

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**BENTONİT, UCUCU KÜL VE SİLİS DUMANI KATKILI
ÇİMENTO ENJEKSİYONU KARİŞİMLARINDA FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİN TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2003

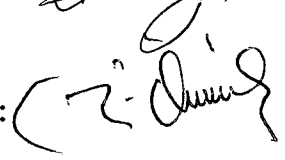
Her hakkı saklıdır

Yrd. Doç Dr Özcan TAN danışmanlığında, A.Şahin ZAIMOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 09/05/2003 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER

İmza : 

Üye : Prof. Dr. İbrahim ÖRÜNG

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özcan TAN

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Suat AKBULUT

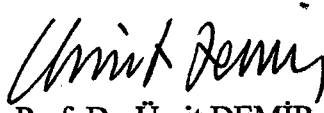
İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sinan HINISLIOĞLU

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

(imza)



Prof. Dr. Ümit DEMİR

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

BENTONİT, UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI KATKILI ÇİMENTO ENJEKSİYONU KARIŞIMLARINDA FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Özcan TAN

Çimento enjeksiyonlarında maliyeti düşürmek veya karışımın bazı özelliklerini iyileştirmek için çimento ile birlikte bazı katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı oranlardaki bentonit, uçucu kül ve silis dumanı ile birlikte hazırlanan enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemeti, dinamik viskozite, çökelme, priz süreleri ve akma özellikleri araştırılmıştır. Deneyler için Taguchi Yöntemine göre 3 parametrelili 4 seviyeli L16 deney tasarım tablosu seçilmiştir. Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, kullanılan katı ağırlığının %0, %0.5, %1 ve %3' ü oranlarında bentonit, %10, %20, %30 ve %40' ı oranlarında uçucu kül ve %0, %5, %10 ve %20' i oranlarında silis dumanı kullanılmıştır. Hazırlanan enjeksiyon karışımları için laboratuvar da serbest basınç (7, 14 ve 28 günlük), çökelme, Marsh Hunisi, Vicat iğnesi ve dönmeli viskozimetre deneyleri yapılmıştır. Deneyler üç farklı su/katı (S/K) oranlarında (0.75, 1.00 ve 1.25) yapılmış olup deney sonuçları Taguchi Yöntemine göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda; enjeksiyon karışım örneklerinin serbest basınç mukavemeti değişimi üzerinde en çok etkili parametrenin uçucu kül, en az etkili parametrenin ise bentonit olduğu belirlenmiştir. Priz başlama süresi üzerindeki en etkili parametreler silis dumanı ve uçucu kül olurken, priz bitiş süresi üzerinde ise bentonit ve uçucu kül etkili olmuştur. Akma süresi ve çökelme miktarı üzerinde ise en etkili parametrenin silis dumanı olduğu belirlenmiştir. Enjeksiyon karışımlarının incelenen özellikleri için optimum karışım oranları Taguchi Yöntemi ile belirlenmiş ve bu oranlar için doğrulama deneyleri yapılmıştır.

Ayrıca %10 uçucu kül, %20 silis dumanı ve %3 bentonit, %10 uçucu kül, %20 silis dumanı kullanılarak hazırlanan enjeksiyon karışımları; rölatif sıkılığı 0.70, tane çapı aralığı 2-10 mm olan kalıp içerisindeki çakıl örneklerine 1 atmosfer basınç altında enjekte edilmiştir. Bu örneklerin 7,14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenerek, sadece çimento ile hazırlanan enjeksiyon karışımı ile enjekte edilmiş örneklerin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2003, 122 sayfa

Anahtar Kelimeler: bentonit, çimento enjeksiyonu, silis dumanı, Taguchi Yöntemi, uçucu kül, zemin iyileştirmesi

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT INJECTION BLENDED WITH BENTONITE, FLY ASH AND SILICA FUME BY TAGUCHI METHOD

Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Özcan TAN

In order to reduce the cost or improve some of the properties of the mixture in the cement injections some supplementary materials are used with the cement. In this study it was investigated the unconfined compressive strength, dynamic viscosity, sedimentation, setting times and flow properties of the mixtures of the injections containing bentonite, fly ash and silica fume, which were prepared in different ratios. L16 orthogonal array with three parameters and four levels was selected using Taguchi Design of Experiment Method. In the preparation of the injection mixtures the used percentages of bentonite, fly ash and silica fume (by weight of solid) are 0%, 0.5%, 1%, 3%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 0%, 5%, 10%, 20%, respectively. For the prepared injection mixtures the unconfined compressive strength (7, 14 and 28 days), precipitation, Marsh Funnel, Vicat needle and rotational viscosimetry experiments were performed in the laboratory. The experiments were performed for three different water to solid ratios, (W/S) of 0.75, 1.00 and 1.25 and the experimental results were evaluated separately using Taguchi method.

As a result of the evaluations; it was determined that the most effective parameter on the variation of the unconfined compressive strength of the samples of the injection mixtures was the fly ash while the least effective parameter was the bentonite. It was also determined that while the most effective parameters on the initial setting time was fly ash and silica fume, on the final setting time the most effective parameters were bentonite and fly ash. The most effective parameter on the flowing time (viscosity) and the amount of precipitation was determined to be silica fume. For the investigated properties of the injection mixtures the optimum mixing ratios were determined with the Taguchi method and for these ratios the confirmation experiments were performed.

In addition, the injection mixtures prepared by using 10% fly ash, 20% silica fume and 3% bentonite, 10% fly ash, 20% silica fume were injected under 1 atmospheric pressure into the aggregate samples placed in the mould which has a relative density of 0.70 and grain diameter of in between 2 and 10 mm. By determining the unconfined compressive strength of these samples for 7, 14 and 28 days, the experimental results of the injected samples and the injection mixtures which were prepared by using only cement were compared.

2003, 122 pages

Keywords: bentonite, cement injection, silica fume, Taguchi method, fly ash, soil improvement

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın her aşamasında, gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı, tez yöneticim ve danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Özcan TAN'a en içten teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmamın yürütülmesindeki yardımlarından dolayı tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. İbrahim ÖRÜNG ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali AYDIN'a teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmamda kullanmış olduğum Taguchi Optimizasyon tekniğinin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Sinan HINISLIOĞLU'na ve deneylerimin yapılışında yardımda bulunan Sayın Ünsal BAYRAK'a teşekkür ederim.

Deneylerde kullandığım malzemelerin temin edilmesindeki katkılarından dolayı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığına ve bu malzemeleri gönderen Ankara SET Çimento Fabrikası, Ankara Çayırhan Termik santrali, Antalya-Etibank Elektrometalurji Endüstri ve İksa İnşaat Katkıları Sanayii ve Tic. Ltd. Şirketi yetkililerine ve Erzurum DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü Laboratuvar yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince benden her türlü destek ve özveriye esirgemeyen aileme içtenlikle teşekkür ederim.

A.Şahin ZAIMOĞLU

Mayıs, 2003

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç.....	1
1.2. Kapsam.....	1
1.3. Kaynak özetleri.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER	13
2.1. Zeminin Enjeksiyonu	13
2.1.1. Enjeksiyonun başlıca uygulama alanları.....	15
2.1.2. Enjeksiyon karışımları	15
2.1.3. Enjeksiyon türleri.....	16
2.1.4. Enjeksiyon ile ilgili tanımlar.....	18
2.1.5. Arazide enjeksiyon uygulamaları.....	20
2.1.6. Enjeksiyon karışım malzemelerinin sınıflandırılması.....	21
2.1.7. Enjeksiyon karışımı çeşitleri.....	25
2.1.8. Enjeksiyon karışımının seçimi.....	26
2.1.9. Enjeksiyon karışımlarının reolojisi.....	26
2.1.10. Enjeksiyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri.....	28
2.1.11. Enjekte edilebilirlik.....	29
2.2. Taguchi Yöntemi	32
2.2.1. Taguchi felsefesi	32
2.2.2. Taguchi Yöntemi'nde deney tasarımı	34
2.2.3. Taguchi Yöntemi'ne göre sonuçların analizi	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM	37
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	37

3.1.1. Çimento	37
3.1.2. Uçucu kül	37
3.1.3. Silis dumanı	38
3.1.4. Bentonit	39
3.1.5. Çakıl	43
3.2. Deney Programı	44
3.3. Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar	46
3.3.1. Hidrolik presler	46
3.3.2. Dönmeli viskozimetre.....	47
3.3.3. Marsh hunisi	47
3.3.4. Vicat iğnesi	47
3.3.5. Karıştırıcı	47
3.3.6. Enjeksiyon düzeneği ve numune kalıpları.....	48
3.4. Deneylerin Yapılışı	49
3.4.1. Enjeksiyon karışımı serbest basınç deneyleri	50
3.4.2. Vicat iğnesi deneyleri	51
3.4.3. Marsh hunisi deneyleri	52
3.4.4. Çökelme (sedimentasyon) deneyleri	52
3.4.5. Dönmeli (Rotasyonel) viskozimetre deneyleri	53
3.4.6. Enjeksiyonlu zemin numunelerinde yapılan deneyler.....	54
3.4.6.1. Numunelerin hazırlanması	54
3.4.6.2. Enjeksiyonlu zemin numunelerinin serbest basınç deneyleri	55
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	56
4.1. Enjeksiyon Karışımlarının Serbest Basınç Mukavemetleri.....	56
4.1.1. Karışımların serbest basınç deney sonuçları.....	56
4.1.2. Karışımların 7 günlük serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi	58
4.1.3. Karışımların 14 günlük serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi	63
4.1.4. Karışımların 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi	67

5.2. Sonuç.....	120
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	



SİMGELER DİZİNİ

C	Kohezyon
C_c	Derecelenme sayısı
C_u	Üniformluluk sayısı
c.p	Santim pois
D	Tane çapı
D_{10}	Zeminin efektif tane çapı
D_{15}	Geçen zeminin %15 ine karşılık gelen tane çapı
D_{30}	Geçen zeminin %30 une karşılık gelen tane çapı
D_{60}	Geçen zeminin %60 ine karşılık gelen tane çapı
D_{85}	Ağırlık olarak karışımın % 85 inin geçtiği tane çapı
D_{95}	Ağırlık olarak karışımın % 95 inin geçtiği tane çapı
D_{min}	Taneler arasındaki minimum boşluk çapı
D_r	Rölatif sıkılık
dk	Dakika
e_{max}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
h	Saat
k	Geçirimlilik katsayısı
MPa	Mega pascal
N, N_c, N_R	Enjeksiyon edilebilirlik
Pa.s	Pascal saniye
q_u	Serbest basınç dayanımı
S/K	Su/Katı
sn	Saniye
t	Zaman
γ_{kmax}	Zeminin maksimum kuru birim ağırlığı
γ_{kmin}	Zeminin minimum birim ağırlığı
γ_n	Doğal birim ağırlık
γ_s	Tane birim ağırlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Yukarıdan aşağı doğru inen kademeler yöntemi ile enjeksiyon.....	20
Şekil 2.2.	Aşağıdan yukarı doğru inen kademeler yöntemi ile enjeksiyon.....	21
Şekil 2.3.	Zemin ve enjeksiyon karışımı malzemelerinin tane-boyut eğrileri ...	30
Şekil 2.4.	Değişik enjeksiyonlar için enjekte edilebilir tane boyut aralıkları....	31
Şekil 3.1.	Kullanılan uçucu külün x-Ray grafiği.....	40
Şekil 3.2.	Kullanılan silis dumanının x-Ray grafiği.....	41
Şekil 3.3.	Kullanılan bentonitin x-Ray grafiği.....	42
Şekil 3.4.	Enjeksiyon yapılan zemine ait granülometri eğrisi.....	43
Şekil 3.5.	Enjeksiyon deney düzeneği.....	49
Şekil 3.6.	Karışımların kalıplara yerleştirilmesi.....	51
Şekil 3.7.	Serbest basınç deney sonrası numunelerin görünüşü.....	51
Şekil 3.8.	Çökelme deneyinin yapılışı.....	53
Şekil 3.9.	Enjeksiyonlu zemin örnekleri.....	55
Şekil 4.1.	Parametrelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=0.75).....	61
Şekil 4.2.	Parametrelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=1.00).....	61
Şekil 4.3.	Parametrelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=1.25).....	62
Şekil 4.4.	Parametrelerin 14 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=0.75).....	65
Şekil 4.5.	Parametrelerin 14 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=1.00).....	65
Şekil 4.6.	Parametrelerin 14 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=1.25).....	66
Şekil 4.7.	Parametrelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=0.75).....	69
Şekil 4.8.	Parametrelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=1.00).....	69

Şekil 4.9.	Parametrelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K oranı=1.25).....	70
Şekil 4.10.	Beklenen değerlerle, doğrulama ve yalnız çimento ile yapılan deney sonuçlarının karşılaştırması (S/K=0.75).....	72
Şekil 4.11.	Beklenen değerlerle, doğrulama ve yalnız çimento ile yapılan deney sonuçlarının karşılaştırması (S/K=1.00).....	72
Şekil 4.12.	Beklenen değerlerle, doğrulama ve yalnız çimento ile yapılan deney sonuçlarının karşılaştırması (S/K=1.25).....	73
Şekil 4.13.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 1)	74
Şekil 4.14.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 2)	74
Şekil 4.15.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 3)	75
Şekil 4.16.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 4)	75
Şekil 4.17.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 5)	75
Şekil 4.18.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 6)	76
Şekil 4.19.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 7)	76
Şekil 4.20.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 8)	76
Şekil 4.21.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 9)	77
Şekil 4.22.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 10).....	77
Şekil 4.23.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 11).....	77
Şekil 4.24.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 12).....	78
Şekil 4.25.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 13).....	78
Şekil 4.26.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 14).....	78
Şekil 4.27.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 15).....	79
Şekil 4.28.	Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No 16).....	79

Şekil 4.29.	S/K=0.75 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No 1-8).....	80
Şekil 4.30.	S/K=0.75 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No 9-16).....	80
Şekil 4.31.	S/K=1.00 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No 1-8).....	81
Şekil 4.32.	S/K=1.00 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No 9-16).....	81
Şekil 4.33.	S/K=1.25 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No 1-8).....	82
Şekil 4.34.	S/K=1.25 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No 9-16).....	82
Şekil 4.35.	Serbest basınç mukavemetlerindeki artış oranları (7-14).....	85
Şekil 4.36.	Serbest basınç mukavemetlerindeki artış oranları (14-28).....	85
Şekil 4.37.	Serbest basınç mukavemetlerindeki artış oranları (7-28).....	86
Şekil 4.38.	Parametrelerin priz başlama süresine etkileri (S/K=0.75).....	90
Şekil 4.39.	Parametrelerin priz başlama süresine etkileri (S/K=1.00).....	90
Şekil 4.40.	Parametrelerin priz bitiş süresine etkileri (S/K=0.75).....	91
Şekil 4.41.	Parametrelerin priz bitiş süresine etkileri (S/K=1.00).....	92
Şekil 4.42.	Enjeksiyon karışımının S/K=0.75 için katılaşma başlangıç ve sonu (Deney No 1-8).....	93
Şekil 4.43.	Enjeksiyon karışımının S/K=0.75 için katılaşma başlangıç ve sonu (Deney No 9-16).....	94
Şekil 4.44.	Enjeksiyon karışımının S/K=1.00 için katılaşma başlangıç ve sonu (Deney No 1-8).....	94
Şekil 4.45.	Enjeksiyon karışımının S/K=1.00 için katılaşma başlangıç ve sonu (Deney No 9-16).....	95
Şekil 4.46.	Parametrelerin marsh hunisi akma sürelerine etkileri (S/K=1.25)....	98
Şekil 4.47.	Enjeksiyon karışımının S/K=1.25 için akış süreleri (Deney No 1-8).....	100
Şekil 4.48.	Enjeksiyon karışımının S/K=1.25 için akış süreleri (Deney No 9-16).....	100
Şekil 4.49.	Parametrelerin çökelme yüzdesine etkileri (S/K=0.75).....	104
Şekil 4.50.	Parametrelerin çökelme yüzdesine etkileri (S/K=1.00).....	104
Şekil 4.51.	Parametrelerin çökelme yüzdesine etkileri (S/K=1.25).....	105
Şekil 4.52.	Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No 1-8).....	106

Şekil 4.53. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No 9-16).....	107
Şekil 4.54. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No 1-8).....	107
Şekil 4.55. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No 9-16).....	107
Şekil 4.56. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No 1-8).....	108
Şekil 4.57. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No 9-16).....	108
Şekil 4.58. Enjeksiyon karışımının $S/K=0.75$ için dinamik viskozitesi (Deney No 1-8).....	110
Şekil 4.59. Enjeksiyon karışımının $S/K=0.75$ için dinamik viskozitesi (Deney No 9-16).....	110
Şekil 4.60. Enjeksiyon karışımının $S/K=1.00$ için dinamik viskozitesi (Deney No 1-8).....	111
Şekil 4.61. Enjeksiyon karışımının $S/K=1.00$ için dinamik viskozitesi (Deney No 9-16).....	111
Şekil 4.62. Enjeksiyonlu numunelerin serbest basınç mukavemetinin zamanla değişimi (1.grup).....	113
Şekil 4.63. Enjeksiyonlu numunelerin serbest basınç mukavemetinin zamanla değişimi (2.grup).....	113
Şekil 4.64. Enjeksiyonlu numunelerin serbest basınç mukavemetinin zamanla değişimi (3.grup).....	114

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Farklı tipteki portland çimentolarının bileşimleri.....	22
Çizelge 2.2..	Uçucu külün kimyasal özellikleri.....	23
Çizelge 2.3.	Silis dumanının kimyasal özellikleri.....	24
Çizelge 2.4.	Ortogonal dizin $L_{16}(4^5)$	34
Çizelge 3.1.	Kullanılan portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....	37
Çizelge 3.2.	Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri.....	38
Çizelge 3.3.	Kullanılan silis dumanını kimyasal özellikleri.....	38
Çizelge 3.4.	Kullanılan bentonitin kimyasal özellikleri.....	39
Çizelge 3.5.	Deney zemininin bazı özellikleri.....	44
Çizelge 3.6.	Çalışmada seçilen parametreler ve seviyeleri.....	44
Çizelge 3.7.	Deneylerde kullanılan ortogonal dizin $L_{16}(4^5)$	45
Çizelge 3.8.	Deneylerde kullanılması gereken çimento/katı oranları.....	46
Çizelge 4.1.	Enjeksiyon sıvısı serbest basınç mukavemeti deney sonuçları (7 günlük).....	56
Çizelge 4.2.	Enjeksiyon sıvısı serbest basınç mukavemeti deney sonuçları (14 günlük).....	57
Çizelge 4.3.	Enjeksiyon sıvısı serbest basınç mukavemeti deney sonuçları (28 günlük).....	57
Çizelge 4.4.	Yalnız çimento ile yapılan karışımların serbest basınç mukavemeti deney sonuçları.....	58
Çizelge 4.5.	Deney sonuçlarının S/N değerleri (7 günlük).....	58
Çizelge 4.6.	Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (7 günlük).....	59
Çizelge 4.7.	Varyans analizi tablosu (7 günlük).....	60
Çizelge 4.8.	Deney sonuçlarının S/N değerleri (14 günlük).....	63
Çizelge 4.9.	Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (14 günlük).....	63
Çizelge 4.10.	Varyans analizi tablosu (14 günlük).....	64
Çizelge 4.11.	Deney sonuçlarının S/N değerleri (28 günlük).....	67
Çizelge 4.12.	Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (28 günlük).....	67
Çizelge 4.13.	Varyans analizi tablosu (28 günlük).....	68
Çizelge 4.14.	Optimum deney koşulları ve beklenen değerler.....	71

Çizelge 4.15.	Serbest basınç mukavemetlerinin zamana göre artış oranları (S/K=0.75).....	83
Çizelge 4.16.	Serbest basınç mukavemetlerinin zamana göre artış oranları (S/K=1.00).....	84
Çizelge 4.17.	Serbest basınç mukavemetlerinin zamana göre artış oranları (S/K=1.25).....	84
Çizelge 4.18.	Vicat iğnesi deney sonuçları.....	87
Çizelge 4.19.	Deney sonuçlarının S/N değerleri (priz süreleri).....	87
Çizelge 4.20.	Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (priz başlangıç). ..	88
Çizelge 4.21.	Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (priz bitiş).....	88
Çizelge 4.22.	Varyans analizi tablosu (priz başlangıç).....	89
Çizelge 4.23.	Varyans analizi tablosu (priz bitiş).....	89
Çizelge 4.24.	Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (minimum priz süreleri).....	93
Çizelge 4.25.	Marsh hunisi deney sonuçları.....	96
Çizelge 4.26.	Deney sonuçlarının S/N değerleri (marsh hunisi, S/K=1.25)	97
Çizelge 4.27.	Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (marsh hunisi, S/K=1.25).....	97
Çizelge 4.28.	Varyans analizi tablosu (marsh hunisi, S/K=1.25)).....	98
Çizelge 4.29.	Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (maksimum akma süresi S/K=1.25).....	99
Çizelge 4.30.	Çökelme deney sonuçları.....	101
Çizelge 4.31.	Deney sonuçlarının S/N değerleri (çökelme yüzdeleri).....	102
Çizelge 4.32.	Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (çökelme yüzdeleri).....	102
Çizelge 4.33.	Varyans analizi tablosu (çökelme yüzdeleri).....	103
Çizelge 4.34.	Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (minimum çökelme yüzdeleri).....	106
Çizelge 4.35.	Dönmeli viskozimetre deney sonuçları.....	109
Çizelge 4.36.	Enjeksiyonlu zemin (çakıl) numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (1.grup).....	112

Çizelge 4.37.	Enjeksiyonlu zemin (çakıl) numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (2.grup).....	112
Çizelge 4.38.	Enjeksiyonlu zemin (çakıl) numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (3.grup).....	112



1. GİRİŞ

1.1. Amaç

Enjeksiyon; bir zemin iyileştirme yöntemi olup, zemin ortamın taşıma gücünü artırmak, deformasyonları ve geçirimliliği azaltmak için zemin boşluklarına basınç altında bir karışımın (enjeksiyon karışımının) gönderilmesi işlemidir. Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, maliyeti düşürmek için veya bazı özellikleri iyileştirmek için çimento ile birlikte bentonit, uçucu kül ve silis dumanı gibi katkı malzemeleri kullanılmaktadır.

Çalışmanın amacı; çimento enjeksiyonunda kullanılan bentonit, uçucu kül ve silis dumanının enjeksiyon karışımının değişik özellikleri üzerindeki etkilerini Taguchi Yöntemi ile araştırmak ve incelenen özelliklere göre optimum karışım oranlarını belirlemektir. Ayrıca belirlenen optimum malzeme oranları dikkate alınarak hazırlanan iki farklı enjeksiyon karışımlarının, silindirik kalıplar içerisindeki çakıl örneklerle ($D_r=0.70$) enjeksiyon yapılarak serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi de çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır.

1.2. Kapsam

Taguchi Yönteminde, kontrol edilebilen parametre ve bu parametrelerin seviye sayılarına bağlı özel olarak geliştirilmiş standart ortogonal dizinler (deney tasarım tabloları) kullanılmaktadır. Yapılan çalışmaya uygun deney tasarım tablosu seçilerek deneylerin yapılması durumunda, deney sonuçları çeşitli analizlerle değerlendirilerek parametrelerin sonuç üzerindeki etkileri ve optimum karışım oranları belirlenebilmektedir.

Enjeksiyon karışımlarının değişik özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada 3 parametrelilik(bentonit, uçucu kül ve silis dumanı) 4 seviyeli standart L16 deney tasarım

tablosunun kullanılmasına karar verilmiştir. Deneyde kullanılan katı ağırlığına göre belirlenen parametre seviyeleri bentonit için %0, %0.5, %1 ve %3, uçucu kül için %10, %20, %30 ve %40 ve silis dumanı için %0, %5, %10 ve %20' olarak seçilmiştir.

Çalışma genel olarak enjeksiyon karışımlarının, serbest basınç mukavemeti, priz süreleri, çökelme, dinamik viskozite ve akma süreleri üzerinde parametrelerin üç farklı S/K (0.75, 1.00 ve 1.25) oranında etkilerinin araştırılmasını kapsamaktadır. Enjeksiyon karışımlarının incelenen her özelliği için ayrı ayrı optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve bu oranlarda hazırlanan karışımlarla silindirik tüpler içerisindeki çakıl ($D_r=0.70$) boşluklarına enjeksiyon yapılarak serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesi de çalışma kapsamı içerisinde yer almaktadır. Seçilen deney tasarım tablosuna uygun olarak hazırlanan enjeksiyon karışımları üzerinde serbest basınç, Vicat iğnesi, çökelme, dinamik viskozite, Marsh hunisi deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir.

1.3. Kaynak Özetleri

Allan (1997) kauçuk hammaddesi içeren karışımların reolojisini araştırmıştır. Araştırmada carboxylated styrene-butadiene ve akrilik olmak üzere iki kauçuk maddesi kullanılmıştır. Çalışmada kauçuk hammaddesi katkılı karışımın reolojisine süper akışkanlaştırıcı, uçucu kül ve yanmış ocak cürufunun etkileri araştırılmıştır. Değişik karışım oranları için gerilme-kesme eğrileri çizilmiş ve seçilen karışımın zamana bağlı davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmada kırılma basıncının ve viskozitenin kauçuk hammaddesi içeriğine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Araştırmada karışıma kauçuk hammaddesinin ilavesi karışımın geçirimsizlik, burulma, gerilme ve kimyasallara karşı dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde artırdığı belirtilmiştir. Kauçuk hammaddesinin aynı zamanda zemine karıştırmada kullanılan çimento-bentonit karışımının özelliklerini artırmak için de kullanıldığı söylenilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak çimento karışımlarına kauçuk hammaddesinin ilave edilmesi reolojik özelliklerin değişmesine neden olduğu ve viskoziteyi artırdığı bulunmuştur.

Akbulut (1999) tarafından yapılan, “Enjeksiyon İle Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi” konulu doktora tez çalışmasında; çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento- kil karışımları kullanılarak fiziksel ve mekanik özellikler araştırılmıştır. Rölatif sıklığı 0.30, 0.50 ve 0.80 olan zemin ortamlarına enjeksiyon uygulanarak serbest basınç mukavemeti ve geçirimsizlik arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Çalışma sonucunda silis dumanı katkılı karışım enjeksiyonu uygulanan numunelerin mukavemet ve hidrolik özellikleri, çimento enjeksiyonu uygulanan numunelere oranla daha olumlu sonuçlar verdiği, uçucu kül katkılı karışım enjeksiyonu uygulanan numunelerde, çimento enjeksiyonu uygulanan numunelere göre basınç mukavemetinin 28. günde %5-25 oranında düşüş gösterdiği ve doğal kil katkılı karışım enjeksiyonu uygulanan numunelerin geçirimsizliğinin kullanılan kil yüzdesi ile farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Bayat (1998), Türkiye’de bulunan uçucu küllerin karakteristik özelliklerini araştırmıştır. Çalışma Türkiye’nin doğu, orta ve batısında yer alan linyit ve bitüm alanlarından elde edilen 7 farklı uçucu külün, mineralojik, morfolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini karşılaştırmaktadır. Özelliklerin belirlenmesinde x-ray diffraction aleti kullanılmıştır.

Beechie (1993) terkedilmiş yeraltı madenlerinde yapılan basınçlı enjeksiyon uygulamasını araştırmıştır. Bu uygulamaların yeraltı stabilizasyonu için başarılı bir yöntem olduğu yapılan çalışma ile ispatlanmıştır. Araştırmanın amacı yer altı madenlerinin ıslahı için yapılan metodolojiye dikkat çekmektir. Çalışma Kuzey Dakota (ABD) da bulunan 24.3 hektara sahip yer altı madeninin stabilizasyonu için basınçlı enjeksiyon ile yapılan ıslah projesini anlatmaktadır. Maden içerisine çimento karışımını enjekte etmek için genelde dönel delgi ve açılı delgi yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan enjeksiyonda toplam 9.175 m³ çimento kullanılmıştır. Yapı içerisine toplam 21 kuyu açılmış ve bu kuyulardan 7 tanesi enjeksiyon için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, yapılar içerisinde yapılan geniş kapsamlı delgi ve enjeksiyon projelerinin bilinen yöntemlerden farklı olduğu, dönel delgi, açılı delgi ve enjeksiyonun çoğu durumlar için uygun olmakla birlikte çöken madenler üzerinde yer alan büyük yapılarla karşı karşıya kalındığında bilinen bu yöntemlerin yetersiz kalabileceği belirtilmiştir.

Bolton and Chin (1994) tarafından hazırlanan makalede, yumuşak zeminlerde tünel inşasında, tünelin ilerlemesi süresince görülebilen oturmaların, vereceği zararın endişe verici boyutlarda olduğu belirtilmiştir. Bu hasarları önlemek için tünel yapımından önce zeminin kayma direncini iyileştirilmesi veya tünel yapımı tamamlandıktan sonra zemin içerisine enjeksiyon yapılması gerektiği belirtilmiştir. Compensation enjeksiyonu ile enjeksiyon süresince tünel-zemin arayüzeyindeki seviyede kırılmalar oluşmaktadır. Çalışmada enjeksiyon uygulamalarındaki kırılma mekanizmasının çok iyi bilinmediği ve önceki çalışmaların güvenilirliği ile ilgili açıklamalar olmadığı ve bunun araştırılması gerektiği belirtilmiştir.

Chen *et al* (1993) tarafından yapılan çalışmada, çok ince maddeler içeren değişik enjeksiyon karışımlarının dağılımları, televizyon sistemi veya mikroskop kullanılarak ultraviyole ışınlar altında belirgin bir şekilde izlenmiştir. Bu yaklaşım, enjeksiyon karışımının dağılışını doğrudan gözlemeyi mümkün kıldığından dolayı, karışım mekanizmasının analizi, tasarlanan karışım içeriğinin belirlenmesi vb. için oldukça faydalı olduğu belirtilmiştir.

Eriksson (2002) tarafından yapılan araştırmada, İsveç’de bulunan Aspo Hard Rock Laboratuvarında, enjeksiyon ile ilgili arazi deneyleri sunulmaktadır. Çalışmada çatlaklarla ilgili araştırmalar yapılmış, çimento bazlı enjeksiyon karışımının ortam içerisindeki ilerleme hızı, geçirimsiliğe bağlı olarak araştırılarak matematik model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin doğruluğu arazi deneyleri ile kontrol edilmiştir. Deneylerin uygulama bölümünde arazide kaya tabakasındaki çatlaklar enjeksiyona tabi tutulmuştur. Enjeksiyon karışımının çatlaklardaki yayılma değerlendirilmesi sonucu, tahmin edilenle uygun olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda, arazi deneylerinin asıl amacının, arazide yapılan gerçek deneylerin sonuçlarına benzer, enjeksiyon tahmin metotlarını oluşturmak olduğu belirtilmiştir. Ayrıca enjeksiyon karışımı hızının daha ayrıntılı bir şekilde belirleyebilmek için çatlağın geometrisin oldukça iyi bilinmesi gerektiği belirtilmiştir.

Harris *et al* (1999) tarafından yapılan çalışma, standart yöntemlerle normal portland çimentosu ve poliüretan malzemeler kullanılarak arazide yapılan enjeksiyonun benzer çalışmasının laboratuvar ortamında yapılmasını anlatmaktadır. Makalede enjeksiyonun yapılması için ana amaçların öncelikle belirlenmesi gerektiği ve bunların; düşük geçirimsizlik, yapıların altında düşük hidrostatik basınç, düşük su kaybı, yüksek mukavemet, taşıma kapasitesini arttırmak, kararlı kaya ve temel vb. oluşturmak olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada gerekli olan araştırmalar için sunulan önerilerden birisi teorik matematiksel modeller ile arazi deneyleri arasında geçici bir adım olarak laboratuvar modellerinin kullanılması olmuştur. Yapılan enjeksiyon karışımlarının özellikleri deneme deneyleri ve performans analizleri için kaydedilmiştir.

Huang (1997) tarafından düşük seviyeli radyoaktif atıklar ve zararlı maddelerin izolasyonu için bariyer olarak kullanılan çimento ve uçucu kül karışımlarının özelliklerini araştırmak amacıyla detaylı bir laboratuvar araştırması yapılmıştır. Çalışmada uçucu kül çimento ağırlığının %30'u olarak kullanılmıştır. Bentonit, silis dumanı, polipropilen fiber gibi üç değişik katkı malzemesi değişik durumlarda karışımın özelliklerini geliştirmek için sırası ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımın akışkanlığı, kusması ve priz yapma süresi belirlenmiş ayrıca 120 güne kadar değişik kürlerde sertleşmiş karışımın serbest basınç mukavemeti, gözenek boyut dağılımı ve su geçirimsizliği belirlenmiştir. Daha sonra çimento-uçucu kül karışımının mukavemeti, karışımın sülfat saldırısına ve ıslak-kuru çevrime farklı seviyelerde maruz bırakıldıktan sonra fiziksel özelliklerindeki değişiklikler dikkatli bir şekilde test edilmiştir. Çalışmada; uçucu külün maliyeti azaltma, akıcılığı azaltma, yoğunluğu artırma, su geçirimsizliğini iyileştirme ve karışımın ömrünü uzatma amacıyla, bentonitin geçirimsizliği düşürme ve kusmayı azaltma amacıyla, silis dumanının gözenekliliği ve geçirimsizliği azaltma, mukavemeti artırma amacıyla ve polipropilen fiberin ise karışımın kırılma dayanımını minimuma indirme amacı ile kullanılabileceği belirtilmiştir.

Karahanoğlu (2001) tarafından uçucu kül ve bentonit ile yapılan çimento enjeksiyonunun özellikleri model deneyler ile araştırılmıştır. Belirlenen 7. ve 28. gün

serbest basınç mukavemetlerinin, akma sürelerinin ve elastisite modüllerinin diğer parametrelerle değişimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Kim and Lee (1998) tarafından yapılan araştırmada, çimento karışımı enjeksiyonu ile birleştirilen kayaların deformasyon davranışında oluşan değişiklikler incelenmiştir. Araştırmada, kaya birleşmesi özelliklerine enjeksiyonun etkisi, birleşim yerlerindeki basınç deneyi, kesme deneyi ve iki eksenli basınç deneyi kaya birleşim numuneleri üzerinde yapılarak incelenmiştir. Çimento şerbeti enjeksiyonu yapıldıktan sonra, birleşimin karakteristik özelliklerinin normal basınç seviyelerinde doğrusal olduğu belirtilmiştir. Fakat normal basınç arttırıldığında enjeksiyon yapılan birleşim yerlerindeki deformasyonun hızlı bir şekilde arttığı belirtilmiştir. Birleşen kaya kütlelerinin yük-deformasyon eğrileri, enjeksiyondan sonra nispeten doğrusal deformasyon gösterdiği belirtilmiştir. Deformasyon modüllerinin iyileştirme oranı, birleşme mesafesinin artırılması ve minimum basınç ile azaltılacağı belirtilmektedir. Yapılan araştırma sonuçlarını şöyle sıralayabiliriz ;

- Çimento karışımı enjeksiyonundan sonra, birleşim yerinin normal deformasyon karakteristikleri, normal basınç seviyelerinde doğrusaldır. Basıncın artmasıyla enjeksiyon yapılan birleşim yerlerinin normal deformasyonu hızlı bir şekilde artmıştır.
- Örneklerin kesme kırılması genellikle kaya-enjeksiyon ortak yüzeyinde meydana gelmiştir.
- Enjeksiyon yapılan kaya birleşimlerinde kesme deneyinden tepe kesme mukavemeti, amprik eşitlik olarak bulunmuştur.
- Birleşmiş kaya kütlelerinin yük - deformasyon eğrileri, enjeksiyondan önce doğrusal olmayan bir davranış fakat enjeksiyondan sonra doğrusal olan bir davranış göstermiştir.
- Enjeksiyon yapılan kaya birleşimlerinin deformasyon modülleri, enjeksiyondan önceki deformasyon modülünün fonksiyonu olarak amprik bir eşitlikle gösterilmiştir.

Langan *et al* (2002) portland çimentosunun hidrasyon ısısına silis dumanı ve uçucu külün etkilerini araştırmıştır. Çalışmada portland çimentosu-silis dumanı-uçucu kül karışımının kalorimetre sonuçları sunulmuştur. Elde edilen veriler, silis dumanının yüksek su/çimento oranlarında hidrasyonu hızlandırıcı etkisinin olduğunu ve düşük su/çimento oranlarında ise hidrasyonu geciktirdiğini ortaya koymuştur. Diğer taraftan uçucu külün yüksek su/çimento oranlarında oldukça belirgin bir şekilde hidrasyonu geciktirdiği belirlenmiştir. Araştırmada çimento içerisine silis dumanı ve uçucu külün birlikte katılması durumunda, silis dumanının reaktivitesinin engellendiği ve çimento sisteminin hidrasyonunun belirgin bir şekilde geciktiği belirtilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara dayanılarak, silis dumanının yüksek su/çimento oranlarında hidrasyonu hızlandırdığı, düşük su/çimento oranlarında ise hidrasyonu geciktirdiği ve durgunluk süresini takiben hidrasyonu yeniden hızlandırdığı belirlenmiştir. Ayrıca çimentonun başlangıç hidrasyonunun genellikle silis dumanının katılması ile hızlandığı belirtilmiştir. Su/çimento oranı ne kadar yüksek olursa, silis dumanının hızlandırma etkisi de o kadar fazla olduğu gözlenmiştir. Buna ilaveten uçucu külün de çimentonun başlangıç hidrasyonunu artırdığı fakat durgunluk süresince hidrasyonu geciktirdiği ve daha sonra hızlandırma periyoduna geçtiği vurgulanmıştır. Su/çimento oranı ne kadar yüksek olursa uçucu külün geciktirme etkisinin o kadar fazla olduğu gözlenmiştir. Çimentoya silis dumanı ve uçucu külün birlikte ilave edildiğinde çimento hidrasyonunun belirgin bir şekilde geciktiği belirtilmiştir. Bu durumda hidrasyon ısısının azaldığı ve silis dumanının erken reaksiyonunun engellendiği belirtilmiştir.

Lee *et al* (2000) kaya kütleleri içerisine enjekte edilen penetrasyon enjeksiyonunun kuvvetlendirici etkisini tartışma konusu yapmıştır. Bunun için enjeksiyon yapılmış ve yapılmamış kırılmış kaya kütlelerinin anizotropik malzeme özellikleri, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine dayalı olarak araştırılmıştır. Çalışma anizotropik malzeme özelliklerini, sadece ana kaya ve enjeksiyon malzeme özelliklerinin fonksiyonu olarak değil aynı zamanda kaya kırılmalarının geometrik ve mekanik özellikleriyle de ilişkilendirmiştir. Çalışmanın sonucu olarak,

- Enjeksiyon ile kuvvetlendirilen kaya kütlelerinin anizotropik malzeme özellikleri, ana kaya ve enjeksiyonun fonksiyonları olduğu

- Basınç deneyi uygulandığında önce düşey enjeksiyonun daha sonra sırasıyla ana kaya ve penetrasyon enjeksiyonunun kırıldığı
- Arazi deneylerinden elde edilen kesme modülü değerleri kullanılarak, ana kaya ve enjeksiyon ile birleştirilmiş kaya malzemelerinin özellikleri farklı olarak hesaplandığı ve kırık yerlerin tamamen penetrasyon enjeksiyonu ile doldurulduğunda kırık kalınlığının altı kat daha arttığı gözlenmiştir.

Mansure (2002) poliüretan enjeksiyonun jeotermal kuyularda uygulamasını araştırmıştır. Poliüretan enjeksiyon Rye Patch'da jeotermal kuyulardaki çamur kaybı bölgelerinde başarı ile uygulanmıştır. Makalede poliüretan enjeksiyonunun avantajının viskozitesinin ve priz yapma süresinin yapılan işe göre uygun olarak ayarlanabilmesi olduğu belirtilmiştir. Yapılan enjeksiyonun pompalama başlangıcında düşük viskoziteyi sağlaması ve daha sonra kısa sürede mukavemet kazanması gerektiği belirtilmiştir. Poliüretan enjeksiyon uygulamasının dar kuyularda çamur kaybını önlemek ve araştırma kuyularının stabilizasyonunu sağlamak için başarılı olduğu buna karşılık önceden açılmış büyük çaplı jeotermal araştırma kuyuları için başarılı olmadığı belirtilmiştir.

Rowe (2000) tarafından yapılan çalışmada başlıca iki enjeksiyon yöntemden bahsedilmiştir. Birincisi, enjeksiyon karışımının yeraltında tek şişebilen lastik halka içerisinden enjekte edilen tek lastik halkalı enjeksiyon yöntemi, ikincisi tüp manşet ile birlikte kullanılan çift lastik halkalı enjeksiyon yöntemidir. İster tek ister çift lastik halkalı enjeksiyon sistemi kullanılsın, her iki enjeksiyon yönteminin de çukurdaki sızıntının önlenmesinde hem etkili hem de güvenilir olduğu söylenmektedir. Yapılan çalışmada seçim kriterleri göz önünde bulundurularak, her iki metodun spesifik özellikleri dikkate alınmış ve yapılan işlemler anlatılmıştır.

Snuparek and Soucek (2000) kimyasal maddelerle hazırlanmış enjeksiyon karışımlarının özelliklerinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesini araştırmışlardır. Çalışmada, enjeksiyon karışımının viskozite ölçümü, kür edilmiş örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleme yöntemleri tartışılmıştır. Ayrıca enjeksiyon uygulanmış

kaya ve zemin örneklerinin kür edildikten sonra fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış ve sonuçları tartışılmıştır. Kür edilen numuneler tek ve üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneylerde kullanılan numune boyutları 53 mm çap ve uzunluğun genişliğe oranı 2:1 olarak seçilmiştir. Tek eksenli basınç mukavemeti deney sonuçlarından, kür edilen karışımın kabarma faktörü ve fiziksel özellikleri arasında elde edilen bir çok ilişki kanıtlanmıştır.

Stavridakis and Hatzigogus (1998) tarafından yapılan çalışmada likit limite göre ufalanma derecesinin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Böyle bir sınıflandırma ile, stabilizasyon kalitesi veya kullanılan çimento miktarı zeminin likit limitinin bulunması ile belirlenebileceği gösterilmiştir. Makalede ufalanma mukavemetinin, likit limit ve killi karışımın serbest basınç mukavemeti ile ilişkisi incelenmiştir. Killi zeminlerinin en önemli bileşenlerinden olan kaolinit, montmorillonit ve quartz killi karışımı oluşturmak için birleştirilmiştir. %45'lik ufalanma değeri belirlenen güvenli stabilizasyon için önerilmiş ve bu değere killi karışımlara %4-12 arasında çimento ilavesi ile ulaşılmıştır. Likit limiti %60'ın üzerinde olan killi karışımlarda, istenilen değere ekonomik olmayan (>%12) çimento ilavesiyle ulaşılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına dayanılarak korelasyon, serbest basınç mukavemeti ile ufalanma mukavemeti arasındaki ilişki kadar ufalanma mukavemeti ile likit limit arasındaki ilişkiden elde edilmiştir. Çalışmada %45'lik ufalanma değerinin iyi bir stabilizasyon için yeterli olduğu önerilmiştir.

Temiz ve Karakeçi (2002) tarafından hazırlanan makalede yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve silis dumanı mineral karışım olarak kullanılmış, bu karışımın çimento hamurunun mikro yapısına olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmada araştırmalar x-ray diffraction ve tarayıcı elektronik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve silis dumanının reaksiyonu sonucu yeni bir kalsiyum-silikat-hidratasyon oluşumu araştırılmıştır.

Toumbakari *et al* (1999) tarafından yapılan çalışmada mekanik ve ultrasonik karıştırıcılar olmak üzere iki farklı karıştırma yöntemi çalışılmıştır. Kireç, doğal ve yapay puzolanlar gibi maddelerin ilavesiyle yapılan çimento karışımlarında, çok ince

boşlukların doldurulması söz konusu olduğunda, süper akışkanlaştırıcıların enjekte yapabilmek için yeterli olmadığı görülmüştür. İyi enjekte edilebilirliği elde etmek sadece kullanılan malzemelerin en büyük çaptaki taneciklerine bağlı olmadığına dikkat çekilmiştir. Süspansiyondaki ince malzemelerin taneler arası bağlantılardan dolayı kolayca topaklanmaya sebep olduğu ve süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasının da, taneler arasındaki polimerlerin tutunma kuvvetlerinden dolayı itici kuvvetlerin oluşmasına izin verdiği belirtilmiştir. Bu durumun silis dumanı ve kireç gibi çok ince malzeme içeren karışımlarda yeteri kadar belirgin olmadığı açıklanmıştır. Harçlarda, enjekte kabiliyetini elde etmek için, ya karışımın su miktarının artırılacağı (bu katılmış karışımın mekanik özelliklerini ve süspansiyon stabilitesini olumsuz yönde etkileyecektir) ya da karıştırma yönteminin topaklanmayı önleyici şekilde olması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda;

- Yüksek devirli karıştırma yönteminin topaklanmayı önlemede yeterli olmadığı için, ince malzemeler ve çimento karışımından oluşan karışımların penetrabilitesinin tam olarak belirtilemediği görülmüştür.
- Ultrasonik karıştırma yönteminin, sınırlı S/K oranında yüksek penetrabiliteye sahip karışımların oluşmasına müsaade ettiği görülmüştür.

Tsingos (2000) enjeksiyon çalışmalarının aşağıdaki bazı önemli projelerin yapımında dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu projeler;

- Tünel kazısı süresince zayıf zeminin mukavemeti ve oturması
- Beton ve toprak barajlar için perde enjeksiyonu
- Zemin oturmalarını kontrol etme
- Mevcut yapıların su sızdıramazlığı
- Zararlı durumların yayılmasını önleme
- Temel taban formasyonu
- Eski baraj ve tünellerin yeniden açılması

olarak sayılabilir.

Vik *et al* (2001) kimyasal enjeksiyon denemelerinin sağlık, çevresel ve fonksiyonelliğini araştırmak için tasarımlar yapmıştır. Çalışmada çevresel etkilerin

anlaşılmasının çok önemli olduğu belirtilmektedir. Bu araştırmada enjeksiyon denemelerinde akrilik asit, metaakrilik asit ve di-n-butyl phthalate kimyasalları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kimyasalların çevresel sonuçlarının araştırılması ve sistematik planlar oldukça olumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

Vipulanandan and Krizek (1986) tarafından yapılan çalışmada enjeksiyonlu kum, karışımın hem adhezyon hem de kohezyon özelliklerini gösteren iki aşamalı örnek olarak düşünülmüştür. Araştırmada adhezyon deneyleri, gerilme, kesme ve karışık yüklemeler altında, ara yüzey bağlarını değerlendirmek için kullanılmış ve mevcut modeller, kırılma mekanizmasını ve bunların basınç-gerilme ilişkisinin nasıl olacağını araştırmak için kullanılmıştır. Bağ mukavemetinin, Mohr-Cloumb Kırılma Kriteri ile tarif edilebileceği ve karışım ve enjeksiyonlu kum kırılması, Drucker-Prager Kriteri ile yapılabileceği tartışılmıştır.

Zebovitz *et al* (1989) orta ve ince kumların içerisine enjeksiyon için kullanılan kimyasal enjeksiyon karışımlarının zehirliliği ve çevreye verdiği zararları nedeniyle, alternatif olarak oldukça ince çimento karışımını incelemişlerdir. MC 500 çimentosu ve diğer çimentolar enjeksiyon karışımında kullanılmış ve bu enjeksiyon karışımları ince kum içerisine enjekte edilerek, enjekte edilmiş kum örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde çok ince çimento ile yapılan enjeksiyon karışımlarının kimyasal karışımlara alternatif olarak daha çevreci ve güvenli olduğu ve çok ince çimentoların kullanılması ile enjekte edilmiş ince kum zemin alanlarını artırabileceği gösterilmiştir.

Xinghua and Quging (1998) priz süresi ve ucuz enjeksiyon karışım malzemesinin etkilerini araştırmıştır. Bu enjeksiyon karışımının özel bir yanı hızlı bir şekilde enjeksiyon yapılabilmesidir. Enjekte edilebilme süresi kavramının, bu özellik ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Bilinen çimento enjeksiyonu ile ucuz enjeksiyon karışımı ile yapılan enjeksiyon deneylerinden elde edilen sonuçları karşılaştırılıp tartışılmıştır. Çalışmada priz süresi ve priz süresine etki eden faktörler ile çimento içeriğinin ve karışım viskozitesinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda:

- Ucuz enjeksiyon karışımı malzemesi, yüksek su absorpsiyonu, mükemmel reolojik davranışı ve su ile seyreltmeye karşı dayanıklılığı gibi bir çok avantaja sahip olduğu ve enjeksiyon mühendisliğinde, yeraltı su akışı olan yerlerde, çimento enjeksiyonu yerine kullanılabileceği gösterilmiştir.
- Ucuz enjeksiyon karışımının priz süresinin kısa ve ayarlanabilir olması, son priz süresinin uzun ve ilk mukavemet kazanma süresinin geç olması nedeniyle, enjeksiyon etkisini artırmak için, ucuz enjeksiyon karışımının tekrar-tekrar enjekte edilebileceği anlaşılmıştır.
- Çimento miktarının artmasının priz süresini kısalttığı ve ucuz enjeksiyon karışımının plastik mukavemeti artırdığı belirlenmiştir.



2- KURAMSAL TEMELLER

2.1. Zeminin Enjeksiyonu

Düşük mukavemete veya yüksek geçirimliliğe sahip zeminler, temel zemini olarak kullanımı için veya kazı projeleri için arzu edilen nitelikte olmayabilir. Kazı yapılan alan içerisinde oluşabilecek aşırı sızıntılar sorun doğurabilir ve yapının ilerlemesini kısıtlayabilir. Mekanik anlamda çeşitli iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan birisi kötü zemini daha iyi kalitedeki sıkışmış diğer bir zeminle yer değiştirmektir. Bu tür tekniklerin basitliğine rağmen, mekanik yöntemler belirli durumlarda uygun değildir. Aşırı çalışma gürültüsü ve titreşimler, yakın çevre için sorun oluşturabilmektedir. Aynı zamanda bu yöntemler zaman ve maliyet sınırlamalarından dolayı da tercih edilmemektedir (Anonymous 1996). Enjeksiyon yöntemleri zemin iyileştirmesinde mekanik yöntemlere alternatif olarak sunulmaktadır.

Enjeksiyon bir katkılı stabilizasyon yöntemi olup, taneli zemin ortamı içine veya kayaların çatlaklarına enjeksiyon karışımının gönderilmesi ve bu karışımın boşluklarda sertleşerek ortama daha kararlı bir yapı kazandırılması işlemidir (Çinicioğlu 1997). Diğer bir deyişle boşlukların, çatlakların ya da gözeneklerin içerisine karışımların enjeksiyonu olarak veya zemin-çimento birleşimini oluşturmak için zemin içerisine yüksek basınçla çimento karışımlarının zerk edilmesi olarak tanımlanabilir (Kim 1998). Teknolojideki sürekli gelişim ve zeminin davranışı konusunda artan bilgi düzeyi, uygulama tipleri, şekilleri ve alanları bakımından enjeksiyon uygulamalarının giderek daha çok çeşitlenmesine sebep olmaktadır. Enjeksiyon uygulamaları, çoğunlukla geoteknik mühendisi, yapı mühendisi ve jeologların bir arada çalıştığı projelerde gerekmektedir. Bu konu, karışım hazırlama ve karışımın çevre üzerindeki kimyasal etkileri gibi yönleriyle de kimyagerler, kimya mühendisleri ve çevre mühendislerinin de ilgi alanları içine girmektedir. Enjeksiyonlar, geçirimliliği azaltma, mukavemeti artırma veya deformasyonu azaltma özellikleri gibi, maliyet ve uzun süre etkin olması açısından da oldukça dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Baraj gövdesi altında geçirimsizlik

oluşturmak, temel zemininin taşıma gücünü artırmak, diyafram duvarlar oluşturmak, ankraj çubuklarının çevresini doldurmak, evsel ve endüstriyel atık depoları oluşturmak başlıca enjeksiyon uygulamalarına örnek olarak verilebilir (Çinicioğlu 1997).

Enjeksiyon uygulamasının başarıyla yapılabilmesi, karışım malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin ve bunların zemine gönderilme yöntemlerinin her yönüyle ve karşılaştırmalı olarak bilinmesine bağlıdır. Ayrıca başarılı karışım enjeksiyonu uygulamasının ön şartlarından birisi de yeterli ve detaylı zemin etütlerinin yapılmış olmasıdır.

Enjeksiyon karışımları, başlıca süspansiyonlar ve kimyasal karışımlar olarak iki gruba ayrılabilir. Enjeksiyon süspansiyonlarında, değişik oranlarda, çimento, kil, kum, bentonit, silis dumanı, uçucu kül, akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Kimyasal karışımlarda ise çeşitli silikatlı maddeler su ile karıştırılarak kullanılmaktadır (Uzuner 1995).

Enjeksiyon teknikleri oldukça önemli yapıların devamlılığı için yararlı ömrü süresince veya yapımında ortaya çıkan problemleri çözmede oldukça yardımcı olmaktadır. Günümüzde üretim oranları ve enjeksiyon için uygulama teknikleri yaygın hale gelmiştir. Bu da insanların tasarım ve uygulama adımlarında daha özel sistemleri kolayca yapabilmelerine imkan tanımaktadır. Enjeksiyon işleminin bir çok yararları vardır. Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir:

- Hemen hemen çoğu zemin şartlarına uygulanabilir.
- Tesisat titreşime neden olmaz ve yapılarda hasarları gidermek için uygulanabilir.
- İyileştirilmiş zemin kütlelerinde, tahmin edilebilir veya ölçülebilir özellikleri sağlamak için tasarlanabilir.
- Uygulamada mevcut yapıda ilave edilemeyen bağlantıların yapılmasında çözüm olabilir.

2.1.1. Enjeksiyonun başlıca uygulama alanları

Giderek kullanımı ve kullanım alanları yaygınlaşan enjeksiyon işleminin başlıca uygulama alanları şunlardır.

- Baraj inşaatları
- Tünel inşaatları
- Ankraj çubuklarının sağlamlaştırılması
- Aşırı oturmaların önlenmesi için boşlukların doldurulması
- Su akışını durduracak veya azaltacak perde duvar oluşturulması
- Derin temel inşaatları
- Yanal zemin basınçlarının azaltılması
- Şevin kararlı olmasının sağlanması
- Zemin sıvılaşmasının önlenmesi
- Mevcut yapı altındaki temel zemininin güçlendirilmesi

2.1.2. Enjeksiyon karışımları

Genel bir kural olarak enjeksiyon karışımları iki sınıfa ayrılmaktadır (Çinicioğlu 1997). Bunlar;

Binghamian karışımları : Taneli süspansiyonlar oluşturan çimento bazlı enjeksiyon karışımlarıdır. Bu karışımlar tercih edildiğinde aynı zamanda, kimyasal açıdan normal çimento ile aynı özelliklere sahip fakat tane boyutu olarak oldukça küçük olan ince veya çok ince çimentoları da bu gruba dahil edilmektedir. Bu karışımlar düşük maliyet, kolay uygulanabilirlik ve yüksek elastisite modülü gibi olumlu yanları olmakla beraber sınırlı penetrasyon kapasitesi, kırılgan davranışı, uzun priz yapma süresi ve yıkanabilirliğin olmaması gibi olumsuz yanları da mevcuttur.

- a- **Saf çimento karışımları:** Çimento ve su karışımını içerir, kararlı bir karışım değildir ve uluslararası standartlara göre enjeksiyon karışımı olarak uygulanamazlar.

- b- Katkılı çimento karışımları:** Çimento, su ve akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcılar ile yapılan karışımlardır.
- c- Katkılı çimento karışımları:** Katkılı çimento karışımına ilaveten killeri ve diğer dolgu çeşitleri, ya puzolanik katkıları (silis dumanı, uçucu kül vb.), ya da puzolanik olmayan katkıları (mineral katkıları) dan oluşurlar.

Newtonian karışımları: Solüsyonları oluşturan kimyasal bazlı enjeksiyon karışımlarıdır. Bu karışımların yüksek penetrasyon kapasitesi, hızlı priz yapma ve düşük elastisite modülü gibi olumlu yanları olmakla beraber yüksek maliyet ve tecrübeli uygulamacılara ihtiyaç duyulması gibi olumsuz yanları da mevcuttur. Bu karışımlar; silika jelleri, fenolik reçineler, akrilikler, organomineral reçineler, poliüretan, su reaksiyonlu poliüretanlar ve epoksiler olarak sıralanabilir.

Enjeksiyon karışımlarında yapılması gereken standart deneyler aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Yoğunluk ölçümü
- Viskozite ölçümü
- Kohezyon ölçümü
- İlk priz alma süresinin ölçümü
- Kusma deneyleri
- Serbest basınç mukavemet deneyi
- Hızlandırılmış yaşlanma, eskime deneyleri
- Özel kimyasal ve/veya fiziksel çevre ile uyumluluğu

2.1.3. Enjeksiyon türleri

Enjeksiyon teknikleri karışımın zemin içine veriş şekline ve zemin yapısında sebep olacağı davranış değişiminin gerçekleşme tipine bağlı olarak sınıflandırılabilir. Buna göre belli başlı enjeksiyon tipleri aşağıdaki gibidir (Çinicioğlu 1997):

a- Penetrasyon enjeksiyonu: Bu işlem ile enjeksiyon karışımının zemin taneleri arasındaki boşluklara girmesi sağlanır. Zemin hacmini ve yapısını değiştirmeden yapılan bu enjeksiyon tipi, geçirimsizlik enjeksiyonu olarak adlandırılmıştır. İki tip penetrasyon enjeksiyonundan söz edilebilir.

- **Permeasyon enjeksiyonu:** Bu, zemin içerisindeki boşluklara açılan kuyu boyunca enjeksiyon uygulanarak yapılan işlemlerdir. Harç zemin tanelerini birleştirerek enjeksiyon yapılmamış formasyonlara nispeten kesme ve basınca daha yüksek mukavemetli formasyonlar elde edilmesini sağlar ve aynı zamanda boşlukları doldurarak zeminin geçirimsizliğini azaltır.
- **İntrüzyon enjeksiyonu:** Yarık ve çatlaklara karışımın girmesi sağlanarak, kesme ve basınca daha dayanıklı bir yapı elde edilir.

b- Yer değiştirme enjeksiyonu: Bu enjeksiyon yöntemi zeminin yer değiştirerek sıkışmasına ve sıkılaşmasına sebep olur. Uygulamanın yapılmasına göre iki tip sonuç elde edilebilir.

- **Kompaksiyon enjeksiyonu:** Yüzey altındaki zeminlerin içerisine kalın karışımın yüksek basınçla enjeksiyon edilmesi işlemidir. Harç, siltli kum veya siltli çakıllı kum, çimento ve pompalanmayı kolaylaştırmak için kil veya bentonit ilave edilmiş su karışımından oluşmaktadır.
- **Hidrolik çatlatma:** Kontrolsüz uygulama sonucunda zeminin içine büyük hızla giren karışım zayıf bölgelerde yapraklanmaya sebep olur. Bu olaya 'Hidrolik Çatlatma' adı verilir.

c- Jet enjeksiyonu: Jet enjeksiyonu, yüksek hız ve yüksek basınçlı çimento karışım jeti ile yapılır. Jet enjeksiyonunun genel uygulaması olarak, zemin içinde su jeti ile düşey bir delik açılır ve boşluklar çimento karışımı jeti ile doldurulur. Başka bir deyişle dönen bir uçtan verilen yüksek hızlı su jeti uygulaması ile parçalanmış zemine ağızlıklardan karışım püskürtülerek zeminin hem yer değiştirmesini hem de karışımla karışması sağlanır. Böylece temel zemini daha güçlü ve daha az geçirgen bir malzeme olan karışım zemin ile yer değiştirmiş olur. Yöntem, hem zeminin yer değiştirmesine hem de karışım malzemesinin zeminle karışmasına ve yer değiştirmesine sebep olduğu için yer

değişimi-malzeme değişimi uygulaması olarak tanımlanabilir. Uygulama alanları, yapı temelleri, kazı kaplamaları, zararlı atıkların muhafazası, yeraltı suyunun kontrolü, erozyondan korunma, şev stabilizasyonu ve değişik tünel ve geçitlerin duvarlarının desteklenmesini kapsamaktadır. Jet enjeksiyonu uygulamasının iki çeşit tekniği vardır. Bunlar;

- **Tek akışkanlı yöntem:** Tek akışkanlı yöntemde hem zeminin parçalanması, hem de karışım ile zeminin birleşmesi tek bir akışkan jeti ile yapılır.
- **Çok akışkanlı yöntemler:** Bu yöntemde, dönen bir uçtan verilen yüksek hızlı su jeti ile parçalanmış zemine yatay ağızlardan püskürtülen karışımın zemin ile karışması sağlanır.

d- Özel enjeksiyon teknikleri (Elektrikli enjeksiyon): Elektrikli enjeksiyon elektro-osmoz sırasında kimyasal maddeler ekleyerek, zeminin elektro kimyasal sertleşmesine sebep olan yöntemdir. Bu işlem sırasında kullanılan kimyasal malzemeler sodyum silikat veya kalsiyum klorür olabilir. Elektrik alanının etkisi altında bu kimyasal maddeler zeminin boşluklarına girerler, anottan (+) katot (-) istikametine doğru akarlar. Burada anot, aynı zamanda karışım enjeksiyon borusudur.

2.1.4. Enjeksiyon ile ilgili tanımlar

Enjeksiyon işlemi ile ilgili uygulama ve teoride geçen bir çok terim bulunmaktadır. Bu terimlerin iyice anlaşılması önemlidir. Enjeksiyon işlemi ile ilgili olan bazı terimler ve kısa açıklamaları aşağıda verilmiştir (Anonim 1999).

Dolgu enjeksiyonu: Tünel, galeri, denge bacası, shaft gibi yapılarda kaplama betonu ile temel kayası arasındaki boşlukları ve göçük boşluklarını doldurmak amacı ile yapılan enjeksiyondur.

Temas enjeksiyonu: Beton ile çelik kaplama ara yüzeyindeki muhtemel boşlukların doldurulmasıdır.

Derz enjeksiyonları: I. ve II. faz betonları arasına yerleştirilen enjeksiyon kutusu ve buna bağlı enjeksiyon gidiş dönüş borularını ihtiva eden bir sitemden yapılan tıkaç veya kutu enjeksiyonudur.

Ankraj enjeksiyonu: Ankraj çubuklarının montajı sırasında çelik çubukları temel kayasına tutturmak için yapılan enjeksiyondur.

Bulon enjeksiyonu: Bulonların montajından hemen sonra yapılan enjeksiyondur. Bu sayede bulonun temel kayasına tutturulması temin edilir.

Konsolidasyon enjeksiyonu: Tünel, galeri, denge bacası veya herhangi bir yapının oturacağı temel kayasının sağlamlaştırılması ve çatlaklar ile boşlukların doldurulması amacı ile yapılan enjeksiyondur.

Kapak enjeksiyonu: Perde kuyularının memba ve mansabında en az birer sıra halinde ve uygun görülen derinliklerde, kazı sırasında bozulan dolgu altı zonunun enjeksiyonudur.

Perde enjeksiyonu: Baraj gövdesinin altında, baraj göl suyunun sızmasını önlemek ve başka yapılarda da suyun gelmesini önlemek veya sızma boyunu uzatmak amacı ile yapılan enjeksiyondur.

Alüvyon enjeksiyonu: Sızdırmazlık veya sağlamlaştırma gayesi ile taneli zeminlerde yapılan enjeksiyondur.

Kademe: Enjeksiyonu yapılacak herhangi bir deliğin iyi bir şekilde enjeksiyonunu yapabilmek amacı ile, delik kısa aralıklar halinde bölünür ve her biri ayrı ayrı enjekte edilir. Bu enjekte edilen bölümlere kademe denir.

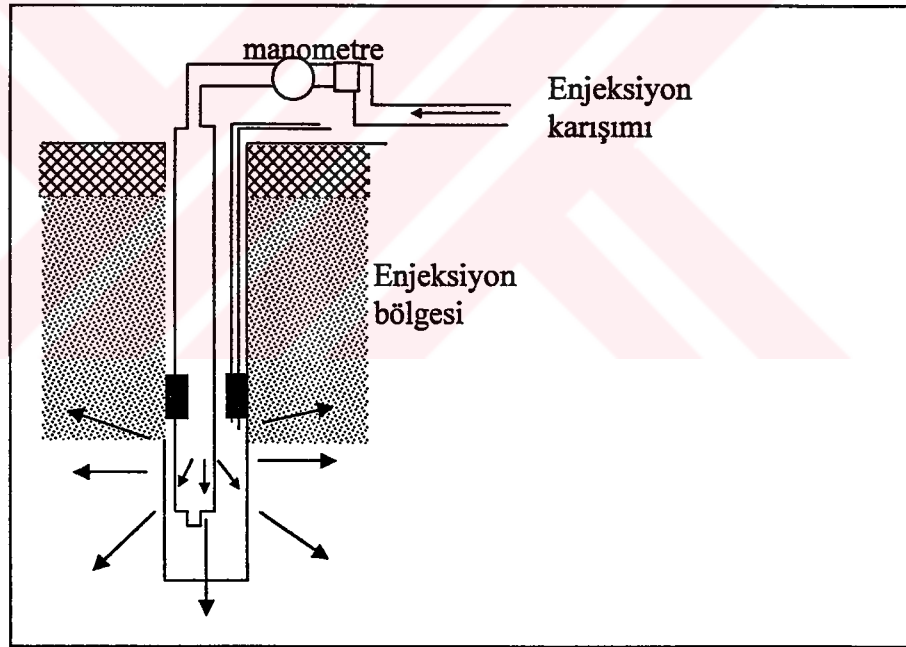
Ano: Enjeksiyon işlemleri ano sistemine göre yapılır. Enjeksiyonu yapılacak eksen 24 m lik parçalara bölünerek anolar tespit edilir ve çalışma koşullarına uygun birbirine yakın en az üç ano ele alınarak enjeksiyona başlanır.

Enjeksiyon Basıncı: Kademe orta noktasında uygulanması istenen basınçtır.

Manometre Basıncı: Enjeksiyon basıncını elde etmek için kuyu başı manometresinde okunması gereken basınçtır.

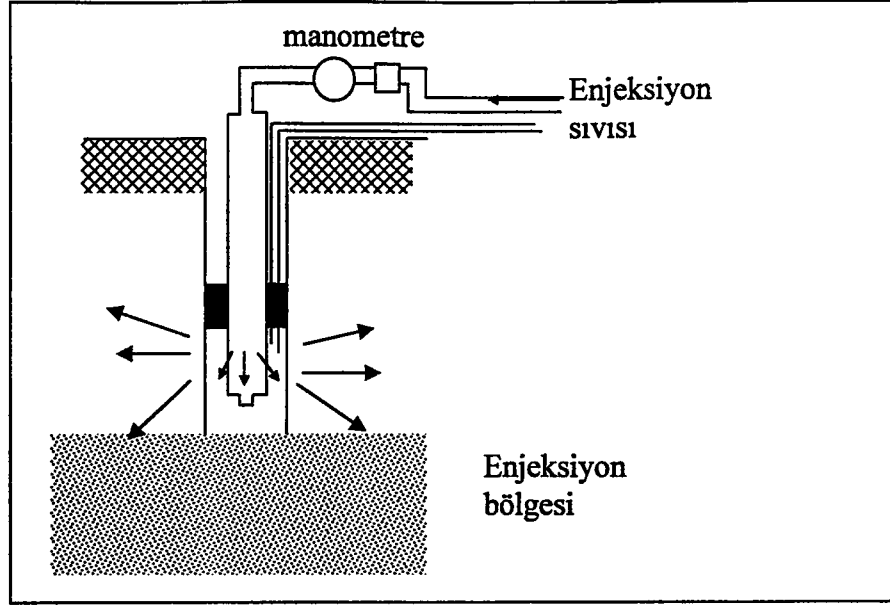
2.1.5. Arazide enjeksiyon uygulamaları

a- Yukarıdan aşağı doğru inen kademeler yöntemi ile enjeksiyon: Başlangıçta enjeksiyon kuyusu kademe boyu kadar delinir, yıkanır, basınçlı su deneyi ve enjeksiyonu yapılır. Çimento tam priz almadan enjeksiyon kuyusu yıkanır ve takım dışarı alınır. Enjeksiyon kuyusunu çevreleyen kayadaki şerbet prizini aldıktan sonra, aynı enjeksiyon kuyusunun ikinci kademesi delinir ve bir yukarı kademe yapılan işlemler tekrarlanır. Benzer şekilde enjeksiyon kuyusunun son kademesine kadar işlemlere devam edilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Yukarıdan aşağı doğru inen kademeler yöntemi ile enjeksiyon

b- Aşağıdan yukarı doğru çıkan kademeler yöntemi ile enjeksiyon: Bu metotta enjeksiyon kuyusu projede belirtilen derinliğe kadar delinir, yıkanır ve her kademe basınçlı su deneyi yapılır. Bundan sonra tıkaç en alttaki kademe enjekte etmek üzere yerleştirilir ve alttaki kademenin enjeksiyonu yapılır. Sonra tıkaç, bir üstteki kademe enjekte etmek üzere yukarıya alınır ve alttan yukarıya doğru ikinci kademenin enjeksiyonu yapılır. Bu işleme zemin yüzeyine kadar devam edilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Aşağıdan yukarı doğru çıkan kademeler yöntemi ile enjeksiyon

c- Çok safhalı enjeksiyon: Bu metotta enjeksiyon kuyusu projede belirtildiği üzere delinirken enjeksiyon kuyusunda yıkıntı oluyor veya devridaim suyunun %70 veya daha fazlası kaçıyor, delme işi durdurulur ve bu bölgelere lastik tutturulup enjeksiyonları yapılır. Priz süresi sonunda enjeksiyon kuyusu delme işlemine devam edilir. Aynı durumlar tekrar ortaya çıkarsa delme işlemi durdurulup o kısımlarda da enjeksiyon yapılır. Enjeksiyon kuyusunun proje derinliğine kadar delme işlemi bittikten sonra, aşağıdan yukarıya doğru kademeler metodu ile enjeksiyonu yapılır.

2.1.6. Enjeksiyon karışım malzemelerinin sınıflandırılması

Enjeksiyon işleminde karışım yapımında yaygın olarak kullanılmakta olan malzemeler şu şekilde sıralanabilir.

A- Portland Çimentoları:

Çimento enjeksiyonlarında ana karışım maddesi olarak tüm dünyada kullanılan en yaygın ve en çok bilinen çimento, portland çimentolarıdır. Bunlar:

- **Tip I portland çimentosu:** Enjeksiyon uygulamalarında özel bir çimento istenilmediği durumlar hariç en yaygın olarak kullanılan genel amaçlı çimento olarak kabul edilmektedir.
- **Tip II portland çimentosu:** Sülfat saldırılarına karşı dayanıklı çimento olarak üretilmektedir. Tip I e nazaran hidrasyon ısı oranı daha yavaştır.
- **Tip III portland çimentosu:** İki hafta veya daha az sürede erken mukavemet elde etmek istenildiği durumlarda kullanılır. Tane boyutları diğer çimentolara göre daha küçüktür.
- **Tip IV portland çimentosu:** Tip II ye göre daha düşük ısıda hidrasyonu gerçekleşir ve tip I e göre daha kısa zamanda mukavemet kazanır.
- **Tip V portland çimentosu:** Aşırı sülfat etkisine maruz kalan enjeksiyonlar için üretilmektedir. Zemin veya yer altı suyunda yüksek oranda sülfat olması durumlarında kullanılır.
- **Hava katkılı portland çimentosu:** IA, IIA ve IIIA olmak üzere üç sınıfı mevcuttur. Bunlar sırasıyla Tip I, Tip II ve Tip III ün bileşimleriyle uygunluk göstermektedir. Bu çimentolarda az miktarda hava katkı malzemesi bulunmaktadır. Genellikle bu çimentolar enjeksiyon aşırı donma ve çözölmeye maruz kaldığı durumlarda kullanılır. Normal şartlarda enjeksiyonda nadiren kullanılırlar.

Farklı tipteki portland çimentolarının bileşimleri çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı tipteki portland çimentolarının bileşimleri (Neville 1995)

Çimento	Değer	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	Serbest CaO	MgO	Kızdırma Kaybı
Tip I	Mak.	67	31	14	12	3.4	1.5	3.8	2.3
	Min.	42	8	5	6	2.6	0.0	0.7	0.6
	Ort.	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4	1.2
Tip II	Mak.	55	39	8	16	3.4	1.8	4.4	2.0
	Min.	37	19	4	6	2.1	0.1	1.5	0.5
	Ort.	46	29	6	12	2.8	0.6	3.0	1.0
Tip III	Mak.	70	38	17	10	4.6	4.2	4.8	2.7
	Min.	34	0	7	6	2.2	0.1	1.0	1.1
	Ort.	56	15	12	8	3.9	1.3	2.6	1.9
Tip IV	Max.	44	57	7	18	3.5	0.9	4.1	1.9
	Min.	21	34	3	6	2.6	0.0	1.0	0.6
	Ort.	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7	1.0
Tip V	Max.	54	49	5	15	3.9	0.6	2.3	1.2
	Min.	35	24	1	6	2.4	0.1	0.7	0.8
	Ort.	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6	1.0

B- Puzolanlar:

1. **N sınıfı puzolanlar:** Doğal puzolanların işlenmemiş veya toz haline getirilmiş halidir. Tüfler, volkanik küller, diatomit topraklar vb.

2. **F ve C sınıfı Puzolanlar (Uçucu küller):** F sınıfı puzolan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ dir. Antasit veya bitümlü kömürden üretilen uçucu küller bu sınıfa girmektedir. Sadece puzolanik özelliği vardır. C sınıfı puzolanlar: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ dir. Linyitten veya subbitiminous kömürden üretilen uçucu küller bu sınıfa girmemektedir. Kireç özelliği %10'dan fazla olabilir. Puzolanik ve bağlayıcı özelliği vardır. Uçucu küllerin tane şekli, dağılımı, inceliği ve yoğunluğu, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkileyen fiziksel özellikleridir. Uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretildikleri yere göre büyük ölçüde değişir. Uçucu külün inceliğinin, puzolanik aktivite hızı ve betonun performansı üzerine dikkate değer bir etkisi olmasına rağmen, fiziksel özellikleri, kimyasal özelliklerine göre taze betonun performansı üzerinde daha büyük etkisi vardır. Çizelge.2.2'de uçucu külün kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge.2.2. Uçucu külün kimyasal özellikleri (Erdoğan, 1997)

Kimyasal Özellikler	F Sınıfı (<%10 CaO)	C Sınıfı (>%10 CaO)
SiO_2	43,6 – 64,4	23,1 – 50,5
Al_2O_3	19,6 – 30,1	13,3 – 21,3
Fe_2O_3	3,8 – 23,9	3,7 – 22,5
CaO	0,7 – 6,7	11,5 – 29,0
MgO	0,9 – 1,7	1,5 – 7,5
Na_2O	0,0 – 2,8	0,4 – 1,9
Kızdırma kaybı	0,4 – 7,2	0,3 – 1,9

3. **Silis dumanı:** Son senelerde, bir çok kuruluş, çimento ve beton endüstrisindeki enerji tasarrufunu amaçlayan araştırmalarla daha çok ilgilenmeye başlamıştır. Bu ise uçucu kül gibi bağlayıcı özelliği olan maddelerin kullanımının desteklenmesi ile sağlanmıştır (Türkmen 2002). Silis dumanının genellikle SiO_2 içeriği %86'dan fazla, Al_2O_3 , CaO ve Na_2O içeriği %1'den düşüktür. Silis dumanının kimyasal içeriği üretildiği malzemenin tipine göre değişir. Silikon metalinden üretilen silis dumanının genellikle demir ve magnezyum oranları daha yüksektir (Erdoğan 1997).

Çizelge.2.3. Silis dumanının kimyasal özellikleri (Erdoğan 1997)

İçerik	Ağırlık olarak %
SiO ₂	93 – 95
C	0,8 – 1,0
Fe ₂ O ₃	0,4 – 1,0
Al ₂ O ₃	1,0 – 1,5
CaO	0,1 – 0,4
MgO	0,6 – 1,0
Na ₂ O	0,5 – 1,0
K ₂ O	0,1 – 0,3
Kızdırma kaybı	0,5 – 1,0

C- Katkı maddeleri:

1- Hızlandırıcılar: Enjeksiyon karışımlarında en çok kullanılan priz süresini hızlandırıcı kalsiyum klorür (CaCl₂) dür. Genellikle çimento ağırlığının %2 kadar kullanılırsa etkilidir. Soğuk havalarda enjeksiyon karışımının hızlı priz almasını sağlar ayrıca sülfat atakları ve alkali-sülfat reaksiyonuna karşı koruma sağlar.

2- Geciktiriciler: En yaygın priz süresini geciktiriciler organik kimyasallardır. Bunlar lignosülfanik asit tuzları, hidroksil katılmış karboksil asit tuzları veya bunların türevleridir.

3- Su azaltıcılar: Bu katkı malzemesi akışkanlığı artırarak pompalanabilirliği artırmakta ve karışım suyu miktarını azaltarak mukavemeti artırmaktadır.

4- Alüminyum tozları: Çimento enjeksiyonlarında büzülmeyi düzenlemek veya enjeksiyon karışımının plastik hali süresince kabarma miktarını düzenlemek amacıyla kullanılırlar.

5- Akışkanlaştırıcılar: Erken katılaşmayı sağlamak, süspansiyonda ince taneciklerin yukarı çıkmasını engellemek ve priz yapma süresince kabarma miktarını düzenlemek amacıyla kullanılırlar.

D- Doldurucular:

Doldurucular enjeksiyonda çimentonun değişik miktarlarda yerine kullanılan çeşitli malzemelerdir.

1- İnce mineral doldurucular: Kaya tozu, kil, bentonit, uçucu kül, silt, diatomit, pomza, barit gibi malzemelerdir.

2- Kaba doldurucular: Sıradan kumlar en yaygın olarak kullanılan kaba filler malzemesidir

3- Mineral doldurucular:

4- Uçucu kül:

5- Diatomit: Fosillerden oluşmaktadır.

6- Pumicit: Volkanik kül, tuf ve pomzanın ezilerek toz haline getirilmesi ile elde edilir.

7- Bentonit: Montmorillonit sodyum bazlı kildir. Pompalanabilirliği iyileştirmek, büzülmeyi azaltmak ve kusmayı önlemek için kullanılır.

8- Barit: Doğal olarak oluşan baryum sülfattır.

E- Karışım Suyu:

İçilebilir olarak kabul edilen sulardır.

2.1.7. Enjeksiyon karışımı çeşitleri

Enjeksiyon karışımları süspansiyonlar, emülsiyonlar ve solüsyonlar olmak üzere üçe ayrılırlar.

a- Süspansiyonlar: Küçük katı taneciklerin sıvı ortam içerisinde dağıtılması ile oluşturulurlar. Örneğin, su içinde dağılmış çimento ve kildir (Bentonit ve bazen kum da kullanılabilir). Çimento karışımı bu gruba girer.

b- Emülsiyonlar: Sıvıların çok küçük kolloidal sıvı damlaları halinde dağılması ve karışması ile oluşmuşlardır. Örneğin, bitüm ve su emülsiyonu. Köpükler karışım malzemesine gaz emdirilmesi ile oluşturulan özel emülsiyon tipleridir.

c- Eriyikler: İki veya daha çok fazlı maddenin moleküler karışımı ile oluşmuş homojen karışımlardır. Solüsyonların içinde taneler yoktur, rijitlikleri sıfırdır. Genel olarak kimyasal karışımlar adını alırlar. Eriyikler kendi aralarında iki gruba ayrılırlar

a- Kolloidal eriyikler: Silika veya lignokrom jel

b- Saf eriyikler: Fenolik ve akrilik reçineler, aminoplastlar

2.1.8. Enjeksiyon karışımının seçimi

Littlejohn (1985) tarafından belirlenen ve enjeksiyon karışımının seçiminde etkili olabilecek hususlar şunlardır;

- Özellikle geçirimlilik ve porozite bakımından zemin araştırmalarının kapsamı ve yeterlilik derecesi,
- En uygun enjeksiyon yönteminin seçimi ve enjeksiyonun uygulandığı sondaj deliğinin tip ve şekli,
- Karışım malzemesinin çeşitlilik derecesi ve bulunabilme olanağı,
- Viskozite, karışımın zamana ve ısıya karşı duyarlılığı,
- Karışımın arazideki stabilitesi ,
- Uygulama sırasında zeminin uygunluk derecesi, karışımdaki kurumanın etkisi ve risk derecesi,
- Yeraltı suyunun kimyasal bileşimi,
- Karışımın arazideki uygulama sırasındaki dayanıklılık özelliği,
- Karışımın zehirleyici etkisi ve kimyasal bileşenlerinin çevre ve ekipman bakımından incelenmesi,
- Enjeksiyonlu zeminin kalıcı geçirimliliği veya mukavemeti,
- Sistemin işleyişinin iyi hale getirilmesi bakımından arazide sağlanan kontrol ve danışmanlık hizmetlerinin yeterlilik derecesi,
- Uygulama için gerekli malzemelerin temini, karıştırma ve enjeksiyon vs. işlemlerini kapsayan maliyet analizi ile toplam maliyetin belirlenmesi.

2.1.9. Enjeksiyon karışımlarının reolojisi

Sıvı malzemelerin akışkanlık özelliklerini ele alan çalışmaların bütünü reoloji adı altında ifade edilir. Karışımların reolojik davranışını belirleyen başlıca özellikler karışımların dengesi, katılaşma süresi ve viskozitesidir. Bunlara ilave olarak yoğunluk, süspansiyonların tane çapı ve enjeksiyonlu zeminlerin nihai mukavemeti gibi özellikler mühendislik çalışmaları bakımından önemlidir.

a- Stabilité: Harç enjeksiyonu sırasında karışımın ulaşması için tasarlanan mesafe boyunca karışımın içindeki taneler süspansiyon içinde kalıyorsa bu tip karışımlara dengeli karışım adı verilir. Tersine olarak, karıştırıcıda harekete geçirildikten hemen sonra veya borulardaki türbülans etkisinden kurtulur kurtulmaz çökelme başlıyorsa bu tür karışımlara dengesiz karışım adı verilir. Çökelme özellikle süspansiyonların dengesi bakımından kritik bir davranıştır. Örnek olarak saf çimento karışımında (Dengesiz karışım grubundadır), taneler ancak mikser etkisiyle ve borudaki türbülansla süspansiyonun içerisinde tutulabilir. Bu sebeple boruda yeterli türbülans seviyesini koruyabilmek için boru çapları genellikle 25 mm civarındadır, aksi takdirde borularda çimento birikir. Ancak çökelme bütün karışım tiplerinde görülen bir özelliktir. Bazı mühendisler, karışımındaki sıvı ve katı taneciklerin ayrışmasını terleme terimi ile ifade etmeyi yeğlemektedirler. Benzer bir olay süzme terimiyle tanımlanmaktadır. Süzme olayında karışımın sıvı bileşeni zemin veya kaya içerisinde oldukça uzak mesafelere ulaşabilirken, katı tanecikler hedeflenen uzaklıklara varamadan çökelmektedirler.

Bir süspansiyonun dengeli olma özelliği basit bir laboratuvar deneyi ile tayin edilebilir. Bunun için derecelenmiş bir kap içerisindeki karışım önce iyice karıştırılır ve sonra dinlenmeye bırakılır. Süspansiyon içerisindeki taneler çökdikten sonra içinde tanecik bulunmayan su kolonu yüksekliği başlangıçtaki numune yüksekliğinin yüzdesi olarak ifade edilir ve bu değere terleme değeri adı verilir. Saf çimento karışımlarının terleme değerleri yüksektir ve dolayısıyla dengesiz özelliktedirler. Çimento karışımının dengeli olma özelliğini artırmak için bentonit kullanılabilir, aynı zamanda yüksek hızla karıştırmak dengeli olma özelliğini arttıran etkenlerdendir.

b- Katılaşma Süreci: Enjeksiyonlu zeminin mukavemetinin artması için ve yer altı suyunun basıncıyla karışımın zeminden uzaklaştırılmasının engellenmesi için karışımlar, uygulamadan sonra belli bir süre içerisinde katılaşacak şekilde tasarlanırlar. Bir karışımın katılaşması için gereken süreye katılaşma süresi adı verilir, fakat bu devre içerisinde oluşan gelişimi de kapsayabilmesi bakımından katılaşma süreci ifadesi tercih edilmiştir. Katılaşma süreci vicat iğnesi aleti ile belirlenmektedir.

Katılaşma süreci, çimento tabanlı karışımlarda kullanılan katkı maddelerine bağlı olarak 4 saatten 24 saate varan bir süre içerisinde olur. Katılaşma süreci özellikle kimyasal karışımlar için jel oluşum süresi veya jelleşme süresi adıyla da ifade edilir.

c- Viskozite: Viskozite sıvının kayma etkisine karşı direnç göstermesini sağlayan özelliğidir. Borularda ve zemin boşluklarında karışımın akışını kontrol eden iki önemli reolojik özellik viskozite ve rijitliktir. Bu özelliklerden viskozite değeri azaldıkça karışımı zemine enjekte etmek için uygulanması gereken basınç azalır, küçük boşluklara nüfus eder ve daha uzun mesafelere gider, diğer taraftan viskozite arttıkça karışımın zemin içinde kat ettiği mesafe kısalmış ve büyük boşluklara nüfus eder (Huang 2001).

Bir uygulama alanında kullanılan karışımın viskozitesini ölçmek için basit bir yöntemden yararlanılabilir. Bunun için standart boyutlarda bir huni kullanılır ve belli miktarda sıvının bu huniden akması için gereken süre ölçülür. Bu bakımdan en çok kullanılan Marsh Konisidir. Marsh Konisinden ilk 1000 ml'lik karışımın akması için gereken süre saniye cinsinden kaydedilir. Bulunan değer Marsh viskozitesi olarak adlandırılır. Temiz su ile bu süre 27-28 saniye ve dengeli bir karışım için 40 saniyedir.

Lombardi (1985) Marsh konisi ile sadece viskozitenin değil, daha ziyade bir grup reolojik özelliklerin ölçüldüğünü ifade ederek, Marsh Konisi sonuçlarının görünen viskozite olarak tanımlanması gerektiğine dikkat çekmiştir. Sonuçta ideal bir karışımda aranan özellikler düşük viskozite, kontrol edilebilir katılaşma süresi ve zeminde istenilen noktaya ulaştığında yüksek mukavemete sahip olmasıdır.

2.1.10. Enjeksiyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri

Farklı tekniklerle enjeksiyonlu zeminlerde arzu edilen iyileştirmelerin tam anlamıyla yapılmış olduğunu anlamak için, enjeksiyonlu zemine ait bir takım mühendislik bilgilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Aşağıda sıralanan maddeler, bu bilgilerin neler olduğunu kısaca vermektedir.

- Karışım enjeksiyonunun zeminde oluşturduğu değişikliklerin değerlendirilmesi

- Enjeksiyonlu zeminde mukavemet
- Enjeksiyonlu zeminin geçirimsizlik özellikleri
- Enjeksiyonlu zeminde akma etkisi
- Enjeksiyon karışımının zeminden uzaklaştırılma direnci
- Enjeksiyonlu zeminin uzun süreli davranışı-dayanıklılık
- Enjeksiyonlu zeminin çevre sağlığı bakımından değerlendirilmesi
- Kaya zeminlerde karışım enjeksiyonunun etkisi.

2.1.11. Enjekte edilebilirlik

Her durum için uygun olan tek bir enjeksiyon çeşidi yoktur. Enjeksiyon karışımı seçiminde en önemli etken, tane çapının boşluk veya çatlak çaplarından daha küçük olmasıdır.

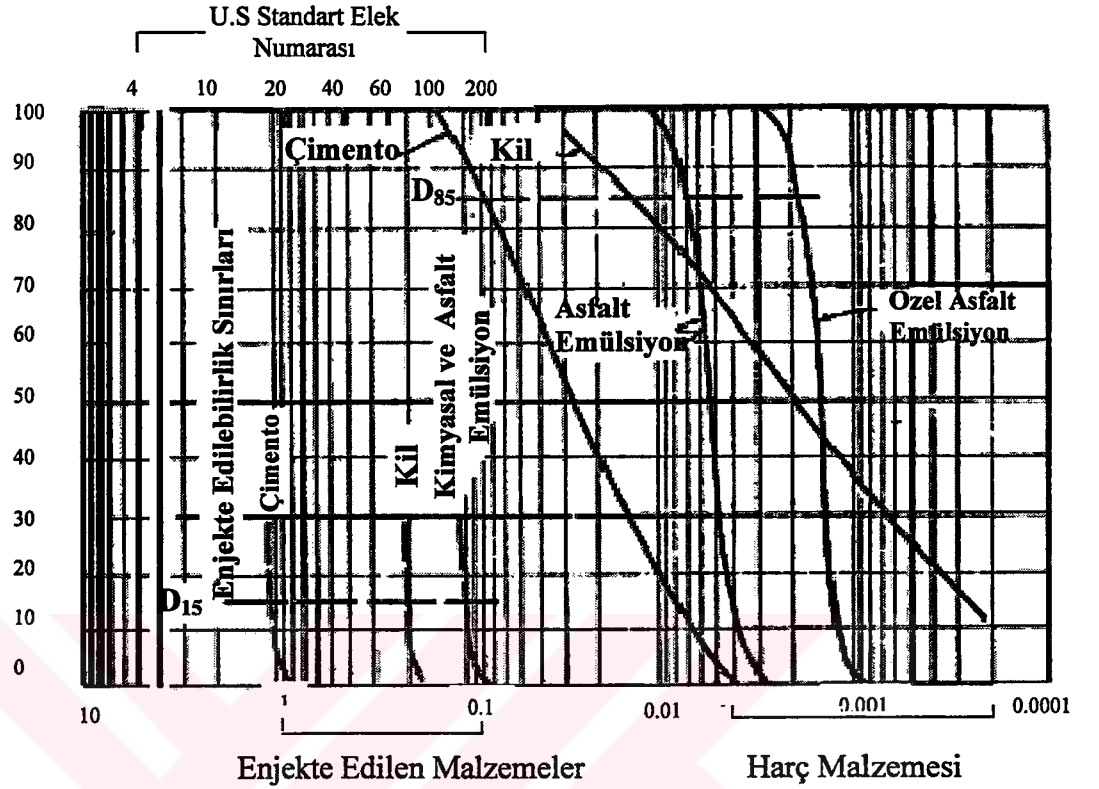
Enjekte edilebilirlik oranı, granular malzemenin içerisine katı süspansiyon karışımlarının enjekte edilebilirliğinin göstergesidir. D çimento, kum veya çakılın elekten geçen yüzde miktarı olmak üzere enjekte edilebilirlik (N) aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır (Anonymous, 1984).

$$N = D_{15}(\text{Zemin}) / D_{85}(\text{Harç}) \quad (2.1)$$

Burada; D_{15} , enjekte edilen zeminin ince tane boyutunun %15, D_{85} ise enjeksiyonun ince tane boyutunun %85 dir.

N'nin genelde 25'den büyük olması gerekir fakat bazı durumlarda enjeksiyon karışımı malzemesinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak 15'in altında da olabilir. Şekil 2.3 bu eşitliği grafik olarak göstermektedir. Bu grafikte;

- a) portland çimento, kil, asfalt emülsiyon ve özel shellperm asfalt emülsiyon enjeksiyonlarının tipik tane boyut eğrilerini,
- b) kumların enjekte edilebilir alt sınırları gösterilmektedir.



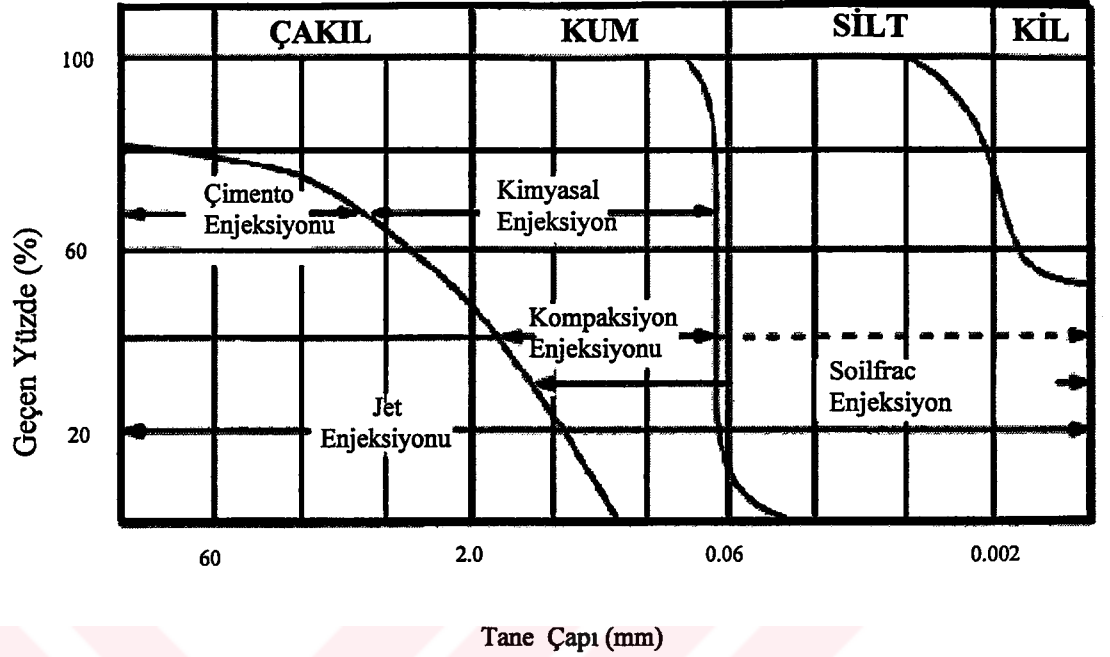
Şekil.2.3. Zemin ve enjeksiyon karışımı malzemelerinin tane-boyut eğrileri (Anonymous, 1984)

Ayrıca zeminlerde enjekte edilebilirlik için aşağıdaki eşitlikte kullanılmaktadır

$$N_c = D_{10}(\text{Zemin}) / D_{95}(\text{Harç}) \quad (2.2)$$

eşitliği de mevcuttur. Bu eşitlikte $N_c > 11$ ise enjeksiyon yapılabilir, $N_c < 6$ ise enjeksiyon yapılamaz.

Şekil 2.4 ise hangi zeminlere ne tür enjeksiyon yapılacağı hakkında bizlere pratik bilgi vermektedir.



Şekil.2.4. Değişik enjeksiyonlar için enjekte edilebilir tane boyut aralıkları

Diğer taraftan zeminin geçirimsizliği enjeksiyon yapıp yapılamayacağını belirleyen bir faktördür. Arazide yapılan geçirimsizlik deneyi laboratuvarda yapılan deneylerden daha doğru sonuçlar vermektedir. Laboratuvar deney sonuçlarında sistematik hatalar olmaktadır. Buna ilaveten örselenmemiş kohezyonsuz numune kolayca dağıldığı için, elde etmek oldukça zordur. Bu durumda arazi geçirimsizlik deneyleri daha doğru sonuçlar vermektedir. Değişik geçirimsizlik katsayılarına göre zeminlerin enjekte edilebilirlikleri aşağıdaki gibidir (Anonymous 1996).

$k=10^{-6}$ cm/sn ve daha aşağısı: enjeksiyon yapılamaz

$k=10^{-5}$ ile 10^{-6} cm/sn arasında: az miktarda enjeksiyon yapılabilir ve yüksek viskoziteler için enjeksiyon yapılamaz.

$k=10^{-3}$ ile 10^{-5} cm/sn arasında: orta derecede enjeksiyon yapılabilir.

$k=10^{-1}$ ile 10^{-3} cm/sn arasında: bilinen kimyasal enjeksiyon karışımları ile kolaylıkla enjeksiyon yapılabilir.

$k=10^{-1}$ cm/sn ve daha yukarısı: süspansiyonlar veya filler kullanılan kimyasal karışımlarla enjeksiyon yapılabilir.

2.2 Taguchi Yöntemi

2.2.1. Taguchi felsefesi

Bir deneyi veya bir ürünü etkileyen değişik parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerini araştırmak için çeşitli yaklaşımlar ve metotlar kullanılmaktadır. Başlıcaları tam faktoriyel tasarım ve kısmi faktoriyel tasarımıdır. Geleneksel yaklaşımda (tam faktoriyel tasarım), bir deneydeki bütün faktörleri kapsayan her koşuldaki deneyler yapılarak sonuçlar araştırılmakta ve değerlendirme yapılmaktadır. Parametre sayısının ve seviyelerinin az olduğu deneylerde tam faktoriyel deney tasarımı uygulanabilmektedir. Örneğin 3 parametrelili ve her parametrenin de 2 seviyeli olduğu bir deneysel çalışma için $2^3=8$ adet deney yapılması gerekmektedir. Bu durum zaman ve maliyet açısından uygulanabilecek bir deney tasarımıdır. 7 parametrelili ve 3 seviyeli bir araştırma için ise tam faktoriyel deney tasarımına göre $3^7=2187$ adet deney yapılması gerekmektedir. Bu sayı, zaman maliyet ve değerlendirme açısından uygulanması oldukça zor bir deney sayısıdır. Bu gibi durumlarda başvurulacak yöntemlerden birisi de kısmi faktoriyel deney tasarımıdır. Bu tasarımda bütün kombinasyonun oldukça küçük bir bölümü örnek olarak seçilip deneyler yapılmakta ve sonuçlar değerlendirilmektedir. Deneyler, seçilen bir grup üzerinde yapıldığı için gerçek durumu yansıtmayabilir. Ayrıca bu yöntemde, aynı deney tasarımı için seçilen farklı gruplarla farklı sonuçlar bulunabilmektedir.

Bazı deney tasarımlarında ise değişik parametreler arasındaki etkileşimler de araştırma sonuçlarını etkileyebilmektedir. Bir deneydeki parametreler arasındaki etkileşimler varyans analizleri (ANOVA) ile araştırılmaktadır. Tam faktoriyel ve kısmi faktoriyel deney tasarımlarında ve analizlerinde etkileşimler genellikle dikkate alınmamaktadır. Yukarıda kısaca açıklanan tam faktoriyel ve kısmi faktoriyel deney tasarımlarında mühendislik açısından bazı önemli dezavantajlar bulunmaktadır. Bunlar;

- Parametrelerin ve parametre düzeylerinin sayısının çok fazla olması durumunda deneylerin yapılması ve değerlendirme için uzun bir süre gerekmektedir. Ayrıca bu durum çalışmaların maliyetini de arttırmaktadır.

- Aynı çalışma için yapılan ikiden fazla tasarımlarda farklı sonuçlar elde edilebilmektedir.
- Bu tasarımlar normalde her faktörün sonuç üzerindeki etkilerini ayrı ayrı belirlemeye izin vermezler.
- Çok faktörlü ve çok seviyeli deneylerin yorumlanması da oldukça zor olabilmektedir.

Taguchi tarafından deney tasarımları için yeni bir iskelet ve disiplin geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından kolaylıkla uygulanabilen bu metot ile sonuçlara ulaşmak ve değerlendirmek standartlaştırılmıştır. Bu nedenle, aynı deneysel çalışma için iki farklı araştırmacı tarafından yapılan tasarımlarda benzer veriler ve benzer sonuçlar elde edilmektedir. Bu Yöntem kalite-kontrol amaçlı ürün üretimi ve parametre tasarımı için geliştirilmiş olmakla birlikte, oldukça farklı alanlar içinde uygulanmaktadır. Taguchi Yöntemi, deney sayısı çok fazla olan araştırmalarda büyük kolaylıklar sağlamak ve tam faktoriyel tasarıma alternatif olarak kullanılabilir. Taguchi felsefesi 3 basit temel kavram üzerine dayanmaktadır.

- Kalite üretim aşamasında tasarlanır ve bu süreçte kontrol edilmez.
- Kalite hedeften minimum sapma ile ulaşılan en iyi sonuçtur.
- Kalitenin maliyeti standart sapma fonksiyonu ile ölçülmeli ve kayıplar sistemden ölçülmelidir.

Taguchi'ye göre bir ürün öncelikle kendi yapısını oluşturan malzemelerden ve bulunduğu çevre koşullarından etkilenmektedir. Bu süreci ise kontrol edilebilen ve edilemeyen parametrelerin etkilediğini belirtmektedir. Taguchi tasarımı ile hedef değerler veya tahmin edilen değerler, kontrol edilebilen parametreleri ve seviyelerini içeren ortogonal diziler ile belirlenmektedir. Seçilen ortogonal dizini ile oldukça az sayıda deney veya çalışma yapılarak parametrelerin sonuca etkileri araştırılabilir. Ayrıca bu yöntem ile yapılmamış olan diğer deney sonuçları ile maksimum ve minimum değerler de tahmin edilebilmektedir. Taguchi yöntemi, son yıllardaki bilgisayar teknolojisindeki hızlı ilerlemelerin sonucunda, çeşitli bilimsel araştırmalarda (Rizzo 1994 and Jiang 1997), endüstri ürünleri tasarımlarında ve deney tasarımlarında

kullanılmaktadır. Taguchi Yöntemi hakkında daha detaylı bilgiler Roy (2001), Logothetis (1992) ve Şirvancı (1997) de bulunmaktadır.

2.2.2. Taguchi Yöntemi'nde deney tasarımı

Taguchi Yöntemi 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 Çalışmada da kullanılan $L_{16}(4^5)$ 5 parametrelili ve 4 seviyeli ortogonal dizisi çizelge 1'de verilmiştir. Çizelgedeki F1, F2, F3, F4 ve F5: çalışmada seçilen parametreleri, her deney numarası satırındaki rakamlar ise çalışmadaki parametrelerin seviyelerini göstermektedir.

Çizelge 2.4. Ortogonal dizin $L_{16}(4^5)$

Deney No.	Parametreler ve Deneylerin Yapılacağı Parametre Seviyeleri				
	F1	F2	F3	F4	F5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

Taguchi Yöntemine göre hazırlanmış olan bu ortogonal dizin tablosu L_{16} sembolü ile gösterilmektedir. 16 satırı ve maksimum 5 kolonu bulunmaktadır. Kolon sayısı parametre sayısına göre değişebilmektedir. Her satır, satırda gösterilen faktör seviyeleri

için yapılacak deney programını göstermektedir. Bu tablo ile 1024 deney yerine 16 deney yapılarak sonuçlar üzerinde değerlendirme yapılabilmektedir. Düşey kolonlar çalışma için belirlenmiş faktörlerin seviyelerini göstermektedir. Her kolonda dört adet 1. seviye, dört adet 2. seviye, 4 adet 3. seviye ve 4 adet 4. seviye olmak üzere toplam 16 adet seviye bulunmaktadır. Dört seviyeli 2 faktör arasında mümkün olabilen (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (2,1), (2,2), (2,3), (2,4), (3,1), (3,2), (3,3), (3,4), (4,1), (4,2), (4,3) ve (4,4) gibi 16 farklı kombinasyon bulunduğundan L16 deney tasarımı tablosu ortogonal olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle aynı çalışma için parametre numaraları farklı seçilerek farklı deneyler yapılmış olsa dahi, değerlendirmede aynı sonuçlar elde edilebilmektedir.

2.2.3. Taguchi Yöntemi'ne göre sonuçların analizi

Taguchi Yönteminde analizler; standart analiz ve S/N (signal to noise) analizi olarak iki şekilde yapılmaktadır. Analizler üç farklı amaç için yapılmaktadır. Bunlar:

- En iyi veya optimum durumun belirlenmesi
- Faktörlerin ayrı ayrı sonuca etkilerinin tahmin edilmesi
- Optimum koşullar altındaki davranışın tahmin edilmesi

S/N analizinde temel olarak değişim indeksi olarak bilinen S/N oranı kullanılmaktadır. Bu analiz S/N analizi olarak bilinmektedir. S/N analizleri sonuçlar içerisindeki değişkenlerden en doğru operating şartlarından belirlenirler. Deneylerdeki verilerin tekrarlanması ile S/N oranı belirlenmektedir. Bu değer ne kadar büyük ise hedef değer etrafındaki ürün değişimi o kadar küçülür. S/N değişim indeksinin kullanılmasının nedeni, deneylerin tekrarlanması ile dış koşulların veya kontrol edilemeyen değişkenlerin alınan sonuçlar üzerindeki etkisini görebilmektir. Bu etkiyi ortalama bir değerle temsil etmek yerine S/N ile temsil ederek alınacak sonucun hedef değer etrafındaki değişimi minimize ederek amaç fonksiyonunu belirlemektir. Taguchi Yönteminde kullanılan S/N oranı aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (2.3)$$

Burada MSD (Mean Square Deviation): Ortalama değerlerden ziyade hedef değer etrafındaki sapma karelerinin ortalaması olarak tanımlanmaktadır. MSD değeri hedef değer en büyük, en küçük ve optimum olması durumları için aşağıdaki bağıntılarla belirlenmektedir. Hedef değerin maksimum olması için:

$$MSD = \left(\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right) / n \quad (2.4)$$

Hedef değerin minimum olması için:

$$MSD = \frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{n} \quad (2.5)$$

Hedefin bilinen belirli bir değer olması için:

$$MSD = \left[\frac{(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + \dots + (Y_n - Y_0)^2}{n} \right] \quad (2.6)$$

Burada; $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$: deney sonuçları n : bir deneydeki tekrar sayısı. Y_0 : Bilinen belirli hedef değerdir. Bu yöntemle göre yapılmış bir deney tasarımında, optimum deney koşullarında beklenen hedef değerler ile deneylerin yapılmadığı durumlar için beklenen değerler (Y_{exp}) tahmin edilebilir. Bu değer, optimum koşullardaki faktör seviyelerinin ortalama S/N değerleri ve bütün tasarımın ortalama S/N değeri göz önüne alınarak belirlenmektedir

$$Y_{beklenen} = \sqrt{\frac{1}{MSD}} \quad (2.7)$$

Deney sonuçlarının güvenilirliğini ve parametrelerin sonuca etki derecelerinin belirlenmesi için analizler yapılmalıdır. Bunun için varyans analizi (ANOVA) olarak bilinen standart istatistiksel teknik kullanılmaktadır. Bu teknik ile veriler doğrudan analiz edilmez. Fakat verilerin değişkenliği belirlenmektedir. Sonuçların güven düzeyleri varyanstan ölçülmektedir. ANOVA analizi ile ortogonal dizinde bulunan her parametrenin sonuç üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan malzemeler, alındıkları yerler ve bazı özellikleri aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Deneylerde Ankara Set Çimento Fabrikasından temin edilen PÇ 42.5 katkısız portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler, malzemenin temin edildiği fabrikadan alınmıştır. Çimentoya ait kimyasal özellikler çizelge 3.1’de verilmiştir. Çimentonun yoğunluğu 3.08 gr/cm^3 , 7 günlük basınç mukavemeti 244 kgf/cm^2 ve 28 günlük basınç mukavemeti 424 kgf/cm^2 olarak verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan portland çimentosunun kimyasal özellikleri

İçerik	Ağırlıkça %
SiO ₂	19.80
Al ₂ O ₃	5.61
Fe ₂ O ₃	3.42
CaO	62.97
MgO	1.76
SO ₃	2.95
Na ₂ O	0.47
K ₂ O	0.87
Kızdırma kaybı	2.17

3.1.2. Uçucu kül

Deneylerde Ankara Çayırhan Termik santrali’nden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal özellikler, malzemenin temin edildiği fabrikadan

alınmış ve çizelge 3.2’de verilmiştir. Malzemeye ait X-Ray analiz sonucu şekil 3.1’de gösterilmiştir. Uçucu kül deney programına uygun olarak katı ağırlığının farklı oranları alınarak enjeksiyon karışımlarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri

İçerik	Ağırlıkça %
SiO ₂	47.5
Al ₂ O ₃	15.95
Fe ₂ O ₃	16.3
CaO	6.6
MgO	4.65
Na ₂ O	15.95

3.1.3. Silis dumanı

Deneylerde kullanılan silis dumanı Etibank Antalya Elektrometalurji Sanayi A.Ş Fabrikasından temin edilmiştir. Bu katkı maddesi deneylerde katı ağırlığının 4 farklı yüzdeleri olarak karışıma ilavè edilmiştir. Silis dumanına ait kimyasal bileşimler malzemenin temin edildiği fabrikadan alınmış ve çizelge 3.3’de gösterilmiştir. Malzemeye ait X-Ray analiz sonucu ise şekil 3.2’de gösterilmiştir. Malzemenin yoğunluğu 2.25 gr/cm³ tür.

Çizelge 3.3. Kullanılan silis dumanın kimyasal özellikleri

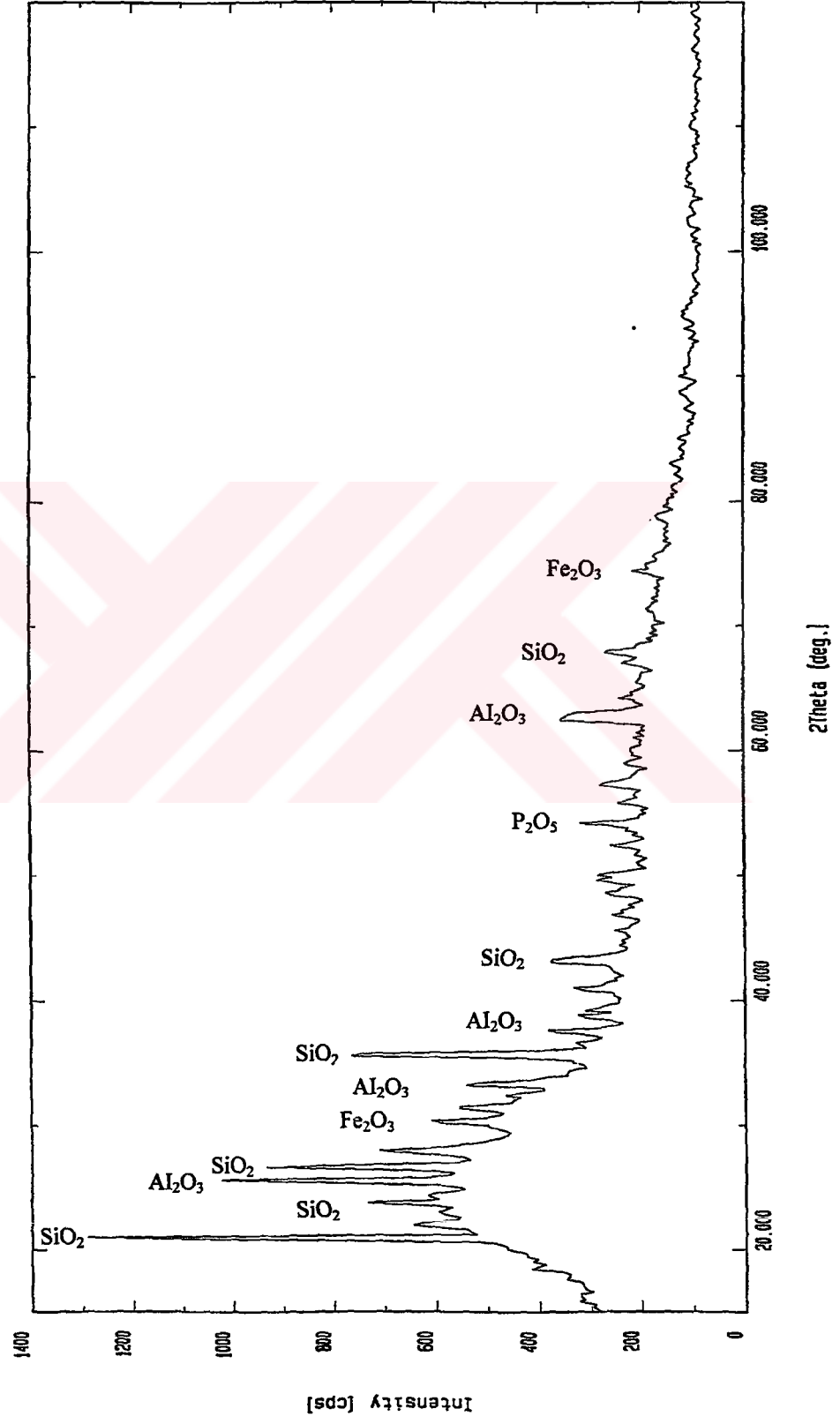
İçerik	Ağırlıkça %
SiO ₂	85-95
Al ₂ O ₃	1-3
Fe ₂ O ₃	0.5-1.0
CaO	0.8-1.2
MgO	1.0-2.0
Kızdırma Kaybı	0.5-1.0

3.1.4. Bentonit

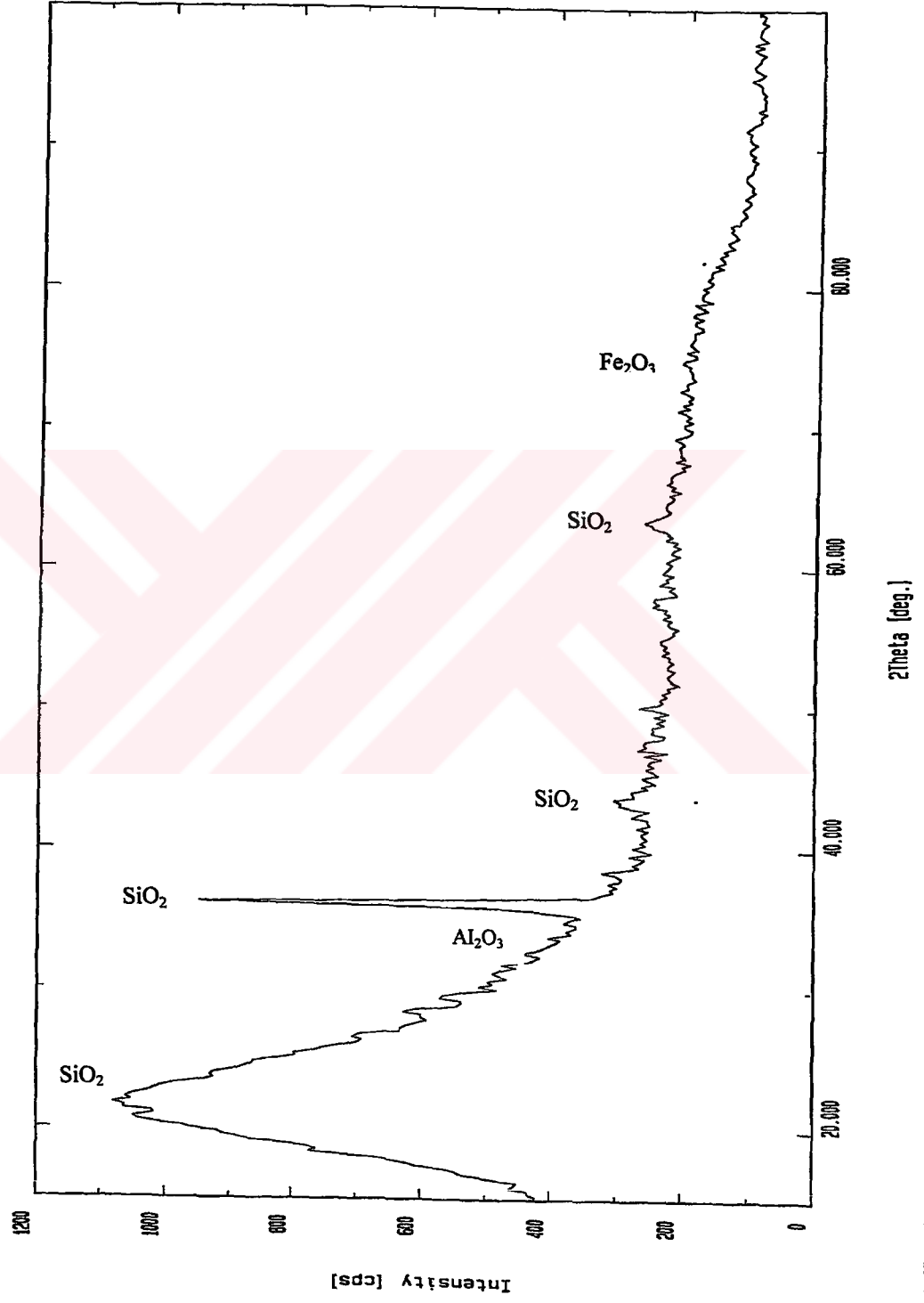
Deneylerde kullanılan bentonit, Çankırı Karakayalar Ocağından temin edilmiştir. Malzemenin yoğunluğu 1.04 gr/cm^3 tür. Malzemeye ait kimyasal özellikler çizelge 3.4’de ve X-Ray analiz sonucu ise şekil 3.3’de gösterilmiştir. Bentonit deneylerde katı ağırlığının farklı yüzdeleri olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Kullanılan bentonitin kimyasal özellikleri

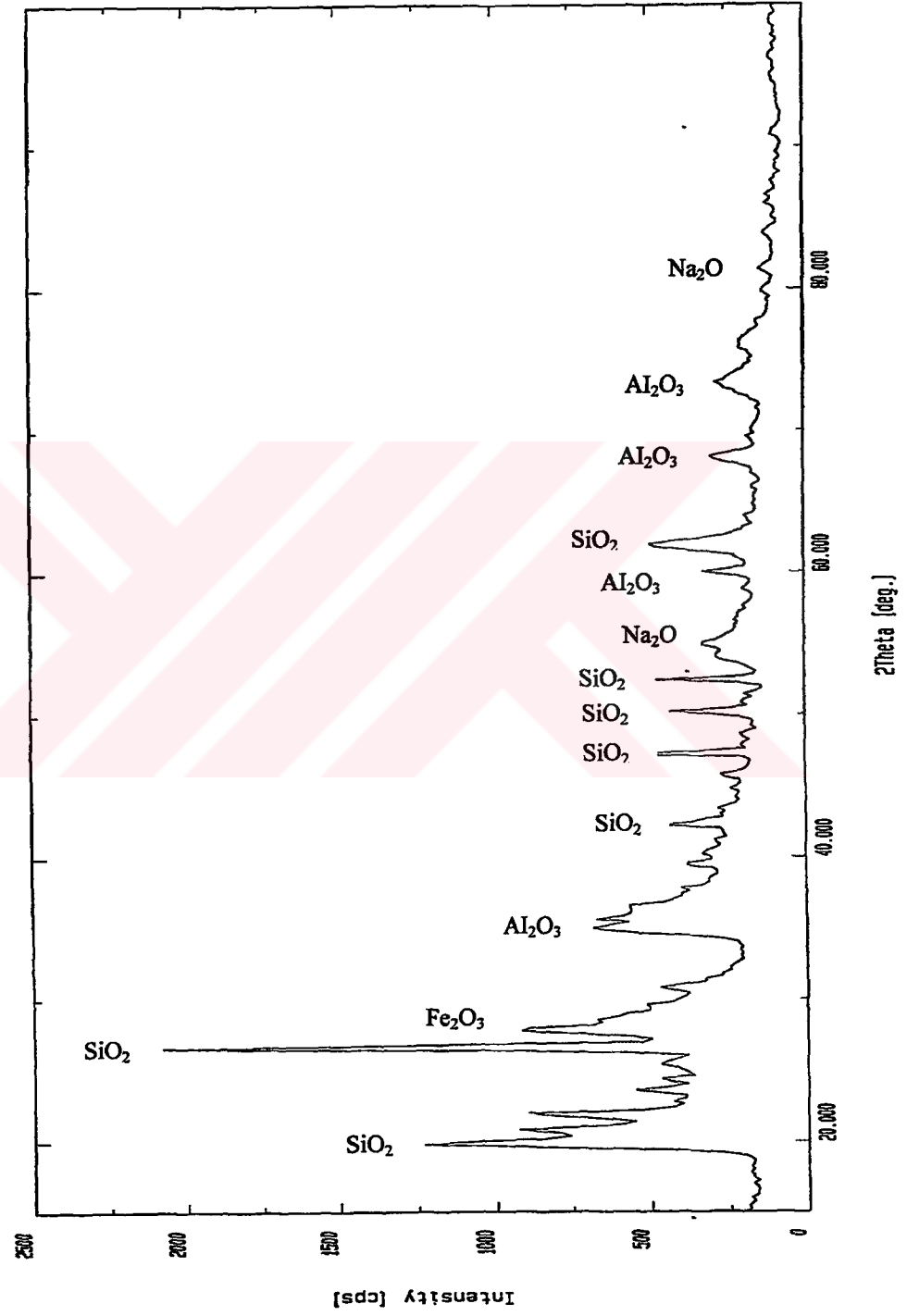
İçerik	Ağırlıkça %
SiO ₂	60.75
Al ₂ O ₃	18.9
Fe ₂ O ₃	3.05
CaO	2.75
MgO	2.1
Na ₂ O	2.7
K ₂ O	0.95



Şekil 3.1. Kullanılan uçucu külün X-Ray grafiği



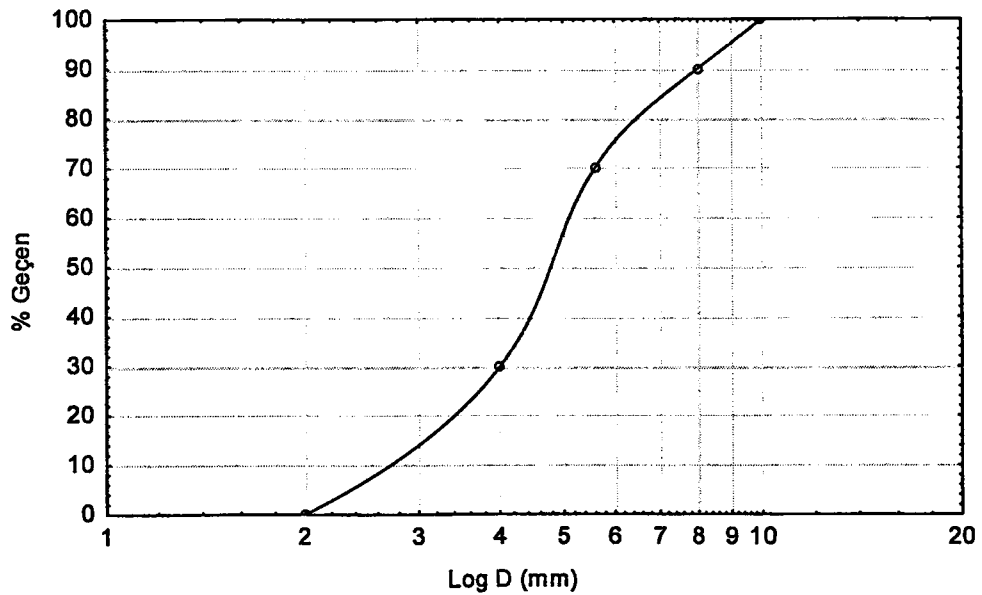
Şekil 3.2. Kullanılan silis dumanının X-Ray grafiği



Şekil 3.3. Kullanılan bentonitin X-Ray grafiği

3.1.5. Çakıl

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan zemin (çakıl) Erzurum'un 45 km Doğusunda yer alan Pasinler İlçesine ait Yağan köyünden alınmıştır. Doğal haldeki dere malzemesi kil boyutu ile iri çakıl boyutuna kadar değişen granülometriye sahip olduğu için zemin önce 105 C° sıcaklıkta etüvde 24 saat bekletilmiş daha sonra ASTM standartlarına uygun 10mm, 8mm, 5.6mm, 4mm ve 2 mm'lik eleklerden elenmiştir. Ön deneylerle 10-8, 8-5.6, 5.6-4 ve 4-2 mm elek aralıklarında kalan malzemelerden belirli oranlarda alınarak enjeksiyon yapılacak zeminin granülometri dağılımı belirlenmiştir. Deneyler için kullanılan çakıla ait granülometri eğrisi şekil 3.4'de verilmiştir. Çakılın bazı geoteknik özelliklerini belirlemek için laboratuarda, tane birim hacim ağırlık, maksimum ve minimum boşluk oranları, kesme kutusu ve sabit seviyeli geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Zemin örneklerine enjeksiyon deneylerinde zeminin ortalama rölatif sıkılığı 0.70 olarak seçilmiştir. Bu nedenle geçirimsizlik ve kesme kutusu deneyleri $D_r=0.70$ için yapılmıştır. Zemine ait belirlenen bazı özellikler çizelge 3.5'de toplu olarak verilmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre zemin sınıfı GP (kötü derecelenmiş çakıl) olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Enjeksiyon yapılan zemine ait granülometri eğrisi

Çizelge 3.5. Deney zemininin bazı özellikleri

İndeks Özellikleri	Değer
γ_s (gr/cm ³)	2.66
γ_{kmak} (gr/cm ³)	1.64
γ_{kmin} (gr/cm ³)	1.28
e_{mak} (%)	1.08
e_{min} (%)	0.62
D_{10} (mm)	2.7
D_{15} (mm)	3.2
D_{30} (mm)	4.0
D_{60} (mm)	5.1
C_u	1.89
C_c	1.16
$\emptyset$ (derece, $D_r=0.70$)	57
k (cm/sn, $D_r=0.70$)	1.46
Zemin Türü (USCS)	GP

3.2 Deney Programı

Çalışmada bentonit, uçucu kül ve silis dumanı parametre olarak seçilmiştir. Her parametrenin de 4 seviyeli olmasına karar verilmiştir. Seçilen parametreler ve bu parametrelerin seviyeleri (kullanılan toplam katı ağırlığın yüzdesi olarak) çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Çalışmada seçilen parametreler ve seviyeleri

Seviye	Parametreler		
	F1	F2	F3
	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 çizelge 3.7'de gösterilmiştir. Seçilen ortogonal dizine göre hazırlanan enjeksiyon karışımları

için laboratuarda 3 farklı S/K oranlarında (0.75, 1.00 ve 1.25) serbest basınç deneyleri (7, 14 ve 28 günlük), çökelme deneyleri, vicat iğnesi deneyleri, Marsh hunisi deneyleri, Dönmeli viskozimetre deneyleri yapılmıştır. Ayrıca optimum karışım oranlarının belirlenmesinden sonra, seçilen uygun iki farklı karışım tipi için 10cm çaplı 20 cm yükseklikli silindirik kalıplar içerisindeki çakıl örneklere ($D_r=0.70$) enjeksiyon yapılarak 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri ölçülmüştür.

Çizelge 3.7. 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

Yukarıdaki L_{16} ortogonal dizine göre deneylerde kullanılması gereken çimento/katı oranları hesaplanarak Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge.3.8. Deneylerde kullanılması gereken çimento/katı oranları

Deney No.	ÇimentoMiktarı(%) Katı Ağırlığa Göre
1	90
2	75
3	60
4	40
5	84.5
6	79.5
7	49.5
8	49.5
9	79
10	59
11	69
12	49
13	67
14	67
15	62
16	57

3.3. Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar

3.3.1. Hidrolik presler

Enjeksiyon karışımı karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü Laboratuvarına ait 0.5 kN hassasiyetli, 150 kN a kadar okumaların yapılabildiği ve 5 kN hassasiyetli 1250 kN a kadar okumaların yapılabildiği iki okuma ünitesine sahip olan yükleme hızı kontrollü hidrolik basınç aleti kullanılmıştır. Enjekte edilmiş zemin örneklerinin serbest basınç mukavemetlerini belirlemek için ise Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Mekanik laboratuvarına ait 3000 kN kapasiteli yükleme hızı kontrollü dijital göstergesi bulunan Autotest 3000 marka hidrolik pres kullanılmıştır.

3.3.2. Dönmeli viskozimetre

Karışımların dinamik viskozitesini belirlemek amacı ile rotasyonel viskozite deneyleri çalışma hızı 0.5-200 dev/dk arasında değişen ve 1.000.000 cp değeri okuma kapasiteli dijital ekranlı Dönmeli viskozimetre aleti kullanılmıştır.

3.3.3. Marsh hunisi

Karışımların akış hızı değerlerini (akışkanlığını) ölçmek için alt çapı 5 mm, üst çapı 152 mm, yüksekliği 355 mm olan 1.5 litre hacme sahip standart Marsh hunisi aleti kullanılmıştır.

3.3.4. Vicat iğnesi

Enjeksiyon karışımlarının priz alma sürelerini belirlemek için üst çapı 65 mm, alt çapı 75 mm ve yüksekliği 40 mm olan, kesik konisi ve 300 gr ağırlığında 10 mm çapında Vicat sondası bulunan standart Vicat iğnesi aleti kullanılmıştır.

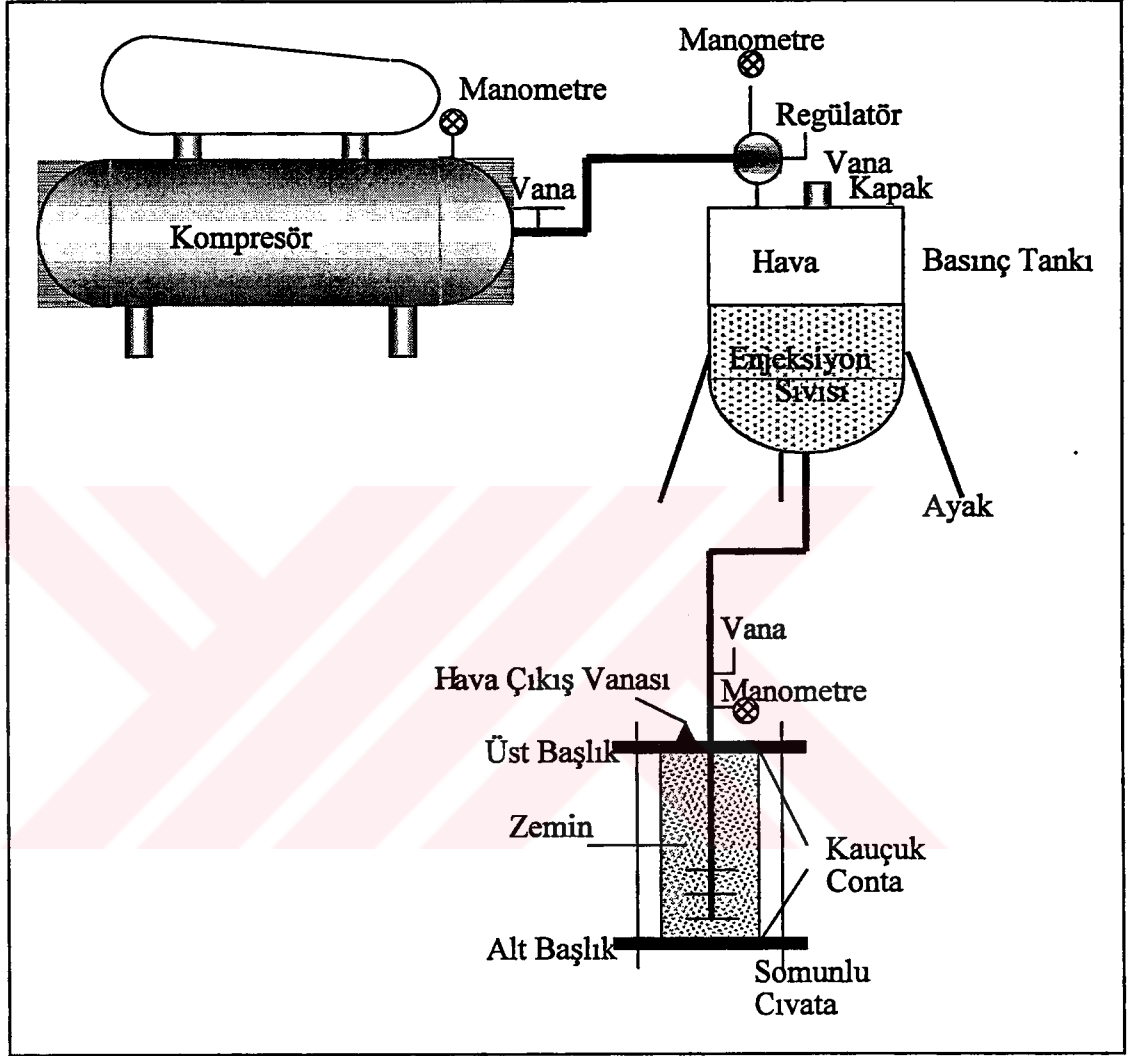
3.3.5. Karıştırıcı

Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında 1400 dev/dk gücünde sayısal göstergesi, 5 lt kapasiteli karıştırma kabı ve eğik iki karıştırma paleti olan karıştırıcı kullanılmıştır.

3.3.6. Enjeksiyon düzeneği ve numune kalıpları

10cm çaplı 20 cm yükseklikli silindirik kalıplar içerisindeki çakıl örneklerle ($D_r=0.70$) enjeksiyon yapmak için hazırlanan enjeksiyon deney düzeneği şematik olarak şekil 3.5’de gösterilmiştir. Deney düzeneği; üzerinde hava giriş musluğu, fazla havayı tahliye edecek bir emniyet ventili, tank içerisinde ki basıncı istenilen düzeyde tutmak için ayarlanabilir ve basınç göstergeli bir basınç regülatörü olan ve alt kısmında enjeksiyon karışımının çıkacağı basınca dayanıklı hortum ile hortumun ucuna açılıp kapanabilen bir vana vasıtasıyla bağlı enjektörü olan 8 litre sıvı alabilen 4 mm et kalınlığına sahip, 5 atmosfer basınca dayanıklı paslanmaz çelikten yapılmış silindir bir tank ve kompresörden oluşmaktadır. Enjektör üzerinde enjeksiyon karışımının çıkabileceği 3-4 mm çapında 14 adet delik yer almaktadır. Hortumun çapı 2 cm den az tutularak enjeksiyon esnasında oluşabilecek ayrışmayı önlenmiştir. Enjeksiyon karışımlarının döküleceği kalıplar 3.8 cm çapında, 7.6 cm yüksekliğinde ve 2 mm kalınlığında çelik kalıplardan oluşmaktadır. Kalıplarda enjeksiyon karışımları döküldükten sonra sızıntı olmasını engellemek için lastik balonlar kullanılmıştır. Ayrıca enjeksiyon karışımının çökmesi de göz önüne alınarak numune yüksekliğinde oluşabilecek kısalmaları önlemek amacıyla bu kalıpların üst kısmına 3 cm yüksekliğinde asetat kağıdı yapıştırılmıştır. Enjeksiyon uygulanacak zemin örneğinin konulacağı kalıpların boyutları ise 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde ve 3 mm kalınlığına sahip flexiglas kalıplardan oluşmaktadır. Enjeksiyon uygulanacak zemin örneğinin belirlenen rölatif sıkılıkta olmasını sağlamak için 5cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde ahşaptan yapılmış bir sıkıştırma tokmağı kullanılmıştır. Enjeksiyon uygulanacak örnek kalıpları alt ve üst kısımlarından 15x15 cm ve 4 mm et kalınlığına sahip olan çelik başlıklar arasında sıkıştırılmıştır. Başlıkların örneği daha rijit bir şekilde tutması için dört kenarından 9 mm çapında somunlu civatalar kullanılmıştır. Üst başlığın tam ortasında enjektörün girebileceği 8 mm çapında bir delik (contalı) ve kalıp içerisinde sıkışan havayı tahliye edebilmek için açılıp kapanabilen contalı bir düzenek oluşturulmuştur. Numune kabının alt ve üst başlıklara temas eden kısımlarından enjeksiyon sırasında hava ve sıvı sızıntısını önlemek için her iki başlığın iç yüzeylerine

4 mm kalınlığında lastik contalar yerleştirilmiştir. Enjekte edilmiş örneklerin kalıptan çıkarılmasında hidrolik numune çıkartıcısı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Enjeksiyon deney düzeneği

3.4. Deneylerin Yapılışı

Çalışma ile ilgili deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 'ne ait Zemin Mekaniği ve Yapı Mekaniği Laboratuvarları ile DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü'ne ait Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır.

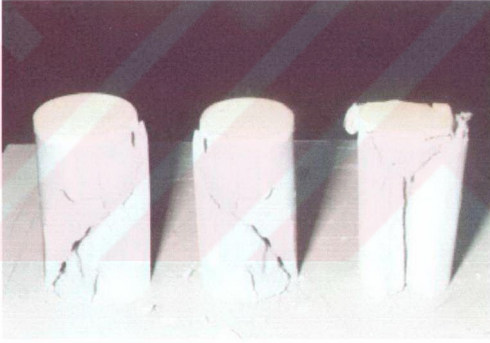
3.4.1. Enjeksiyon karışımı serbest basınç deneyleri

Enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü Laboratuvarına ait 0.5 kN hassasiyetli hidrolik basınç aleti kullanılmıştır. Deney ASTM C109 a uygun olarak yapılmıştır. Karışımın katı malzemeleri (çimento, uçucu kül, silis dumanı) ayrı ayrı tartılmış ve hepsi birlikte homojen olacak şekilde kuru iken karıştırılmıştır. Bentonit katılması gereken karışımlara, her karışım için bentonit miktarı, %10 bentonit %90 su olacak şekilde karıştırılmış ve 24 saat bekletilmiştir (Huang 1997). Bentonit için harcanan su miktarı karışım için gereken su miktarından çıkarılmıştır. Karışım suyuna homojen karıştırılmış katı kısım 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)). Karışımı tamamlanan enjeksiyon karışımı 3,8x7,6 cm boyutlarında olan silindirik kalıplar içerisine aynı karışımdan 15 adet numune olacak şekilde dökülmüştür (Şekil 3.6). Kalıplara dökülen numuneler bir gün sonra numune kalıplarından çıkarılmış ve kirece doymun $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ sabit sıcaklıkta olan kür havuzuna yerleştirilmiştir.

Numuneler basınç mukavemet deneyine tabi tutulmadan 24 saat önce kür havuzundan çıkarılarak kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan numunelerin alt ve üst yüzeyleri deneye en az iki saat kala kükürt ile başlıklanmıştır. Daha sonra başlıklanan numunelerin 0.5 kN hassasiyetli hidrolik pres deney aleti ile 7, 14 ve 28 günlük basınç mukavemetleri belirlenmiştir (Şekil 3.7). Benzer deneyler sadece çimentonun kullanıldığı karışımlar için de yapılmıştır. 7, 14 ve 28 günlük enjeksiyon karışımı serbest basınç mukavemeti deneyleri seçilen L16 ortogonal dizine göre, üç farklı S/K oranında (0.75, 1.00 ve 1.25) yukarıda anlatıldığı şekilde ayrı ayrı yapılmıştır. Her durum için en az üç numunenin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Karışımların kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 3.7. Serbest basınç deney sonrası numunelerin görünüşü

3.4.2. Vicat iğnesi deneyleri

Vicat iğnesi deneyi ile enjeksiyon karışımlarının priz alma süreleri belirlenmektedir. İlk priz yapma süresi, taze enjeksiyon karışımının enjekte edilemediği veya işlenemediği zaman, son priz yapma süresi enjeksiyon karışımının sıkılaştığı veya mukavemet göstermeye başladığı zaman olarak tanımlanmaktadır (Postacıoğlu, 1987). Enjeksiyon karışımının karıştırma işlemi bittikten iki dakika içerisinde enjeksiyon karışımı üst çapı 65 mm alt çapı 75 mm ve yüksekliği 40 mm olan kesik koni şeklindeki deney kabı

içerisine yerleştirildikten sonra üst kısım spatula yardımı ile düzeltilir. İçerisinde enjeksiyon karışımı bulunan bu kap vicat denilen aletin alt tarafına yerleştirildi. Bu alette düşey doğrultuda serbest hareket eden 300 gr ağırlığında bir çubuk vardır. Çubuk aletin üzerinde bulunan cıvatanın gevşetilmesi ile bu hareketi gerçekleştirmektedir. Çubuğun ucunda vicat iğnesi yer almaktadır. Aletin özel bir tertibi ile iğne ucunun kabın tabanına olan mesafesi mm cinsinden kolaylıkla okunabilmektedir. Sonda serbest bırakıldıktan sonra elle kesik koni içinde bulunan enjeksiyon karışımının üst yüzeyine indirilir ve bundan sonra serbest bırakılır. İğne tabandan 3-5 mm yukarıda durduğunda prizin başlamış olduğu kabul edilmektedir. İğnenin tabandan 39mm yukarıda durduğu an prizin tamamlanmış olduğu kabul edilmektedir. Deneylerin nem odasında yapılması uygun olmaktadır (ASTM C191). Seçilen L16 ortogonal dizin için (çizelge 3.7) yukarıda anlatıldığı şekilde 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranlarında deneyler yapılmıştır.

3.4.3. Marsh Hunisi deneyleri

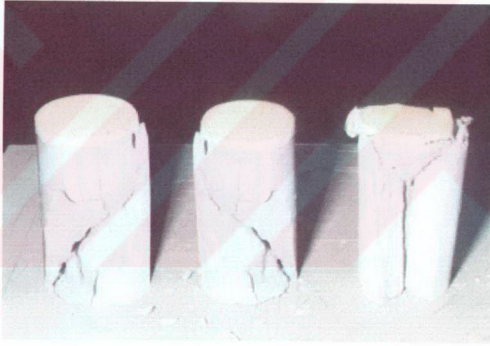
Enjeksiyon karışımının viskozitesi Marsh hunisi aleti ile ölçülebilmektedir. Huninin alt ucu kapatılarak karıştırma hızı 1000 devir/dk olan mikserde beş dakika karıştırılan enjeksiyon karışımı Marsh hunisinin içerisine boşaltılır. Huninin alt kısmına 1000 ml'lik hacim okumalı kap yerleştirilir. Daha sonra huninin alt ucu açılarak enjeksiyon karışımının huniden ölçekli kaba boşalması sağlanır. 1000 ml'lik ölçekli kap enjeksiyon karışımı ile doluncaya kadar deneye devam edilir. 1000ml'nin dolması için geçen süre kronometre vasıtası ile belirlenir (Çincioğlu 1997, Mirza et al 2002). Bulunan bu değerler, enjeksiyon karışımlarının viskozitesi olarak kaydedilir. Yukarıda anlatıldığı şekilde, seçilen L16 ortogonal dizin için (çizelge 3.7) 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranlarında Marsh Hunisi deneyleri yapılmıştır.

3.4.4. Çökelme (sedimentasyon) deneyleri

Bu deney ile enjeksiyon karışımının çökelme yüzdesi araştırılmaktadır. Karıştırma hızı 1000 devir/dk olan mikserde beş dakika karıştırılan enjeksiyon karışımı, 1000 cm³ (V₁)



Şekil 3.6. Karışımların kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 3.7. Serbest basınç deney sonrası numunelerin görünüşü

3.4.2. Vicat iğnesi deneyleri

Vicat iğnesi deneyi ile enjeksiyon karışımlarının priz alma süreleri belirlenmektedir. İlk priz yapma süresi, taze enjeksiyon karışımının enjekte edilemediği veya işlenemediği zaman, son priz yapma süresi enjeksiyon karışımının sıkılaştığı veya mukavemet göstermeye başladığı zaman olarak tanımlanmaktadır (Postacıoğlu, 1987). Enjeksiyon karışımının karıştırma işlemi bittikten iki dakika içerisinde enjeksiyon karışımı üst çapı 65 mm alt çapı 75 mm ve yüksekliği 40 mm olan kesik koni şeklindeki deney kabı

içerisine alınarak uygun disk seçilir. Kap dönmeli viskozimetre aletine yerleştirilir daha sonra disk karışımının içerisine batırılarak alet çalıştırılır. Deney başlangıcından 1 dakika sonra okuma yapılarak kaydedilir. Yukarıda anlatıldığı şekilde, seçilen L16 ortagonal dizin için (Çizelge 3.7) 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranlarında Dönmeli Viskozimetre deneyleri yapılmıştır. Tüm deneyler sabit dönme hızında (Rpm=100) yapılmıştır.

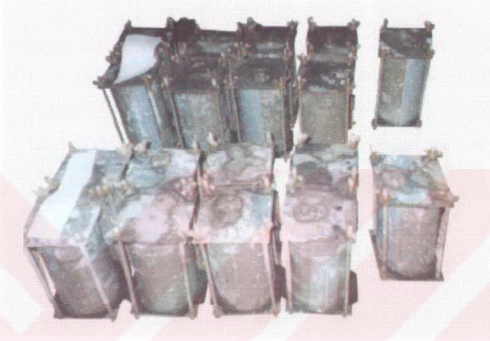
3.4.6. Enjeksiyonlu zemin numunelerinde yapılan deneyler

3.4.6.1. Numunelerin hazırlanması

Ön deneyler sonucunda belirlenen enjeksiyon basıncı ve zemin granülometrisine bağlı kalınarak hazırlanan zemin (çakıl) örneği, rölatif sıklığı 0.70 olacak şekilde 10cm çaplı 20cm yükseklikli şeffaf numune kalıplarına yerleştirilmiştir. Enjeksiyon karışımı, karışım içerisinde oluşmuş olabilecek toprakların enjektör deliklerini tıkamaması için 0.2 mm elekten süzülerek enjeksiyon tankına dökülüp kapağı iyice sıkıştırılarak kapatılmıştır. Enjeksiyon basıncının enjekte edilecek zemin örneği içerisine batırılan enjektör deliği çıkışında 1 atmosfer basınç olması için enjeksiyon tankı üzerinde yer alan basınç regülatörü 1.1 atmosfer basınca ayarlanmıştır (Anonim 1999).

Zemin ortamına enjekte edilecek enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında üç farklı karışım oranları seçilmiştir. 1. grup karışımlarda katı ağırlığının %10 oranında uçucu kül ve %20'si oranında silis dumanı kullanılmıştır. 2.grup karışımlarda katı ağırlığının % 3 oranında bentonit, % 10 oranında uçucu kül ve %20'si oranında silis dumanı kullanılmıştır. 3. grup karışımlarda ise karışım malzemesi olarak sadece çimento kullanılmıştır. S/K oranları 0.75, 1.00 ve 1.25 olacak şekilde ayrı ayrı hazırlanan enjeksiyon karışımları, kalıp içerisindeki zemin örneklerine enjekte edilmiştir (Şekil.3.9). Enjeksiyon işlemi aşağıdan yukarıya doğru çıkan kademeler metoduna uygun olarak yapılmıştır (Anonim 1999).

Enjeksiyon işlemi tüm numuneler için aynı şekilde yapılmış ve enjeksiyonlu örnekler 24 saat sonra kalıplarından çıkarılarak 23 ± 2 °C sabit sıcaklıklı ve kirece doymun kür havuzunda bekletilmiştir.



Şekil 3.9. Enjeksiyonlu zemin örnekleri

3.4.6.2. Enjeksiyonlu zemin numunelerinin serbest basınç deneyleri

Enjeksiyonlu örnekler serbest basınç mukavemet deneyine tabi tutulmadan 24 saat önce kür havuzundan çıkarılarak kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan numunelerin alt ve üst yüzeyleri deneye en az iki saat kala kükürt ile başlıklanmıştır. Daha sonra başlıklanan numunelerin autotest 3000 hidrolik pres aleti ile 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Enjeksiyon Karışımlarının Serbest Basınç Mukavemetleri

4.1.1. Karışımların serbest basınç deney sonuçları

Üç farklı S/K oranı için bölüm 3.4.1' e uygun olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen enjeksiyon karışımlarının 7,14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemeti deney sonuçları çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3' de toplu halde verilmiştir. Yalnız çimento ile yapılan karışımların 7,14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemeti deney sonuçları çizelge 4.4' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Enjeksiyon karışımı serbest basınç mukavemeti deney sonuçları (7 günlük)

Den. No	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)								
	S/K=0.75			S/K= 1.00			S/K= 1.25		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	8.27	7.50	8.38	4.85	4.85	4.76	4.58	4.23	4.58
2	5.73	6.17	6.17	3.98	3.79	3.79	3.97	3.70	3.70
3	4.41	4.30	4.41	3.08	2.80	2.82	2.21	2.21	2.12
4	5.73	5.29	5.56	3.09	3.09	2.82	2.12	2.12	2.03
5	7.06	7.50	7.06	3.97	3.97	3.70	2.65	2.65	2.21
6	6.17	6.40	6.61	4.41	4.23	4.23	2.65	2.85	2.95
7	7.06	6.61	7.06	3.70	3.79	3.97	2.38	2.38	2.21
8	5.18	4.63	4.41	2.21	2.21	2.29	1.94	1.94	2.12
9	7.94	7.06	7.50	3.70	3.35	3.53	2.82	2.82	2.65
10	7.50	7.06	7.50	4.06	4.76	4.23	2.38	2.47	2.47
11	4.76	4.41	4.76	3.79	3.88	3.44	2.29	2.29	2.21
12	3.97	3.97	3.97	2.21	2.21	2.38	2.03	1.94	2.03
13	8.35	8.38	8.47	5.47	5.56	5.47	2.82	2.82	2.82
14	7.06	7.28	7.06	3.26	3.35	3.35	1.94	1.94	2.03
15	4.92	4.41	4.85	2.82	2.82	3.09	1.59	1.59	1.76
16	3.79	3.92	3.97	2.65	2.54	2.65	1.94	1.94	1.76

Çizelge 4.2. Enjeksiyon karışımı serbest basınç mukavemeti deney sonuçları (14 günlük)

Den. No	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)								
	S/K=0.75			S/K= 1.00			S/K= 1.25		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	10.58	10.32	10.32	4.85	5.50	5.29	5.47	5.47	5.73
2	7.50	7.15	7.50	5.56	5.73	5.91	4.76	4.76	4.59
3	8.82	9.00	9.00	4.85	4.59	4.59	2.91	2.91	3.09
4	10.2	11.30	11.45	6.26	5.47	6.26	3.97	3.58	3.97
5	9.26	8.55	8.80	5.47	5.12	5.29	3.35	3.70	3.79
6	8.20	8.60	9.08	7.67	6.79	7.25	3.26	3.26	3.35
7	9.70	10.58	10.14	7.67	7.94	7.94	3.70	3.79	4.10
8	7.76	7.23	7.23	4.67	4.23	4.23	2.47	2.47	2.38
9	11.91	11.02	11.40	5.73	5.73	6.35	4.59	4.23	4.23
10	12.21	12.17	12.17	8.20	7.20	8.38	5.47	5.47	5.11
11	6.53	6.61	6.70	4.41	4.41	4.32	3.53	3.53	3.35
12	6.35	6.35	6.79	3.35	3.09	3.35	2.82	3.26	3.26
13	9.88	9.70	10.30	6.26	6.35	6.53	5.55	5.91	5.75
14	11.29	11.29	11.29	5.73	6.00	5.91	3.70	3.70	3.70
15	8.20	8.38	8.20	4.41	4.41	4.15	2.91	2.65	2.82
16	5.56	5.47	5.29	3.35	3.09	3.09	2.47	2.65	2.65

Çizelge 4.3. Enjeksiyon karışımı serbest basınç mukavemeti deney sonuçları (28 günlük)

Den. No	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)								
	S/K=0.75			S/K= 1.00			S/K= 1.25		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	13.23	14.11	13.66	7.50	7.50	7.76	7.06	7.06	7.23
2	10.14	10.58	10.73	6.88	6.88	6.61	6.35	6.44	6.44
3	8.82	9.52	9.20	5.12	5.73	5.73	3.79	4.23	3.97
4	12.17	12.17	13.23	7.50	7.50	7.58	4.23	4.15	3.97
5	13.23	12.70	12.08	6.79	6.88	7.50	5.12	4.85	5.25
6	9.70	9.70	9.70	7.76	8.50	9.26	5.29	5.29	5.12
7	15.43	15.7	14.29	10.41	10.05	10.76	5.73	6.00	6.17
8	8.82	8.38	8.82	5.56	5.29	5.12	3.35	3.35	3.70
9	12.35	12.35	13.23	7.94	7.85	8.20	4.41	5.12	4.68
10	12.78	13.23	14.29	10.94	11.29	11.10	6.44	6.61	7.06
11	8.82	9.08	9.26	7.06	6.61	7.50	5.29	5.29	5.29
12	8.38	7.94	8.11	4.59	4.59	4.85	3.70	3.70	3.53
13	14.11	15.43	15.87	8.82	8.82	9.08	7.50	6.88	6.61
14	14.20	13.05	15.26	7.50	7.50	7.41	4.41	4.41	4.59
15	11.91	11.75	11.64	5.47	5.29	5.56	3.26	3.06	3.26
16	6.00	6.00	6.00	4.23	4.23	4.15	3.35	3.06	3.26

Çizelge 4.4. Yalnız çimento ile yapılan karışımların serbest basınç mukavemeti deney sonuçları

S/K Oranı	Süre	Serbest Basınç Mukavemeti (Mpa)				
		1	2	3	4	ortalama
0.75	7. gün	9,08	8,82	7,23	8,82	8,5
	14. gün	14,73	15,17	16,76	15,34	15.5
	28. gün	18,96	19,40	17,64	17,64	17.41
1.00	7. gün	6,44	5,47	6,35	6,44	6.18
	14. gün	8,55	10,32	9,08	8,99	9.23
	28. gün	11,46	11,91	13,67	12,79	12.46
1.25	7. gün	4,57	3,53	4,41	3,79	4.1
	14. gün	4,85	5,73	5,29	5,29	5.29
	28. gün	6,61	6,17	9,70	6,70	7.3

4.1.2. Karışımların 7 günlük serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi

Çizelge 4.1’de verilen S/K oranlarının 0.75, 1.00 ve 1.25 olduğu 7 günlük serbest basınç mukavemeti deney sonuçları kullanılarak L_{16} ortogonal dizin için ayrı ayrı S/N analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda deney sonuçları için hesaplanan S/N değerleri (Bağıntı 2.3) ile ortalama S/N değerleri çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deney sonuçlarının S/N değerleri (7 günlük)

Deney No.	Parametreler ve Seviyeleri				S/N Oranı		
	Bentonit	Uçucu Kül	Silis Dumanı	S/K=0.75	S/K=1.00	S/K=1.25	
1	1	1	1	18.08	13.66	12.97	
2	1	2	2	15.58	11.71	11.56	
3	1	3	3	12.81	9.22	6.76	
4	1	4	4	14.83	9.52	6.40	
5	2	1	2	17.14	11.76	7.87	
6	2	2	1	16.11	12.64	8.97	
7	2	3	4	16.77	11.63	7.31	
8	2	4	3	13.46	6.99	6.00	
9	3	1	3	17.47	10.93	8.82	
10	3	2	4	17.31	12.71	7.74	
11	3	3	1	13.32	11.34	7.09	
12	3	4	2	11.97	7.09	6.01	
13	4	1	4	18.48	14.81	9.00	
14	4	2	3	17.06	10.42	5.88	
15	4	3	2	13.46	9.25	4.30	
16	4	4	1	11.80	8.34	5.46	
Ortalama S/N Oranı				15.35	10.75	7.63	

Parametrelerin ve seviyelerinin sonuca etkilerini belirlemede kullanılan, seviyelerin ortalama S/N değerleri hesaplanarak çizelge 4.6'da verilmiştir. En yüksek ortalama S/N değeri; S/K oranı 0.75 için uçucu külün 1. seviyesinde (%10) 17.79, S/K oranı 1.00 için uçucu külün 1. seviyesinde (%10) 12.79 ve S/K oranı 1.25 için ise uçucu külün 1. seviyesinde 9.66 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan genel olarak uçucu külün 7 günlük serbest basınç mukavemeti değişimi üzerinde en etkili parametre olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (7 günlük)

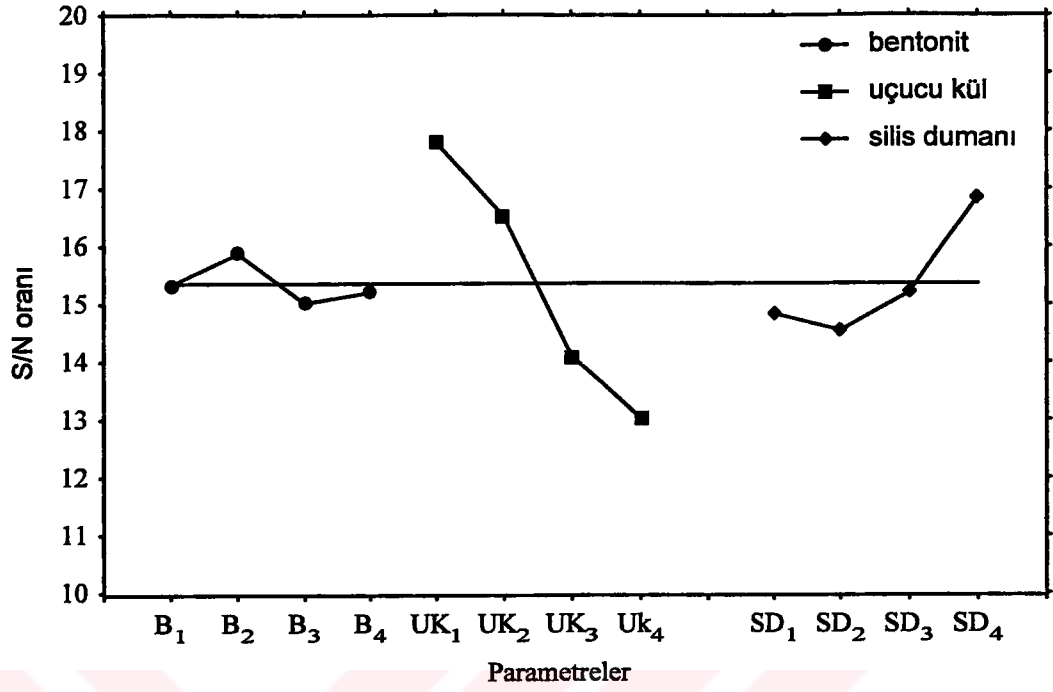
S/K oranı	Parametre	S/N Oranı			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
0.75	Bentonit	15.33	15.87	15.02	15.20
	Uçucu Kül	17.79	16.52	14.09	13.02
	Silis Dumanı	14.83	14.54	15.20	16.85
1.00	Bentonit	11.03	10.76	10.52	10.70
	Uçucu Kül	12.79	11.87	10.36	7.98
	Silis Dumanı	11.49	9.95	9.39	12.17
1.25	Bentonit	9.43	7.54	7.42	6.16
	Uçucu Kül	9.66	8.54	6.37	5.97
	Silis Dumanı	8.62	7.44	6.87	7.61

Enjeksiyon karışımının 7 günlük serbest basınç mukavemetine, bentonit, uçucu kül ve silis dumanının etkisini belirlemek için varyans analizi yapılmış ve sonuçlar çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelgede yer alan diğer satırı, deneylerde kontrol edilemeyen etkenlerin tümünün etki değerini göstermektedir. Bentonitin 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerine etkilerinin 0.75 ve 1.00 S/K oranı için oldukça az olduğu (%0) 1.25 S/K oranında ise %21.70 oranında etkili olduğu görülmektedir. Uçucu külün 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranları için sırası ile %72.23, %69.54 ve % 42.33 oranlarında etkili olduğu görülmektedir. Silis dumanı ise 0.75 S/K oranı için % 13.86, 1.00 S/K oranı için 25.96 ve 1.25 S/K oranı için ise %1.59 oranlarında etkili olmuştur.

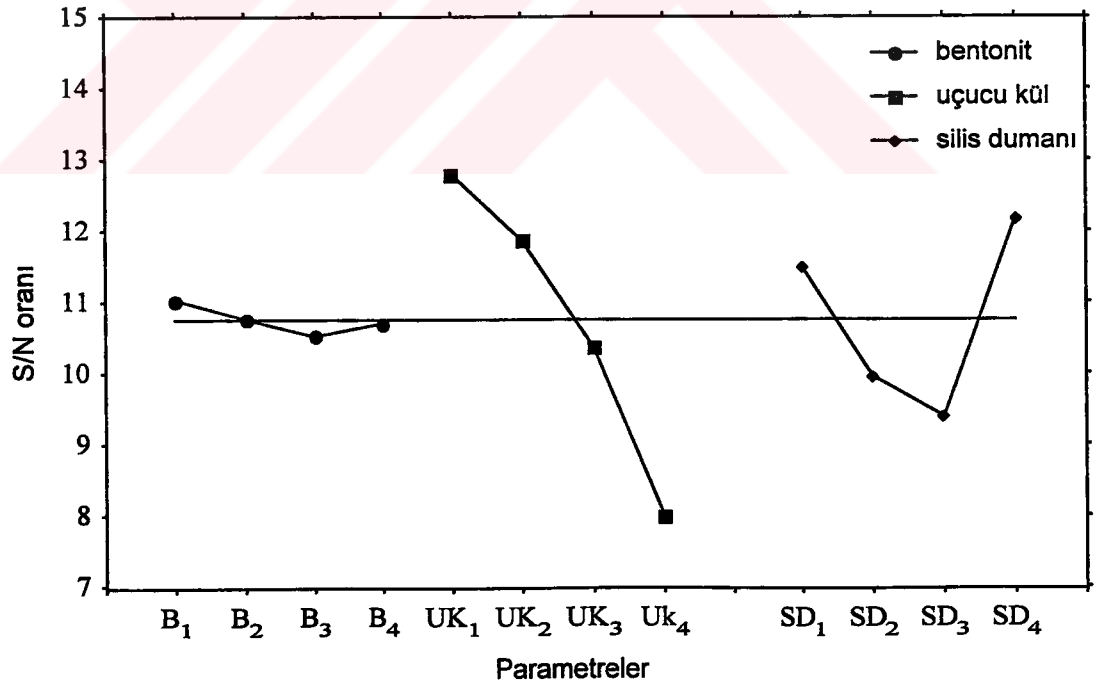
Çizelge 4.7. Varyans analizi tablosu (7 günlük)

S/K Oranı	Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
0.75	Bentonit	3	1.61	0.54	0.71	0.00	0.00
	Uçucu Kül	3	57.40	19.13	25.49	55.15	72.23
	Silis	3	12.83	4.28	5.70	10.58	13.86
	Dumanı	6	4.503	0.75			13.91
	Diğer Toplam	15	76.37				100.00
1.00	Bentonit	3	0.54	0.18	0.75	0.00	0.00
	Uçucu Kül	3	52.86	17.62	74.37	52.14	69.54
	Silis	3	20.18	6.73	28.39	19.47	25.96
	Dumanı	6	1.42	0.24			4.54
	Diğer Toplam	15	74.99				100.00
1.25	Bentonit	3	21.71	7.24	4.16	16.49	21.70
	Uçucu Kül	3	37.38	12.46	7.16	32.16	42.33
	Silis	3	6.43	2.14	1.23	1.21	1.59
	Dumanı	6	10.45	1.74			34.38
	Diğer Toplam	15	75.97				100.00

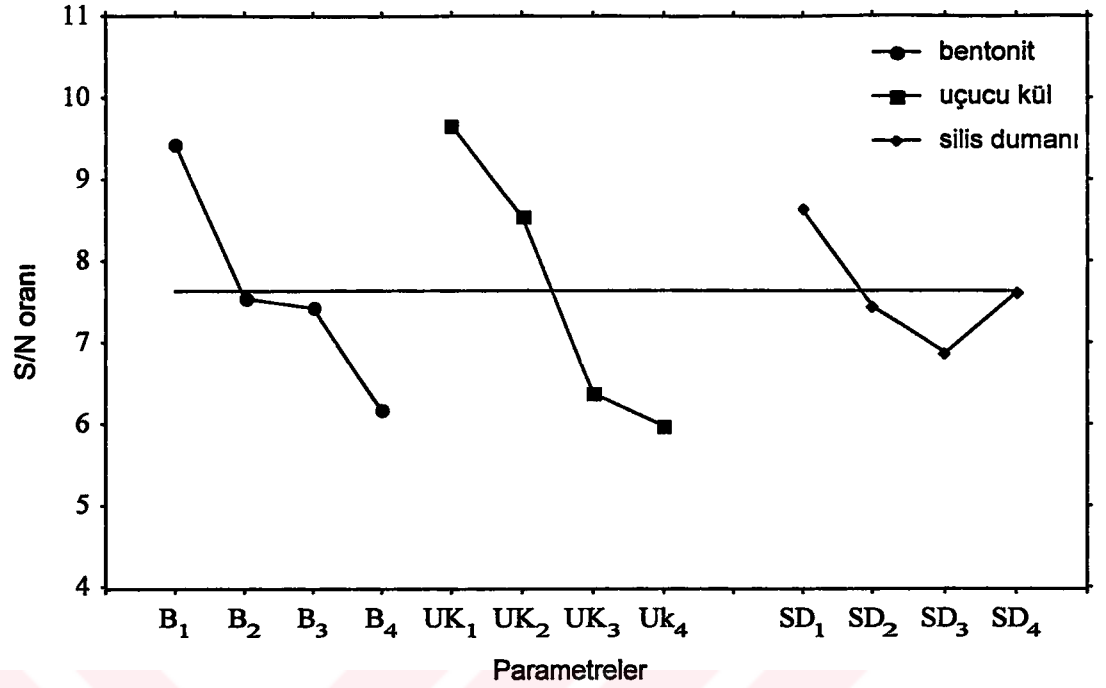
Bentonit, uçucu kül ve silis dumanının 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren grafikler şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’de verilmiştir. Grafiklerde yatay doğrular deneylerdeki ortalama S/N değerini göstermektedir.



Şekil 4.1. Parametrelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=0.75)



Şekil 4.2. Parametrelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=1.00)



Şekil 4.3. Parametrelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=1.25)

Hazırlanan ANOVA tablosu çizelge 4.3 ve şekil 4.1, 4.2, ve 4.3'ün incelenmesi sonucunda 7 günlük serbest basınç mukavemeti değişimi üzerinde en etkili parametrenin uçucu kül olduğu görülmektedir. Parametrelerin 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkinlik sıralaması uçucu kül, silis dumanı ve bentonittir. Parametrelerin etki dereceleri ANOVA tablosundaki değerlerinden de belirlenmektedir.

S/K oranının 0.75, 1.00 ve 1.25 olduğu üç durumda da uçucu kül oranı arttıkça 7 günlük serbest basınç mukavemeti hızlı bir şekilde azalmaktadır (Mirza et al 2002, Huang 1997). S/K oranının 0.75 ve 1.00 olduğu durumlarda bentonitin 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisinin çok az olduğu, genel ortalamaya yakın sonuçlar elde edilirken, 1.25 S/K oranı için sonuç üzerinde azaltıcı yönde etki ettiği görülmektedir (Huang 1997). S/K oranının 0.75 olduğu durumda %10 silis dumanı oranına (3. Seviye) kadar basınç mukavemeti azalırken, özellikle %10 oranından sonra serbest basınç mukavemeti ortalamanın üzerine çıkarak artış göstermektedir (Huang 1997).

4.1.3. Karışımların 14 günlük serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi

Çizelge 4.2’de verilen 14 günlük serbest basınç mukavemetleri deney sonuçları kullanılarak yapılan S/N analizi sonucunda belirlenen S/N değerleri çizelge 4.8’de, parametre seviyelerinin ortalama değerleri ise çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Deney sonuçlarının S/N değerleri (14 günlük)

Deney No.	Parametreler ve Seviyeleri			S/N Oranı		
	Bentonit	Uçucu Kül	Silis Dumanı	S/K=0.75	S/K=1.00	S/K=1.25
1	1	1	1	20.34	14.31	14.89
2	1	2	2	17.36	15.16	13.44
3	1	3	3	19.03	13.39	9.44
4	1	4	4	20.78	15.50	11.66
5	2	1	2	18.94	14.47	11.12
6	2	2	1	18.69	17.16	10.34
7	2	3	4	20.10	17.89	11.71
8	2	4	3	17.38	12.79	7.74
9	3	1	3	21.16	15.44	12.75
10	3	2	4	21.72	17.92	14.55
11	3	3	1	16.41	12.83	10.79
12	3	4	2	16.24	10.25	9.80
13	4	1	4	19.96	16.09	15.16
14	4	2	3	21.05	15.38	11.36
15	4	3	2	18.34	12.71	8.90
16	4	4	1	14.71	10.02	8.25
Ortalama S/N Oranı				18.89	14.46	11.37

Çizelge 4.9. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (14 günlük)

S/K oranı	Parametre	S/N Oranı			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
0.75	Bentonit	19.38	18.78	18.88	18.52
	Uçucu Kül	20.10	19.71	18.47	17.28
	Silis Dumanı	17.54	17.72	19.65	20.64
1.00	Bentonit	14.59	15.58	14.11	13.55
	Uçucu Kül	15.08	16.41	14.20	12.14
	Silis Dumanı	13.58	13.15	14.25	16.85
1.25	Bentonit	12.36	10.23	11.98	10.92
	Uçucu Kül	13.48	12.43	10.22	9.36
	Silis Dumanı	11.07	10.82	10.33	13.27

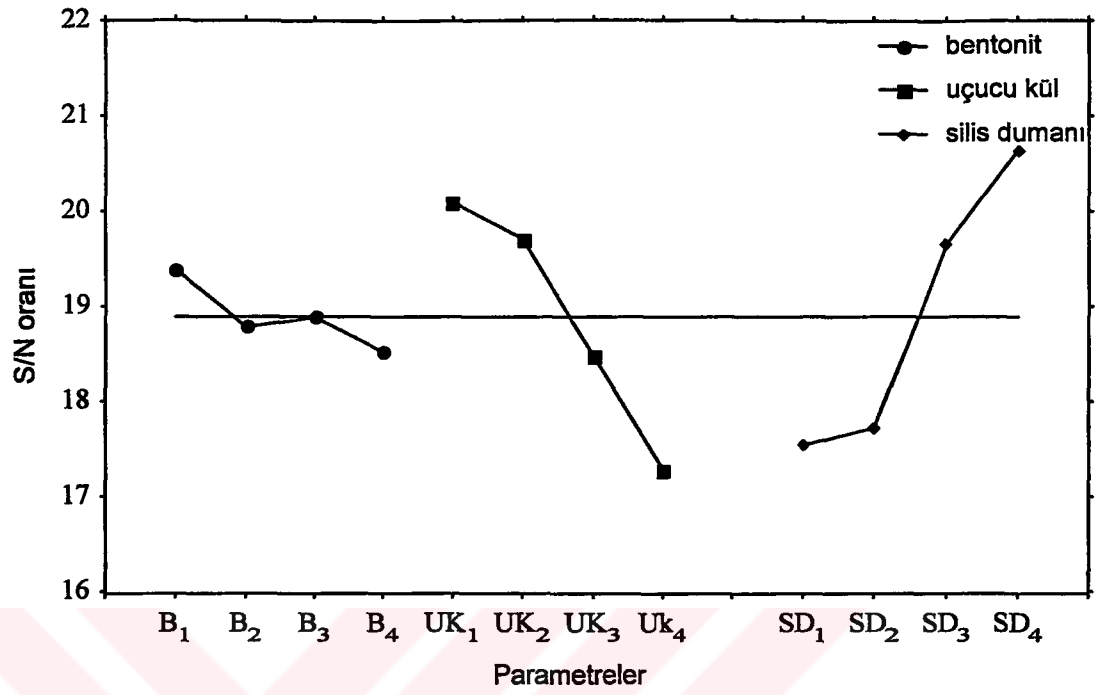
14 günlük serbest basınç mukavemeti değişimine parametrelerin etkisini belirlemek için yapılan varyans analizi sonuçları ise çizelge 4.10’da görülmektedir.

Çizelge 4.10. Varyans analiz tablosu (14 günlük)

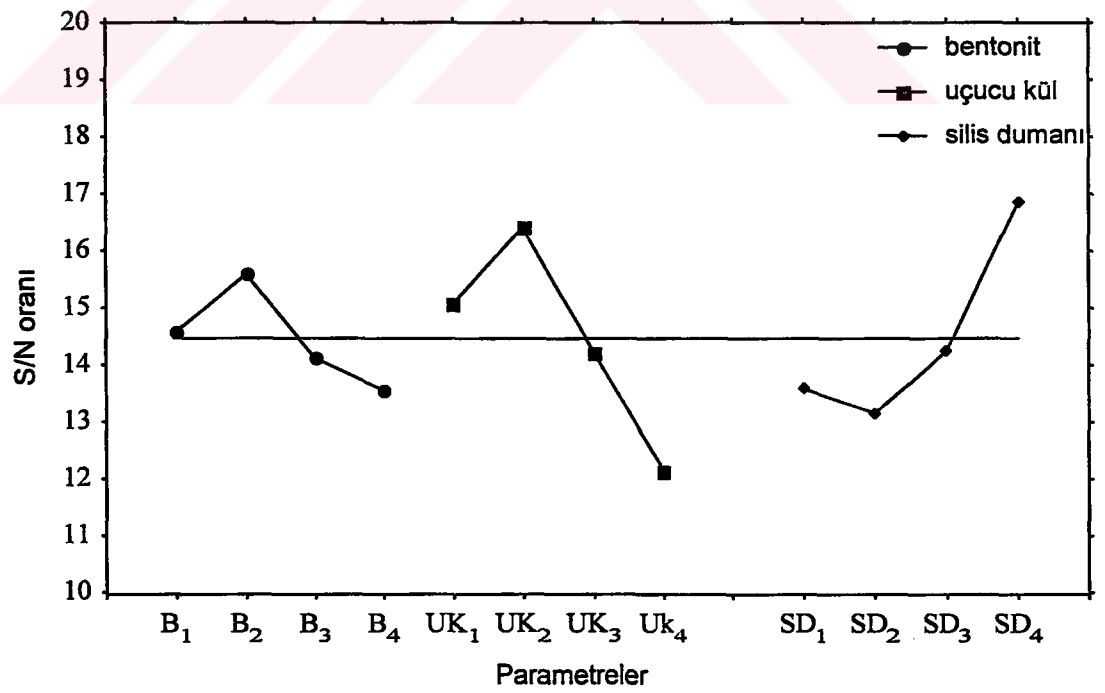
S/K Oranı	Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
0.75	Bentonit	3	1.56	0.52	0.24	0	0
	Uçucu Kül	3	19.67	6.56	2.98	13.06	21.13
	Silis	3	27.37	9.12	4.15	20.77	33.61
	Dumanı	6	13.20	2.2			45.26
	Diğer Toplam	15	61.80				100
1.00	Bentonit	3	8.86	2.95	4.61	6.94	8.24
	Uçucu Kül	3	38.39	12.80	19.95	36.46	43.31
	Silis	3	33.10	11.03	17.20	31.18	37.02
	Dumanı	6	3.85	0.64			11.03
	Diğer Toplam	15	84.2				100
1.25	Bentonit	3	11.38	3.79	5.21	9.20	11.51
	Uçucu Kül	3	43.73	14.58	20.00	41.55	52.00
	Silis	3	20.41	6.80	9.33	18.22	22.81
	Dumanı	6	4.37	0.73			13.69
	Diğer Toplam	15	79.90				100

Çizelgedeki P oranlarından; uçucu külün 14 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde 1.00 ve 1.25 S/K oranı için % 43.31 ve % 52 oranları ile en etkili parametre olduğu, silis dumanının ise 0.75 S/K oranı için %33.61 değeri ile etkili parametre olduğu görülmektedir. Bentonitin ise 14 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde 0.75 ve 1.00 S/K oranı için etkisi fazla olmazken 1.25 S/K oranı için %11 oranında etkili olduğu görülmektedir.

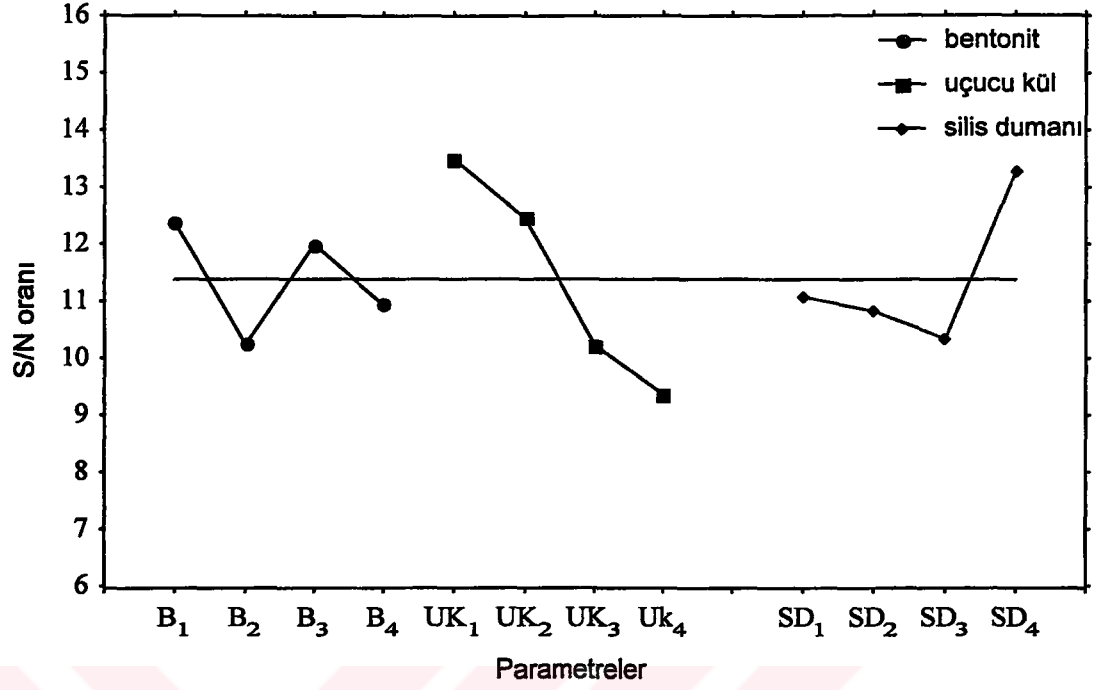
Parametrelerin ve parametre seviyelerinin 14 günlük serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek için çizilen grafikler şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.4. Parametrelerin 14 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=0.75)



Şekil 4.5. Parametrelerin 14 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=1.00)



Şekil 4.6. Parametrelerin 14 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=1.25)

14 günlük serbest basınç mukavemetleri için yapılan S/N analizleri, varyans analizleri ve çizilen grafiklerin (şekil 4.4, 4.5, 4.6) birlikte değerlendirilmesi sonucunda belirlenen bulgular şunlardır:

Bentonit oranı genellikle serbest basınç mukavemetini düşürmektedir (Huang 1997) fakat 14 günlük serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi çok fazla olmayıp ortalamaya yakındır.

S/K oranının 0.75 ve 1.25 olduğu durumlarda uçucu kül oranı arttıkça serbest basınç mukavemeti hızla azalma göstermektedir (Mirza et al 2002, Huang 2001). S/K oranının 1.00 olduğu durumda %20 uçucu kül oranına (2. Seviye) kadar serbest basınç mukavemeti artmakta bu orandan sonra hızlı bir şekilde azalmaktadır.

Her üç S/K oranında silis dumanı oranı arttıkça genellikle 14 günlük serbest basınç mukavemeti artmaktadır. Özellikle silis dumanının 4. seviyesinde genel ortalamadan oldukça yüksek sonuçlar elde edilmektedir.

4.1.4. Karışımların 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi

Çizelge 4.3’de verilen 28 günlük serbest basınç mukavemetleri için yapılan S/N analizi ile belirlenen deneylere ait S/N değerleri çizelge 4.11’de, parametre seviyelerinin S/N değerleri ise çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Deney sonuçlarının S/N değerleri (28 günlük)

Deney No.	Parametreler ve Seviyeleri			S/N Oranı		
	Bentonit	Uçucu Kül	Silis Dumanı	S/K=0.75	S/K=1.00	S/K=1.25
1	1	1	1	22.70	17.60	17.04
2	1	2	2	20.40	16.63	16.14
3	1	3	3	19.24	14.81	12.01
4	1	4	4	21.93	17.53	12.28
5	2	1	2	22.04	16.95	14.09
6	2	2	1	19.74	18.53	14.37
7	2	3	4	23.58	20.34	15.50
8	2	4	3	18.76	14.51	10.77
9	3	1	3	22.02	18.05	13.46
10	3	2	4	22.54	20.91	16.51
11	3	3	1	19.13	16.94	14.47
12	3	4	2	18.21	13.39	11.22
13	4	1	4	23.57	18.99	16.86
14	4	2	3	22.97	17.47	13.00
15	4	3	2	21.41	14.71	10.07
16	4	4	1	15.56	12.47	10.15
Ortalama S/N Oranı				20.86	16.86	13.62

Çizelge 4.12. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (28 günlük)

S/K oranı	Parametre	S/N Oranı			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
0.75	Bentonit	21.07	21.03	20.47	20.88
	Uçucu Kül	22.58	21.41	20.84	18.62
	Silis Dumanı	19.28	20.52	20.75	22.90
1.00	Bentonit	16.64	17.58	17.32	15.91
	Uçucu Kül	17.90	18.38	16.70	14.48
	Silis Dumanı	16.38	15.42	16.21	19.44
1.25	Bentonit	14.37	13.68	13.91	12.52
	Uçucu Kül	15.36	15.00	13.01	11.11
	Silis Dumanı	14.01	12.88	12.31	15.29

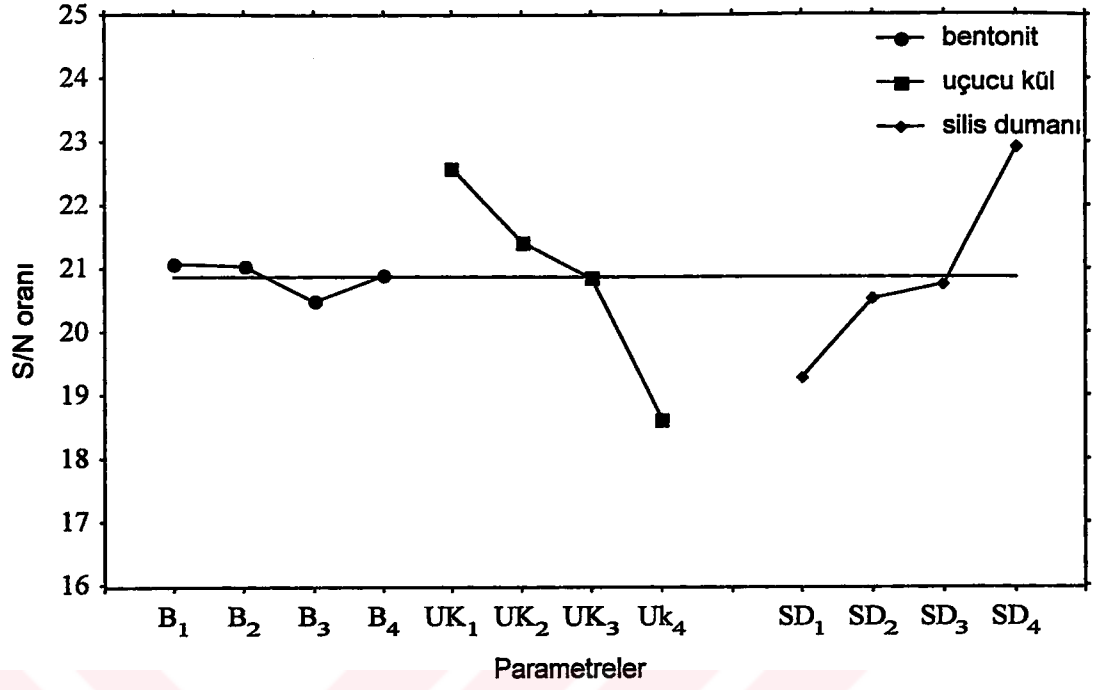
28 günlük basınç mukavemetlerine ait üç farklı S/K oranı için ayrı ayrı yapılan varyans analizi sonuçları çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Varyans analiz tablosu (28 günlük)

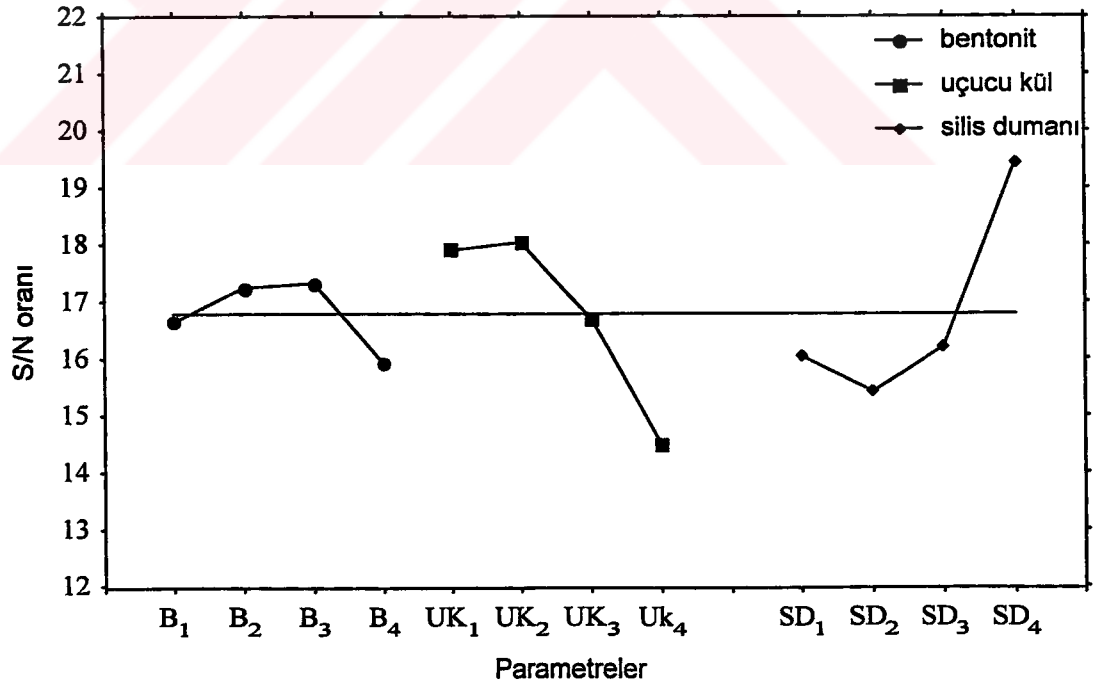
S/K Oranı	Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
0.75	Bentonit	3	0.89	0.30	0.12	0.00	0.00
	Uçucu Kül	3	33.24	11.08	4.47	25.81	33.87
	Silis Dumanı	3	27.19	9.26	3.65	19.75	25.92
	Diğer	6	14.88	2.48			40.22
	Toplam	15	76.20				100
1.00	Bentonit	3	6.74	2.25	3.78	4.96	5.87
	Uçucu Kül	3	36.45	12.15	20.45	34.67	41.11
	Silis Dumanı	3	37.59	12.53	21.09	35.81	42.45
	Diğer	6	3.56	0.59			10.57
	Toplam	15	84.35				100.00
1.25	Bentonit	3	7.43	2.48	1.42	2.21	2.59
	Uçucu Kül	3	46.60	15.53	8.92	41.38	48.53
	Silis Dumanı	3	20.78	6.93	3.98	15.56	18.25
	Diğer	6	10.44	1.74			30.63
	Toplam	15	82.26				100

Yukarıdaki çizelgede verilen P değerlerinden; 0.75 ve 1.25 S/K oranları için en etkili parametrenin %33.87 ve %48.53 oranları ile uçucu kül olduğu, S/K oranının 1.00 olduğu durumda ise %42.45 oranı ile silis dumanının en etkili parametre olduğu görülmektedir. Her üç S/K oranı için bentonitin etkisinin oldukça az olduğu ve ortalamaya yakın değerler aldığı görülmektedir.

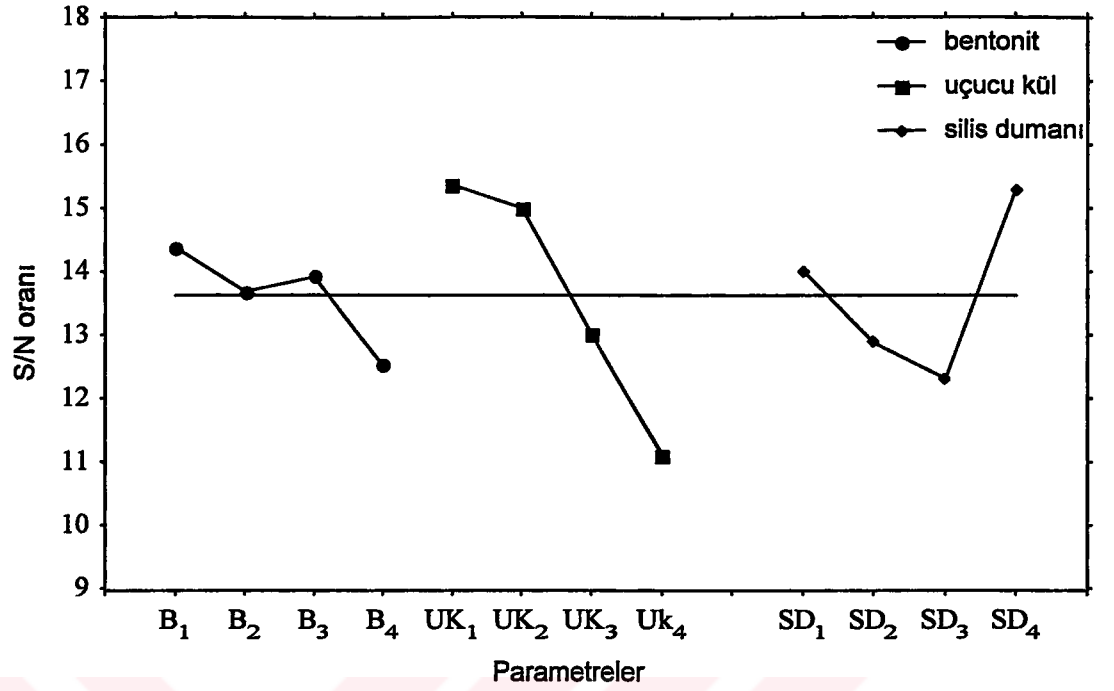
Parametrelerin ve parametre seviyelerinin 28 günlük serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren grafikler şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.7. Parametrelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=0.75)



Şekil 4.8. Parametrelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=1.00)



Şekil 4.9. Parametrelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetine etkileri (S/K=1.25)

28 günlük serbest basınç mukavemetleri için yapılan S/N analizleri, varyans analizleri ve çizilen grafiklerin (şekil 4.7, 4.8, 4.9) birlikte değerlendirilmesi sonucunda belirlenen bulgular şunlardır.

S/K oranının 0.75 ve 1.25 olduğu durumlarda, uçucu kül oranı arttıkça basınç mukavemeti azalmaktadır (Mirza et al 2002, Huang 2001, Huang 1997). S/K oranının 1.00 olduğu durumda %20 uçucu kül oranına (2. Seviye) kadar basınç mukavemeti artmakta, bu orandan sonraki 3. ve 4. seviyelerde (%30 ve %40) hızla düşmektedir.

S/K oranının 0.75 ve 1.00 olduğu durumlarda bentonitin 28 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi bulunmamakta (Huang 1997), genel ortalamaya yakın sonuçlar elde edilmektedir. 1.25 S/K oranında ise, bentonitin 1., 2. ve 3. seviyelerinde ortalamanın biraz üzerinde sonuçlar elde edilmekte, bentonitin 4. seviyesinde (%5) ise serbest basınç mukavemetinde önemli derecede azalma görülmektedir. Bunun nedeni S/K oranının arttıkça bentonit enjeksiyon karışımında

poroziteyi artırıcı yönde rol oynamasıdır (Huang 1997). Silis dumanı serbest basınç mukavemetini artırıcı yönde etki etmektedir. 0.75 S/K oranında silis dumanı arttıkça 28 günlük serbest basınç mukavemeti de artmaktadır. 1.00 S/K oranında %5 silis dumanı oranına kadar 28 günlük serbest basınç mukavemeti azalma gösterirken %10 ve %20 silis dumanı oranlarında artma görülmektedir. 1.25 S/K oranı için %10 silis dumanı oranına kadar 28 günlük serbest basınç mukavemetinde azalma olurken %20 oranında hızlı bir artış görülmektedir.

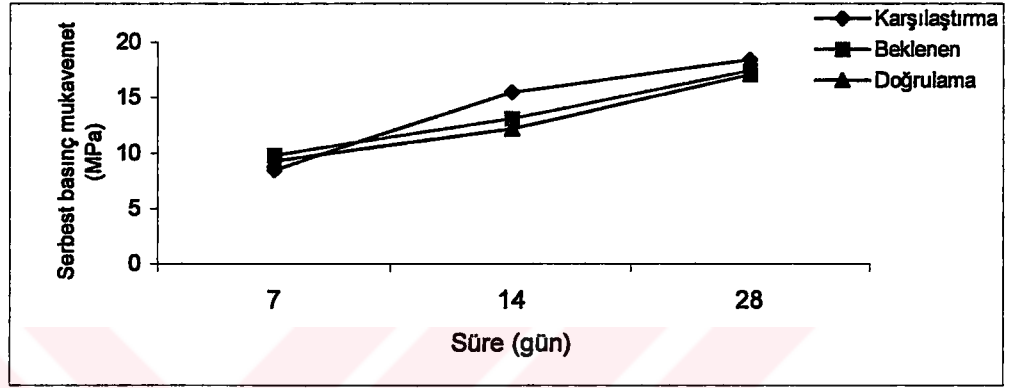
4.1.5. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve değerlendirme

0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranlarında 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin maksimum olduğu değeri ve karışım oranlarını belirlemek için Taguchi Yöntemi ile beklenen değerler ve güven aralıkları hesaplanmış ve çizelge 4.14’de verilmiştir. Ayrıca serbest basınç mukavemetlerinin maksimum olacağı karışım oranları için hazırlanan örnekler üzerinde doğrulama deneyleri yapılmış ve doğrulama deney sonuçlarının ortalaması çizelge 4.13’de verilmiştir.

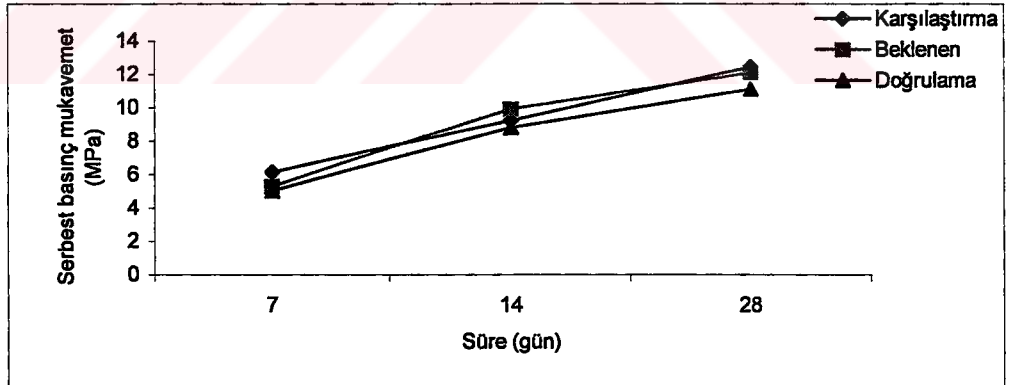
Çizelge 4.14. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler

Deney Süresi (gün)	S/K Oranı	Optimum koşullardaki Parametre Oranı			Beklenen Basınç Muk. (Mpa)	% 90 güven Aralığı (Mpa)	Doğrulama Deney Sonucu (Mpa)
		Bentonit	Uçucu Kül	Silis Dumanı			
7	0.75	0.5	10	20	9.77	8.51-11.23	9.25
	1.00	0	10	20	5.30	4.90-5.70	6.35
	1.25	0	10	0	4.19	3.39-5.18	4.58
14	0.75	0	10	20	13.10	10.30-16.61	12.20
	1.00	0.5	20	20	9.91	8.71-11.26	8.82
	1.25	0	10	20	6.58	5.74-7.55	6.60
28	0.75	0	10	20	17.44	13.55-22.45	17.10
	1.00	0.5	20	20	12.13	10.05-13.27	11.10
	1.25	0	10	20	7.74	5.76-8.52	7.25

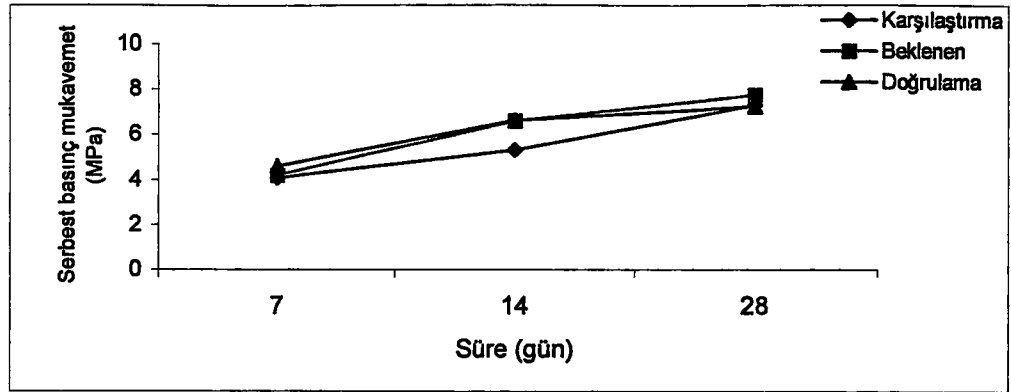
Enjeksiyon karışımlarında serbest basınç mukavemetinin maksimum olduğu doğrulama deney sonuçlarının, yalnız çimento kullanılan (karşılaştırma) deney sonuçları ve beklenen değerler ile karşılaştırmasını gösteren grafikler şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.10. Beklenen değerlerle, doğrulama ve yalnız çimento ile yapılan deney sonuçlarının karşılaştırması (S/K=0.75)



Şekil 4.11. Beklenen değerlerle, doğrulama ve yalnız çimento ile yapılan deney sonuçlarının karşılaştırması (S/K=1.00)



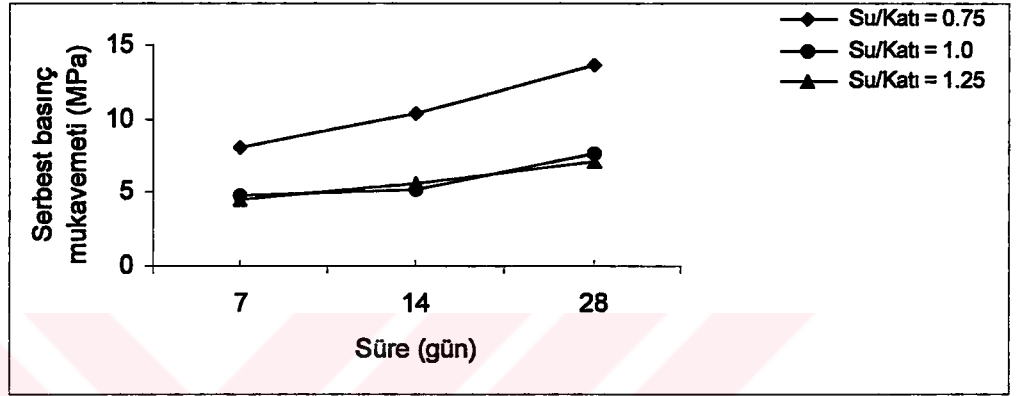
Şekil 4.12. Beklenen değerlerle, doğrulama ve yalnız çimento ile yapılan deney sonuçlarının karşılaştırması (S/K=1.25)

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

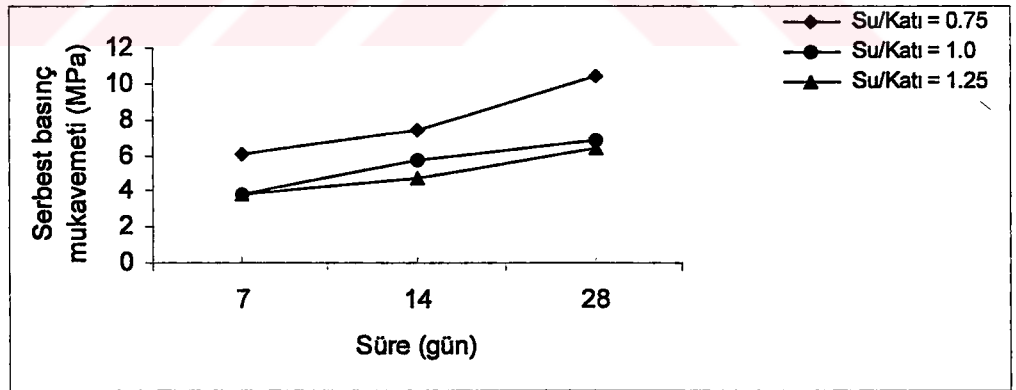
- Optimum koşullarda beklenen serbest basınç mukavemetlerinin, bu koşullarda yapılan doğrulama deneylerine ait serbest basınç mukavemetlerine (7, 14 ve 28 günlük) oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi Yöntemi ile yapılan serbest basınç mukavemeti tahmininin (beklenen değer) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir.
- Her üç S/K oranı için doğrulama deney sonuçları ile yalnız çimento ile yapılan deney sonuçlarının genelde birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Yani sadece çimentonun kullanılan karşılaştırma deney karışımlarının serbest basınç mukavemetlerine, katkı malzemelerinin kullanıldığı doğrulama deney karışımları ile ulaşıldığı görülmektedir. Bu aynı serbest basınç mukavemetine, hem daha az çimento kullanılarak hemde daha ekonomik olarak ulaşılabilindiğini göstermektedir.
- S/K oranının artmasının serbest basınç mukavemetine olan olumsuz etkisinin, sadece çimento ile yapılan enjeksiyon karışımlarına (karşılaştırma deneyleri) nazaran katkı malzemeleri ile yapılan enjeksiyon karışımlarında (doğrulama deneyleri) daha az olduğu görülmektedir.

4.1.6. Deneylerde serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi

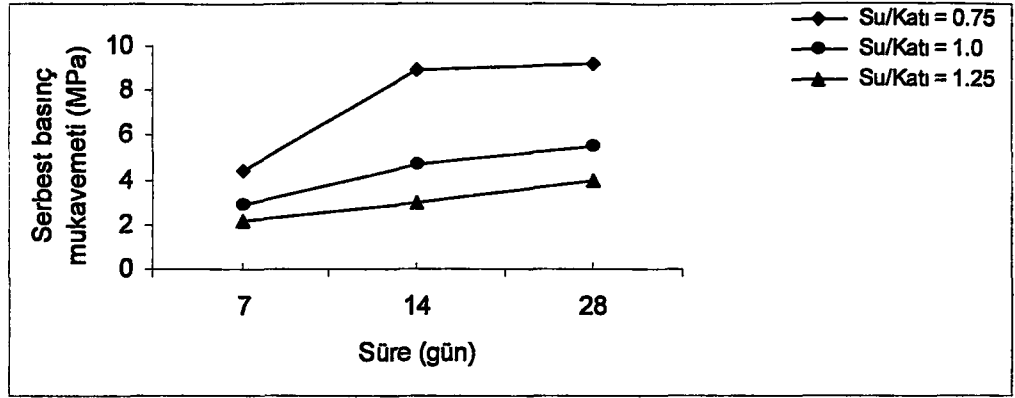
0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranları için ayrı ayrı yapılan 16 farklı karışımın serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimini belirlemek için çizilen grafikler şekil 4.13-4.28'de verilmiştir.



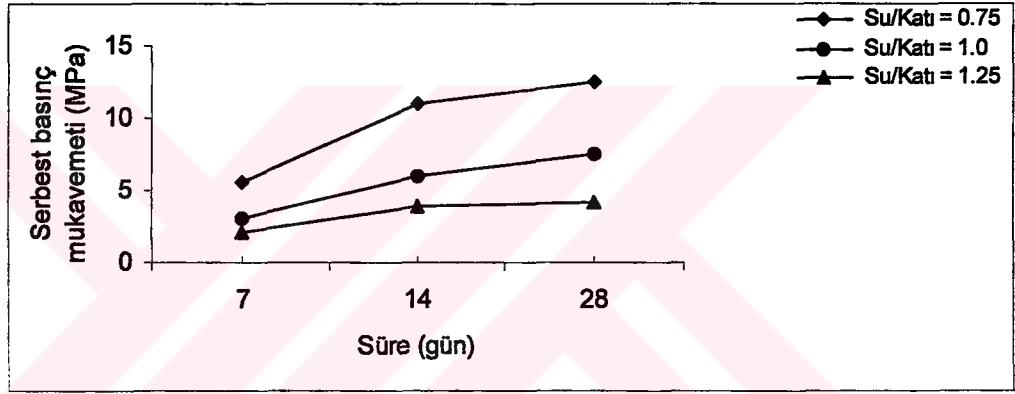
Şekil 4.13. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 1)



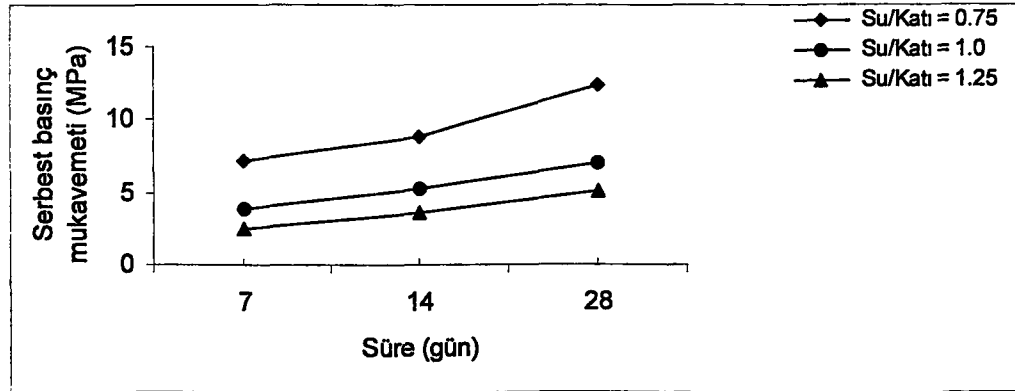
Şekil 4.14. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 2)



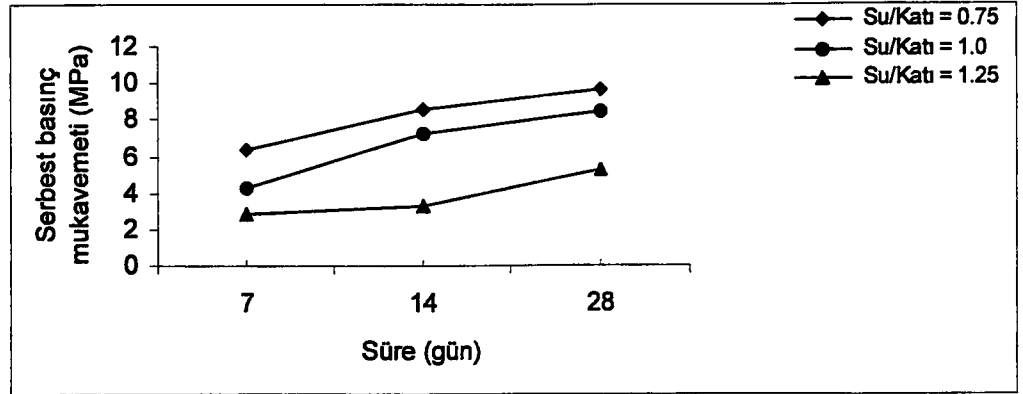
Şekil 4.15. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 3)



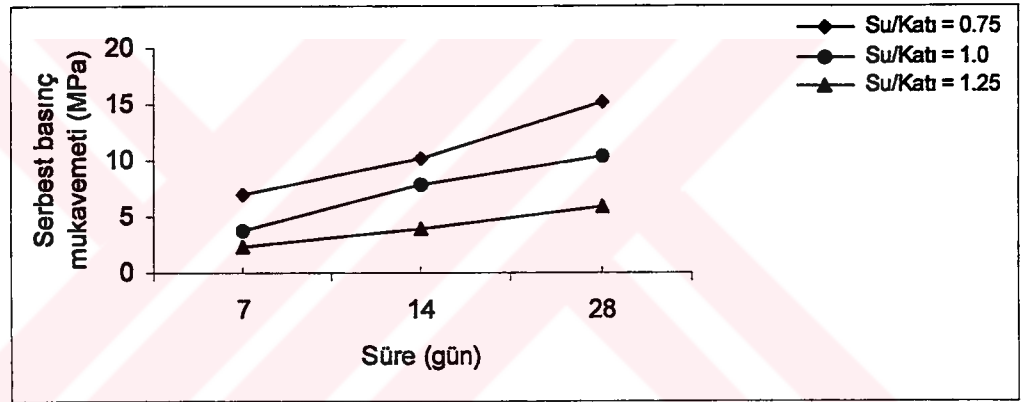
Şekil 4.16. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 4)



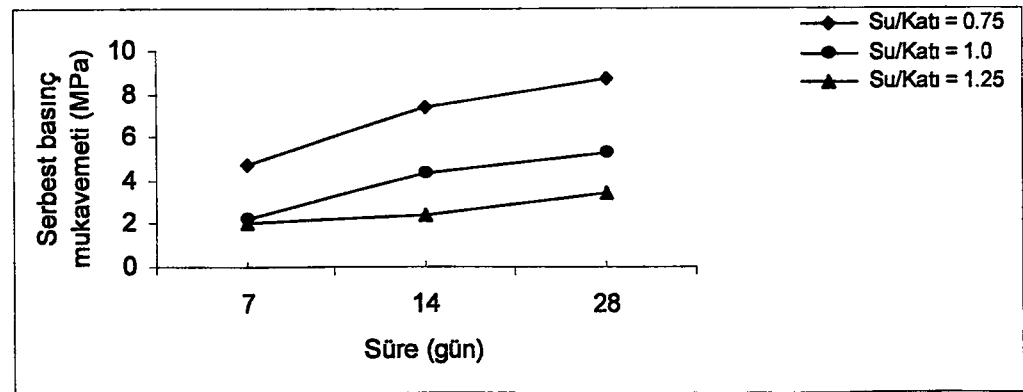
Şekil 4.17. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 5)



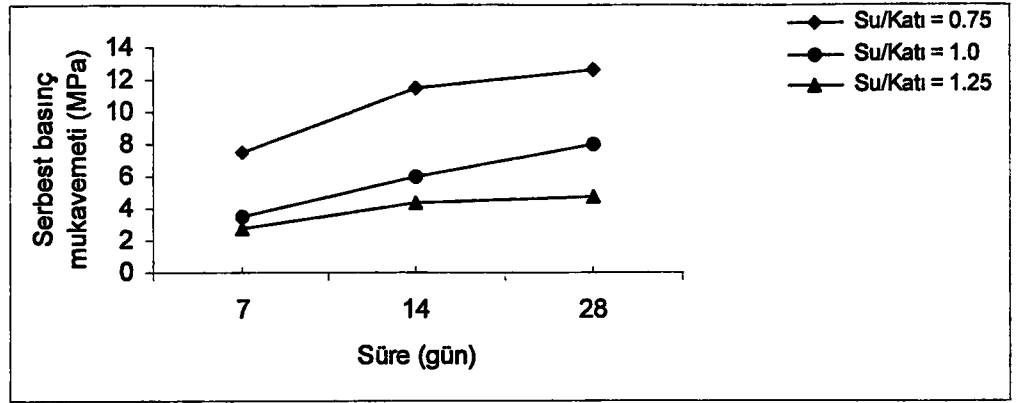
Şekil 4.18. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 6)



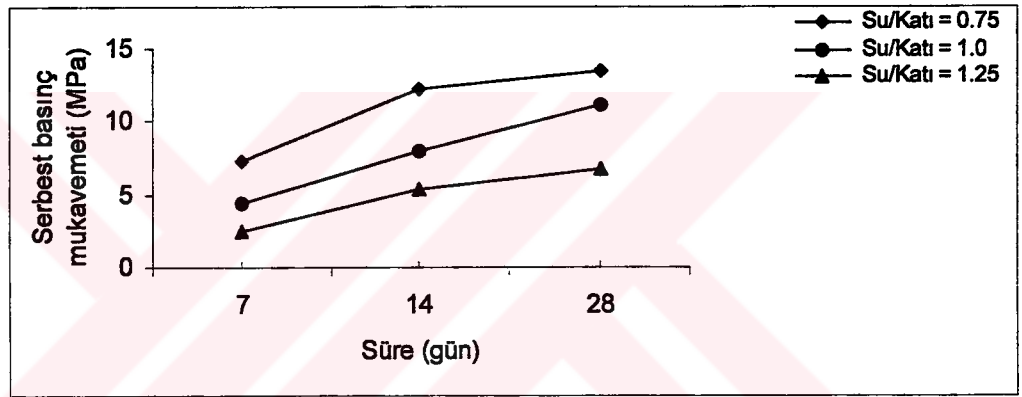
Şekil 4.19. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 7)



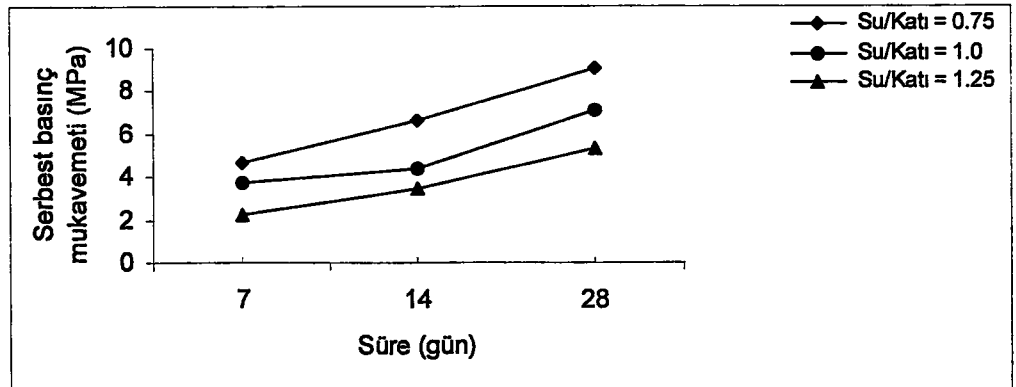
Şekil 4.20. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 8)



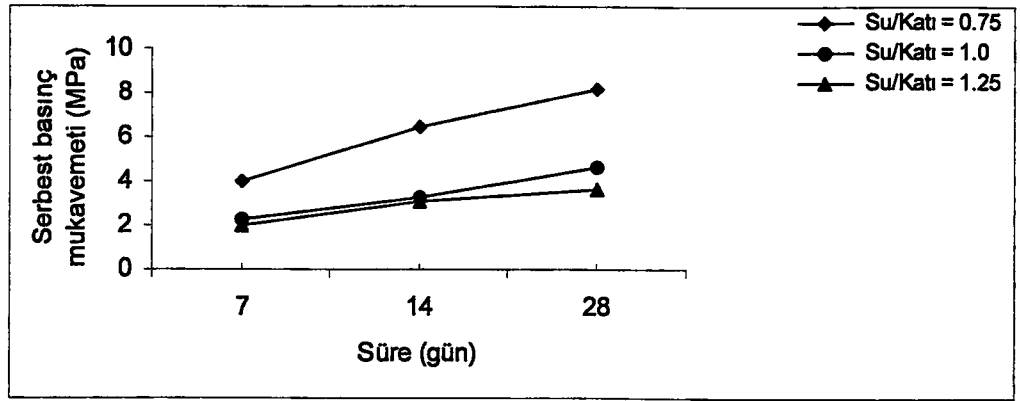
Şekil 4.21. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 9)



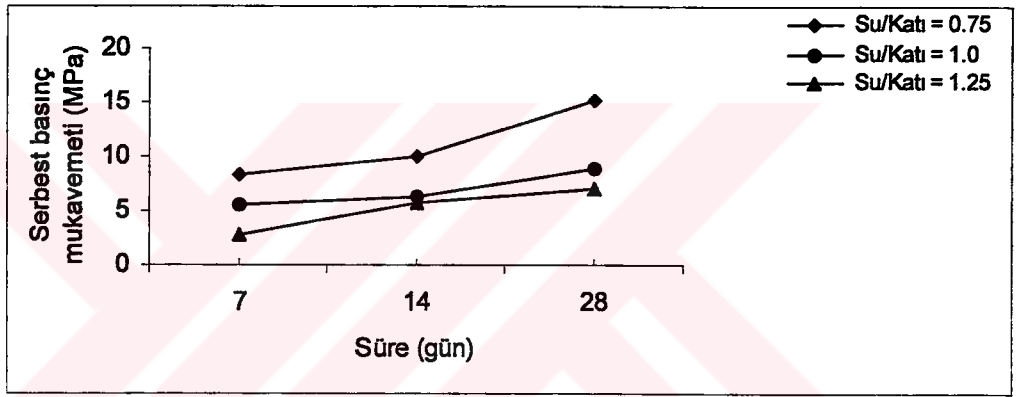
Şekil 4.22. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 10)



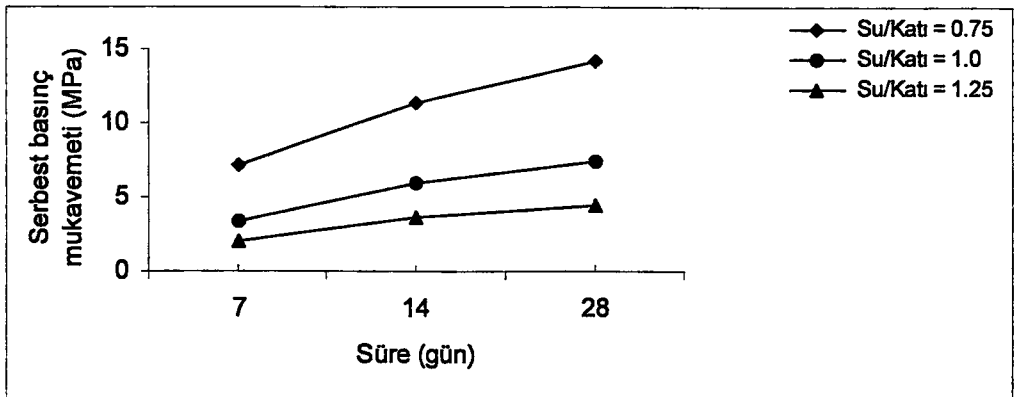
Şekil 4.23. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 11)



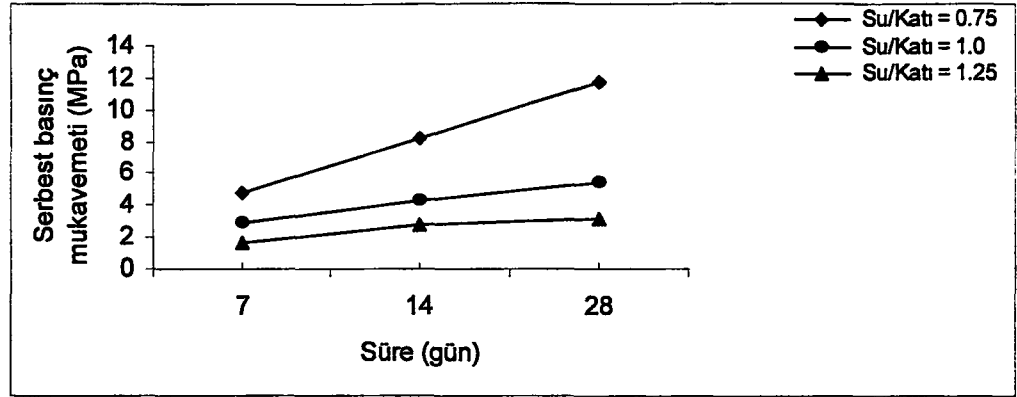
Şekil 4.24. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 12)



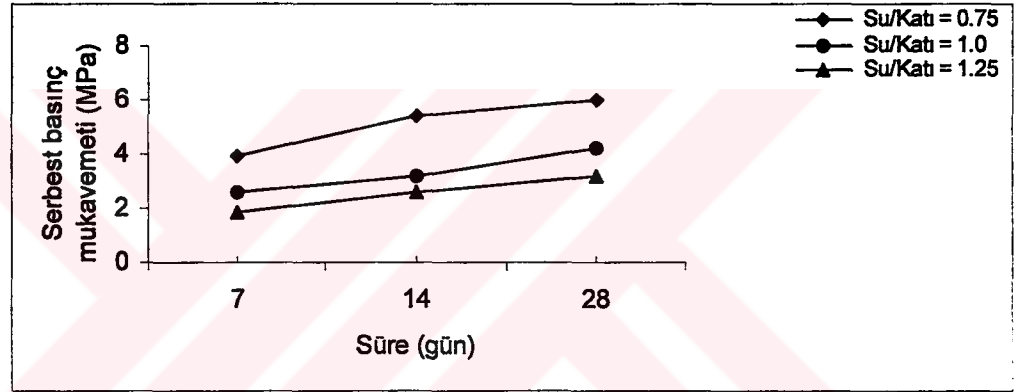
Şekil 4.25. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 13)



Şekil 4.26. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 14)

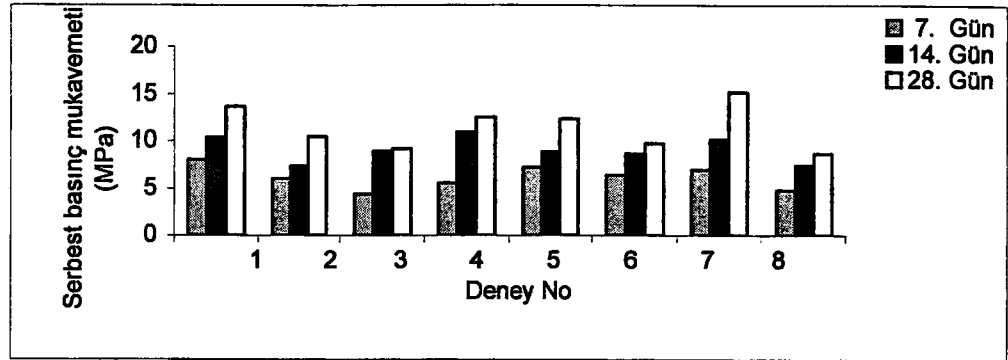


Şekil 4.27. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 15)

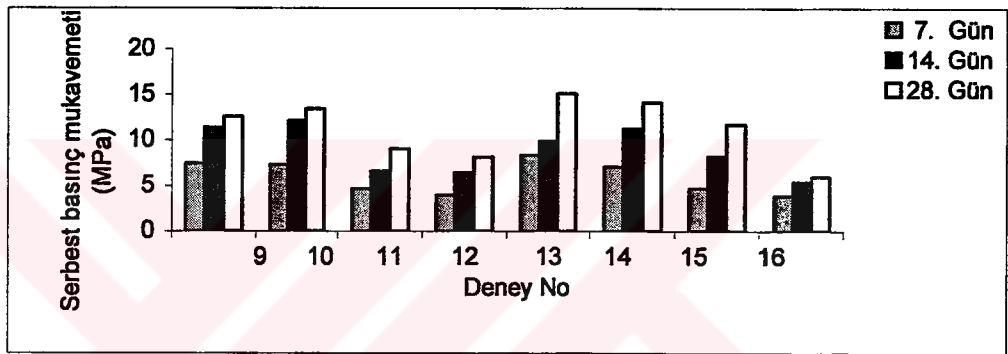


Şekil 4.28. Serbest basınç mukavemetinin zamana göre değişimi (Deney No. 16)

16 deney için çizilen değişim grafikleri incelendiğinde, bütün deneylerde zaman arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir (Huang 2001). Yapılan deneylere ait 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerini gösteren histogramlar şekil 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 ve 4.34’de verilmiştir.

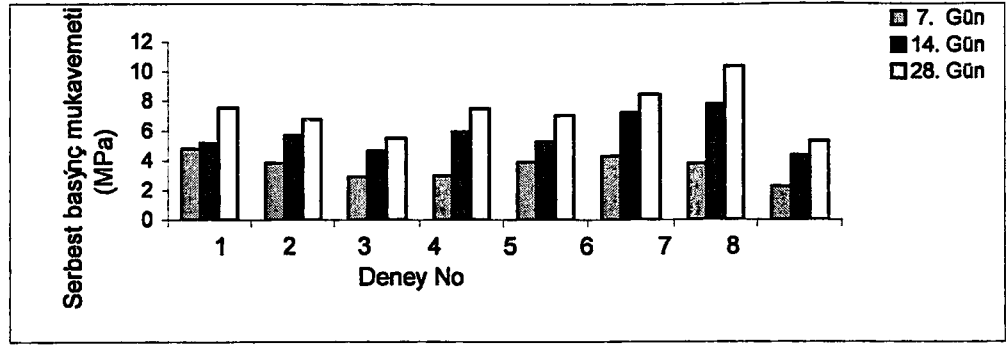


Şekil 4.29. S/K=0.75 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No. 1-8)

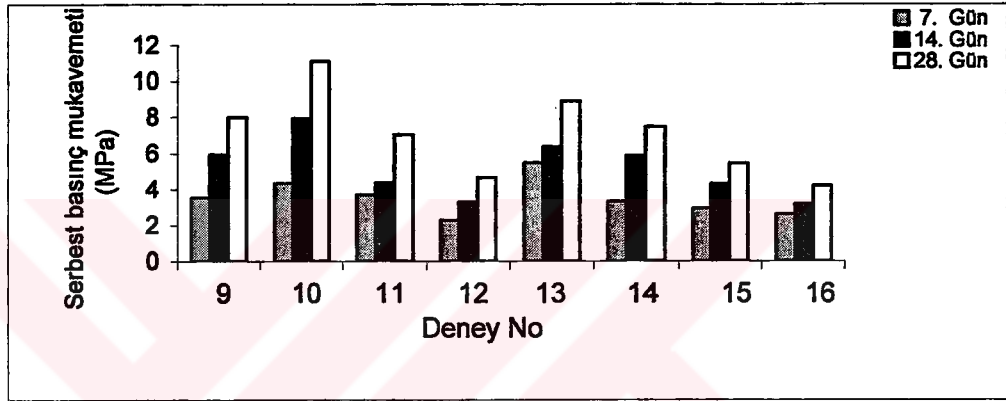


Şekil 4.30. S/K=0.75 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No. 9-16)

En yüksek 7 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 0.75 için %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 8.4 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 3.89 Mpa olarak bulunmuştur. S/K oranı 1.00 için en yüksek 7 günlük serbest basınç mukavemeti, %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 5.5 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 8 No. lu deneyde (%0.5 bentonit, %40 uçucu kül ve %10 silis dumanı) 2.24 Mpa olarak bulunmuştur. En yüksek 7 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.25 için %0 bentonit, %10 uçucu kül ve %0 silis dumanının kullanıldığı 1 No. lu deneyde 4.46 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 15 No. lu deneyde (%3 bentonit, %30 uçucu kül ve %5 silis dumanı) 1.65 Mpa olarak bulunmuştur.

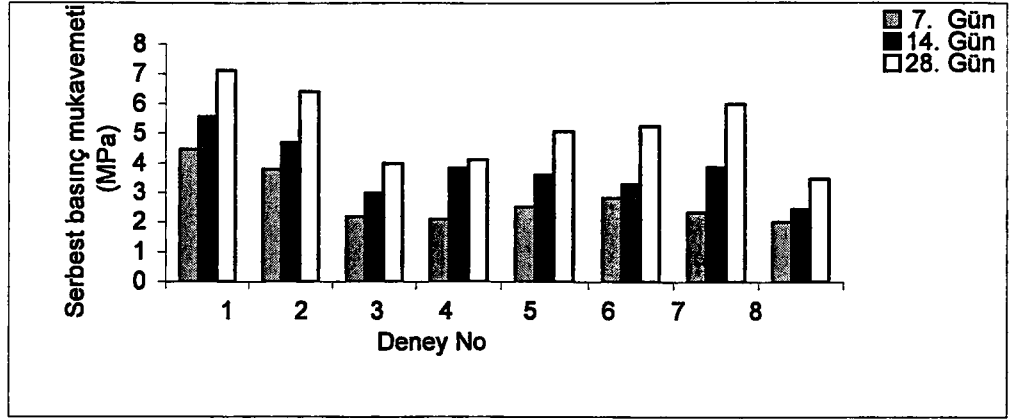


Şekil 4.31. S/K=1.00 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No. 1-8)

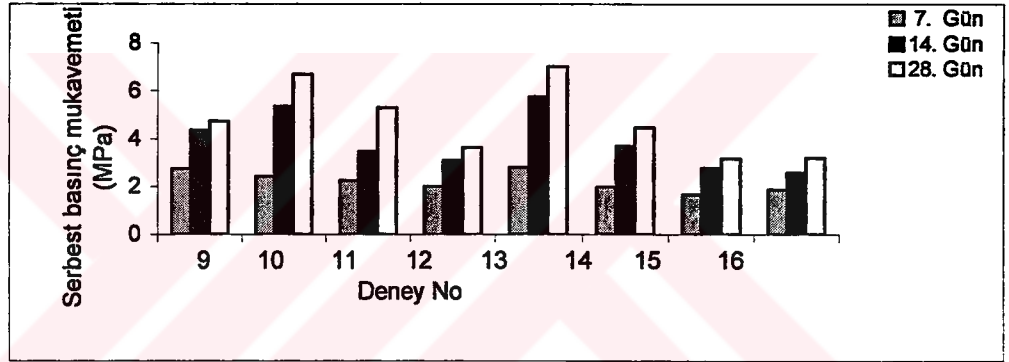


Şekil 4.32. S/K=1.00 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No. 9-16)

S/K oranı 0.75 için en yüksek 14 günlük serbest basınç mukavemeti, %1 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 10 No. lu deneyde 12.18 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 5.44 Mpa olarak bulunmuştur. En yüksek 14 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.00 için %1 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 10 No. lu deneyde 7.93 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 3.18 Mpa olarak bulunmuştur. En yüksek 14 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.25 için %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 5.74 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 8 No. lu deneyde (%0.5 bentonit, %40 uçucu kül ve %10 silis dumanı) 2.44 Mpa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.33. S/K=1.25 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No. 1-8)



Şekil 4.34. S/K=1.25 için serbest basınç mukavemetleri (Deney No. 9-16)

En yüksek 28 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 0.75 için %0.5 bentonit, %30 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 7 No. lu deney ve %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 15.14 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 6.00 Mpa olarak bulunmuştur.

En yüksek 28 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.00 için %1 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 10 No. lu deneyde 11.11 Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 4.20 Mpa olarak bulunmuştur.

En yüksek 28 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.25 için %0 bentonit, %10 uçucu kül ve %0 silis dumanının kullanıldığı 1 No. lu deneyde 7.12Mpa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 15 No. lu deneyde (%3 bentonit, %30 uçucu kül ve %5 silis dumanı) 3.19 Mpa olarak bulunmuştur.

Üç farklı S/K oranı için ayrı ayrı yapılan 7. günden 14. güne (7-14), 14. günden 28. güne (14-28) ve 7 .günden 28. güne (7-28) serbest basınç mukavemetlerindeki artış oranları hesap edilmiş ve çizelge 4.15, 4.16 ve 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Serbest basınç mukavemetlerinin zamana göre artış oranları (S/K=0.75)

Deney No.	7. gün-14. gün Artış oranı (%)	14. gün-28. gün Artış oranı (%)	7. gün-28. gün Artış oranı (%)
1	29.28	31.33	69.77
2	22.59	41.99	74.04
3	104.42	2.68	109.91
4	98.73	14.02	126.60
5	23.08	39.01	71.18
6	34.93	12.44	51.72
7	46.74	49.31	119.10
8	56.26	17.10	82.98
9	52.58	10.49	68.58
10	65.68	10.26	82.68
11	42.43	36.89	94.97
12	63.64	25.35	105.12
13	18.57	51.97	80.20
14	58.27	25.51	98.64
15	74.75	42.45	148.94
16	39.73	10.29	54.11

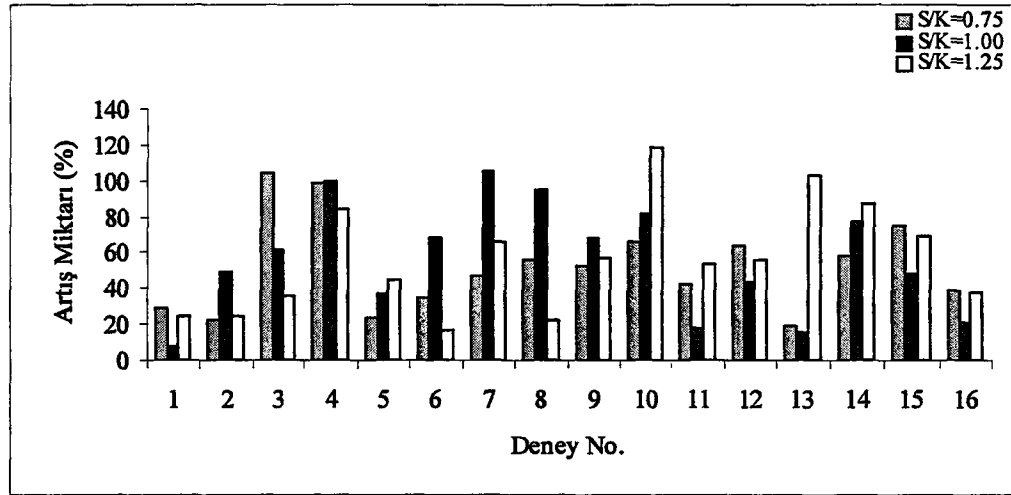
Çizelge 4.16. Serbest basınç mukavemetlerinin zamana göre artış oranları (S/K=1.00)

Deney No.	7. gün-14. gün Artış oranı (%)	14. gün-28. gün Artış oranı (%)	7. gün-28. gün Artış oranı (%)
1	8.16	45.52	57.40
2	48.79	18.43	76.21
3	61.26	18.17	90.57
4	99.89	25.51	150.89
5	36.43	33.31	81.87
6	68.69	17.55	98.29
7	105.50	32.57	172.43
8	95.68	21.63	138.00
9	68.34	34.70	126.75
10	82.22	40.16	155.40
11	18.27	61.11	90.55
12	43.97	43.31	106.32
13	16.00	39.60	61.94
14	77.11	27.04	125.00
15	48.57	25.83	86.94
16	21.56	32.32	60.84

Çizelge 4.17. Serbest basınç mukavemetlerinin zamana göre artış oranları (S/K=1.25)

Deney No.	7. gün-14. gün Artış oranı (%)	14. gün-28. gün Artış oranı (%)	7. gün-28. gün Artış oranı (%)
1	24.50	28.07	59.45
2	24.10	36.29	69.13
3	36.24	34.57	83.33
4	83.73	7.20	96.97
5	44.34	40.41	102.66
6	16.80	59.07	85.80
7	66.28	54.44	156.81
8	22.00	42.08	73.33
9	57.42	8.89	71.41
10	119.26	25.30	174.73
11	53.31	52.45	133.73
12	55.67	17.02	82.17
13	103.43	21.96	148.11
14	87.82	20.81	126.90
15	69.64	14.32	93.93
16	37.77	24.45	71.45

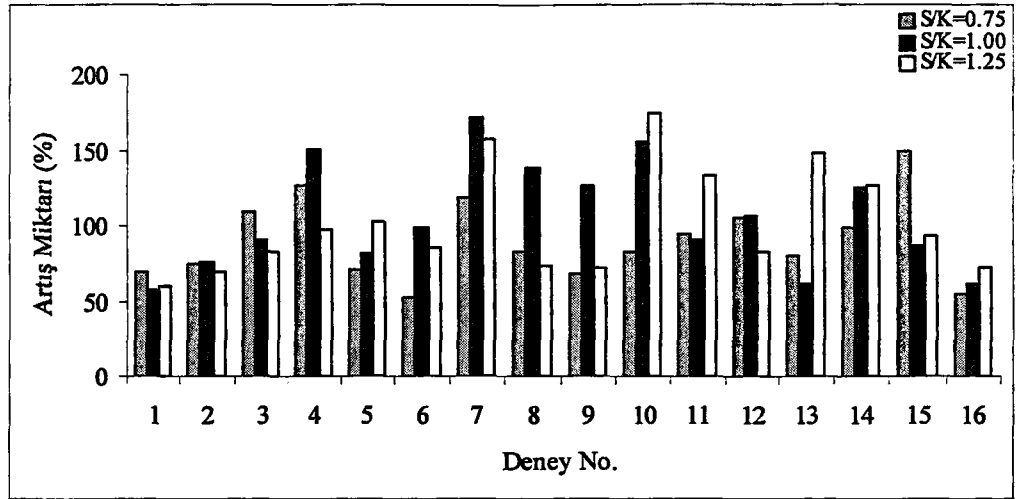
Deneylerde enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinin zamana göre artış oranların gösteren histogramlar Şekil 4.35., 4.36 ve 4.37’de gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Serbest basınç mukavemetlerindeki artış oranları(7-14 günlük)



Şekil.4.36. Serbest basınç mukavemetlerindeki artış oranları(14-28 günlük)



Şekil 4.37.Serbest basınç mukavemetlerindeki artış oranları(7-28 günlük)

7 ve 14 günlük mukavemetler karşılaştırıldığında en fazla artış oranı $S/K=1.25$ de %119.25 ile 10 No. lu deneyde, en az artış oranı $S/K=1.00$ da %8.16 ile 1 No. lu deneyde gerçekleşmiştir. 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında en fazla artış oranı $S/K=1.00$ da %61.11 ile 11 No. lu deneyde, en az artış oranı $S/K=0.75$ de %2.68 ile 3 No. lu deneyde gerçekleşmiştir. 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında ise en fazla artış oranı $S/K=1.25$ de %174.73 ile 10 No. lu deneyde, en az artış oranı $S/K=0.75$ de %51.72 ile 6 No. lu deneyde gerçekleşmiştir.

4.2. Enjeksiyon KarışımlarınınPriz Başlama ve Bitiş Süreleri

4.2.1. Karışımların vicat iğnesi deney sonuçları

Üç farklı S/K oranı için bölüm 3.4.2' ye uygun olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen vicat iğnesi deney sonuçları çizelge 4.18' de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.18. Vicat iğnesi deney sonuçları

Deney No.	Priz Süreleri (h)					
	S/K=0.75		S/K=1.00		S/K=1.25	
	Priz Başlama Süresi	Priz Bitiş Süresi	Priz Başlama Süresi	Priz Bitiş Süresi	Priz Başlama Süresi	Priz Bitiş Süresi
1	10.00	15.75	12.50	22.42	32.75	41.25
2	10.75	16.92	13.50	23.33	35.42	68.58
3	11.42	20.17	13.83	30.17	41.00	60.00
4	8.83	18.25	13.66	30.00	32.42	40.92
5	10.08	17.78	11.66	21.58	37.17	49.50
6	8.83	18.33	11.58	21.50	36.83	46.17
7	6.83	16.50	12.58	22.50	39.50	64.17
8	11.33	18.58	15.66	29.42	40.42	69.66
9	7.08	12.83	12.25	21.08	34.42	54.25
10	5.92	14.08	12.25	20.92	36.25	54.08
11	10.50	15.75	11.75	20.75	33.33	42.50
12	12.25	18.08	14.58	28.33	39.58	57.08
13	5.00	12.00	10.58	16.83	33.83	44.00
14	7.33	15.00	10.83	19.83	37.17	53.25
15	8.66	14.83	11.5	25.50	39.08	62.75
16	11.42	17.50	14.00	25.42	39.00	62.66

4.2.2. Priz başlama ve bitiş sürelerinin değerlendirmesi

Çizelge 4.18’de verilen priz başlama ve priz bitiş süreleri kullanılarak L_{16} ortogonal dizin için ayrı ayrı S/N analizleri yapılmış ve yapılan analiz sonucunda 16 deney sonuçları için belirlenen S/N değerleri ile ortalama S/N değerleri çizelge 4.19’de verilmiştir.

Çizelge 4.19. Deney sonuçlarının S/N oranları (Priz süreleri)

Deney No.	Priz Başlama S/N Oranı		Priz Bitiş S/N Oranı	
	S/K=0.75	S/K=1.00	S/K=0.75	S/K=1.00
1	20.00	21.94	23.95	27.01
2	20.63	22.61	24.57	27.36
3	21.15	22.82	26.10	29.59
4	18.92	22.71	25.23	29.54
5	20.07	21.33	25.00	26.68
6	18.92	21.28	25.26	26.65
7	16.69	21.99	24.35	27.04
8	21.09	23.90	25.38	29.37
9	17.00	21.76	22.17	26.48
10	15.45	21.76	22.97	26.41
11	20.42	21.40	23.96	26.34
12	21.76	23.28	25.14	29.04
13	13.98	20.49	21.58	24.52
14	17.30	20.69	23.52	25.95
15	18.75	21.21	23.42	28.13
16	21.75	22.92	24.86	28.10
Ort. S/N	18.96	22.01	24.22	27.39

Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri hesaplanarak, iki farklı S/K oranları (0.75 ve 1.00) için priz başlama süresi çizelge 4.20 ve priz bitiş süresi ise çizelge 4.21’de verilmiştir. Priz başlama süresi için en büyük ortalama S/N değerleri (priz başlangıcının en fazla olduğu); 0.75 S/K oranı için uçucu külün 4. seviyesinde (%40) 20.73 olarak, 1.00 S/K oranı için ise yine uçucu külün 4. seviyesinde 23.2 olarak elde edilmiştir.

Priz bitiş süresi için en büyük ortalama S/N değerleri (priz sona ermesinin en fazla olduğu); 0.75 ve 1.00 S/K oranları için yine uçucu külün 4. seviyesinde sırasıyla 25.15 ve 29.02 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan, uçucu kül oranı artıkça priz başlangıç ve priz bitiş sürelerin de arttığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.20. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (Priz başlangıç)

S/K oranı	Parametre	S/N Oranı			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
0.75	Bentonit	20.18	19.19	18.66	17.98
	Uçucu Kül	17.76	18.07	19.25	20.73
	Silis Dumanı	20.13	20.30	19.14	16.26
1.00	Bentonit	22.52	22.12	22.05	21.33
	Uçucu Kül	21.38	21.59	21.86	23.20
	Silis Dumanı	21.88	22.11	22.29	21.74

Çizelge 4.21. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (Priz bitiş)

S/K oranı	Parametre	S/N Oranı			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
0.75	Bentonit	24.96	25.00	23.56	23.35
	Uçucu Kül	23.17	24.08	24.46	25.15
	Silis Dumanı	24.51	24.53	24.29	23.53
1.00	Bentonit	28.38	27.44	27.07	26.68
	Uçucu Kül	26.17	26.59	27.78	29.02
	Silis Dumanı	27.03	27.80	27.85	26.88

Priz başlama ve bitiş sürelerine bentonit uçucu kül ve silis dumanı seviyelerinin etkisini belirlemek için yapılan varyans (ANOVA) analizleri sonuçları sırasıyla çizelge 4.22 ve

çizelge 4.23’de verilmiştir. Çizelgede yer alan P oranlarından silis dumanının 0.75 S/K oranı için priz başlama süresine en fazla etkisi olan parametre olarak görülmektedir. 1.00 S/K oranı için uçucu külün sonuca en fazla etki eden parametre olduğu görülmektedir. Priz başlama süresine 1.00 S/K oranı için silis dumanının etkisinin olmadığı görülmektedir. Bentonit 0.75 ve 1.00 S/K oranı için sonuca etkisinin az olduğu görülmektedir. Priz bitiş süresine bentonitin 0.75 S/K oranı için sonuca en fazla etki olan parametre ve 1.00 S/K oranı için ise uçucu külün priz bitiş süresine en etkili parametre olduğu görülmektedir. Ayrıca priz bitiş süresine 0.75 ve 1.00 S/K oranı için silis dumanı sonuca en az etki eden parametre olarak görülmektedir.

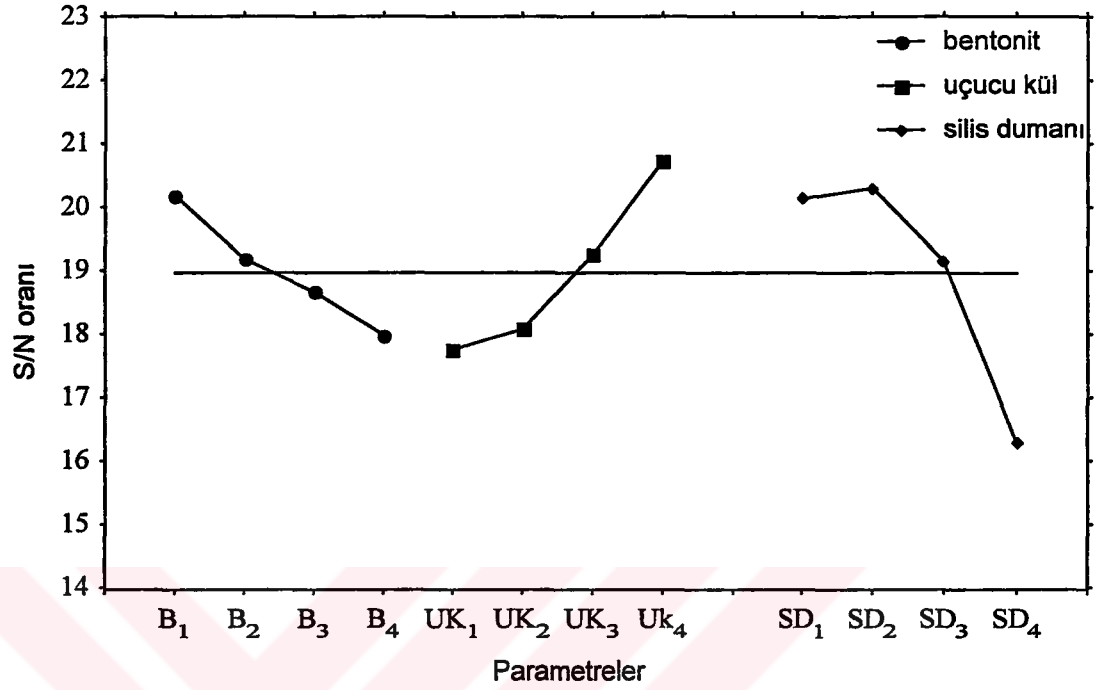
Çizelge 4.22. Varyans analizi tablosu (Priz başlangıç)

S/K Oranı	Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
0.75	Bentonit	3	11.90	3.97	9.25	10.61	13.58
	Uçucu Kül	3	21.75	7.25	16.92	20.47	26.18
	Silis Dumanı	3	41.95	13.98	32.63	40.66	52.02
	Diğer	6	2.57	0.43			8.23
	Toplam	15	78.17				100
1.00	Bentonit	3	2.94	0.98	3.04	1.97	14.44
	Uçucu Kül	3	8.07	2.69	8.34	7.11	52.01
	Silis Dumanı	3	0.71	0.24	0.74	0	0
	Diğer	6	1.93	0.32			33.55
	Toplam	15	13.66				100

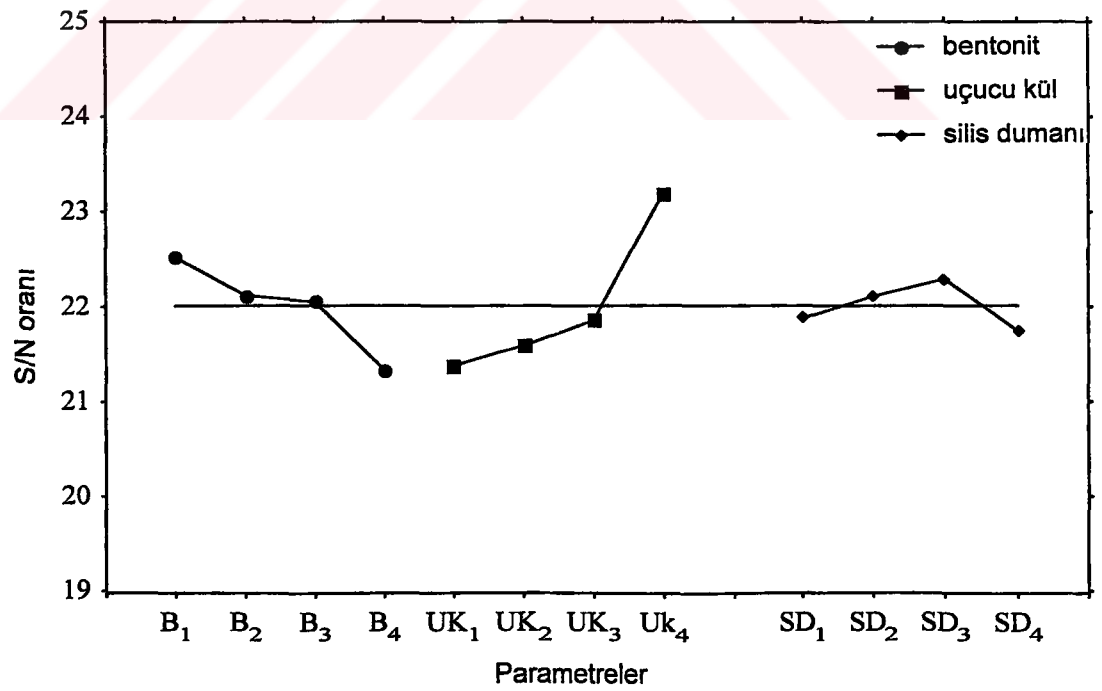
Çizelge 4.23. Varyans analizi tablosu (Priz bitiş)

S/K Oranı	Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
0.75	Bentonit	3	9.39	3.13	6.76	8.00	34.83
	Uçucu Kül	3	8.17	2.72	5.88	6.78	29.51
	Silis Dumanı	3	2.63	0.88	2.54	1.24	5.42
	Diğer	6	2.78	0.46	1.90		30.25
	Toplam	15	22.96				100
1.00	Bentonit	3	6.35	2.12	4.82	5.04	15.87
	Uçucu Kül	3	19.65	6.55	14.91	18.33	57.77
	Silis Dumanı	3	3.09	1.03	2.35	1.77	5.59
	Diğer	6	2.63	0.44			20.77
	Toplam	15	31.73				100

Parametre ve seviyelerin priz başlama ve bitiş sürelerine etkilerini gösteren grafikler şekil 4.38, 4.39, 4.40 ve 4.41’de verilmiştir.



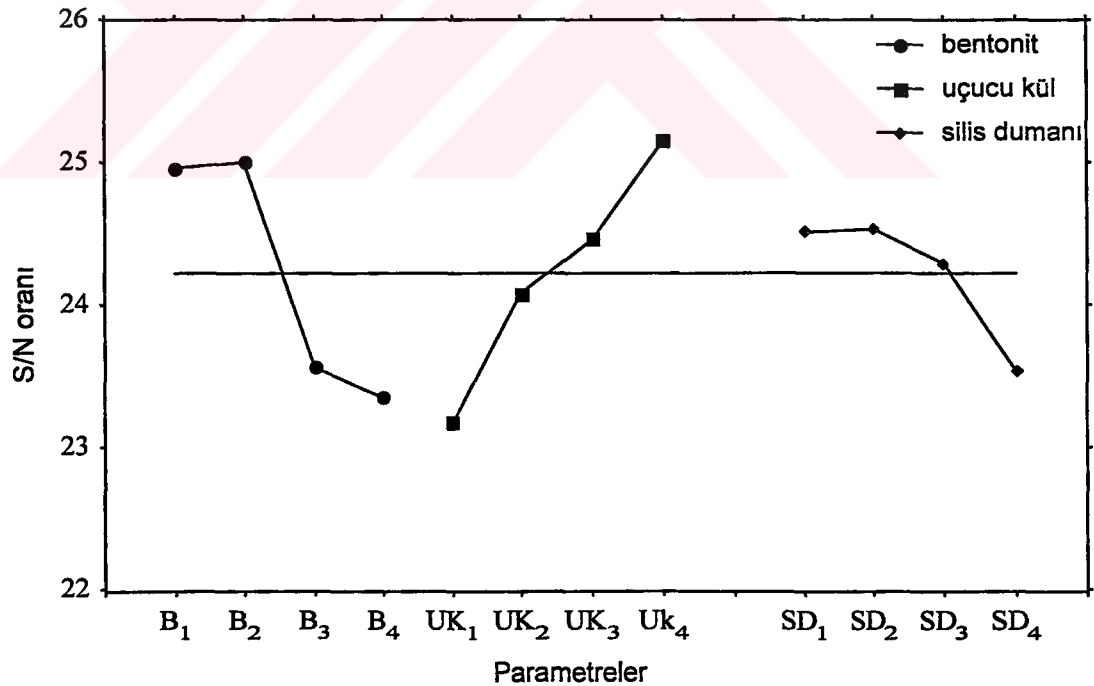
Şekil 4.38. Parametrelerin priz başlama süresine etkileri (S/K=0.75)



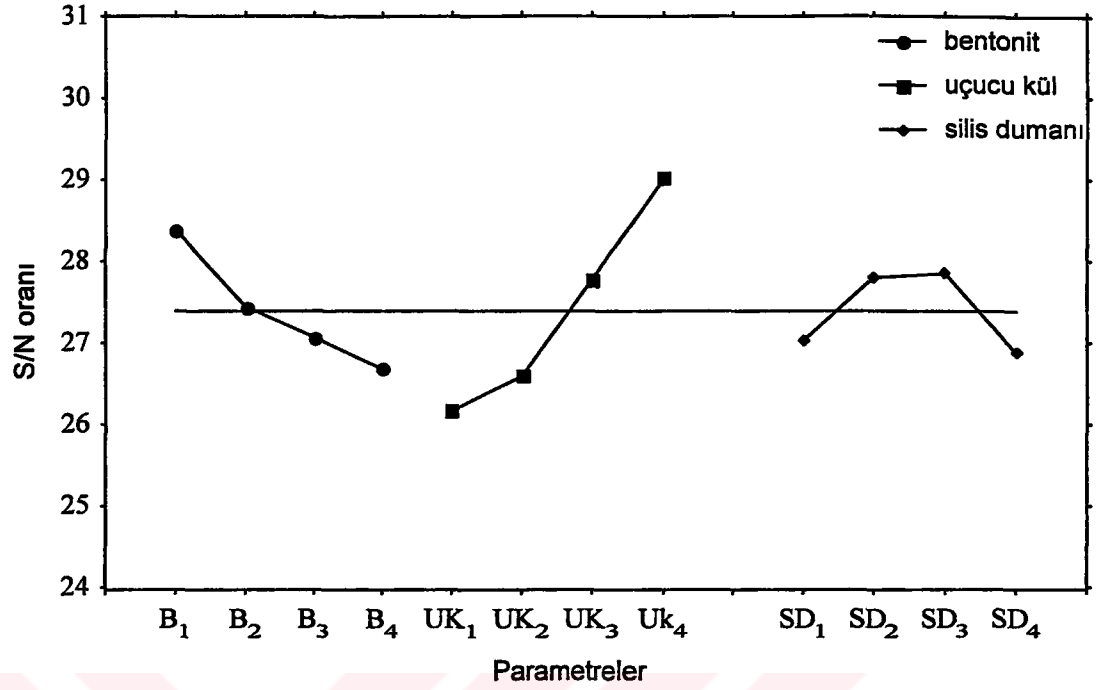
Şekil 4.39. Parametrelerin priz başlama süresine etkileri (S/K=1.00)

Varyans analizi sonuçları ile şekil 4.35 ve şekil 4.36 birlikte incelendiğinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Her iki S/K oranı için bentonit oranı artıkça, priz başlama süresinin hızla düştüğü görülmektedir. Bu durum bentonitin priz başlama süresi üzerinde azaltıcı bir etki yaptığını göstermektedir. Uçucu kül oranı artıkça priz başlama süreleri de hızla artmaktadır. Bu durum uçucu külün karışımın daha geç prize başlamasına neden olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni uçucu külün pozolanik aktivitesinin yavaş oluşu ve çimento konsantrasyonunun azalmasıdır (Mirza et al 2002). Silis dumanı; 0.75 S/K oranında %5 (2. seviye) oranına kadar, 1.00 S/K oranında ise %10 (3. seviye) oranına kadar priz başlama süresini artırmakta, daha sonra ise düşürmektedir. Bu durum karışımlarda en fazla %5-10 oranlarında silis dumanı kullanılması durumunda priz başlama süresinin artacağını, daha yüksek oranların kullanılması durumunda ise azalacağını göstermektedir.



Şekil 4.40. Parametrelerin priz bitiş süresine etkileri (S/K=0.75)



Şekil 4.41. Parametrelerin priz bitiş süresine etkileri (S/K=1.00)

Varyans analizi sonuçları ile şekil 4.37 ve şekil 4.38 birlikte incelendiğinde priz bitiş süreleri için aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Priz başlangıç süresinde olduğu gibi bentonit her iki S/K oranında da priz bitiş süresi hızla düşürmektedir. Uçucu kül oranı arttıkça priz bitiş süresi de artmaktadır (Mirza et al 2002). Bu durum uçucu kül kullanılan karışımlarda priz tamamlanmasının daha uzun bir sürede gerçekleştiğini göstermektedir. Silis dumanı 0.75 S/K oranında %5 oranına kadar priz bitiş süresini çok az artırmakta, bu orandan sonra ise azaltmaktadır. 1.00 S/K oranında ise %10 silis dumanı oranına kadar priz bitiş süresi artmakta, bu orandan sonra azalmaktadır (Lanan et al 2002).

4.2.3. Optimum priz başlama ve priz bitiş sürelerinin belirlenmesi

Priz başlama ve bitiş sürelerinin minimum olduğu değerleri ve karışım oranlarını belirlemek için Taguchi yöntemi ile beklenen değerler ve güven aralıkları hesaplanmış

ve belirlenen karışım oranları için doğrulama deneyleri yapılarak sonuçları toplu halde çizelge 4.24'da verilmiştir. Çizelgedeki beklenen değerler ile doğrulama deney sonuçlarının genelde uyumlu oldukları görülmektedir.

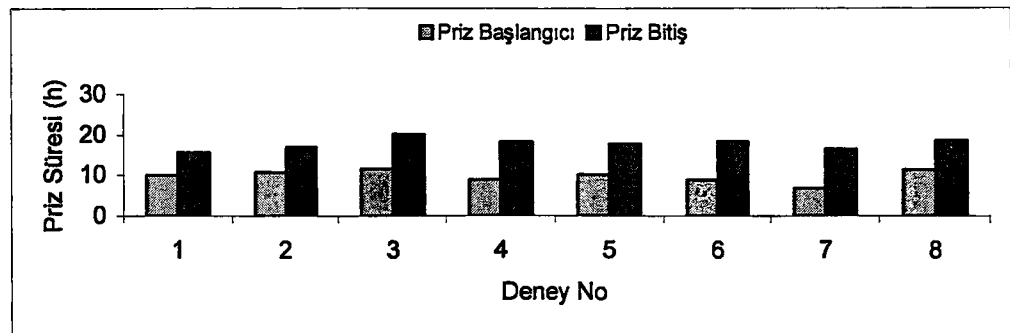
Çizelge 4.24. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (Minimum priz süreleri)

	S/K Oranı	Optimum koşullardaki Parametre Oranı			Beklenen minimum Süre (h)	% 90 güven Aralığı (h)	Doğrulama Deney Sonucu (h)
		Bentonit	Uçucu Kül	Silis Dumanı			
Priz Başlama	0.75	3	10	20	4.96	4.47-5.51	5.00
	1.00	3	10	20	10.52	9.61-11.52	10.58
Priz Bitiş	0.75	3	10	20	12.06	10.81-13.44	12.00
	1.00	3	10	20	17.69	15.90-19.67	16.83

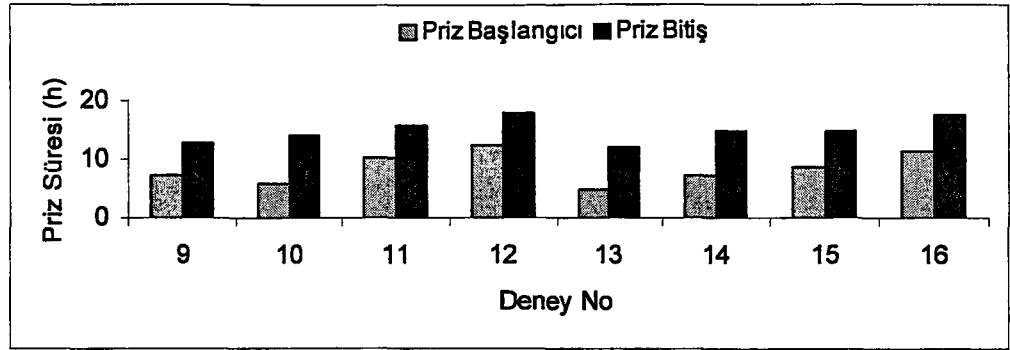
Bu çalışmada parametreler ve seviyeleri için, her iki S/K oranı içinde %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanı kullanılarak deneyler yapılması durumunda priz başlama ve priz bitiş sürelerinin minimum olacağı belirlenmiştir.

4.2.4. Deneylerde priz başlama ve bitiş sürelerinin değişimi

16 farklı karışım oranlarında 0.75 ve 1.00 S/K oranları için yapılan deneylerde priz başlama ve bitiş sürelerini göstermek için hazırlanan histogramlar şekil 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45'de verilmiştir.

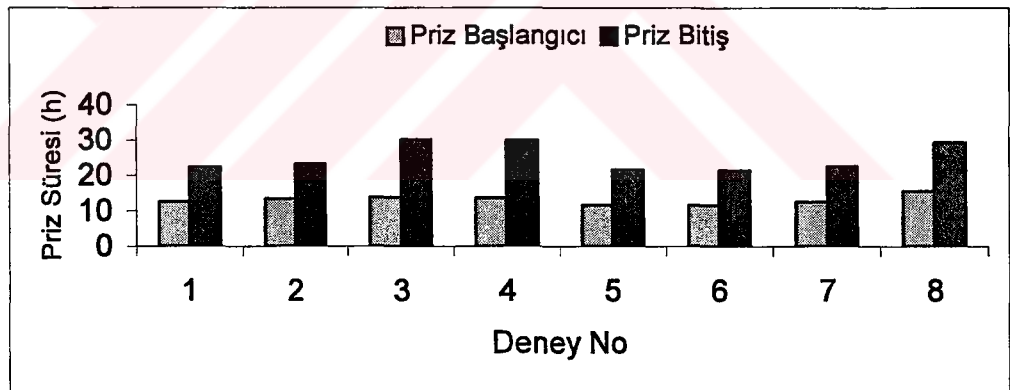


Şekil 4.42. Enjeksiyon karışımının S/K=0.75 için priz başlangıcı ve bitiş (Deney No.1-8)

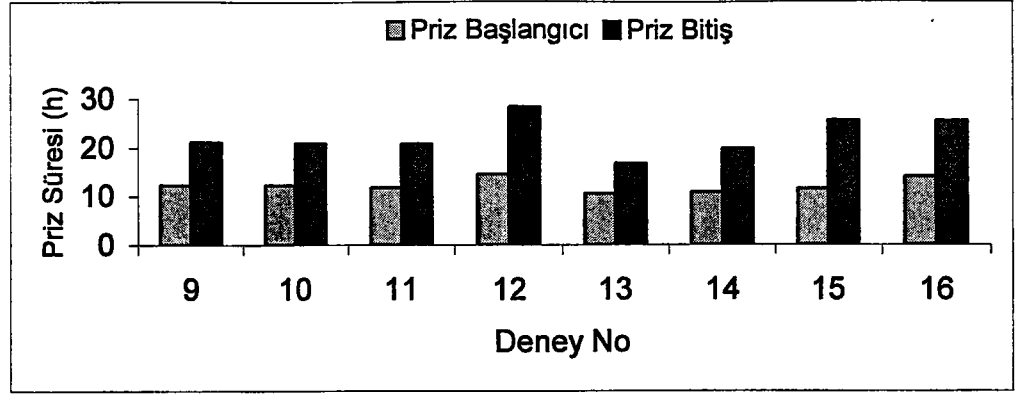


Şekil 4.43. Enjeksiyon karışımının S/K=0.75 için priz başlangıcı ve bitiş (Deney No. 9-16)

16 deney içerisinde 0.75 S/K oranı en büyük priz başlama süresi 12.25 h ile 12 No. lu deneyde, en küçük priz başlama süresi ise 5 h ile 13 No. lu deneyde gerçekleşmiştir. Priz bitiş süreleri ise en büyüğü 13 No. lu deneyde (12 h), en küçüğü 3 No. lu deneyde (20 h) gerçekleşmiştir.



Şekil 4.44. Enjeksiyon karışımının S/K=1.00 için priz başlangıcı ve bitiş (Deney No. 1-8)



Şekil 4.45. Enjeksiyon karışımının S/K=1.00 için priz başlangıcı ve bitişi (Deney No. 9-16)

16 deney içerisinde 1.00 S/K oranı için en büyük priz başlama süresi 12.66 h ile 8 No. lu deneyde, en küçük priz başlama süresi ise 10.83 h ile 14 No. lu deneyde gerçekleşmiştir. Priz bitiş süreleri ise en büyüğü 4 No. lu deneyde (30 h), en küçüğü 13 No. lu deneyde (16 h) gerçekleşmiştir. Yapılan deneyler içerisinde priz başlangıç ve bitiş süreleri arasındaki en büyük fark 0.75 S/K oranı için 9.67 h ile 7 No. lu deneyde, 1.00 S/K oranı için 16.34 h ile 3 No. lu deneyde görülmüştür. Ayrıca S/K oranı arttıkça priz başlama ve bitiş sürelerinin de arttığı görülmektedir.

4.3. Enjeksiyon Karışımlarının Akma Süreleri

4.3.1. Marsh hunisi deney sonuçları

Üç farklı S/K oranı için bölüm 3.4.3' e uygun olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen marsh hunisi deney sonuçları çizelge 4.25' de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.25. Marsh hunisi deney sonuçları

Deney No.	Boşalma Süresi (sn)		
	S/K=0.75	S/K=1.00	S/K=1.25
1	34	32	32
2	36	33	31
3	40	35	32
4	41	42	35
5	40	33	31
6	34	32	32
7	-	49	36
8	46	35	33
9	84	38	35
10	-	94	39
11	34	33	32
12	38	34	33
13	-	-	60
14	-	51	38
15	127	40	34
16	41	35	33

4.3.2. Marsh hunisi akma sürelerinin değerlendirilmesi

S/K oranının 0.75 ve 1.00 olduğu 7, 10, 13 ve 14 No. lu deneylerde viskozitenin yüksek olmasından dolayı marsh hunisi ile değerler ölçülememiştir. Bu nedenle 0.75 ve 1.00 S/K oranları için bazı deneylere ait sayısal değerler olmadığından Taguchi yöntemi ile analizler yapılamamıştır. Çizelge 4.25’de verilen 1.25 S/K oranı için akma süreleri deney sonuçları kullanılarak ayrı ayrı S/N analizleri yapılmış ve yapılan analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri çizelge 4.26’de ve parametrelerin ortalama S/N değerleri çizelge 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.26. Deney sonuçlarının S/N değerleri (Marsh hunisi, S/K=1.25)

Deney No.	S/N Oranı
1	30.10
2	29.83
3	30.10
4	30.88
5	29.83
6	30.10
7	31.13
8	30.37
9	30.88
10	31.82
11	30.10
12	30.37
13	35.56
14	31.60
15	30.63
16	30.37
Ort. S/N	30.85

En yüksek ortalama S/N değeri; silis dumanının 4. (%20) seviyesinde 32.35 olarak elde edilmiştir. En düşük ortalama S/N değeri ise yine silis dumanının 2. (%5) seviyesinde 30.16 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.27. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (Marsh hunisi, S/K=1.25)

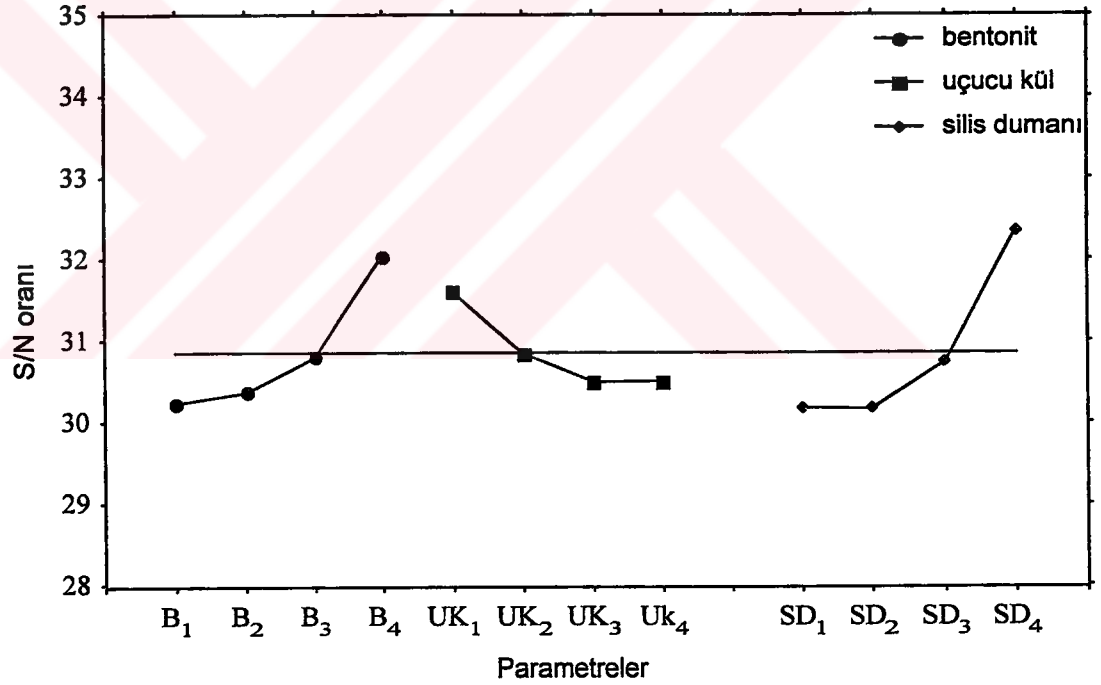
S/K oranı	Parametre	S/N Oranı			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
1.25	Bentonit	30.23	30.36	30.79	32.04
	Uçucu Kül	31.59	30.84	30.49	30.50
	Silis Dumanı	30.17	30.16	30.74	32.35

Akma süresine bentonit, uçucu kül ve silis dumanının etkisini belirlemek için varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.28’de verilmiştir. P oranları incelendiğinde akış süresi üzerinde en etkili parametrenin %36.12 ile silis dumanı olduğu görülmektedir. Bentonitin etkisi %20.28, uçucu külün etkisi ise %3.07 dir.

Çizelge 4.28. Varyans analizi tablosu (Marsh hunisi, S/K=1.25)

S/K Oranı	Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
1.25	Bentonit	3	8.19	2.73	3.50	5.85	20.28
	Uçucu Kül	3	3.22	1.07	1.38	0.89	3.07
	Silis Dumanı	3	12.76	4.25	5.46	10.42	36.12
	Diğer	6	4.68	0.78			40.53
	Toplam	15	28.85				100

Çizelge 4.27'deki ortalama S/N değerleri kullanılarak çizilen etki grafikleri şekil 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.46. Parametrelerin marsh hunisi akma süresine etkileri (S/K=1.25)

Şekil 4.46 ve S/N analizi sonuçları birlikte incelendiğinde; S/K 1.25 için karışımdaki bentonit ve silis dumanı oranı arttığında akma süresi de hızla artmaktadır. Özellikle daha düşük S/K oranlarında (0.75 ve 1.00) yüksek oranlardaki bentonit ve silis dumanı, karışımın akma süresini önemli ölçüde azaltmakta (Huang 1997), marsh hunisi ile ölçüm yapılamamaktadır. Karışımlardaki uçucu kül oranı arttıkça akma süresinin

azaldığı görülmektedir (Mirza et al2002). Ayrıca S/K oranı arttıkça akış süresinde artışı yani viskozitenin azaldığı belirlenmiştir (Mirza et al 2002, Huang 1997).

4.3.3. Optimum akma süresinin belirlenmesi

S/K oranı 1.25 için akma süresinin maksimum olduğu değer ve karışım oranlarını belirlemek için Taguchi yöntemi ile beklenen değerler ve güven aralıkları hesaplanmış ve çizelge 4.29’de verilmiştir.

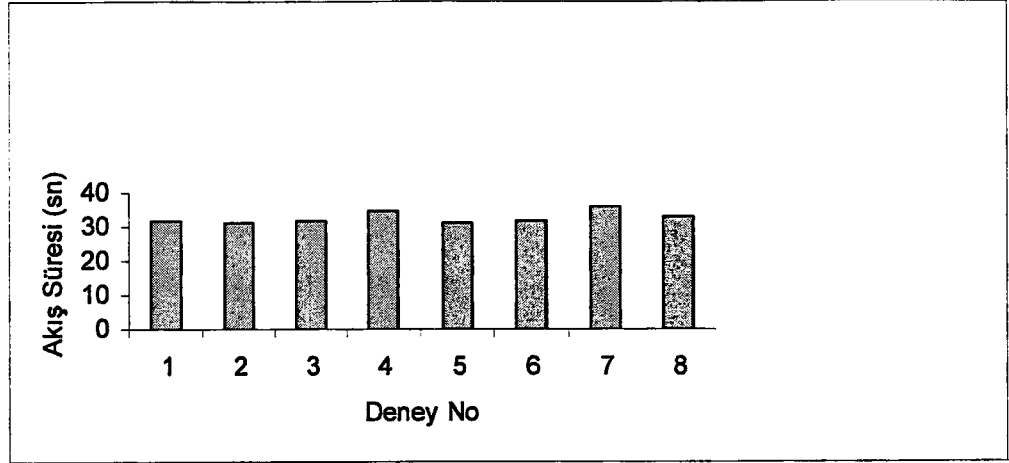
Çizelge 4.29. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (maksimum akma süresi, S/K=1.25)

Optimum koşullardaki Parametre Oranı			Beklenen Akma süresi. (sn)	% 90 güven Aralığı (sn)	Doğrulama Deney Sonucu (sn)
Bentonit	Uçucu Kül	Silis Dumanı			
3	10	20	51.70	44.87-60.00	60.00

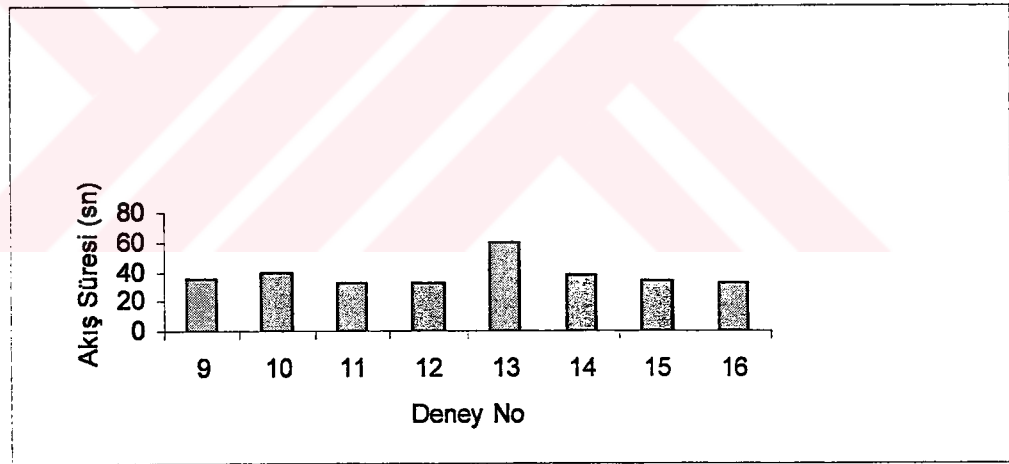
Deneylerin yapılabileceği farklı karışımlar içinde en fazla akma süresinin %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı deneyde ölçülebileceği belirlenmiştir. Bu karışım için akma süresinin %90 güven aralığında 44.87 sn-60 sn ölçülmesi beklenmektedir. Yapılan doğrulama deneyi sonucunda bu değer ortalama 60 sn olarak ölçülmüştür.

4.3.4. Deneylerde akma sürelerinin değişimi

16 farklı karışım oranlarında 1.25 S/K oranı için yapılan deneylerde akma sürelerini göstermek için hazırlanan histogramlar şekil 4.47 ve 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.47. Enjeksiyon karışımının $S/K=1.25$ için akış süresi (Deney No. 1-8)



Şekil 4.48. Enjeksiyon karışımının $S/K=1.25$ için akış süresi (Deney No. 9-16)

16 deney içerisinde en fazla akma süresi 60 sn ile 13 No. lu deneyde, en düşük akma süresi ise 31 sn ile 2 No. lu deneyde ölçülmüştür. Bu iki deney arasındaki akma süresi %93.5 oranında artmaktadır. S/K oranı arttıkça akma süresinde arttığı görülmektedir. Yüksek S/K oranlarında katkı malzemelerinin akma süresi üzerindeki etkisi önemsiz hale gelmektedir (Huang 1997).

4.4. Enjeksiyon Karışımlarının Çökelme Oranları

4.4.1. Çökelme deney sonuçları

Üç farklı S/K oranı için bölüm 3.4.4' e uygun olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen çökelme deney sonuçları çizelge 4.30' de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.30. Çökelme deney sonuçları

Deney No.	Çökelme Miktarı (%)		
	S/K=0.75	S/K=1.00	S/K=1.25
1	21.71	37.21	42.19
2	6.92	20	37.39
3	2.38	6.25	18.25
4	0.8	0.83	3.94
5	5.51	12	28.91
6	20.16	30.47	39.23
7	0.2	1.6	2.69
8	0.84	4.76	17.52
9	0.88	4.07	10.32
10	0.1	0.98	2
11	12.7	27.34	38.7
12	5.45	9.76	20.32
13	0	0.2	2.46
14	0.15	1.5	4.72
15	0.2	3.5	10.16
16	6.14	10	24

4.4.2. Çökelme yüzdelerinin değerlendirmesi

Çizelge 4.30'da verilen çökelme miktarı deney sonuçları kullanılarak L_{16} ortogonal dizin için ayrı ayrı S/N analizleri yapılmış ve yapılan analiz sonucunda 16 deney için belirlenen S/N değerleri ile ortalama S/N değerleri çizelge 4.31'de verilmiştir.

Çizelge 4.31. Deney sonuçlarının S/N değerleri (Çökeltme yüzdeleri)

Deney No.	S/N Oranı		
	S/K=0.75	S/K=1.00	S/K=1.25
1	26.73	31.41	32.51
2	16.80	26.02	31.46
3	7.53	15.92	25.23
4	-1.94	-1.62	11.91
5	14.82	21.58	29.22
6	26.09	29.68	31.87
7	-13.98	4.08	8.60
8	-1.51	13.55	24.87
9	-1.11	12.19	20.27
10	-20.00	-0.18	6.02
11	22.08	28.74	31.76
12	14.73	19.79	26.16
13	-93.58	-13.98	7.82
14	-16.48	3.52	13.48
15	-13.98	10.88	20.14
16	15.76	20.00	27.61
Ort. S/N	-1.13	13.85	21.81

Parametrelerin ve seviyelerin sonuca etkilerini belirlemede kullanılan parametrelerin ortalama S/N değerleri hesaplanarak çizelge 4.32’de verilmiştir. En yüksek ortalama S/N değerleri; 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranı için silis dumanının 1. seviyesinde (%0) sırası ile 22.67, 27.46 ve 30.93 olarak elde edilmiştir. Uçucu kül 0.75 ve 1.25 S/K oranı için 4. seviyesinde (%40) sırası ile 6.76 ve 22.64 1.00 S/K oranı için 3.seviyesinde (%30) 14.91 olarak bulunmuştur. Bentonit ise üç farklı S/K oranı için 1. seviyesinde (%0) sırası ile 12.28, 17.93 ve 25.27 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.32. Parametre seviyelerinin ortalama S/N değerleri (Çökeltme yüzdesi)

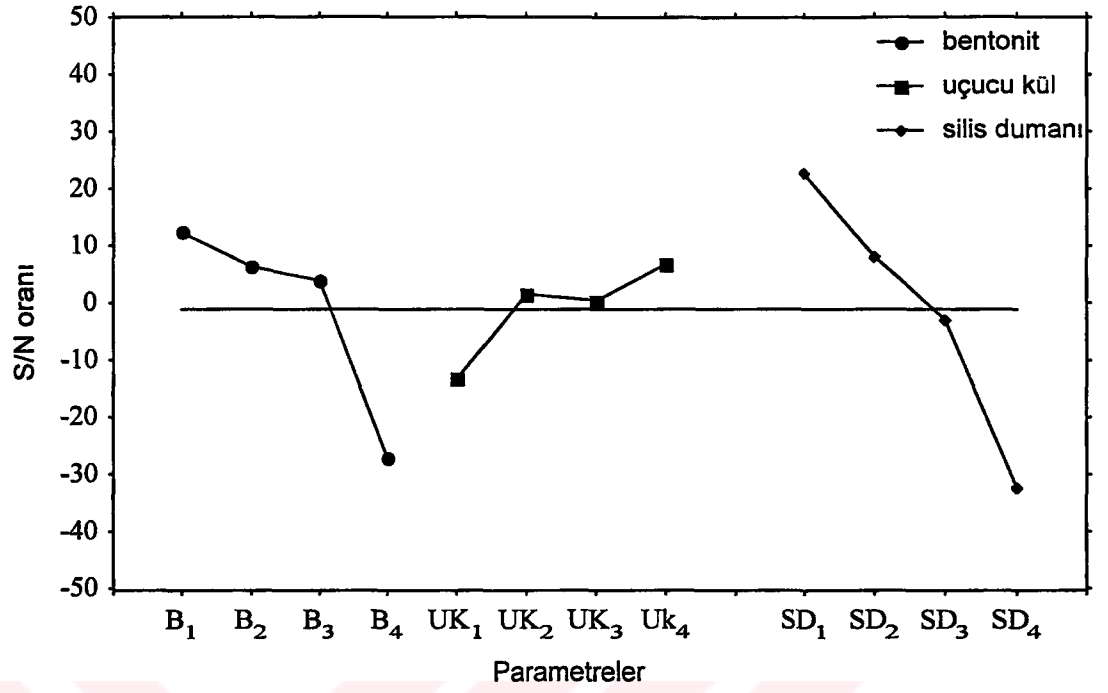
S/K oranı	Parametre	S/N Oranı			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
0.75	Bentonit	12.28	6.35	3.92	-27.07
	Uçucu Kül	-13.28	1.60	0.41	6.76
	Silis Dumanı	22.67	8.09	-2.89	-32.37
1.00	Bentonit	17.93	17.22	15.14	5.11
	Uçucu Kül	12.80	14.76	14.91	12.93
	Silis Dumanı	27.46	19.57	11.30	-2.92
1.25	Bentonit	25.27	23.64	21.05	17.26
	Uçucu Kül	22.45	20.71	21.43	22.64
	Silis Dumanı	30.93	26.74	20.96	8.59

Çökelme miktarına bentonit uçucu kül ve silis dumanının etkisini belirlemek için yapılan varyans (ANOVA) analizi sonuçları çizelge 4.33’de verilmiştir. Çizelgede yer alan P oranlarından silis dumanının S/K oranı 0.75, 1.00 ve 1.25 için çökelme miktarına en fazla etkisi olan parametre olarak görülmektedir. Bentonit sonuca ikinci derecede etki eden parametre olarak görülmektedir. Uçucu külün ise çökelme miktarına oldukça az etkisinin olduğu görülmektedir (Mirza et al 2002).

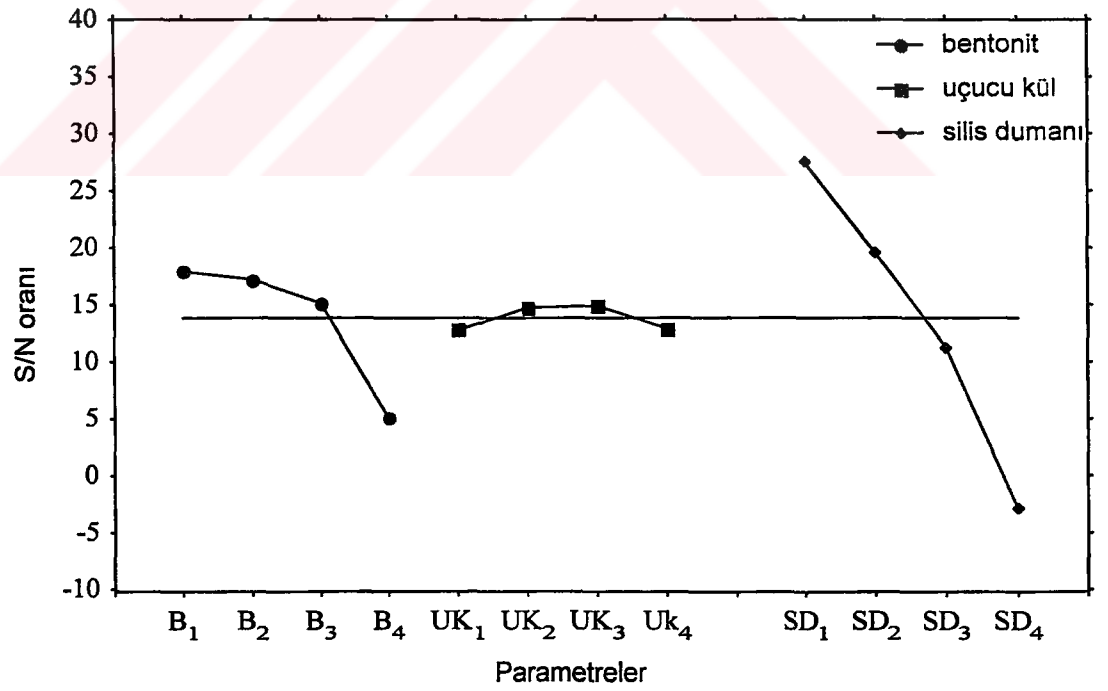
Çizelge 4.33. Varyans analizi tablosu (Çökelme yüzdesi)

S/K Oranı	Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
0.75	Bentonit	3	3736.83	1245.61	4.75	2949.57	23.20
	Uçucu Kül	3	879.13	293.04	1.12	91.88	0.72
	Silis Dumanı	3	6522.27	2174.09	8.28	5735.01	45.11
	Diğer	6	1574.51	262.42			30.97
	Toplam	15	12712.78				100
1.00	Bentonit	3	424.67	141.56	31.36	411.12	16.51
	Uçucu Kül	3	15.54	5.18	1.15	2.00	0.08
	Silis Dumanı	3	2002.77	674.26	149.36	2009.23	80.69
	Diğer	6	27.08	4.51			2.72
	Toplam	15	2490.06				100
1.25	Bentonit	3	146.49	48.83	7.47	126.88	9.55
	Uçucu Kül	3	9.84	3.28	0.50	0.00	0.00
	Silis Dumanı	3	1132.68	377.56	57.75	1113.06	83.80
	Diğer	6	39.23	6.54			6.65
	Toplam	15	1328.24				100

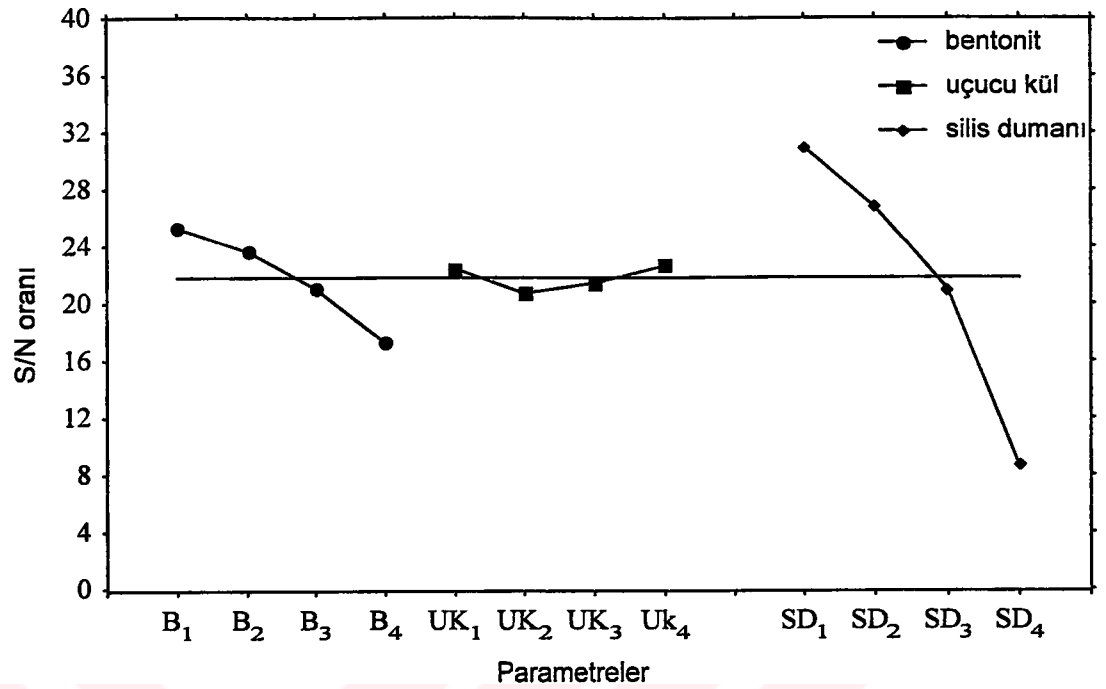
Bentonit, uçucu kül ve silis dumanının çökelme miktarına etkilerini gösteren grafikler şekil 4.49, 4.50 ve 4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.49. Parametrelerin çökeltme yüzdesine etkileri (S/K=0.75)



Şekil 4.50. Parametrelerin çökeltme yüzdesine etkileri (S/K=1.00)



Şekil 4.51. Parametrelerin çökelme yüzdesine etkileri (S/K=1.25)

Çökelme yüzdesi için hazırlanan ANOVA tablosu (çizelge 4.26) ve etki grafiklerinin incelenmesi sonucunda elde edilen bulgular şunlardır; 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranı için bentonit miktarı arttıkça çökelme miktarının da azaldığı görülmektedir (Huang 1997). Uçucu kül miktarının artmasıyla 0.75 S/K oranı için çökelme miktarının arttığı görülmektedir. 1.00 S/K oranı için 3. (%30) seviyeye kadar uçucu kül oranı arttıkça çökelme miktarı artmakta daha sonra 4. (%40) seviyede çökelme miktarı azalma göstermektedir. 1.25 S/K oranı için uçucu külün 2. (%20) seviyeye kadar çökelme miktarı azalmakta ve daha sonra 3. (%30) ve 4. (%40) seviyelerde uçucu kül arttıkça çökelme miktarı artmaktadır (Mirza et al 2002). 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranı için silis dumanının artması ile çökelme miktarında önemli derecede bir azalmanın olduğu görülmektedir (Huang 1997). S/K oranı arttıkça çökelme miktarında arttığı görülmektedir.

4.4.3. Optimum çökelme miktarının belirlenmesi

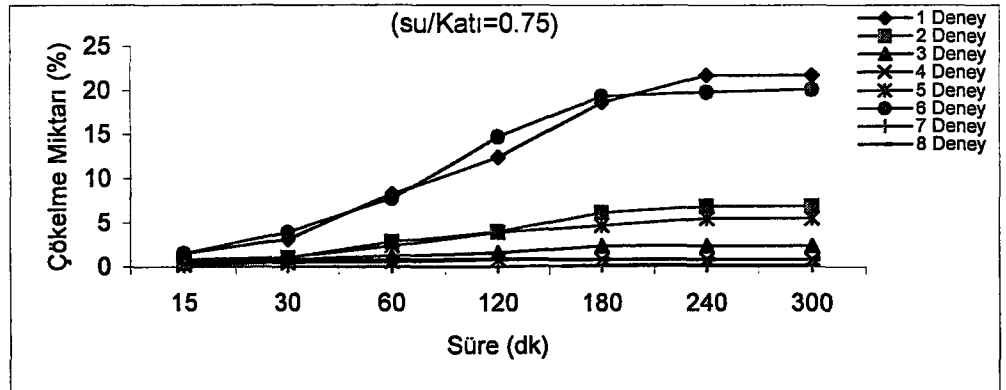
S/K oranı 0.75, 1.00 ve 1.25 için çökelme miktarının minimum olduğu değer ve karışım oranlarını belirlemek için Taguchi yöntemi ile beklenen değerler ve güven aralıkları hesaplanmış ve çizelge 4.34’de verilmiştir.

Çizelge 4.34. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (minimum çökelme yüzdesi)

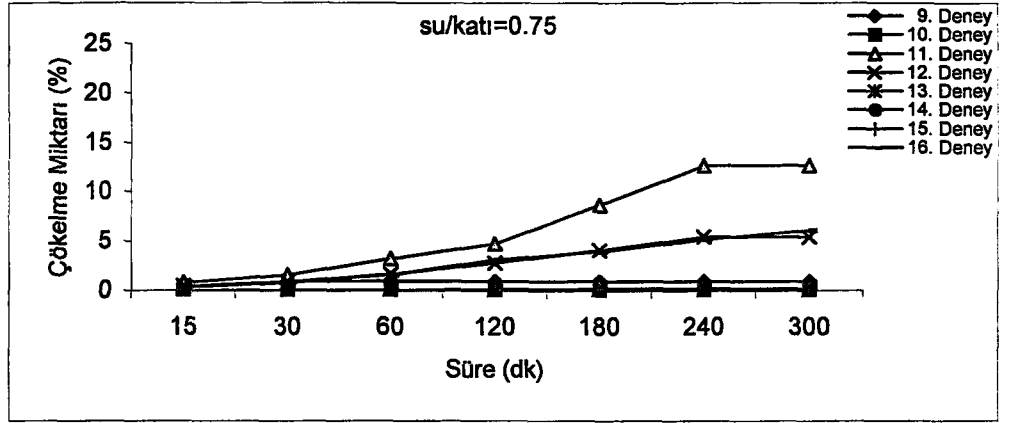
S/K Oranı	Optimum koşullardaki Parametre Oranı			Beklenen Çökelme yüzdesi (%)	% 90 güven Aralığı (%)	Doğrulama Deney Sonucu (%)
	Bentonit	Uçucu Kül	Silis Dumanı			
0.75	3	10	20	0.002	0.01-0.00	0.00
1.00	3	10	20	0.23	0.16-0.33	0.20
1.25	3	20	20	1.40	0.49-2.11	2.00

4.4.4. Deneylerde çökelme miktarının zamanla değişimi

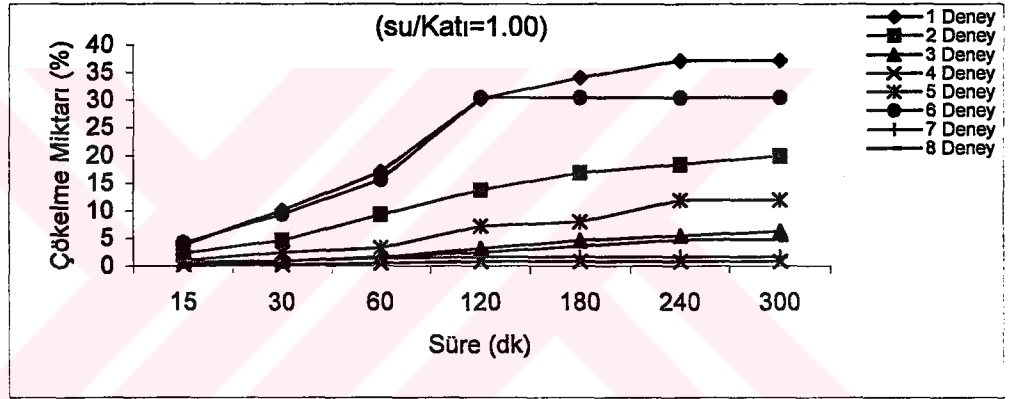
0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranı için yapılan 16 deney için çökelme miktarının zamana göre değişimini gösteren grafikler şekil 4.52, 4.53, 4.54, 4.55, 4.56 ve 4.57’de verilmiştir.



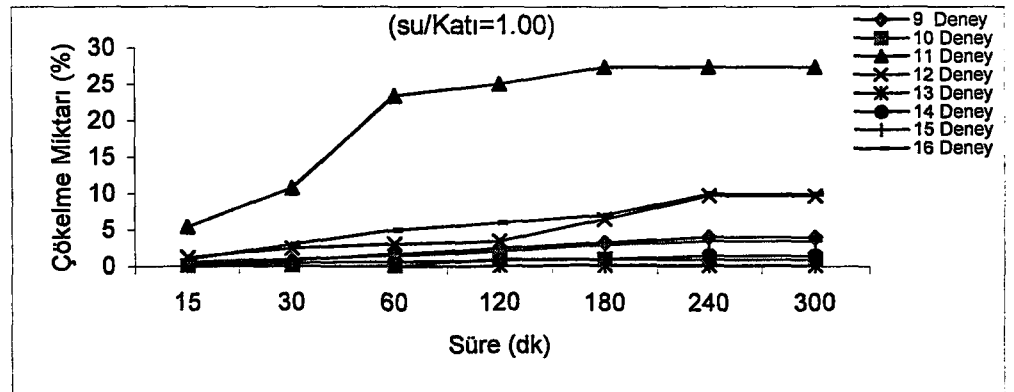
Şekil 4.52. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No. 1-8)



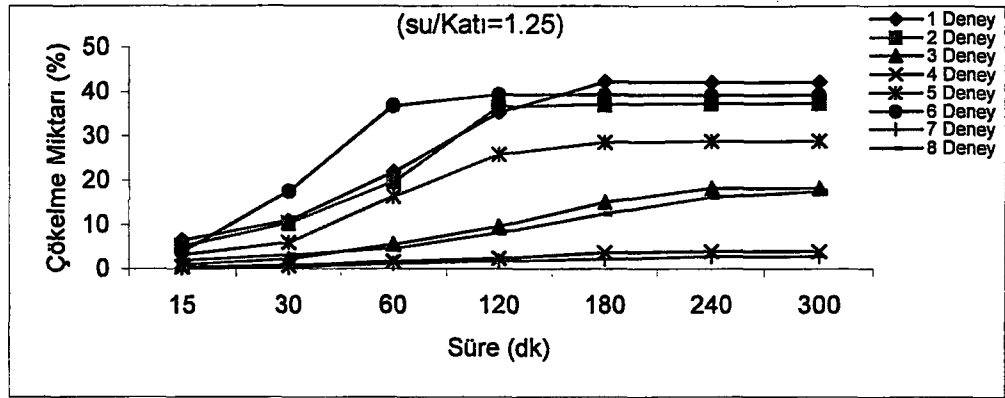
Şekil 4.53. Enjeksiyon karışımının çökeltme-zaman ilişkisi (Deney No. 9-16)



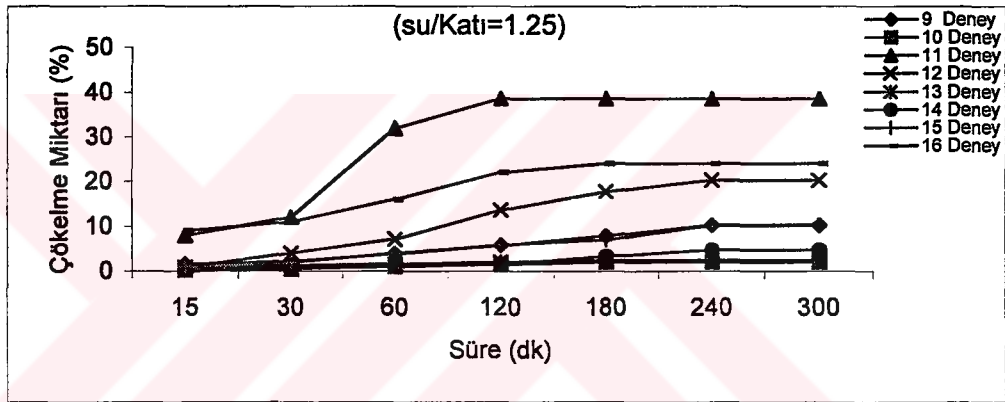
Şekil 4.54. Enjeksiyon karışımının çökeltme-zaman ilişkisi (Deney No. 1-8)



Şekil 4.55. Enjeksiyon karışımının çökeltme-zaman ilişkisi (Deney No. 9-16)



Şekil 4.56. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No. 1-8)



Şekil 4.57. Enjeksiyon karışımının çökelme-zaman ilişkisi (Deney No. 9-16)

Yukarıdaki şekillerden çökelme miktarının ilk 120 dakikaya kadar genelde doğrusal bir artış yaptığı ve 240 dakikada ise çökelmelerin hemen hemen tamamlandığı görülmektedir. 0.75 S/K oranı için, en yüksek çökelme miktarı %21 ile 1 No. lu deneyde ve en düşük çökelme miktarı ise %0 ile 13 No. lu deneyde gerçekleşmiştir. 1.00 S/K oranı için, en yüksek çökelme miktarı %37 ile 1 No. lu deneyde ve en düşük çökelme miktarı ise %0.2 ile 13 No. lu deneyde gerçekleşmiştir. 1.25 S/K oranı için, en yüksek çökelme miktarı %42 ile 1 No. lu deneyde ve en düşük çökelme miktarı ise %2 ile 10 No. lu deneyde gerçekleşmiştir.

4.5. Enjeksiyon Karışımlarının Dinamik Viskoziteleri

4.5.1. Dönmeli viskozimetre deney sonuçları

Üç farklı S/K oranı için bölüm 3.4.5' e uygun olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen dönmeli viskozimetre deney sonuçları çizelge 4.35' de toplu olarak verilmiştir.

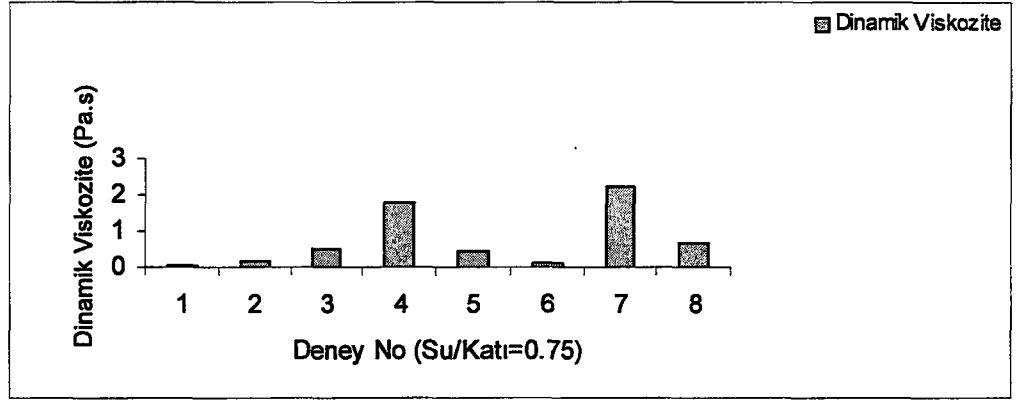
Çizelge 4.35. Dönmeli viskozimetre deney sonuçları

Deney No.	Dinamik Viskozite (Pa.s)					
	S/K=0.75	Disk No.	S/K=1.00	Disk No.	S/K=1.25	Disk No.
1	0.08	R5	0.05	R5	0.03	R3
2	0.18	R5	0.07	R5	0.04	R3
3	0.48	R5	0.19	R5	0.06	R3
4	1.78	R5	0.59	R5	0.19	R3
5	0.44	R5	0.17	R5	0.05	R3
6	0.13	R5	0.07	R5	0.03	R3
7	2.23	R5	0.86	R5	0.29	R3
8	0.66	R5	0.3	R5	0.07	R3
9	1.15	R5	0.47	R5	0.16	R3
10	-	R5	1.24	R5	0.4	R3
11	0.19	R5	0.08	R5	0.04	R3
12	0.51	R5	0.23	R5	0.08	R3
13	-	R5	-	R5	1.02	R5
14	-	R5	1.01	R5	0.54	R5
15	2.22	R5	0.52	R5	0.24	R5
16	0.55	R5	0.21	R5	0.12	R5

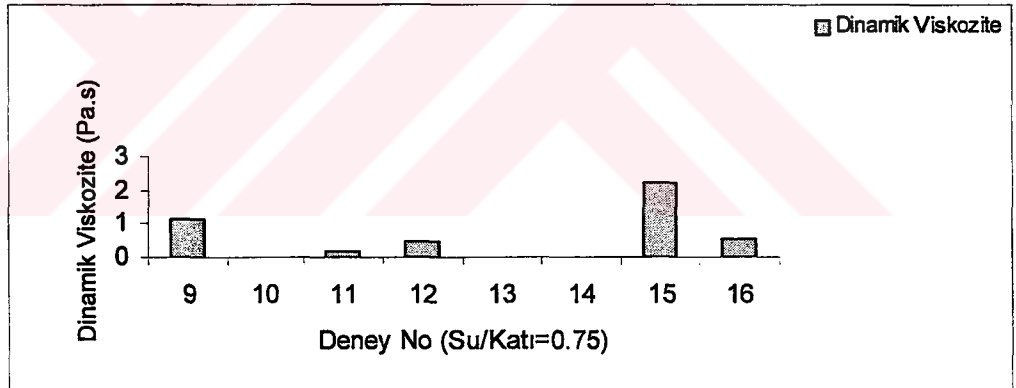
4.5.2. Dönmeli viskozimetre deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Dönmeli viskozimetre aleti ile dinamik viskozitenin belirli aralıklarda olması durumunda ölçüm yapılabilir. 0.75 S/K oranında 10, 13 ve 14 No. lu deneyler için hazırlanan karışımların viskozitesi çok yüksek, 1.00 S/K oranında 1,2 ve 6 No. lu deneyler için hazırlanan karışımların viskoziteleri ise çok düşüktür. Bu nedenle sabit bir disk ile 16 deney için dönmeli viskozite aleti ile ölçümler yapılamamıştır. 16 deneyin

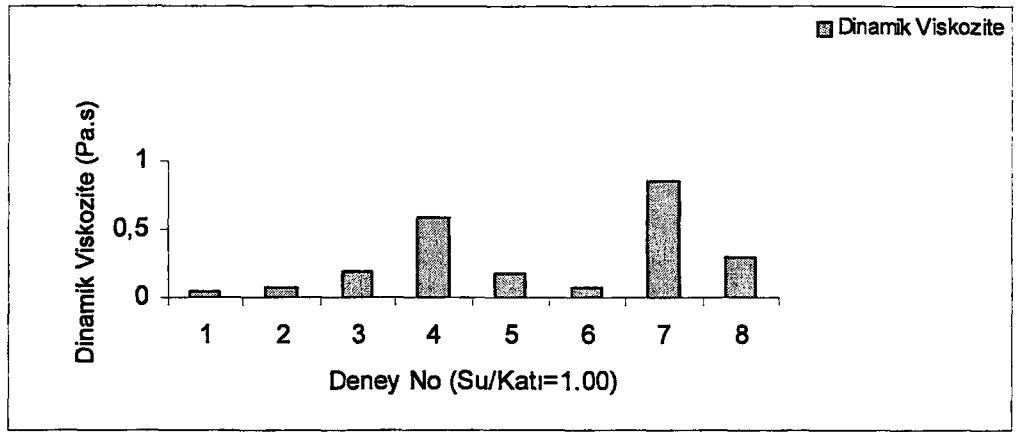
tamamına ait sayısal ölçümler olmadığı içinde Taguchi yöntemi ile analizler yapılamamıştır. Her üç S/K oranı için, ölçümlerin yapıldığı deneylere ait histogramlar şekil 4.58, 4.59, 4.60 ve 4.61’de verilmiştir.



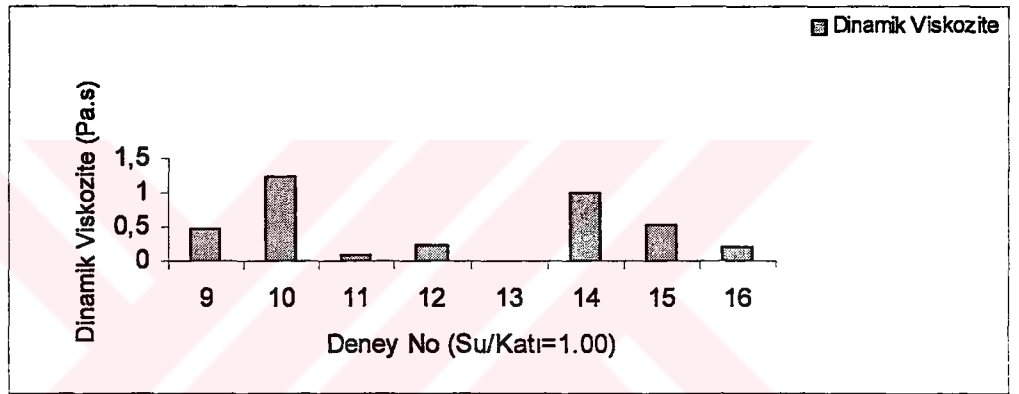
Şekil 4.58. Enjeksiyon karışımının S/K=0.75 için dinamik viskozitesi (Deney No. 1-8)



Şekil 4.59. Enjeksiyon karışımının S/K=0.75 için dinamik viskozitesi (Deney No. 9-16)



Şekil 4.60. Enjeksiyon karışımının S/K=1.00 için dinamik viskozitesi (Deney No. 1-8)



Şekil 4.61. Enjeksiyon karışımının S/K=1.00 için dinamik viskozitesi (Deney No. 9-16)

4.6. Enjeksiyonlu Zemin Örneklerinin Serbest Basınç Mukavemetleri

4.6.1. Enjeksiyonlu zeminlerin serbest basınç deney sonuçları

Taguchi Yöntemine göre belirlenen optimum malzeme oranları dikkate alınarak hazırlanan 1.grup (%0 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanı) ve 2.grup(%3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanı) enjeksiyon karışımları ile sadece çimento ile yapılan 3. grup (%0 bentonit, %0 uçucu kül ve %0 silis dumanı) karşılaştırma karışımı üç farklı S/K oranları için rölatif sıkılığı 0.70 olan kötü derecelenmiş çakıl örneği içerisine enjekte edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları toplu olarak çizelge 4.36,

4.37’de ve sadece çimento ile yapılan enjeksiyon deneylerinin sonuçları ise çizelge 4.38’de verilmiştir.

Çizelge 4.36. Enjeksiyonlu zemin (çakıl) numunelerin serbest basınç mukavemetleri (1. grup)

S/K Oranı	Süre	Serbest Basınç Mukavemeti (Mpa)			
		1	2	3	ortalama
0.75	7. gün	8.48	9.03	8.75	8.75
	14. gün	13.59	13.87	13.73	13.73
	28. gün	15.69	14.86	15.27	15.27
1.00	7. gün	3.02	3.67	2.75	3.15
	14. gün	6.29	6.17	5.27	5.91
	28. gün	8.56	7.49	7.57	7.87
1.25	7. gün	1.46	1.35	1.37	1.40
	14. gün	2.54	2.30	2.40	2.42
	28. gün	2.96	3.67	2.92	3.18

Çizelge 4.37. Enjeksiyonlu zemin (çakıl) numunelerin serbest basınç mukavemetleri (2. grup)

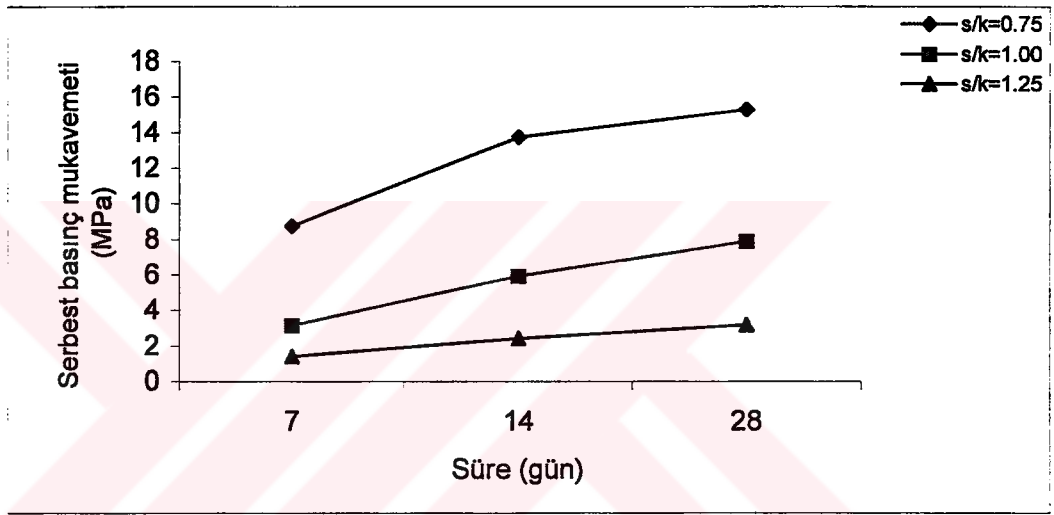
S/K Oranı	Süre	Serbest Basınç Mukavemeti (Mpa)			
		1	2	3	ortalama
0.75	7. gün	8.88	7.02	7.94	7.95
	14. gün	13.12	13.25	13.19	13.19
	28. gün	13.50	13.44	13.47	13.47
1.00	7. gün	3.82	3.93	3.74	3.83
	14. gün	7.83	7.14	6.82	7.26
	28. gün	8.59	9.66	9.61	9.29
1.25	7. gün	1.68	1.67	1.61	1.66
	14. gün	2.79	3.20	2.79	2.93
	28. gün	4.89	4.31	4.07	4.42

Çizelge 4.38. Enjeksiyonlu zemin (çakıl) numunelerin serbest basınç mukavemetleri (3. grup)

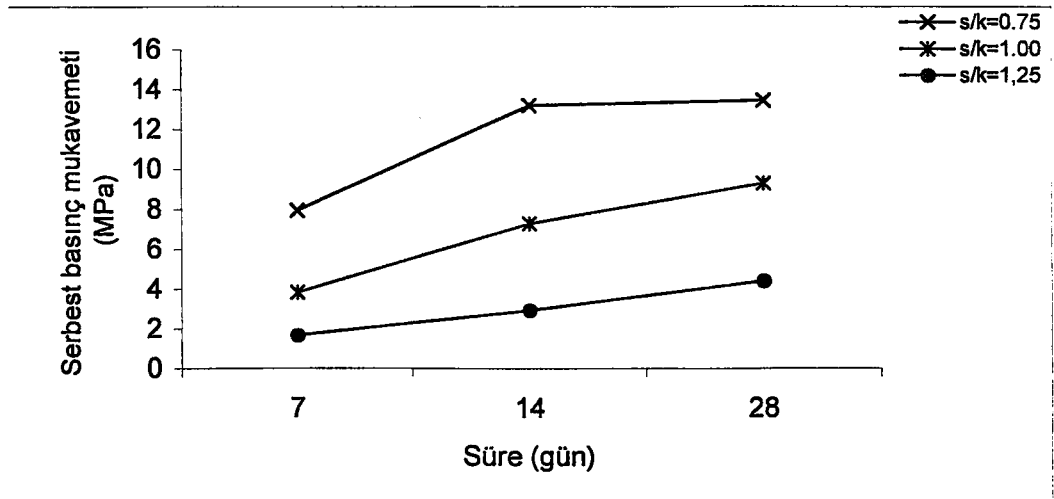
S/K Oranı	Süre	Serbest Basınç Mukavemeti (Mpa)			
		1	2	3	ortalama
0.75	7. gün	3.6	3.22	3.40	3.40
	14. gün	5.24	4.93	5.10	5.10
	28. gün	6.37	5.75	6.10	6.07
1.00	7. gün	2.1	1.90	2.25	2.08
	14. gün	3.13	2.67	2.82	2.88
	28. gün	4.46	5.57	4.88	4.97
1.25	7. gün	1.61	1.46	1.56	1.54
	14. gün	2.52	1.74	2.12	2.13
	28. gün	3.07	3.26	3.38	3.24

4.6.2. Enjeksiyonlu zeminlerin serbest basınç deney sonuçlarının değerlendirilmesi

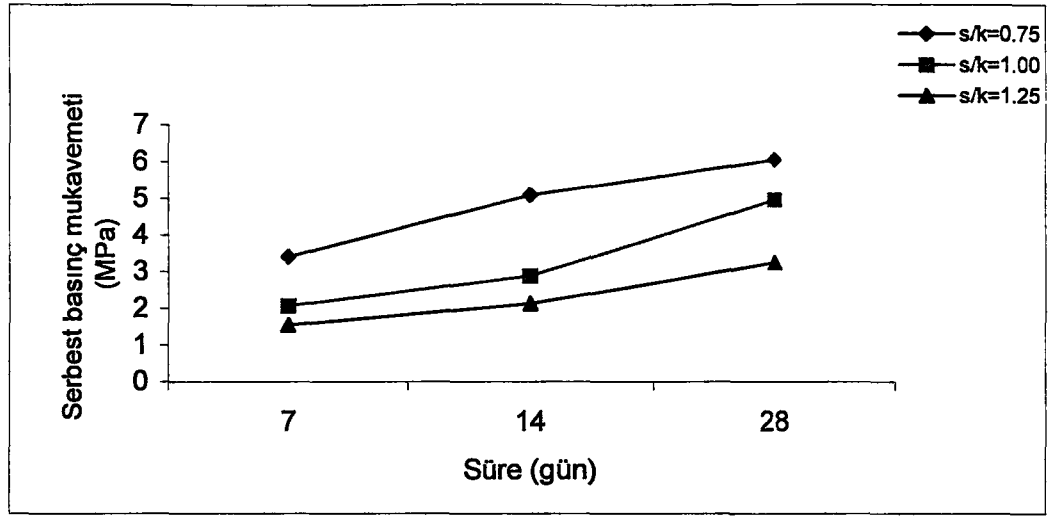
1.grup (%0 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanı), 2.grup(%3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanı) ve 3. grup (%0 bentonit, %0 uçucu kül ve %0 silis dumanı) enjeksiyon karışımları ile enjekte edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin (7, 14 ve 28 günlük) zamanla değişim grafikleri şekil 4.62, 4.63 ve 4.64'de verilmiştir.



Şekil 4.62. Enjeksiyonlu numunelerin serbest basınç mukavemetinin zamanla değişimi (1. grup)



Şekil 4.63. Enjeksiyonlu numunelerin serbest basınç mukavemetinin zamanla değişimi (2. grup)



Şekil 4.64. Enjeksiyonlu numunelerin serbest basınç mukavemetinin zamanla değişimi (3. grup)

0.75 S/K oranı için 1. grup karışım (%0 bentonit,%10 uçucu kül ve % 20 silis dumanı) ile enjeksiyon uygulanan zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (7,14 ve 28 günlük) 2. ve 3. grup karışımlar ile enjeksiyon uygulanan zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. 1.00 ve 1.25 S/K oranı için ise 2. grup karışım (%3 bentonit,%10 uçucu kül ve % 20 silis dumanı) ile enjeksiyon uygulanan zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinin (7, 14 ve 28 günlük) 1. ve 3. grup karışımlar ile enjeksiyon uygulanan zemin numunelerinkinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada katı ağırlığının dört farklı oranlarında bentonit (%0, %0.5, %1 ve %3), uçucu kül (%10, %20, %30 ve %40) ile silis dumanı (%0, %5, %10 ve %20) parametre olarak seçilmiştir. Deneyler için Taguchi yöntemine göre 3 parametrelili 4 seviyeli standart L16 ortogonal deney tasarım tablosu seçilmiştir. 0.75, 1.00 ve 1.25 S/K oranları için ayrı ayrı enjeksiyon karışımı serbest basınç deneyleri (7, 14 ve 28 günlük), çökelme deneyleri, vicat iğnesi deneyleri, Marsh hunisi deneyleri, rotasyonel viskozimetre deneyleri ile enjeksiyon uygulanmış zemin örnekleri üzerinde serbest basınç deneyleri (7, 14 ve 28 günlük) yapılmıştır.

5.1. Tartışma

Seçilen parametrelerin ve seviyelerinin deney üzerindeki etkileri araştırılmış ve aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

5.1.1. Enjeksiyon karışımı serbest basınç mukavemetleri

1. 7 günlük serbest basınç mukavemeti değişimi üzerinde en etkili parametre uçucu küldür. P değerlerine göre; 0.75 S/K oranı için %72.2, 1.00 S/K oranı için %69.5, 1.25 S/K oranı için %42.3 oranında etkili olmaktadır.
2. 7 günlük serbest basınç mukavemeti için bentonitin 0.75 ve 1.00 S/K oranlarında önemli bir etkisi bulunmamaktadır. 1.25 S/K oranında %21.7 oranında etkili olmaktadır.
3. Bentonit ve uçucu kül oranı arttıkça 7 günlük serbest basınç mukavemeti düşmektedir.
4. 0.75 S/K oranı için %5 silis dumanı, 1.00 S/K oranı için %10 silis dumanı oranından sonra 7 günlük serbest basınç mukavemeti artmaktadır. 1.25 S/K oranı için silis dumanı arttıkça 7 günlük serbest basınç mukavemeti düşmektedir.

5. En yüksek 7 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 0.75 için %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 8.4 Mpa olarak, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 3.89 Mpa olarak bulunmuştur.
6. En yüksek 7 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.00 için %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 5.5 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 8 No. lu deneyde (%0.5 bentonit, %40 uçucu kül ve %10 silis dumanı) 2.24 Mpa olarak bulunmuştur.
7. En yüksek 7 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.25 için %0 bentonit, %10 uçucu kül ve %0 silis dumanının kullanıldığı 1 No. lu deneyde 4.46 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 15 No. lu deneyde (%3 bentonit, %30 uçucu kül ve %5 silis dumanı) 1.65 Mpa olarak bulunmuştur.
8. 14 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametre 0.75 S/K oranı için %33.6 ile silis dumanı, 1.00 ve 1.25 S/K oranı için ise sırası ile %43.3 ve %52 oranı ile uçucu küldür.
9. Bentonitin 0.75 S/K oranı için 14 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde bir etkisi olmazken 1.00 S/K oranı için %8.24 ve 1.25 S/K oranı için ise %11.5 oranlarında etkili olmaktadır.
10. 0.75 ile 1.25 S/K oranı için bentonit ve uçucu kül oranı arttıkça 14 günlük serbest basınç mukavemeti düşmektedir.
11. 1.00 S/K oranı için bentonitin %0.5 ve uçucu külün %20 oranlarından sonra 14 günlük serbest basınç mukavemeti düşmektedir.
12. 14 günlük serbest basınç mukavemeti, silis dumanı arttıkça artmaktadır.
13. En yüksek 14 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 0.75 için %1 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 10 No. lu deneyde 12.18 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 5.44 Mpa olarak bulunmuştur.
14. En yüksek 14 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.00 için %1 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 10 No. lu deneyde 7.93 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 3.18 Mpa olarak bulunmuştur.

15. En yüksek 14 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.25 için %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 5.74 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 8 No. lu deneyde (%0.5 bentonit, %40 uçucu kül ve %10 silis dumanı) 2.44 Mpa olarak bulunmuştur.
16. 28 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametre uçucu küldür. P değerlerine göre; 0.75 S/K oranı için %33.8, 1.00 S/K oranı için %41.1 ve 1.25 S/K oranı için ise % 48.5 oranında etkili olmaktadır.
17. 28 günlük serbest basınç mukavemeti için bentonitin 0.75 S/K oranı için önemli bir etkisi bulunmamaktadır.
18. Uçucu kül oranı arttıkça 28 günlük serbest basınç mukavemeti azalmaktadır.
19. 0.75 ve 1.25 S/K oranı için bentonit oranı arttıkça 28 günlük serbest basınç mukavemetinde düşme görülmektedir.
20. Silis dumanı 0.75 S/K oranı için arttıkça 28 günlük serbest basınç mukavemeti artmakta, 1.00 S/K oranı için %5 ve 1.25 S/K oranı için ise %10 oranından sonra artma görülmektedir.
21. En yüksek 28 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 0.75 için %0.5 bentonit, %30 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 7 No. lu deney ve %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 13 No. lu deneyde 15.14 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 6.00 Mpa olarak bulunmuştur.
22. En yüksek 28 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.00 için %1 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı 10 No. lu deneyde 11.11 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 16 No. lu deneyde (%3 bentonit, %40 uçucu kül ve %0 silis dumanı) 4.20 Mpa olarak bulunmuştur.
23. En yüksek 28 günlük serbest basınç mukavemeti, S/K oranı 1.25 için %0 bentonit, %10 uçucu kül ve %0 silis dumanının kullanıldığı 1 No. lu deneyde 7.12 Mpa, en düşük serbest basınç mukavemeti ise 15 No. lu deneyde (%3 bentonit, %30 uçucu kül ve %5 silis dumanı) 3.19 Mpa olarak bulunmuştur.
24. 7 ve 14 günlük serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında en fazla artış oranı S/K=1.25 de %119.25 ile 10 No. lu deneyde, en az artış oranı S/K=1.00 da %8.16 ile 1 No. lu deneyde gerçekleşmiştir.

25. 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında en fazla artış oranı $S/K=1.00$ da %61.11 ile 11 No. lu deneyde, en az artış oranı $S/K=0.75$ de %2.68 ile 3 No. lu deneyde gerçekleşmiştir.
26. 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında ise en fazla artış oranı $S/K=1.25$ de %174.73 ile 10 No. lu deneyde, en az artış oranı $S/K=0.75$ de %51.72 ile 6 No. lu deneyde gerçekleşmiştir.
27. S/K oranı arttıkça enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinde azalma görülmektedir.
28. sadece çimento ile yapılan (karşılaştırma) enjeksiyon karışımının serbest basınç mukavemetine, katkı malzemelerinin kullanıldığı (doğrulama) enjeksiyon karışımlarıyla ulaşılmıştır.

5.1.2. Priz süreleri

1. Priz başlama süresi üzerinde en etkili parametre P değerlerine göre; 0.75 S/K oranı için %52 oranı ile silis dumanı ve 1.00 S/K oranı için %52 oranı ile uçucu kül olarak bulunmuştur.
2. Priz bitiş süresi üzerinde en etkili parametre P değerlerine göre; 0.75 S/K oranı için % 34.8 oranı ile bentonit ve 1.00 S/K oranı için %57.7 oranı ile uçucu kül olmaktadır.
3. Priz başlama ve bitiş sürelerinde, 0.75 ve 1.00 S/K oranı için bentonit oranı arttıkça düşme uçucu kül oranı arttıkça artma görülmektedir.
4. Priz başlama ve bitiş sürelerinde, 1.00 S/K oranı için %10 silis dumanı oranından sonra azalma olmaktadır. 0.75 S/K oranı için silis dumanı oranı arttıkça priz başlama ve bitiş süreleri azalmaktadır.
5. Her iki S/K oranı içinde %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanı kullanılarak deneyler yapılması durumunda priz başlama ve priz bitiş sürelerinin minimum olacağı belirlenmiştir.
6. S/K oranı arttıkça priz başlama ve bitiş süreleride artmaktadır.
7. Yüksek S/K oranlarında katkı malzemelerinin priz süreleri üzerindeki etkisi önemsenmeyecek kadar azalmaktadır.

5.1.3. Akma süreleri

1. Akma süresi üzerinde en etkili parametre P değerine göre, 1.25 S/K oranı için %36.1 oranı ile silis dumanıdır.
2. Akma süresi sonucunu üzerinde P değerine göre, %3 oranı ile uçucu kül en az etkili parametre olmaktadır.
3. Bentonit düşük S/K oranında akma süresinin azalmasına neden olmaktadır.
4. Silis dumanı oranı arttıkça akma süresi artmakta, uçucu kül oranı arttıkça akma süresi azalmaktadır.
5. Deneylerin yapılabileceği farklı karışımlar içinde en fazla akma süresinin %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının kullanıldığı deneyde ölçülebileceği belirlenmiştir.
6. S/K oranının artması akma süresinide artırmaktadır.

5.1.4. Çökelme yüzdeleri

1. Çökelme miktarı üzerinde en etkili parametre silis dumanı olmuştur. P değerlerine göre; 0.75 S/K oranı için %54.1, 1.00 S/K oranı için %80.6 ve 1.25 S/K oranı için %83.8 oranında etkili olmaktadır.
2. Her üç S/K oranı için (0.75, 1.00 ve 1.25) bentonit ve silis dumanı oranı arttıkça çökelme miktarı azalmaktadır.
3. 1.00 S/K oranı için %30 uçucu kül oranından sonra çökelme miktarı azalmakta, 1.25 S/K oranı için %20 uçucu kül oranından sonra çökelme miktarı artmaktadır. 0.75 S/K oranı için uçucu kül oranı arttıkça çökelme miktarı artmaktadır.
4. Çökelme miktarı S/K oranı artması ile artma göstermektedir.

5.1.5. Enjeksiyonlu zemin numuneleri

1. 0.75 S/K oranı için enjeksiyon uygulanan zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (7,14 ve 28 günlük) üzerinde en iyi sonucu 1. grup karışım (%0 bentonit,%10 uçucu kül ve % 20 silis dumanı) vermektedir. Bu durumda 7, 14 ve 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 9.03 Mpa, 15.87 Mpa ve 15.27 Mpa olarak bulunmuştur.
2. 1.00 ve 1.25 S/K oranı için enjeksiyon uygulanan zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri (7,14 ve 28 günlük) üzerinde en iyi sonucu 2. grup karışım (%3 bentonit,%10 uçucu kül ve % 20 silis dumanı) vermektedir. S/K=1.00 için 7, 14 ve 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 3.93 Mpa, 7.83 Mpa ve 9.66 Mpa ve S/K=1.25 için ise 7, 14 ve 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 1.67 Mpa, 2.93 Mpa ve 4.89 Mpa olarak bulunmuştur.
3. Sadece çimento kullanılarak yapılan karışım (3.grup) ile enjekte edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri, katkı malzemesi kullanılarak yapılan karışımla (1. ve 2. grup) ile enjekte edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni sadece çimento ile yapılan karışımın çökelme yüzdesinin fazla , priz sürelerinin uzun ve viskozitesinin iyi olmamasıdır.

5.2. Sonuç

Bu çalışmada, bentonit uçucu kül ve silis dumanının enjeksiyon karışımları üzerindeki etkileri Taguchi Yöntemine göre başarılı bir şekilde araştırılmıştır. Deney sonuçlarının literatür bilgileri ile uyum içerisinde olması Taguchi Yönteminin uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu durum Taguchi Yönteminin geoteknik mühendisliği deney tasarımlarında da rahatlıkla uygulanabileceğini göstermektedir. Taguchi Yöntemine göre yapılan bu çalışma sonucunda elde edilen genel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Bentonitin düşük S/K oranlarında (0.75, 1.00) enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemetleri (7, 14 ve 28 günlük) üzerinde etkisi oldukça az olurken, yüksek S/K oranlarında (1.25) düşürmektedir. Bentonit miktarı arttıkça priz başlama ve bitiş süreleri ($S/K=0.75$ ve 1.00 için) azalmaktadır. Bentonit miktarının artması ile $S/K=0.75$ ve 1.00 için akma süresi azalmakta, $S/K=1.25$ için ise artırmaktadır. Bentonit miktarı her üç S/K (0.75, 1.00 ve 1.25) oranı için çökelme yüzdesini düşürmektedir.

Uçucu külün serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi azaltıcı yönde olurken, $S/K=1.00$ için 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetini 2. seviyeye kadar (%20) artırdığı görülmektedir. Priz başlama ve bitiş süreleri üzerinde uçucu külün etkisi artırıcı yönde olurken, akma süresi üzerinde azaltıcı yönde etki etmektedir. Düşük S/K oranı (0.75) için uçucu kül çökelme yüzdesini artırırken, $S/K=1.00$ ve 1.25 için çok önemli bir etkisi olmamaktadır.

Silis dumanı enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemetlerini genelde artırmaktadır. Priz başlama ve bitiş süreleri üzerinde azaltıcı etki gösteren silis dumanı, akma süresi sonuçları üzerinde ise artırıcı yönde etki etmektedir. Her üç S/K oranı için silis dumanı çökelme yüzdelerini azaltmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akbulut, S. 1999. Enjeksiyon İle Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Allan, M.L., 2000. Materials characterization of superplasticized cement-sand grout. *Cement and Concrete Research*, 30, 937-942.
- Allan, M.L., 1997. Rheology of Latex-Modified Grouts. *Cement and Concrete Research*, 27, 12, 1875-1884.
- Allan, M.L. and Kukacka L.E., 1995. Blast Furnace Slag-Modified Grouts For in Situ Stabilization of Chromium-Contaminated. *Soil Waste Management*. Vol, 15. No. 3, pp. 193- 202.
- Anonymous, 1984. Grouting Technology, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 20314-1000.
- Anonymous, 1996. Description of and Application for Grouts Used in the Civil Engineering Field by J.G.T.
- Anonim, 1999. Temel Sondaj ve Enjeksiyon Teknik Şartnamesi. DSİ Teknoloji Dairesi Başkanlığı Basım ve Foto-Film Şube Müdürlüğü, 10-25, Ankara.
- ASTM, C 109., 1998. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. 71-75.
- ASTM, C 939., 1997. Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete. 469-471.
- ASTM, C 953., 1987. Standard test method for time of setting of grouts preplaced-aggregate concrete in the laboratory. 485-486.
- ASTM, C 191., 1992. Standard test method for time of setting of hydraulic by vicat needle. 164-166.
- Bayat, O., 1998. Characterisation of Turkish fly ashes. *Fuel*, 77, 1059-1066.
- Beechie, B.E., 1993. Pressure grout reclamation processes conducted inside a building. 15th Annual Meeting of the Association of Abandoned Mine Land Programs.
- Bolton, M.D., Chin C.Y., 1994. Soil grouting in the mini-drum centrifuge. *CUED/D-soils/TR 266*.

- Bouzoubaa, N., Zhang M.H., Bilodeau A., Malhotra V.M., 1998. Laboratory-produced high-volume fly ash blended cement: physical properties and compressive strength mortars. *Cement and Concrete Research*, 28, 1555-1569.
- Bowen, R., 1981. *Grouting in Engineering Practice*. 2nd. Ed., Applied Science Publisher Ltd., London.
- Buekett, J., 1998 . *International Admixture Standards* . *Cement and Concrete Composites* 20, 137-140.
- Chen, Y., Nishiyama T., Terada M., Iwamoto Y., 1999. A Flourescent Approach to The İdentification of Grout Injected Into Fissures and Pore Spaces. *Engineering Geology*, 56, 395-401.
- Cumaraswamy, V. and Krizek R.J., 1986. *Journal of Geotechnical Engineering* 112,9.
- Çinicioğlu, F.Ö., 1997. Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu. İ.Ü. Basımevi ve Film Merkezi, 63-172, İstanbul.
- Erdoğan, T.Y., 1997. *Admixtures for concrete*. Middle East Technical University, 93-126, Ankara.
- Eric, R.D., Allen J.F., Jessee A.S., 1995. Jet grouting to support historic buildings. *Foundation Upgrading and Repair For Infrastructure Improvement*, 42-55.
- Eric, R.D., Paul D.T., John F., 1995. Soil fracture grouting to remediate settlement due to soft ground tunneling. 21-39.
- Eriksson, M., 2002. Grouting field experiment at the Aspo Hard Rock Laboratory. *Tunneling and Underground Space Technology*.
- Francis, M.P.E., Glen A., Gorski P.E., 1998. In situ soil mixing for the mitigation seismic lateral spreading- a case study. *Deep Foundation Institute's 23rd Annual Meeting*.
- Gary, E.T., Joseph K.C., Michael F.R., 1997. Horizontal chemical grouting beneath the hollywood freeway los angeles metrorail c-311. 73-81.
- Glenn, S.W. Francis B.G., Jerrod R.C., 1998. Remedial grouting of Dworshak Dam. *Grouts and Grouting Proceeding Of the Conference American Society of Civil Engineering*, 83-99.
- Güner, A., Özkan T.M., 1984. Geçirimsiz perde ve diyafram duvar yapımında bentonit-çimento bulamaçları. *Türkiye'de İnşaat Mühendisliği Alanındaki Gelişmeler kongresi* 84, 187-200.

- Hacıoğlu, E., Yüksek basınçlı enjeksiyon (jet grouting) yöntemi ile zemin iyileştirmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Harris, D.W., 1999. A Laboratory simulation of in-situ grouting portland cement and polyurethane materials with standard methods. U.S Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office.
- Huang, W.H., 1997. Properties of Cement-Fly Ash Grouth Admixed With Bentonite, Silica Fume, or Organic Fiber. *Cement and Concrete Research*, 27, 3, 395-406.
- Huang, W.H., 2001. Improving the properties of cement-fly ash grout using fiber and superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 31, 1033-1041.
- Huang, Z., Chen M., Chen X., 2002. A developed technology for wet-ground fine cement slurry withits applications. *Cement and Concrete Research*, 2238, 1-4.
- John, H.S., James F.H., 1992. A Design theory for compaction grouting. *Soil Improvement and Geosynthetics*, 215-228.
- Kaniraj, S.R., Havanagi V.G., 1999. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures. *Cement and Concrete Research*, 29, 673-677.
- Karahanoglu, H.İ., 2001. Uçucu kül ve bentonit ile hazırlanan çimento enjeksiyonlarının kohezyonsuz zeminlerdeki davranış ve özelliklerinin model deneylerle araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kefeng, T., Xincheng Pu., 1998. Strengthening effects of finely ground fly ash granulated blast furnace slag and their combination. *Cement and Concrete Research*, 28, 1819-1825.
- Kılıc, A., Yasar E., Atis C.D., 2002. Effect of bar shape on the pull-out of fully-grouted rockbolts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1-6.
- Kılıc, A., Yasar E., Çelik A.G., 2002. Effect of grout propties on the pull-out load capacity of fully-grouted rock bolt. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1-8.
- Kim, T., Lee C., 1998. Deformation behavior changes of jointed rocks by cement milk grouting.
- Kleyner, I., and Raymond J.K., 1995. Mathematical Model For Bore-Injected Cement Grout. *Installations Journal of Geotechnical Engineering*, 121, 11, 5815.
- Krishnamoorthy, T.S., Gopalakrishnan S., Balasubramanian K., Bharatkumar B.H., Rama Mahon Rao P., 2002. Investigation on the cementitious grout containing

- supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 32, 1395-1405.
- Langan, B.W., Weng K., Ward M.A., 2002. Effect of silica fume and fly ash on heat of portland cement. *Cement and Concrete Research*, 32, 1045-1051.
- Lee, J.S., Bang C.S., Mok Y.J., Joh S.H., 2000. Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses. *Rock Mechanics and Mining Science*, 37, 1027-1037.
- Littlejohn, 1985. *Chemical Grouting-1. Ground Engineering*.
- Logothetis, N., 1992. *Managing for Total Quality From Deming to Taguchi and SPC*. Prentice Hall International Ltd, New York.
- Mansure, A.J., 2002. Polyurethane grouting geothermal lost circulation zones. *Society of Petroleum Engineering* 74556.
- Mario, J.P., 1992. Settlement reduction by soil fracture grouting. *Soil Improvement and Geosynthetics*, 398-409.
- Mike, L.S., Bryan D.S., 2001. Effect of remedial grouting on the ground-water flow system at Red Rock Dam near Pella, Iowa. U.S. Geological Survey, WRIR 00-4231.
- Mirza, J., Mirza M.S., Roy V. and Saleh K., 2002. Basic rheological and mechanical properties of high-volume fly ash grouts. *Construction and Building Materials*, 16, 353-363.
- Mohamed, A.M.O., 2000. The role of clay minerals in marly soils on its stability. *Engineering Geology*, 57, 193-203.
- Neville, A.M., 1995. *Properties of concrete*. Educational Low-Priced Books Scheme, 63-64, England.
- Öztaş, A.F., 1978. Temellerin Kil ve Çimento Enjeksiyonu. T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Özbek, T., 1978. Çimento Enjeksiyonu. T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 4-14.
- Paul, M.B., Ray J., 1997. Design and construction of a compaction grouting program to remediate a highway over karst. *Compaction Remediation and Testing*, 54-61.
- Postacıoğlu, B. 1987. Bağlayıcı Maddeler. Teknik Kitaplar yayınevi, İstanbul, 1, 48-50.

- Quebaud, S., Sibai M., Henry J.P., 1998. Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils. *Tunneling and Underground Space Technology*, 13, 173-180.
- Rowe, C.J., 2000. Inflatable packer for grouting. Inflatable Packer International.
- Rosquoet, F., Alexis A., Khelidj A., Phelipot A., 2002. Experimental study of cement grout: rheological behavior and sedimentation. *Cement and Concrete Research*, 2239, 1-10.
- Roy, R., 2001. *Design of Experiments Using The Taguchi Approach*, Wiley-Interscience, New York.
- Snuparek, R. And Soucek K., 2000. Laboratory testing of chemical grouts. *Tunneling and Underground Space Technology*, 15.
- Stavridakis, E.I. and Hatzigogos T.N., 1999. Influence of liquid limit and slaking on cement stabilized clayey admixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 17, 145-154.
- Steve, W., Bruce B., Fly ash grout testing in a simulated wet mine environment. 18th Annual Conference of the Association of Abandoned Mine Land Programs.
- Şirvancı, M., 1997. *Kalite İçin Deney Tasarımı*. Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Taguchi Methods, 1995. G.S.Peace Addison-Wesley publishing Company.
- Temiz, H., Karakeçi A.Y., 2002. An Investigation on microstructure of cement paste containing fly ash and silica fume. *Cement and Concrete Research*, 32, 1131-1132.
- Temel Sondaj ve Enjeksiyon Teknik Şartnamesi., 1999. T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 8-25.
- Toumbakari, E.E., Van Gemert D., Tassios T.P., Tenoutasse N., 1999. Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts. *Cement and Concrete Research*, 29, 867-872.
- Tsingos, P.H., 2000. Guidelines for injection in underground construction and tunneling.
- Tvetien V., 2001. Experiences from environmental risk management of chemical grouting agents used during construction of Romeriksporten Tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology*, 15, 369-378.
- Uzuner, B.A., 2001. *Temel Zemin Mekaniği*. Teknik Yayınevi, 1-74, Trabzon.

- Uzuner, B.A., 1995. Temel Mühendisliğine Giriş. Derya Kitapevi, 137-150, Trabzon.
- Vik, E.A., Sverdrup L., Kelley A., Storhaug R., Beitnes A., Boge K., Grepstad G.K., Vipulanandan C., and Krizek R.J., 1986. Mechanical behavior of chemically grouted sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112, 9, 869-887.
- Welsh, J.P., 1983. Dynamic deep compaction of sanitary landfill to support süperhighway. *Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 319-321.
- Wong, Y.L., Lam L., Poon C.S., Zhou F.P., 1999. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces. *Cement and Concrete Research*, 29, 1905-1913.
- Xinghua W. and Quqing G., 1997. Study of a new cheap grouting material; Clagtc Hardening Grout. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12, 4, 497-502.
- Yunsheng, Xu., Chung D.D.L., 2000. Improving silics fume cement by using silane. *Cement and Concrete Research*, 30, 1305-1311.
- Zebovitz, S., Krizek R.J., and Atmatzıdis D.K., 1989. Injection of Fine Sands With Very Fine Cement Grouth. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115, 12.

ÖZGEÇMİŞ

Erzurum’da 1969 yılında doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 1988 yılında girdiği Erzurum Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm’ünden 1992 yılında mezun oldu. 1993 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi Rektörlüğü Deprem Araştırma Merkezi Müdürlüğünde göreve başladı. 1993-1996 yılları arasında Erzurum Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimini tamamladı ve aynı yıl Erzurum Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında doktora başladı. Halen 1999 yılında görevlendirildiği Erzurum Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevine devam etmektedir.

