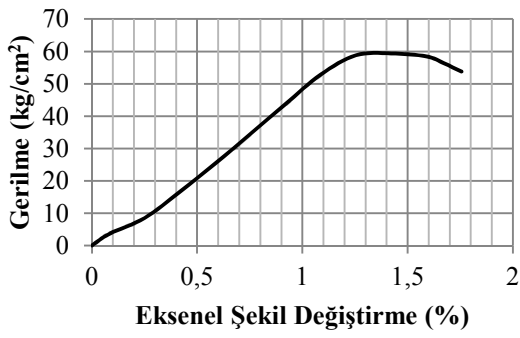
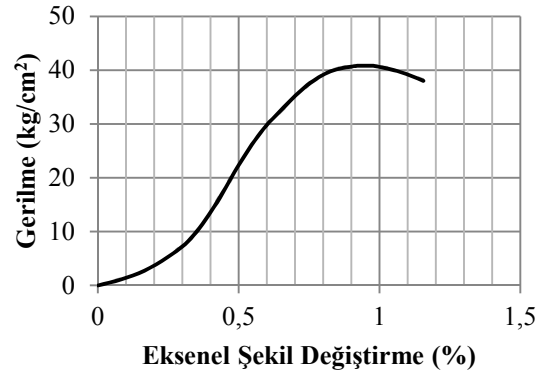
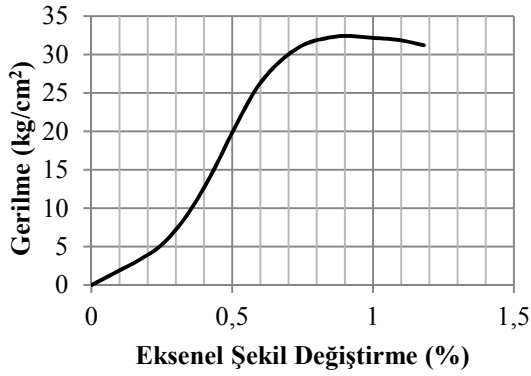
## KAYNAKLAR

- Akbulut, S.**, 1999. Enjeksiyon ile Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Akbulut, S., Sağlamer A.**, 2002. Estimating The Groutability of Granular Soils: A New Approach, *Tunnelling and Underground Space Technology*. **17**, 371-380.
- Akbulut, S., Sağlamer, A.**, 2003. Daneli Zeminlerde Enjeksiyon Basıncı ve Dane Çapının Enjeksiyon Edilebilirlik Açısından Etkileri, *Teknik Dergi*, **199**, 2985-2995.
- ASTM C127-12**, 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, *American Test Methods Standards*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C597-09**, 2009. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, *American Test Methods Standards*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D422-63**, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, *American Test Methods Standards*, West Conshohocken, PA.
- Bell, F.G.**, 1993. Engineering Treatment of Soils. E&FN Spon, London.
- Durgunoğlu, H.T., Kulaç, H.F., Oruç, K., Özge, C.E., Eker, F.Ş.**, 1998. Jetgrout Yöntemi ile Zemin İyileştirilmesi Üzerine Bir Uygulama, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi*, YTÜ, 22-23 Ekim, İstanbul, s. 438-448.
- Genç, D.**, 2008. Zemin Mekaniği ve Temeller, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
- Ishihara, K., Kokusho, T., Silver, M., L.**, 1989. Recent Developments in Evaluating Liquefaction Characteristics of Local Soils, *12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 13-18 August, Brazil, s. 2719-2734.
- İncecik, M., Ceren, İ.**, 1995. Cement Grouting Model Tests, *İstanbul Teknik Üniversitesi Bülteni*, **48**, 305-317.
- JSCE**, 1977. Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structure, Earth Structure and Foundation in Japan, Japan Society of Civil Engineers.
- Kavak, A., Mutman, U.**, 2005. Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin İyileştirilmesi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, 23-25 Mart, s.1114-1119

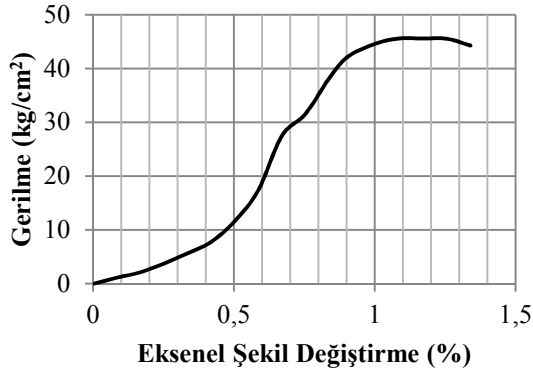
- Krizek, R.J., Helal M.,**1992. Anisotropic Behavior of Cement-Grouted Sand, Grouting, Soil Improvements and Geosynthetics, *Geotechnical Engineering Division of ASCE*, **30**, 541-550.
- Liao, H., Krizek, R., J., Borden, R., H.,** 1992. Micro Fine Cement/Sodium Silicate Grout, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, *Geotechnical Engineering Division of ASCE*, **30**, 676-687.
- Mnif T.,** 1997. Injectability of Fissured Media with Cement-Based Grouts, *PhD thesis*. Universite de Sherbrooke, French.
- Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F.,** 2006. Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi Kitapevi, Ankara.
- Mori, A., Tamura, M., Hayashi, H., Shibata, H.,** 1992. Some Factors Related to Injected Shape in Grouting, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, *Geotechnical Engineering Division of ASCE*, **30**, 313-324,
- Mutman, U., Kavak, A.,** 2007. Sıvılaşma Riskinin Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu ile Azaltılması, *Earthquake Symposium*, Kocaeli Üniv., Kocaeli, 22-24 Ekim, s. 518-525.
- Nonveiller, E.,** 1989. Grouting Theory and Practice, Elsevier, Amsterdam.
- Perret, S., Ballivy, G., Khayat, K., Mnif, T.,** 1997. Injectability of Fine Sand with Cement-Based Grout, Grouting, *Geotechnical Special Publication of ASCE*, **66**, 289-305.
- Scheidegger, A.E., Johnson, E.F.,** 1969. "Displacement Processes in Porous Media" *Symposium on the Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, Haifa, Israel.23-28 February.
- Schwarz, L.G., Krizek, R.J.,** 1992. Effects of Mixing on Rheological Properties of Microfine Cement Grout, Grouting, Soil Improvements and Geosynthetics, *Geotechnical Engineering Division of ASCE*, **30**, 512-525.
- Şekercioğlu, E.,** 2007. Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi, JMO Yayınları, Ankara.
- Toğrol, E.,** 1994. Temel Takviyesi Yöntemlerine Yeni Bir Bakış, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, ODTÜ, Ankara, s. 887-917.
- Toumbakaria, E.E., Gemert, D.V., Tassios, T.P., Tenoutasse, N.,** 1999. Effect of Mixing Procedure on Injectability of Cementitious Grouts, *Cement and Concrete Research*, **29**, 867-872.

- TS EN 197-1.**, 2012. Çimento-Bölüm1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Tunçdemir, F.**, 2004. Temel Zeminlerin Enjeksiyon Tekniği ile İyileştirilmesi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **430**, 59-63.
- Wallance, H.B.**, 1982. Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE Publication New York.
- Warner**, 2004. Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock and Structures, Wiley, London.
- Yıldırım, S.**, 2004. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yılmaz, I.**, 2007. Mühendislik Jeolojisi İlkeler ve Temel Kavramlar, Teknik Yayınevi, Ankara.

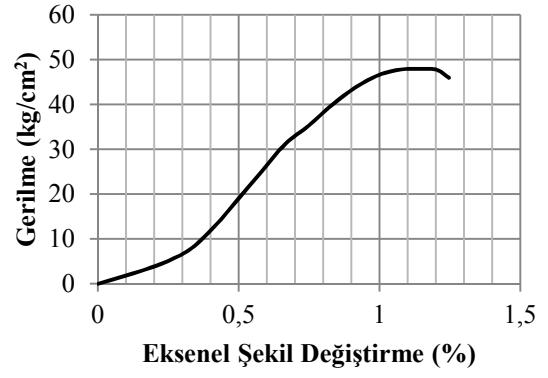
## EKLER (Gerilme-Eksenel Şekil Değiştirme Eğrileri)



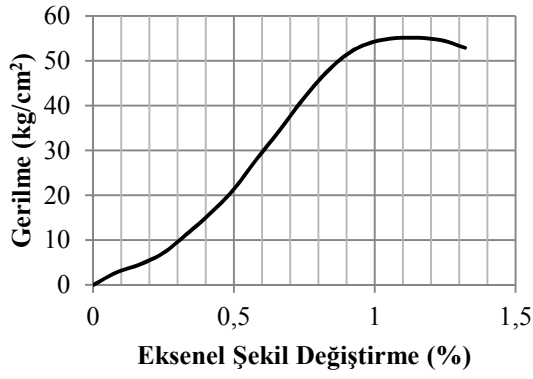
**Şekil E.1.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %40)



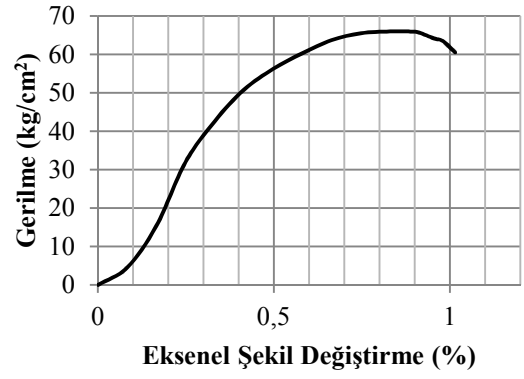
a) 1. Numune (7 gün)



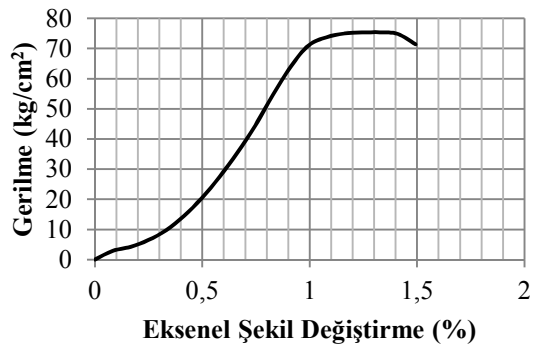
b) 2. Numune (7 gün)



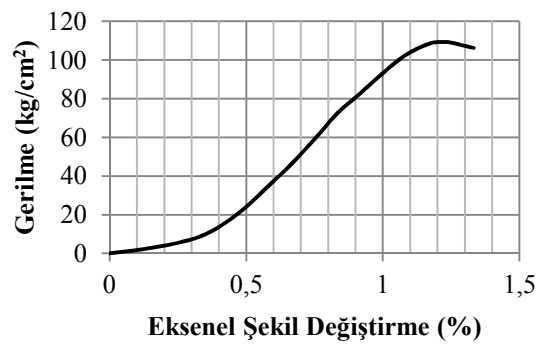
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

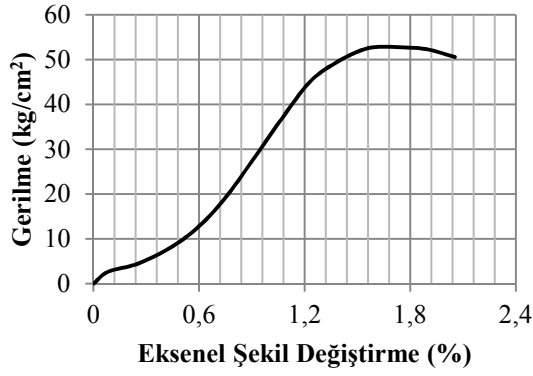


e) 2. Numune (28 gün)

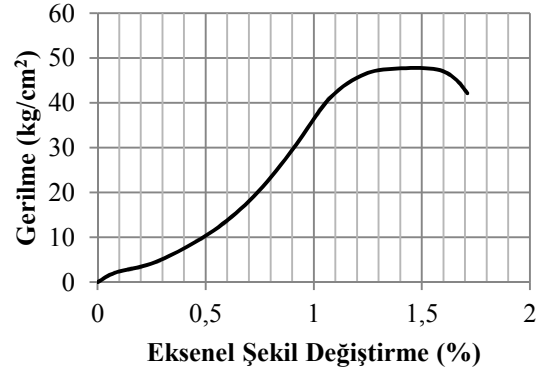


f) 3. Numune (28 gün)

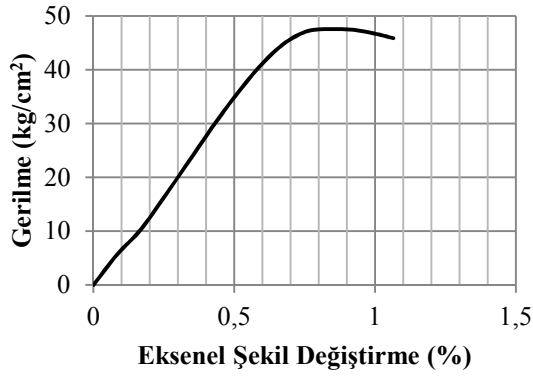
**Şekil E.2.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %60)



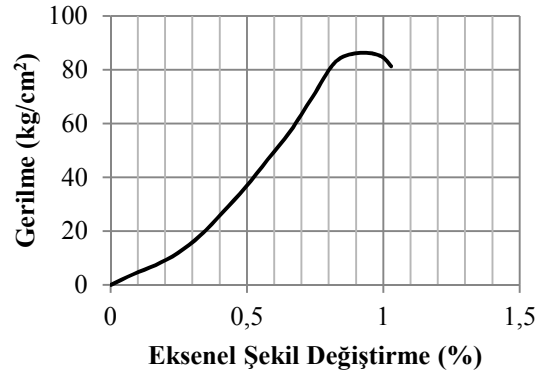
a) 1. Numune (7 gün)



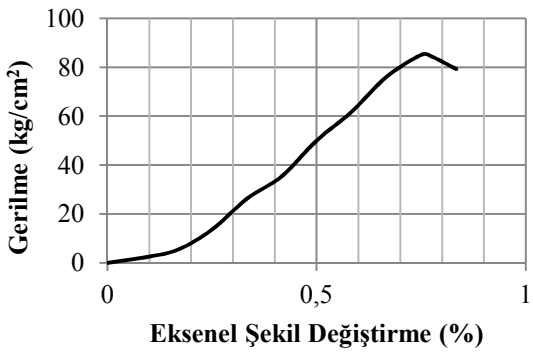
b) 2. Numune (7 gün)



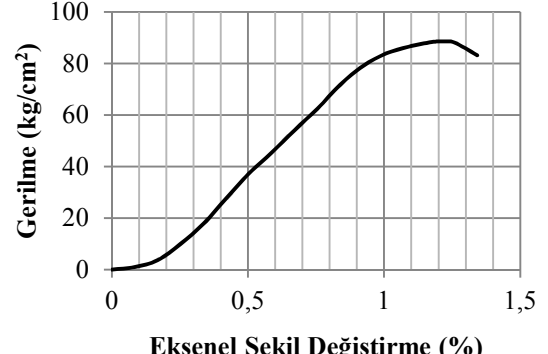
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

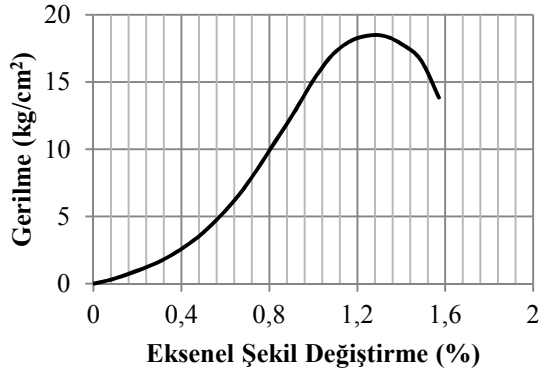


e) 2. Numune (28 gün)

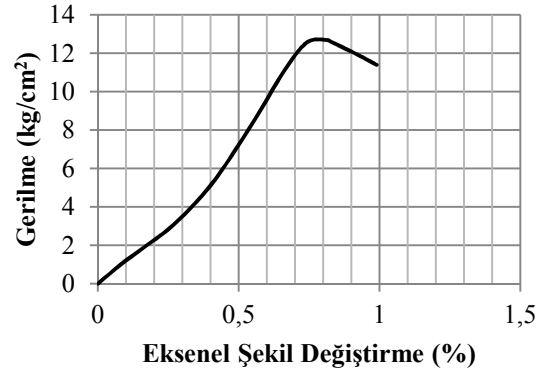


f) 3. Numune (28 gün)

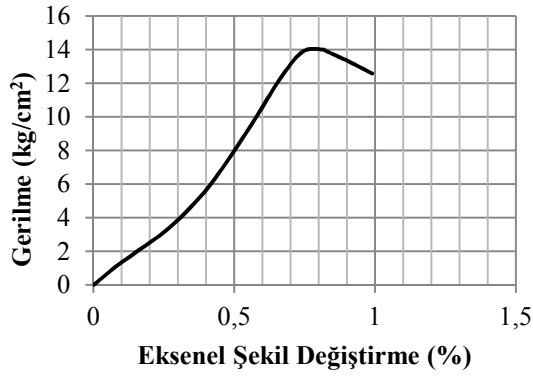
**Şekil E.3.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %80)



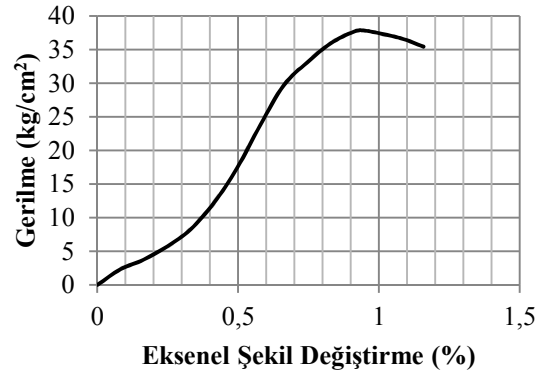
a) 1. Numune (7 gün)



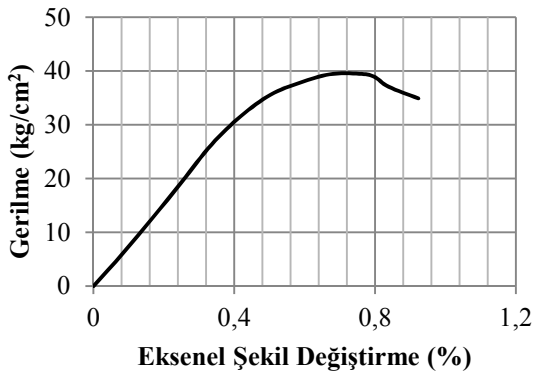
b) 2. Numune (7 gün)



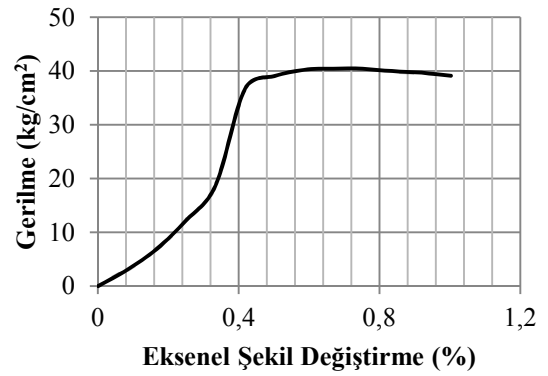
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

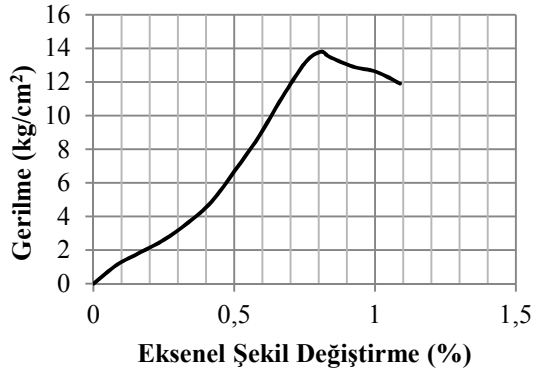


e) 2. Numune (28 gün)

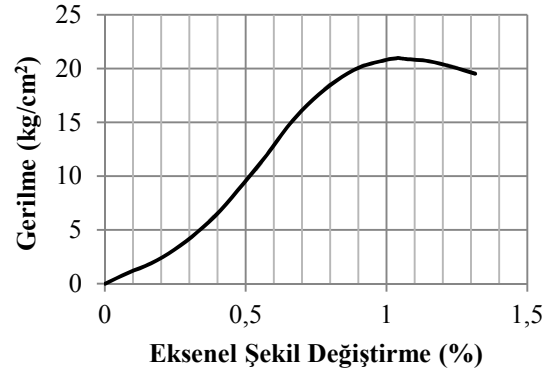


f) 3. Numune (28 gün)

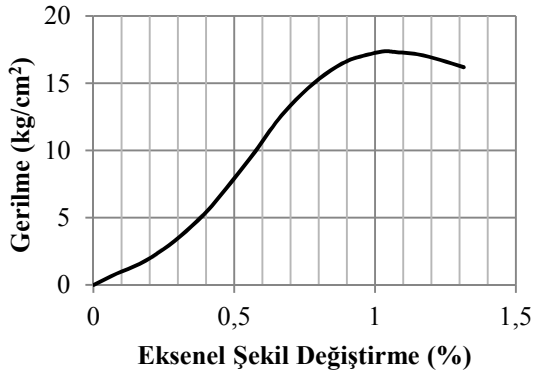
**Şekil E.4.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %40)



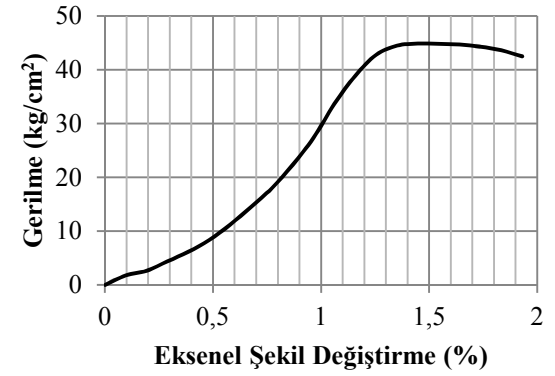
a) 1. Numune (7 gün)



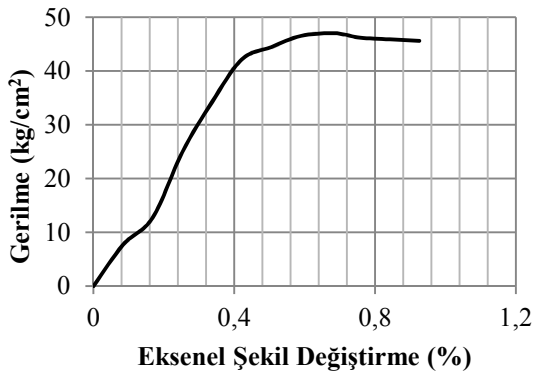
b) 2. Numune (7 gün)



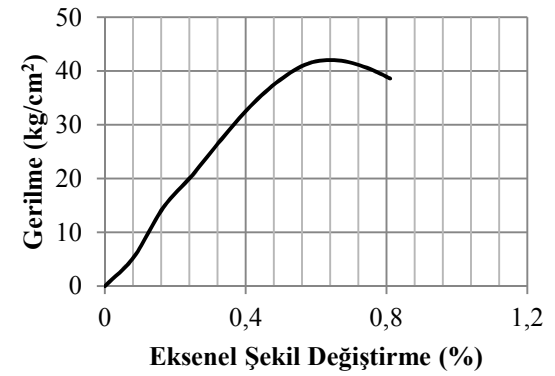
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

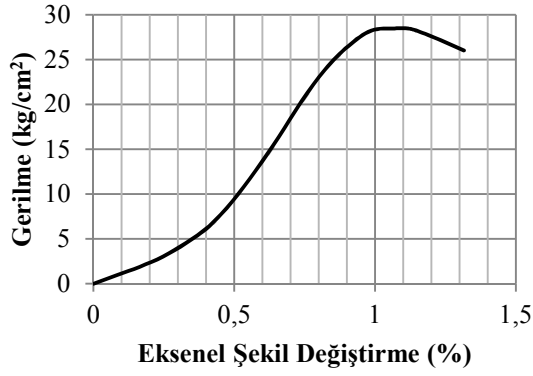


e) 2. Numune (28 gün)

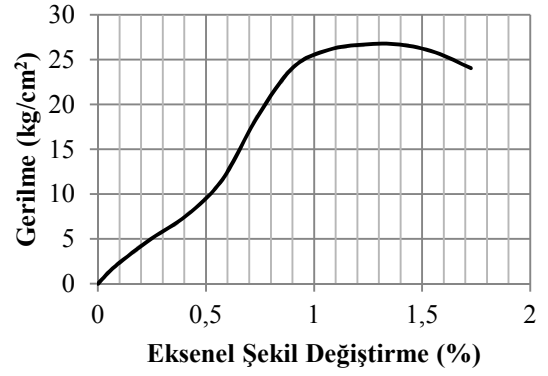


f) 3. Numune (28 gün)

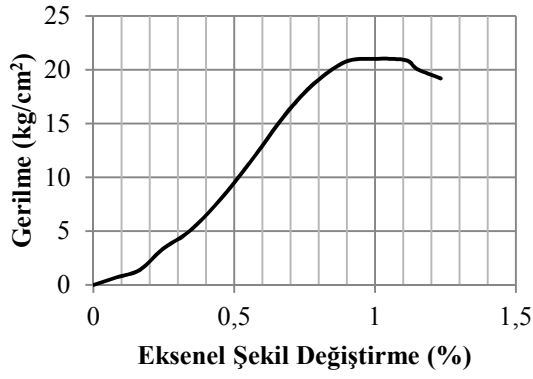
**Şekil E.5.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %60)



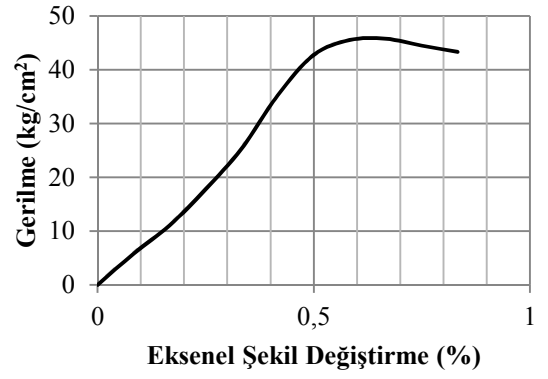
a) 1. Numune (7 gün)



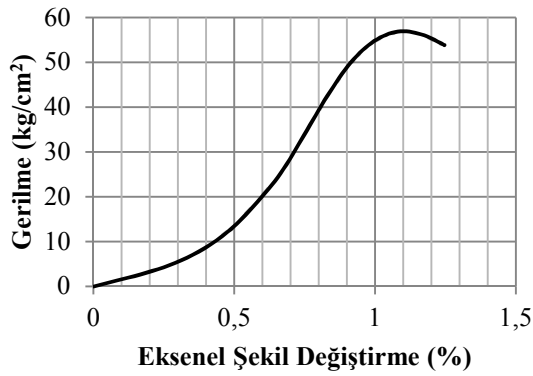
b) 2. Numune (7 gün)



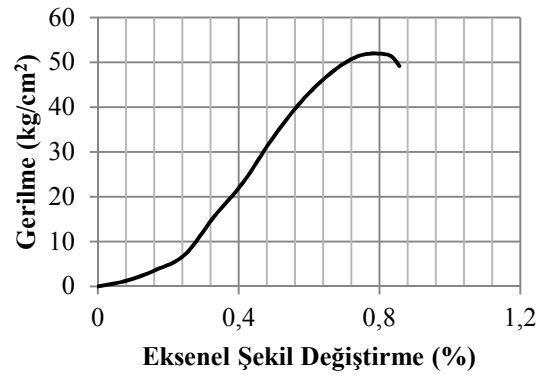
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

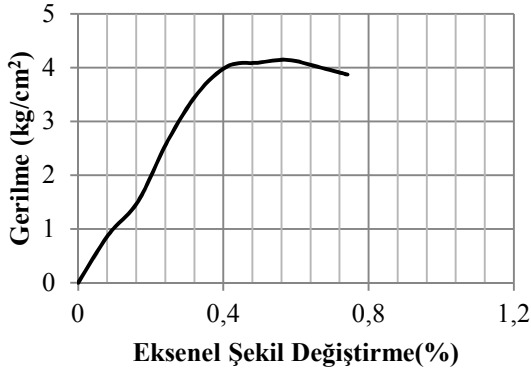


e) 2. Numune (28 gün)

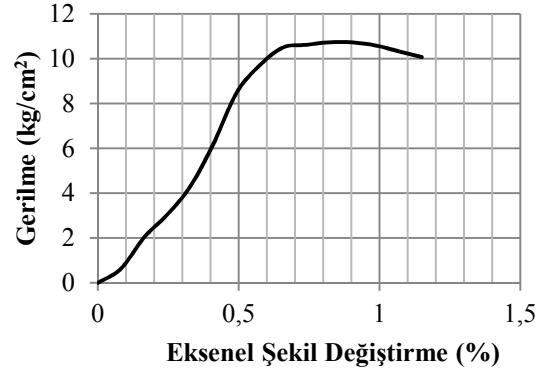


f) 3. Numune (28 gün)

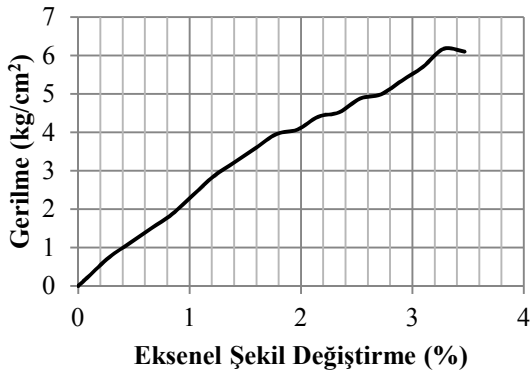
**Şekil E.6.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %80)



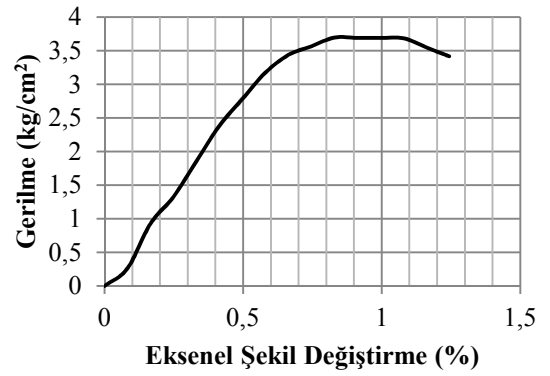
a) 1. Numune (7 gün)



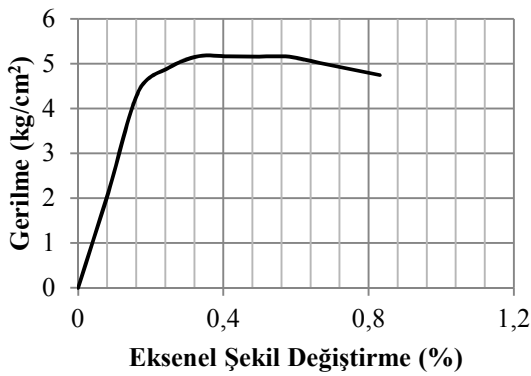
b) 2. Numune (7 gün)



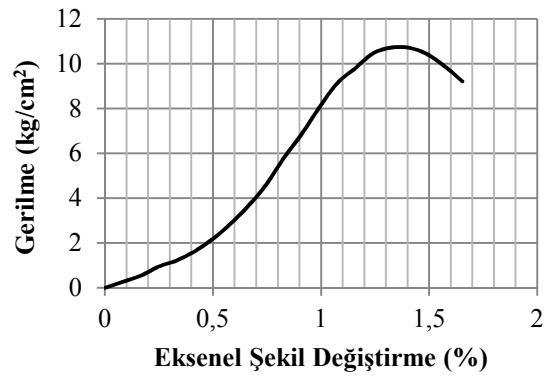
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

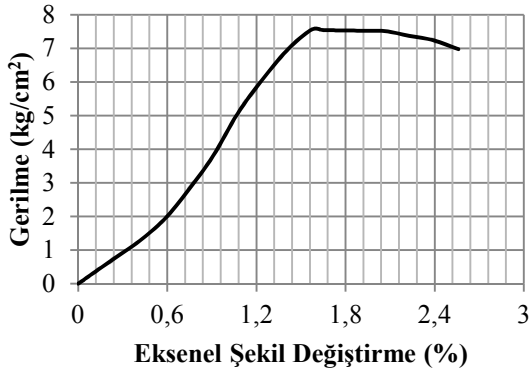


e) 2. Numune (28 gün)

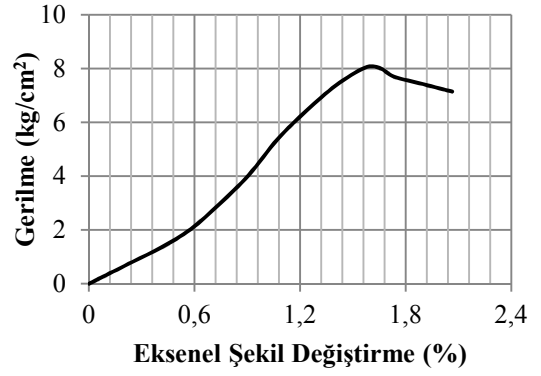


f) 3. Numune (28 gün)

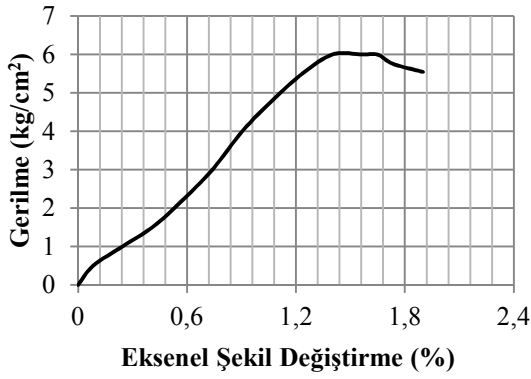
Şekil E.7. a), b), c), d), e), f); Dere kumu kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/C: 1.5, Dr: %40)



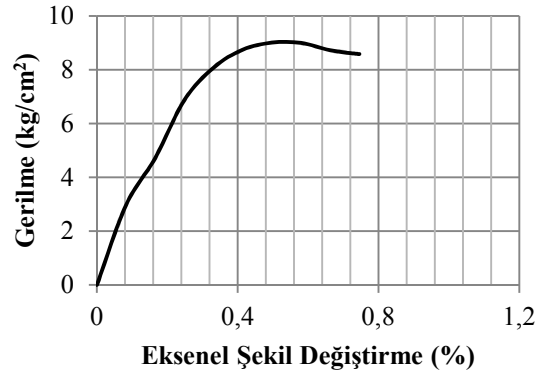
a) 1. Numune (7 gün)



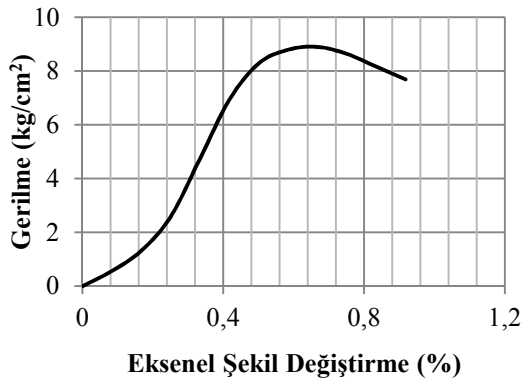
b) 2. Numune (7 gün)



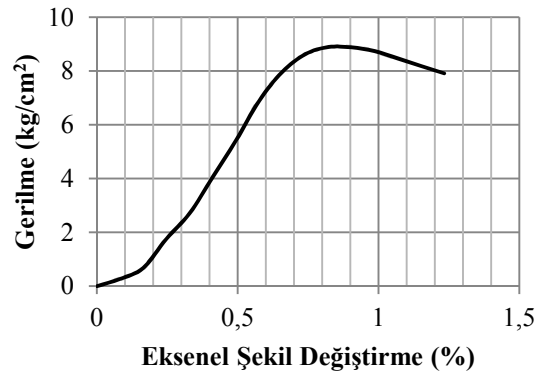
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

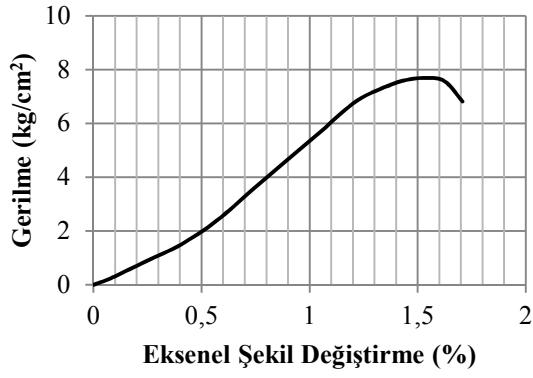


e) 2. Numune (28 gün)

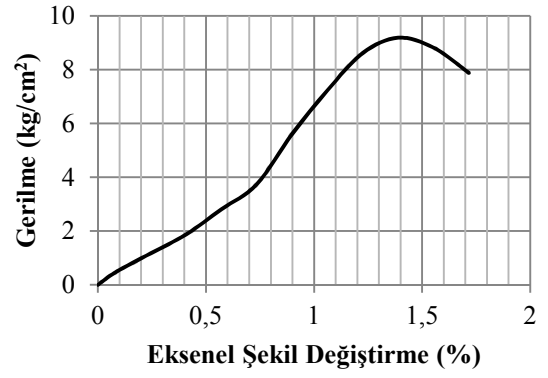


f) 3. Numune (28 gün)

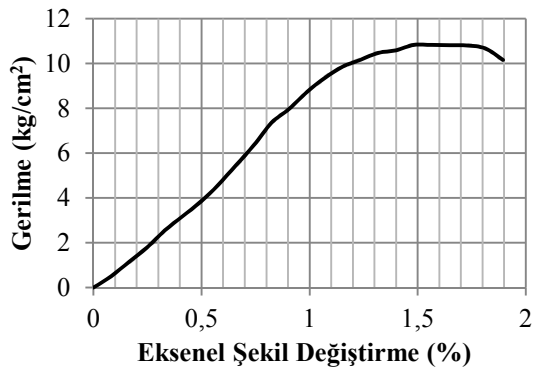
**Şekil E.8.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %60)



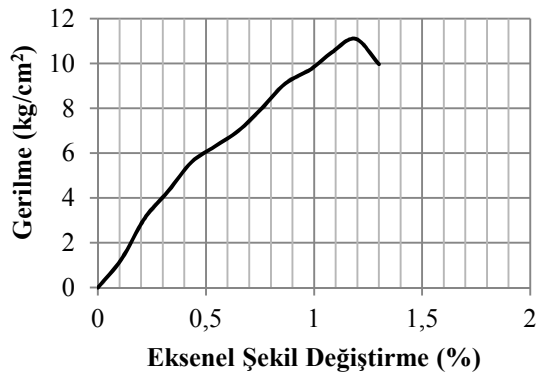
a) 1. Numune (7 gün)



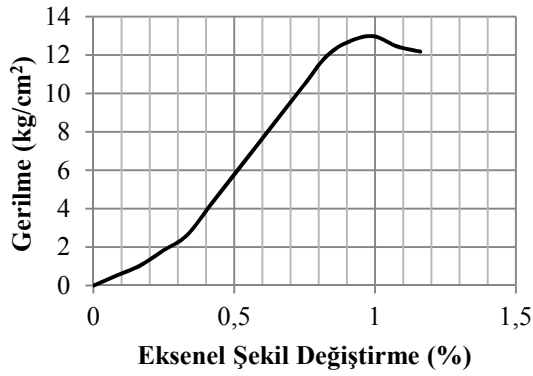
b) 2. Numune (7 gün)



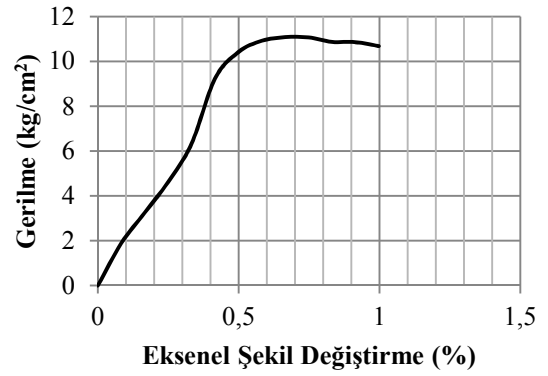
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

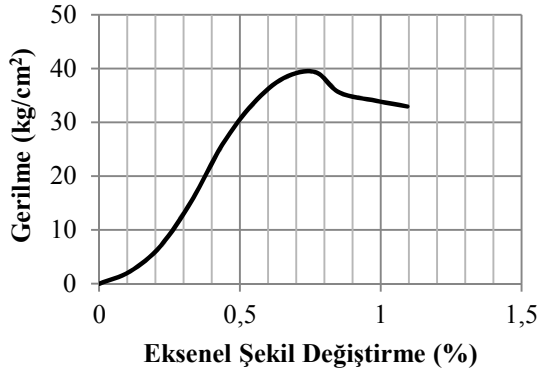


e) 2. Numune (28 gün)

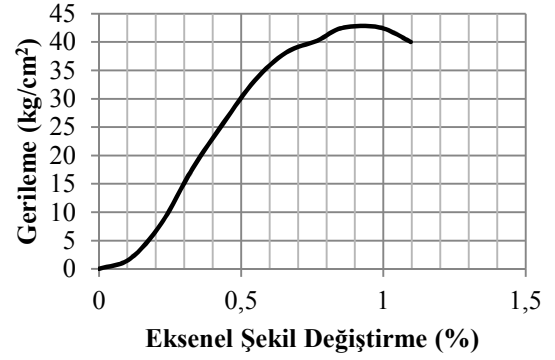


f) 3. Numune (28 gün)

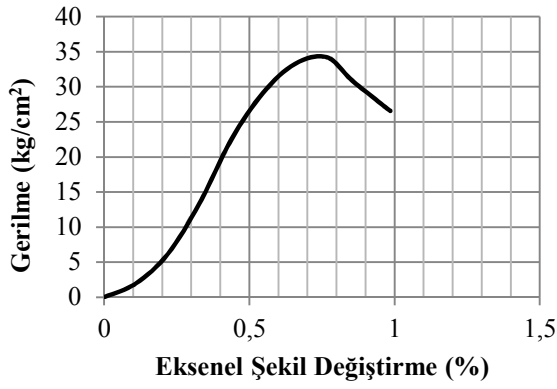
**Şekil E.9.** a), b), c), d), e), f); Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %80)



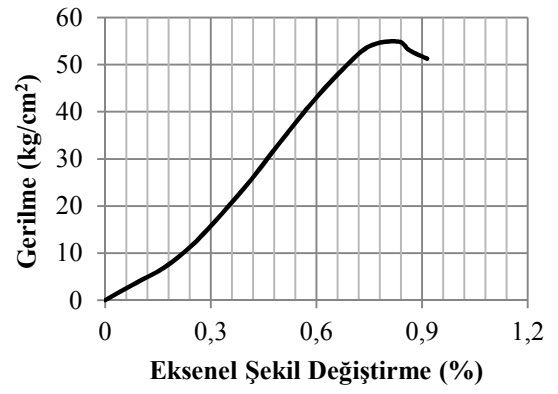
a) 1. Numune (7 gün)



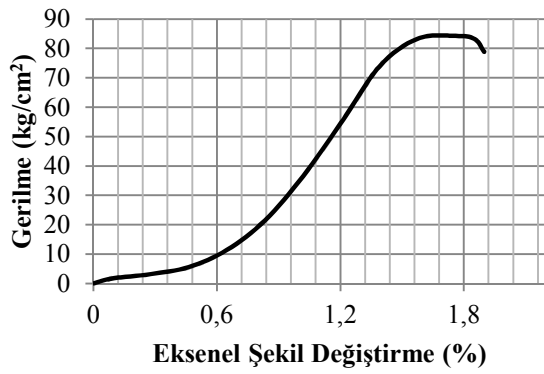
b) 2. Numune (7 gün)



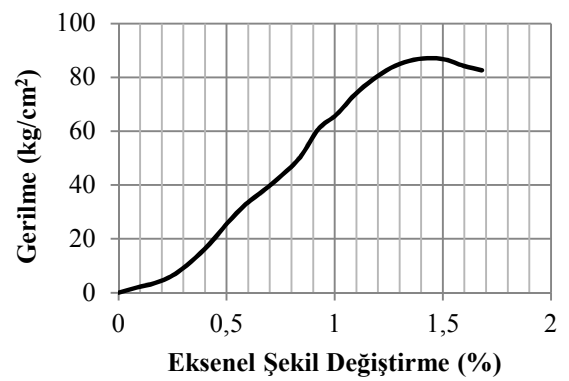
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

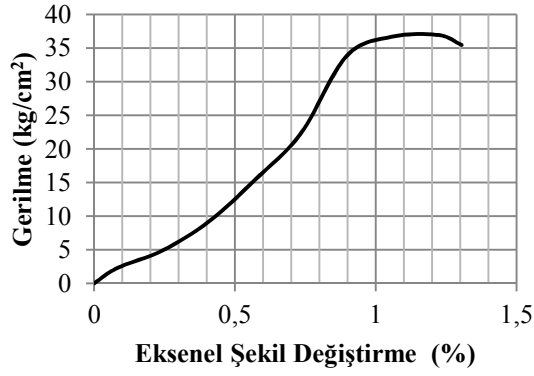


e) 2. Numune (28 gün)

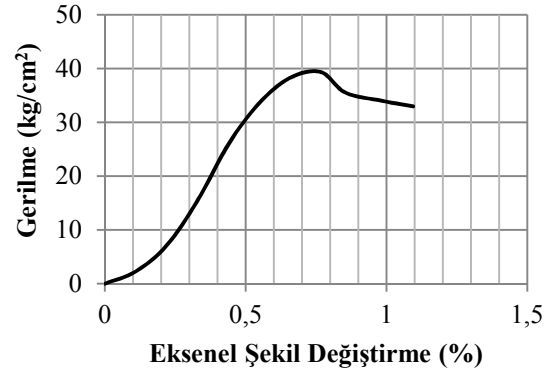


f) 3. Numune (28 gün)

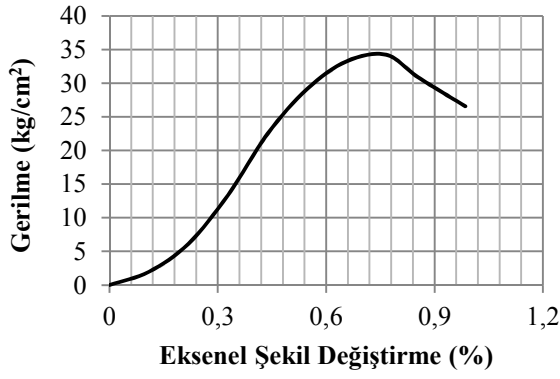
**Şekil E.10.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme–eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/C: 0.8, Dr: %40)



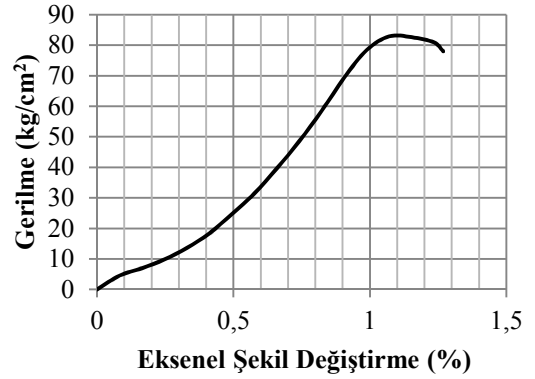
a) 1. Numune (7 gün)



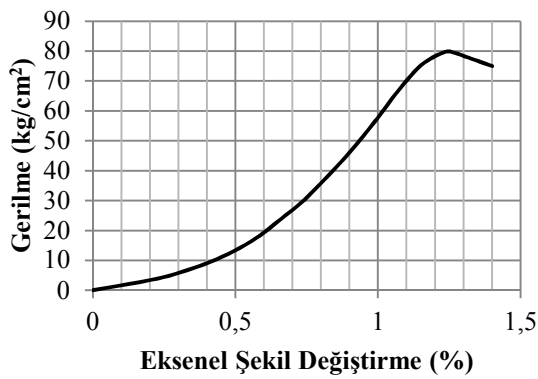
b) 2. Numune (7 gün)



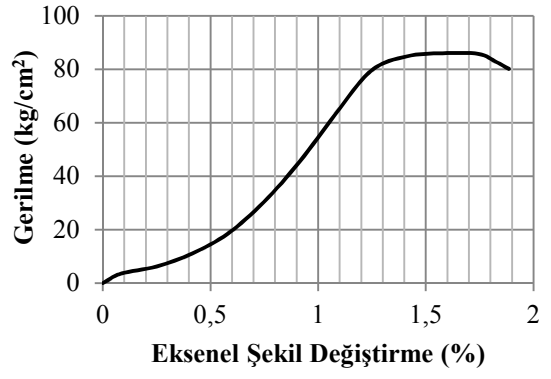
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

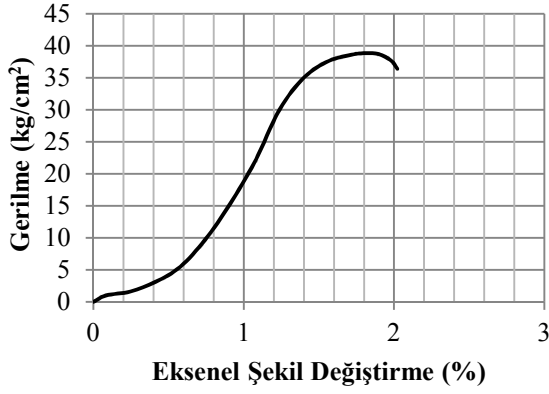


e) 2. Numune (28 gün)

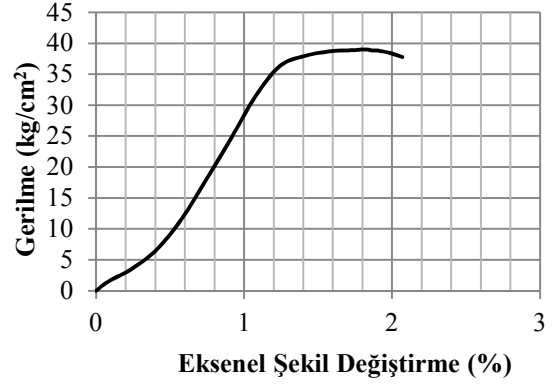


f) 3. Numune (28 gün)

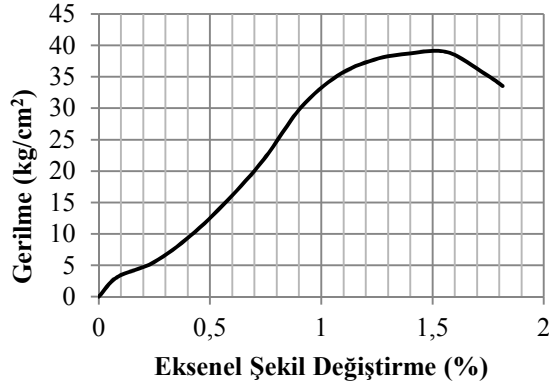
**Şekil E.11.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %60)



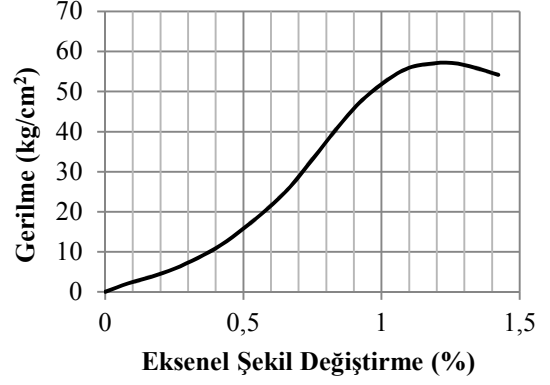
a) 1. Numune (7 gün)



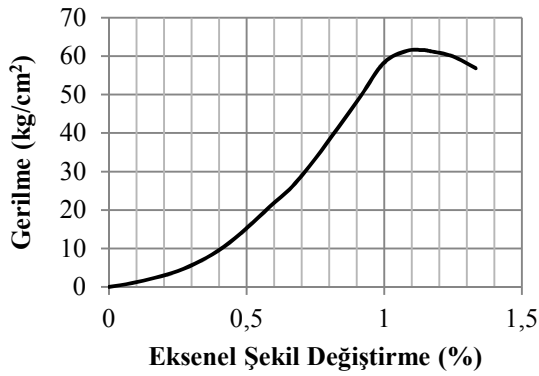
b) 2. Numune (7 gün)



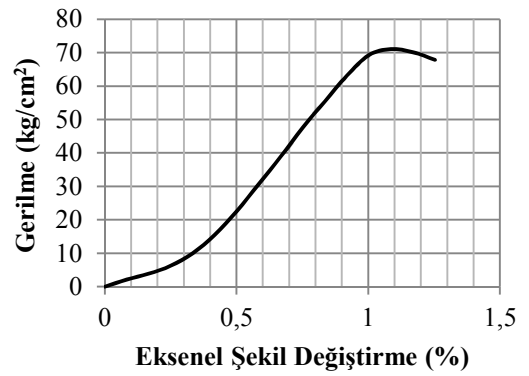
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

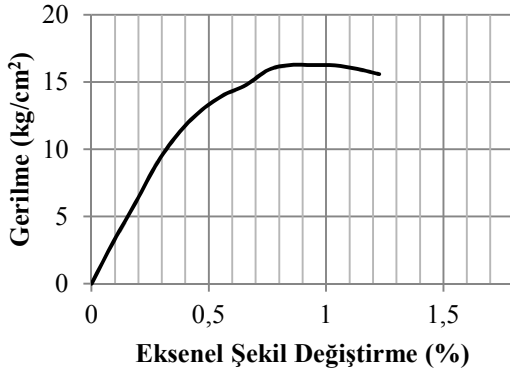


e) 2. Numune (28 gün)

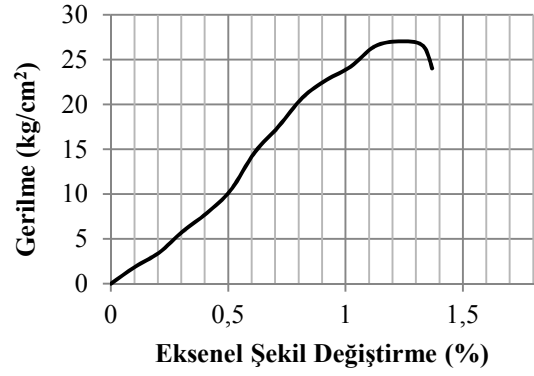


f) 3. Numune (28 gün)

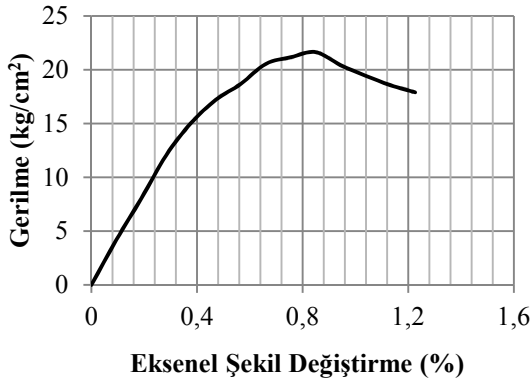
**Şekil E.12.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değişirme eğrileri (S/Ç: 0.8, Dr: %80)



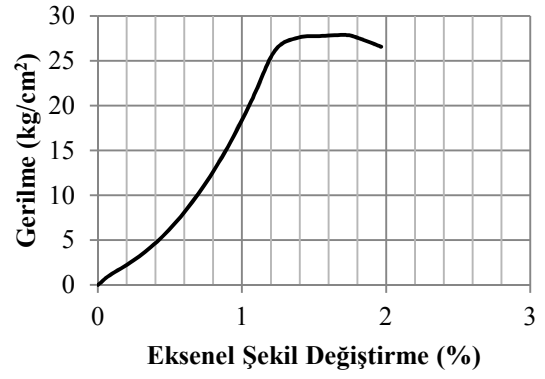
a) 1. Numune (7 gün)



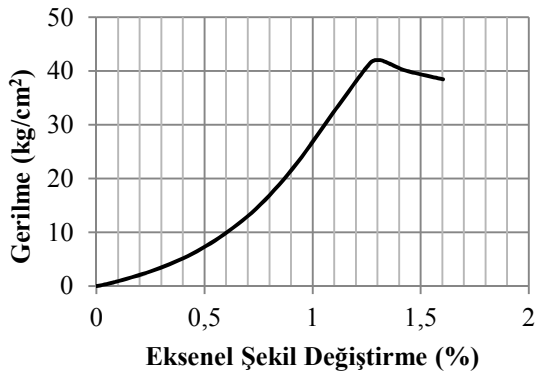
b) 2. Numune (7 gün)



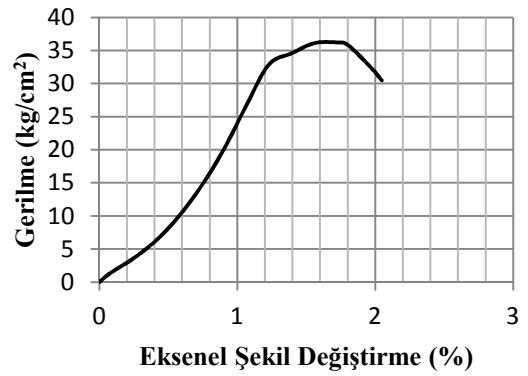
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

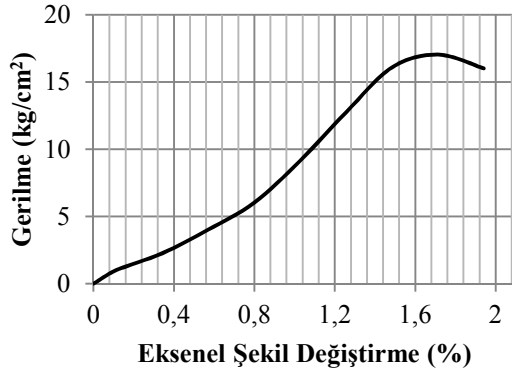


e) 2. Numune (28 gün)

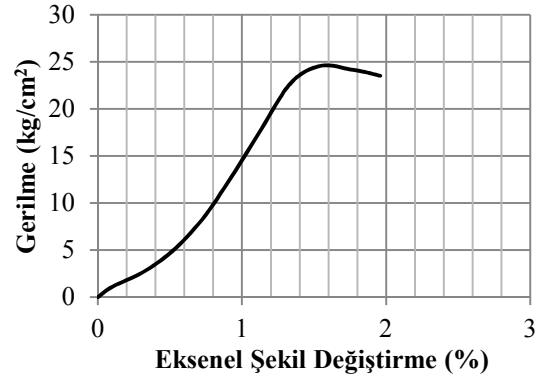


f) 3. Numune (28 gün)

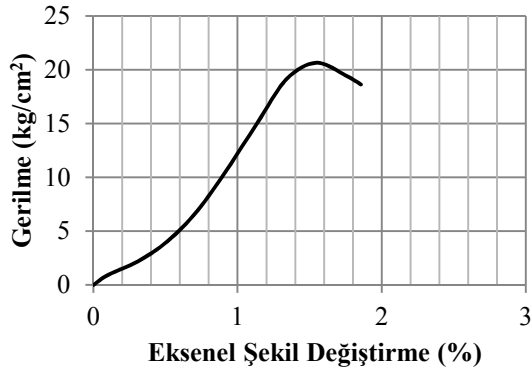
**Şekil E.13.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %40)



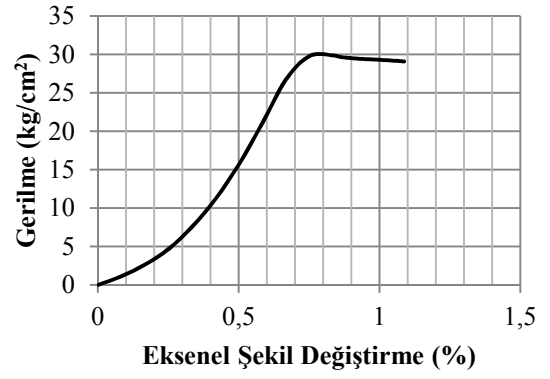
a) 1. Numune (7 gün)



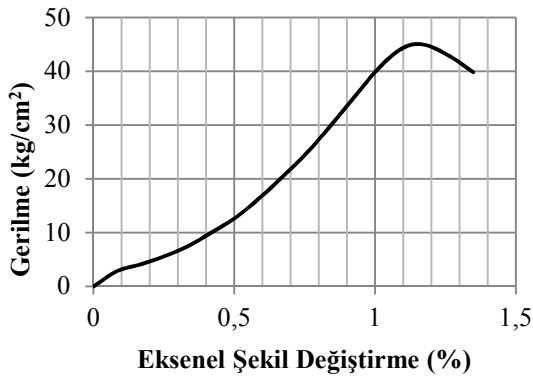
b) 2. Numune (7 gün)



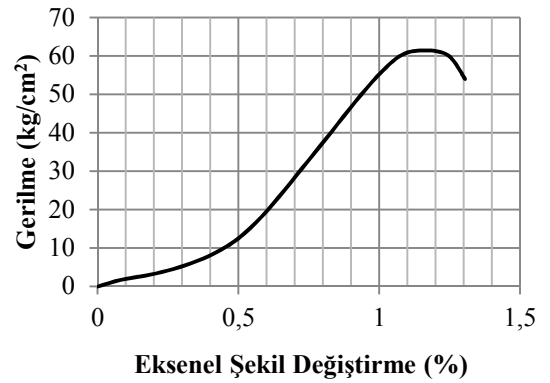
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

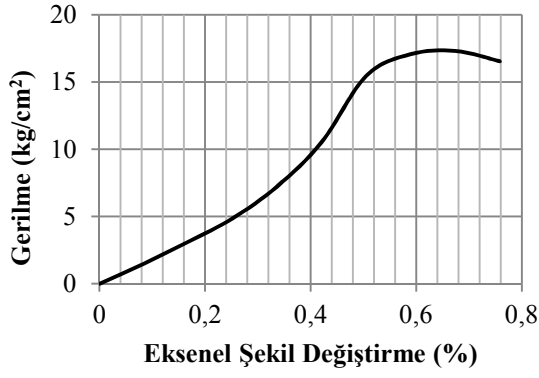


e) 2. Numune (28 gün)

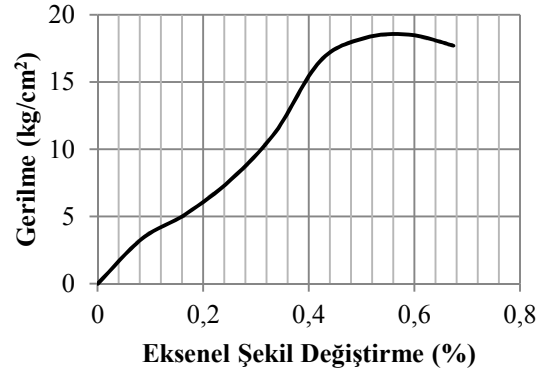


f) 3. Numune (28 gün)

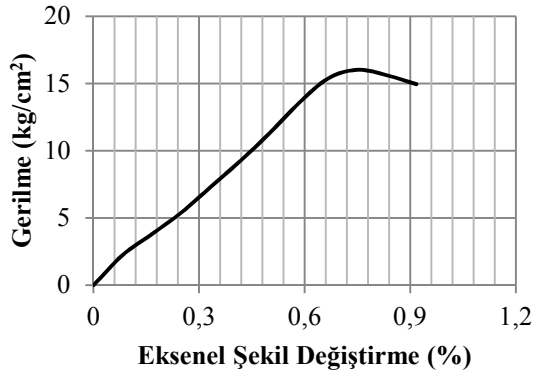
**Şekil E.14.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %60)



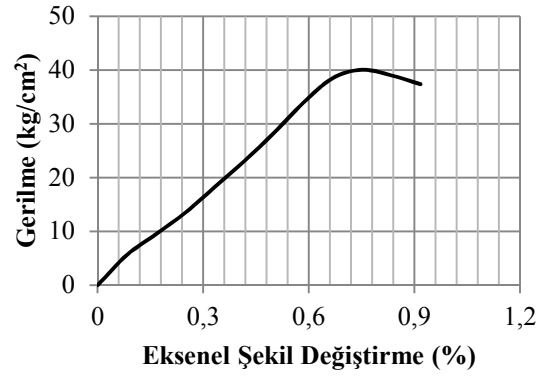
a) 1. Numune (7 gün)



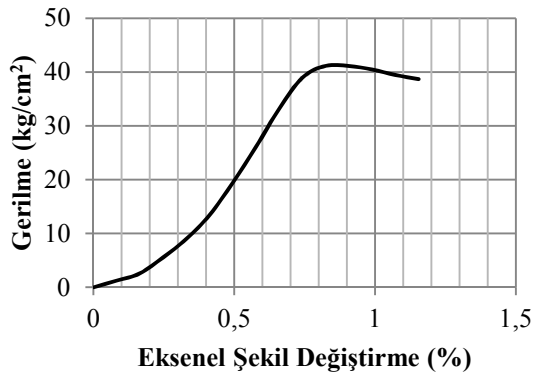
b) 2. Numune (7 gün)



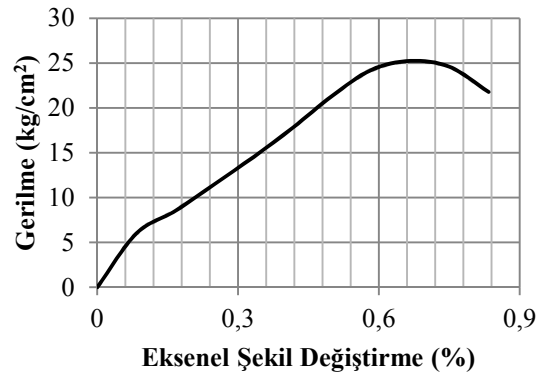
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

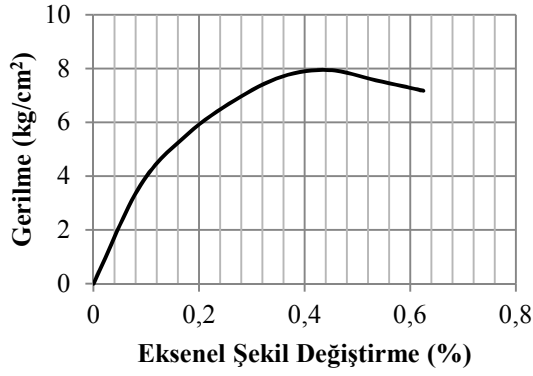


e) 2. Numune (28 gün)

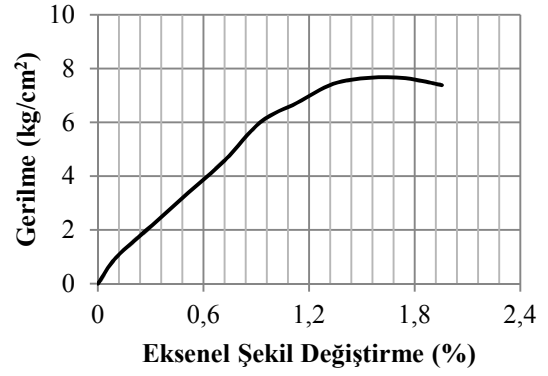


f) 3. Numune (28 gün)

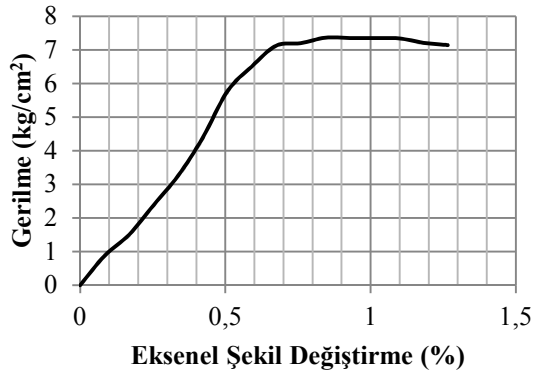
**Şekil E.15.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.0, Dr: %80)



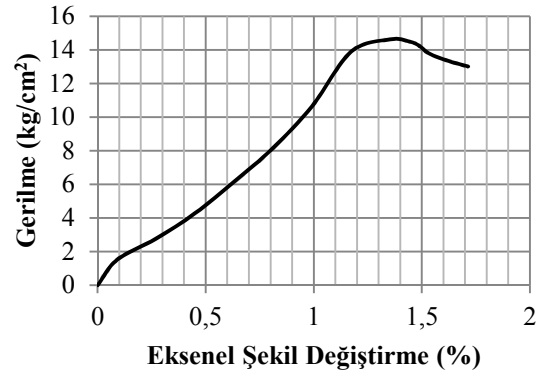
a) 1. Numune (7 gün)



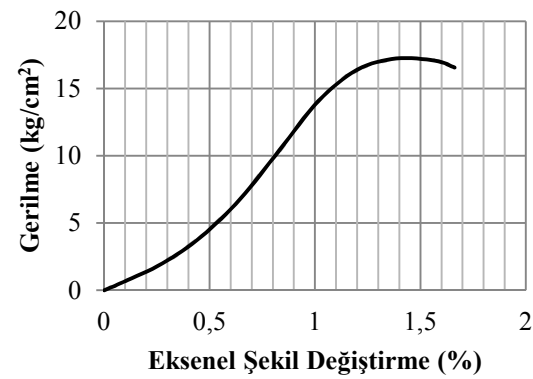
b) 2. Numune (7 gün)



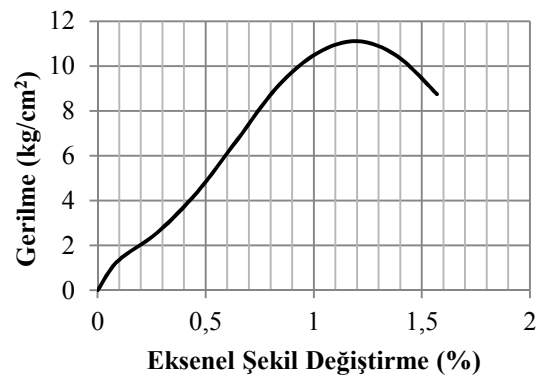
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

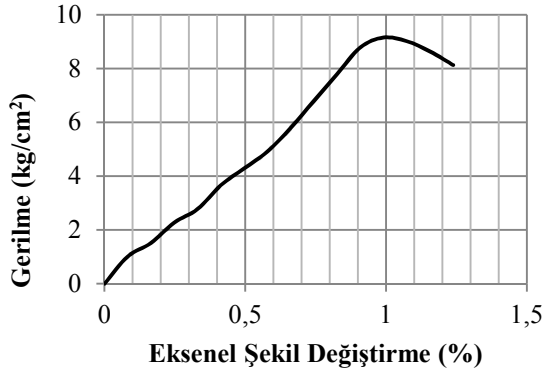


e) 2. Numune (28 gün)

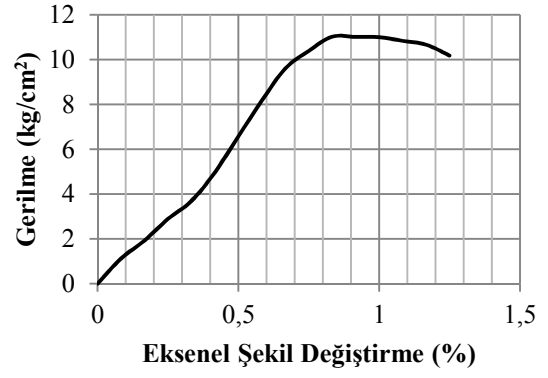


f) 3. Numune (28 gün)

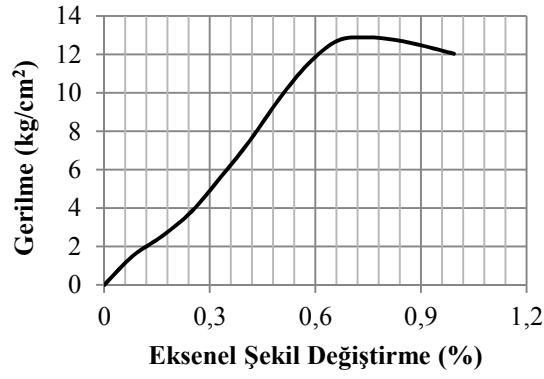
**Şekil E.16.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %40)



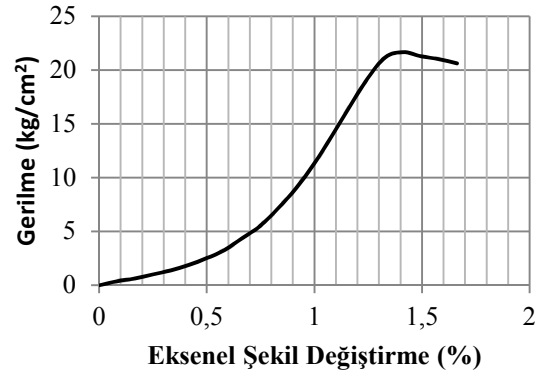
a) 1. Numune (7 gün)



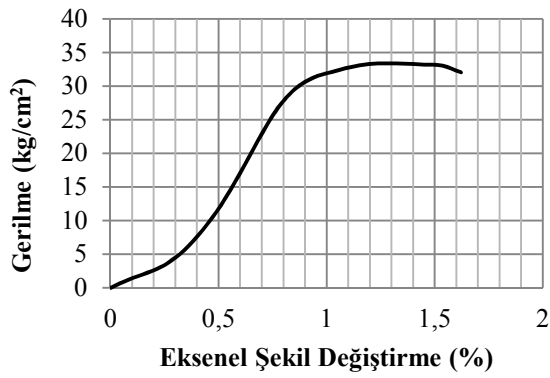
b) 2. Numune (7 gün)



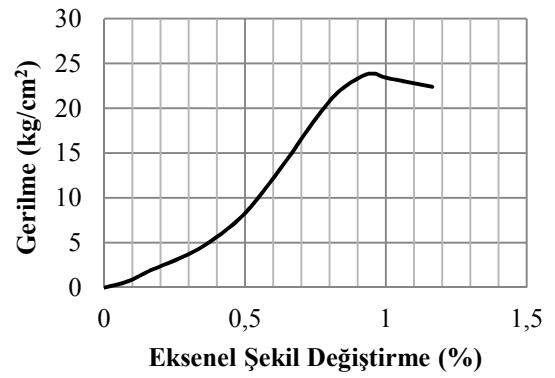
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)

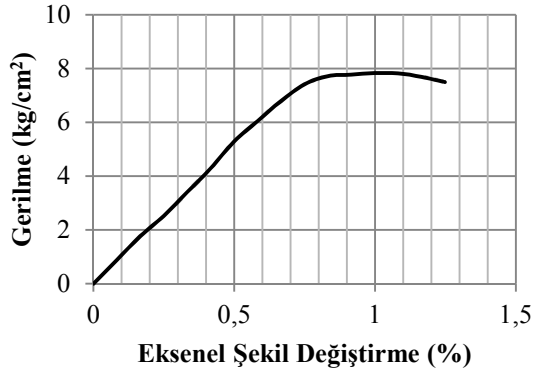


e) 2. Numune (28 gün)

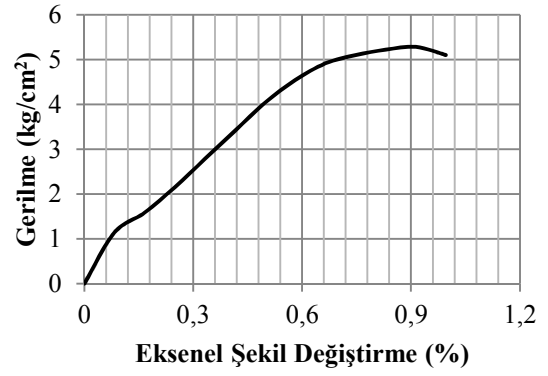


f) 3. Numune (28 gün)

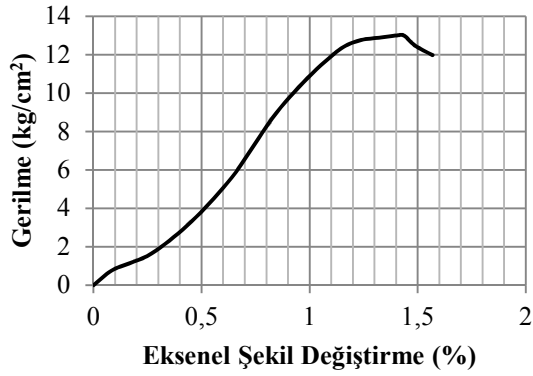
**Şekil E.17.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin; gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/Ç: 1.5, Dr: %60)



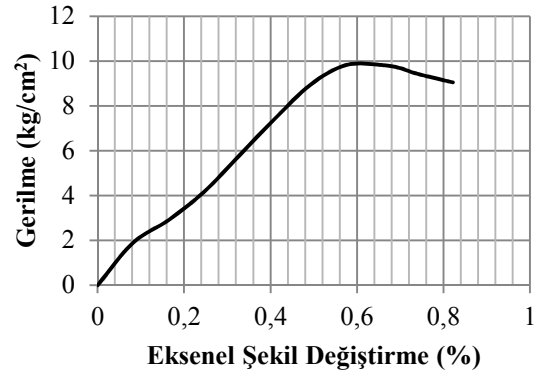
a) 1. Numune (7 gün)



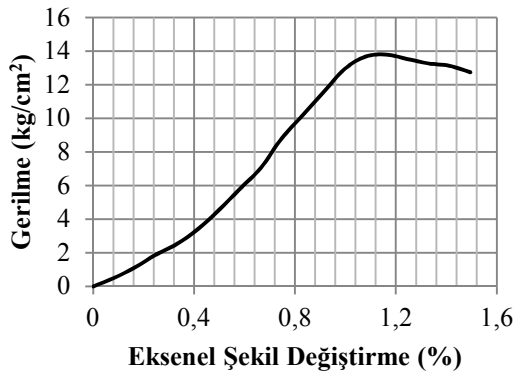
b) 2. Numune (7 gün)



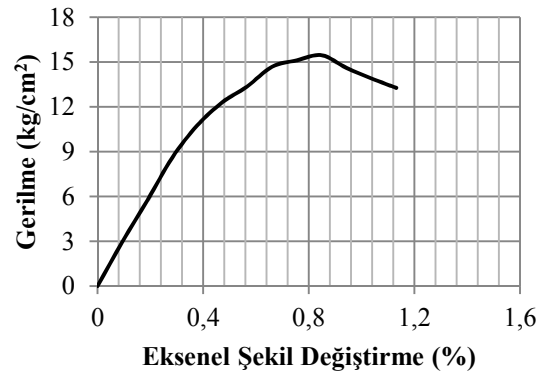
c) 3. Numune (7 gün)



d) 1. Numune (28 gün)



e) 2. Numune (28 gün)



f) 3. Numune (28 gün)

**Şekil E.18.** a), b), c), d), e), f); Kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri (S/C: 1.5, Dr: %80)

## **ÖZGEÇMİŞ**

1987 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, Orta ve Lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 2007 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılından itibaren Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Dalında Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir.