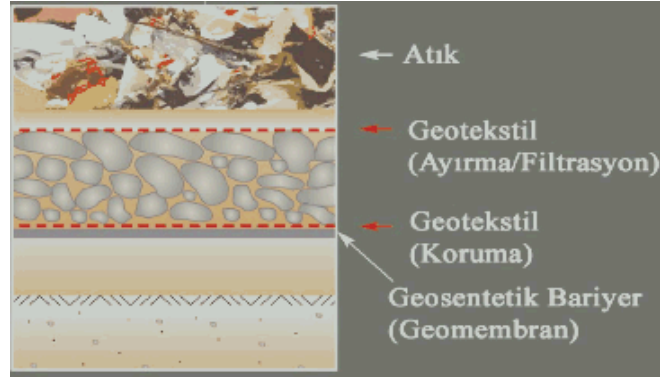




Şekil 8. Membran ve geotekstilin katı atık deponisi altında müşterek kullanımı.

**BENTONİT, UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI KATKILI ÇİMENTO  
ENJEKSİYONLARININ DANELİ ZEMİNLERİN TEK EKSENLİ BASINÇ  
DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

**Özcan TAN**  
Doç. Dr.

**Gökhan GÜNGÖRMÜŞ**  
İnş. Yük. Müh.

**A. Şahin ZAIMOĞLU**  
Yrd. Doç. Dr.

## ÖZET

Enjeksiyon, zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için uygulanan yöntemlerden biridir. Maliyeti düşürmek ve daha iyi sonuç elde edebilmek amacıyla enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, çimento ile birlikte çeşitli katkı malzemeleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada; farklı oranlarda bentonit, uçucu kül ve silis dumanı gibi atık malzemeleri kullanılarak enjeksiyon karışımları hazırlanmıştır. Belirli bir dane boyu dağılıma sahip daneli zemin silindirik kalıplar içerisine rölatif sıklığı 0.70 olacak şekilde yerleştirilerek içerisine, hazırlanan enjeksiyon karışımları enjekte edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan örneklerin 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları üzerinde bentonit, uçucu kül ve silis dumanı malzemelerinin etkileri Taguchi yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda enjekte edilen örneklerin 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin silis dumanı olduğu görülmüştür.

## GİRİŞ

İnşaat mühendisliği uygulamalarında zemin özelliklerinin istenilen düzeyde olmaması karşılaşılan önemli problemlerden birisidir. Zemin iyileştirmesi zemin türüne göre kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin iyileştirilmesi ve uygulama bölgesinin zemin yüzeyine uzaklığına bağlı olarak yüzeysel veya derin zeminlerin iyileştirmesi şeklinde sınıflandırılmaktadır (Mitchell 1981). Enjeksiyon karışımlarıyla zeminlerin iyileştirilmesi derin ve sık zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden birisidir. Enjeksiyon

bir katkılı stabilizasyon yöntemi olup, boşlukların, çatlakların ya da gözeneklerin içerisine karışımların enjeksiyonu veya zemin-çimento birleşimini oluşturmak için zemin içerisine yüksek basınçla çimento karışımlarının enjekte edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Kim 1998). Baraj gövdesi altında geçirimsiz zon oluşturmak, temel zemininin taşıma gücünü artırmak, diyafram duvarlar oluşturmak, ankraj çubuklarının çevresini doldurmak, evsel ve endüstriyel atık depoları oluşturmak başlıca enjeksiyon uygulamalarındandır (Çinicioğlu 1997). Enjeksiyonda kullanılan karışımlar genelde süspansiyon ve solüsyon karışımlar olarak ikiye ayrılır. Kil süspansiyonlar içerisinde oluşan bağlar çimento süspansiyonlar içindeki bağlardan daha zayıf olmasına rağmen (Shroff 1993), bu karışımlar boşluklarda dolgular oluşturarak zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirirler. Enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyonun zorluğu ve pahalı olması öne çıkan başlıca iki problemdir. Bu nedenle enjeksiyon karışımlarında daha düşük maliyetler elde etmek amacıyla çeşitli katkı malzemeleri kullanılması yaygın hale gelmiştir. Ayrıca zeminlerin enjeksiyon edilebilirliğini kolaylaştırmak için enjekte edilen karışımın oldukça ince daneli malzemelerden meydana gelmesi sağlanmalıdır. Bu ise kimyasal karışımlar veya süper ince daneli çimentolar kullanılmasını gerektirdiğinden maliyet artmaktadır. Uçucu kül ve silis dumanı gibi ince daneli çeşitli atık maddelerinin enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında kullanılması enjekte edilebilirliği kolaylaştırırken maliyeti azaltmaktadır.

## **AMAÇ**

Bu çalışmada bentonit ile birlikte uçucu kül ve silis dumanı gibi atık malzemeleri kullanılarak farklı oranlarda enjeksiyon karışımları hazırlanmıştır. Belirli bir dane boyu dağılımına sahip daneli zemin silindirik kalıplar içerisine rölatif sıklığı 0.70 olacak şekilde yerleştirilerek içerisine hazırlanan enjeksiyon karışımları enjekte edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan örneklerin 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları üzerinde bentonit, uçucu kül ve silis dumanı malzemelerinin etkileri Taguchi Yöntemi kullanılarak araştırılması hedeflenmiştir. Çalışma hakkında detaylı bilgiler Güngörmüş (2003) ve Zaimoğlu (2003) de bulunmaktadır.

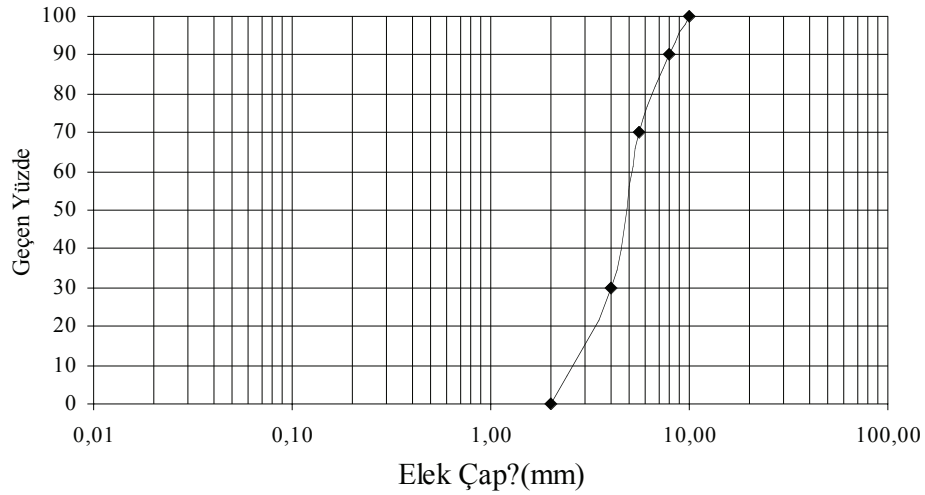
## **Malzeme ve Yöntem**

Deneylerde, PÇ 42.5 katkısız portland çimentosu, Ankara Set Çimento Fabrikası'ndan; F sınıfı uçucu kül, Ankara Çayırhan Termik Santrali'nden; silis dumanı, Etibank Antalya Elektrometalurji Sanayi A.Ş Fabrikası'ndan; bentonit, Çankırı Karakayalar Ocağından ve

çakıl Erzincan İli'nden temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelere ait özellikler Tablo 1'de, çakıla ait dane boyu dağılım eğrisi Şekil 1'de, bazı geoteknik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan malzemelere ait özellikler

| İçerik                         | Çimento (%)             | Uçucu Kül (%) | Silis Dumanı (%)       | Bentonit (%) |
|--------------------------------|-------------------------|---------------|------------------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 19.80                   | 47.5          | 85-95                  | 60.75        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.61                    | 15.95         | 1-3                    | 18.9         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.42                    | 16.3          | 0.5-1.0                | 3.05         |
| CaO                            | 62.97                   | 6.6           | 0.8-1.2                | 2.75         |
| MgO                            | 1.76                    | 4.65          | 1.0-2.0                | 2.1          |
| SO <sub>3</sub>                | 2.95                    | --            | --                     | --           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.47                    | 15.95         | --                     | 2.7          |
| K <sub>2</sub> O               | 0.87                    | --            | --                     | 0.95         |
| Ateşte Kızdırma kaybı          | 2.17                    | --            | 0.5-1.0                | --           |
| Yoğunluk                       | 3.08 g/cm <sup>3</sup>  | --            | 2.25 g/cm <sup>3</sup> | --           |
| Basınç dayanımı(7 gün)         | 244 kgf/cm <sup>2</sup> | --            | --                     | --           |
| Basınç dayanımı(28 gün)        | 424 kgf/cm <sup>2</sup> | --            | --                     | --           |



Şekil 1. Enjeksiyon yapılan zemine ait dane boyu dağılım eğrisi

Tablo 2. Deney örneğinin bazı özellikleri

| Fiziksel Özellikleri                  | Değer | Fiziksel Özellikleri            | Değer |
|---------------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| $\gamma_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )      | 2.68  | D <sub>30</sub> (mm)            | 4.0   |
| $\gamma_{kmak}$ (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1.79  | D <sub>60</sub> (mm)            | 5.2   |
| $\gamma_{kmin}$ (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1.45  | C <sub>u</sub>                  | 2.00  |
| e <sub>mak</sub> (%)                  | 0.85  | C <sub>c</sub>                  | 1.18  |
| e <sub>min</sub> (%)                  | 0.50  | k (cm/sn, D <sub>r</sub> =0.70) | 1.66  |
| D <sub>10</sub> (mm)                  | 2.6   | Zemin Türü (USCS)               | GP    |
| D <sub>15</sub> (mm)                  | 2.9   |                                 |       |

Gün geçtikçe pahalılaşan araştırma-geliştirme giderlerini en düşük seviyede tutmak için en az deneyle doğru sonuca gitme ilkesine dayanan birçok deney tasarım yöntemi geliştirilmiş ve bunlar geniş uygulama alanı bulmuştur. Deney tasarımının amacı, en az sayıda deneyden mümkün olduğu kadar çok bilgi elde etmektir. Taguchi yöntemi kalite-kontrol amaçlı ürün üretimi ve parametre tasarımı için geliştirilmiş olmakla birlikte, oldukça farklı alanlarda uygulanmaktadır. Yöntem, özel olarak geliştirilmiş ortogonal dizinler için uygulanmaktadır. Bu tasarım tüm deneylerin bir örneğini oluşturmaktadır. Deney tasarımı için ortogonal dizinler (OA) olarak bilinen standartlaştırılmış tablolar kullanılmaktadır. Bu yöntemde; standart analiz ve S/N (signal to noise) analizi olmak üzere iki şekilde analiz yapılmaktadır. Taguchi Yöntemi hakkında ayrıntılı bilgiler Roy (2001), Logothetis (1992) ve Şirvancı (1997) tarafından verilmiştir.

Çalışmada bentonit, uçucu kül ve silis dumanı parametre olarak seçilmiştir. Seçilen parametreler ve bu parametrelerin seviyeleri (kullanılan toplam katı ağırlığın yüzdesi olarak) Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Çalışma için seçilen parametreler ve seviyeleri

| Seviye | Parametreler       |                     |                        |
|--------|--------------------|---------------------|------------------------|
|        | Bentonit oranı (%) | Uçucu Kül oranı (%) | Silis Dumanı oranı (%) |
| 1      | 0                  | 10                  | 0                      |
| 2      | 0.5                | 20                  | 5                      |
| 3      | 1                  | 30                  | 10                     |
| 4      | 3                  | 40                  | 20                     |

Deneyler için seçilen, 3 parametrelili 4 seviyeli standart L16 ortogonal dizin Tablo 4’de gösterilmiştir. Seçilen ortogonal dizine göre enjeksiyon karışımları laboratuvarında su/katı=1 (S/K=1) oranına göre hazırlanmış ve bu karışımlar 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde silindirik kalıplar içerisindeki çakıl örneklerine ( $Dr=0.70$ ) enjeksiyon yapılarak hazırlanan örneklerin 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları tayin edilmiştir.

Tablo 4. Deneylerde kullanılan ortogonal dizin  $L_{16}(4^5)$

| Deney No. | Parametreler ve Deneylerin Yapılacağı Parametre Seviyeleri |                     |                        |
|-----------|------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
|           | Bentonit oranı                                             | Uçucu Kül oranı (%) | Silis Dumanı oranı (%) |
| 1         | 0                                                          | 10                  | 0                      |
| 2         | 0                                                          | 20                  | 5                      |
| 3         | 0                                                          | 30                  | 10                     |

|    |     |    |    |
|----|-----|----|----|
| 4  | 0   | 40 | 20 |
| 5  | 0.5 | 10 | 5  |
| 6  | 0.5 | 20 | 0  |
| 7  | 0.5 | 30 | 20 |
| 8  | 0.5 | 40 | 10 |
| 9  | 1   | 10 | 10 |
| 10 | 1   | 20 | 20 |
| 11 | 1   | 30 | 0  |
| 12 | 1   | 40 | 5  |
| 13 | 3   | 10 | 20 |
| 14 | 3   | 20 | 10 |
| 15 | 3   | 30 | 5  |
| 16 | 3   | 40 | 0  |

Bentonitin su ile reaksiyonunu tamamlaması için gerekli süre yaklaşık bir gün olduğundan bentonit katılması gereken karışımlara her karışım için bentonit miktarı %10, su miktarı ise %90 olacak şekilde karıştırılmış ve 24 saat bekletilmiştir (Huang 1997). Karışım suyuna, homojen olarak önceden karıştırılmış katı malzemeler (çimento, uçucu kül, silis dumanı) ilk 2 dakika içerisinde yavaşça ilave edilmiş ve üçüncü dakikada ise 24 saat bekletilmiş olan bentonit-su karışımı eklenmiştir. Karıştırıcının hızı 1000 dev/dk olarak sabit tutulmuş ve karıştırma süresi 5 dakika olarak alınmıştır (Toumbakari 1999, Huang 2001). Enjeksiyon basıncı 1 atmosfer basınca ayarlanmış ve enjeksiyon işlemi aşağıdan yukarıya doğru çıkan kademeler şeklinde yapılmıştır. Aynı işlemler sadece çimento harcı ile enjekte edilen karşılaştırma örnekleri için de tekrar edilmiştir. Enjeksiyonlu ve karşılaştırma örnekleri 24 saat sonra kalıplarından çıkarılarak  $23 \pm 2$  °C sabit sıcaklıkta ve kirece doygun kür havuzunda bekletilmiştir.

Deney sonuçlarının S/N değerleri (7, 14, 28 günlük) Tablo 5’de, parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (7, 14, 28 günlük) Tablo 6’da, varyans analizi tablosu (7,14,28 günlük) Tablo 7’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Taguchi yöntemiyle değerlendirilerek parametrelerin 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkilerini gösteren grafikler Şekil 2, 3 ve 4’de verilmiştir. Şekil 2-4 te B, UK ve S kısaltmaları sırasıyla bentonit, uçucu kül ve silis dumanını, kısaltmaların yanında verilen rakamlar ise parametre seviyelerini göstermektedir. Örnek olarak B1 kısaltmasından bentonitin birinci seviyesini gösterdiği anlaşılmaktadır.

Tablo 5. Deney sonuçlarının S/N değerleri (7, 14, 28 günlük)

| Deney No.          | Parametreler ve Seviyeleri |           |              | S/N Oranı |           |           |
|--------------------|----------------------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|
|                    | Bentonit                   | Uçucu Kül | Silis Dumanı | 7 günlük  | 14 günlük | 28 günlük |
| 1                  | 1                          | 1         | 1            | 2,33      | 5,75      | 11,76     |
| 2                  | 1                          | 2         | 2            | 2,66      | 5,18      | 7,28      |
| 3                  | 1                          | 3         | 3            | 4,57      | 5,78      | 10,82     |
| 4                  | 1                          | 4         | 4            | 4,75      | 8,58      | 13,24     |
| 5                  | 2                          | 1         | 2            | 6,95      | 7,82      | 11,91     |
| 6                  | 2                          | 2         | 1            | 0,08      | 2,67      | 5,80      |
| 7                  | 2                          | 3         | 4            | 7,89      | 9,52      | 16,02     |
| 8                  | 2                          | 4         | 3            | 2,48      | 5,49      | 9,84      |
| 9                  | 3                          | 1         | 3            | 9,97      | 11,88     | 14,24     |
| 10                 | 3                          | 2         | 4            | 8,08      | 13,62     | 16,53     |
| 11                 | 3                          | 3         | 1            | -0,39     | 5,72      | 7,72      |
| 12                 | 3                          | 4         | 2            | 0,20      | 2,14      | 4,74      |
| 13                 | 4                          | 1         | 4            | 11,58     | 15,03     | 17,80     |
| 14                 | 4                          | 2         | 3            | 7,62      | 11,15     | 13,64     |
| 15                 | 4                          | 3         | 2            | 1,11      | 7,34      | 10,16     |
| 16                 | 4                          | 4         | 1            | -0,92     | 1,39      | 3,63      |
| Ortalama S/N Oranı |                            |           |              | 4,31      | 7,44      | 10,95     |

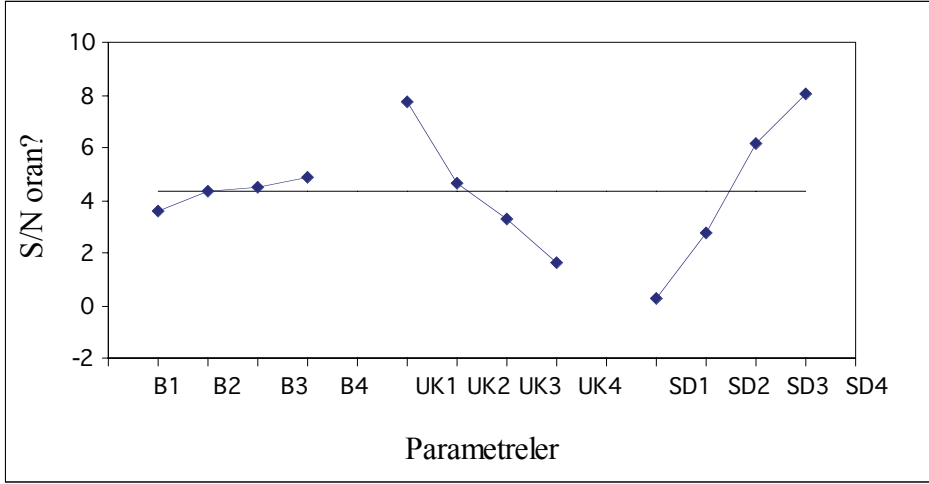
Tablo 6. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (7, 14, 28 günlük)

| SÜRE      | SEVIYE    | BENTONİT | S/N ORANı |             |
|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|
|           |           |          | UÇUCU KÜL | SİLİS DUMAı |
| 7 GÜNLÜK  | 1. SEVIYE | 3,58     | 7,71      | 0,27        |
|           | 2. SEVIYE | 4,35     | 4,61      | 2,73        |
|           | 3. SEVIYE | 4,46     | 3,30      | 6,16        |
|           | 4. SEVIYE | 4,85     | 1,63      | 8,07        |
| 14 GÜNLÜK | 1. SEVIYE | 6,33     | 10,12     | 3,88        |
|           | 2. SEVIYE | 6,37     | 8,16      | 5,62        |
|           | 3. SEVIYE | 8,34     | 7,09      | 8,58        |
|           | 4. SEVIYE | 8,73     | 4,40      | 11,69       |
| 28 GÜNLÜK | 1. SEVIYE | 10,78    | 13,93     | 7,23        |
|           | 2. SEVIYE | 10,89    | 10,81     | 8,52        |
|           | 3. SEVIYE | 10,81    | 11,18     | 12,14       |
|           | 4. SEVIYE | 11,31    | 7,87      | 15,90       |

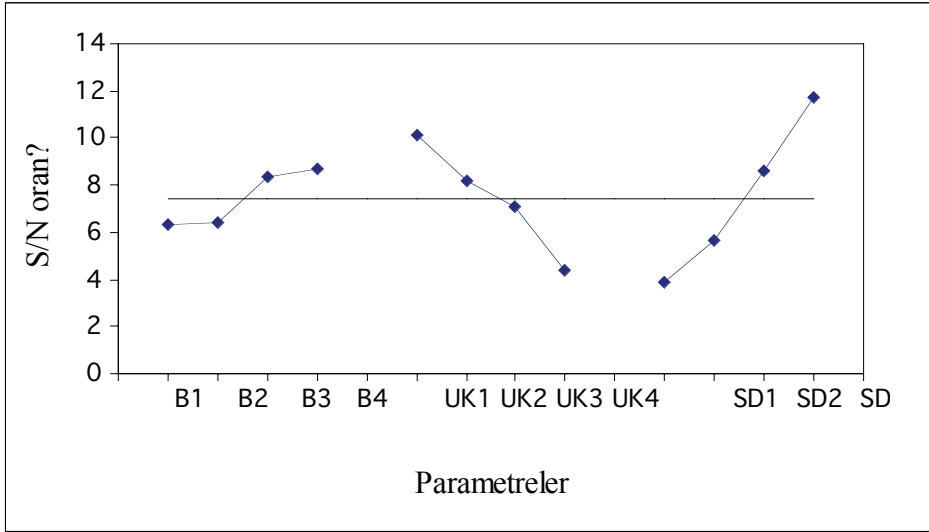
Tablo 7. Varyans analizi tablosu (7, 14, 28 günlük)

| Parametre    | 7 günlük                  |                     |                  | 14 günlük                 |                     |                  | 28 günlük                 |                     |                  |
|--------------|---------------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
|              | Serbestlik Derecesi (DOF) | Kareler Toplamı (S) | Etki Oranı S (%) | Serbestlik Derecesi (DOF) | Kareler Toplamı (S) | Etki oranı S (%) | Serbestlik Derecesi (DOF) | Kareler Toplamı (S) | Etki Oranı S (%) |
| Bentonit     | 3                         | 3,40                | 1,45             | 3                         | 19,40               | 8,08             | 3                         | 0,73                | 0,27             |
| Uçucu Kül    | 3                         | 79,44               | 33,87            | 3                         | 66,82               | 27,84            | 3                         | 73,88               | 27,05            |
| Silis Dumanı | 3                         | 145,50              | 62,03            | 3                         | 141,19              | 58,84            | 3                         | 182,53              | 66,84            |
| Diğer        | 6                         | 6,22                | 2,65             | 6                         | 12,57               | 5,24             | 6                         | 15,95               | 5,84             |
| Toplam       | 15                        | 234,56              | 100.00           | 15                        | 239,98              | 100              | 15                        | 273,09              | 100              |

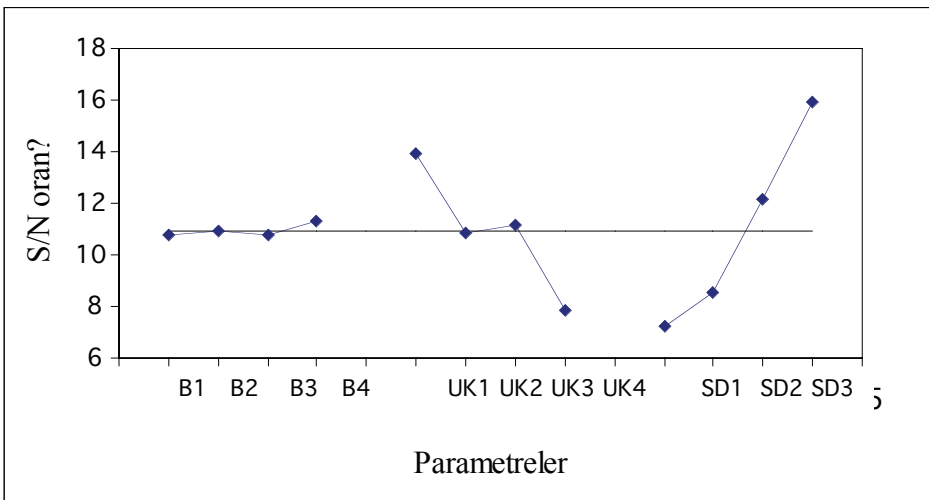




Şekil 2. Parametrelerin 7 günlük tek eksenli basınç dayanımı üzerinde etkileri



Şekil 3. Parametrelerin 14 günlük tek eksenli basınç dayanımı üzerinde etkileri



Şekil 4. Parametrelerin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı üzerinde etkileri

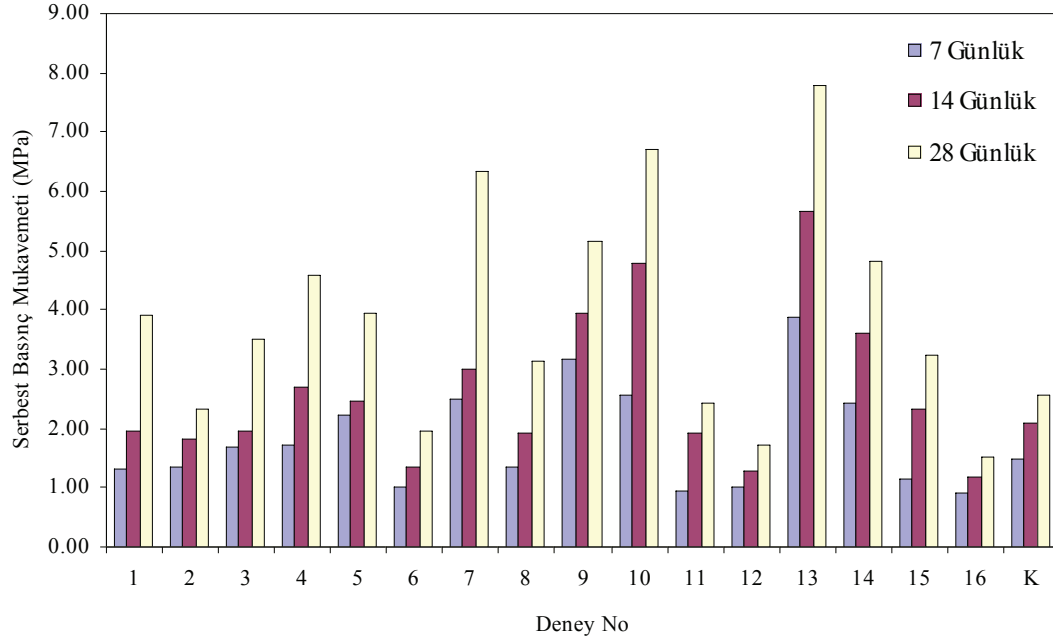
Tüm örnekler için elde edilen 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları Tablo 8’de, karşılaştırma örneklerinin 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları Tablo 9’da ve bu değerlerden yararlanarak çizilen histogram ise Şekil 5’de verilmiştir.

Tablo 8. Enjeksiyon uygulanan örneklerin tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

| Den.<br>No | Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) |      |      |           |      |      |           |      |      |
|------------|-----------------------------------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
|            | 7 Günlük                          |      |      | 14 Günlük |      |      | 28 Günlük |      |      |
|            | 1                                 | 2    | 3    | 1         | 2    | 3    | 1         | 2    | 3    |
| 1          | 1,21                              | 1,42 | 1,32 | 2,23      | 1,83 | 1,83 | 4,21      | 3,81 | 3,66 |
| 2          | 1,46                              | 1,30 | 1,33 | 1,71      | 1,94 | 1,82 | 2,38      | 2,48 | 2,12 |
| 3          | 1,70                              | 1,78 | 1,61 | 1,91      | 2,05 | 1,89 | 3,50      | 3,21 | 3,79 |
| 4          | 1,76                              | 1,82 | 1,62 | 2,69      | 2,69 | 2,68 | 4,49      | 4,70 | 4,60 |
| 5          | 2,23                              | 2,13 | 2,33 | 2,46      | 2,41 | 2,51 | 3,65      | 4,00 | 4,23 |
| 6          | 1,18                              | 0,99 | 0,91 | 1,37      | 1,35 | 1,36 | 1,84      | 2,13 | 1,91 |
| 7          | 2,61                              | 2,36 | 2,49 | 3,00      | 2,87 | 3,12 | 6,33      | 6,27 | 6,38 |
| 8          | 1,51                              | 1,35 | 1,19 | 1,68      | 1,87 | 2,20 | 3,47      | 2,81 | 3,14 |
| 9          | 3,07                              | 3,24 | 3,15 | 3,76      | 4,33 | 3,77 | 5,05      | 5,26 | 5,16 |
| 10         | 2,79                              | 2,41 | 2,45 | 4,64      | 4,97 | 4,80 | 6,50      | 6,94 | 6,69 |
| 11         | 0,90                              | 1,02 | 0,96 | 1,94      | 1,85 | 2,02 | 2,30      | 2,58 | 2,44 |
| 12         | 1,01                              | 1,03 | 1,03 | 1,28      | 1,28 | 1,28 | 1,81      | 1,73 | 1,65 |
| 13         | 3,30                              | 3,95 | 4,37 | 5,86      | 5,44 | 5,65 | 7,90      | 7,39 | 8,05 |
| 14         | 2,32                              | 2,68 | 2,27 | 3,62      | 3,44 | 3,80 | 5,00      | 4,81 | 4,63 |
| 15         | 1,12                              | 1,24 | 1,07 | 2,38      | 2,28 | 2,33 | 3,20      | 3,20 | 3,26 |
| 16         | 0,93                              | 0,90 | 0,87 | 1,09      | 1,18 | 1,27 | 1,55      | 1,48 | 1,53 |

Tablo 9. Yalnız çimento ile enjeksiyon uygulanmış örneklerin basınç dayanımları

| Süre    | Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) |      |      |          |
|---------|-----------------------------------|------|------|----------|
|         | 1                                 | 2    | 3    | ortalama |
| 7. gün  | 1,42                              | 1,64 | 1,44 | 1,50     |
| 14. gün | 2,07                              | 2,10 | 2,08 | 2,08     |
| 28. gün | 2,56                              | 2,56 | 2,55 | 2,56     |



Şekil 5. Enjeksiyonlu örneklerin tek eksenli basınç dayanımları

## SONUÇ

Enjeksiyon uygulanan örneklerin tek eksenli basınç dayanımlarında (7, 14 ve 28 günlük) en yüksek değerler, enjeksiyon karışımında %3 bentonit, %10 uçucu kül ve % 20 silis dumanının kullanıldığı 13 No.lu deneylerde elde edilmiş olup, 7, 14 ve 28 günlük en yüksek tek eksenli basınç dayanımları sırasıyla 4.37 MPa, 5.86 MPa ve 8.05 MPa olarak bulunmuştur.

Optimum karışım oranlarını ve beklenen en büyük tek eksenli basınç dayanımını belirlemek için yapılan analizlerde, optimum karışım oranları 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı için %3 bentonit, %10 uçucu kül, %20 silis dumanı olarak belirlenmiştir. Beklenen tek eksenli basınç dayanımları sırasıyla 3.99 MPa, 6.06 MPa ve 9.16 MPa olarak hesaplanmıştır. Optimum koşullarda yapılan doğrulama deney sonuçları %90 güven aralığı içerisinde olup, bu değerlere oldukça yakındır.

Sadece çimento kullanılarak yapılan deneylerde en yüksek tek eksenli basınç dayanımları (7, 14 ve 28 günlük) ise sırasıyla; 1.64 MPa, 2.10 MPa, ve 2.56 MPa olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerlere göre; sadece çimento kullanılarak hazırlanan örneklerin tek eksenli basınç dayanımlarının, katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerinkine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, su/çimento oranının yüksek olması, sadece çimento

ile hazırlanan karışımların çökelme, viskozite ve priz süreleri gibi özelliklerinin istenilen düzeyde olmaması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır.

Seçilen parametreler ve seviyelerinin deneyler üzerindeki etkileri incelendiğinde; enjeksiyon uygulanan örneklerin tek eksenli basınç dayanımları (7, 14 ve 28 günlük) üzerinde en etkili parametrenin silis dumanı olduğu görülmüştür. Enjeksiyon karışımındaki silis dumanı oranı arttıkça örneklerin tek eksenli basınç dayanımları da artmıştır. Uçucu külün enjeksiyonlu örneklerin tek eksenli basınç dayanımları (7, 14 ve 28 günlük) üzerindeki etkisi azaltıcı yönde olup bu oran arttıkça tek eksenli basınç dayanımları genelde hızlı bir düşüş göstermiştir. Tek eksenli basınç dayanımı üzerinde en az etkili parametre bentonittir.

Bu çalışma, çimento enjeksiyonlarının hazırlanmasında belirli oranlarda bentonit, silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanılabileceğini göstermiştir. Optimum karışım koşulları %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanı olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu oranların enjeksiyon karışımının işlenebilirlik, su kuma, viskozite, homojenlik ve priz süreleri gibi özelliklerini olumlu yönde geliştirdiği görülmüştür.

Farklı zemin tane boyu dağılımları, rölatif sıklıklar ve malzeme oranları için detaylı benzer çalışmalar yapılarak etki yüzdeleri ve optimum karışım oranları belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

1. Çinicioğlu, F.Ö., Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu. İ.Ü. Basımevi ve Film Merkezi, 1997. 63-172, İstanbul.
2. Güngörmüş, G., Bentonit uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu uygulanan granüler zeminlerde serbest basınç mukavemetinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2003.
3. Huang, W.H., Properties of Cement-Fly Ash Grout Admixed With Bentonite, Silica Fume, or Organic Fiber. Cement and Concrete Research, 1997. 27, 3, 395-406.
4. Huang, W.H., Improving the properties of cement-fly ash grout using fiber and superplasticizer. Cement and Concrete Research, 2001. 31, 1033-1041.

5. Kim, T., Lee C., Deformation behavior changes of jointed rocks by cement milk grouting. 1998.
6. Logothetis, N., Maniging for Total Quality From Deming to Taguchi and SPC. Prentice Hall Intenational Ltd, New York. 1992.
7. Mitchell, J. K., Soil improvement-State-of-Art Report. Proc. 10<sup>th</sup> International Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 509-65, Stockholm. 1981.
8. Roy, R., Design of Experiments Using The Taguchi Approach, Wiley-Interscience, New York. 2001.
9. Shroff, A. V., Shah, D. L., Grouting Technology In Tunnelling and Dam Construction, pp. 20-490, Balkema Publishers, Brookfield. 1993.
10. Şirvancı, M., Kalite İçin Deney Tasarımı. Literatür Yayıncılık, İstanbul. 1997.
11. Toumbakari, E.E., Van Gemert D., Tassios T.P., Tenoutasse N., Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts. Cement and Concrete Research, 1999. 29, 867-872.
12. Zaimoğlu, A.Ş., Bentonit uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu karışımlarında fiziksel ve mekanik özelliklerin Taguchi Yöntemi ile incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2003.