

**ENJEKSİYON İLE GRANÜLER ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Suat AKBULUT

100709

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Mayıs 1999

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Eylül 1999

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN (YTÜ)

Prof. Dr. Gökhan BAYKAL (BÜ)

Doç. Dr. Bülent ÖZÜER

Doç. Dr. İsmail H. AKSOY

EYLÜL 1999

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında, gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı, tez yürütücüm ve danışmanım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Sağlamer'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deney düzeneğinin oluşturulması ve gerekli cihazların temin edilmesi amacıyla, Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından sağlanan proje desteği için teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmanın yürütülmesinde her türlü yardımlarını gördüğüm İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı ve Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri ve çalışanlarına teşekkür ederim.

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

Mayıs 1999

İnş. Y. Müh. Suat AKBULUT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
KISALTMALAR	V
TABLO LİSTESİ	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VII
SEMBOL LİSTESİ	XIII
ÖZET	XV
SUMMARY	XX
1. GİRİŞ	1
2. ENJEKSİYON KARIŞIMLARI VE ZEMİN ENJEKSİYONU	6
2.1. Enjeksiyon Karışımları	6
2.1.1. Çimento Karışımlar	8
2.1.2. Çimento-Kil Karışımlar	9
2.1.2. Kil Karışımlar	10
2.1.4. Kil-Kimyasal Karışımlar	10
2.1.5. Kimyasal Karışımlar	11
2.1.6. Emülsiyon Karışımlar	12
2.2. Zemin Enjeksiyonları	12
2.2.1. Dolgu Enjeksiyonu	12
2.2.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu	13
2.2.3. Çatlak Enjeksiyonu	14
2.2.4. Yüksek Basınç Enjeksiyonu	15
2.2.5. Kontakt Enjeksiyonu	16
2.2.6. Konsolidasyon Enjeksiyonu	17
2.2.7. Perde Enjeksiyonu	17
2.3. Enjeksiyon İşlemi	17
2.3.1. Enjeksiyon Basıncı	18
2.3.2. Etkin Yarıçap	20
2.3.3. Enjeksiyon Süresi	21
2.3.4. Geçirgenlik	22
2.3.5. Zeminlerdeki Boşluk Yapıları	22
2.3.6. Dane Büyüklüğü Dağılımı ve Zemin Tabakaları	23
2.3.7. Zemin ve Sızıntı Suyu	24
2.4. Karışımların Enjeksiyon Edilebilirliği	24

3. KONU İLE YAYINLANMIŞ ÇALIŞMALAR	27
3.1. Daneli Karışımlarla İlgili Yapılan Çalışmalar	28
3.2. Kimyasal Karışımlarla İlgili Yapılan Çalışmalar	42
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	48
4.1. Deneylerde Kullanılan Zemin ve Karışım Malzemelerin Özellikleri	48
4.1.1. Deneylerinde Kullanılan Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi	49
4.1.2. Deneylerde Kullanılan Çimentonun Özellikleri	50
4.1.3. Deneylerde Kullanılan Silis Dumanının Özellikleri	51
4.1.4. Deneylerde Kullanılan Uçucu Külün Özellikleri	51
4.1.5. Deneylerde Kullanılan Kilin Özellikleri	52
4.1.5.1. Kil Mineralojisinin Belirlenmesi	52
4.2. Deneylerde Kullanılan Aletler ve Deney Düzenneği	55
4.3. Deneylerin Yapılışı	59
4.3.1. Ön Deneylerin Yapılması	59
4.3.2. A Serisi Deneyler	63
4.3.3. B ve C Serisi Deneyler	65
4.3.4. D Serisi Deneyler	68
4.3.5. E Serisi Deneyler	70
4.4. Deney Sonuçları ve Yorumu	71
4.4.1. A Serisi Deney Sonuçları	71
4.4.2. B Serisi Deney Sonuçları	84
4.4.3. C Serisi Deney Sonuçları	99
4.4.4. D Serisi Deney Sonuçları	112
4.4.5. E Serisi Deney Sonuçları	125
5. SONUÇLAR	133
KAYNAKLAR	136
EK	140
ÖZGEÇMİŞ	178

KISALTMALAR

A	: Aktivite
AC	: Akril Amid
AE	: Asfalt Emisyonu
ÇL	: Çelik Lif
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
ER	: Epoksi Reçinesi
K	: Kil
KE	: Kevler
KK	: Kızdırma Kaybı
KL	: Karbon Lif
KN	: Katkısız Numune
MC	: Micro Fine Cement
PÇ	: Portland Çimentosu
PL	: Polipropilen Lif
SB	: Sitrin-Butadien (Styrene-Butadiene)
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Scanning Electron Microscopy
SS	: Sodyum Silikat
UK	: Uçucu Kül

TABLÖLAR

	Sayfa No
Tablo 2.1. Bazı karışımların enjeksiyon sınırları	25
Tablo 3.1. Katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi	31
Tablo 3.2. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilite değişimleri	36
Tablo 3.3. Kum kolonlarda enjeksiyon edilebilirlik yükseklik değişimleri	41
Tablo 4.1. Deney zeminin indeks özellikleri	50
Tablo 4.2. Portland çimentosunun kimyasal bileşenleri	51
Tablo 4.3. Silis dumanının kimyasal bileşenleri	51
Tablo 4.4. Uçucu külün kimyasal bileşenleri	52
Tablo 4.5. Kil malzemesinin indeks özellikleri	52
Tablo 4.6. Kil malzemesinin kimyasal bileşenleri	55
Tablo 4.7. Ön deneylerde kullanılan zemin numunelerin özelliği ve enjeksiyon edilebilirliği	62
Tablo 4.8. A serisi karışım numunelerin oranları	64
Tablo 4.9. B serisi karışım ve zemin numunelerinin özellikleri	66
Tablo 4.10. C serisi karışım ve zemin numunelerinin özellikleri	67
Tablo 4.11. D serisi karışım ve zemin numunelerinin özellikleri	69
Tablo 4.12. A serisi karışım numunelerin 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetleri	72
Tablo 4.13. B serisi enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. gündeki basınç mukavemeti ve elastik modülü değerleri	85
Tablo 4.14. C serisi enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. gündeki basınç Mukavemeti ve elastik Modülü Değerleri	101
Tablo 4.15. D serisi enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilite Değerleri	113
Tablo 4.16. Karışımların çökelme ve viskozite deney sonuçları	127

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Çimento Karışımlarının viskozite ve çökelme hızı	7
Şekil 2.2. Dolgu, kompaksiyon, çatlak enjeksiyonu	14
Şekil 2.3. Yüksek basınç enjeksiyon uygulaması	15
Şekil 2.4. Enjeksiyon basıncının ve oranının zamanla değişimi	18
Şekil 2.5. Enjeksiyon karışımlarının uygulama sınırı	23
Şekil 3.1. Silis dumanı katkılı karışımların basınç mukavemeti değişimi	28
Şekil 3.2. Farklı karışımların basınç mukavemeti değişimi	29
Şekil 3.3. Numunelerin permeabilitesinin karışım tipi ile değişimi	30
Şekil 3.4. Farklı karışımların çökelme yüzdesinin zamanla değişimi	32
Şekil 3.5. Farklı karışımların gerilme deformasyon ilişkisi	33
Şekil 3.6. Farklı karışımlarla enjeksiyon uygulanmış numunelerin gerilme-deformasyon ilişkisi	33
Şekil 3.7. Yatay ve düşey kür edilmiş numunelerin basınç mukavemetinin Su/katı oranı ile değişimi	36
Şekil 3.8. Çimento enjeksiyonu uygulanmış numunelerin su/katı oranı ile Basınç mukavemeti değişimi	38
Şekil 3.9. Katkılı karışımlarının viskozite değerinin su/katı oranı ile değişimi	39
Şekil 3.10. Silis dumanı katkılı silikat enjeksiyonu uygulanmış numunelerin Gerilme deformasyon ilişkisi	46
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan zeminin alındığı malzeme ocağı	49
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan zemin ve karışım malzemelerinin Granülometrisi	50
Şekil 4.3. Kil malzemenin X-Ray eğrileri	53
Şekil 4.4. Kil malzemenin DTA ve TG Eğrileri	54
Şekil 4.5. Deneylerde kullanılan rotasyonel viskozimetre	56
Şekil 4.6. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan düzenek	57
Şekil 4.7. Enjeksiyon uygulama esnasında bir görünüş	57
Şekil 4.8. Permeabilite deney düzeneği	58
Şekil 4.9. Permeabilite deneyleri esnasında bir görünüş	58
Şekil 4.10. Başarısız enjeksiyon uygulamaları	61
Şekil 4.11. Enjeksiyon basıncının zemin granülometrisi ile değişimi	63
Şekil 4.12. Karışım numuneleri	65
Şekil 4.13. Yeterli enjeksiyon uygulanmış numuneler	68
Şekil 4.14. Çökelme (sedimentasyon) deneyi	70
Şekil 4.15. Çimento Karışımlarının farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (%100 çimento)	73
Şekil 4.16. Silis dumanı katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (SD/ÇM=5/95)	74
Şekil 4.17. Uçucu Kül katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (UK/ÇM=5/95)	75

Şekil 4.18. Kil katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($K/\bar{C}M=5/95$)	76
Şekil 4.19. Çimento ve silis dumanı katkılı karışımların basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi	77
Şekil 4.20. Çimento ve uçucu kül katkılı karışımların basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi	78
Şekil 4.21. Çimento ve kil katkılı karışımların basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi	79
Şekil 4.22. Çimento karışımlarının basınç mukavemetinin zamanla değişimi (karışım %100 çimento)	80
Şekil 4.23. Silis dumanı katkılı karışımların basınç mukavemetinin Zamanla değişimi ($SD/\bar{C}M=5/95$)	80
Şekil 4.24. Silis dumanı karışımlarının 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetinin silis dumanı yüzdesi ile değişimi	81
Şekil 4.25. Uçucu kül karışımlarının 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetinin Uçucu kül yüzdesi ile değişimi	82
Şekil 4.26. Kil karışımlarının 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetinin kil yüzdesi ile değişimi	83
Şekil 4.27. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($Dr=0.30$, karışım %100 çimento)	86
Şekil 4.28. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($Dr=0.30$, $SD/\bar{C}M=5/95$)	87
Şekil 4.29. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($Dr=0.30$, $UK/\bar{C}M=5/95$)	88
Şekil 4.30. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($Dr=0.30$, $K/\bar{C}M=5/95$)	89
Şekil 4.31. Çimento ve silis dumanı enjeksiyonu uygulanmış numunelerin 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.30$)	90
Şekil 4.32. Çimento ve uçucu kül enjeksiyonu uygulanmış numunelerin 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.30$)	91
Şekil 4.33. Çimento ve kil enjeksiyonu uygulanmış numunelerin 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.30$)	92
Şekil 4.34. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($Dr=0.30$, karışım %100 çimento)	93
Şekil 4.35. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($Dr=0.30$, $SD/\bar{C}M=5/95$)	93
Şekil 4.36. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin silis dumanı yüzdesi ile değişimi ($Dr=0.30$, Karışım= $SD/\bar{C}M$)	94
Şekil 4.37a. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. Günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.30$)	95
Şekil 4.37b. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 28. Günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.30$)	95
Şekil 4.38a. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. Günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.30$)	96

Şekil 4.38b. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 28. Günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.30$)	96
Şekil 4.39. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7 ve 28 günde elastisite modülünün su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.30$, karışım; çimento, silis dumanı, uçucu kül ve kil)	97
Şekil 4.40a. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. günde elastisite modülünün Katkı tipi ile değişimi ($Dr=0.30$)	98
Şekil 4.40b. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 28. günde elastisite modülünün Katkı tipi ile değişimi ($Dr=0.30$)	98
Şekil 4.41. Çimento ve silis dumanı enjeksiyonu uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.80$)	102
Şekil 4.42. Çimento ve uçucu kül enjeksiyonu uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.80$)	103
Şekil 4.43. Çimento ve kil enjeksiyonu uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde basınç mukavemetinin su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.80$)	104
Şekil 4.44. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($Dr=0.80$, karışım %100 çimento)	105
Şekil 4.45. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($Dr=0.80$, $SD/ÇM=5/95$)	105
Şekil 4.46. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin silis dumanı yüzdesi ile değişimi ($Dr=0.80$, karışım $SD/ÇM$)	106
Şekil 4.47a. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7.günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.80$)	107
Şekil 4.47b. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 28.günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.80$)	107
Şekil 4.48a. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7.günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.80$)	108
Şekil 4.48b. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 28.günde katkı tipi ile basınç mukavemeti değişimi ($Dr=0.80$)	108
Şekil 4.49. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde elastisite modülünün su/katı oranı ile değişimi ($Dr=0.80$, karışım: çimento, silis dumanı, uçucu kül, kil)	109
Şekil 4.50a. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. günde elastisite modülünün katkı tipi ile değişimi ($Dr=0.80$)	110
Şekil 4.50b. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 28. günde elastisite modülünün katkı tipi ile değişimi ($Dr=0.80$)	110
Şekil 4.51. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (Dr) ile değişimi, (%100 çimento)	111
Şekil 4.52. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (Dr) ile değişimi, ($SD/ÇM=5/95$)	111
Şekil 4.53. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin su/katı oranı ile değişim eğrileri ($Dr=0.50$, karışım: çimento ve silis dumanı)	114
Şekil 4.54. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin su/katı oranı ile değişim eğrileri ($Dr=0.50$, karışım: çimento ve uçucu kül)	115
Şekil 4.55. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin su/katı oranı ile değişim eğrileri ($Dr=0.50$, karışım: çimento ve kil)	116

Şekil 4.56. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilite katsayısının zamanla değişimi ($D_r = 0.50$, karışım: çimento ve silis dumanı, su/katı= 1/1)	117
Şekil 4.57. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilite katsayısının zamanla değişimi ($d_r = 0.50$, karışım: çimento ve uçucu kül, su/katı= 1/1)	117
Şekil 4.58. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilite katsayısının zamanla değişimi ($D_r = 0.50$, karışım: çimento ve kil, su/katı= 1/1)	118
Şekil 4.59. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilite katsayısının zamanla değişimi ($D_r = 0.50$, karışım: çimento ve kil, su/katı= 2/1)	118
Şekil 4.60. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin silis dumanı yüzdesi ile değişimi (a) $s/k=1/1$, (b) $s/k=1.5/1$, (c) $s/k=2/1$	119
Şekil 4.61. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin uçucu kül yüzdesi ile değişimi (a) $s/k=1/1$, (b) $s/k=1.5/1$, (c) $s/k=2/1$	120
Şekil 4.62. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin kil yüzdesi ile değişimi (a) $s/k=1/1$, (b) $s/k=1.5/1$, (c) $s/k=2/1$	121
Şekil 4.63. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin basınç mukavemeti ile değişimi (karışım: çimento ve silis dumanı)	122
Şekil 4.64. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin basınç mukavemeti ile değişimi (karışım: çimento ve uçucu kül)	123
Şekil 4.65. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin basınç mukavemeti ile değişimi (karışım: çimento ve kil)	124
Şekil 4.66. Çimento, silis dumanı katkılı karışımların çökelme yüzdesinin zamanla değişimi	128
Şekil 4.67. Çimento karışımların su/katı oranı ile çökelme yüzdesinin değişimi	128
Şekil 4.68. Kil katkılı karışımların çökelme yüzdesinin zamanla değişimi	129
Şekil 4.69. Kil katkılı karışımların çökelme yüzdesinin kil yüzdesi ile değişimi	129
Şekil 4.70. Silis dumanı enjeksiyonu uygulanmış numunelerinin basınç mukavemetinin çökelme yüzdesi ile değişimi	130
Şekil 4.71. Silis dumanı enjeksiyonu uygulanmış numunelerin permeabilite katsayısının çökelme yüzdesi ile değişimi	130
Şekil 4.72. Karışımların viskozite değerinin su/katı oranı ile değişim eğrileri	131
Şekil 4.73. Viskozite değerinin silis dumanı, uçucu kül ve kil yüzdesi ile Değişimi	132
Şekil A.1. Silis dumanı katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($SD/ÇM=10/90$)	141
Şekil A.2. Silis dumanı katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($SD/ÇM=20/80$)	142
Şekil A.3. Uçucu kül katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($UK/ÇM=10/90$)	143
Şekil A.4. Uçucu kül katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($UK/ÇM=20/80$)	144
Şekil A.5. Kil katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($Kil/ÇM=10/90$)	145
Şekil A.6. Kil katkılı karışımların farklı su/katı oranlarında 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri ($Kil/ÇM=20/80$)	146
Şekil A.7. Silis dumanı katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($SD/ÇM=10/90$)	147
Şekil A.8. Silis dumanı katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($SD/ÇM=20/80$)	147
Şekil A.9. Uçucu kül katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($UK/ÇM=5/95$)	148

Şekil A.10. Uçucu kül katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi (UK/ÇM=10/90)	148
Şekil A.11. Uçucu kül katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi (UK/ÇM=20/80)	149
Şekil A.12. Kil katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi (K/ÇM=5/95)	149
Şekil A.13. Kil katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi (K/ÇM=10/90)	150
Şekil A.14. Kil katkılı karışımların basınç mukavemetinin zamanla değişimi (K/ÇM=20/80)	150
Şekil A.15. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.30, SD/ÇM=10/90)	151
Şekil A.16. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr=0.30, SD/ÇM=20/80)	152
Şekil A.17. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.30, UK/ÇM= 10/90)	153
Şekil A.18. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.30, kil/çimento= 10/90)	154
Şekil A.19. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi (Dr= 0.30, SD/ÇM=10/90)	155
Şekil A.20. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi (Dr= 0.30, SD/ÇM=20/80)	155
Şekil A.21. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi (Dr= 0.30, UK/ÇM=5/95)	156
Şekil A.22. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi (Dr= 0.30, UK/ÇM=10/90)	156
Şekil A.23. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi (Dr= 0.30, Kil/ Çimento= 5/95)	157
Şekil A.24. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi (Dr= 0.30, Kil/ Çimento= 10/90)	157
Şekil A.25. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin uçucu kül yüzdesi ile değişimi (Dr=0.30, karışım UK/ÇM)	158
Şekil A.26. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin kil yüzdesi ile değişimi (Dr=0.30, karışım K/ÇM)	159
Şekil A.27. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri, (Dr=0.80, %100 çimento)	160
Şekil A.28. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri, (Dr= 0.80, SD/ÇM= 5/95)	161
Şekil A.29. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.80, SD/ÇM=10/90)	162
Şekil A.30. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.80, SD/ÇM=20/80)	163
Şekil A.31. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.80, UK/ÇM= 5/95)	164
Şekil A.32. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.80, UK/ÇM= 10/90)	165
Şekil A.33. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.80, kil/çimento=5/95)	166
Şekil A.34. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. günde gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Dr= 0.80, kil/çimento=10/90)	167

Şekil A.35. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($D_r = 0.80$, $SD/ÇM = 10/90$)	168
Şekil A.36. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($D_r = 0.80$, $SD/ÇM = 20/80$)	168
Şekil A.37. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($D_r = 0.80$, $UK/ÇM = 5/95$)	169
Şekil A.38. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($D_r = 0.80$, $UK/ÇM = 10/90$)	169
Şekil A.39. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($D_r = 0.80$, $kil/çimento = 5/95$)	170
Şekil A.40. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin zamanla değişimi ($D_r = 0.80$, $kil/çimento = 10/90$)	170
Şekil A.41. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin uçucu kül yüzdesi ile değişimi ($D_r = 0.80$, karışım $UK/ÇM$)	171
Şekil A.42. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin uçucu kül yüzdesi ile değişimi ($D_r = 0.80$, karışım $K/ÇM$)	172
Şekil A.43. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (D_r) ile değişimi ($SD/ÇM = 10/90$)	173
Şekil A.44. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (D_r) ile değişimi, ($SD/ÇM = 20/80$)	173
Şekil A.45. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (D_r) ile değişimi ($UK/ÇM = 5/95$)	174
Şekil A.46. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (D_r) ile değişimi ($UK/ÇM = 10/90$)	174
Şekil A.47. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (D_r) ile değişimi ($kil/çimento = 5/95$)	175
Şekil A.48. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin relatif sıkılığı (D_r) ile değişimi, ($kil/çimento = 10/90$)	175
Şekil A.49. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin zamanla değişimi ($D_r = 0.50$, çimento ve silis dumanı, $su/katı = 1.5/1$)	176
Şekil A.50. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin zamanla değişimi ($D_r = 0.50$, çimento ve silis dumanı, $su/katı = 2/1$)	176
Şekil A.51. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin zamanla değişimi ($D_r = 0.50$, çimento ve uçucu kül, $su/katı = 1.5/1$)	177
Şekil A.52. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde permeabilitenin zamanla değişimi ($D_r = 0.50$, çimento ve uçucu kül, $su/katı = 2/1$)	177

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktivite
C	: Kohezyon
C_c	: Derecelenme sayısı
C_u	: Üniformluk sayısı
D	: En küçük küresel kum danesi çapı
D_{10}	: Zeminin efektif dane çapı
D_{15}	: Geçen zeminin %15' ine karşılık gelem dane çapı
D_{30}	: Geçen zeminin %30' una karşılık gelem dane çapı
D_{60}	: Geçen zeminin %60' ına karşılık gelem dane çapı
D_{85}	: Ağırlık olarak karışımın %85'inin geçtiği dane çapı
D_{95}	: Ağırlık olarak karışımın %95'inin geçtiği dane çapı
D_{min}	: Kum daneleri arasındaki minimum boşluk çapı
D_r	: Relatif sıkılık
E	: Elastisite modülü
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
E_p	: Enjeksiyon basıncı
G_s	: Özgül ağırlık
H	: Toplam yükseklik
I_C	: Kıvam indisi
I_L	: Likidite indisi
I_p	: Plastisite indisi
k	: Permeabilite katsayısı
k_0	: Solüsyonu referans alan permeabilite katsayısı
N	: Enjeksiyon edilebilirlik
PH	: Asidik özellik
P_o	: Çatlama basıncı
q_e	: Birim zamandaki enjeksiyon
Q_e	: Toplam enjeksiyon hacmi
q_u	: Örselenmemiş numunenin serbest basıncı
R	: Etkin yarıçap
S/ζ	: Su/çimento
S/k	: Su/katı
SP	: Kötü derecelenmiş kum
t	: Zaman
W_L	: Likit limit
W_P	: Plastik limit
η	: Suyun viskozitesi
τ_0	: Karışımın akma direnci
η_0	: Akışkanın viskozitesi
σ_3	: Çevre basıncı
Δh	: Yüzeyden dikey mesafe

ϕ	: Kayma gerilmesi açısı
ϕ_k	: Kuru zeminin kayma gerilmesi açısı
γ_k	: Kuru birim ağırlık
γ_{kmax}	: Zeminin maksimum kuru birim ağırlığı
γ_{kmin}	: Zeminin minimum kuru birim ağırlığı
γ_n	: Doğal birim ağırlık
ω_n	: Doğal su muhtevası
γ_s	: Dane birim ağırlığı
$1/m$	: Poission oranı
$2a$	: Çatlak genişliği
$2r$	: Kuyu yarıçapı



ENJEKSİYON İLE GRANÜLER ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

19. Yüzyılın başından beri zeminlerin enjeksiyon ile iyileştirme uygulamaları geoteknik mühendisliğinde pratik olarak kullanılmaktadır. İlk kez enjeksiyon uygulaması 1802 yılında Fransa'da bir köprü ayağı altındaki zeminin taşıma gücünü artırmak için kullanılmıştır (Bruce, 1993). Kendiliğinden sertleşen puzolanlı çimento enjeksiyonu 1800'ler boyunca Fransa ve İngiltere'de gelişmeye devam etmiş ve kanallar, havuzlar, limanlar, köprüler gibi mühendislik yapılarına uygulanmıştır (Raymond, 1996).

Günümüzde zemin boşlukları doldurularak zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak, oturma ve geçirgenliğini azaltmak için pek çok enjeksiyon uygulaması yapılmaktadır. Bununla beraber son yıllarda, deprem yüklerinin zeminler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak ve sıvılaşmayı önlemek için zemin enjeksiyonu konusunda laboratuvar ve arazi çalışmaları yürütülmektedir. Zemin enjeksiyonu, özellikle yüzeyden iyileştirilemeyen, derin zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır.

Enjeksiyon ile zemin boşlukları veya kaya çatlakları belirli bir basınç altında uygun bir karışımla doldurularak zeminin taşıma gücü artırılır veya geçirgenliği azaltılır. Enjeksiyon uygulamaları inşaat mühendisliğinde yapı temellerinin desteklenmesinde, kaya çatlaklarının doldurulmasında, gevşek zeminlerin stabilizasyonunda, suya doygun granüler zeminlerin sıvılaşma riskinin azaltılmasında, baraj temellerinin geçirimsizliğinin sağlanmasında, yeraltında geçirimsiz perdelerin oluşturulmasında kullanılmaktadır (Shroff, 1993). Bunlara ek olarak diğer enjeksiyon uygulamaları da;

- Kuyu açma ve numune alma esnasında su akışının kontrol edilmesi.
- Sıra dışı oturmaların oluşmasını önlemek için boşluk ve çatlakların doldurulması.
- Müsaade edilen zemin basınçları altında yeni ve mevcut yapı temellerinin stabilizasyonu gibi sıralanabilir.

Bunların dışında pek çok destek yapısı ve arazi çalışmasında enjeksiyon teknikleri başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Enjeksiyon, halen temel mühendisliği uygulamalarında ve diğer mühendislik çalışmalarında kullanılmaktadır. Yeni uygulama alanlarından biri de atık depolarında çöp suyunun sızmasıyla zemin ve yer altı suyunun kirlenmesinin önlenmesidir.

Amaca ve zemin tipine bağılı olarak kullanılan enjeksiyon tipi de değışmektedir. Yeraltı yapıları ve çalışmalarında özellikle kendini tutamayan zeminlerde yüksek basınç enjeksiyonu yapılırken, genel amaçlı zeminlerin iyileştirilmesinde dolgu, kompaksiyon ve çatlak enjeksiyonu uygulanmaktadır. Kaya ortamlarda daha çok konsolidasyon enjeksiyonu kullanılmaktadır.

Dolgu Enjeksiyonu: Enjeksiyon karışımı doğal yapıyı bozmayacak bir şekilde kaya çatlakları veya zemin boşlukları içerisine şırınga edilir. Dolgu enjeksiyonu yeraltı suyunu kontrol etmek ve zemin de gerekli stabilizasyonu sağlamak için kullanılır. Kullanılan en eski ve en yaygın enjeksiyon yöntemidir.

Kompaksiyon Enjeksiyonu: Enjeksiyon karışımının zemin içinde kontrollü yer değıştirmesine müsaade edilerek bozulmadan bir kütle olarak kalması sağlanır, sonuçta enjeksiyon kuyusu etrafındaki zayıf bölge basınçlı enjeksiyon karışımı ile sıkıştırılır. Kompaksiyon enjeksiyonu yumuşak, gevşek veya karışık zeminlerin iyileştirilmesi için uygundur.

Çatlak Enjeksiyonu: Basınç altındaki karışım çatlaklı kaya veya zemin ortama şırınga edilerek malzemelerin doğal yapısı bozulur ve karışımın çatlaklı bölgeye nüfuz etmesi sağlanır (Shroff, 1993). Bu metot daha çok zeminin taşıma gücü ve kayma gerilmesini artırmak için kullanılır.

Yüksek Basınç Enjeksiyonu: 1960'ların başında geliştirilen yeni bir tekniktir (Welsh, 1991). Jet grouting olarak da isimlendirilen bu metotla, su-çimento karışımı 300-500 atmosfer basınçta zemine verilir ve zeminle karışması sağlanır. Yüksek basınçlı enjeksiyon zeminin pek çok geoteknik özelliğinde gerekli iyileşme sağlar (Raymond, 1996). Farklı zemin türlerinde kullanılması yanında daha çok derinlerde ki nispeten ulaşılabilir gevşek zeminler yüksek basınç enjeksiyonu ile sağlamlaştırılabilir.

Konsolidasyon enjeksiyonu: Bu enjeksiyon yöntemi ile daha çok kaya ortamda ulaşılabilir çatlaklar, ayrık kütleler, fay bölgeleri, mağaralar ve diğere boşluklar doldurulur. Konsolidasyon enjeksiyonu temel zeminin mukavemetini artırır ve yapı içindeki zemin suyu akışını azaltır. Ayrıca konsolidasyon enjeksiyonu, kazı yapılan kaya kütlelerin yapı içine hareketini önlemek ve yük boşalmalarına engel olmak için uygulanabilir.

Zeminlerin enjeksiyonu konusunda temel belirleyici zemin sınıfı ve granülometrisi olması yanında, enjeksiyonda kullanılan karışımların tipi de önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Zemin enjeksiyonunda daneli ve danesiz (boyutsuz) karışımlar kullanılmaktadır. Kaba daneli kum ve çakıl zeminlerin enjeksiyonunda daneli karışımlar kullanılırken ince daneli kum ortamlarda boyutsuz karışımlar kullanılmaktadır.

Enjeksiyon da kullanılan karışımlar genelde süspansiyon (daneli) ve solüsyon (boyutsuz/danesiz) karışımlar olarak tanımlanır. Süspansiyon karışımlar toprak, çimento-kireç, asfalt, emülsiyon vb.'lerini içerirken solüsyon karışımlar geniş bir kimyasal grubu içermektedir. Toprak veya kil-su karışımlar geçirimsizlik ve kompaksiyon enjeksiyonunda öncelikli olarak kullanılmaktadır. Kil süspansiyonlar içerisinde oluşan bağlar çimento süspansiyonlar içindeki bağlardan daha zayıf

olmasına rağmen bu karışımlar boşluklarda dolgular oluşturarak zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirirler (Shroff, 1993).

Kimyasal karışımlar silikatlar, lignosulfanat, aminoplast, akrilamidler, akrilitler, epoxy reçinesi, polyester reçinesi, poliüretan ve diğer kimyasallar/reçineler olarak guruplandırılır. Kimyasal karışımlarla daneli karışımlar arasındaki temel farklar başlangıçtaki viskozite, boşlukların ve dane büyüklüğünün bir fonksiyonu olan enjeksiyon edilebilirlik ve jelleşme süresidir. Zeminlerin mukavemeti ve geçirgenliği kimyasal veya daneli karışımların kullanılması ile farklılık göstermektedir.

Kimyasal karışımlar tek aşama veya iki aşamada zemine enjeksiyon yapılır. Tek aşamalı işlemde, tüm katkıları enjeksiyondan önce karıştırılır ve daha sonra zemine enjeksiyon yapılarak kimyasalların zemin içinde sertleşmesi sağlanır. İki aşamalı işlemde önce zemin içerisine bir kimyasalın enjeksiyonu yapılır ve arkasından ikinci kimyasal ile zemin enjeksiyon edilir. Zemin içerisinde iki kimyasal reaksiyon oluşturarak zeminin özelliklerini iyileştirirler. Enjeksiyon işleminin başarılı sonuçlanması için karışımın viskozite, sertleşme süresi, mukavemet özelliklerinin probleme uygun şekilde seçilmesi gerekir.

Bu çalışmada daneli (kum ve çakıl) zeminlere daneli (süspansiyon) karışımlarla enjeksiyon uygulaması yapılmıştır. Karışım olarak çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento-kil karışımları kullanılmıştır. Elde edilen karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş zemin ortamının enjeksiyonu için kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda enjeksiyon basıncı, zeminlerin dane çapı, boşluk oranı, karışım suyu oranı, katkı maddelerinin tipi ve miktarı ile zaman parametre alınarak laboratuvar şartlarında seri enjeksiyon deneyleri yapılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde, enjeksiyon uygulamalarının genel tarihsel gelişimi anlatılmış ve konu hakkında genel bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, enjeksiyon çalışmalarında kullanılan karışım tipleri ve enjeksiyon yöntemleri detaylı olarak anlatılmış, zeminlerin fiziksel ve hidrolojik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, diğer araştırmacılar tarafından yapılan konu ile ilgili bilimsel yayınlar sıralanmış ve laboratuvar deney sonuçları özetlenmiştir.

Dördüncü bölümde, sırası ile deneysel çalışmalarda kullanılan zeminin granülometrisi, permeabilitesi, içsel sürtünme açısı, diğer zemin indeks özellikleri ve deneylerde karışım maddesi olarak kullanılan kil malzemesinin kimyasal, minerolojik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül, çimento-kil ve kil katkılarından oluşan karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmiş ve daneli zeminlerin enjeksiyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen karışımlarla yeterli oranda karışım numunesi dökülmüş ve bu numunelerin 7. ve 28. günlük basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

Daha sonra farklı sıklıklarda ($Dr = 0.30, 0.50, 0.80$) hazırlanan zemin numuneleri önce çimento enjeksiyonu ve silis dumanı, uçucu kül ve kil katkılı karışımlarla enjeksiyon edilmiştir. $Dr = 0.30$ ve 0.80 sıklığında hazırlanarak enjeksiyon uygulanmış zemin numuneleri üzerinde yapılan testlerle basınç mukavemeti değişimleri, kullanılan karışımların tipi, su/katı madde oranı, karışımdaki katkı yüzdeleri, zeminin relatif sıklığı ve zamanla değişimleri araştırılmıştır. Yine bu numunelerin elastisite modüllerinin değişimleri incelenmiştir.

$Dr = 0.50$ sıklığında hazırlanarak enjeksiyon uygulanmış zemin numuneleri üzerinde yapılan testlerle numunelerin permeabilite değişimleri yine kullanılan karışım tipi, su/katı madde oranı, kullanılan katkı yüzdesi ve basınç mukavemeti ile değişimleri araştırılmıştır.

Çalışmada ayrıca karışımların çökelme ve viskozite değerlerinin deneysel olarak belirlenmesinden sonra bu değerlerle enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemeti, geçirgenlik değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Ön deneylerde kullanılan zemin granülometrisi ortamın enjeksiyon edilebilirliğini birinci derecede etkilemiştir. Zemin içindeki ince dane yüzdesi artışına bağlı olarak zeminin enjeksiyon edilebilirliği azalmıştır. Bu nedenle mevcut karışımla enjeksiyon yapılabilecek zemin granülometrisi ön deneylerle tespit edilmiştir.
- Zeminin granülometrisi kadar ortamın enjeksiyon edilebilirliği karışımın su/katı oranı ile doğrudan etkilenmiştir. Yapılan enjeksiyonun başarılı olmasında, karışım malzemenin granülometrisi ve karışım suyu miktarı önemli rol oynamıştır.
- Karışım suyunun bir miktar artırılması enjeksiyonu kolaylaştırırken, zeminin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Yüksek viskoziteli daneli karışımların kullanılması enjeksiyonu zorlaştırmış, enjeksiyonlu numunelerin basınç mukavemetini artırmıştır.
- Silis dumanı katkılı karışım enjeksiyonu uygulanmış numunelerde basınç mukavemeti çimento enjeksiyonu uygulanmış numunelere göre artmış ve geçirgenlik düşmüştür.
- Uçucu kül katkılı enjeksiyon uygulanmış numuneler zeminin basınç mukavemetini çimentoya göre bir miktar düşürmüş ve geçirgenliği aynı şekilde artırmıştır.
- Kil katkılı enjeksiyon uygulanmış numuneler çimento enjeksiyonlu numunelere göre basınç mukavemetini ve geçirgenliği düşürmüştür. Yüksek oranlarda kullanılan kil karışımlar çimentoya göre geçirgenliği düşürmüştür.
- Çimento içindeki katkı malzemelerinin artışı ile karışımın çökelme yüzdesi azalmış ve viskozite değeri artmıştır. Viskozite artışının tersine sıkı ortamların enjeksiyon edilebilirliği azalmıştır. Silis dumanı ve kil katkılı karışım enjeksiyonu uygulanmış numunelerde geçirgenlik azalmıştır.
- Enjeksiyonlu numunelerde, basınç mukavemeti silis dumanı dışında kullanılan katkı maddelerinin yüzdesi ile ters orantılı olarak düşmüştür. Karışımdaki silis dumanı basınç mukavemetini çimentoya göre artırırken, kil ve uçucu kül ters orantılı olarak basınç mukavemetini düşürmüştür.

- Karışım suyu miktarının artışı ile çökelme yüzdesi (Bleeding) artış göstermiştir.
- Karışımların su miktarı ile ters orantılı olarak viskozite (Marsh hunisi ve dinamik viskozite) değeri düşüş göstermiştir.

Son bölümde ise yapılan deneysel çalışma sonuçları genel olarak irdelenmiştir.



IMPROVEMENT OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF GRANULAR SOIL BY GROUTING

SUMMARY

Ground improvement applications by grouting have been practically used in geotechnical engineering, since early 19th century. The development of cementitious permeation grouting has got its start as a method to improve the foundation material of civil engineering structures built in and around bodies of water. The concept of injecting self-hardening cementitious slurry was first employed in 1802 in France to improve the bearing capacity under a sluice (Bruce, 1993). The development of cement grouting continued in France and England throughout the 1800s. The applications were concentrated on civil engineering structures such as canals, docks, and bridges (Raymond, 1996).

Today, numerous applications are done by sealing the pores in ground, in order to increase bearing capacity and to decrease settlement and permeability of ground. Recently, a major increase has been observed in grouting techniques for reducing adverse effects of earthquake motions and preventing liquefaction both in the laboratory and in situ cases. This area has been the subject-matter of increasing number of researches. Grouting particularly is used in improvement of deep grounds where surface techniques are of no but little use.

Filling of the pores, other openings in soil and fractures of rocks under definite pressure by any grout, increases bearing capacity and reduces permeability of the ground. This technique is used in civil engineering applications, such as supporting foundations, stabilization of loose soil and rock fractures, reducing liquefaction of saturated granular soil, reducing permeability and strengthening of dam foundations and in construction of impermeable underground cut off walls (Shroff, 1993). In addition to these applications, some other practices of ground improvements may be summarized as follows:

- Controlling water inflow during drilling and sampling (coring).
- In filling cavities and pores, to prevent extreme settlements.
- Stabilization of the foundations of new and existing structures, under allowable soil pressures.

Grouting is successfully used in various field applications and in retaining structures. Today, grouting is applied in almost all practices of foundation and geotechnical engineering. One of the new applications is use of preventing pollution in land fill areas.

Grouting of soil in conjunction with underground structure can be performed either from surface to underground, or from underground to surface. Factors such as soil gradation, groundwater level, depth of the structure below the surface, and surface access for grouting equipment will determine which method or combination of methods is the best for a specific problem.

The type of grouting is decided according to the purpose of modifying the particular ground and the in situ properties of the soil (particle size distribution, void ratio, etc.). Jet grouting is used in underground constructions particularly when the soil under consideration does not possess cohesion. Permeation grouting is used in general purpose ground improvement applications. Compaction and hydro-fracture grouting, however, are other methods which are applied for their specific applications.

Permeation grouting: The grout is injected under high pressure into the rock fractures and ground openings, without destroying natural texture or the grout is injected into the pore spaces of the soil. This method is used to control water or to improve the structure of the soil. It is the oldest among the other methods and remains the most common type of grouting. The size and distribution of the particles of the in situ soil determine the groutability of the foundation material.

Compaction grouting: The grout in this technique forms a mass which does not deform and exerts pressure on rock or soil. This body forming a controlled replacement in the ground, apply pressure to the weak zone around the injection well. In this method, 25-50 mm stiff grout slump through pipes or casing that are driven into the soil is injected. The injection pipe diameter should be kept between 50 and 100 mm. The grout exiting the bottom of the pipe forms a bulb-shaped mass that increases in volume, thereby densifying the soft, loose, or disturbed soil surrounding the mass.

Fracture grouting: Since the injection pressure is greater than the tensional strength of the rock or soil, material of the ground deforms and the grout invades rapidly into the fractured zone (Shroff, 1993). The grouting method involves locally confined and controlled fracturing of a soil unit by injecting a stable grout. This method is used primarily to increase the bearing capacity and shear resistance of the soil. It can be used before the commencement of tunnel excavation to stabilize soil and it compensates for anticipated settlement.

Jet grouting: Jet grouting is a relatively new technique developed at early 1960s (Welsh, 1991) In this method, thin high-pressure jets of cement grout are discharged laterally into a bore hole wall. The jet simultaneously excavates and mixes with the soil a grouted soil is obtained. Consequently, high pressure injection causes the required improvement of the geotechnical properties of the ground (Raymond, 1996).

Grouting of rock can be performed from the surface or underground. Factors such as, the geological properties of the rock, depth of structure, groundwater level, and surface access for grouting equipment will determine, which method or combinations of methods is the best for a specific method. Most grouting of rock, however, is done

from underground. Consolidation and curtain grouting are used mostly in grouting of rock.

Consolidation grouting involves the filling of open joints, separated bedding planes, faulted zones, cavities, and other defects in the rock up to distance. Usually this distance is approximately one tunnel diameter beyond the excavation limits. Consolidation grouting strengthens the foundation material and reduces the flow of groundwater into the structure.

Curtain grouting: grout curtains are used for underground hydraulic structures which transport and store water, such as, underground reservoir structures that store natural gas and petroleum products.

The grouts used in injection are defined as suspension grouts (grained) and solution grouts, in general. Suspension grouts include, cement, cement-lime and other natural additives, such as asphalt, emulsion, etc. Solution grouts include a wide range of chemical groups. Soil and clay-water grouts are used particularly in compaction and impermeability injections. Bonds formed in clay grouts are weaker than the bonds formed in cement grouts (Shroff, 1993).

This kind of grout improves the geotechnical properties of the ground by forming in filling-structures in the pores. However the cement grouts are used for increasing both impermeability and strength of the ground. This kind of grout increases strength of soil by filling the pores and prevents the ground settlements. Water-cement ratios of the grouts change between 0.5/1 and 5/1. Lower water/cement ratios increases strengths but decreases groutability.

Chemical grouts are clasified as flollows: silicates, lignosulphanete, aminoplas, acrilamides, acrilites, epoxy resine, polyesterere resine, polyuretane and other chemicals. The initial viscosity has a significant effect on jelling time and groutability, depending on the dimension of openings and fractures it is also function of grain-size distribution. Chemical grouts and suspension grouts provide different strengths and permeability to the soil.

Chemical grouts are injected in to the soil at one or two steps. In the one-step process, all additives are mixed before injection. Then the injected chemical grout reacts with the soil to be hardened. However, in the two-step processes, more viscous chemical grout is injected first and then second chemical is grouted into soil. The interaction of two grouted chemicals improves ground properties. Viscosity, jelling time and strength properties of the grout must be properly selected depending on the problem in order to obtains proper results from injection. In addition to these factors, for making proper grout selection, it is essential that the degree of grout sealing through the ground must be estimated realistically.

In the first chapter of this experimental work, a general information is introduced and historical background of grouting method and preliminary knowledge about the subject is presented.

In the second chapter, varieties of grouts and the techniques of injection are explained in detail by considering physical and hydro-chemical characteristics of the

soil media. The programme of the experimental work has been developed according to the information presented in this chapter.

In the third chapter, researches including previous laboratory experiments closely related to the subject of this study have been summarized. The laboratory experiments have been carried out in compliance with the methods and the results of these researches.

In the fourth chapter, geotechnical properties of the ground granulometry, permeability, internal friction angle and other soil index properties have been determined before experiments. In addition to chemical, mineralogical and physical properties of clay which was used as additive material are analyzed. Physical and mechanical properties of cement, silica fume and fly ash are defined by units obtained from their manufacturing units. Later, physical and mechanical properties of the grouts obtained by cement, cement-silica fume, cement-fly ash, cement-clay and clay mixture were determined, using the grout samples with 38 mm diameter and 70-90 mm height.

Sedimentation and viscosity of grout, compression strength of the grout specimen were investigated by changing parameters such as, mixture type, additive percentage, mixture water and time as parameters. According to the results obtained from this preliminary investigation, the grout mixtures to be used in soil injection were selected. In 7th and 28th day, compression strengths of more than 200 grout specimen cured in water were determined .

Soil specimen prepared at relative densities of 0.30 and 0.80 were injected into eight different grout types, such as; cement, cement-silica fume (%5, 10, 20 by total weight) and cement-fly ash (%5, 10 by total weight) and cement-clay (%5, 10 by total weight). The grouted specimen are cured in water to determine compression strengths at 7th and 28th days. Two densities (0.30 and 0.80) are used not only for monitoring effect of the relative density on strength, but for obtaining the possibility of comparing the test results. Grout type, water/solid ratio, admixture percentage, relative density, curing time used as variable parameters and module of elasticity and compressive strength diagrams are plotted. More than 400 specimen were grouted for compressive strength tests.

In addition specimen prepared for compressive strength test, new grouted specimen are prepared by injecting the grout described above and new cement-clay grouts (20,50, 80, 100 clay percentage by total weight) to soil with 0.50 relative density finally, soil permeability changes are determined for the new grouted specimen. More than 100 specimen cured in water with their moulds were tested for permeability, for 7th and 28th days. Permeability diagrams are plotted by using the same variables as for compressive strength test.

The results obtained from the experiments are summarized below.

- Granulometry of the soil specimen used in preliminary test has strongly affected the groutability of the soil media. Increasing percentage of fine material in the soil skeleton caused a decrease in groutability of particular-grout. The convenient

soil grain distribution which permit injection of suspension grouts has been determined through these preliminary experiments.

- It is observed that the groutability is controlled not only by grain-size distribution but also by water/solid ratio of the mixture. These two key parameters directly affect soil groutability.
- While any increase in mixture water improves grouting, it results in poorer mechanical properties of the samples. High viscosity in particular grouts caused difficulty in injection, but ultimately resulted in increased strength and reduced permeability of the soil specimen.
- Bleeding has shown an increase directly proportional to the amount of the mixture water and grout viscosity.
- At lower mixture water contents, higher Marsh cony and dynamic viscosity and lower sedimentation are obtained.
- Compressive strengths of all the modified grout injected specimen at 7th and 28th days showed reduction as compared with the pure cement grout specimen.
- Compressive strengths of soil specimen grouted by silica fume additives has increased when compared with those of the cement grouted specimen. Permeability of silica fume grouted samples decreased as compared to cement grouted samples.
- Compressive strengths of the specimen grouted by fly ash additives, somehow decreased and their permeability increased as compared to those of the cement grouted specimen.
- In general, clayey grout injected specimen have lower compressive strengths than cement grouted specimen.
- Permeabilities of clayey grout injected specimen at the 7th day of curing, decreased with respect to the permeabilities of cement grouted specimen. Permeability variations showed opposite behaviour at clay content of 20 percent (with respect to total weight), at the 28th day of curing.
- Permeability has increased by certain amount for the grouts having less than 20% clay, whereas permeability decreased for grouted samples with clay content more than 20 percent. This behaviour is expected to be resulted from negative effect of clay on the compressive strength. The compressive strength and permeability have been observed to be inversely proportional to each other.
- Increasing amount of additives in grout has resulted in a decrease in sedimentation and increase in viscosity. The increase in viscosity caused difficulties in grouting, for dense media.
- Silica fume and clay modified grouts resulted in lower permeability values in specimen, as compered to the cement grouted samples.
- Increase of mixture water ratio and percentage of additives resulted in lower compressive strength and modulus of elasticity.
- Lower compressive strength values were obtained from the soil samples with high relative density, because increasing relative density impedes the grout from permeating through the soil.
- Increase in sedimentation resulted in decrease in compressive strength and increase in permeability, whereas increase in viscosity caused exactly the opposite variations.

In the conclusion part, an interpretation of the results obtained from the experiments are presented.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İlk kez 1802 yılında Fransız mühendis Charles Berigny tarafından su ve puzolanlı çimento karışımı zemin enjeksiyonunda kullanılmıştır. Daha sonra, çimentonun ve hidrolik bağlayıcıların geliştirilmesi ile inşaat ve maden mühendisliğinde enjeksiyonların kullanılması yaygınlaşmıştır (Kutzner, 1996). Kendiliğinden sertleşen puzolanlı çimento enjeksiyonu 1800'ler boyunca Fransa ve İngiltere'de gelişmeye devam etmiş ve kanallar, havuzlar, limanlar, köprüler gibi mühendislik yapılarına uygulanmıştır (Bruce, 1993). Bununla beraber 1893 yılında Birleşik Devletlerde New Croton Barajında sistematik bir kaya enjeksiyonu uygulanmıştır (Weaver, 1991). 1900'lü yılların başında enjeksiyon ekipmanlarının gelişmesi ile enjeksiyon tekniklerinde pek çok ilerleme meydana gelmiştir. 1914'lerde baraj temellerinin boşluklarının doldurulması için enjeksiyon uygulamaları yapılmıştır. Buna paralel olarak zeminlerin hidrolik geçirgenliğinin azaltılması ve taşıma kapasitesinin artırılması önemli bir problem idi. Yüzyılın başında bunu başarmak zordu. Zira, çimento danelerinin zemin boşlukları ve kaya çatlaklarından geçmesi için yeterli oranda küçük olmaları gerekiyordu.

Bununla beraber, 1926 yılında Almanya'da Dutchman H. Joosten tarafından kimyasal esaslı karışımların geliştirilmesiyle ileriye doğru bir adım atılmış oldu. Joosten sistemi ile yüksek konsantreli sodyum silikat ve kalsiyum klorit başarılı bir şekilde çakıl, kaba ve orta büyüklükte kum boyutuna uygulanmıştır. Enjeksiyon sonucunda kendiliğinden reaksiyon oluşturan kimyasallar zemini daha geçirimsiz ve dayanıklı bir hale dönüştürmüştür. 1930'dan sonra Joosten sistemi yaygın olarak Almanya'da demiryolu tünellerinde kullanıldı. 1980'lerden sonra çevre bilincinin gelişmesi ve zemin suyunu korumak için artan resmi talepler doğrultusunda kimyasal enjeksiyon uygulamaları geniş oranda azalmıştır. Buna paralel pek çok

uygulamada yüksek basınçlı enjeksiyon, kimyasal enjeksiyon uygulamalarının yerini almıştır. Çimento enjeksiyon teknikleri 1930'lardaki seviyede kalmamış daha ince daneli çimentolar geliştirilmiştir. Aynı zamanda reçineler ve köpük malzemelerin enjeksiyonda kullanılması en son gelişmelerdir (Kutzner, 1996). Enjeksiyon teknolojisinin ilerlemesi yeraltı yapılarında ve baraj enjeksiyon uygulamalarında gelişmelere yol açmıştır (Raymond, 1996).

Maden mühendisliğinde başlayan modern enjeksiyon uygulamaları daha sonra inşaat mühendisliğinde yapı temellerinin desteklenmesinde, kaya çatlaklarının doldurulmasında, gevşek zeminlerin stabilizasyonunda, suya doymuş granüler zeminlerin sıvılaşma riskinin azaltılmasında, baraj temellerinin geçirimsizliğinin sağlanmasında, yeraltında geçirimsiz perdelerin oluşturulmasında (Shroff, 1993), mevcut yapı altındaki zemin suyu akışının kontrol edilmesi ve granüler zeminlerin stabilitesinin artırılmasında, makine temellerinin titreşiminin azaltılmasında kullanılmaktadır. Bunların dışında pek çok destek yapısı ve arazi çalışmasında enjeksiyon başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Enjeksiyon, halen temel mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır. Yeni uygulama alanlarından biri de atık depolarında çöp suyunun sızmasıyla zemin ve yer altı suyunun kirlenmesinin önlenmesidir.

Zemin ortamların iyileştirilmesinde uygulanan enjeksiyon yöntemleri şu başlıklar altında sıralanmaktadır.

- Dolgu Enjeksiyonu; Bu işlemde, enjeksiyon karışımı doğal yapıyı bozmayacak bir şekilde kaya çatlakları veya zemin boşlukları içerisine sırınga edilir.
- Kompaksiyon Enjeksiyonu; Enjeksiyon karışımının zemin içinde kontrollü yer değiştirmesine müsaade edilerek bozulmadan bir kütle olarak kalması sağlanır, sonuçta enjeksiyon kuyusu etrafındaki zayıf bölge basınçlı enjeksiyon karışımı ile sıkıştırılır.
- Çatlak Enjeksiyonu; Basınç altındaki karışım çatlaklı kaya veya zemin ortama sırınga edilerek malzemelerin doğal yapısı bozulur ve karışımın çatlaklı bölgeye nüfuz etmesi sağlanır (Shroff, 1993).

- Yüksek Basınç Enjeksiyonu; Su-çimento karışımı 300-500 atmosfer basınçta zemine verilir ve zeminle karışması sağlanır. Yüksek basınçlı enjeksiyon zeminin pek çok özelliğinde gerekli iyileşme sağlar (Raymond, 1996).
- Kontakt (Temas) Enjeksiyonu: Bu işlemde, mühendislik yapıları ile zemin arasındaki boşluklar doldurularak zemin ile yapı arasında bütünlük sağlanır.

Enjeksiyonda kullanılan karışımlar genelde süspansiyon (daneli) ve solüsyon (boyutsuz/danesiz) karışımlar olarak tanımlanır. Süspansiyon karışımlar toprak, çimento-kireç, asfalt, emülsiyon vb.' lerini içerirken solüsyon karışımlar geniş bir kimyasal grubu içermektedir. Toprak veya kil-su karışımlar geçirimsizlik ve kompaksiyon enjeksiyonunda öncelikli olarak kullanılmaktadır. Kil süspansiyonlar içerisinde oluşan bağlar çimento süspansiyonlar içindeki bağlardan daha zayıf olmasına rağmen (Shroff, 1993) bu karışımlar boşluklarda dolgular oluşturarak zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirirler.

Bununla beraber çimento karışımlar zeminin hem geçirimsizlik hem de mukavemetini artırmak için kullanılırlar. Bu karışımlar boşlukları doldurarak mukavemet oluşturur ve zemin oturmalarını önlerler. Kullanılan çimento karışımların su/çimento oranı 0.5/1 ile 5/1 arasında değişebilir. Karışımlar daha düşük su/çimento oranlarında daha yüksek mukavemet oluştururlar yalnız karışımın enjeksiyon edilebilirliği aynı oranda azalır.

Kimyasal karışımlar silikatlar, lignosulfanat, aminoplast, akrilamidler, akrilitler, epoxy reçinesi, polyester reçinesi, poliüretan ve diğer kimyasallar/reçineler olarak gruplandırılır. Kimyasal karışımlarla daneli karışımlar arasındaki temel farklar başlangıçtaki viskozite, boşlukların ve dane büyüklüğünün bir fonksiyonu olan enjeksiyon edilebilirlik ve jelleşme süresidir. Zeminlerin mukavemeti ve geçirgenliği kimyasal veya daneli karışımların kullanılması ile farklılık göstermektedir.

Kimyasal karışımlar tek aşama veya iki aşamada ortama enjeksiyon yapılır. Tek aşamalı işlemde, tüm katkıları enjeksiyondan önce karıştırılır ve daha sonra zemine enjeksiyon yapılarak kimyasalların zemin içinde sertleşmesi sağlanır. İki aşamalı işlemde önce zemin içerisine bir kimyasalın enjeksiyonu yapılır ve arkasından ikinci

kimyasal ile zemin enjeksiyon edilir. Zemin içerisinde iki kimyasal reaksiyon oluşturarak zeminin özelliklerini iyileştirirler. Geliştirilen pek çok kimyasal karışımlardan bazıları akrilamid, kromlignin, fenolplast, silikajel, aminoplast, polimerlerdir. Enjeksiyon işleminin iyi sonuçlanması için karışımın viskozite, sertleşme süresi, mukavemet özelliklerinin probleme uygun şekilde seçilmesi gerekir. Doğru bir tercih yapmak için aynı zamanda karışımın zemin içerisinde nasıl yayılacağını tahmin etmek önemlidir.

Karışımlar ve enjeksiyon yapılacak zeminler arasındaki farklılıklar nedeniyle, enjeksiyon metotları ve ekipmanları hakkında genelleme yapmak zordur. Bununla beraber barajlarda, kaya ve alüvyon enjeksiyonlarında yukarıda açıklanan dolgu, kompaksiyon, çatlak, konsolidasyon, yüksek basınçlı enjeksiyon gibi enjeksiyon tipleri kullanılmaktadır.

Günümüzde zemin enjeksiyonu yukarıda sıraladığımız pek çok sahada pratik olarak uygulanmaktadır. Uygulamalarda genel olarak iki ana problemten bahsetmemiz mümkündür. Bunlardan birincisi zemin enjeksiyon uygulamalarının zorluğu, ikincisi enjeksiyon işleminin pahalı olmasıdır. Zeminlerin enjeksiyon edilebilirliğini kolaylaştırmanın yollarından biri ortama şırınga edilen karışımın dane boyutunu küçültmektir. Karışımın dane çapını küçültmek çoğu zaman bir çözüm olmakla beraber bunu başarmak aynı oranda maliyeti artırmaktadır. Maliyeti yüksek olmasına rağmen, son yıllarda kimyasal karışımların yerini tutacak süper ince daneli çimentolar üretilmektedir.

Enjeksiyon uygulamalarının maliyetini düşürmek ve nispeten çevreye olumsuz etkilerini azaltmak için yapılan pek çok laboratuvar çalışmasında çimento katkılı karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmaktadır. Bunların başında çimento-kil, çimento-bentonit, çimento-uçucu kül, çimento-silis dumanı, kireç-uçucu kül, çimento-kimyasallar ve kil vb. katkıları kullanılarak enjeksiyon karışımlarının özellikleri araştırılmaktadır. Son yıllarda puzolanik özelliklere sahip ince daneli fabrika atıklarının (silis dumanı, uçucu kül) enjeksiyon uygulamalarında kullanılabilirliği araştırma konusudur.

Yapılan bu çalışmada çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül, çimento-kil ve kil karışımlarından oluşan karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmiş ve daneli zeminlerin enjeksiyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışımların özelliklerini belirlemek için karıştırma süresi hepsinde aynı tutularak enjeksiyon karışımı içindeki katkı oranları ve karışım suyu oranı parametre alınmış, karışımların sulanma (çökelme), viskozite ve basınç mukavemeti değişimleri incelenmiştir. Çalışmada iki yüz den fazla karışım numunesi dökülmüş ve bu numunelerin 7. ve 28. günlük basınç mukavemetleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Karışım deneyleri sonucundan elde edilen veriler baz alınarak zemin enjeksiyonunda kullanılacak karışımlara karar verilmiştir.

Daha sonra farklı sıklıklarda ($Dr= 0.30, 0.50, 0.80$) hazırlanan zemin numuneleri önce çimento enjeksiyonu ile daha sonra tespit edilen yeni karışımlarla enjeksiyon edilmiştir. $Dr=0.30$ ve 0.80 sıklığında hazırlanarak enjeksiyon uygulanmış zemin numuneleri üzerinde yapılan testlerle basınç mukavemeti değişimleri, kullanılan karışımların tipi, su/katı madde oranı, karışımındaki katkı yüzdeleri, zeminin relatif sıklığı ve zamanla değişimleri araştırılmıştır. Yine bu numunelerin elastisite modüllerinin değişimleri incelenmiştir.

$Dr= 0.50$ sıklığında hazırlanarak enjeksiyon uygulanmış zemin numuneleri üzerinde yapılan testlerle numunelerin permeabilite değişimleri yine kullanılan karışım tipi, su/katı madde oranı, kullanılan katkı yüzdesi ve basınç mukavemeti ile değişimleri araştırılmıştır. Enjeksiyon deneylerinde dört yüz den fazla numune dökülmüştür. Çalışmada ayrıca karışımların çökelme ve viskozite değerleri ile enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemeti, geçirgenlik değerleri arasındaki ilişkiler grafikler üzerinde gösterilmiştir. Genel olarak çalışmalarda elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Enjeksiyon deneylerinde zeminin granülometri ve relatif sıklığı, enjeksiyon basıncı, su/katı madde oranı, katkı yüzdesi, katkı tipi ve zaman parametre olarak alınmıştır.

BÖLÜM 2

ENJEKSİYON KARIŞIMLARI VE ZEMİN ENJEKSİYONU

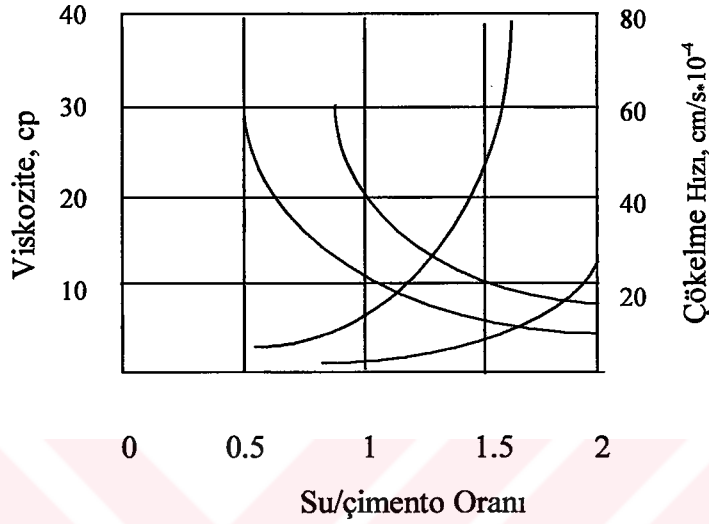
Zemin iyileştirme teknikleri, teknolojik gelişmelere paralel olarak sürekli gelişme göstermiş ve yeni uygulama alanları bulmuştur. Günümüzde geoteknik problemlerin çözümünde kullanılan enjeksiyon yöntemleri aynı zamanda atıkların depolanması, çevre ve zemin suyunun korunması, kirlenmiş zemin ve yeraltı suyunun iyileştirilmesi gibi problemlerin çözümünde de kullanılmaktadır.

Zemin iyileştirmesi zemin türüne göre kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin iyileştirilmesi ve uygulama bölgesinin zemin yüzeyine uzaklığına bağlı olarak yüzeysel veya derin zeminlerin iyileştirmesi şeklinde sınıflandırılmaktadır (Mitchell, 1981). Bu temel belirleyicilere bağlı olarak günümüze kadar pek çok yöntem geliştirilmiştir. Özellikle derin ve sık zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de enjeksiyon karışımlarıyla zeminlerin iyileştirilmesidir. Yapılan enjeksiyon işleminin niteliğini belirleyen önemli değişkenler uygulanan enjeksiyon yöntemi, zeminin yapısı, ortama zerk edilen karışımların fiziksel, mekanik ve akış özellikleridir.

2.1. Enjeksiyon Karışımları

Enjeksiyon karışımının bir zemin formasyonu içine zerk edilebilmesi için uygun akış, gerekli sertleşme özelliği, yeterli derecede priz hızı ve büzölmeye karşı hacim stabilitesine sahip olmalıdır. Daneli bir zeminin iyileştirilmesi için düşünülen bir karışımın başlangıç yoğunluğu, viskozitesi, jelleşme süresi, dane büyüklüğü dağılımı (süspansiyonlar için) ve enjeksiyon esnasında oluşabilecek diğer değişiklikler bilinmelidir. Ayrıca enjeksiyon karışımının zemin suyu ile etkileşimi, zemin ve zemin suyunun kimyasal yapısının etkisi de önemli bir parametredir.

Viskozite ve jelleşme, zemin boşlukları içindeki karışımın akışını kontrol eden iki reolojik (akış) özelliğdir. Süspansiyon karışımlarında bu özellikler su/katı oranı ile ters orantılıdır (Şekil 2.1). Çimento karışımlarının viskoziteleri zamanla fazla değişmediği için enjeksiyon üstünde önemli bir etkiye sahip değildir.



Şekil 2.1. Çimento Karışımların Viskozite ve Çökelme Hızı (Kutzner, 1996)

Zemin içindeki karışımların jel süresi karışım formülasyonu içindeki hızlandırıcı ve geciktirici katkıların konsantrasyonuna bağlıdır. Kimyasal karışımların viskozitesini reaksiyona giren kimyasalların konsantrasyonu ile belirlenir. Bu yüzden pek çok kimyasal karışımın jel süresi farklı katkıları kullanılarak değiştirilebilir. Sıcaklık artışı başlangıçtaki viskoziteyi düşürürken sıcaklık düşüşü jelleşme işlemini hızlandırarak ortamı hızlıca katılaştırır. Başarılı bir şekilde enjeksiyon edilen karışımın zemin içinde konumunu muhafaza edebilmesi için, yeterli bir rijitliği olmalıdır. Özellikle, enjeksiyon basıncı ile sıkıştırılmış boşluk suyu tarafından oluşturulan hidrolik basınca karşı koymalıdır. Bu nedenle yeterli rijitliğe sahip olmayan kil karışımlara gerekli mukavemeti vermek için ortama daha fazla kil yerine sodyum silikat katılarak karışım kalınlaştırılır ve rijitliği önemli derecede artırılır.

Kayma direnci en düşük durumda olan karışımlar, enjeksiyon için minimum basınca ihtiyaç duyarlar. Eğer süspansiyonlar kendi haline karıştırılmadan bırakılırsa tekrar karıştırılınca kadar kayma direnci artar ve karıştırılınca tekrar aynı kıvama gelirler.

Bu süspansiyonlar tiksotropik (basınç altında önceki özelliğine kavuşabilen) olarak tanımlanılır. Tiksotropik davranış kil karışımlar için önemli bir davranış biçimidir. Tiksotropik kil süspansiyonlardaki problem, jelleşme oranının kontrol edilememesidir. Yine de enjeksiyon sırasında süspansiyona ayrıştırıcı kimyasalların katılması ile karışımların akış özellikleri iyileştirilerek kayma direnci düşürülür. Daneli karışımların önemli özellikleri kıvam (kalınlık), akışkanlık, su tutma (retantivity) ve su kusma (bleeding) dır. Akışkanlık, karışımın yoğunluğu ile ters orantılı olup basınç altındaki akışın viskozitesi ile belirlenir. Daha akışkan bir karışım, daha düşük basınç altında hareket edecek ve enjeksiyon noktasından daha uzağa ulaşacaktır.

Sulanma mekanizması karışımlar için önemlidir ve genelde sulanma oranı veya çökelme yüzdesi, kusulan suyun (bleeding) toplam hacmi olarak tanımlanır. Solüsyon karışımların uygulanması danecikler tarafından sınırlandırılmazken, süspansiyonlar içindeki daneler boşluk kanallarının giriş ve çıkışına yerleşebilir ve karışımın daha uzaklara gitmesine engel olacaktır bu nedenle uygulama sadece enjeksiyon yapılan ortamın geçirgenliği ve karışımın akış özelliklerine bağlıdır. Süspansiyon karışımlar için uygulama sınırı, kaba kum ve ince çakıl arasında değişmektedir.

2.1.1. Çimento Karışımlar

Çimento karışımlar su-çimento veya su-çimento-diğer katkı malzemelerinden oluşurlar. En yaygınca kullanılan çimento karışımı su ve portland çimentosu karışımlarıdır. Bu karışımın kolay elde edilmesi, mukavemetinin yüksek olması ve kimyasal karışımlardan ucuz olması nedeniyle kullanımı fazladır. Portland çimentosu karışımlarının olumsuz yanı geç priz alması ve geçirgenliği 10^{-1} cm/sn den düşük olan zeminlere kaba daneleri nedeni ile enjeksiyona uygun olmamasıdır. Çimento karışımların özelliğine etki eden temel faktör su/çimento oranıdır. Su miktarı karışımın sulanma, plastisite ve basınç mukavemetine önemli derecede etki etmektedir (Littlejohn, 1982).

Çimento karışımları, su/çimento oranı 1'den büyük olduğunda aşırı sulanma eğilimindedir ve bunlar aynı zamanda düşük mukavemet, fazla büzülme ve kötü dayanıklılık özelliği gösterirler. Bunun tersine, düşük su/çimento oranlarında karışımlar daha zor enjeksiyon edilmelerine rağmen, daha iyi mukavemet verirler. Sınırlı oranda katkılar karışımın akış, mukavemet ve sertleşme süresi gibi özelliklerini kontrol etmek için katılabilir (Klein ve Polivka, 1958). Bu katkılar genel olarak şöyle sıralandırılmaktadır;

- Priz hızlandırıcılar ve geciktiriciler
- Akışkanlaştırıcılar (lubricant)
- Ayırma (segregasyon) önleyiciler
- Küçülme önleyici şişen malzemeler
- Su tutucular

Bunların dışında karışımlarda doğal katkı olarak kum, kil ve puzolanlar kullanılarak karışımın özellikleri iyileştirilmektedir. Dolguların ana amacı karışım maliyetini düşürmek, sulanmayı azaltmak, akışkanlığı iyileştirmek ve prizi geciktirmektir. Kum dolgular özellikle geniş boşlukları doldurmak için genelde eklenirler. Çimentoya kil eklenerek çok değişik aralıklarda mukavemete sahip karışım kombinasyonları elde edilebilir (Domone, 1994). Genelde çimentonun %3 oranında bentonit çimento danelerine bağlanarak danelerin çökmesini önler, viskoziteyi artırır ve karışımı daha stabil hale getirir.

Puzolanlar, uçucu kül ve silis dumanı, portland çimentosu ile beraber karışımın sertleşme özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Uçucu kül daneleri portland çimentosu boyutuna sahip olmakla beraber silis dumanı çok daha küçük dane çapına sahiptir. Uçucu külün çimento ile kullanılma aralığı gerekli mukavemet ve elastik özelliklere bağlı olarak uçucu kül/çimento oranı 1/4-20/1 arasında değişmektedir.

2.1.2. Çimento-Kil Karışımlar

Çimento-kil karışımlar, su sızıntısını önlemek için en uygun enjeksiyon malzemeleridir (Johnson, 1958). Bu karışımlarda sertleşmenin oluşması yavaştır ve tanımlanmış priz süresi yoktur. Çimento-kil karışımların sertleşmesi, kalsiyum klorit

veya sodyum silikat katılarak hızlandırılabilir. Bu kimyasal katkıların etkisi kullanılan kil oranı artışı ile sınırlandırılır ve bu durumda reaksiyon hızlandırıcı katkılar kullanılır. Karışım içinde jel oluşturan kil çimento danelerini tutarak karışımın çökmesini önler. Bir miktar rijitliğe sahip çimento-kil karışımının stabilitesi kilin özellikleri ve kilin karışım içindeki miktarı ile direk olarak orantılıdır.

2.1.3. Kil Karışımlar

Ekonomik nedenlerden dolayı kil karışımlar için her zaman doğal killeri kullanmak uygundur. Karışım için kullanılan bir kilin dane büyüklüğü dağılımı önemlidir. Enjeksiyon karışımı için elverişli bir kilin uygun reolojik (akışkan) özellikler, likit limit ($W_L < 60$) ve daha yüksek yüzdelerde kil mineraline sahip olması gerekir (Domone, 1994). Montmorolit en aktif kil mineralidir ve önemli derecede şişme kapasitesine sahiptir. Kil süspansiyonları genelde az alkalidirler ve asidik malzemeler katılarak çökelti (folikül) oluştururlar. Karışımın $pH > 7$ olmalıdır, eğer pH büyük değilse sodyum fosfat gibi ayrıştırıcılar katılarak bu ayarlanmalıdır (Kravetz, 1958). Ayrıştırıcı kimyasallar içeren kil karışımlar hemen hemen değişmez bir şekilde üçüncü bir karışım oluştururlar ve kimyasal reaksiyon devam ederken kil sürekli bir yapı oluşturur.

Kil karışımlar yüksek mukavemete sahip değildirler fakat zeminin geçirgenliğini azaltırlar ve suyun yer değiştirmesine karşı yüksek direnç verirler. Ayrıştırıcı katkıların kullanımı viskozite, enjeksiyon basıncı ve jel mukavemetini düşürür ve karışımın daha kolay enjeksiyon yapılmasını sağlar. Bentonit bir su tutucudur ve küçük daneleri (2μ 'den küçük) nedeniyle kalın ve orta büyüklükte kum enjeksiyonlarında kullanılmaktadır (Ischy and Glossop, 1962). Bu karışımların jel mukavemeti zeminin mukavemetini artırmak için yeterli değildir. Bundan dolayı kil karışımlar genelde dolgu yapmak veya geçirimsizliği azaltmak için kullanılır.

2.1.4. Kil-Kimyasal Karışımlar

Kil-kimyasal karışımlar büyük oranda kil içerirler. Bu karışımlarda en yaygın kullanılan kimyasallar sodyum silikat ($NaSiO_2$), sodyum alüminat ($NaAl_2O_3$) veya

hidroklorik asit (HCl) tir (King ve Bush, 1961). Krom-lignin aynı zamanda jel oluşturan önemli bir kimyasaldır ve sülfat-liquar, kromik asit veya suyla karıştırılarak enjeksiyon karışımları elde edilmektedir. Düşük stabilite ve viskoziteye sahip kil kimyasal karışımlar permeabiliteyi azaltmak için ince-orta daneli kumların içine enjeksiyon yapılabilir. Bunların zemine girme kabiliyeti başlangıçtaki viskozite ve kil danelerinin büyüklüğüne bağlıdır. Küçük danelere sahip sodyum bentonitler kimyasal katkılarla en iyi reaksiyon veren killerdir.

2.1.5. Kimyasal Karışımlar

Kimyasal karışımlar özel bir amaç için katı danecikler içermeyen katkısız çözeltiler olarak tarif edilmiştir (Anon, 1957). Bu yüzden ince kum ve kumlu siltler içerisine girebilirler. Pahalı olmaları nedeni ile başlangıçta ortam ucuz bir karışımla enjeksiyon edildikten sonra kimyasal bir karışımla son dolgu enjeksiyonu yapılır. Kimyasal karışım tipi seçilmeden önce, boşluk büyüklükleri, boşluk yüzeyindeki ve serbest su oranı hakkında bilgiler mevcut olmalıdır. Kimyasal karışımların priz süresi 5 dakikadan bir kaç saate kadar geniş aralıkta değişir. Özel bir amaç için karışım ve enjeksiyon metodu seçildiğinde bu göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, zemin ve hava sıcaklığı karışımın priz süresi, viskozite ve dolayısı ile boşluklara nüfus etme özelliğini etkilediği için önemlidir.

Kimyasal karışımlar iki yöntemle zemine enjeksiyon edilir (Karol 1982). Bunlar sırası ile tek aşamalı yöntem; tek aşamalı yöntemde kimyasallar daha önce bir karıştırıcı da yeterli oranda karıştırılarak zemine enjeksiyon yapılır ve zemin boşluklarında sertleşmeleri sağlanır. İki aşamalı yöntem; zemin boşluklarında erimez bir çökelmeyi meydana getirmek için iki farklı kimyasal, zemine ayrı ayrı enjekte edilir. Önce viskozitesi yüksek olan karışım daha sonra düşük viskoziteli kimyasal zemine şırınga edilerek bu iki kimyasal zemin içinde reaksiyon oluşturarak sertleşir. İki aşamalı yöntemde, karışım enjektörü aşağıya doğru ilerlediğinde sodyum silikat çözeltisi zemin içerisine pompalanır ve enjektör daha sonra yukarı çekilirken basınçlı su ve kalsiyum klorit pompalanarak enjeksiyon tamamlanır. Sodyum silikat karışımının viskozitesinin diğer kimyasal karışımlara göre daha yoğun olması nedeni ile ilk aşamada enjeksiyon edilir.

2.1.6. Emülsiyon Karışımlar

Emülsiyon karışımlar petrol ürünü zift, katran, asfalt vb. mamullerden oluşmaktadır. Zift emülsiyonlar, zift tipi ve oranına bağlı olarak farklı viskozitelerde elde edilebilirler. Zift gibi yapışkan bir sıvıya nispeten yapışkan olmayan akışkan özelliği vermek için su gibi yapışkan olmayan bir sıvı içerisinde dağıtılabilir. %30 zift içeren emülsiyonlar su ve zemine enjeksiyon yapılır ve daha sonra iki bileşene ayrılır. Arazide emülsiyonun bozulması organik bir ester ilavesi veya sentetik bir reçine vasıtasıyla yapılır. Enjeksiyon süresini uzatmak ve farklı su oranlarında reaksiyonu kontrol etmek için yakıcı soda kullanılarak karışımın ayrışması için gerekli zaman ayarlanabilir.

2.2. Zemin Enjeksiyonları

Genel olarak enjeksiyon, zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için zemin boşluklarına emülsiyon, solüsyon ve süspansiyon kıvamında akışkanların zerk edilmesi anlamına gelir. Zemin yapılarında kullanılan en yaygın enjeksiyon tipleri dolgu enjeksiyonudur. Başarılı bir enjeksiyon programı, uygun karışım malzemesi, doğru delgi ekipmanı ve yöntemine gereksinim duyar. Enjeksiyon programının ilk evreleri bir derecede deneyseldir ve enjeksiyon basıncı karışım kuyusunun derinliği, güvenle kullanılacak enjeksiyon karışımı, verilen bölgenin ne kadar karışım kabul edeceği hakkında veriler elde etmek için bir kaç kuyu enjeksiyon edilir. Ardışık olarak her bir kuyu enjeksiyon edilerek kuyu hakkında veriler elde edilir. Kuyu açıklığı yaklaşık 1.3-2.5 metre civarındadır. Zemin şartlarını belirlemek için kuyuların zemin profilleri ile bazı geoteknik modeller oluşturulur. Zeminlere uygulanan enjeksiyon tipleri amaca ve zemin tipine göre değerlendirilir.

2.2.1. Dolgu Enjeksiyonu

Dolgu enjeksiyonu sığ derinliklerde bir karışım borusundan tek evrede uygulanır, karışım kuyusu aşağıdan yukarıya doğru veya alternatif olarak karışım kuyusu delindikçe yukarıdan aşağıya doğru enjeksiyon uygulanır. Kısa mesafeler için kuyu

delinir ve daha sonra enjeksiyona tabi tutulur (Şekil 2.2a). Derin kuyularda veya kuyunun sıkı olduğu kesitlerde, karışımın yeterli oranda nüfuzunu sağlamak için nispeten yüksek enjeksiyon basıncı ve kademeli enjeksiyon yöntemi kullanılır. Kademeli enjeksiyonda, kuyu verilen bir derinliğe kadar delinir ve enjeksiyon uygulanır. Karışım sertleştikten sonra kuyu tekrar ikinci enjeksiyon kademeleri için delinir ve işlem tekrarlanır.

2.2.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu

Kompaksiyon enjeksiyonunda zemin çevresini sıkıştırmak için yüksek viskoziteli çimento, zemin, kil karışımları kullanılır. Sertleşen karışım, nispeten sıkıştırılmaz sert yumru ve kolon şeklinde bir malzeme oluşturur. Kompaksiyon enjeksiyonları her çeşit zeminde kullanılabilir olmasına rağmen genelde ince kum ve orta büyüklükte kum danelerinden oluşan zeminlerde uygulanır (şekil 2.2b). Bunun avantajlarından birisi en zayıf zemin tabakaları içinde maksimum derecede etkili olmasıdır. Karışım danelerinin büyüklüğü zeminin kabarmasına neden olabilir. Bu nedenle kompaksiyon enjeksiyonu oturmaların önlenmesi, yapı altında iyileştirme yapılması ve aynı zamanda tünel çalışmalarında veya açık kazı çalışmalarında zeminin desteklenmesi için kullanılabilir. Enjeksiyon zemin yüzeyinden aşağıya sağlam-taşıyıcı tabakaya doğru veya aşağıdan zemin yüzeyine doğru kademeli olarak uygulanabilir. Eğer enjeksiyon bir binanın altında destek oluşturmak için yapılıyorsa enjeksiyonun aşağı doğru kademeli olmasının daha başarılı sonuç verdiği ifade edilmiştir (Stilley 1982).

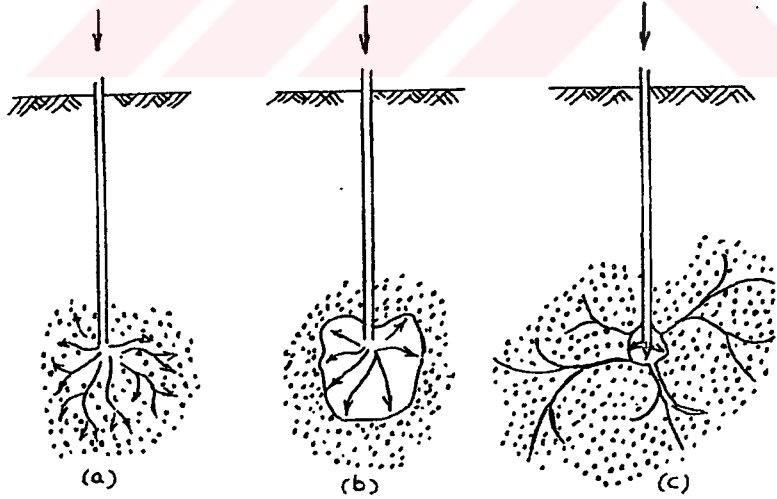
Yüzeyin 2 m altında yapılan enjeksiyon işlemlerinde enjeksiyon basınçları 0.35 - 1.7 MPa arasında değişirken, daha derinlerde 3.5- 4.2 MPa arasında değişmektedir. Sıkı bir kuyuda enjeksiyonu başlatmak için enjeksiyon basıncının hızlı bir şekilde arttırılmaması önemlidir. Basınç pompalama oranının ayarlanması ile kontrol edilebilir ve daha düşük pompalama oranı daha yüksek karışımın verilmesini sağlar.

Killi zeminlerde boşluk suyu basınçları enjeksiyon sırasında takip edilmelidir. Bazı durumlarda düşük pompalama oranı, aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasını önler ve bu durumlarda, aşırı boşluk suyu basıncının dağılımına müsaade etmek için enjeksiyona

ara verilerek drenaj sağlanmalıdır. Enjeksiyon süresi boyunca karışım kütesinin şekli enjeksiyon kuyusunun açıklık miktarı ve zeminin özelliklerine bağlıdır. Üiform zeminlerde şekil genelde küresel veya silindir şeklindedir, oysa üniform olmayan zeminler düzensiz bir şekillenmeye sahiptir. Karışım kütesinin büyüklüğüne enjeksiyon basıncı ve oranı kadar zeminin yoğunluğu, su muhtevası ve mekanik özellikleri de etki etmektedir. 30 metre derinliğe kadar kompaksiyon enjeksiyonu uygulanmaktadır (Bell, 1993).

2.2.3. Çatlak Enjeksiyonu

Çatlak enjeksiyonu genellikle bozunmuş kaya veya alüvyon zeminlerin enjeksiyonunda kullanılır. Bu enjeksiyonun amacı daneli zeminlerde enjeksiyon yapılmış çatlaklar kümesi oluşturmaktır. Silt ve kil zeminler bunun için uygun değildir. (Ischy ve Glossop, 1962; Samol ve Prible,1985). Enjeksiyon çatlaklar ve boşluklarda hızlıca ilerlerken karışımla dolan boşluklar kendi aralarında bir bağlantı oluşturarak bu şekilde geçirgenliği azaltır, zeminin mekanik özelliklerini iyileştirir ve zemini sıkıştırırlar (şekil 2.2c).



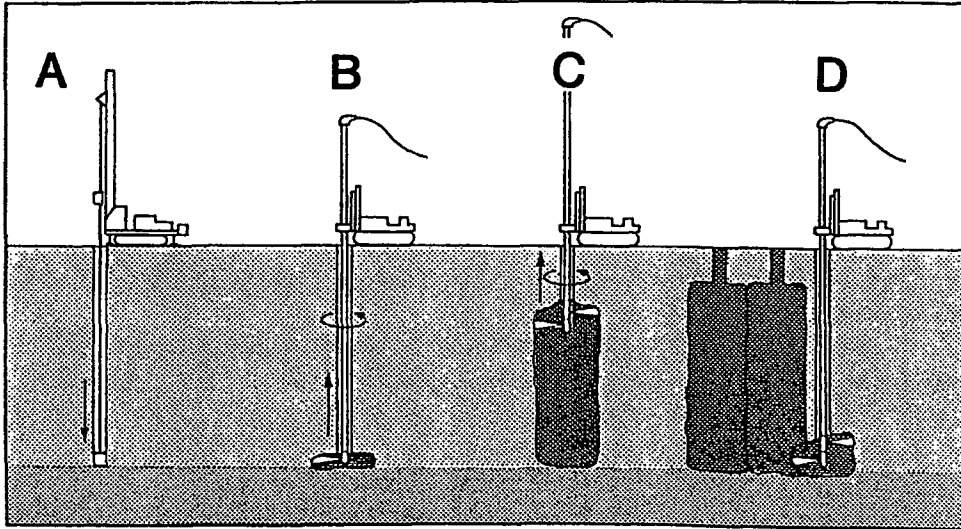
Şekil 2.2. (a)Dolgu, (b)Kompaksiyon, (c)Çatlak Enjeksiyonu (Koerner,1985)

Jeolojik yük ve zeminin özelliklerine bağlı olarak enjeksiyon kuyusu içindeki basınç belli bir değeri aştığında çatlaklar oluşur. Başlangıçta karışımın hareket etmesi için

basıncın düşürülmesi gerekir. Daha sonra akışın olması için kabul edilebilir bir basınç olmalıdır. Teoride bu basınç; akış/kuyunun birim uzunluğu oranı ve karışımın viskozitesi ile doğru orantılı, zeminin geçirgenliği ile ters orantılıdır. Karışım kütlesi herhangi bir doğrultuda şekillenir. Camberfort (1977)'e göre dikey çatlaklar yatay çatlaklardan önce şekillenirler. Yatay çatlakları işgal eden karışım, özellikle zeminin düşey yönde kabarmasına neden olur. Çatlak enjeksiyonu zeminin oturma miktarını azaltmak (Arcones, 1985) ve aynı zamanda yapı temelleri altındaki zeminlerin oturmasını önlemek için (Raabe ve Esters, 1990) yapılmaktadır.

2.2.4. Yüksek Basınç Enjeksiyonu

Yüksek basınç enjeksiyonu yapıların desteklenmesi veya gerekli durumlarda geçirimsiz perdeler oluşturmak için uygulanır. Tüm zemin türlerinde kullanılması yanında derinlerdeki nispeten ulaşılamaz gevşek zeminler yüksek basınç enjeksiyonu ile sağlamlaştırılabilir. Kullanılacak karışım miktarı, ön çalışmalarla ve iyileştirilmesi gerekli bölge üzerinde kontrollü deneyler yapılarak belirlenir. En basit şekli ile yüksek basınç enjeksiyonu yapılması için, enjeksiyon borusu uygun derinliğe kadar indirilerek zemin yatay olarak dönen su jetine maruz bırakılır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Yüksek Basınç Enjeksiyon Uygulaması a) Delme, b) Aşındırma, c) Enjeksiyon, d) Enjeksiyon Perdeleri

Aynı zamanda zemin çimento veya bentonit karışımları ile harmanlanır ve daha sonra enjeksiyon borusu tedricen yukarı çekilerek enjeksiyona devam edilir. Yüksek enerjili, aşındırıcı su veya hava jeti (Shibazaki ve Ohta, 1982) tarafından delgi basıncının ucundaki bir enjektör vasıtası ile çok yüksek basınç altında jet oluşturulur. Operasyon kuyunun altından yukarı doğru yapılır. Gerekli durumlarda harmanlanan zemin hava basıncı ile çıkartılarak karışım aynı anda ortama verilir. Yüksek basınç enjeksiyonu özellikle lős zeminlerin derin stabilizasyonunda başarılı sonuçlar vermektedir. Bu yöntemle 40 metreyi aşan derinliklere kadar başarılı bir şekilde iyileştirme yapılmaktadır.

Yüksek basınç enjeksiyonu üç farklı şekilde (kolon, perde, kanat) uygulanabilir. Kolonlar jet borusunun döndürülmesi ile elde edilir. Perde enjeksiyonunda jet yalnızca düşey bir düzlem boyunca verilir ve boru yukarı çekilirken sızdırmaz perdeler elde edilir. Kanat enjeksiyonun da yelpaze şeklinde enjeksiyon olmuş bir kütle oluşturmak için sabit iki enjektör kullanılır. Enjektör yavaşça yukarı çekilir ve kuyu üzerine gelindiğinde karışım akışı sınırlandırılır.

Yüksek basınç enjeksiyonunda kullanılan karışımlar, yeterli oranda pompalamanın yapılabilmesi için düşük viskoziteye sahip olmalıdır. Ayrıca kum gibi aşındırıcı dolgulardan kaçınılmalıdır. Bu iki faktör dışında enjeksiyon karışımının özellikleri ihtiyacı karşılayacak şekilde değiştirilebilir.

2.2.5. Kontakt (Temas) Enjeksiyonu

Kontakt (Temas) enjeksiyonu beton kaplamalarla, tabii jeolojik malzeme arasındaki boşlukların veya beton ile çelik arasındaki boşlukların doldurulmasında kullanılır. Özellikle tünel ve su yapıları etrafındaki boşlukların doldurulmasında kullanılan kontakt enjeksiyonu bazen arka dolgu olarak da isimlendirilir.

2.2.6. Konsolidasyon Enjeksiyonu

Konsolidasyon enjeksiyonu ile kaya ortamda ulaşılabilir çatlaklar, ayrık kütleler, fay bölgeleri, mağaralar ve diğer boşluklar doldurulur. Konsolidasyon enjeksiyonu temel zeminin mukavemetini artırır ve yapı içindeki zemin suyu akışını azaltır. Tünel ve galerilerde yüksek basınçlı su olması durumunda, kaplama dışındaki ortama yapılacak enjeksiyon ile yapı içine gelebilecek akışlar minimize edilir. Ayrıca konsolidasyon enjeksiyonu, kazı yapılan kaya kütlelerin yapı içine hareketini önlemek ve yük boşalmalarına engel olmak için uygulanır.

2.2.7. Perde Enjeksiyonu

Enjeksiyon perdeleri yeraltı hidrolik yapılarında, ulaşım ve su depolarında veya doğal gaz ve petrol depolarında kullanılır. Bu tür yapılara örnek olarak basınçlı galeriler, tüneller, depolar, pompa istasyonları ve santraller verilebilir. Perde enjeksiyonu, galeri ve tünellerin genelde etrafında radyal olarak yapılır. Santraller ve depoların etrafında ise çemberler oluşturacak şekilde uygulanır. Tünel ve galerilerde su geçirimsizliği düşürmek santrallerde suyun yapı içine akışını azaltmak, depolarda gaz veya sıvının kaçışını önlemek için kullanılır.

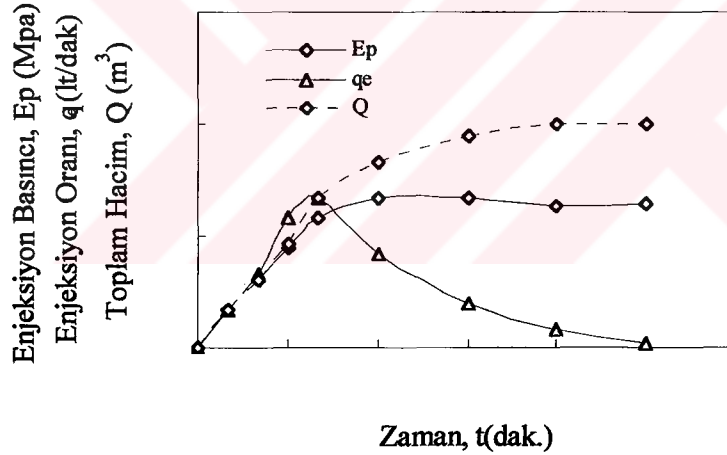
2.3. Enjeksiyon İşlemi

Enjeksiyon teknikleri, teoriden değil pratikten geliştirilmiştir. Enjeksiyon ile zemin içindeki boşluklar doldurularak zemin stabilize edilir, enjeksiyon yapılan ortamın akış özellikleri ve mukavemeti başlangıçtan daha iyi hale getirilir. Enjeksiyon sonucunda boşluklu zemin veya çatlaklı kaya, enjeksiyonla daha sıkı ve geçirimsiz hale getirilebilir. Enjeksiyon ile açılan sondaj kuyuları içerisinde zeminlerin boşluk sistemleri, kaya içindeki çatlaklar veya insan yapımı tüneller, şaftlar, mağaralar doldurulur.

Enjeksiyon işlemi sırasında penetrasyonun gerçekleşmesi için katı daneciklerin çökmesiyle karışım daha fazla sertleşmemeli ve blok halini almamalıdır. Ayrıca, karışım özellikleri bozulmadan mevcut çatlaklar veya boşluklar içerisinde yer

değiştirebilmelidir (Scherdegger ve Johnson, 1969). Karışım yalnızca akış yolları boyunca doğrusal olarak ilerler. Bu ilerleme yüksek basınç ve enjeksiyon oranı ile desteklenerek zemin suyunun yer değiştirmesine tatmin edici bir şekilde yardım ederek başarılı bir enjeksiyon yapılır.

Enjeksiyon basıncı (E_p) sıfırdan müsaade edilebilir son noktaya kadar yükselmesi sürekli bir şekilde kontrol edilir ve sonunda basınç (E_p) verilen bir periyodun üzerinde sabit kalır. Zamanla (t) enjeksiyon yapılan alan geçici bir yarıçapa kadar doldurulur ve nihayet son etkin yarıçapa (R) ulaşılır. Dolgunun ilk evresinde birim zamandaki enjeksiyon oranı (q_e lit/dak) büyür ve ilerleyen zamanlarda azalarak sonunda sıfıra yaklaşır. Pratik nedenlerden dolayı enjeksiyon oranı (q_e) son aşamada çok küçüktür fakat sıfır değildir (Şekil 2.4). Enjeksiyon karışımının toplam hacmi ($Q_e m^3$) işlemin sonuna kadar artar ve işlem sonunda sabit kalır (Lombardi, 1985).



Şekil 2.4. Enjeksiyon Basıncı ve Oranının Zamanla Değişimi (Mistry, 1988)

2.3.1. Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon karışımlarının zemin ve kaya içindeki nüfuzu son 20 yıl içinde kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Viskozite zamanın bir fonksiyonu kabul edilerek bu konuda pek çok araştırma yapılmıştır. Enjeksiyon bölgesinin etkin yarıçapı uygulanan basınçla artmaktadır yalnız bunun gerçekleşmesi için enjeksiyon basıncının karışımın akma direncinden büyük olması gerekir. Ayrıca çatlak veya

boşluklar katı süspansiyonların girişine olanak sağlamalı ve yeteri kadar geniş olmalıdır.

Bu ön koşullar altında, başarılı bir enjeksiyonun maksimum bir basınç, maksimum bir yarıçap ile sonuçlanması ve artan basıncın çok dar çatlakları ve boşlukları doldurması beklenir (Cambefort, 1977). Fakat pratik ve teorik çalışmalar bu düşünce biçimiyle uyuşmamaktadır. Kaya ortamların dikkate değer anizotropi olması durumunda karışım malzemesi mevcut çatlaklar veya suni kırıklar boyunca bir bütün olarak geniş etkin bir çap oluşturmaksızın, parmak şeklinde ilerlemektedir.

Bu nedenle, yüksek basınçların uygunluğu genelde kabul edilmez ve hala tartışılmaktadır. Suni çatlakların yeniden doldurulması güvenilir olmadığı için, başarılı bir enjeksiyon için risk azaltan ve minimize eden yüksek basınçların çatlatma etkisine dikkat etmek gerekir. Ewert (1985)' a göre kum ve kil taşı yatağında önemsiz küçük basınçlarda bile (0.2-0.3 MPa) oldukça derin çatlaklar oluşmuştur. Geniş etkin çaplarda ve bloklaşmış veya doldurulmuş çatlaklarda kuyu etrafındaki basınç direk olarak kuyuya etki etmiştir. Bunun sonucunda çatlakların eğim açısına bağlı olarak çok yüksek bir basınç, kütle kalkmasına veya yer değiştirmesine neden olduğu ifade edilmiştir. Gözenekli ortamlarda çok yüksek basınç zemin danelerinin yer değiştirmesine ve zemin içinde dağılmaksızın kuyu etrafında suni boşluklarda karışımın toplanmasına neden olabilir.

Tüm bu olumsuz etkiler dolgu enjeksiyonlarında istenmez, çünkü çatlak ve boşluk sistemlerinin yeteri kadar doldurulmasına mani olacak bu sonuçlar enjeksiyon başarısını azaltırlar. Bu yüzden, uygun olmayan yüksek basınçlardan sakınılmalıdır ve boşlukların doldurulması için uygun basınca belirli testlerle karar verilmelidir. Genelde dolgu enjeksiyonlarında basınç, çatlama basıncı altında olmalıdır. Homojen zeminlerdeki çatlak çalışmaları için gerekli basınç, zemin özelliklerinden hesaplanabilir. Kohezyonsuz zeminler için Denklem 2.1 verilmiştir.

$$p_0 = \frac{\gamma_n \cdot h}{m} + (1 + \sin \phi) \quad (2.1)$$

- p_0 : Çatlama basıncı
 γ_n : Zeminin doğal birim ağırlığı
 h : Yüzeyden dikey mesafe
 $\emptyset$: Sürtünme açısı
 $1/m$: Poission oranı

Çatlama basıncı; yaklaşık olarak kohezyonlu zeminler için 0.16 MPa, kohezyonsuz zeminler için 0.09 MPa dır. Görüldüğü gibi çatlama basınçları çok düşüktür. Homojen ortam içinde hidrolik kırılmalar teoride küçük gerilmeler oluşturur. Bu durum kohezyonlu zeminlere yapılan çatlak enjeksiyonundan sonra kazılan çimento yumrularıyla belirlenmiştir (Kutzner, 1996).

Dolgu enjeksiyonları için uygun ve müsaade edilebilir enjeksiyon basınçları hakkında aşağıdaki sonuçlar verilmiştir. Enjeksiyon basıncı, yükleme ağırlığına eşit olmalıdır. Genelde kaya kütlelerin çatlak sistemleri yüzeye paraleldir, bu yüzden basınç derinlikle orantılı şekilde artırılmalıdır. Derinlik içindeki basınç yükleme basıncının altında olmalıdır. Yatay ve dikey çatlakların yoğun kayanın kütlesi içinde yer aldığı durumlarda basınç, kayanın yer değiştirmesine neden olacak basınçtan küçük olmalıdır. Zeminlerin dolgu enjeksiyonları için boşluk sistemi içinde karışım malzemesine sabit bir akış hareketi sağlamak önemlidir. Karışım malzemesi referans alınarak enjeksiyon basıncı zeminin spesifik geçirgenliğine göre ayarlanmalıdır. Homojen zeminlerde basınç derinlikle orantılı olarak artırılabilir. Aşırı basınçlar zeminde akma, hidrolik kırılma veya kuyuda radyal zemin kopmalarına neden olur.

2.3.2. Etkin Yarıçap

Etkin yarıçap aşağıdaki gibi tanımlanmış olup, basit denklemi aşağıda verilmiştir (Denklem 2.2).

$$R = a.p / \tau_0 + r \quad (2.2)$$

- R : Etkin yarıçap
 $2a$: Çatlak genişliği

- E_p : Enjeksiyon basıncı
 τ_0 : Karışım malzemesinin akma direnci
 $2r$: Kuyu yarıçapı

Etkin yarıçap çatlak genişliğinin yarısıyla ve karışım basıncıyla doğru orantılı, karışımın akma limitiyle ters orantılıdır. Kuyu yarıçapı ihmal edildiğinde su için etkin yarıçap sonsuzdur. Denklem 2.2 dikey olarak penetrasyon yapılan yatay bir çatlak için geçerlidir.

Boşluk sistemlerindeki daneli/süspansiyon ve danesiz/solüsyon akışkanlar için benzer denklemler bulunmuş ve viskoziteyi zamanın bir fonksiyonu kabul edilerek solüsyon akışkanların ilerleyişi teorik olarak araştırılmıştır. Bu eğilim zamanla iyileştirilen zeminin geçirgenlik değişimini yansıtmaktadır. Çünkü geçirgenlik enjeksiyon karışımının viskozitesiyle değişmektedir. Solüsyon akışkanlar için viskozite ve geçirgenlik arasındaki ilişki Denklem 2.3' de verilmiştir.

$$k / k_0 = \eta_0 / \eta \quad (2.3)$$

- k : Zeminin permeabilitesi (suyu referans alan)
 k_0 : zeminin permeabilitesi (Solüsyonu referans alan)
 η : Suyun viskozitesi
 η_0 : Solüsyonun viskozitesi

Teorik buluşlar deneylerle doğrulanmış ve hesaplanan çapların ölçülen çaplarla uyum içerisinde olduğu ifade edilmiştir.

2.3.3. Enjeksiyon Süresi

Enjeksiyon süresi karışımın viskozitesi, müsaade edilen enjeksiyon basıncı ve arzu edilen veya başarılı olan etkin yarıçapın genişliğiyle ilgilidir. Pompalama periyodu ve enjeksiyon süresi viskoziteyle sınırlandırılır. Bu periyot çimento süspansiyonları için yaklaşık 2-4 saat, kimyasal karışımlar için 20-60 dakika, köpük ve diğer özel

malzemeler için bir kaç dakika veya sadece bir kaç saniyedir. Çimento karışımının ilk sertleşmesi, hidratasyonun başlamasına eşit olmasına rağmen enjeksiyon için hazırlanan çimento süspansiyonları, enjeksiyon yapılmaya kadar karıştırıldıklarında hidratasyonun başlamasından sonra da pompalanabilirler. Kimyasal solüsyonlar için enjeksiyon süresi jel süresine eşittir ve jel süresinin sonunda malzeme ölçülebilir kayma mukavemeti oluşturmaya başlar.

Enjeksiyon süresi esnasında malzeme kuyudan istenilen uzaklığa kadar ilerler ve çimento süspansiyonları için bu mesafenin etkin yarıçapla sınırlandırılması arzu edilir. Karışımın istenmeyen mesafelere gitmesini önlemek veya çatlama basınçlarını aşan basınçlardan sakınmak için bu sınırlandırma gereklidir. Yaygın kimyasal karışımlar için başarılı yarıçap ve enjeksiyon süresi viskozitenin hızlıca artırılmasıyla nispeten kısa jel süresi ile sınırlandırılır. Pratikte, çatlaklı ortamlarda ortalama etkin yarıçap 3-5 m ve boşluklu sistemlerinde 1-3 m arasında değişmektedir.

2.3.4. Geçirgenlik

Enjeksiyon alanındaki bilimsel araştırmaların başlangıcından itibaren bir ortamın enjeksiyon edilebilirliği ve geçirgenliği Darcy kanunu ile değerlendirilmektedir. Geçirgenliğin bir fonksiyonu olarak farklı karışımların kullanılmasıyla, enjeksiyon edilebilirliği gösteren diyagramlar geliştirilmiştir. Geçirgenlik, enjeksiyon yapılacak zemin ortamın dane büyüklüğü veya karışımın kendi dane büyüklüğü ile ifade edilir. Enjeksiyon edilebilirlik zeminin geçirgenliği ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

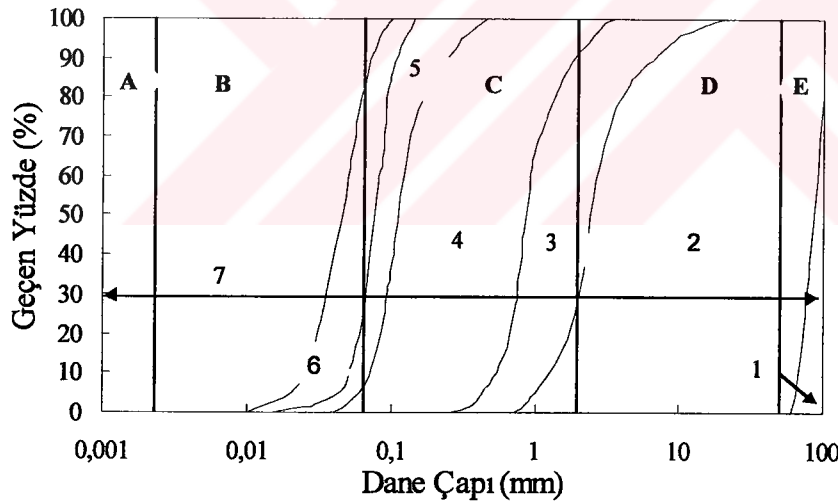
2.3.5. Zeminlerdeki Boşluk Yapıları

Zeminlerin boşluk sistemlerinin doldurulması için solüsyon akışkanlarının uygulanmasındaki alt sınırlar Şekil 2.5' de verilmektedir. Limitler stabil süspansiyonlar ve yaygın kimyasal karışımlarla pratikteki tecrübelerden geliştirilmiştir. Değişik araştırmalardaki referanslarda, dane büyüklüğü dağılım eğrilerinin sınırlarında önemsiz farklılıklar gözlenmiştir. Sınır eğrilerinden birine karşı gelen zeminlerin enjeksiyon uygulamaları daha çok başlangıçta gerçekçi zemin araştırmalarına ihtiyaç duymaktadır. Şüpheli durumlarda, karışım malzemesi ve

yöntemi hakkında karar vermeden önce bir deneme enjeksiyonu yapılması tavsiye edilmektedir (Kutzner, 1996). Kaya çatlaklarında genel olarak zemindeki kurallar geçerlidir. Zamanın bir fonksiyonu olarak viskozite ve müsaade edilebilir basınç tarafından uygulamanın alt sınırı verilir. Yaygın viskoz solüsyonlar için minimum çatlak genişliği yaklaşık 0.05 mm civarındadır. Bu çatlaklar sadece istisnai durumlarda doldurulabilir.

2.3.6. Dane Büyüklüğü Dağılımı ve Zemin Tabakaları

Zeminin enjeksiyon edilebilirliği (N) önemli derecede dane büyüklüğü dağılımına bağlıdır. Herhangi bir enjeksiyon uygulamasına zeminin dane dağılımı ile karar verilir. Şekil 2.5’de farklı karışım malzemeleri hakkında bilgi verilmektedir. Zemin boşluklarının doldurulması için farklı tabakaların iyileştirilmesinde farklı materyallere ihtiyaç duyulur. Zemin tabakaları açılan araştırma kuyuları veya dren çukurlarının incelenmesiyle keşfedilir.



- | | |
|------------------------------|----------|
| 1. Harç | A. Kil |
| 2. Normal çimento | B. Silt |
| 3. İnce çimento | C. Kum |
| 4. Silika içerikli çimento | D. Çakıl |
| 5. Aşırı ince çimento | E. Taş |
| 6. Reçine | |
| 7. Yüksek basınç enjeksiyonu | |

Şekil 2.5. Enjeksiyon Karışımlarının Uygulama Sınırı

2.3.7. Zemin ve Sızıntı Suyu

Enjeksiyonun tutulan zemin suyu veya sızıntı suyu seviyesinin altında veya üstünde yapılması gerektiğini bilmeliyiz. Mevcut zemin suyu enjeksiyon karışımının davranışına etki edeceği için su seviyelerine deney kuyuları ile karar verilmelidir. Aynı zamanda suyun kimyasal yapısının ve karışım malzemesine etkisinin de bilinmesi gerekir. Uygun enjeksiyon basınçları ve malzemeleri seçebilmek için zemin suyunun sıcaklık ve basıncı bilinmelidir. Su seviyesi, akış hızı ve yönü de önemli parametrelerdir.

2.4. Karışımların Enjeksiyon Edilebilirliği

Karışımın zemine girme kabiliyeti zeminin boşluk oranı, geçirgenlik ve dane büyüklüğü dağılımına bağlıdır. Enjeksiyon için kullanılan basınç, enjeksiyon aralığı ve karışımın viskozitesine bağlıdır. Ayrıca karışımların viskozitesinin zamanla değişimi bilinmelidir. Boşluk suyu ve karışım arasında oluşan ara yüzeyin basınç yüksekliğini azaltmasından dolayı karışımın ulaşabileceği mesafe sınırlıdır ve karışımın viskozitesi akışı önler. Bu yüzden çimento-kil karışımların özellikleri diğer kimyasal karışımlardan çok farklıdır. Boşluklu zeminlere daneli karışımlar enjekte edildiğinde, süspansiyondaki büyük daneciklerin boşluklara girmek için yayılması nedeniyle filtrasyon meydana getirebilir. Örneğin dane büyüklüğü 2 mm 'den küçük olan üniform kum içine çimento enjekte edildiğinde filtre formasyonu oluşur. Bundan dolayı daneli karışımların bir formasyona girme kabiliyeti askı malzemesinin dane büyüklüğüne, diğer bir ifade ile, karışım danelerinin dolgu yapılacak boşluklardan daha küçük olmasına bağlıdır (Denklem 2.4). Bu durum enjeksiyon edilebilirlik (N) olarak ifade edilir ve aşağıdaki formülle tanımlanır.

$$N = D_{15} (\text{zemin}) / D_{85} (\text{karışım}) \quad (2.4)$$

Eğer $N > 25$ olursa karışım formasyona başarılı şekilde enjeksiyon yapılabilir demektir. Eğer $N < 11$ ise enjeksiyon mümkün değildir. Bununla beraber, Burwell (1958), karışımın D_{85} değerine tek başına güvenilmemesi gerektiğini ve enjeksiyon edilebilirlik limitlerine yaklaşıldığı zaman, karışımın uygun olduğundan emin olmak

için enjeksiyon edilebilirlik aşağıdaki formüle göre yeniden kontrol edilmesi gerektiğini ifade etmiştir (Denklem 2.5).

$$N = D_{10} (\text{zemin})/D_{95} (\text{karışım}) \quad (2.5)$$

Bu ikinci durumda $N > 11$ ise enjeksiyon tutarlı bir şekilde mümkündür, fakat $N < 5$ ise enjeksiyon mümkün değildir. Alternatif olarak daneli karışımlar için limitler, D_{15} (karışım) ve D_{15} (zemin) arasında büyüklük faktörü (1/10) olarak alınmalıdır. %10'dan daha az ince dane içeren zeminlere genelde kimyasal karışımlar uygulanabilir. Eğer ince dane yüzdesi %15'i aşıyorsa, etkili kimyasal karışımın uygulanması zor olabilir. İnce daneler yüzdesi %20'den daha çok olduğunda enjeksiyon mümkün değildir. Dane inceliği (cm^2/g) aynı zamanda enjeksiyon edilebilirliği göstermektedir. Bazı karışımların enjeksiyon aralığı Tablo 2.1'de verilmektedir. Alternatif olarak enjeksiyon edilebilirliği (N) tayin etmek için geçirgenlik de kullanılabilir. Örneğin, Littlejohn (1985), geçirgenliği $k < 5.10^{-3} \text{ cm/sn}$ den küçük olan zeminlerin iyileştirilmesinde, çimento karışımların kullanılamayacağını önermiştir.

Tablo 2.1. Bazı Karışımların Enjeksiyon Sınırları (Caron, 1967)

Özellikler	Zemin Tipleri		
	Kaba kumlar, çakıllar	Orta-ince kumlar	Siltli veya killi kumlar, siltler
Dane Çapı	$D_{10} > 0.5 \text{ mm}$	$0.02 < D_{10} < 0.05 \text{ mm}$	$D_{10} < 0.02 \text{ mm}$
Geçirgenlik	$k > 10^{-1} \text{ cm/sn}$	$10^{-1} > k > 10^{-3} \text{ cm/sn}$	$k < 10^{-3} \text{ cm/sn}$
Karışım tipi	Süspansiyonlar	Solüsyonlar	Saf reçineler
Konsolidasyon Enjeksiyonu	Çimento $k > 1 \text{ cm/sn}$ kuru karışım	Silika Jel İki aşamalı $k > 10^{-2} \text{ cm/sn}$ Tek aşamalı Caronjel Glyoxol	Aminoplastik Fenolplastik
Geçirimsizlik Enjeksiyonu	Kuru karışım Bentonit Jel Kil Jel Kil-Çimento	Bentonit Jel Ligno-Kromit Soft Silikajel Terranier	Akrilamidler Aminoplastlar Fenolplastlar

Geçirgenliği $k=10^{-3}$ cm/s olan zeminlere kil karışımların enjeksiyon edilebildiği ifade edilmiştir. Kimyasal karışımların enjeksiyon edebilirliği viskozite, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon periyodu kadar enjeksiyon yapılan zeminin geçirgenliği tarafından belirlenir (Bodocsi ve Bowers, 1991). Viskozitesi $2 \cdot 10^{-3}$ Ns/m² (2cp)'den küçük olan kimyasal karışımlar (akrilamid içerikli karışımlar), geçirgenlikleri $k=10^{-4}$ cm/sn 'den daha az olan zeminlerde her hangi bir zorlukla karşılaşmadan enjeksiyon edilebileceği ifade edilmiştir.



BÖLÜM 3

KONU İLE İLGİLİ YAYINLANMIŞ ÇALIŞMALAR

Zemin enjeksiyonu konusunda günümüze kadar pek çok arazi ve laboratuvar çalışması yapılmıştır. Arazide yapılan çalışmalar genel olarak uygulamaya yönelik olmasına rağmen laboratuvar çalışmaları daha çok deneysel amaçlıdır. Laboratuvarda yapılan çalışmalar enjeksiyon karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri ile bu karışımlarla enjeksiyon yapılan zeminlerin geoteknik özelliklerinin araştırılmasını içermektedir. Arazide yapılan uygulamalarda ise amaca ve zemin türüne bağlı olarak zeminin enjeksiyon edilebilirliği araştırılarak zemin için uygun bir enjeksiyona karar verilmektedir. Arazi çalışmaları da zemin türü (daneli veya kaya), enjeksiyon yöntemi, enjeksiyon amacı ve karışım tipi gibi kriterlere bağlı olarak değerlendirilmektedir.

Laboratuvarda yapılan çalışmalar kaya zeminlere oranla daha çok daneli (kum-çakıl) zeminlerin enjeksiyonu konusunda yoğunlaşmıştır. Bunun nedeni daneli zeminlerin deneysel çalışmalara kolay uygulanması, istenilen özelliklerde hazırlanabilmesi ve deney sonuçlarının daha rasyonel sonuçlar vermesidir. Kaya zeminler için aynı varsayımlarda bulunmak laboratuvar şartlarında kolay olmamaktadır. Yapılan çalışmalarda enjeksiyon karışımlarının tipi, su/katı oranı, katkı yüzdesi, zeminin boşluk oranı veya çatlak genişliği, relatif sıklığı ve enjeksiyon basıncı parametre olarak seçilmiştir.

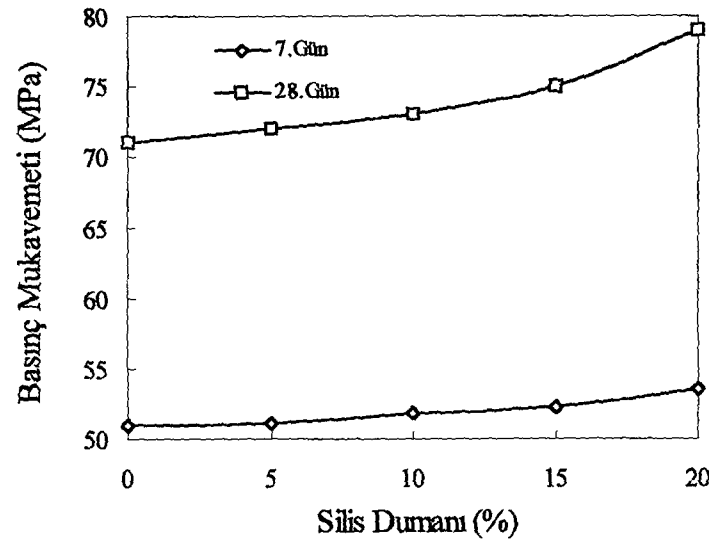
Laboratuvarda yürütülen model enjeksiyon deneylerinde başlıca daneli ve danesiz (kimyasal) karışımlar kullanılmıştır. Bu kapsamda değişik araştırmacılar tarafından daha önce yapılan laboratuvar çalışmaları genel olarak özetlenmiş ve elde edilen sonuçlar açıklanmıştır.

3.1. Daneli Karışımlarla İlgili Yapılan Çalışmalar

• Pierre-Claude Aitcin ve diğerleri tarafından yapılan çalışma (1984)

Pierre tarafından yapılan laboratuvar çalışmasında, farklı oranlarda silis dumanı çimentoya katılarak elde edilen karışımların viskozite, sulanma, tiksotropi, küçülme ve basınç mukavemetinin zamanla değişimleri incelenmiştir.

Çalışmada çimento ağırlığının % 5, 10, 15, 20 oranlarında silis dumanı ve çimento kullanılarak beş farklı karışım elde edilmiştir. Silis dumanı kullanılmayan karışımın başlangıçta su/çimento oranı 0.4 alınarak, bu oran kullanılan silis dumanı miktarı ile artırılmıştır. Karışımlarda çimento ağırlığının %0.8-1.2 oranında süper akışkanlaştırıcı (naftalin formaldehit) kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda, karışımlarda kullanılan silis dumanı oranı ile karışım numunelerinin viskozite ve basınç mukavemeti değerlerinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.1). En büyük basınç mukavemeti %20 silis dumanı kullanılan numunelerde meydana gelmiş ve referans numunesine göre artış %10 oranında gerçekleşmiştir. Ayrıca deneyler sonucunda çimento karışımlarında daha çok sulanma gözlenirken, silis dumanı katkı karışımların sulanma miktarını azalttığı belirtilmiştir.

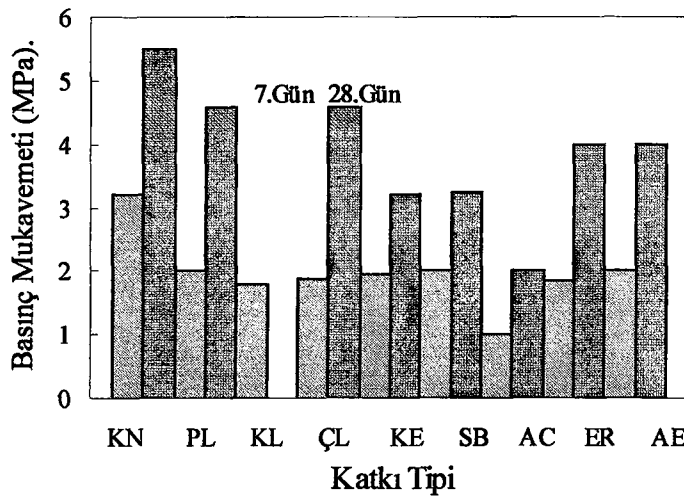


Şekil 3.1. Silis Dumanı Katkılı Karışımların Basınç Mukavemeti Değişimi

• T.S. McFarlane ve R.D. Holtz tarafından yapılan çalışma (1992)

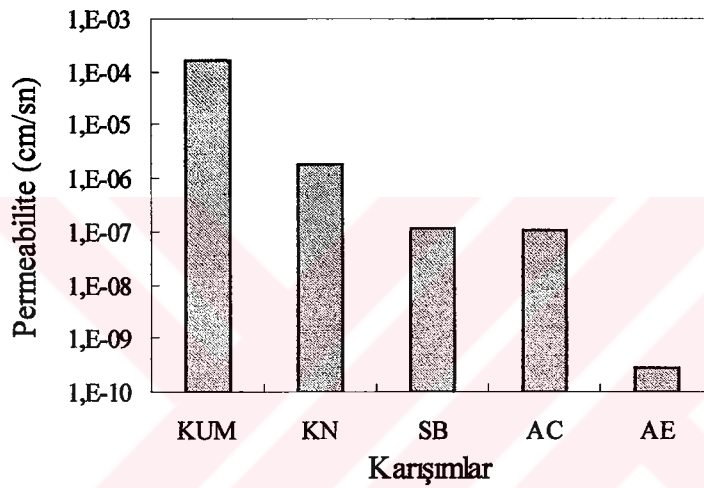
Çalışmada geçirimsiz duvarlarda yaygınca kullanılan zemin-çimento-bentonit karışımlarının flexsibilitesini artırmak, ortamın permeabilitesini düşürmek amacıyla laboratuarda diğer katkıları içeren karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışımlarda zemin olarak ince kum ve silt katkı olarak çelik lif (ÇL), karbon lif (KL), kevlor (KE), polipropilen lif (PL), styrene-latex (SB), acrylic latex (AC), epoksi reçinesi (ER) ve asfalt emülsiyonu (AE) kullanılmıştır. Ayrıca, yapılan çalışmaları kontrol etmek için katkısız numuneler (KN) hazırlanmış ve daha sonra numunelerin basınç, çekme, eğilme mukavemetleri, elastisite modülü ve permeabilitesi test edilmiştir.

Deney karışımlarında %63-70 zemin, %12-14 çimento, %5-0.2 bentonit, %15-18 su ve katkıları %0-0.4 oranlarında alınmış ve katkı tipi, zemin tipi, kür süresi, karıştırma oranı parametre olarak seçilmiştir. Karışımlar hazırlandıktan sonra 100 mm çapında, 200 mm uzunluğunda kalıplara konulmuş ve her bir kalıp 30 saniye süreyle, karışımları yoğunlaştırmak ve hava kabarcıklarını çıkarmak için sarsma tablası üzerinde bırakılmış, daha sonra deney yapılınca kadar numuneler %100 nemli bir ortamda kür edilmiştir. Sonuçta katkıların tamamı elastisite modülünü, basınç mukavemetini ve geçirgenliği katkısız numuneye göre düşürdüğü görülmüştür. Katkılı numunelerin 7. ve 28. günlük basınç mukavemeti katkısız numuneye göre %40 oranından daha düşük değerler verdiği ifade edilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Farklı Karışımların Basınç Mukavemeti Değişimleri

Styrene butadiene latex, çelik lif ve Kevlor ile iyileştirilen numuneler çekme mukavemetini katkısız numuneye göre düşürürken asfalt emülsiyonu düşük elastik modüle sahip olmakla beraber basınç, çekme ve eğilme mukavemetini katkısız numuneye göre fazla değiştirmedeği ifade edilmiştir. Katkılarla stabilize edilen zeminin çekme mukavemeti önemli derecede artmasına rağmen Styrene butadiene lateks çekme mukavemeti kontrol numuneye göre %9-14 oranında artmıştır. Katkılı silt numunelerin genelde kum numunelerden daha düşük mukavemet gösterdiği ifade edilmiştir. Geçirgenlik akrilik , polimer lateks ve asfalt emülsiyonu ile düşürülmüş ve en büyük düşme asfalt emülsiyonunda olmuştur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Numunelerin Permeabilitesinin Karışım Tipi ile Değişimi

• Sandra Z. Tosca ve Jeffery C. Evans tarafından yapılan çalışma (1992)

Bu çalışmada farklı oranlarda çimento, uçucu kül, bentonit ve hava sürükleyici katkıları kullanılarak çok sayıda karışım elde edilmiştir. Tüm karışımlar su, çimento ve doğal katkılardan oluşacak şekilde hacimsel olarak 1:1:1 oranında hazırlanmıştır. Doğal katkı olarak kum ve uçucu kül %50 ile %100 oranlarında kullanılmıştır. Bazı karışımlarda %0.5 oranında bentonit ve %1 oranında hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Çalışmada 1.25 mm den daha büyük kaya çatlakları veya zemin boşluklarının en ekonomik ve en etkili şekilde doldurulması amaç edinilmiştir. Mikserde karıştırılarak elde edilen karışımlar 7.1 cm çapında ve 14 cm yüksekliğinde flexi-glas kalıplara dökülerek 28 gün boyunca %100 nemde kür edilmiş ve daha sonra numunelerin 1, 7, 14, 28 günlük basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Deney

sonuçlarında, maksimum basınç dayanımı %100 kum dolgu kullanılan ve her hangi bir katkı kullanılmayan numuneler verirken en düşük mukavemeti ise hava sürükleyici katkıların kullanıldığı kum/uçucu kül ve uçucu kül karışımlarının verdiği gösterilmiştir (Tablo 3.1). Yine kullanılan bentonit miktarına bağlı olarak karışımların büzülme ve şişmesi değerlendirilmiş, %100 kum dolgu kullanılan numunelerde büzülme olurken %50 oranında kum ve uçucu külün kullanıldığı karışımlarda bentonit miktarına bağlı olarak şişme meydana gelmiştir. Bentonitin sulanmayı azaltarak büzülmeyi önlediği gözlenmiştir. İkiyüz den fazla numunenin değerlendirildiği çalışmada %50 kum ve %50 uçucu kül numunelerinin mühendislik özelliklerinin arzu edilen sınırlarda olduğu ifade edilmiştir.

Tablo 3.1. Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi

Karışım	Katkı Oranları (hacim)				Katkı Oranları (ağırlık)		Basınç Muk.(Mpa)	
	Su	Çimento	Kum	Uçucu Kül	Bentonit	Hava Sür.	7.Gün	28.Gün
A	1	1	1	0	0	0	7.69	16.02
AA	1	1	1	0	0.5	0	10.30	9.10
AAA	1	1	1	0	0	1	7.57	10.19
B	1	1	0.5	0.5	0	0	10.13	18.92
BB	1	1	0.5	0.5	0.5	0	8.66	17.44
BBB	1	1	0.5	0.5	0	1	2.26	3.17
C	1	1	0	1	0	0	18.70	14.97
CC	1	1	0	1	0.1	0	16.91	18.56
CCC	1	1	0	1	0	1	2.13	3.58

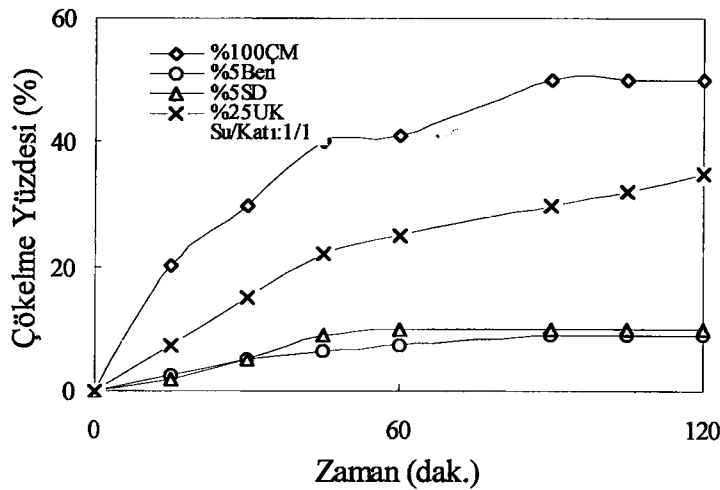
Vipulanandan C. ve S. Shenoy'un yaptıkları çalışma (1992)

Yapılan bu çalışmada genel olarak çimento ve çimento esaslı karışımlar ve bu karışımlarla enjeksiyon yapılan kumların özellikleri incelenmiştir. Laboratuar deneylerinde çimento, çimento-sodyum silikat (%5), çimento-bentonit (%5), çimento-kalsiyum silikat (%5), çimento-silis dumanı (%5) ve çimento-uçucu kül (%25F) kullanılarak elde edilen karışımların viskozite, sertleşme süreleri, sulanma ve basınç mukavemeti araştırılmıştır. Çalışmalarda dane büyüklüğü 0.8-60 µm olan normal portland çimentosu kullanılmış, katkılar çimento ağırlığına göre eklenmiştir.

Karışımlarda kullanılan bentonitin ise 0.2-6 μm mikron arasında değiştiği ifade edilmiştir. Bentonit, uçucu kül, silis dumanı, sodyum silikat, kalsiyum klorit gibi katkıları kullanarak karışımların sulanma, akışkanlık ve mekanik özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın amacı katkıların çimento karışımlarına etkisinin araştırılması, enjeksiyon yapılan kumun dinamik ve statik özelliklerinin belirlenmesidir.

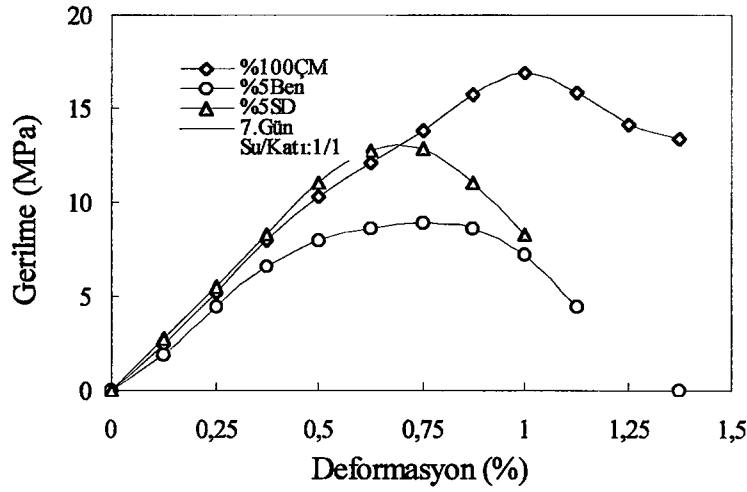
Elde edilen karışımlar kum ortama enjeksiyon yapılarak 38 mm çapında 74-90 mm uzunluğunda enjeksiyon uygulanmış numuneler ve sade karışım numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen numuneler deney gününe kadar su içerisinde kür edilerek karışım numuneleri ve enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28. gündeki basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Karışımlarda su/katı oranı 1 alınmıştır.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kumun granülometrisini tanımlamak için iki şekil parametresi, uniformluk $C_u=1.49$ ve derecelenme $C_e=1.05$ katsayıları kullanılmıştır. Kalsiyum klorit, sodyum silikat ve bentonitin kullanıldığı karışımların viskozite değerlerinin yüksek olduğu ifade edilmiştir. Karışımda kullanılan bentonit başlangıç ve final priz sürelerini uzatırken kalsiyum klorit priz başlangıç ve priz bitiş sürelerini düşürmüştür. Deneysel çalışmalarda en fazla sulanma %50 oranında çimento karışımlarında meydana gelirken, bentonit ve silis dumanı sulanmayı önemli miktarda düşürdüğü grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3.4).



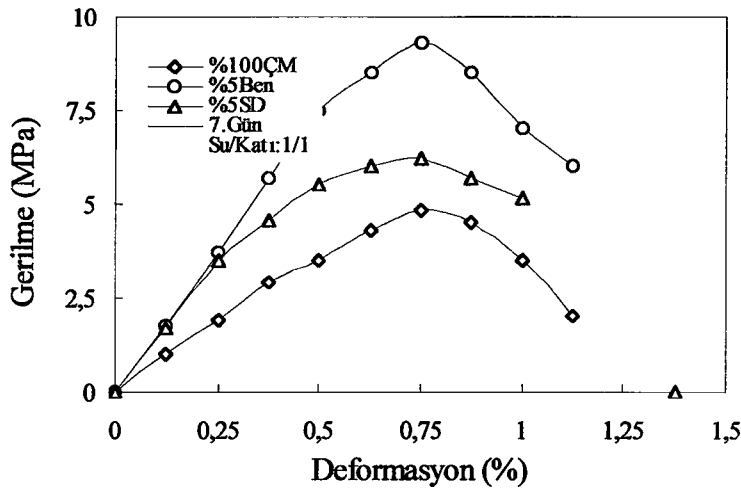
Şekil 3.4. Farklı Karışımların Çökeltme Yüzdesinin Zamanla Değişimi

Yapılan basınç testleri sonucunda 7. ve 28. günde en yüksek basınç mukavemetini çimento karışımı verirken silis dumanı kullanılan numuneler bentonit kullanılan numunelerden daha fazla mukavemet göstermiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Farklı Karışımların Gerilme Deformasyon İlişkisi

Enjeksiyon yapılan numunelerde ise bentonit kullanılan numuneler, çimento ve silis dumanı kullanılan numunelerden daha fazla basınç ve çekme dayanımı verdiği gösterilmiştir (Şekil 3.6). Bentonit karışımlarının basınç mukavemeti düşerken bentonit karışım enjeksiyonu uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin artması çalışmada karışım ve enjeksiyon yapılmış numuneler arasında direk bir korelasyon olmadığı şeklinde açıklanmıştır.



Şekil 3.6. Farklı Karışımlarla Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Gerilme Deformasyon İlişkisi

• **Schwarz ve Krizek tarafından yapılan çalışma (1992)**

Schwarz ve Krizek tarafından yapılan laboratuvar çalışmasında farklı su/çimento oranlarında ince daneli çimentolar kullanılarak, değişik hıza sahip karıştırıcılar tarafından enjeksiyon karışımları elde edilmiş ve karışım numunelerinin basınç mukavemeti değerlerinin karıştırma mekanizmasıyla ilişkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarında karışımların bu özelliklerinin karıştırma tipi ile (karıştırıcı tipi) değişim gösterdiği ortaya konmuştur.

Deneysel çalışmalarda dört farklı çimento; normal portland, ince daneli MC-100, MC-300, MC-500 ve farklı hızlara sahip beş farklı karıştırıcı kullanılmıştır. Karışımların su/çimento oranı 1/1, 2/1, 3/1, 4/1 alınmıştır. Karışımlar karıştırıcılarda 1 ve 10 dakika karıştırılarak elde edilen karıştırma süresinin numunelerin özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Ayrıca karışımlarda çimento ağırlığının %1'i oranında akışkanlaştırıcı kullanılmış ve katkılar karışım suyuna önceden eklenmiş daha sonra çimento ilave edilmiştir. Yapılan çalışmada 10 dakika karıştırılarak hazırlanan karışımlar 1 dakika karıştırılan karışımlara göre daha hızlı çöktüğü ve sonuçta aynı çökme yüzdesine ulaştıkları ifade edilmiştir. Bazı karışımlara %10 oranında katılan silis dumanı ve bentonit sulanma miktarını %50 - %75 oranında düşürdüğü gözlenmiş ve karıştırma süresinin artması ile viskozitenin arttığı ifade edilmiştir. Rotasyonel viskozimetrenin hızı artırıldığında viskozitenin düştüğü belirtilmiştir.

Enjeksiyon karışımlarının priz sürelerini tayin etmek için 5 cm çapında ve 10 cm uzunluğunda kalıplar kullanılmış ve numuneler deney süresi boyunca kapalı tutularak sulu ortamda bırakılmıştır. Sonuçta karıştırma sürelerinin sertleşme süresine etki etmediği gözlenmiştir. Su içinde kürde bırakılan numuneler 7. ve 28. günde serbest basınç deneyine tutulmuş, basınç mukavemeti değerleri tespit edilmiştir. Blender karıştırıcı ile elde edilen karışımların 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti, Colcrete tip karıştırıcılarla karıştırılarak elde edilen karışımlardan daha yüksek çıktığı ifade edilmiştir.

• **Raymond J. Krizek ve Maan Helal tarafından yapılan çalışma (1992)**

Krizek ve Helal yaptıkları çalışmada çimento enjeksiyonu yapılan kum içerisindeki boşluk yapılarının yönelimini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda Ottawa 20-30 kumuna, ince daneli çimento enjeksiyonu yapılarak elde edilen numuneler incelenmiş ve enjeksiyon yapılan zeminin boşluk yapısının, karışımın su/çimento oranı ve karışım içinde tutulan danelerin çökelme davranışının fonksiyonu araştırılmıştır.

Yapılan bu deneysel çalışmada relatif sıkılığı $65 \pm 5\%$ olan Ottawa 20-30 kumu, 70 kPa enjeksiyon basıncı altında ince daneli çimento (MC-500) karışımı ile enjeksiyona tabi tutularak numunelerin 7 ve 28 gündeki geçirgenliği, basınç ve çekme mukavemeti incelenmiştir. Geçirgenlik ve basınç mukavemeti için deney numuneleri 5 cm çapında 15 cm uzunluğunda plastik borularda hazırlanmış ve borular Ottawa 20-30 kumu ile doldurulduktan sonra 1/1, 1.5, 2/1, 2.5, 3/1 su/çimento oranlarındaki karışımlarla enjeksiyon yapılmıştır. Numunelere düşey doğrultuda enjeksiyon yapıldıktan sonra numunelerin yarısı yatay, diğer yarısı düşey doğrultuda nem odasında kür edilmiştir.

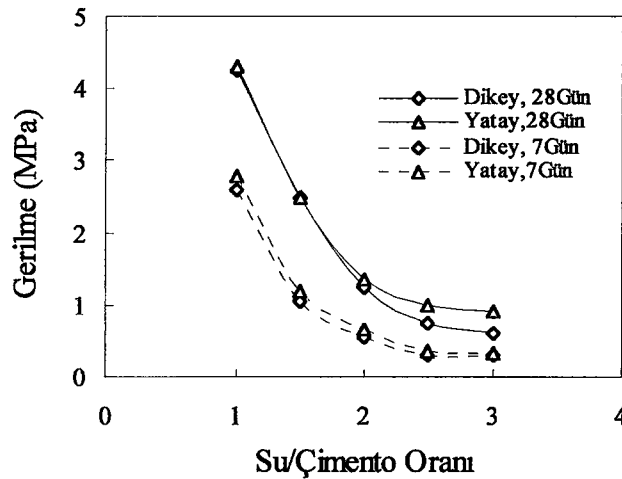
Çekme gerilmesi için 209x20x25 cm boyutlarında dikdörtgen ağaç kalıplarda hazırlanan numuneler enjeksiyondan sonra geçirgenlik ve basınç numuneleri gibi yatay ve düşey olarak kür edilmiştir. Sonuçta bu numuneler 5x5x20 cm uzunluğunda prizmatik numuneler haline getirilip, çekme deneyleri yapılmıştır.

Deney sonuçlarında düşey olarak kür edilen numunelerin yatay olarak kür edilen numuneler göre geçirgenliği daha düşük çıkmıştır (Tablo3.2). Ayrıca karışımlarda kullanılan su/çimento oranı arttıkça numunelerin geçirgenliği de aynı oranda artmıştır ve su/çimento oranı 1.5/1 den büyük olan numunelerde, yatay olarak kür edilen numunelerin basınç mukavemeti düşey olarak kür edilen numunelere göre daha yüksek çıkarken, 1/1 su/çimento oranlarda yatay ve düşey kür edilen numuneler arasında önemli bir fark olmadığı gözlenmiştir (Şekil 3.7).

Tablo 3.2. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Değişimleri

Su/çimento	Konum	Permeabilite Katsayısı k(cm/sn)		
		7.Gün	14.Gün	28.Gün
1/1	Dikey	Küçük<10 ⁻⁷	Küçük<10 ⁻⁷	Küçük<10 ⁻⁷
	Yatay	Küçük<10 ⁻⁷	Küçük<10 ⁻⁷	Küçük<10 ⁻⁷
1.5/1	Dikey	Küçük<10 ⁻⁷	Küçük<10 ⁻⁷	Küçük<10 ⁻⁷
	Yatay	8*10 ⁻⁵	2*10 ⁻⁵	4*10 ⁻⁷
2/1	Dikey	4*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	2*10 ⁻⁵
	Yatay	3*10 ⁻³	2*10 ⁻³	9*10 ⁻⁴
2.5/1	Dikey	8*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁴
	Yatay	7*10 ⁻²	2*10 ⁻²	2*10 ⁻²
3/1	Dikey	9*10 ⁻²	6*10 ⁻²	5*10 ⁻²
	Yatay	6*10 ⁻²	4*10 ⁻²	3*10 ⁻²

Gözlenen bu anizotropik durumun yatay olarak kür edilen numunelerin hidratasyonu sırasında daneler arasında bir basınç iletişimi olması ve düşey yönde kür edilen numunelerde ise boşluklarda toplanan suyun daneler arasında bir basınç azalması oluşturmaktan kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Bu durum düşey olarak kür edilen numunelerin mukavemetin daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Aynı şekilde 2/1 ve 3/1 su/çimento oranlarında yatay olarak kür edilen numuneler, düşey olarak kür edilen numunelere göre daha yüksek çekme gerilmesi verdiği belirtilmiştir.



Şekil 3.7. Yatay Ve Düşey Kür Edilmiş Numunelerin Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi

• Akira Mori ve diğerkleri tarafından yapılan çalışma (1992)

Bu çalışmada iki ayrı laboratuvar enjeksiyon model deney düzeneği ve renkli karışımlar kullanılarak, deney düzeneklerinin enjeksiyonun sertleştikten sonraki geometrik şekli ve enjeksiyon edilebilirliğine etkisi incelenmiştir. Çalışmada enjeksiyon basıncı, enjeksiyon oranı, karışımın jelleşme süresi, çevre basıncı ve zemin geçirgenliğinin enjeksiyon şekli üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

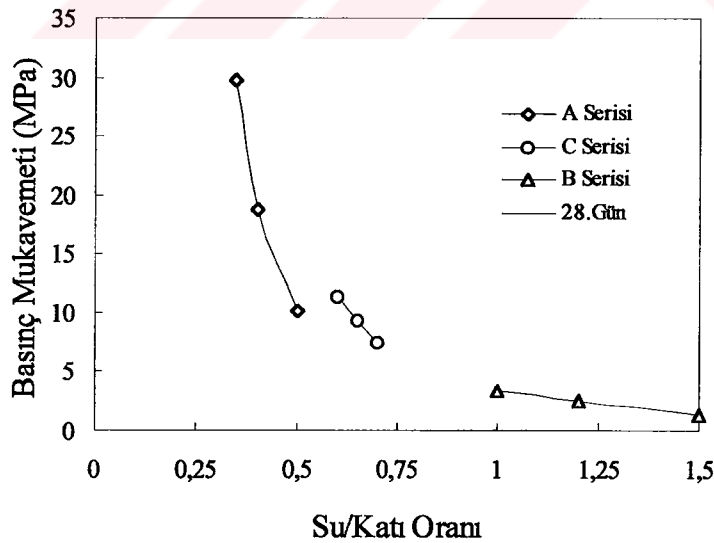
Önce üç eksenli basınç uygulanabilen çap ve yüksekliği 500 mm olan enjeksiyon deney düzeneği kullanılarak kuru birim ağırlığı $\gamma_k=1.52-1.45 \text{ gr/cm}^3$, kayma gerilmesi açısı $\phi_k=35-41^\circ$ ve geçirgenliği $k=2.7 \times 10^{-1} - 5.8 \times 10^{-4} \text{ cm/sn}$ arasında değişen kum numuneler hazırlanmış ve su ile doygun hale getirilen ortama çevre basıncı(σ_3) uygulanarak enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon sırasında numune içindeki boşluk suyu basıncı, enjeksiyon oranı ve enjeksiyon basıncı ölçülmüştür. Daha sonra aynı özellikteki numuneler, çapı ve yüksekliği 800 mm olan ve sadece düşey doğrultuda bir hava yastığı ile numuneye 100 kPa basınç uygulanabilen diğerk bir deney düzeneğine yerleştirilerek enjeksiyon uygulanmıştır. Her iki deney düzeneğinde de enjeksiyon çubuğu ile düzeneğin düşey kenarından numune ortasına enjeksiyon yapılmıştır.

Enjeksiyon zeminin mukavemetini artırmak ve geçirgenliğini düşürmek için kullanılan uygun bir yöntem olmasına rağmen laboratuvarda uygulanan model deney düzeneklerinin deney sonuçları üzerinde farklılıklar gösterdiği belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilebilirliğinin arttığı dolayısı ile geçirgenliğin azaldığı gözlenmiş ve çevre basıncının artması ile enjeksiyon edilebilirliğinin azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak enjeksiyon edilen numunenin şekli enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon oranı arasındaki ilişkiye bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Enjeksiyon basıncının ise zeminin geçirgenlik ve çevre basıncına bağlı olarak değiştii ileri sürülmüştür.

• İncecik ve Ceren tarafından yapılan çalışma (1995)

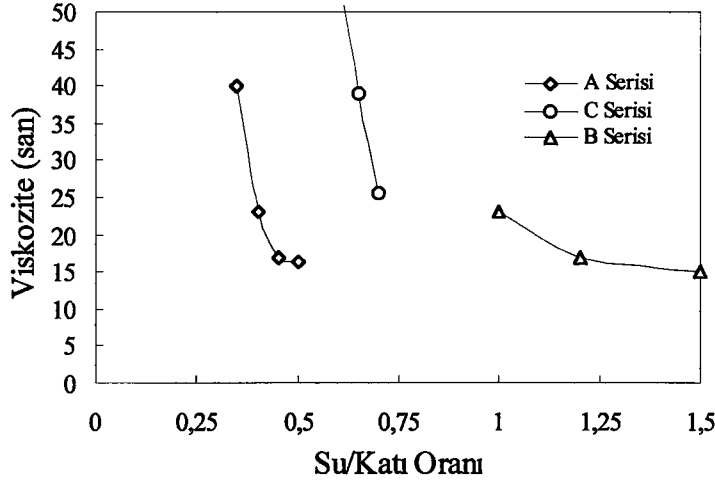
Yapılan bu çalışmada çimento, bentonit, akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları kullanılarak farklı su/çimento oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlarda çimento ağırlığının %4 oranında bentonit, %1 oranında akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları kullanılmıştır. $Dr=0.50$ relatif sıkılığında podima çakılı ($\gamma_{kmax}=1.80 \text{ gr/cm}^3$ ve $\gamma_{kmin}=1.73 \text{ gr/cm}^3$) ile doldurulan 15 cm çapında 30 cm uzunluğundaki silindir kalıplar daha sonra elde edilen karışımlarla 100 kPa basınç altında enjeksiyona tabi tutulmuştur.

Seri deneyler sonucunda, enjeksiyon yapılan numunelerin 7. ve 28. günlük basınç mukavemeti, gerilme-deformasyon ilişkisi, basınç mukavemeti ve viskozitenin su/çimento oranı ile değişimleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemeti su/çimento oranının artmasıyla azalırken (Şekil 3.8), zamanla artış göstermiştir. En büyük basınç mukavemeti değerlerini çimento-akışkanlaştırıcı karışımlarla enjeksiyon yapılan (A serisi) numuneler verirken en düşük mukavemeti %4 bentonit katkılı numunelerin (C ve B serisi) verdiği gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Çimento Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin Su/Katı Oranı İle Basınç Mukavemeti Değişimi

Ayrıca enjeksiyon deneylerinde kullanılan karışımların viskozite değerleri karışımın su/çimento oranı ile ters orantılı olarak düştüğü belirtilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Katkılı Karışımların Viskozite Değerinin Su/Katı Oranı İle Değişimi

• C. Vipulanandan ve diğerleri tarafından yapılan çalışma (1997)

Bu çalışmada petekli hafif karışımların davranışları araştırılarak karışımların sertleşme süresi, viskozite, pompalanabilirlik ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. Çalışmada petekli karışımlar için bir köpük katkı kullanılmıştır. Birim ağırlığı 6.4 kN/m^3 ve 8.8 kN/m^3 olan petekli karışımlar, düşük birim ağırlığı, kolay yerleşimi, iyi mekanik ve izolasyon özelliklerine sahiptirler. Petekli karışımlar çatı aralarında, döşeme ve duvar panellerinde, ısı ve ses yalıtımlarında, hava alanı çıkışlarında, otoyollarında enerji absorpsiyon bariyerlerinde, endüstriyel güvenlik duvarlarında, tünel ve boru hatlarında, yük dağıtım dolgularında ve geoteknik uygulamalarda dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Petekli karışımların enerji absorpsiyon özelliği, kontrol edilebilir çarpma mukavemeti ve geniş deformasyon kapasitesi gibi mükemmel özellikleri nedeniyle çok popüler olmaya başlamıştır.

Petekli karışımlar, yerleşim ve yerinde performans sağlamak için, kontrol edilebilir sertleşme zamanı, iyi akış özelliği, düşük çekme küçülmesi, bir birini tutma, yeterli basınç mukavemetine sahip olmalı ve aynı zamanda karışım hafif olmalıdır. Köpüklü karışımlar üretmek için bir kaç köpük maddesi mevcuttur.

Çimentolu köpüklerin üretimi için, sabunlaştırılmış ağaç reçinesi, alifatic aromatic sülfatların sodyum bileşimleri (sodyum lauryl, cetyl ve oetyl sülfatlar ve sodyum naftalin izopropil sülfat), petrol türevleri sülfatlar, kompleks organik bileşikler (keratin ve saponin), ve uygun köpük katkıları kullanılmaktadır. Bu çalışmada sodyum lauryl sülfat katkılı köpük kullanılmıştır.

Çalışmanın amacı birim ağırlığı 6.4 ve 8.8 kN/m³ olan petekli hafif karışımların çalışma özelliklerini tanımlamak ve petekli karışımların test metodları ile mekanik özelliklerine karar vermektir. Deneysel çalışmada farklı birim ağırlıklarda petekli hafif karışımlar hazırlamak için birim ağırlığı 3.7 kN/m³ olan, değişik oranlarda köpük çimento bulamacına eklenmiş ve laboratuarda çimento karıştırıcısı (450 rpm) ile en az 5 dakika karıştırılarak farklı ağırlıklarda değişen petekli karışımlar elde edilmiştir. Daha sonra karışımların (marsh hunisi ve brookfield) viskozite ve sertleşme sürelerine karar verilmiştir.

Deneysel sonuçlarda karışımın yoğunluğunun azalması ile beraber viskozite değerinin arttığı, yoğunluk azaldıkça priz süresinin azaldığı ve birim ağırlıkla doğru orantılı olarak basınç mukavemetinin arttığı ifade edilmiştir.

•Stephanie Perret ve diğerleri tarafından yapılan çalışma (1997)

Çalışmada normal portland çimentosu ve ince daneli çimentolardan farklı su/çimento oranlarında karışımlar hazırlanmış ve karışımlarda farklı yüzdelerde silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı, su tutucu katkıları kullanılmıştır. Karışımların reolojik özellikleri ve karışımın enjeksiyon edilebilirliği incelenmiştir.

Deneylerde, porozitesi $n=0.44$ olan kuvars kumu ile porozitesi $n=0.35$ olan Ottawa kumu kullanılmış ve kum daneleri arasındaki minimum boşluk çapı aşağıdaki bağıntı (Denklemler 3.1) ile belirlenmiştir.

$$d_{\min}=0.15 D \quad (3.1)$$

D, en küçük küresel kum danesinin çapı olup bu çalışmada $d_{\min}$ 'nin değeri kuvars kumu için 15 μm , Ottawa kumu için 45 μm olarak tahmin edilmiştir. Kullanılan

normal portland ve ince daneli çimentoların inceliği sırasıyla 3000, 4000 ve 12000 cm²/gr olarak verilmiştir. Tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılırken sadece iki karışımda su tutucu katkı kullanılmış ve su/çimento oranları 0.5, 0.6, 0.8, 1.2 ve 2 olan karışımlar hazırlanmıştır.

Ön araştırmalarda, su/çimento oranı 0.8 olan ince daneli çimento karışımının stabilitesine silis dumanının etkisi olmadığı görülmüştür. Karışımlar 2500 rpm dönme hızına sahip karıştırıcı ile 10 dakika karıştırılarak elde edilmiştir. Daha sonra 1200 ml karışım numunesi, 4.76 mm açıklığa sahip, mars hunisi içine dökülerek akış süresi ölçülmüştür. Bir litre suyun akış süresi 32±5 sn olarak verilmiştir. Çimento karışımının penetrasyonunu tayin etmek için standart kum kolon testi yapılmıştır. Bu testte, 22 mm iç çapında 370 mm uzunluğunda silindir bir kolon içerisindeki kumun 75 kPa sabit enjeksiyon basıncı altında, karışımın numuneye nüfus etme uzunluğu ile ölçülmüştür. Karışımın ulaştığı yükseklik, zamanın fonksiyonu olarak alınmıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Kum Kolonlarda Enjeksiyon Edilebilirlik Yükseklik Değişimleri

Karışım		Enjeksiyon Yüksekliği		Zaman (sn)
Çimento	Su/çimento	Yükseklik (cm)	Yükseklik (%)	
İnce Daneli	2.0	37	100	22
İnce Daneli	1.2	37	100	69
Normal	2.0	37	100	210
Normal	1.2	37	100	320
İnce Daneli	0.6	20	54	36
İnce Daneli	0.5	5	14	2
Normal	0.5	5	14	20

Daha stabil değere sahip ince daneli çimento karışımların akış özellikleri (marsh hunisi) değerleri, normal portland çimento karışımlardan daha yüksek çıkmıştır. İnce daneli çimento karışımlarının enjeksiyon edilebilirliği 1.2 ve 2 su/çimento oranlarında %100 olarak gerçekleşmiştir. Enjeksiyon edilebilirlik ince daneli çimento karışımlarda portland çimentosuna göre daha hızlı olmuş, karışımların su/çimento oranı azaldıkça enjeksiyon edilebilirliği de aynı oranda düşmüştür. Karışımlara

çimento ağırlığının %6 oranında katılan silis dumanı enjeksiyon edilebilirliği ve sulanmayı düşürürken viskoziteyi artırdığı ifade edilmiştir.

3.2. Kimyasal Karışımlarla İlgili Çalışmalar

• A.V. Shroff ve D.L. Shah tarafından yapılan çalışma (1992)

Bu çalışmada, polimer-çimento karışımlarının sulu ortamdaki etkileşimi, toprak ve kaya dolgu barajların temel iyileştirilmesinde kullanımı, karışımların viskozite ve mukavemetinin zamanla değişimi araştırılmış, sonuçta polimer esaslı çimento karışımlarının tabaka içerisindeki dağılımı ve su/çimento oranının optimizasyonu için gerekli oransal yaklaşımlar verilmiştir.

Çimenton karışımlarında sertleşmeyi sağlamak için kalsiyum klorit, sodyum silikat ve Metil metilakrilat hızlandırıcı, kalsiyum lignosülfanat su tutucu olarak kullanılmıştır. Deney karışımlarında inceliği 2800 cm²/gr, priz başlama ve bitiş süresi 45-90 dakika olan Hindistan portland çimentosu ve katkı olarak karışımların %90-95 oranında kimyasallar ve polimerler kullanılmıştır. Karışımlar değişik hızlara sahip uygun bir karıştırıcı ile homojen karışım elde etmek için karıştırılmış, daha sonra fiziksel ölçümler (spesifik ağırlık, pH, akışkanlık, jel süresi, sulanma, jel mukavemeti) yapılmıştır. Su/çimento oranları 0.6 ve 1 olarak seçilen karışımlarla yapılan deneylerde metil ve sodyum silikat sade çimentoya göre daha yüksek basınç mukavemeti verdiği ortaya konulmuştur.

• Hung-Jiun Liao ve diğerlerinin yaptığı çalışma (1992)

Bu çalışmada MC-500 ince daneli çimento ile farklı oranlarda sodyum silikat katkılarından oluşan karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Karışım oranlarının viskozite, jel süresi üzerindeki etkisi araştırılarak, bu oranların mukavemeti ne oranda değiştirdiği ortaya konulmuştur. Deneylerde, su/çimento 1/1 ile 1/5 oranlarında hazırlanan karışımlarda sodyum silikat karışım hacminin %10-80' i arasında değiştirilerek enjeksiyon karışımları elde edilmiştir. Hacimsel olarak %20 sodyum silikat miktarının sabit tutulduğu karışımlarda su/çimento oranı 2/1-5/1 arasında değiştirilerek bir seri deney yapılmıştır. İkinci

seride su/çimento oranı 2/1 de sabit tutularak, sodyum silikatın miktarı hacimsel olarak %10-60 oranında değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Deneylerde $D_{50}=3.5 \mu\text{m}$, inceliği=8800 cm^2/gr olan ince daneli çimento MC-500 ve yoğunluğu $1,38 \text{ gr}/\text{cm}^3$, viskozitesi 180 cp, PH=11.3, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=3.22$ olan sodyum silikat kullanılmıştır.

Yüksek hızlı mikser (10.000 rpm) kullanılarak elde edilen karışımlar alt tarafı kapalı 37.5 mm çapında 6.4 mm kalınlığında fleksi-glas kaplara dökülerek numuneler hazırlanmıştır. Kür esnasında numunelerin renk değişimi incelenerek katkılı karışımlar sade çimento karışımları ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında. Çalışmalarda kullanılan viskozite ve basınç mukavemeti değerleri orantılı değişim göstermiş, %20 sodyum silikat içeren numunelerde su/çimento oranının artması ile basınç mukavemeti azalmıştır ve sabit su/çimento oranında (2/1) sodyum silikat oranının (%10-60) artması ile 28. günde basınç mukavemeti %30 oranında artış göstermiştir. Karışım suyu oranı artışıyla numunelerin çekme mukavemeti %20-50 arasında azalmış ve çimento/sodyum silikat oranının artması ile artmıştır. Ayrıca deney sonuçlarında karışım numunelerinin koyu yeşil renge dönüşmesi mukavemetin artışının işareti olduğu ifade edilmiştir.

• Raymond J. Krizek ve diğerlerinin yaptığı çalışma (1992)

Bu çalışmada ince daneli çimento (MC-500) ve sodyum silikat karışımları kum zemine enjeksiyon yapılarak numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmalarda numuneler üzerinde serbest basınç, çekme, drenajlı ve drenajsız üç eksenli deneyler yapılmış ve gerilme-deformasyon davranışı incelenmiştir. Deney sonuçları sade çimento enjeksiyonu yapılan numunelerle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Deneysel çalışmanın amacı kumun yoğunluğu, kür süresi, enjeksiyon karışımları ve efektif çevre basıncının enjeksiyon uygulanmış numunelerin mukavemeti üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Çalışmada üç farklı boşluk oranında $e=0.70$, $e=0.59$, $e=0.45$ hazırlanan Ottawa 20-30 kumu kullanılmıştır. Kumun dane çapı 0.59-84 mm, $e_{\text{max}}=0.77$, $e_{\text{min}}=0.45$, üniform sayısı $C_u=1$ olarak verilmiştir. Su/çimento oranı 2/1 olan

karışımlarda %20 ve %40 oranında sodyum silikat, %20 silikat içeren karışımlarda su/çimento oranı 3/1, 4/1, 5/1 alınmıştır.

Enjeksiyon edilebilirlik (Denklem 2.4) D_{15}/D_{85} oranı 100 ve 75 olarak belirlenmiştir. Kalıplara dökülerek vibratör ile istenilen yoğunlukta sıkılaştırılan kum malzeme orta ve sıkı numuneler için 75 ± 5 ve 81 ± 10 gevşek numuneler için 21 ± 5 sıkılıkta hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan MC/SS karışımın jel süresi 1-5 dakika oranında değiştiği için enjeksiyon sırasında uygulama zorluğu yaşanmıştır. Bu nedenle jel süresini uzatmak için karışımın sıcaklığı 10°C dereceye düşürülmüştür. Deneylerde 15 kPa enjeksiyon basıncı kullanılarak enjeksiyon yapılan numuneler yeterli prizden sonra kalıptan alınmış daha sonra test gününe kadar su içinde kür edilmiştir.

Numunelerin tamamı gerilme-deformasyon grafiğinde kırılma noktasına kadar lineer bir ilişki göstermiştir. Numunelerin basınç mukavemeti, kür süresi ve başlangıçtaki yoğunlukları ile artış gösterdiği belirtilmiştir. Enjeksiyon uygulanmış numunelerde relatif sıkılık %21'den 81'e çıkarken serbest basınç mukavemeti 3,2 MPa dan 3,5 Mpa' a aynı zamanda çekme gerilmeleri de 0,35 MPa' dan 0,43 MPa' ya çıkmıştır. Deney sonuçlarından başlangıçtaki relatif sıkılığın mukavemete az bir etkisi olduğu gözlenmiş ve basınç mukavemeti değişiminin MC/SS oranlarından daha çok su/çimento oranına bağlı olduğu ifade edilmiştir.

• Raymond Krizek ve diğerleri tarafından yapılan çalışma (1992)

Bu çalışmada AC-400 akrilit polimer karışımı ve bu karışımla enjeksiyon yapılan kum numunelerin gerilme-deformasyon, sünme davranışı, su absorpsiyon özelliği ve şişme basıncı araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan AC-400 karışımının yoğunluğu 1.04 gr/cm^3 , pH=7.5-9.5 arasında değiştiği ve karışım içinde ağırlık olarak %40 akril amid ve %60 oranında su bulunduğu belirtilmiştir. Enjeksiyonda Ottawa 20-30 kumu 3.8 cm çapında silindir PVC kalıplar içine konularak serbest basınç, çekme ve sünme deneyleri için $D_r=0.90$ su absorpsiyonu ve şişme basıncı için $D_r=0.60+0.5$ olan numuneler hazırlanmış ve 30 kPa basınç altında alttan üste doğru 5 dakika enjeksiyon yapılmıştır.

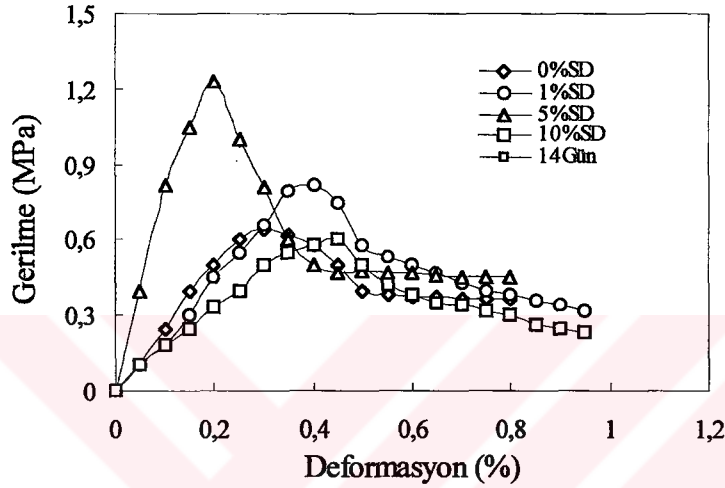
Nem ortamında kür edilen numuneler daha sonra basınç mukavemeti için kükürt ile keplenmiştir. Çalışmada farklı katalizörler kullanılarak akrilit karışımların jelleşme süreleri tespit edilmiş ve viskozite değerleri belirlenmiştir. %1-%4 oranında katalizör kullanılarak jelleşme süresi hızlandırılmış veya geciktirilmiştir. Ayrıca jel sürelerinin farklı sıcaklıklarda değişimi incelenmiş ve AC-400 karışımların jel sürelerinin sıcaklıkla hızlandığı ifade edilmiştir. Deney numuneleri prizini çok hızlı bir şekilde (birkaç saat) tamamlamış ve basınç mukavemetinin 28 gün boyunca değişmediği belirtilmiştir. Enjeksiyon uygulanan numunelerin serbest basınç mukavemeti 0.28 Mpa civarında gerçekleşirken enjeksiyon karışımlarından elde edilen numunelerin değeri 0.55 Mpa seviyesinde olduğu belirtilmiştir.

• **Alaa Ata ve C. Vipulanandan tarafından yapılan çalışma (1997)**

Deneysel çalışmada sodyum silikat, çimento, silis dumanı katkılı karışımların çalışabilirlik, sertleşme süresi, sulanma, viskozite, basınç, çekme mukavemeti ve enjeksiyon yapılan kumların davranışları araştırılmıştır. Deneylerde, dane çapı 0.1-0.15 µm mikron arasında değişen silis dumanı çimento ağırlığının %5-10-15 oranında çimento karışımlarına, ve sodyum silikatın %1,5-10 oranında ise silikat karışımlarına katılmıştır. Daha sonra enjeksiyon karışımlarının priz süreleri, sulanma oranları ve viskozite değerleri belirlenmiştir. Silis dumanı yüzdesi karışımların jelleşme sürelerini düşürmüş, aynı zamanda karışımların çökelme yüzdesini azaltmıştır. Ayrıca silis dumanı miktarı ile karışımların viskozite değerleri artmıştır. Elde edilen karışımlar 13.8 kPa basınç altında 38 mm çapında, 90 mm uzunluğunda kum numunelere enjeksiyon yapılmıştır ve elde edilen çimentolu numuneler su içinde silikatlı numuneler ise nemli plastik ortam içinde kür edilmiştir.

Normal portland çimentosu kullanılarak elde edilen ve su/katı oranı 1 olan karışımlar $D_{10}=1.65$ mm, $D_{60}=2.3$ mm ve $C_u=1.49$ olan kum ortama enjeksiyon yapılmıştır. Sulu sodyum silikat (%50) karışımları ise D_{10} ve D_{60} değerleri sırasıyla 0.65 ve 0.72mm, C_u , $C_c=1$ olan kum (Ottowa 20, 30) enjeksiyonunda kullanılmıştır.

Deney sonuçlarında %5 silis dumanı katkıli karışımın 28. günde çimento karışımına göre %30 daha yüksek çekme dayanımı vermiş ve silikat karışımlarda silis dumanı yüzdesi artışıyla orantılı olarak çekme mukavemetinin düştüğü ifade edilmiştir. Aynı şekilde silikat karışımlarda %5 silis dumanı en iyi sonucu vermiştir (Şekil 3.10). %1 ve %5 oranında silis dumanı katkıli silikat karışımlarla enjeksiyon uygulanan numunelerin basınç mukavemeti %50 ile %100 oranında artmış ve %10 oranda silis dumanı katkıli silikat karışımlar çimentoya yakın değerler verdiği gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Silis Dumanı Katkıli Silikat Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin Gerilme Deformasyon İlişkisi

• J. Lowther ve M.A. Gabr tarafından yapılan çalışma (1997)

Bu çalışmada ürethan enjeksiyonu yapılan kumun geçirgenlik ve mukavemet özellikleri ile ürethanın geçirimsizlik yapılarında kimyasal karışım olarak kullanımı araştırılmıştır. Karışımlar su, jel, jel süresi belirleyici ve jel sertleştirici katkılardan oluşmaktadır. Ürethan, su ile reaksiyon içeren hidrolik bir reçine olup serbest akan sıvılarda yarı-geçirimsiz katı hal oluşturabilir. Ürethan sıvı fazda 20-60 cp viskozite ve 6,8-7,5 pH değerine sahiptir ve sertleştiğinde 1,5-2 kPa çekme mukavemeti oluşturduğu belirtilmiştir. Karışımlarda kullanılan ürethanın zehirsiz (non-toxic) olduğu ifade edilmiştir.

Deneysel çalışmada karışımların viskozite, jelleşme süreleri ve enjeksiyon yapılan kum ortamın permeabilite değişimleri incelenmiştir. Mukavemet deneyleri için %50

jel süresi ayarlayıcısı, %45 su ve %5 jel sertleştiriciden oluşan karışımlar kullanılmıştır. Deneylerde su oranı %0.08, özgül yoğunluğu $\gamma_s=2.65 \text{ gr/cm}^3$, $\gamma_{\min}=1.49 \text{ gr/cm}^3$, $\gamma_{\max}=1.73 \text{ gr/cm}^3$ ve hidrolik iletkenlik $k_{\min}=2.10^{-2} \text{ mm/s}$, relatif sıkılık $D_r=\%50$ ve içsel sürtünme açısı $\phi=35^\circ$ olan havada kurutulmuş uniform kum kullanılmıştır.

Deneylerde istenilen özellikte kum 300 mm çapında 600 mm uzunluğunda akrilik kolon içerisine konulmuş ve daha sonra 2 litre/dakika hızda üretilen enjeksiyonu yapılmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıptan alınmış ve 70 mm çapında numuneler hazırlanmıştır.

Deneysel çalışma sonucunda üretilen karışımlarının viskozite değerleri 43-225 cp, jelleşme süreleri 15-21 dakika arasında değiştiği belirtilmiştir. Enjeksiyon yapılmış numunelerin hidrolik iletkenliği ise $k=4.6 \times 10^{-8} \text{ mm/sn}$ - $1.5 \times 10^{-8} \text{ mm/sn}$ arasında değiştiği ve kayma gerilmesinin 7. günde 12.4 kPa olduğu belirtilmiştir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tezle ilgili çalışmada ana amaç, silis dumanı, uçucu kül ve doğal kilin zemin enjeksiyonunda kullanılmasının araştırılmasıdır. Çalışmada ön deneylerin dışında beş seri deney yapılmıştır. Başlangıçta enjeksiyon deneylerinde kullanılacak zeminin granülometrisi ve enjeksiyon karışımlarının su/katı madde oranı ve enjeksiyon basıncı ön deneylerle tespit edilmiştir.

Deneylerde kullanılan karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve daha sonra daneli zeminlere enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon uygulanan numunelerin basınç mukavemeti ve geçirgenlik değişimleri araştırılmıştır. Basınç mukavemeti değişiminin araştırıldığı deneyler için numuneler iki ayrı sıklıkta, $D_r=0.30$ ve 0.80 , hazırlanmış ve deneyler yeterli sayıda tekrarlanmıştır. Geçirgenlik deneyleri için zemin numuneleri $D_r=0.50$ sıklıkta hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda altı yüz den fazla numune hazırlanmış ve karışımların katkı tipi, katkı yüzdesi, su/katı oranı, zemin granülometrisi, relatif sıklık ve zaman parametre olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri, deney düzeneği, deneylerin yapılışı açıklandıktan sonra deneylerden elde olunan sonuçlar irdelenip yorumlanmıştır.

4.1. Deneylerde Kullanılan Zemin ve Karışım Malzemelerinin Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan zemin ve karışımların özellikleri, geoteknik laboratuvarında yapılan bir seri deney sonucu belirlenmiştir. Laboratuvarında yapılamayan diğer bazı deneyler ise farklı kuruluşlara yaptırılmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan çimento, silis dumanı ve uçucu küle ait bazı bilgiler üretim birimlerinden alınmıştır.

4.1.1. Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

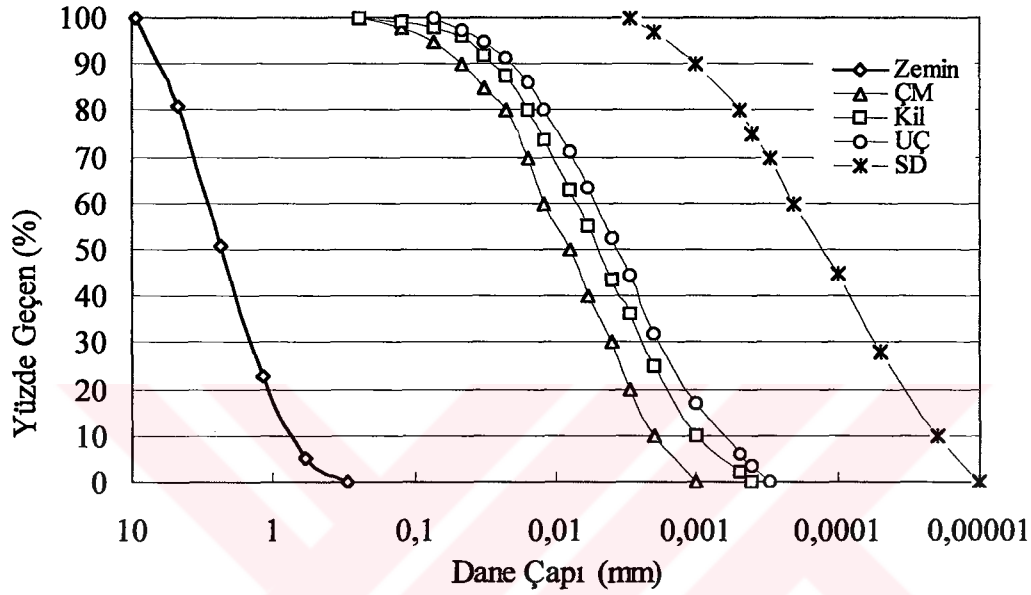
Enjeksiyon deneylerinde, Doğu Anadolu'nun genel yapısını oluşturan, yaşlı alüvyon zemin kullanılmış ve malzeme Doğu Anadolu deprem fay kuşağı üzerinde yer alan Erzurum-Palandöken çökellerinden temin edilmiştir (Şekil 4.1). Deney malzemesi, doğal yüzeyin yaklaşık 6-7 metre derinliğinden, açık malzeme ocağından alınmıştır. Malzeme doğal halde kil boyutundan kaba taş boyutu arasında değişen granülometri değerlerine sahiptir. Bu nedenle araziden getirilen malzeme, içerisindeki büyük taş parçalarından ayırmak için önce 20 mm çapında bir elekten elenmiştir. Bünyesinde %12 su bulunduran malzeme daha sonra 105 °C etüvde kurutularak ASTM 9.5, 4.75, 2.36, 1.18, 0.600 ve 0.300 mm eleklerden elenmiştir.



Şekil 4.1. Deneylerde Kullanılan Zeminin Alındığı Malzeme Ocağı

Eleme sonunda, 9.5 mm elek üstündeki ve daneli karışımların enjeksiyon edilebilir sınırı altında kaldığı için 0.300 mm altındaki malzeme atılmıştır (Kutzner, 1986). Diğer elekler arasında kalan farklı granülometrideki zeminler, ön deneylerde kullanılmış ve ön deneyler sonucunda enjeksiyon yapılacak granülometri elde edilmiştir (Şekil 4.3). Ön deneyler sonucu elde edilen granülometri kullanılarak $Dr=0.30$ ve $Dr=0.80$ sıklığındaki zemin numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler

üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılarak numunenin içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenmiştir. $D_r=0.50$ sıklığında hazırlanan numuneler ise geçirgenlik deneyine tabi tutulmuş ve permeabilite değeri $k=1.26$ cm/sn belirlenmiştir. Elde edilen zemin birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre kötü derecelenmiş kum (SP) sınıfına girmektedir ve indeks özellikleri Tablo 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan Zemin ve Karışım Malzemelerin Granülometrisi

Tablo 4.1. Deney Zemininin İndeks Özellikleri

γ_s gr/cm ³	γ_{kmak} gr/cm ³	γ_{kmin} gr/cm ³	e_{mak} %	e_{min} %	D_{10} mm	D_{15} mm	D_{30} mm	D_{60} mm	Cu	Cc	ϕ Dr=30	ϕ Dr=80	Zemin Türü
2.62	1.58	1.40	87	65	0.70	0.85	1.40	3.20	4.57	0.87	39	44	SP

4.1.2. Deneylerde Kullanılan Çimentonun Özellikleri

Deneylerde Nuh Çimento Fabrikasından (İzmit) temin edilen PÇ 42.5 katkısız portland çimentosu kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 3.13 gr/cm³, Özgül yüzeyi 3063 cm²/g, 28. günlük basınç dayanımı 590 kg/ cm² olan çimentonun dane çapı dağılımı Şekil 4.2’ de, kimyasal analiz sonucu Tablo 4.2’ de verilmiştir. Deneylerde çimento tek başına ve katkılarla beraber kullanılmıştır.

Tablo 4.2 Portland Çimentosunun Kimyasal Bileşenleri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Kireç	Serbest Kireç	Kızdırma Kaybı
%	20.63	4.00	4.10	65.38	1.21	2.09	0.76	0.76	1.19

4.1.3. Deneylerde Kullanılan Silis Dumanının Özellikleri

Etibank Antalya Elektrometalurji Sanayi A.Ş. Fabrikasından temin edilen silis dumanı, çimentoya farklı yüzdelerde katılarak elde edilen karışımlar enjeksiyon deneylerinde kullanılmıştır. Silis dumanına ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.3’ de, elek analizi sonuçları ise Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Malzemenin yoğunluğu 2-2,5 gr/cm³, görünür yoğunluğu 0.30-0.50 gr/cm³ arasında değişmektedir. Silis dumanı, uçucu kül ve kile oranla daha ince daneli yapıya sahiptir.

Tablo.4.3. Silis Dumanının Kimyasal Bileşenleri

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	C	K.K
%	85-95	0.5-1.0	1-3	0.8-1.2	1-2	0.5-0.3	0.5-1	0.5-1

4.1.4. Deneylerde Kullanılan Uçucu Külün Özellikleri

Termik santrallerin atık ürünü olan uçucu küller, diğer pek çok fabrika atığı gibi toz halinde yada su ile karıştırılarak depolanmaktadır. Uçucu küller genel olarak bünyelerinde bulundurdıkları kimyasal bileşenler nedeniyle F ve C tipi olarak adlandırılmaktadır. SiO₂+Al₂O₃+F₂O₃ oranı puzolanik aktivite olarak tanımlanmakta ve bu oran ASTM C 618’ de F tipi için %70’ den, C tipi için ise %50’ den büyük olmalıdır. TS 639’da ise puzolanik aktivite en az %70 olması gerektiği belirtilmektedir. Uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılan kömürün bileşimi, yanma ısısı ve kül tutma koşullarına bağlı olarak değişmektedir.

Enjeksiyon deneylerinde Afşin Elbistan Termik Santralinden toz olarak alınan uçucu kül kullanılmıştır. Alınan uçucu külün kimyasal bileşenleri Tablo 4.4.’de gösterilen

aralıklarda değişmektedir (Özbayoğlu, 1993). Ayrıca laboratuarda belirlenen uçucu küle ait granülometri eğrisi Şekil 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.4. Uçucu Külün Kimyasal Bileşenleri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Diğer	K.K
%	22.4-28.7	16.1-21.2	43.9-32.6	2.1-4.0	13.1-12.2	0.5-1	1.9-0.3

4.1.5. Deneylerde Kullanılan Kilin Özellikleri

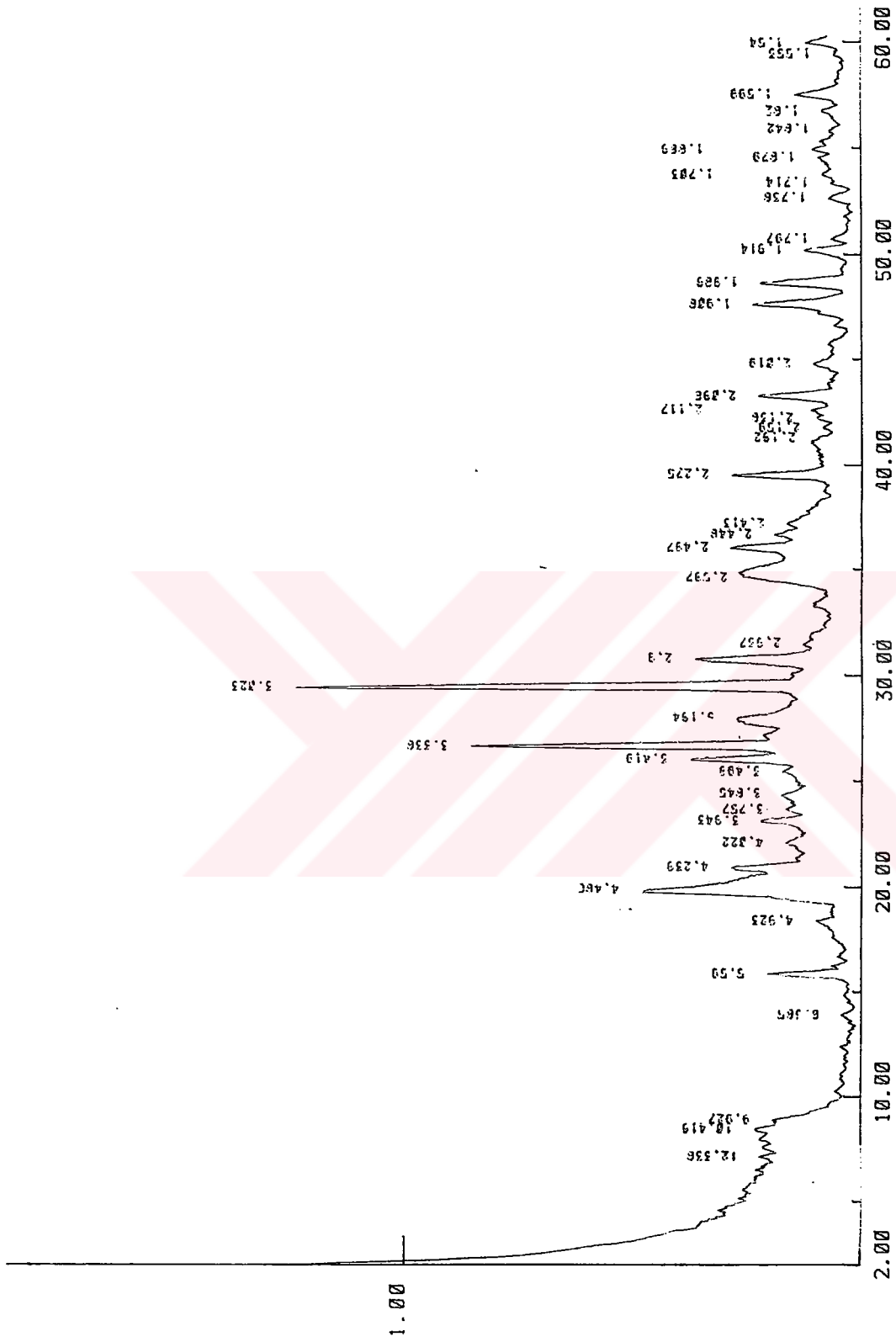
Deneylerde karışım olarak kullanılan kil, Erzurum-Oltu havzası içerisinde yer alan geniş kil formasyonundan alınmıştır. Araziden getirilen kil numuneleri üzerinde laboratuarda yapılan deneyler sonucunda kilin indeks özellikleri, geçirgenlik ve granülometrisi belirlenmiştir (Şekil 4.2). Geçirgenlik ve serbest basınç deneyleri için kilden örselenmemiş numuneler alınmıştır. Numuneye ait geoteknik parametreler Tablo 4.5’ de verilmiştir. Kilin doğal rengi yeşil olup kırmızı renkte diğer bir kil tabakası ile beraber bulunmaktadır. Laboratuarda kil üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri sonucu kilin şişme kapasitesinin %25’ den büyük olduğu tespit edilmiştir. Kil plastisite kartında yüksek plastisiteli kil grubuna girmektedir. Doğal halde bünyesinde %6 civarında su bulunduran kil sert kıvamdadır ve kiltası yapısı göstermektedir. Kilin Likit Limit (W_L) değeri %60 civarında olup zemin enjeksiyonunda kullanılabilir özellikler taşımaktadır (Bell, 1993).

Tablo 4.5. Kil Malzemesinin İndeks Özellikleri

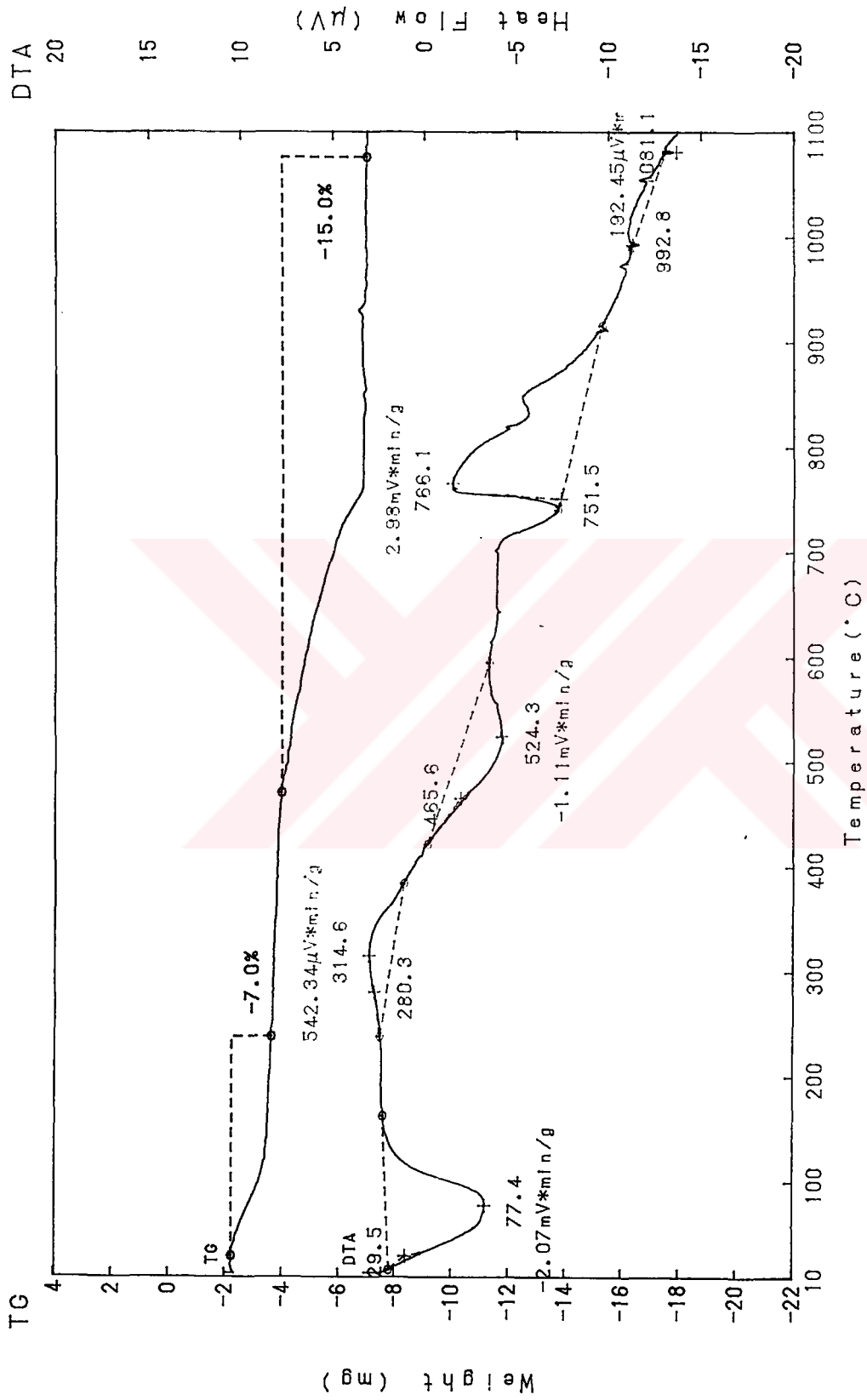
γ_s g/cm ³	ω_n %	W _L %	W _p %	I _p %	I _L %	I _c %	Kil %	A	q _u kg/cm ²	c _u kg/cm ²	Kıvam	k cm/sn
2.73	6.57	70	36	34	-0.86	1.86	25	1.36	>16	>8	Kiltası	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸

4.1.5.1. Kil Minerolojisinin Belirlenmesi

Kil minerolojisinin belirlenmesi için X-Ray ve DTA-TG analizleri Ankara MTA’ da (Şekil 4.3,4), kilin kimyasal analizi ise Toprak Holding AŞ. kimya laboratuvarında yaptırılmıştır (Tablo 4.6). Yapılan incelemeler sonucunda kil bünyesinde Semektit,



Şekil 4.3. Kil Malzemenin X-Ray Eğrileri



Şekil 4.4. Kıl Malzemenin DTA, TG Eğrileri

Montmorolit, İllit kil mineralleri ve Kalsit, Kuvars, Mika gibi kil olmayan mineralleri bulundurduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.6. Kil Malzemenin Kimyasal Bileşenleri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	KK
%	47.32	16.24	6.50	9.50	3.79	2.09	0.48	1.19	1.19

4.2. Deneylerde Kullanılan Aletler ve Deney Düzenegi

Laboratuarda yürütülen deneysel çalışmalar sırasıyla enjeksiyon karışımları ile enjeksiyon uygulanacak numunelerin hazırlanması, enjeksiyon deneylerinin yapılması, kür edilen numunelerin, serbest basınç ve permeabilite testlerinin yapılmasından oluşmaktadır. Farklı aşamalardan oluşan deneysel çalışmanın yürütülmesinde deney düzenegi başta olmak üzere değişik aletler kullanılmıştır.

Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında 1400 dev/dak gücünde ve 5 lt kapasiteli karıştırma kabı olan bir karıştırıcı kullanılmıştır. Karışımların akış hızı değerleri ağız çapı 5mm, üst çapı 152 mm, yüksekliği 355 mm ve 1.5 litre hacminde Marsh hunisi ile (Kutzner,1996), dinamik viskozite değerleri ise çalışma hızı 0.5-200 dev/dak arasında değişen ve 1.000.000 cp değeri okuma kapasiteli dijital ekranlı rotasyonel viskozimetre ile ölçülmüştür (Şekil 4.5). Okumalar kronometre vasıtası ile yapılmıştır. Karışımların çökme yüzdeleri 500 mm yüksekliğinde ve 1000 cc hacminde ölçekli cam mezürler kullanılarak belirlenmiştir.

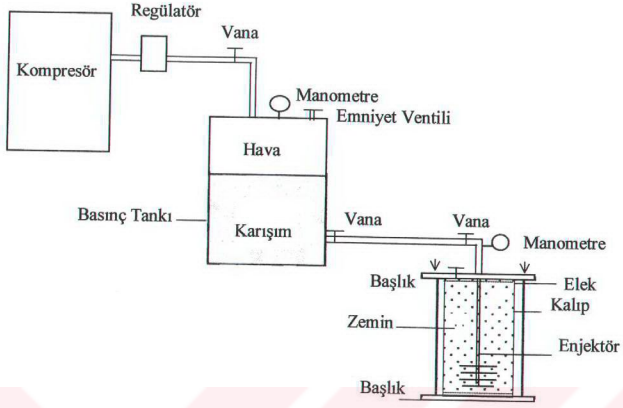
Karışım numunelerinin hazırlanmasında 38 mm çapında, 100-200 mm uzunluğunda, 2 mm kalınlığında plastik kalıplar, enjeksiyon uygulanacak zemin numunelerinin hazırlanmasında 100 mm çapında 200 mm uzunluğunda 3 mm kalınlığında flexiglastan yapılmış silindir kalıplar kullanılmıştır. Zemin kalıplara üniform şekilde ve istenilen sıklıkta yerleştirmek için alt ucu 20 mm, genişliği 80 mm, uzunluğu 300 mm olan plastik bir huni ve 5 mm çapında, 300 mm uzunluğunda metal bir çubuk kullanılmıştır. Huni vasıtası ile kalıplara dökülen zemin daha sonra metal çubuk kullanılarak istenilen oranda sıkıştırılmıştır.



Şekil 4.5. Deneylerde Kullanılan Rotasyonel Viskozimetre

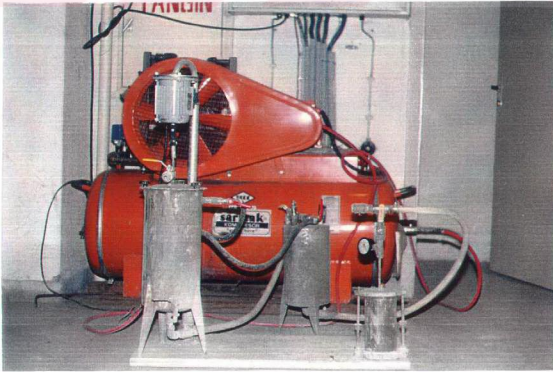
Enjeksiyon uygulanacak numuneler rijid hale getirilebilen metal başlıklı kalıplar içinde hazırlanmıştır. Metal üst başlığın üzerinde, enjeksiyon çubuğunun gireceği 8 mm çapında bir delik (merkezde) ve deney sırasında karışım akışını kontrol etmek için küresel bir vana bulunmaktadır. Enjeksiyon sırasında basınç altındaki zeminin deliklerden kaçışını önlemek ve karışımın akışını kolaylaştırmak için kalıbın alt ve üst başlarına elek (mesh) konulmuştur. Alt başlığa konulan elek numunenin metal kalıplara yapışmasını önlemiş kalıptan çıkışı sırasında kolaylık sağlamıştır. Yağlanmış kalıplardan enjeksiyon uygulanmış numunelerin çıkarılması için zemin laboratuvarında bulunan hidrolik numune çıkartıcı kullanılmıştır.

Şematik olarak Şekil 4.6' da gösterilen enjeksiyon deney düzeneği; (a) 5 mm iç çapı, 7 mm dış çapı, 300 mm uzunluğu olan ve uç kısmında 3-4 mm çapında 16 delik bulunan bir enjektör, (b) gereğinden fazla havanın tahliyesi için üzerinde bir emniyet ventili bulunan 10 litre kapasiteli bir basınç tankı, tank 3 mm kalınlığında metal paslanmaz çelikten yapılmış ve 1 MPa su basıncı altında test edilmiştir, (c) enjeksiyon deneylerinin yapılabilmesi için gerekli basınçlı havanın temin edildiği 3 MPa kapasiteye sahip bir kompresör, (d) numune kalıpları, (e) deneyler sırasında hava basıncını istenilen düzeyde ayarlamak için regülatör (f) enjeksiyon basıncını kontrol



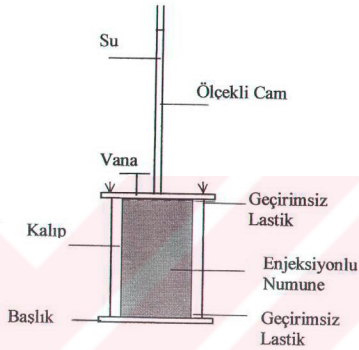
Şekil 4.6. Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Düzenek

etmek için manometreler, (g) deney düzeneğinde hava ve sıvı akışını kontrol etmek için 63.4 mm çapında elle kontrol edilebilen küresel vanalar ve düzeneğin bağlantılarını sağlamak için 600 kPa basınca dayanıklı şeffaf plastik hortumlardan oluşmaktadır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Enjeksiyon Uygulama Esnasında Bir Görünüş

Permeabilite deneylerinde kompaksiyon permeametreleri kullanılmıştır. Deney d zeneg , geçirimsiz başlıklardan oluşan kalıplar ve bu kalıplar üzerindeki ölçekli cam b retlerden oluşmaktadır. 1 cm çapında ve 500 mm y ksekliɡinde ölçekli cam büretler vasıtası ile deney numunesi içinden geçen akış miktarı tesbit edilmiştir. Düzenek şematik olarak aşağıda gösterilmiştir (şekil 4.8,9).



şekil 4.8. Permeabilite Deney D zeneg i



şekil 4.9. Permeabilite Deneyleri Esnasında Bir Görünüş

Ayrıca, karışım ve enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetini belirlemek için 50 kN kapasiteli ve değişik hızlarda çalışabilen serbest basınç test cihazı kullanılmıştır.

4.3. Deneylerin Yapılışı

Laboratuar deneyleri ön deneyler dışında enjeksiyon karışımları ve enjeksiyon uygulanmış numuneler üzerinde yapılmış beş seri (A, B, C, D, E) deneyden oluşmaktadır.

4.3.1. Ön Deneylerin Yapılması

Ön deneylerin yapılması sırasında zemin, daha önceden yağlanmış şeffaf kalıplar içerisine tartılarak konulmuştur. Deneylerde şeffaf kalıpların kullanılması zemin numunelerinin üniform yerleşmesi ve enjeksiyonun izlenmesinde kolaylık sağlamış böylece, yapılan işlemlerin güvenilirliğini ve deneylerin çalışma hızını olumlu etkilemiştir. Deneyler sırasında yetersiz enjeksiyon izlendiğinde enjeksiyon basıncı bir kademe artırılmıştır. Ön deneylerin yapılmasında basıncın artırılması ile başarılı yürütülemeyen enjeksiyon deneyleri iptal edilerek deneyler tekrarlanmıştır. Deneylerde kullanılan çimento karışımı mikserde 10 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır.

Araziden getirilen alüvyon zemin 9.5, 4.75, 2.36, 1.18, 0.600, 0.300 mm çaplarındaki eleklerden elenerek kum ve çakıl boyutunda farklı granülometride malzemeler elde edilmiştir. Enjeksiyon edilebilir bir zemin granülometrisi elde etmek için şu sıra takip edilmiştir. Başlangıçta 2.36-4.75 mm çapında elekler arasında kalan zeminden $D_r=0.80$ relatif sıklıkta numuneler hazırlanarak, bu numuneler 50 kPa enjeksiyon basıncı altında su/çimento oranı 1/1 olan çimento karışımı ile enjeksiyona tabi tutulmuş ve uygulama başarılı olmuştur. Daha sonra 2.36-1.18 ve 1.18-0.600 mm çapında elekler arasında kalan zemin numuneleri aynı şartlarda hazırlanmış ve 100 kPa basınç altında başarılı enjeksiyon uygulanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda göz önünde tutulmuş ve bu deneyler sonucunda 100 kPa basıncın laboratuar şartlarında enjeksiyon için uygun olduğuna karar verilmiştir.

Aynı şekilde 0.300-0.600 mm çapında elekler arasında kalan zeminden hazırlanan numunelere de 100 kPa basınç altında enjeksiyon yapılmış fakat başarılı olmamıştır. Enjeksiyon basıncı sırası ile 150- 250 kPa' a çıkarılarak deneyler tekrarlanmış, fakat enjeksiyon yapılamadığı gözlenmiştir.

Daha sonra 0.300-0.600 ve 0.600-1.18 çapında elekler arasında kalan zeminlerden %34, 66 oranlarında doğal yüzdelere uygun olarak $D_r=0.80$ relatif sıkılıkta numuneler hazırlanmış, 100 kPa basınç altında su/çimento 1/1 oranında enjeksiyona tabi tutulmuş ve zeminin enjeksiyon edilemediği gözlenmiştir. Deneylere enjeksiyon basıncı (150-200 kPa) artırılarak devam edilmiş buna rağmen yeterli enjeksiyonun olmadığı gözlenmiştir. Tekrar 0.600-1.18, 1.18-2.36, 2.36-4.75 mm çapında elekler arasında kalan zeminlerden %33, 33, 33 oranlarında numuneler hazırlanmış ve enjeksiyon yapılabilmiştir. Tekrar 0.300-0.600-1.18-2.36-4.75 mm çapında elekler arasında kalan zeminlerden %15, 28, 29, 27 oranlarında numuneler hazırlanmış ve 100 kPa basınç altında yeterli enjeksiyon yapılamamıştır, bunun üzerine enjeksiyon basıncı 200 kPa' a çıkarılmış, malzemeye kısmen enjeksiyon yapılabilmiş fakat yeterli başarı elde edilememiştir.

Deneylere devam edilmiş ve 0.300-0.600-1.18-2.36-4.75-9.5 mm çapında elekler arasında kalan zeminlerden %15, 21, 21, 22, 21 oranlarında numuneler hazırlanmış ve aynı şartlarda enjeksiyona tabi tutulmuştur. Bu durumda da zemin yeterli oranda enjeksiyon olmamıştır. Bunun üzerine numune içindeki 0.300-0.600 mm çapındaki zemin yüzdesi %10 oranına düşürülmüş fakat enjeksiyonda yine de tam bir başarı sağlanamamıştır. Tekrar numunedeki ince malzeme yüzdeleri azaltılarak 0.300-0.600-1.18-2.36-4.75-9.5 mm çapında elekler arasında kalan zeminlerden %5, 18, 28, 28, 21 oranlarında yeni numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin 100 kPa basınç altında üniform şekilde enjeksiyon yapıldığı görülmüştür. Ön deneylerden sonra elde edilen bu yüzdelere enjeksiyon uygulanacak zeminin granülometresi olarak kabul edilmiştir (Şekil 4.2). Deneylerde kullanılan zeminin çimento karışımları ile enjeksiyon edilebilirliği (N) Denklem 2.4 ve 2.5 için sırası ile 26 ve 10 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar zeminin enjeksiyon edilebilir olduğunu göstermektedir.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak karışımların su/katı oranı da yine bir seri deney sonucunda belirlenmiştir. Başlangıçta su/çimento oranı 0.8 olan karışım, belirlenen granülometri kullanılarak $Dr=0.80$ sıklığında hazırlanan zemine enjeksiyon yapılmış fakat yeterli enjeksiyon olmadığı gözlenmiştir. Bunun üzerine enjeksiyon basıncı 150-200 kPa' a çıkarılarak deneyler tekrarlanmış ve yine yeterli enjeksiyonun gerçekleşmediği görülmüştür. Aynı zeminden $Dr=0.30$ ve $Dr=0.80$ sıklığında hazırlanan numuneler su/katı (s/k) oranı 1/1 olan kil karışım ile 100 kPa basınçta enjeksiyon yapılmış ve başarılı olmuştur. Böylece su/katı oranı 1/1 den büyük oranlarında zeminin enjeksiyon edilebileceği görülmüştür. Bunun sonucunda karışımlarda kullanılacak su/katı oranının alt sınırı 1/1 kabul edilmiştir. Daha sonra relatif sıklığı $Dr=0.30$ olan zemin numunelerine su/çimento oranı 1.5/1, 2/1, 2.5/1, 3/1 olan karışımlarla enjeksiyon uygulanmış ve numuneler yeterince (2 gün) kurumaya bırakılmıştır. Kuruma sonucunda su/çimento (s/ç) oranı 2.5 ve 3/1 olan numunelerin kalıptan çıkarılamadığı görülmüştür. Bunun üzerine deneysel çalışmalarda su/çimento oranının üst sınırı 2 /1 olarak belirlenmiştir. Ön deneylerin yapılmasında yüz civarında numune dökülmüş ve pek çok numunede istenilen başarı sağlanamamıştır (Şekil 4.10).



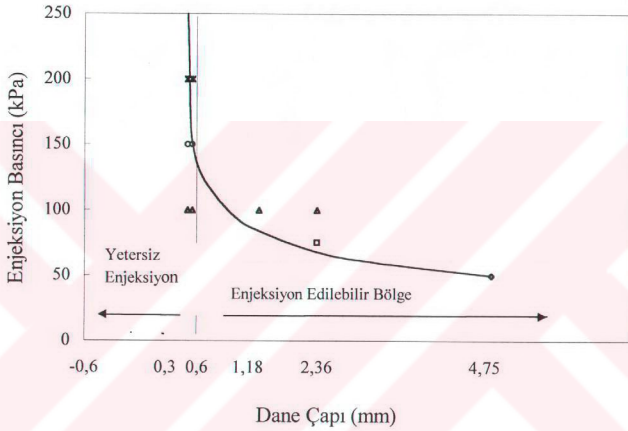
Sekil 4.10. Başarısız Enjeksiyon Uygulamaları

Bu deneylerden sonra $s/k=1/1$ oranlarında çimento, çimento-silis dumanı (%10) ve çimento-uçucu kül (%10) içeren karışımlar hazırlanarak enjeksiyon deneyleri yapılmış ve bu numunelerin 7. gündeki basınç mukavemetleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan malzemelerin yeterli basınç mukavemeti (0.5-2 MPa) verdiği gözlenmiş ve asıl deneylere geçilmiştir.

Tablo 4.7. Ön deneylerde Kullanılan Zemin Numunelerin Özelliği Ve Enjeksiyon Edilebilirliği

Deney No	S/k	Karışım	Dr (%)	Ep (kPa)	Elek Çapı (mm)	Zemin (%)	Enjeksiyon
1	1/1	çimento	80	50	2.36-4.75	100	Başarılı
2	1/1	çimento	80	100	1.18-2.36	100	Başarılı
3	1/1	çimento	80	100	0.60-1.18	100	Başarılı
4	1/1	çimento	80	100	0.30-0.60	100	Başarısız
5	1/1	çimento	80	150	0.30-0.60	100	Başarısız
6	1/1	çimento	80	250	0.30-0.60	100	Başarısız
7	1/1	çimento	80	100	0.30-0.60 0.60-1.18	34 66	Başarısız
8	1/1	çimento	80	150	„	34 66	Yetersiz
9	1/1	çimento	80	200	„	34 66	Yetersiz
10	1/1	çimento	80	100	0.60-1.18 1.18-2.36 2.36-4.75	33 33 34	Başarılı
11	1/1	çimento	80	100	0.30-0.60 0.60-1.18 1.18-2.36 2.36-4.75	15 28 29 27	Başarısız
12	1/1	çimento	80	150	„	15-28-29-27	Yetersiz
13	1/1	çimento	80	200	„	15-28-29-27	Tam başarılı değil
14	1/1	çimento	80	100	0.30-0.60 0.60-1.18 1.18-2.36 2.36-4.75 4.75-9.5	15 21 21 22 21	Yetersiz
15	1/1	çimento	80	100	„	10-22-24-22-22	Tam başarılı değil
16	1/1	çimento	80	100	„	5-18-28-28-21	Başarılı
17	0.8/1	çimento	80	100	„	5-18-28-28-21	Başarısız
18	0.8/1	çimento	80	150	„	5-18-28-28-21	Başarısız
19	0.8/1	çimento	80	200	„	5-18-28-28-21	Yetersiz
20	1/1	kil	80	100	„	5-18-28-28-21	Başarılı
21	1/1	kil	30	100	„	5-18-28-28-21	Başarılı
22	1.5/1	çimento	30	100	„	5-18-28-28-21	Başarılı
23	2/1	çimento	30	100	„	5-18-28-28-21	Başarılı
24	2.5/1	çimento	30	100	„	5-18-28-28-21	Başarılı, kalıptan Alınamadı
25	3/1	çimento	30	100	„	5-18-28-28-21	Başarılı, kalıptan Alınamadı

Ön deneylerde parametre olarak dane çapı, karışımın s/k oranı, enjeksiyon basıncı seçilmiştir. Sonuçta dane çapının küçülmesi enjeksiyon edilebilirliği düşürmüş hatta tamamen imkansız kılmıştır. Yapılan deneylerde 0.300-0.600 mm aralığındaki malzeme yüzdesinin enjeksiyon edilebilirlik üzerinde önemli bir rol oynadığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca karışımın s/k oranı, dane çapı kadar enjeksiyon edilebilirliği etkilemiştir. Enjeksiyon basıncının artırılması ince daneli ortamlarda başarılı enjeksiyon için yeterli olmamıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Enjeksiyon Basıncının Zemin Granülometrisi İle Değişimi

4.3.2. A serisi Deneyler

Karışım numunelerinin basınç dayanımını belirlemek için 1/1, 1.5/1, 2/1 su/katı oranlarında çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento-kil karışımları hazırlanmıştır. Beş litre hacimli karıştırıcı kabına önce içme suyu konulmuş, daha sonra ağırlıklarına göre tartılarak hazırlanmış katkılar (silis dumanı, uçucu kül, kil) azar azar ilave edilerek yeterli oranda karıştırılmış ve çimento katılarak karışımlar hazırlanmıştır (Tablo 4.8). Katkılar toplam katı ağırlığın %5, 10, 20 oranlarında karışımlara katılmış, 1400 dev/dak hıza sahip karıştırıcıda 10 dakika karıştırılmış, daha sonra, 38 mm çapında 100-200 mm uzunluğunda içi yağlanmış ve

bir ucu kapatılmış plastik kalıplara dökülmüştür. Numuneler döküldükten bir gün sonra kalıptan alınarak üst ve alt başlıkları bir kesici ile düzeltilmiş daha sonra su içerisinde kür edilmiştir (Şekil 4.12).

Tablo 4.8. A Serisi Karışım Numunelerinin Oranları

Deney No	Katkı Tipi	Katkı Oranı (%)	Su/katı (Ağırlık)
A101	ÇM	100	1/1
A102	ÇM	100	1.5/1
A103	ÇM	100	2/1
A201	SD/ÇM	5/95	1/1
A202	SD/ÇM	5/95	1.5/1
A203	SD/ÇM	5/95	2/1
A211	SD/ÇM	10/90	1/1
A212	SD/ÇM	10/90	1.5/1
A213	SD/ÇM	10/90	2/1
A221	SD/ÇM	20/80	1/1
A222	SD/ÇM	20/80	1.5/1
A223	SD/ÇM	20/80	2/1
A301	UK/ÇM	5/95	1/1
A302	UK/ÇM	5/95	1.5/1
A303	UK/ÇM	5/95	2/1
A311	UK/ÇM	10/90	1/1
A312	UK/ÇM	10/90	1.5/1
A313	UK/ÇM	10/90	2/1
A321	UK/ÇM	20/80	1/1
A322	UK/ÇM	20/80	1.5/1
A323	UK/ÇM	20/80	2/1
A401	K/ÇM	5/95	1/1
A402	K/ÇM	5/95	1.5/1
A403	K/ÇM	5/95	2/1
A411	K/ÇM	10/90	1/1
A412	K/ÇM	10/90	1.5/1
A413	K/ÇM	10/90	2/1
A421	K/ÇM	20/80	1/1
A422	K/ÇM	20/80	1.5/1
A423	K/ÇM	20/80	2/1

Numuneler test edilmeden bir kaç saat önce kürden alınarak kurumaya bırakılmış ve alt ve üst başlar kükürt ile başlıklanmıştır. Yeterli sertleşmeyen numunelere kükürt başlık uygulanamamıştır. Bu nedenle kükürt başlık yapılmayan karışım numuneler bir kesici ile düzeltilerek 7. ve 28. günde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.12. Karışım Numuneleri

4.3.3. B ve C Serisi Deneyler

B ve C serisi deneyler için, relatif sıklığı $D_r=0.30$ ve 0.80 olan zemin numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelere çimento ve toplam ağırlığın %5, 10, 20 oranlarında silis dumanı, %5, 10 oranlarında uçucu kül ve kil katkıları içeren karışımlar 100 kPa basınç altında enjeksiyon yapılmıştır. Karışımların su/katı oranları 1/1, 1.5/1 ve 2/1 olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan zemin ve karışımlara ait bilgiler Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da verilmiştir. B ve C seri deneylerin yapılması sırasında şeffaf kalıplar kullanılmış ve yetersiz enjeksiyon izlendiğinde enjeksiyon basıncı artırılmıştır. Kalıplar yağlandıktan sonra iki ayrı sıklıkta ($D_r=0.30$ ve $D_r=0.80$) zemin her seferinde tartılarak kalıplara yerleştirilmiş ve enjeksiyon için numuneler hazırlanmıştır. Zeminin kalıplara üniform yerleşmesini sağlamak için bir huni kullanılmış ve huni kalıbın alt tarafından üst tarafına doğru çekilerek zemin yerleştirilmiştir.

İstenilen sıklıkta zemin numuneleri hazırlandıktan sonra, kalıbın başlığı takılmış başlık vidaları sıkılarak rijit hale getirilmiştir. İçinde zemin bulunan kalıpların alt ve üst yüzeyi ince elek teli (mesh) ile kapatılmıştır. Elek zemin danelerinin basınç altında başlık üzerinde bulunan delikten dışarıya çıkması önlenmiştir. Rijit başlık üzerindeki enjeksiyon çubuğunun gireceği kadar bir delik ile enjeksiyon sırasında karışım akışının hareketlerini kolaylaştırmak ve kontrol etmek için bir vana

bulunmaktadır. Enjeksiyon işlemi sırasında istenilen enjeksiyon basıncına ulaşmak için vana kapatılmış ve bu şekilde her numune için istenilen enjeksiyon basıncı uygulanmıştır.

Tablo 4.9. B Serisi Karışım Ve Zemin Numunelerinin Özellikleri

Deney No	Katkı Tipi	Katkı Oranı(%)	Su/katı (Ağırlık)	Dr (%)	Ep (kPa)
B101	ÇM	100	1/1	30	100
B102	ÇM	100	1.5/1	30	100
B103	ÇM	100	2/1	30	100
B201	SD/ÇM	5/95	1/1	30	100
B202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	30	100
B203	SD/ÇM	5/95	2/1	30	100
B211	SD/ÇM	10/90	1/1	30	100
B212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	30	100
B213	SD/ÇM	10/90	2/1	30	100
B221	SD/ÇM	20/80	1/1	30	100
B222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	30	100
B223	SD/ÇM	20/80	2/1	30	100
B301	UK/ÇM	5/95	1/1	30	100
B302	UK/ÇM	5/95	1.5/1	30	100
B303	UK/ÇM	5/95	2/1	30	100
B311	UK/ÇM	10/90	1/1	30	100
B312	UK/ÇM	10/90	1.5/1	30	100
B313	UK/ÇM	10/90	2/1	30	100
B401	K/ÇM	5/95	1/1	30	100
B402	K/ÇM	5/95	1.5/1	30	100
B403	K/ÇM	5/95	2/1	30	100
B411	K/ÇM	10/90	1/1	30	100
B412	K/ÇM	10/90	1.5/1	30	100
B413	K/ÇM	10/90	2/1	30	100

Deneylerde kullanılan karışımlar, 1/1,1.5/1,2/1 su/katı oranlarında 1400 dev/dak hıza sahip bir mikser ile hazırlanmıştır. Her bir karışımın karışma süresi ortalama 10 dakika olarak tutulmuştur. Hazırlanan karışım basınç tankına aktarılarak enjeksiyon işlemine başlanmıştır. Enjeksiyon model deneylerinin yapıldığı düzenek Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Yeterli sıklıkta ve istenilen özelliklerde hazırlanan numuneler ($Dr=0.30$ ve 0.80) daha sonra enjektör ile kalıp içinde alttan üste doğru enjeksiyona tabi tutulmuştur. Enjeksiyon sırasında karışımın yanal yöndeki akışını kolaylaştırmak için enjektörün delik olan alt ucu kapatılmış böylece yanal deliklerin etkinliği artırılmıştır.

Enjeksiyon deneyleri sırasında basınç tankı bir hava kompresörü tarafından beslenmiş ve kontrolsüz basınçlar için tank üzerine bir emniyet ventili konulmuştur.

Tablo 4.10. C Serisi Karışım ve Zemin Numunelerinin Özellikleri

Deney No	Katkı Tipi	Katkı Oranı (%)	Su/katı (Ağırlık)	Dr (%)	Ep (kPa)
C101	ÇM	100	1/1	80	100
C102	ÇM	100	1.5/1	80	100
C103	ÇM	100	2/1	80	100
C201	SD/ÇM	5/95	1/1	80	100
C202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	80	100
C203	SD/ÇM	5/95	2/1	80	100
C211	SD/ÇM	10/90	1/1	80	100
C212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	80	100
C213	SD/ÇM	10/90	2/1	80	100
C221	SD/ÇM	20/80	1/1	80	200
C222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	80	100
C223	SD/ÇM	20/80	2/1	80	100
C301	UK/ÇM	5/95	1/1	80	100
C302	UK/ÇM	5/95	1.5/1	80	100
C303	UK/ÇM	5/95	2/1	80	100
C311	UK/ÇM	10/90	1/1	80	100
C312	UK/ÇM	10/90	1.5/1	80	100
C313	UK/ÇM	10/90	2/1	80	100
C401	K/ÇM	5/95	1/1	80	100
C402	K/ÇM	5/95	1.5/1	80	100
C403	K/ÇM	5/95	2/1	80	100
C411	K/ÇM	10/90	1/1	80	100
C412	K/ÇM	10/90	1.5/1	80	100
C413	K/ÇM	10/90	2/1	80	100

Deneyler sırasında basıncı kontrol etmek için tank ve enjeksiyon çubuğu üzerine iki adet manometre yerleştirilerek enjeksiyon basıncı her iki manometreden kontrol edilmiştir. Karışım basınç tankına aktarıldıktan sonra, tank yeterli hava basıncıyla beslenerek enjeksiyona başlanmıştır. Enjeksiyon çubuğu üzerindeki diğer vana ile kontrollü enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon çubuğu üzerindeki vananın açılması ile zemin numunesi enjeksiyon olmaya başlamış, istenilen basınca ulaşıncaya enjeksiyona son verilmiştir.

Enjeksiyon uygulanan numuneler priz yapması için 24 saat kalıpta bırakılmış, daha sonra prizini alan numuneler bir hidrolik numune çıkartıcı ile kalıplardan çıkarılmıştır (Şekil 4.13). Yeterli derecede priz yapmamış numuneler 2-3 gün sonra kalıplardan alınmıştır. Çıkarılan numuneler 7. ve 28. gündeki basınç testleri için tamamen su içinde kür edilmiştir. Kür havuzu içerisine biyolojik bozulma ve sülfata karşı önlem alma açısından yeterli oranda kireç atılmıştır.



Şekil 4.13. Yeterli Enjeksiyon Uygulanmış Numuneler

Numuneler basınç testinden bir gün önce sudan çıkarılarak kurutulmuş ve daha sonra 0.5 mm/dak yükleme hızında serbest basınç uygulanarak kırılmıştır. 7 Ve 28 günlük basınç dayanımları için her bir numuneden üç adet olmak üzere toplam 12 numune kırılmış olup, $Dr=0.30$ ve $Dr=0.80$ sıklığında hazırlanarak enjeksiyon uygulanmış numunelerin sonuçları paralellik göstermiştir.

4.3.4. D- Serisi Deneyler

Bu seri deneylerde enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayıları belirlenmiştir. $Dr=0.50$ Sıklıkta hazırlanan zemin numunelerine çimento, çimento-silis dumanı (%5, 10, 20), çimento-uçucu kül (%5, 10) ve çimento-kil (%5, 10, 20, 50, 80, 100) karışımları 1/1, 1.5/1, 2/1 su/katı oranında enjeksiyon yapılmıştır. D serisi karışım ve zemin numunelerine ait bilgiler Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

Geçirgenlik deneyleri için plastik kalıplar yağlanmadan zemin numuneleri hazırlanarak enjeksiyon yapılmıştır. Priz tamamlandıktan sonra numuneler kalıptan çıkarılamamış 28 gün boyunca tamamen su içinde kür edilmiştir. Numuneler su içinde kür edildiği için suya doymun kabul edilmiştir. Numunelerin 7. ve 28. günde sudan çıkarılarak, kalıp ile beraber, permeabilite deney düzeneğine konulmuştur. Numunelerin alt ve üst başlarında sızıntıyı önlemek için plastik halkalar kullanılmış ve deneye başlamadan önce numunelerin havası alınmıştır.

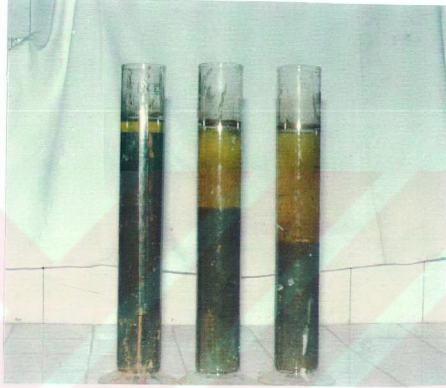
Tablo 4.11. D Serisi Karışım Ve Zemin Numunelerinin Özellikleri

Deney No	Katkı Tipi	Katkı Oranı (%)	Su/katı (Ağırlık)	Dr (%)	Ep (kPa)
D101	ÇM	100	1/1	50	100
D102	ÇM	100	1.5/1	50	100
D103	ÇM	100	2/1	50	100
D201	SD/ÇM	5/95	1/1	50	100
D202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	50	100
D203	SD/ÇM	5/95	2/1	50	100
D211	SD/ÇM	10/90	1/1	50	100
D212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	50	100
D213	SD/ÇM	10/90	2/1	50	100
D221	SD/ÇM	20/80	1/1	50	100
D222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	50	100
D223	SD/ÇM	20/80	2/1	50	100
D301	UÇ/ÇM	5/95	1/1	50	100
D302	UÇ/ÇM	5/95	1.5/1	50	100
D303	UÇ/ÇM	5/95	2/1	50	100
D311	UÇ/ÇM	10/90	1/1	50	100
D312	UÇ/ÇM	10/90	1.5/1	50	100
D313	UÇ/ÇM	10/90	2/1	50	100
D401	K/ÇM	5/95	1/1	50	100
D402	K/ÇM	5/95	1.5/1	50	100
D403	K/ÇM	5/95	2/1	50	100
D411	K/ÇM	10/90	1/1	50	100
D412	K/ÇM	10/90	1.5/1	50	100
D413	K/ÇM	10/90	2/1	50	100
D421	K/ÇM	20/80	1/1	50	100
D422	K/ÇM	20/80	1.5/1	50	100
D423	K/ÇM	20/80	2/1	50	100
D431	K/ÇM	50/50	1/1	50	100
D432	K/ÇM	50/50	1.5/1	50	100
D433	K/ÇM	50/50	2/1	50	100
D441	K/ÇM	80/20	1/1	50	100
D442	K/ÇM	80/20	1.5/1	50	100
D443	K/ÇM	80/20	2/1	50	100
D451	KİL	100	1/1	50	100
D452	KİL	100	1.5/1	50	100
D453	KİL	100	2/1	50	100

Daha sonra numune üzerindeki akış kararlı hale geldikten sonra geçirgenlik deneyine başlanmıştır. Numuneler 100 cm su sütunu basıncı altında düşen seviyeli deneye tabi tutulmuştur. Deney süresi numunelerin geçirgenliğine bağlı olarak 1-2 saatten, 2-3 güne kadar devam etmiş ve okumalar alınmıştır. Numune ve kalıp arasından su sızıntısını önlemek için kalıplar alt ve üst başlarından bir parafin ile kaplanarak deneyler yapılmış fakat bunun sonuca fazla bir etkisi olmadığı gözlenmiş daha sonra parafin uygulamasından vazgeçilmiştir.

4.3.5. E Serisi Deneyler

Bu seride enjeksiyon deneylerinde kullanılan karışımların fiziksel ve akış (reolojik) özellikleri belirlenmiştir. Karışım numuneleri 10 dakika mikserde karıştırıldıktan sonra 1000 cm^3 hacmin de ölçekli cam kaba boşaltılarak çökmeye bırakılmış ve 4 saat boyunca çökme (sedimentasyon) yüzdeleri okunmuştur (Şekil 4.14) .



Şekil 4.14. Çökme (Sedimentasyon) Deneyi

Karışımlar hazırlandıktan sonra, 1 litre karışım marsh hunisine konularak akış değeri (sn) elde edilmiştir. Marsh hunisi değerleri bir kronometre ile okunmuştur. Marsh hunisinin boru çapı, uzunluğu ve okuma süresinin tam olarak belirlenmesi deney sonuçlarını değiştirmektedir (Kutzner, 1996). Deney şartlarında 1000 cm^3 suyun viskozitesi 31.5-32 sn okunmuştur.

Enjeksiyon yapılmış karışımların dinamik viskozite değerleri rotasyonel viskozimetre ile belirlenmiştir. Deneylerde viskozimetre 200 dev/dak dönme hızında en uygun sonuçları vermiştir. Viskozite okumaları, deney başlangıcından 1 dakika sonraki okumalardır. Deneyler sırasında viskozimetre hızının düşürülmesi viskozite değerinin düşmesine neden olmuştur.

4.4. Deney Sonuçları Ve Yorumu

Karışım ve enjeksiyon uygulanmış numuneler üzerinde laboratuarda yapılan deney sonuçları ve yorumları sırası ile aşağıda verilmiştir.

4.4.1. A Serisi Deney Sonuçları

A serisi deney çalışmalarında çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül, çimento-kil karışım numunelerinin basınç mukavemeti değişimleri araştırılmış ve sonuçlar Tablo 4.12' de özetlenmiştir. Karışım numunelerinin 7. ve 28. gündeki gerilme-birim deformasyon (Şekil 4.15-18, Şekil A.1-6), basınç mukavemeti-su/katı oranı (Şekil 4.19-21), basınç mukavemeti-zaman (Şekil 4.22-23, Şekil A.7-14) ve basınç mukavemeti-katkı yüzdesi (Şekil 4.24-26) değişim grafikleri çizilmiştir. Deneyisel çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

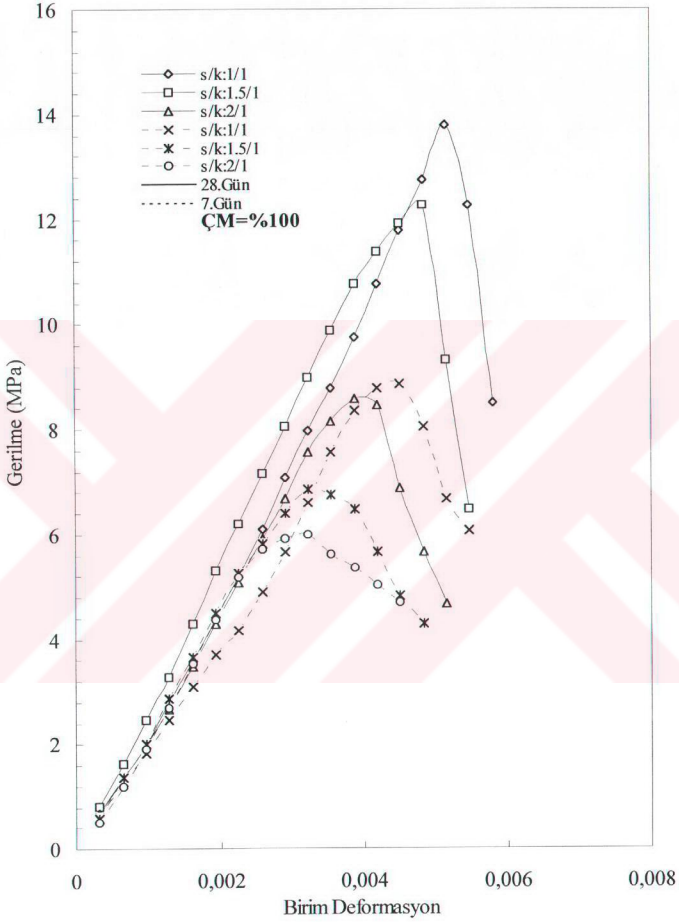
- 7. Ve 28. günde maksimum basınç mukavemeti çimentonun kullanıldığı karışım numunelerinde elde edilmiştir. Silis dumanı, uçucu kül ve kilin katkı olarak kullanıldığı numuneler basınç mukavemetini çimentoya göre düşürmüştür. En az düşüş %10 silis dumanı, en fazla düşüş ise %20 kilin kullanıldığı numunelerde meydana gelmiştir.
- Karışım numunelerinin basınç mukavemeti karışımın su/katı oranının artması ile ters orantılı olarak düşüş göstermiştir. Basınç mukavemetinin düşmesinde veya artmasında su oranı önemli bir parametredir. En büyük basınç mukavemeti su/katı oranı 1/1 ve en düşük basınç mukavemeti su/katı oranı 2/1 olan numunelerde elde edilmiştir (Şekil 4.19,21).
- Karışım numunelerinin basınç mukavemeti zamanla artış göstermiştir (Şekil 4.22,23). En fazla artış s/k oranı 1/1 olan numunelerde meydana gelmiştir. 28. Gündeki basınç mukavemeti ortalama 7. güne göre %20-50 oranında artış göstermiştir.
- Silis dumanı katkılı numuneler basınç mukavemetini çimentoya göre %30-50 oranında düşürmüştür (Şekil 4.24). 7. Günde %5, 10 ve 20 oranında silis dumanı katkılı numunelerin basınç mukavemeti aynı seviyede çıkmıştır. 28. Günde,

%10 oranında silis dumanı kullanılan numuneler tüm su/katı oranlarında basınç mukavemetini diğer yüzdelerden daha yüksek vermiştir.

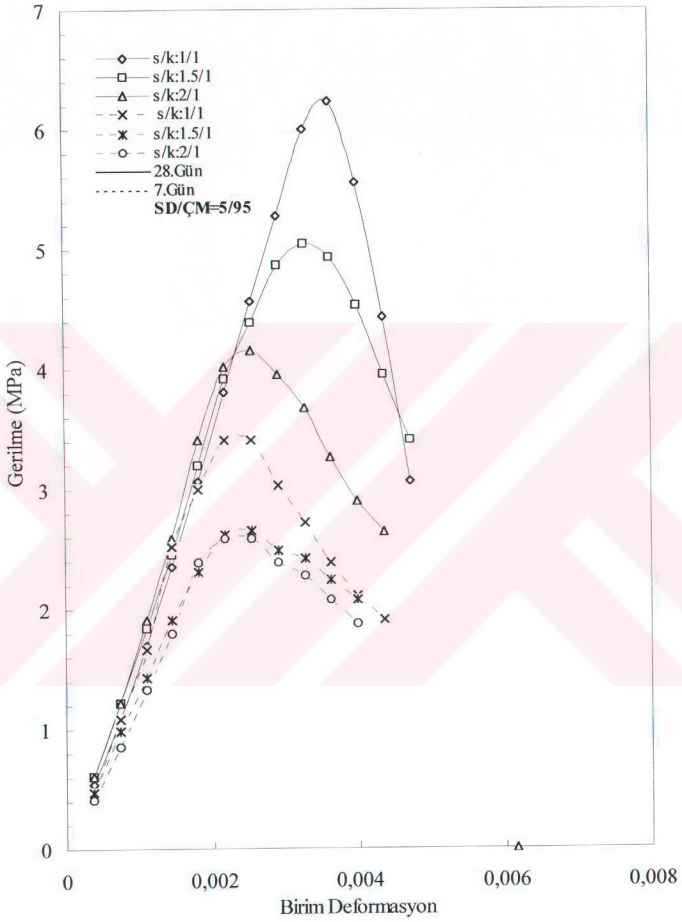
Tablo 4.12. A-Serisi Karışım Numunelerinin 7. Ve 28. Gündeki Basınç Mukavemeti

Deney No	Katkı Tipi	Katkı Oranı (%)	Su/katı (Ağırlık)	Basınç Muk. 7.Gün MPa	Basınç Muk. 28.Gün MPa
A101	ÇM	100	1/1	8.855	13.794
A102	ÇM	100	1.5/1	6.846	12.261
A103	ÇM	100	2/1	5.994	8.583
A201	SD/ÇM	5/95	1/1	3.406	6.233
A202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	2.656	5.040
A203	SD/ÇM	5/95	2/1	2.588	4.155
A211	SD/ÇM	10/90	1/1	3.676	8.378
A212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	2.929	7.152
A213	SD/ÇM	10/90	2/1	2.605	5.449
A221	SD/ÇM	20/80	1/1	3.610	6.641
A222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	1.771	4.972
A223	SD/ÇM	20/80	2/1	1.416	3.746
A301	UK/ÇM	5/95	1/1	2.179	4.666
A302	UK/ÇM	5/95	1.5/1	1.481	4.121
A303	UK/ÇM	5/95	2/1	1.348	3.165
A311	UK/ÇM	10/90	1/1	1.771	3.065
A312	UK/ÇM	10/90	1.5/1	1.260	2.554
A313	UK/ÇM	10/90	2/1	1.124	2.418
A321	UK/ÇM	20/80	1/1	1.410	5.313
A322	UK/ÇM	20/80	1.5/1	0.970	3.474
A323	UK/ÇM	20/80	2/1	0.592	1.839
A401	K/ÇM	5/95	1/1	3.951	7.050
A402	K/ÇM	5/95	1.5/1	3.031	5.006
A403	K/ÇM	5/95	2/1	2.656	4.155
A411	K/ÇM	10/90	1/1	3.133	5.551
A412	K/ÇM	10/90	1.5/1	2.622	4.904
A413	K/ÇM	10/90	2/1	2.227	4.291
A421	K/ÇM	20/80	1/1	2.520	4.359
A422	K/ÇM	20/80	1.5/1	1.055	1.481
A423	K/ÇM	20/80	2/1	0.558	0.613

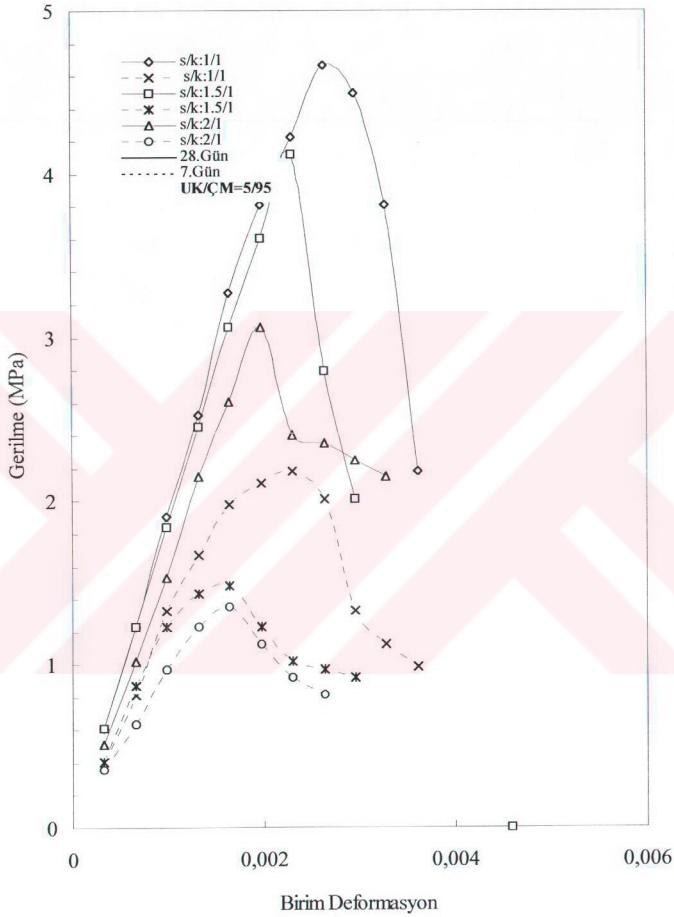
- Uçucu kül katkılı karışım numunelerinin basınç mukavemeti, çimento numunelerine göre daha düşük çıkmıştır (Şekil 4.25). 7. Günde, basınç mukavemeti artan uçucu kül yüzdeleri ile genel olarak düşmüş ve en düşük değeri %20 uçucu kül kullanılan numuneler vermiştir. 28. Günde basınç mukavemeti çimento numunelerine göre %50 - 70 oranlarında düşmüş ve en düşük basınç mukavemetini %10 uçucu kül kullanılan karışım numuneleri vermiştir.



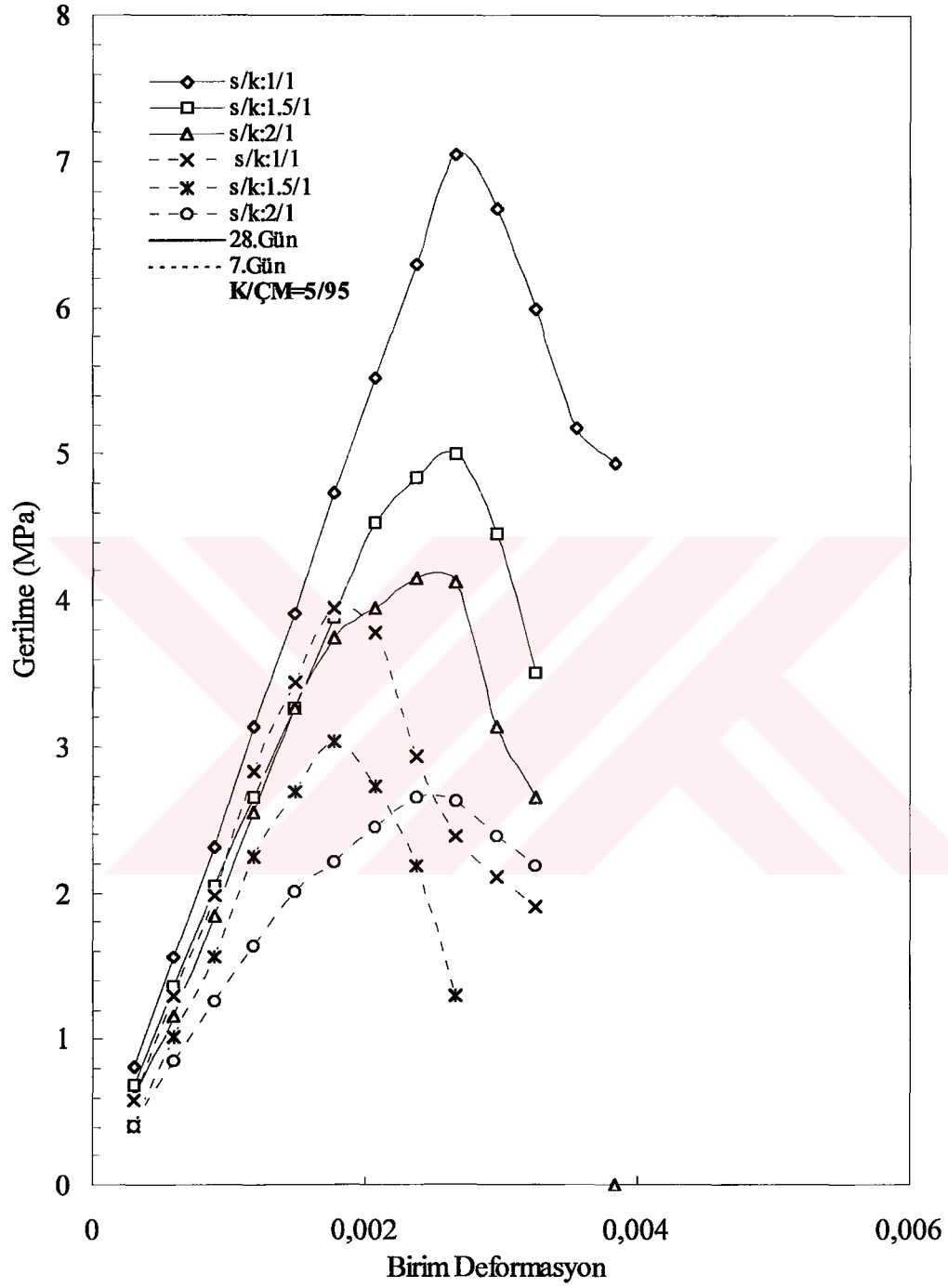
Şekil 4.15. Çimento Karışımlarının Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (%100 Çimento)



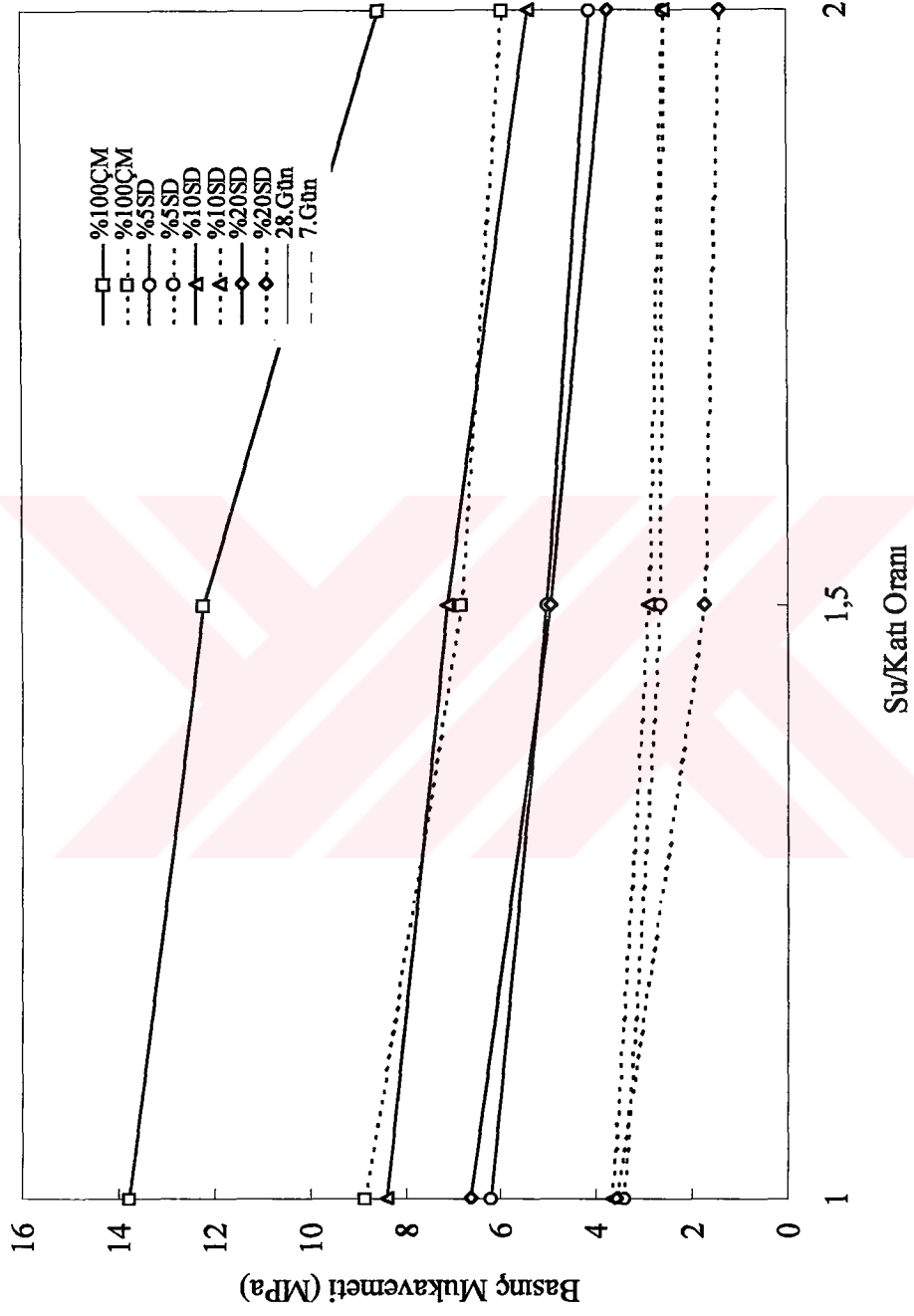
Şekil 4.16. Silis Dumanı Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (SD/ÇM=5/95)



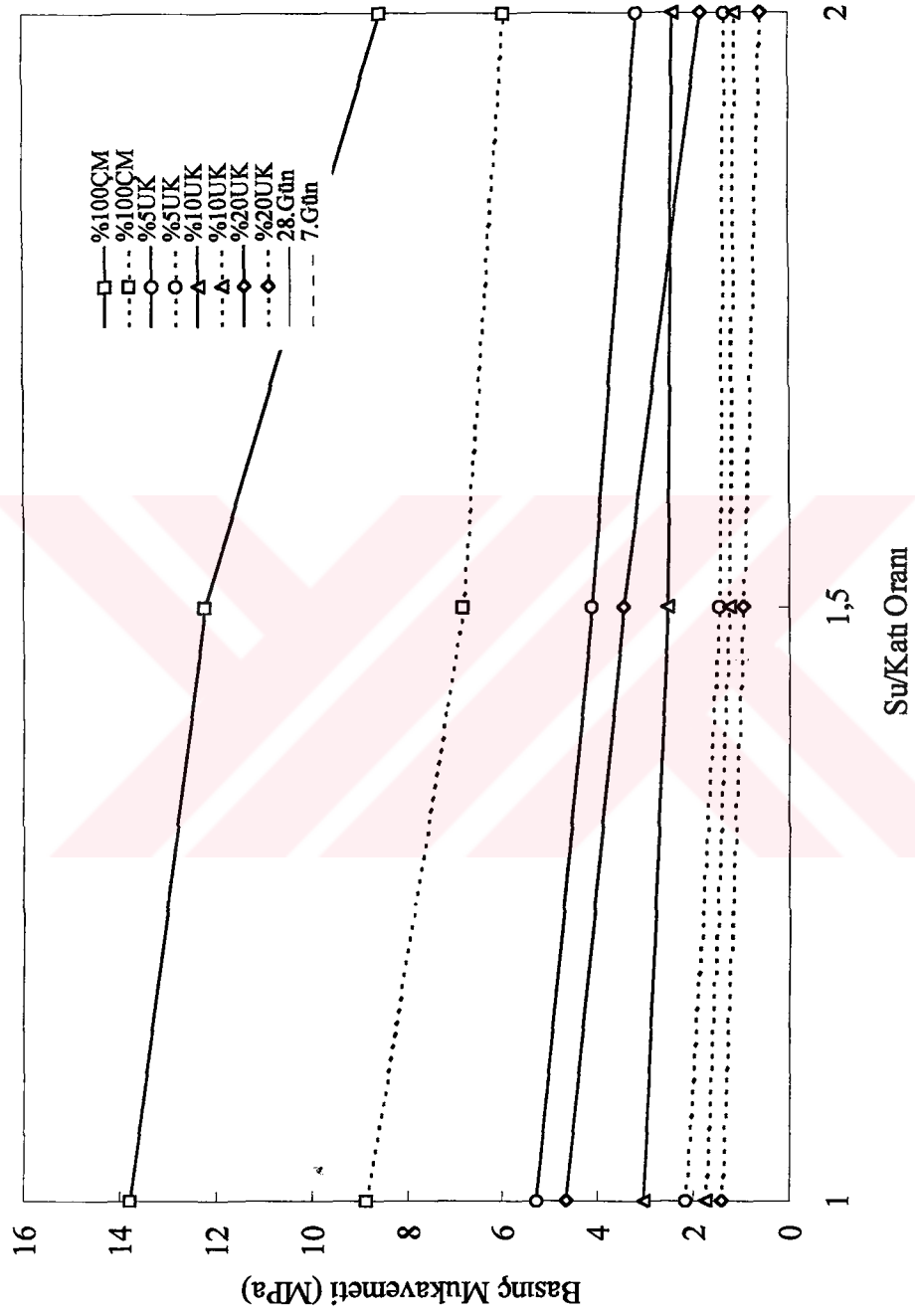
Şekil 4.17. Uçucu Kül Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (UK/ÇM=5/95)



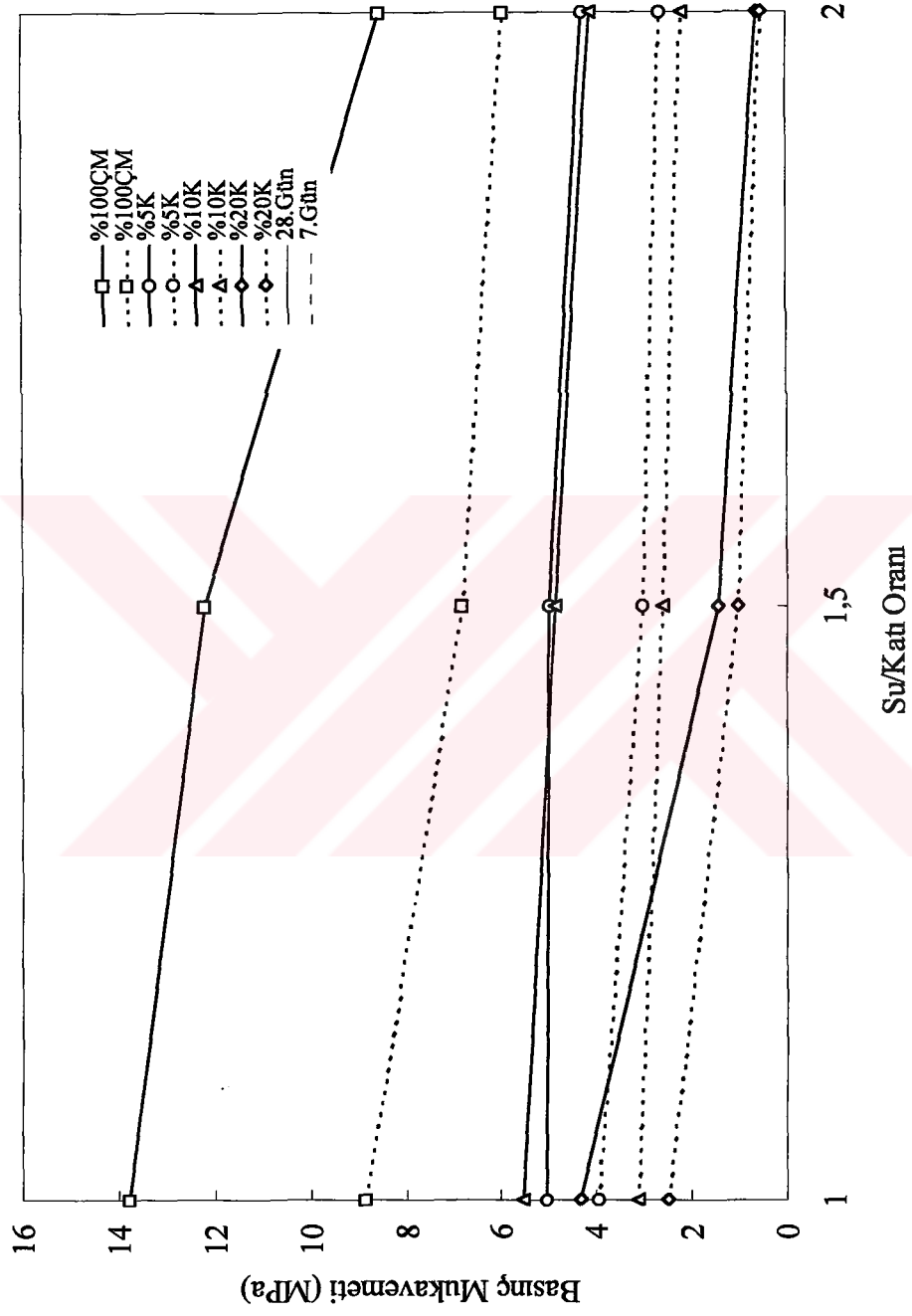
Şekil 4.18.Kil Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (Kil/ÇM=5/95)



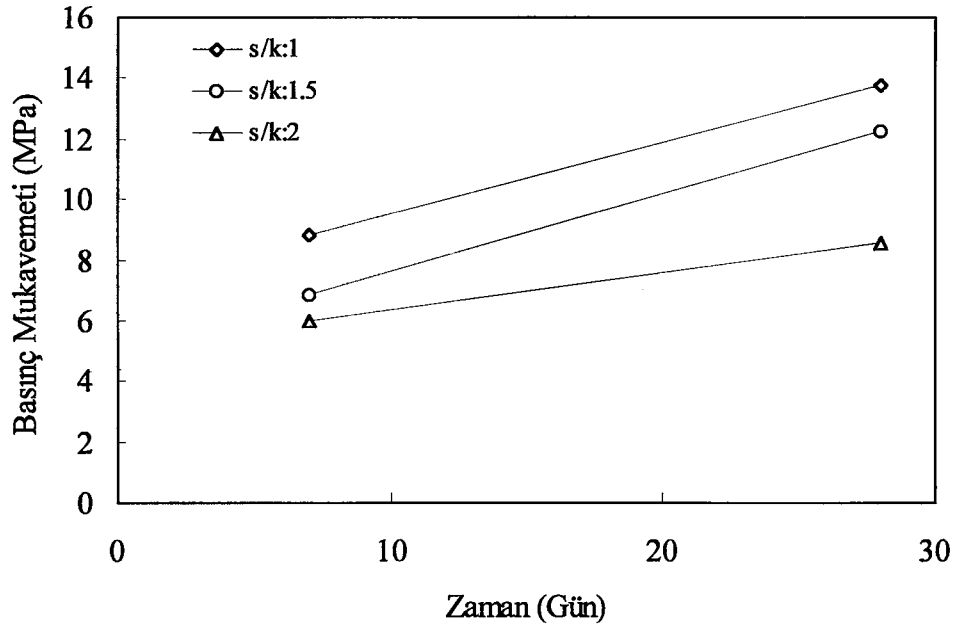
Şekil 4.19. Çimento Ve Silis Dumamı Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi



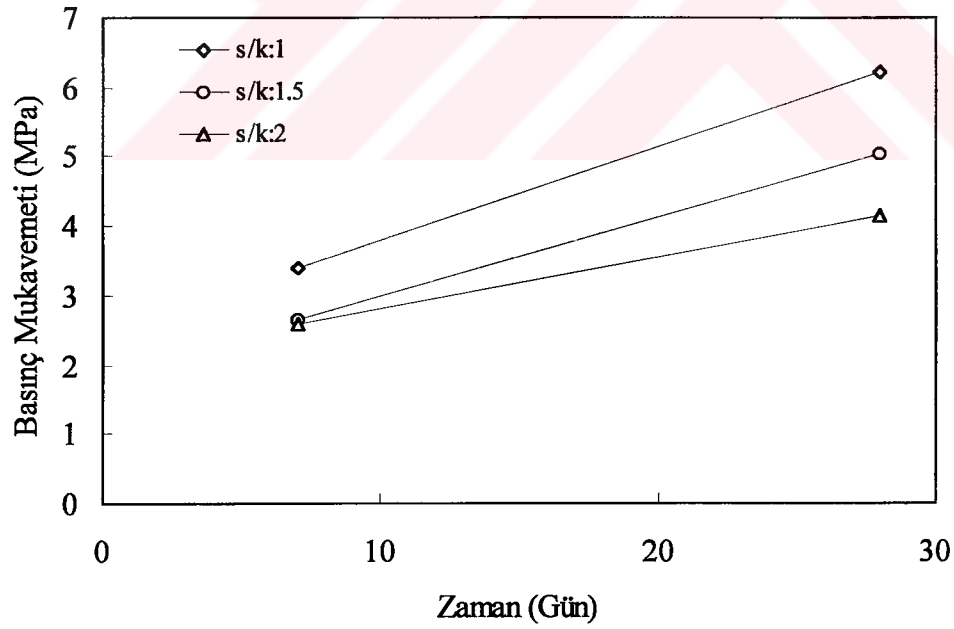
Şekil 4.20. Çimento Ve Uçucu Kül Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi



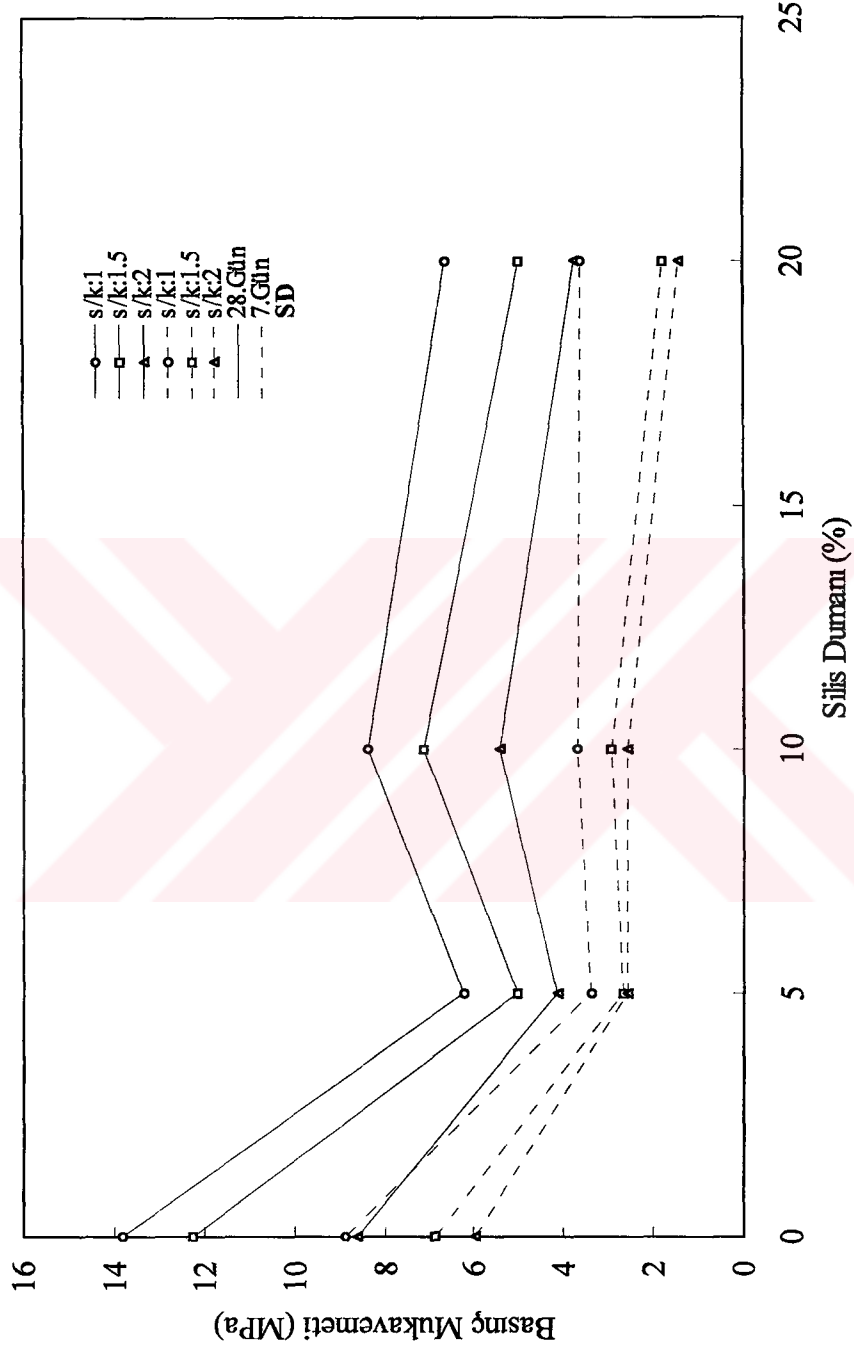
Şekil 4.21.Çimento Ve Kil Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi



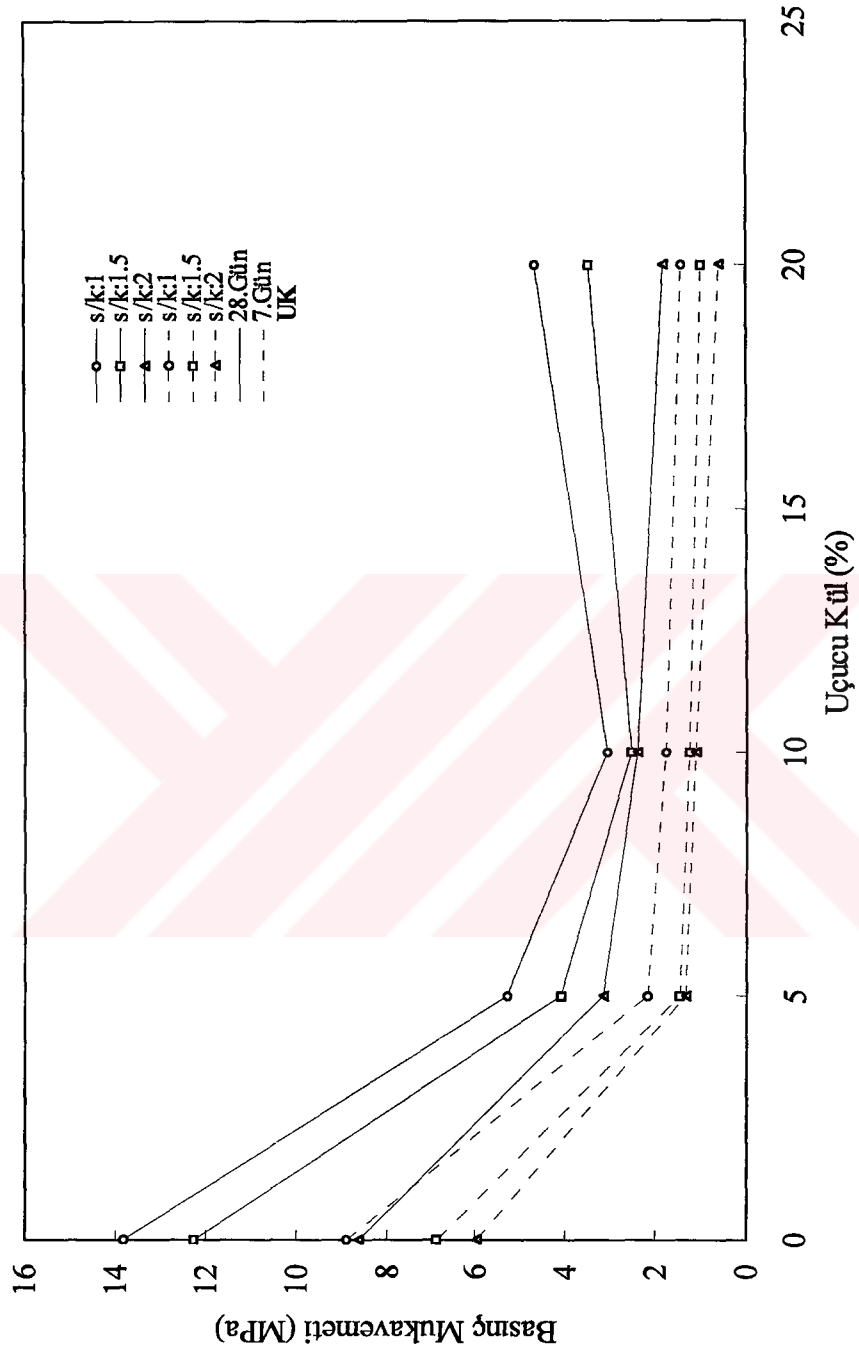
Şekil 4.22. Çimento Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (Karışım %100 Çimento)



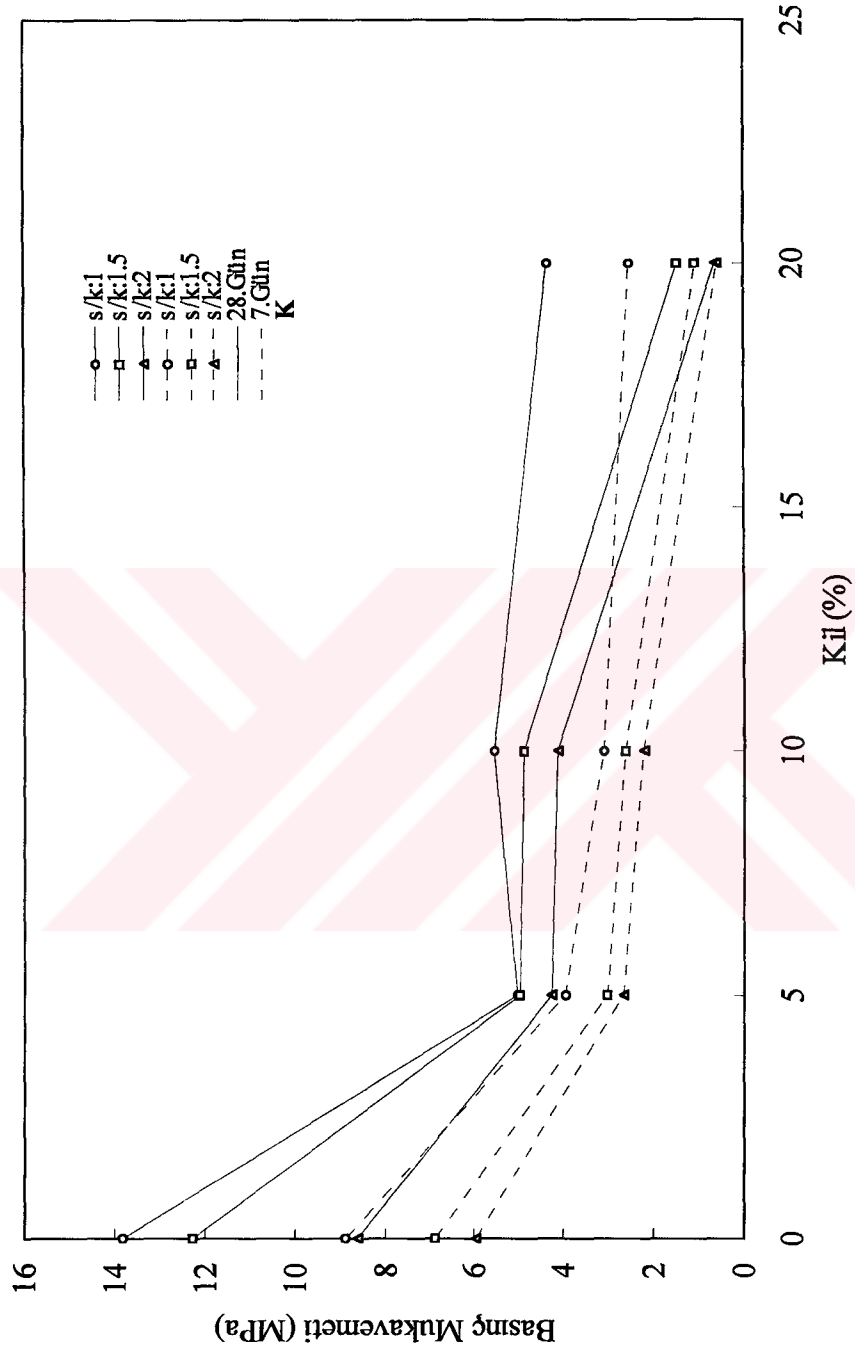
Şekil 4.23. Silis Dumanı Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (SD/ÇM=5/95)



Şekil 4.24. Silis Dumanı Karışımlarının 7. Ve 28. Gündeki Basınç Mukavemetinin Silis Dumanı Yüzdesi ile Değişimi



Şekil 4.25. Uçucu Kül Karışımların 7. Ve 28. Gündeki Basınç Mukavemetinin Uçucu Kül Yüzdesi ile Değişimi



Şekil 4.26. Kil Karışımların 7. Ve 28. Gündeki Basınç Mukavemetinin Kil Yüzdesi ile Değişimi

- Kil katkılı karışım numunelerinin 7. ve 28. günde basınç mukavemeti çimentoya göre %70-90 oranında düşüş göstermiştir. 28. Günde %5 ve %10 oranında kil katkılı numunelerin basınç mukavemeti aynı düzeyde kalırken en düşük basınç mukavemetini %20 kil katkılı numuneler vermiştir (Şekil 4.26).

4.4.2. B Serisi Deney Sonuçları

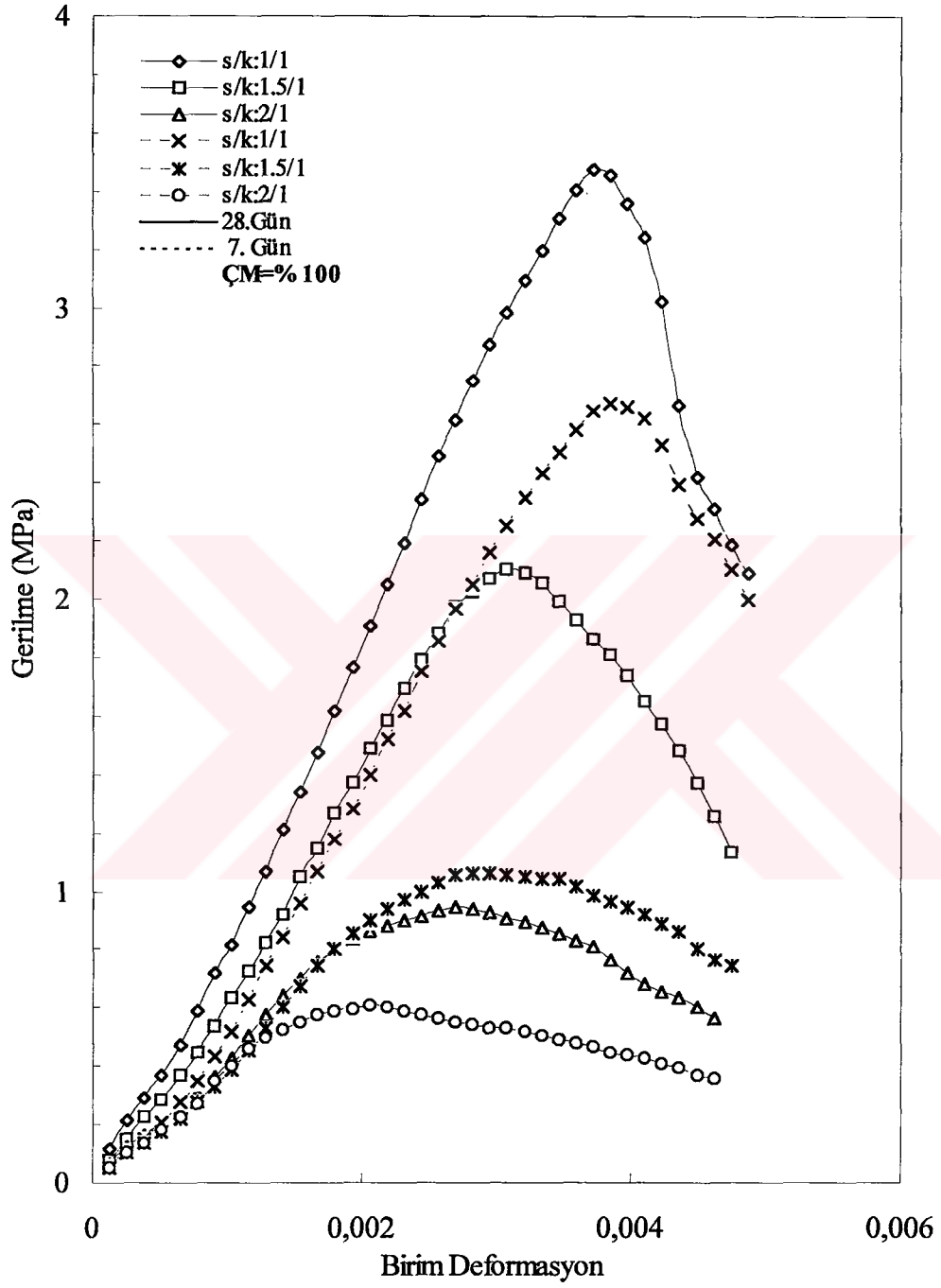
B serisi deneylerde, relatif sıklığı $D_r=0.30$ olan numunelere farklı su/katı oranlarında çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül, çimento-kil karışımları ile 100 kPa basınç altında enjeksiyon uygulanmıştır. Deney numunelerine ait sonuçlar Tablo 4.13' de verilmektedir. 7. Ve 28. günde deney sonuçlarından elde edilen gerilme-birim deformasyon (Şekil 4.27-30 ve Şekil A.15-18), basınç mukavemeti-su/katı oranı (Şekil 4.31-33), basınç mukavemeti-zaman (Şekil 4.34-35 ve Şekil A.19-24), basınç mukavemeti-katkı yüzdesi (Şekil 4.36, Şekil A.25,26), basınç mukavemeti-katkı tipi (Şekil 4.37,38), elastik modülü-su/katı oranı (Şekil 4.39) ve elastik modülü-katkı tipi (Şekil 4.40) grafikleri çizilmiştir. Deneylere ait grafiklerin ve tabloların sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

- Enjeksiyon uygulanmış numunelerin, gerilme-birim deformasyon eğrileri tepe noktalarına kadar tüm numunelerde non-lineer davranış gösterirken, tepe noktasından sonra şekil değiştirmeler farklılık göstermiştir. Düşük basınç mukavemetine sahip numuneler sünek kırılma, yüksek basınç mukavemetine sahip numuneler gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Çimento ve silis dumanı katkılı numuneler özellikle düşük su/katı (1/1) oranlarında gevrek kırılmalar, uçucu kül ve kil katkılı numuneler sünek kırılmalar göstermiştir.
- Enjeksiyonlu numunelerin basınç mukavemeti karışımın su/katı oranının artması ile ters orantılı olarak azalmıştır. En büyük azalma 1/1 - 1.5/1 su/katı oranı arasında gerçekleşirken, 1.5/1 - 2/1 su/katkı oranı arasında numunelerin basınç mukavemeti daha az değişim göstermiştir.
- Numunelerin basınç mukavemeti zamanla artış göstermiş ve 28. günde maksimum basınç mukavemetine ulaşılmıştır. En fazla artışlar su/katı oranı 1/1 olan, en düşük artışlar su/katı oranı 2/1 olan numunelerde gerçekleşmiştir.

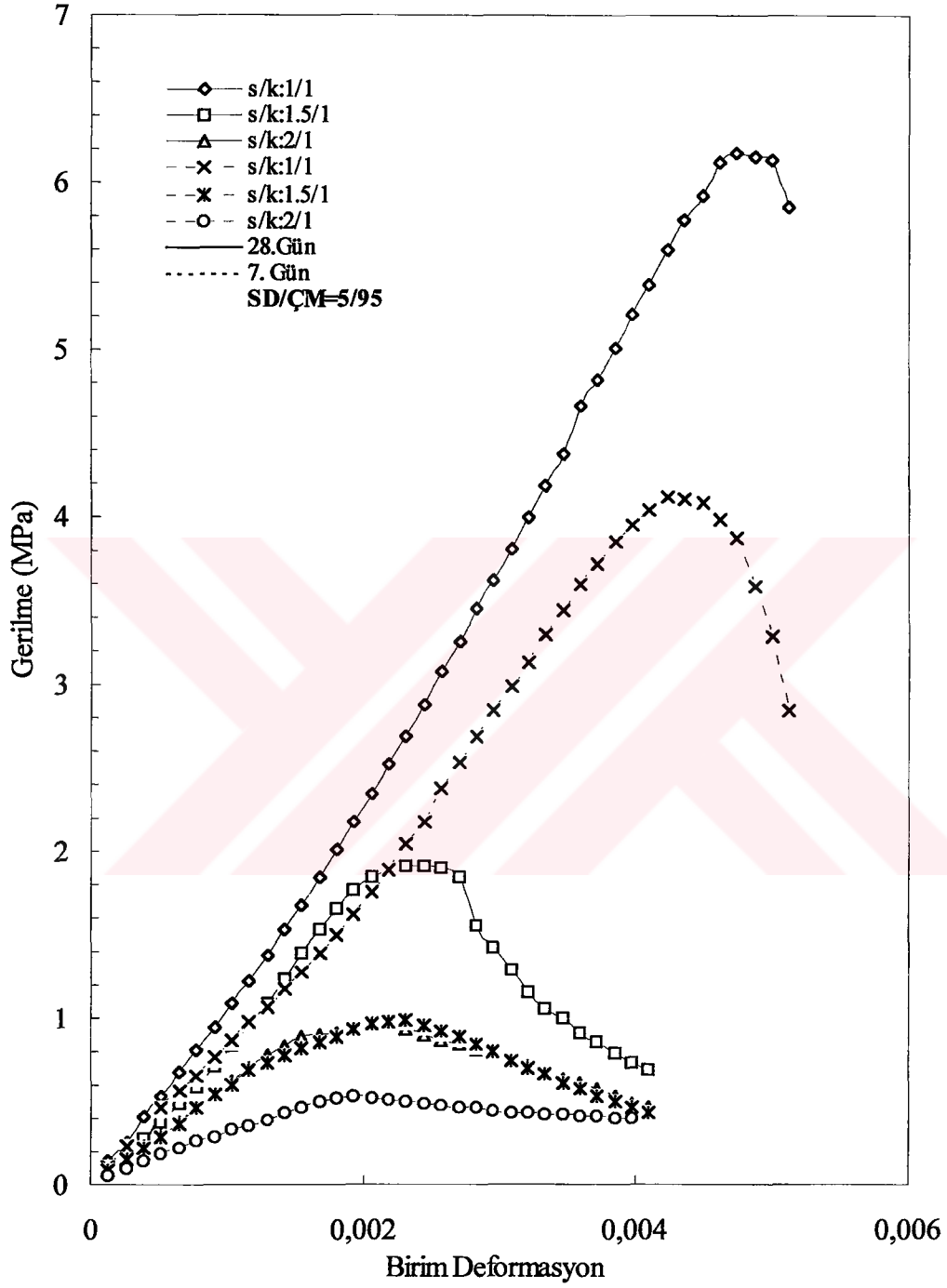
Tablo 4.13. B Serisi Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Basınç Mukavemeti Ve Elastik Modül Değerleri ($D_r=0.30$, $E_p=100$ kPa)

Deney No	Katkı Tipi	Katkı Oranı (%)	Su/katı (kg)	Basınç Muk. 7.Gün MPa	Basınç Muk. 28.Gün MPa	E 7.Gün MPa	E 28.Gün MPa
B101	ÇM	100	1/1	2.676	3.475	7042	9391
B102	ÇM	100	1.5/1	1.062	2.106	3662	6194
B103	ÇM	100	2/1	0.607	0.942	2890	4485
B201	SD/ÇM	5/95	1/1	3.653	6.173	11415	13717
B202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	0.986	1.911	4286	7864
B203	SD/ÇM	5/95	2/1	0.444	0.955	2750	4400
B211	SD/ÇM	10/90	1/1	2.782	4.426	8304	12645
B212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	1.353	2.587	5637	8920
B213	SD/ÇM	10/90	2/1	0.297	0.900	928	3192
B221	SD/ÇM	20/80	1/1	2.995	3.786	7080	10575
B222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	1.193	2.444	4057	8312
B223	SD/ÇM	20/80	2/1	0.653	0.96	1738	3950
B301	UK/ÇM	5/95	1/1	1.571	3.029	5343	8460
B302	UK/ÇM	5/95	1.5/1	0.88	1.236	2750	4594
B303	UK/ÇM	5/95	2/1	0.573	0.893	2640	3674
B311	UK/ÇM	10/90	1/1	1.467	2.604	4097	6705
B312	UK/ÇM	10/90	1.5/1	0.644	0.937	2800	3488
B313	UK/ÇM	10/90	2/1	0.219	0.736	1068	2875
B401	K/ÇM	5/95	1/1	2.210	3.031	5755	8169
B402	K/ÇM	5/95	1.5/1	0.831	1.055	3089	4042
B403	K/ÇM	5/95	2/1	0.376	0.835	1129	3630
B411	K/ÇM	10/90	1/1	1.8	2.969	4687	8002
B412	K/ÇM	10/90	1.5/1	0.764	1.12	3144	4869
B413	K/ÇM	10/90	2/1	0.26	0.493	1198	2969

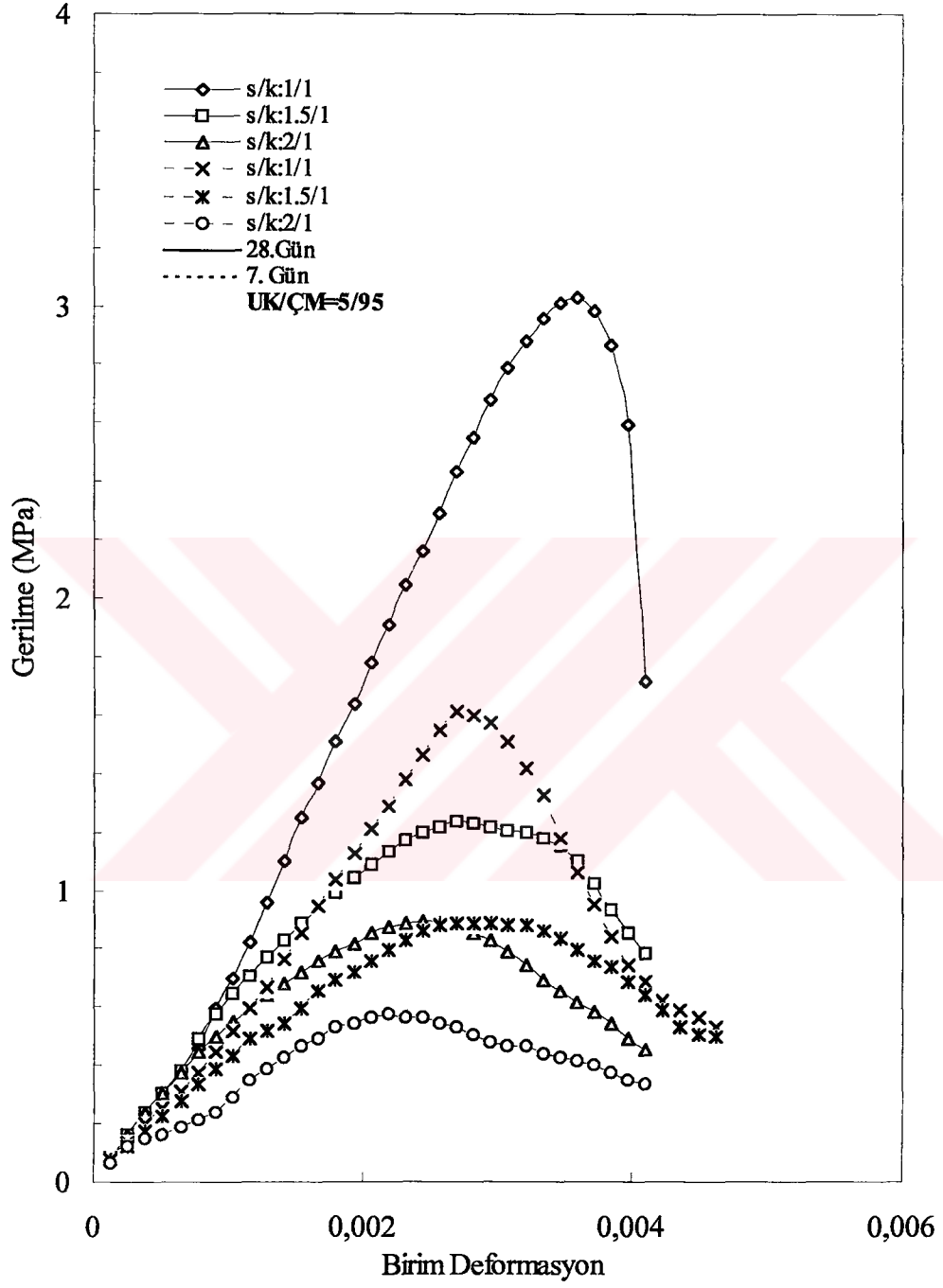
- %5, 10, 20 Silis dumanı enjeksiyonlu numuneler 7. ve 28. günde basınç mukavemetini çimentoya göre artırmıştır. Basınç mukavemeti, %5 silis dumanı içeren karışımlar ve su/katı oranı 1/1 olan numunelerde %30-70 oranında, %10 silis dumanı ve su/katı oranı 1.5/1 olan numunelerde %20 oranında, %20 silis dumanı ve su/katı oranı 2/1 numunelerde %5-15 oranlarında artmıştır. Bu farklılık, silis dumanı katkılı karışımların değişen su/katı oranlarında zemine daha iyi enjeksiyon edilmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifade ile kullanılan karışım suyunun artışına paralel olarak enjeksiyon edilebilirlik artmıştır.
- Uçucu kül katkılı enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemeti, çimentodan daha düşük değerler vermiştir. 7. Günde %40, 28. Günde %10-25 oranında basınç mukavemeti azalma göstermiştir. %5 Uçucu kül kullanılan numuneler %10 uçucu kül kullanılan numunelere göre daha yüksek basınç



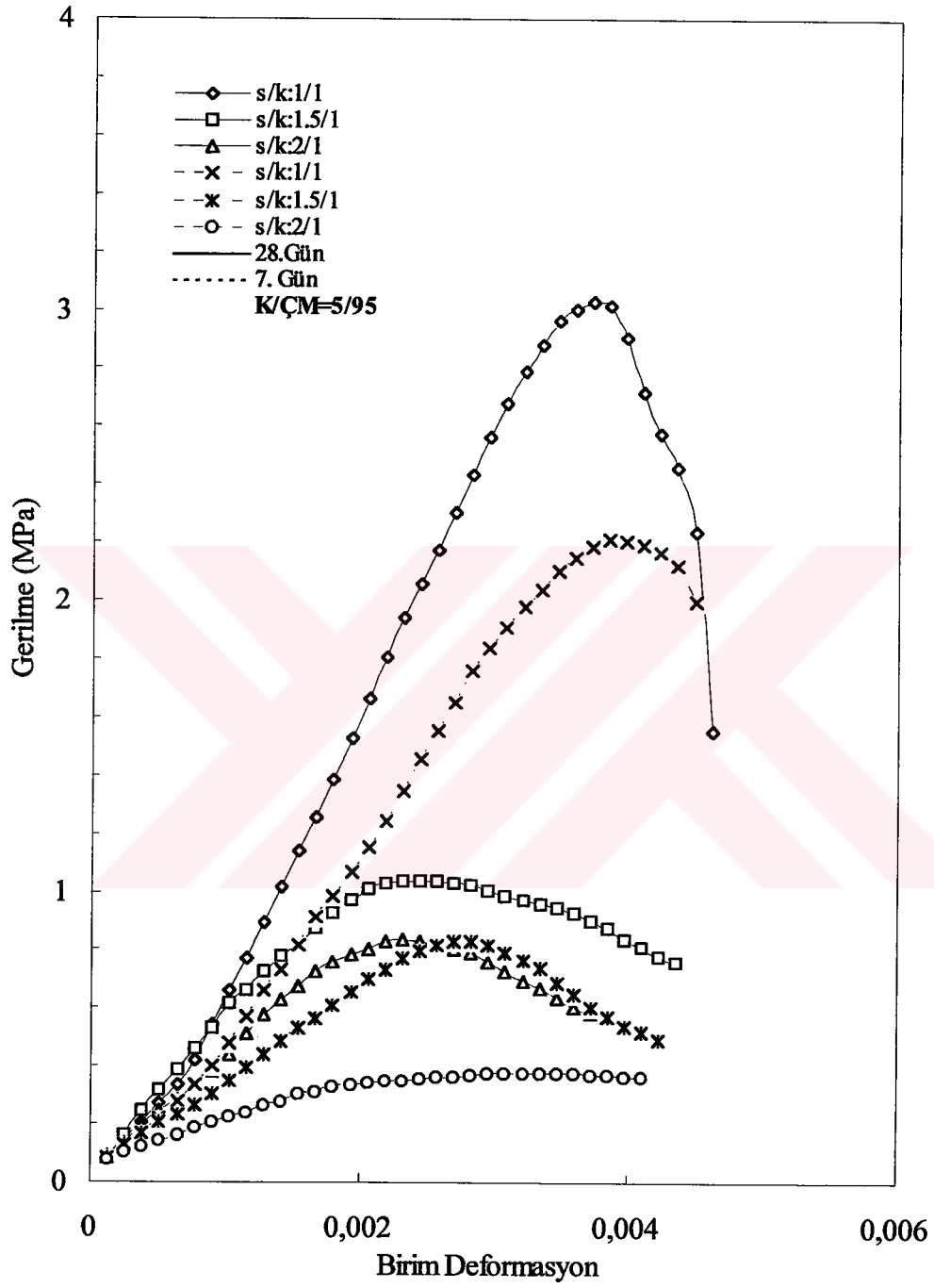
Şekil 4.27. Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r=0.30$, Karışım %100 Çimento)



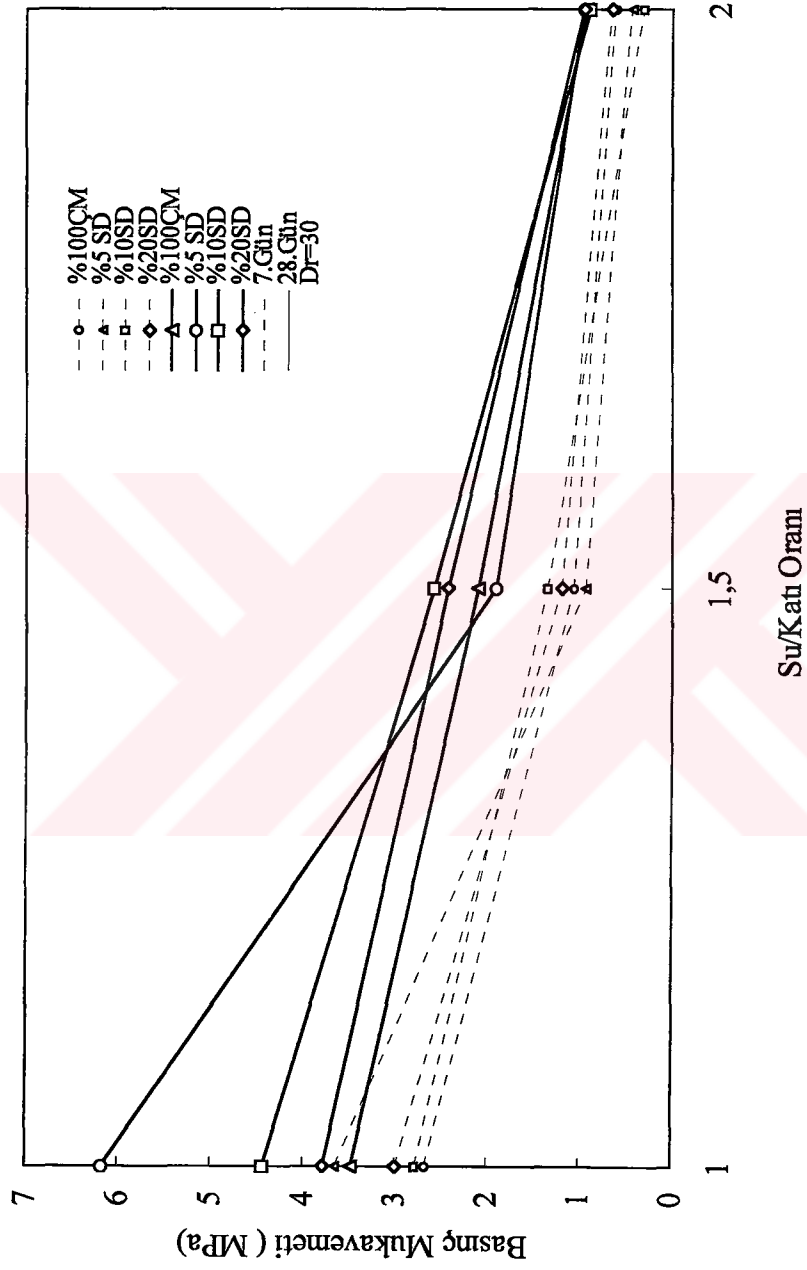
Şekil 4.28. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri, ($D_r = 0.30$, SD/ÇM=5/95)



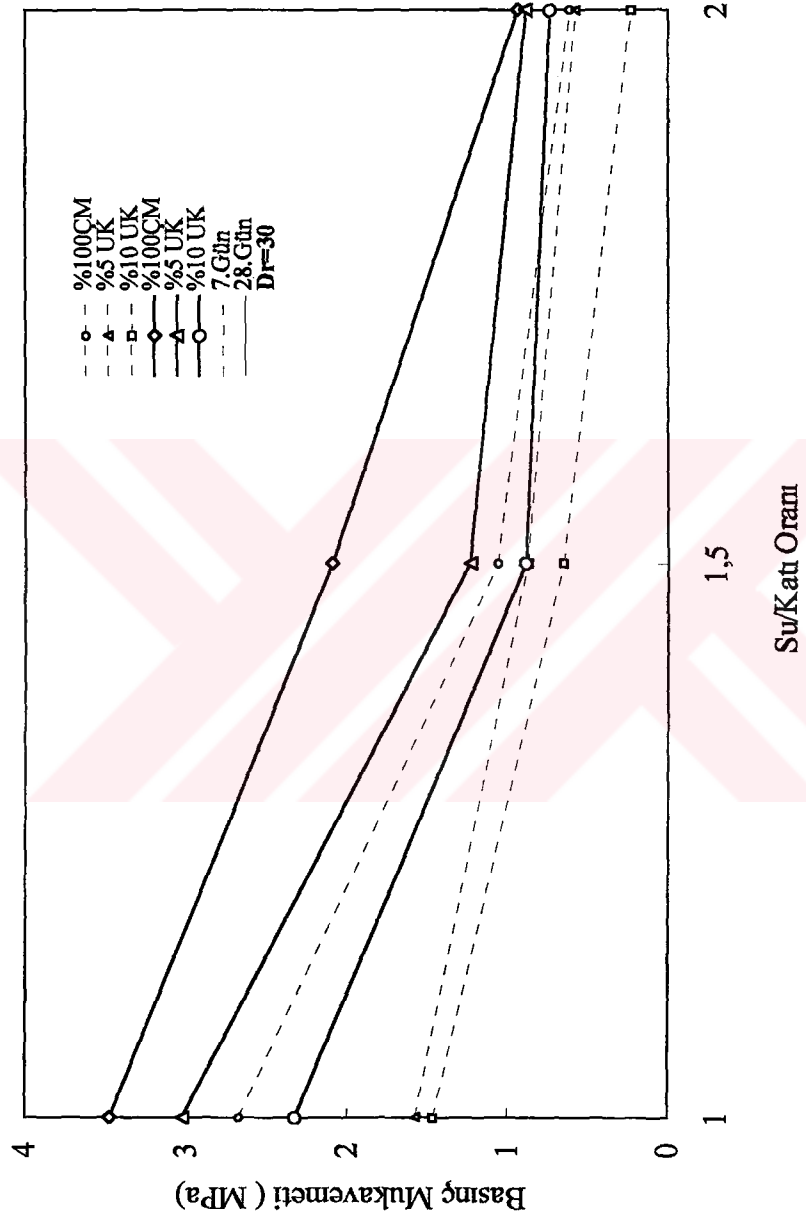
Şekil 4.29. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.30$, UK/ÇM= 5/95)



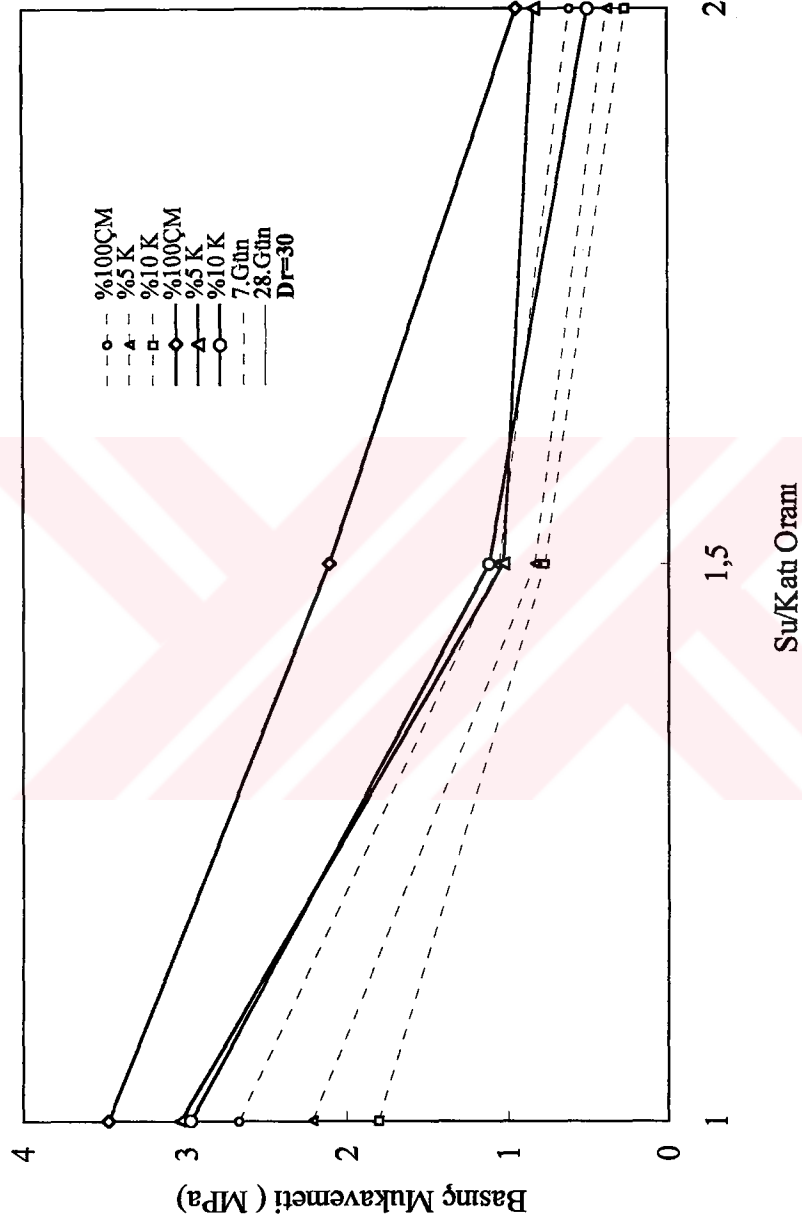
Şekil 4.30. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.30$, Kil/Çimento= 5/95)



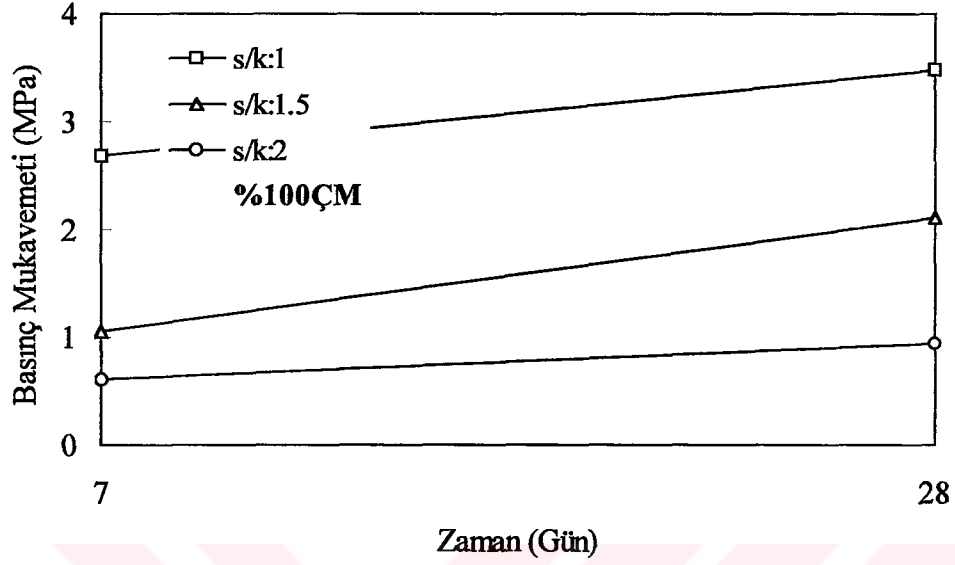
Şekil 4.31. Çimento Ve Silis Dumanı Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi (Dr:0.30)



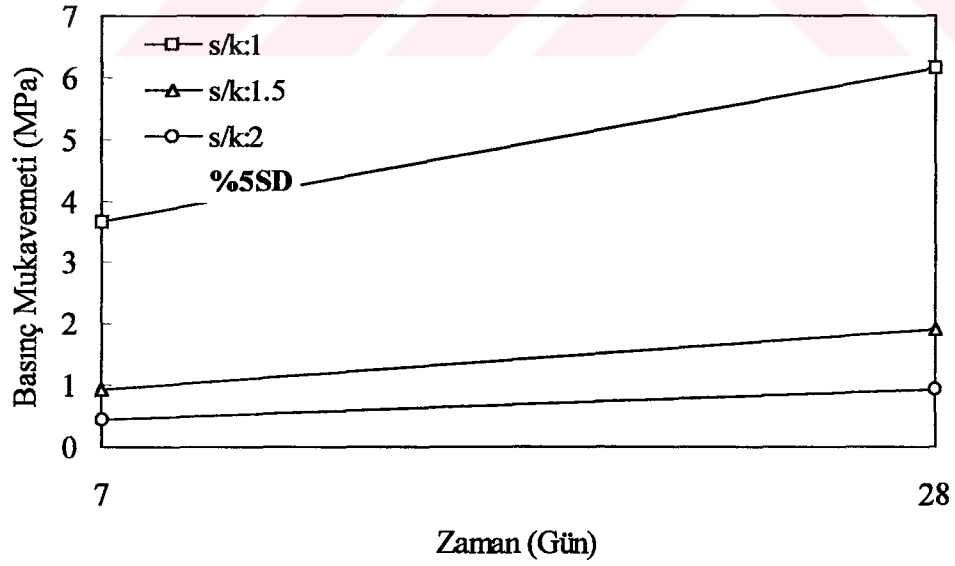
Şekil 4.32. Çimento Ve Uçucu Kül Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi (Dr:0.30)



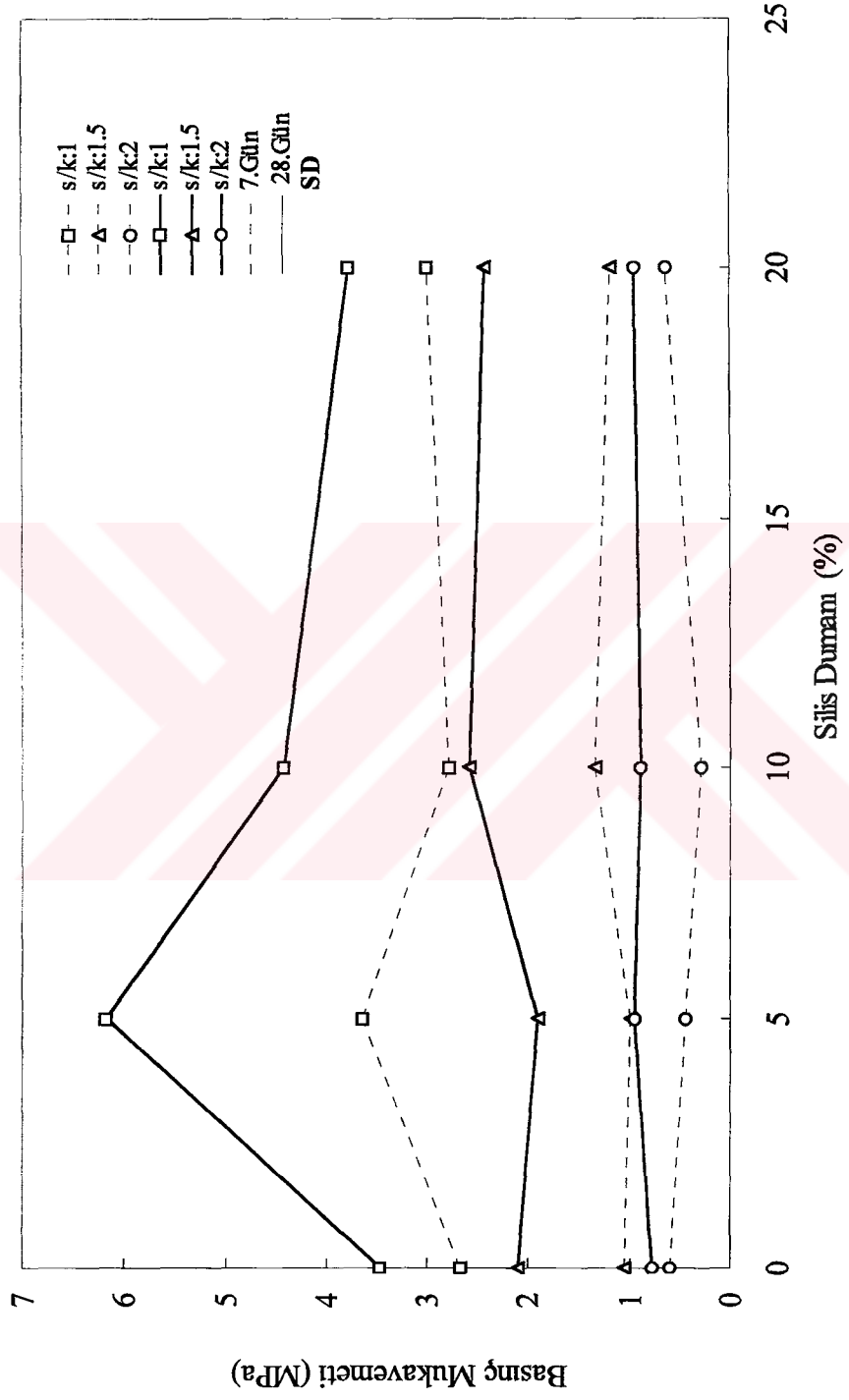
Şekil 4.33. Çimento Ve Kil Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Baskınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi (Dr:0.30)



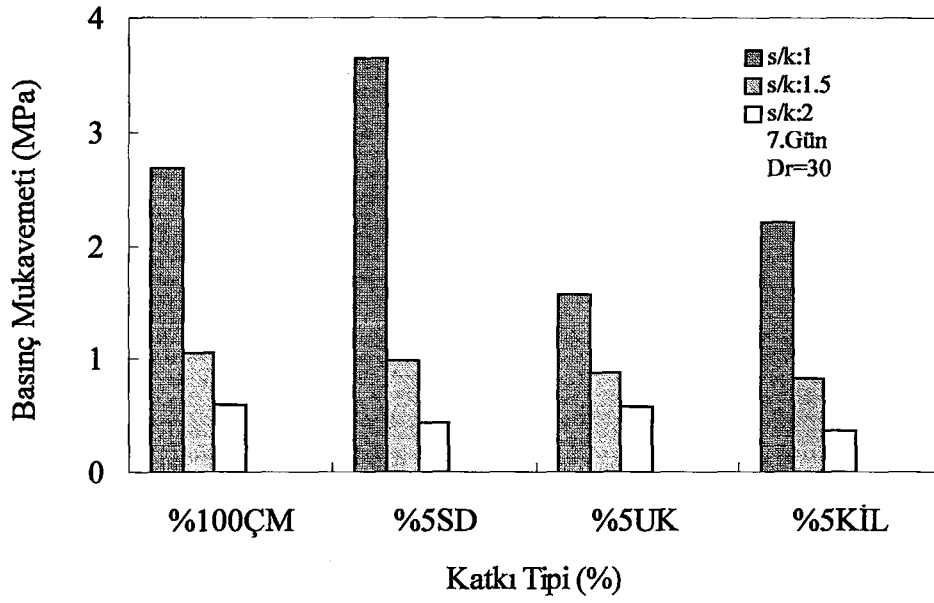
Şekil 4.34. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (Dr= 0.30, Karışım. %100 Çimento)



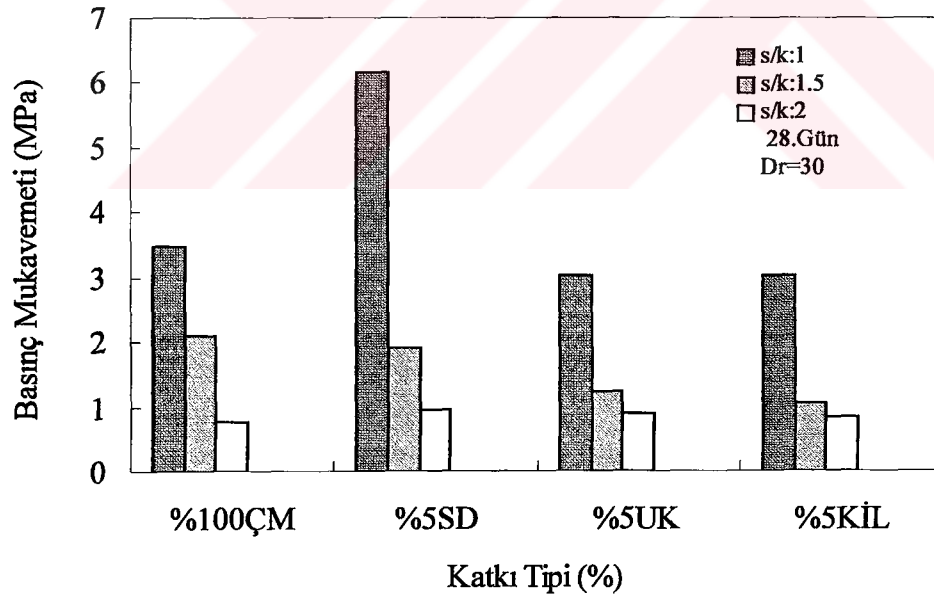
Şekil 4.35. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (Dr= 0.30, SD/ÇM=5/95)



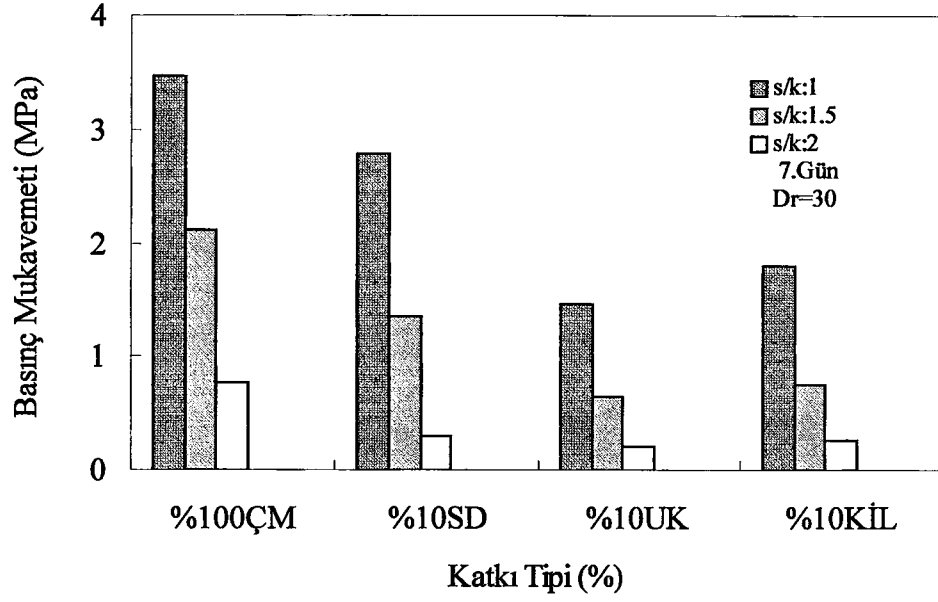
Şekil 4.36. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Silis Dumanı Yüzdesi ile Değişimi
(Dr:0.30, Karışım SD/ÇM)



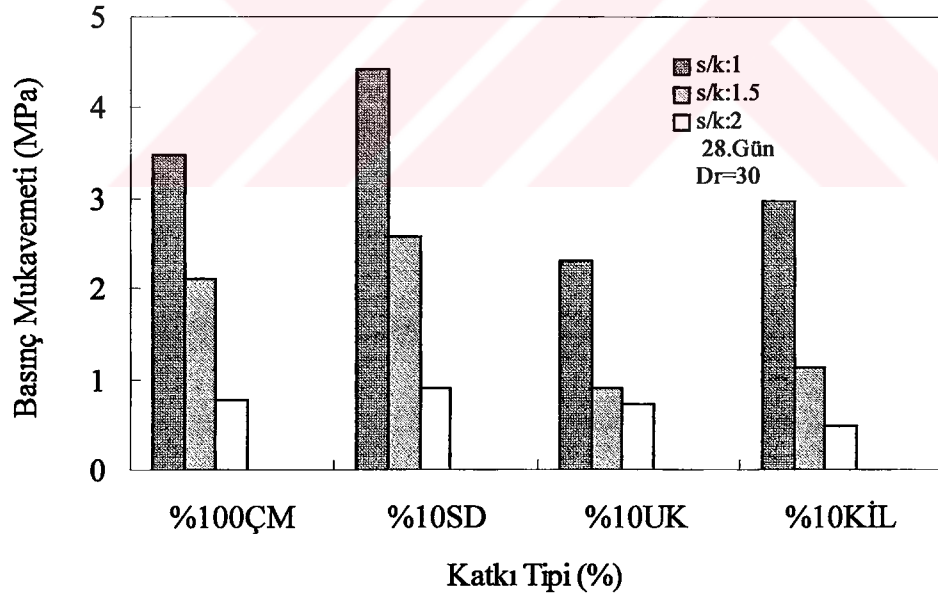
Şekil 4.37a. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.30)



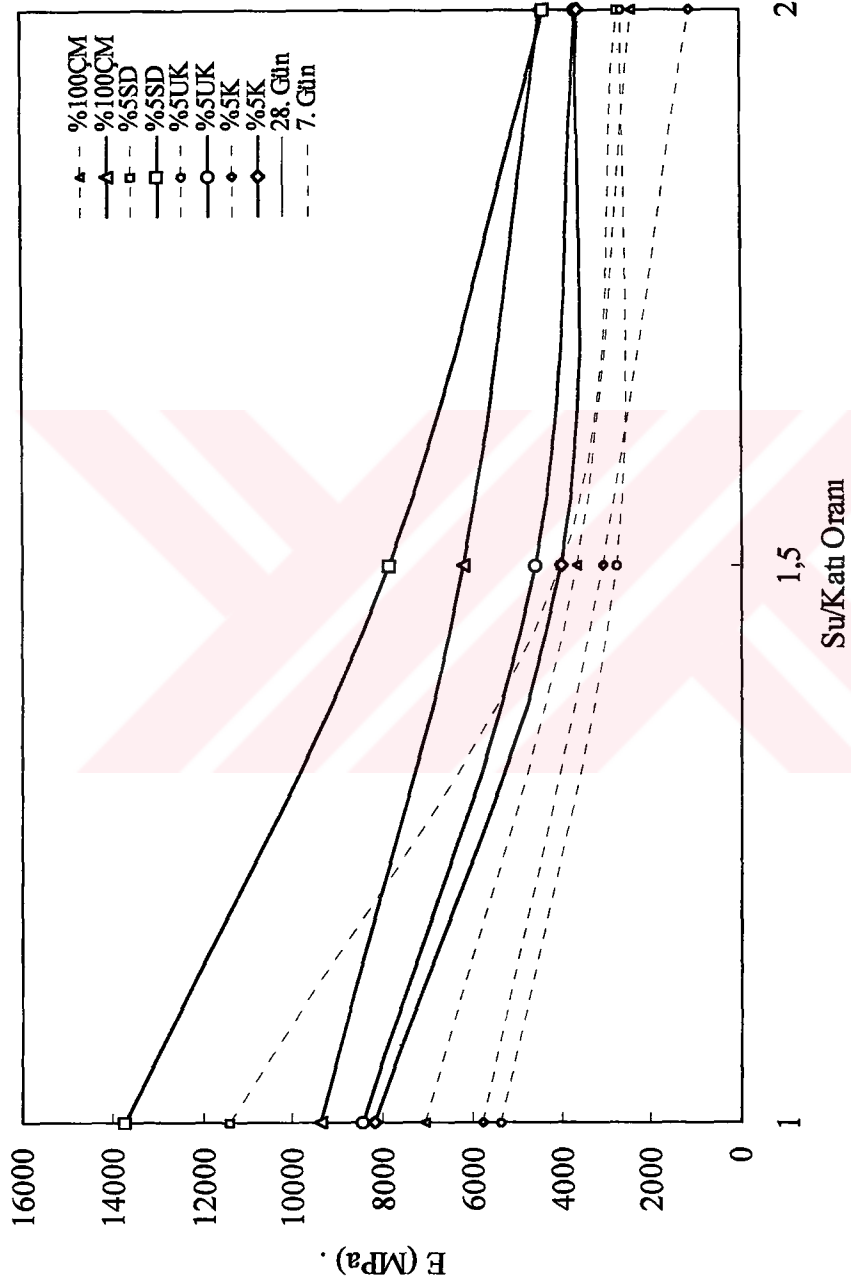
Şekil 4.37b. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 28.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.30)



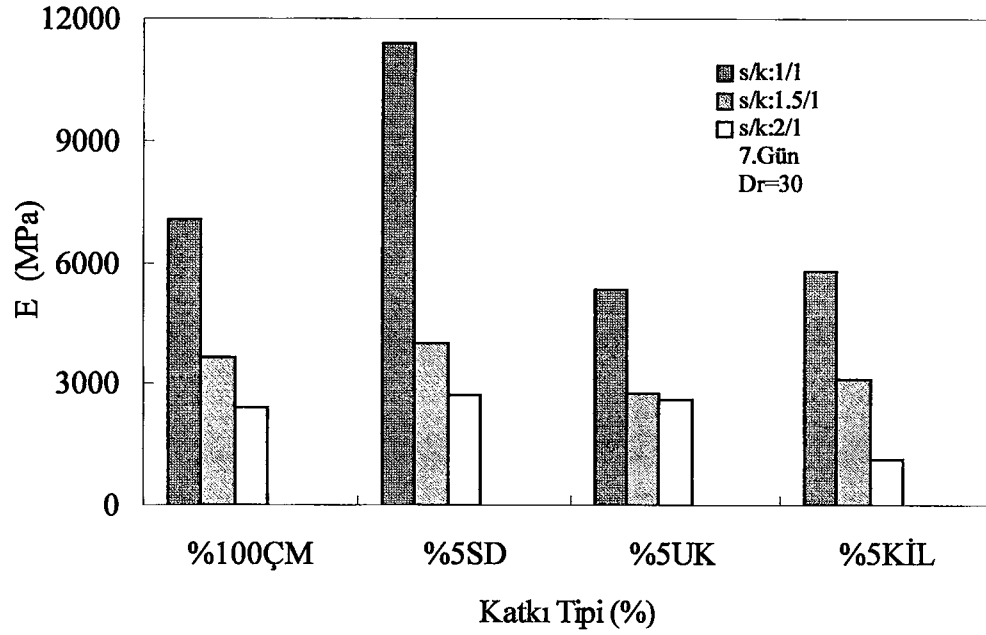
Şekil 4.38a. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.30)



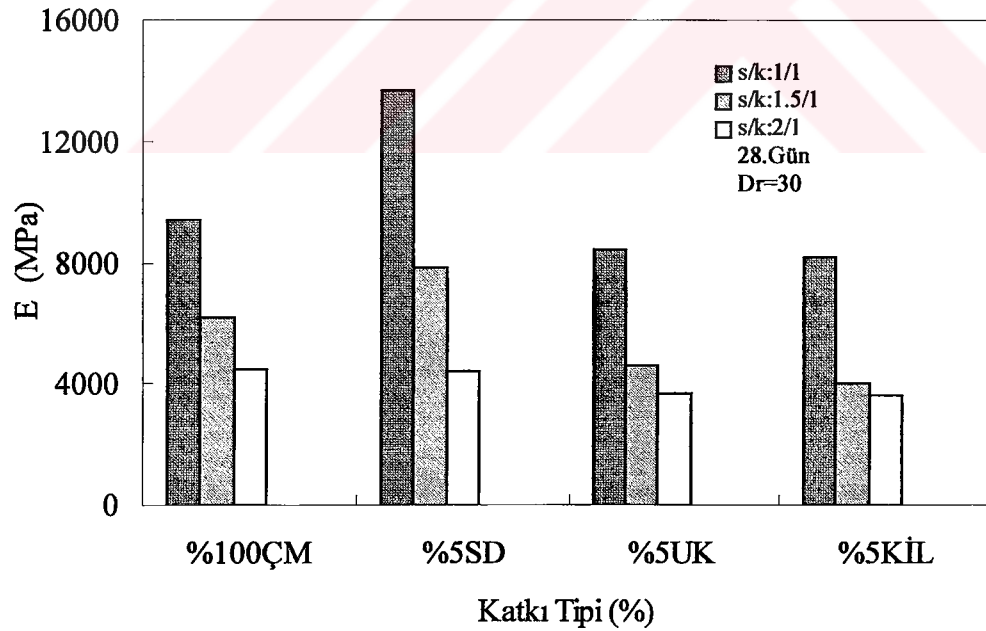
Şekil 4.38b. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 28.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.30)



Şekil 4.39. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Elastisite Modülünün Su/Katı Oranı ile Değişimi (Dr: 0.30, Karışım: Çimento, Silis Dumane, Uçucu Kül, Kil)



Şekil 4.40a. Enjeksiyon uygulanmış Numunelerin 7. Günde Elastisite Modülünün Katkı Tipi İle Değişimi (Dr=0.30)



Şekil 4.40b. Enjeksiyon uygulanmış Numunelerin 28. Günde Elastisite Modülünün Katkı Tipi İle Değişimi (Dr=0.30)

mukavemeti verilmiştir. En düşük basınç mukavemetini %10 uçucu kül kullanılan ve su/katı oranı 2/1 olan numuneler vermiştir.

- Kil katkılı numuneler çimentoya göre basınç mukavemetini düşürmüştür. 7. Günde %15-30, 28. Günde %15 oranında numunelerin basınç mukavemeti çimentoya göre azalma göstermiştir. %5 Kil katkılı numuneler basınç mukavemetini %10 oranında kil katkılı numunelerden yüksek vermiştir.
- Silis dumanı, uçucu kül, kil katkılı karışımlarla enjeksiyon uygulanmış numuneler içinde, en yüksek basıncı silis dumanı numuneleri verirken, uçucu kül ve kil katkılı numuneler basınç mukavemetini çimentoya göre düşürmüştür. Uçucu kül kullanılan numunelerde basınç mukavemetinin, çimento ve silis dumanı numunelerinden daha düşük çıkmasının nedeni, uçucu külün dane çapının silis dumanı dane çapından büyük ve puzolanik değerinin daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.
- Enjeksiyon uygulanmış numunelerin elastisite modülü 7. ve 28. günde karışımın su/katı oranındaki artışla azalma göstermiştir. En büyük elastisite modülü su/katı oranı 1/1 olan %5 silis dumanı katkılı enjeksiyon uygulanmış numunelerde oluşurken, en düşük elastisite modülü su/katı oranı 2/1 olan uçucu kül ve kil katkılı numuneler vermiştir.

4.4.3. C Serisi Deney Sonuçları

C serisi deneylerde $D_r=0.80$ sıklıkta zemin numuneleri hazırlanmış ve su/katı oranı 1/1, 1.5/1, 2/1 olan çimento, çimento-silis dumanı (%5, 10, 20) ve çimento-uçucu kül (%5, 10) ve çimento-kil (%5, 10) karışımları ile 100 kPa basınç altında enjeksiyon edilmiştir. Su/katı oranı 1/1 ve %20 silis dumanı katkılı karışımlar 100 kPa basınçta yeterli enjeksiyon edilememiştir. Bu karışımların enjeksiyon basıncı deneylerde 200 kPa olarak alınmıştır. Elde olunan deney sonuçları Tablo 4.14' de verilmiştir. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin 7. ve 28 gündeki gerilme-birim deformasyon (Şekil A.27-34), basınç mukavemeti-su/katı oranı (Şekil 4.41-43), basınç mukavemeti-zaman (Şekil 4.44-45 ve Şekil A35-40), basınç mukavemeti-katkı yüzdeleri (Şekil 4.46, Şekil A.41,42), basınç mukavemeti-katkı tipi (Şekil 4.47,48), elastisite modülü- su/katı oranı (Şekil 4.49) ve elastisite modülü-katkı yüzdesi (Şekil

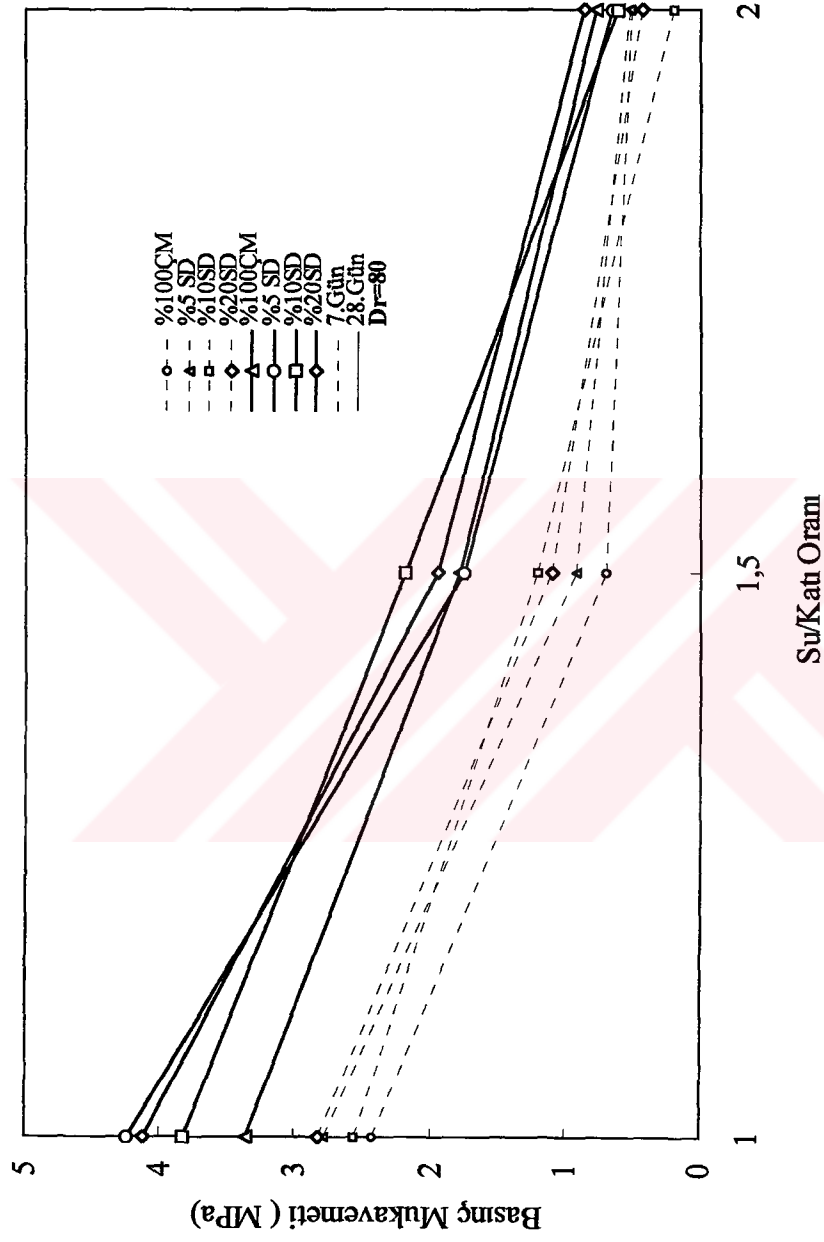
4.50), basınç mukavemeti-relatif sıkılık (Şekil 4.51-52 ve Şekil A.43-48) grafikleri çizilmiştir. Deney ve grafiklerin yorumu aşağıda sıralanmıştır.

- C serisi deney sonuçları B serisi deney sonuçları ile paralellik göstermiştir.
- Gerilme-birim deformasyon eğrilerinde numuneler tepe noktasına kadar non-lineer davranış sergilemiş, tepe noktasından sonra çimento ve silis dumanı içeren numunelerde daha gevrek kırılmalar, uçucu kül ve kil katkılı numunelerde daha sünek kırılmalar olmuştur.
- B serisi deney numunelerinde olduğu gibi numunelerin basınç mukavemeti karışımın su/katı oranı artışı ile ters orantılı olarak azalmıştır. Enjeksiyonlu numunelerin basınç mukavemeti, 1/1-1.5/1 su/katı oranları arasında lineer bir azalma gösterirken 1.5/1-2/1 su/katı oranları arasında daha az bir düşüş göstermiştir.
- Enjeksiyonlu numunelerin basınç mukavemeti zamanla artış göstermiş ve en büyük artışlar 28. günde su/katı oranı 1/1 olan numunelerde, en düşük mukavemet su/katı oranı 2/1 olan numunelerde meydana gelmiştir.
- Silis dumanı katkılı karışım enjeksiyonu uygulanmış numunelerin basınç mukavemeti çimentoya göre artmış ve 28. günde %25 oranında artış meydana gelmiştir. 1/1 Su/katı oranında en büyük basınç mukavemetini %5 silis dumanı numuneler vermiştir. 1.5/1 Su/katı oranında %10 silis dumanı katkılı enjeksiyon uygulanmış numuneler çimentoya göre %20 oranında daha yüksek basınç mukavemet vermiştir. 2/1 Su/katı oranında %20 silis dumanı enjeksiyonu uygulanmış numunelerde basınç mukavemeti çimentoya göre %10 oranında artış göstermiştir.
- Uçucu kül katkılı karışımlarla enjeksiyon uygulanan numuneler 7. ve 28. günde çimentoya göre daha düşük basınç mukavemeti verilmiştir. %5 ve %10 uçucu kül katkılı numunelerin basınç mukavemeti su/katı oranı 1/1 olan numunelerde yatay bir seyir izlemiştir.
- Kil katkılı enjeksiyon uygulanmış numuneler basınç mukavemetini genel olarak çimentoya göre düşürmesine rağmen, %10 kil katkılı numuneler %5 kil katkılı numunelerden daha yüksek basınç mukavemeti vermiştir.

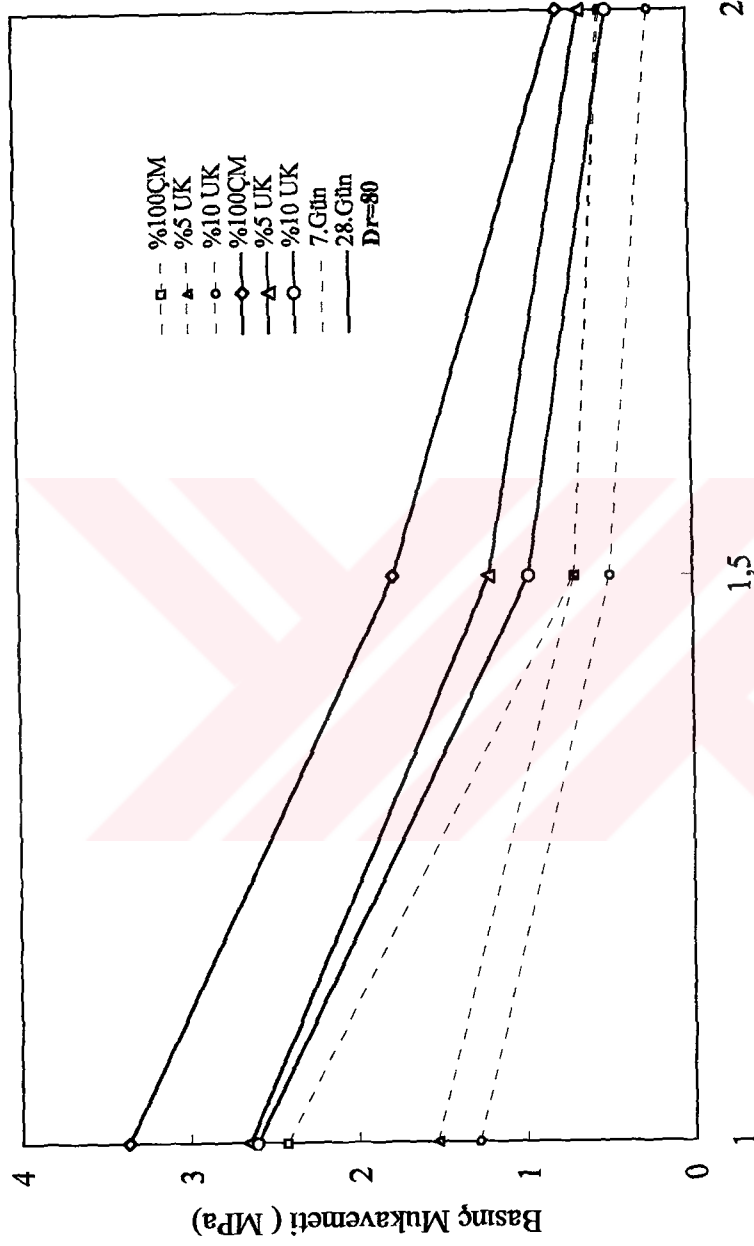
Tablo 4.14. C- Serisi Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Basınç Mukavemeti Ve Elastik Modül Değerleri ($D_r=0.80$, $E_p=100$ kPa)

Deney No	Katkı Tipi	Katı Oranı (%)	Su/katı (kg)	Basınç Muk. 7.Gün MPa	Basınç Muk. 28.Gün MPa	E 7.Gün MPa	E 28.Gün MPa
C101	ÇM	100	1/1	2.433	3.368	6402	7654
C102	ÇM	100	1.5/1	0.706	1.786	2941	5102
C103	ÇM	100	2/1	0.511	0.773	1965	3220
C201	SD/ÇM	5/95	1/1	2.782	4.248	8040	9482
C202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	0.924	1.751	4017	6209
C203	SD/ÇM	5/95	2/1	0.528	0.653	2046	4267
C211	SD/ÇM	10/90	1/1	2.56	3.831	5885	11008
C212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	1.206	2.182	2851	8523
C213	SD/ÇM	10/90	2/1	0.2	0.613	1204	3192
C221	SD/ÇM	20/80	1/1	2.826	4.124	6496	10739
C222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	1.10	1.946	4782	6338
C223	SD/ÇM	20/80	2/1	0.431	0.866	1873	4510
C301	UK/ÇM	5/95	1/1	1.539	2.655	5234	7972
C302	UK/ÇM	5/95	1.5/1	0.707	1.213	2507	4991
C303	UK/ÇM	5/95	2/1	0.52	0.646	2260	3891
C311	UK/ÇM	10/90	1/1	1.28	2.32	5565	7526
C312	UK/ÇM	10/90	1.5/1	0.488	0.893	2726	3450
C313	UK/ÇM	10/90	2/1	0.232	0.480	1008	2891
C401	K/ÇM	5/95	1/1	1.604	2.782	5455	8040
C402	K/ÇM	5/95	1.5/1	0.716	0.968	2539	3983
C403	K/ÇM	5/95	2/1	0.281	0.48	1221	3404
C411	K/ÇM	10/90	1/1	1.604	2.933	6265	7638
C412	K/ÇM	10/90	1.5/1	0.618	0.982	2686	4269
C413	K/ÇM	10/90	2/1	0.292	0.671	1140	3494

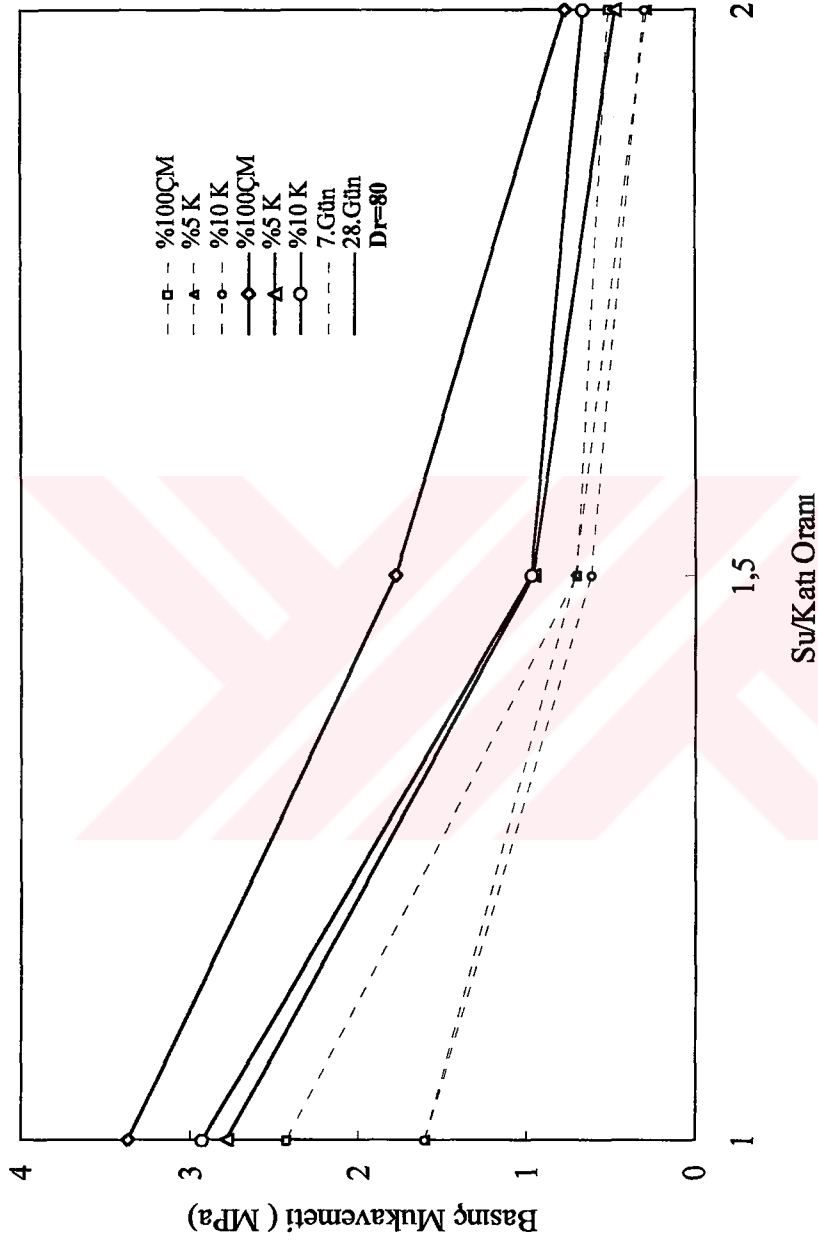
- Enjeksiyon uygulanmış numunelerin elastisite modülü, karışımın artan su/katı oranı ile ters orantılı olarak düşmüştür. Çimento, silis dumanı, uçucu kül ve kil katkılı enjeksiyon uygulanmış numuneler karşılaştırıldığında, 1/1 ve 1.5/1 su/katı oranlarında, en büyük elastisite modülü değerlerini silis dumanı katkılı numuneler vermiştir. S/k oranı 2/1 olan numunelerin elastisite modülü önemli farklar ortaya koymamıştır. Elastisite modülündeki en düşük değerleri uçucu kül ve kil katkılı numuneler vermiştir.
- Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemeti relatif sıkılık artışı ile önemli bir değişim göstermemiştir. Bununla beraber, basınç mukavemeti bazı numunelerde relatif sıkılı ile azalma göstermiştir. Bu durumun, zemin sıkılığının artması ile enjeksiyon edilebilirliğin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



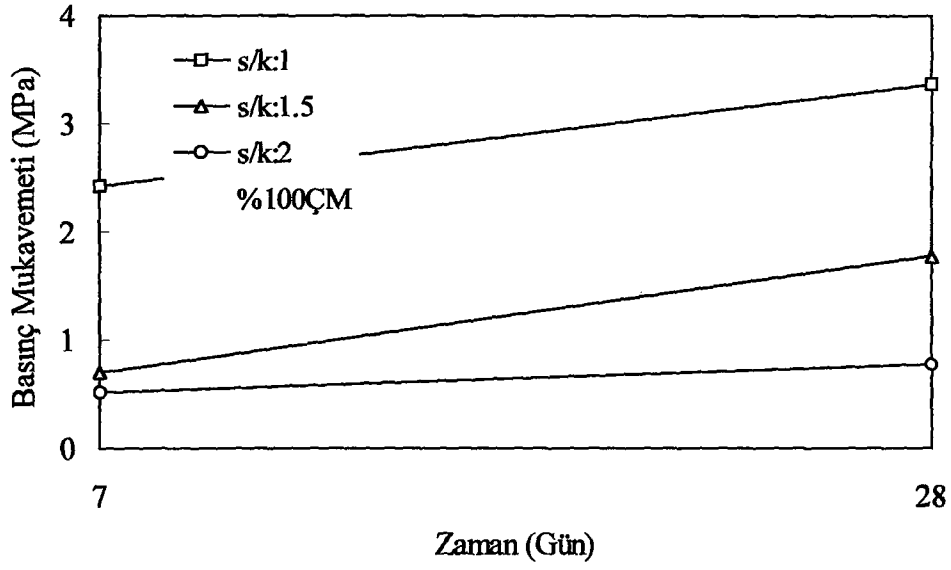
Şekil 4.41. Çimento Ve Silis Dumanı Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi (Dr:0.80)



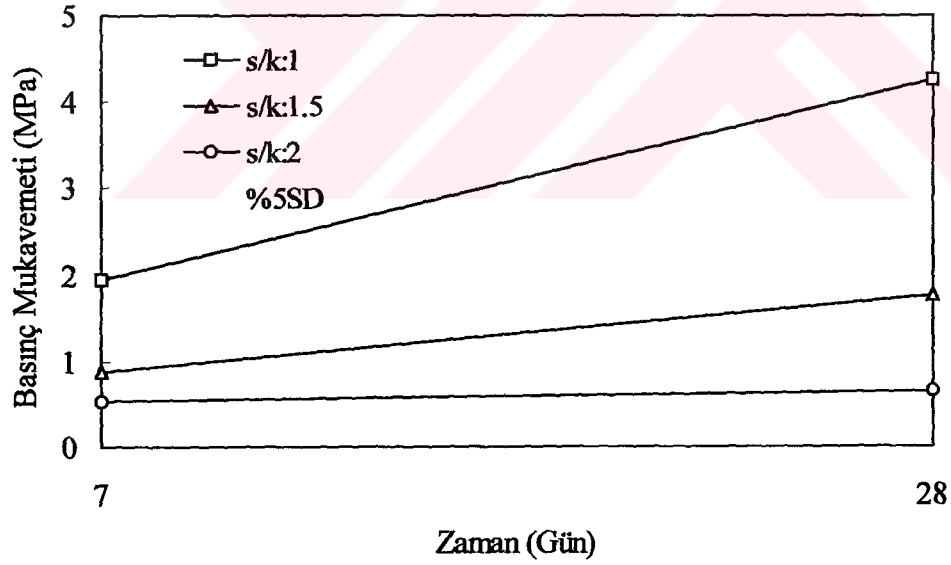
Şekil 4.42. Çimento Ve Uçucu Kül Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Basınç Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi (Dr:0.80)



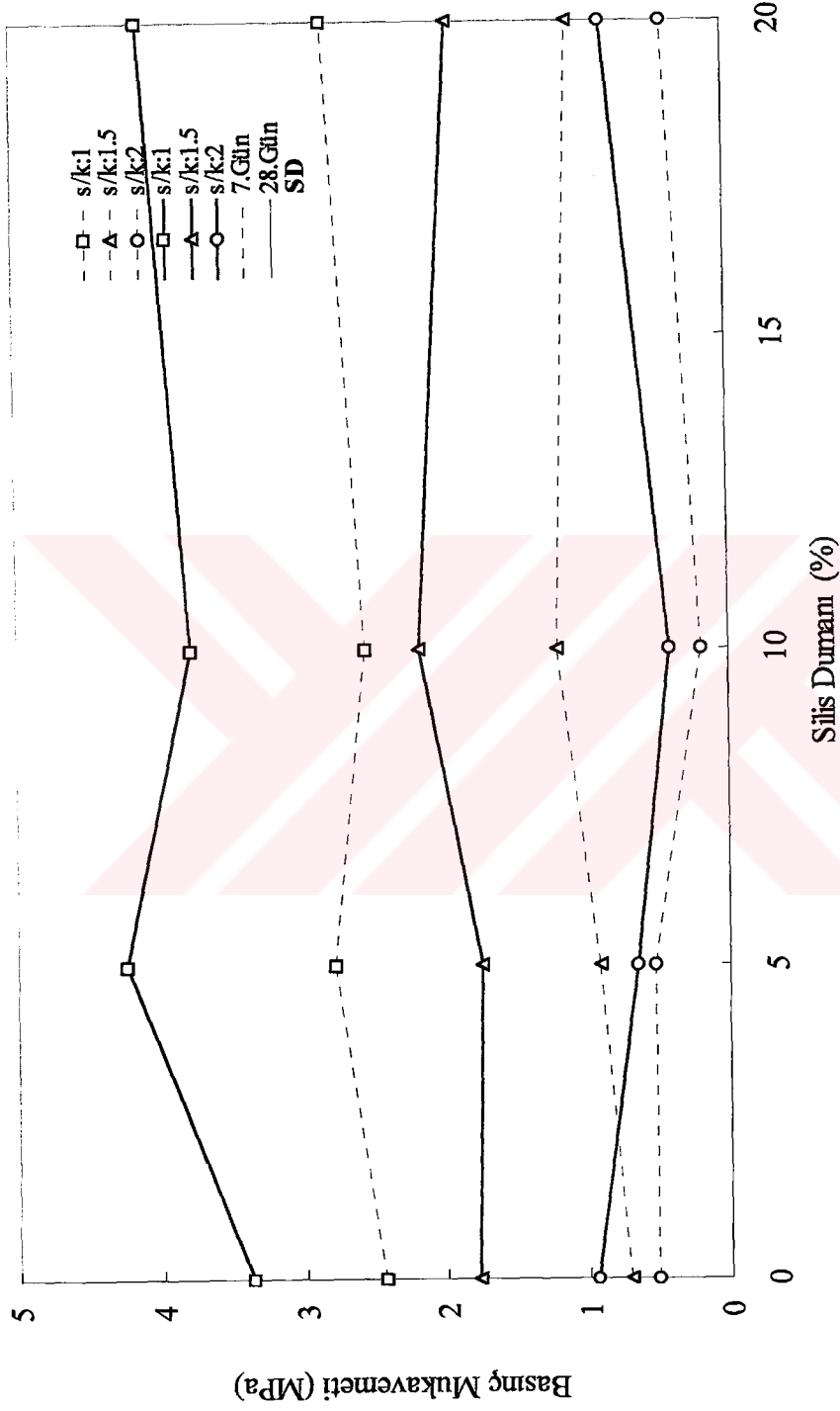
Şekil 4.43. Çimento Ve Kil Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Baskı Mukavemetinin Su/Katı Oranı İle Değişimi (Dr:0.80)



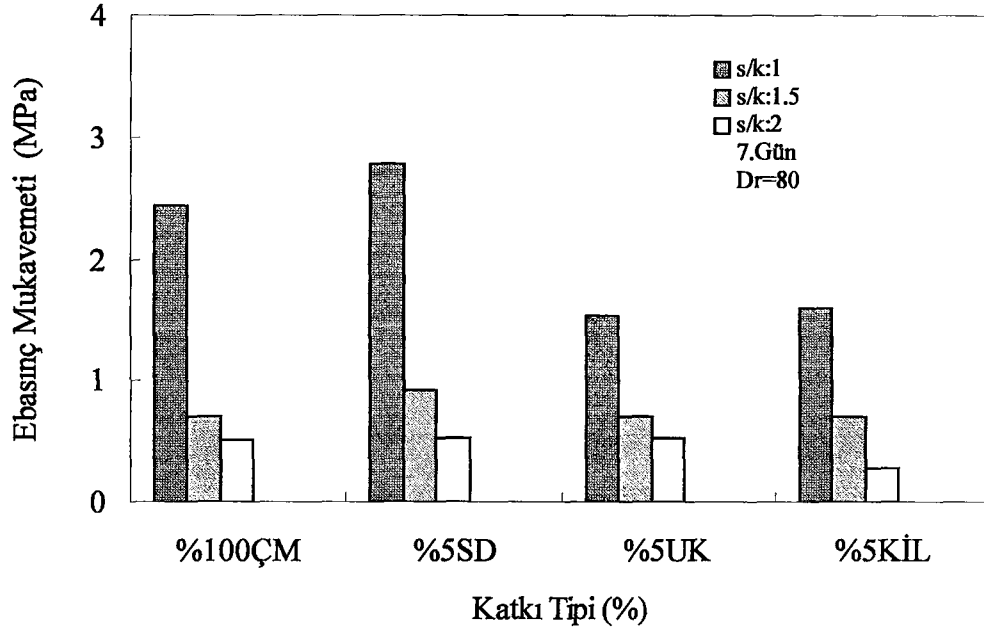
Şekil 4.44. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r = 0.80$, Karışım. %100 Çimento)



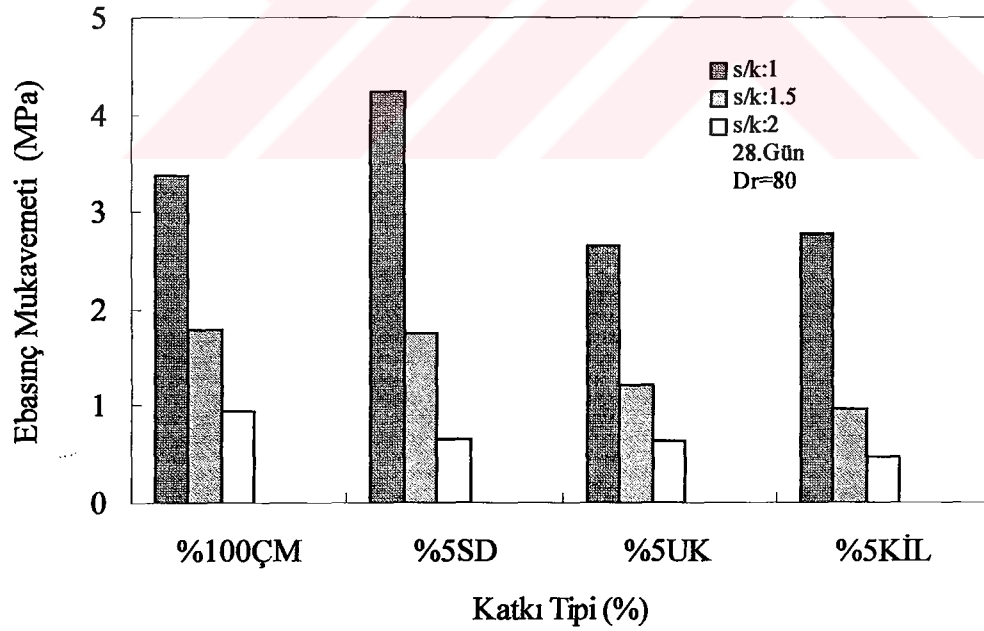
Şekil 4.45. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r = 0.80$, SD/ÇM=5/95)



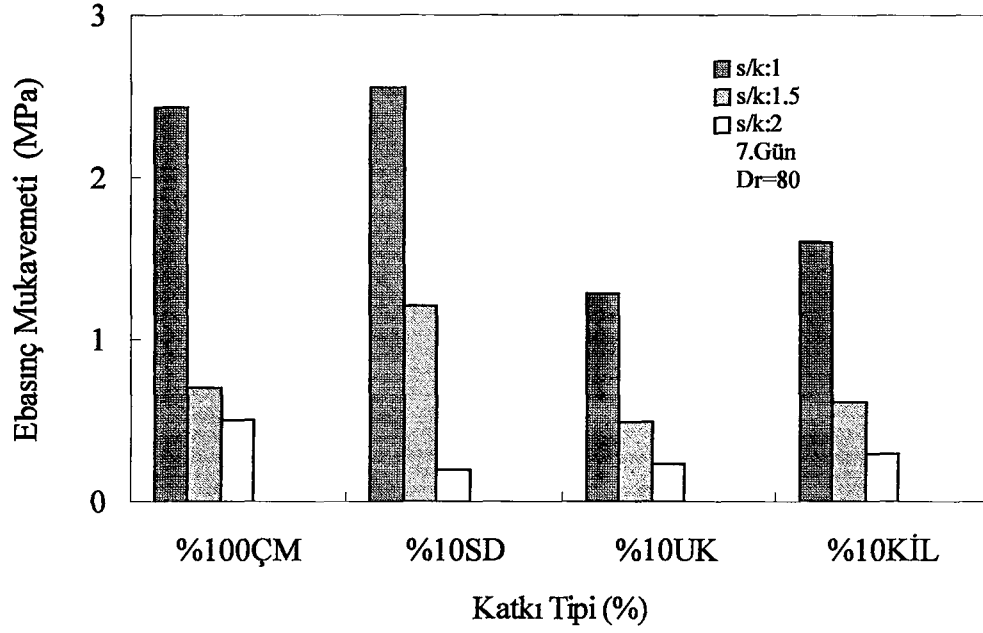
Şekil 4.46. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Silis Dumanı Yüzdesi ile Değişimi
($D_r=0.80$, Karışım SD/ÇM)



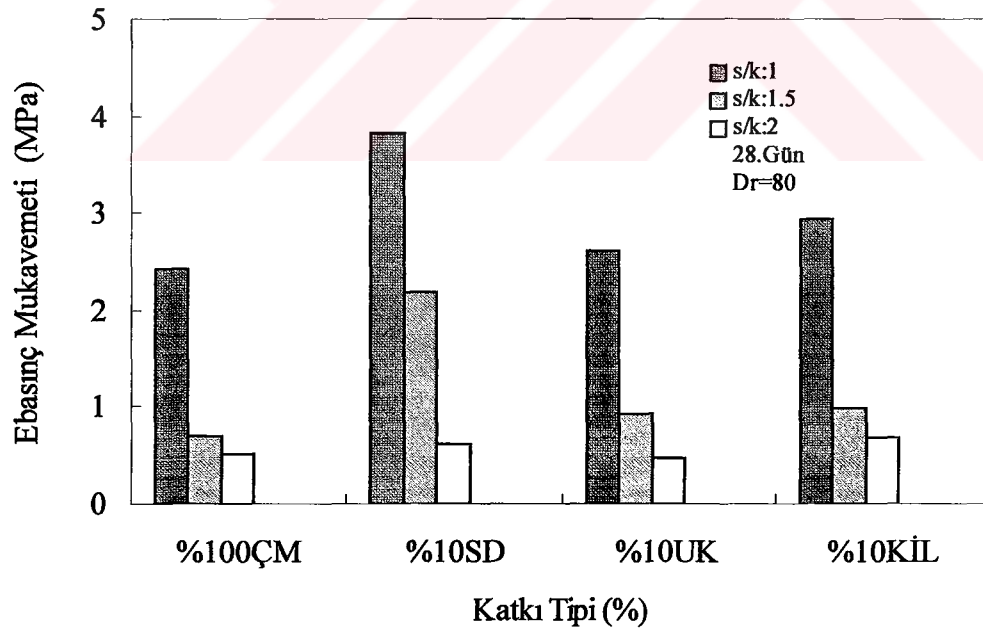
Şekil 4.47a. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.80)



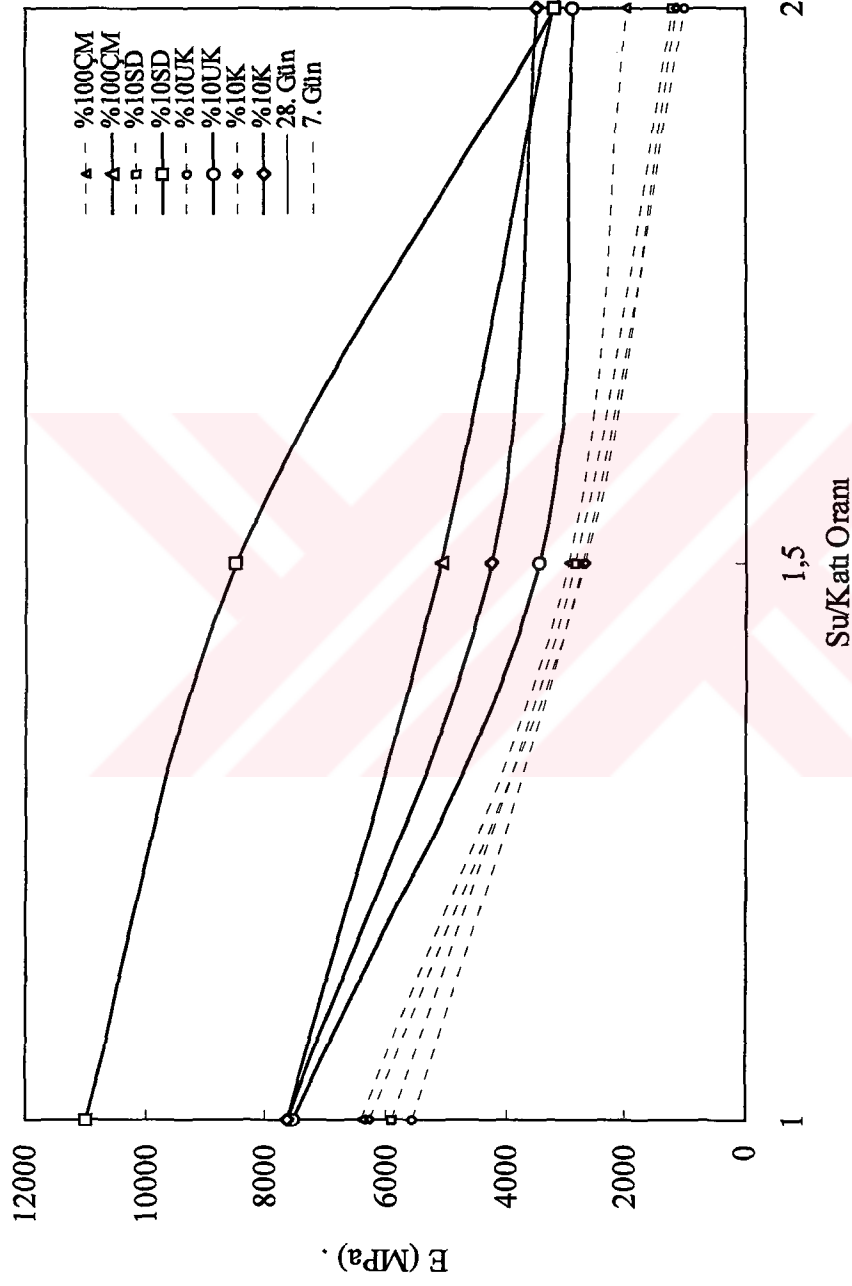
Şekil 4.47b. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 28.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.80)



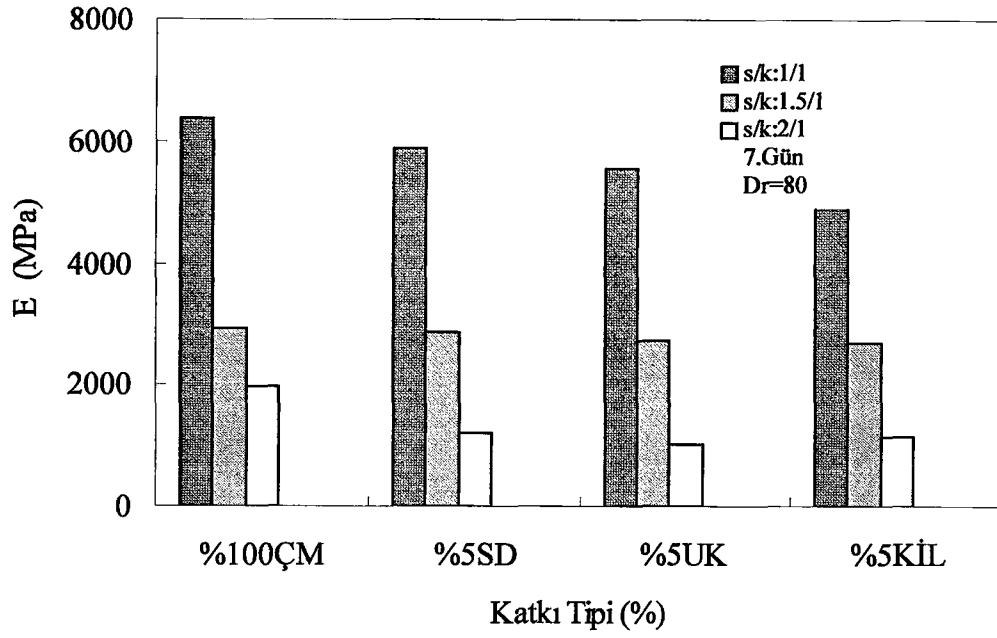
Şekil 4.48a. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.80)



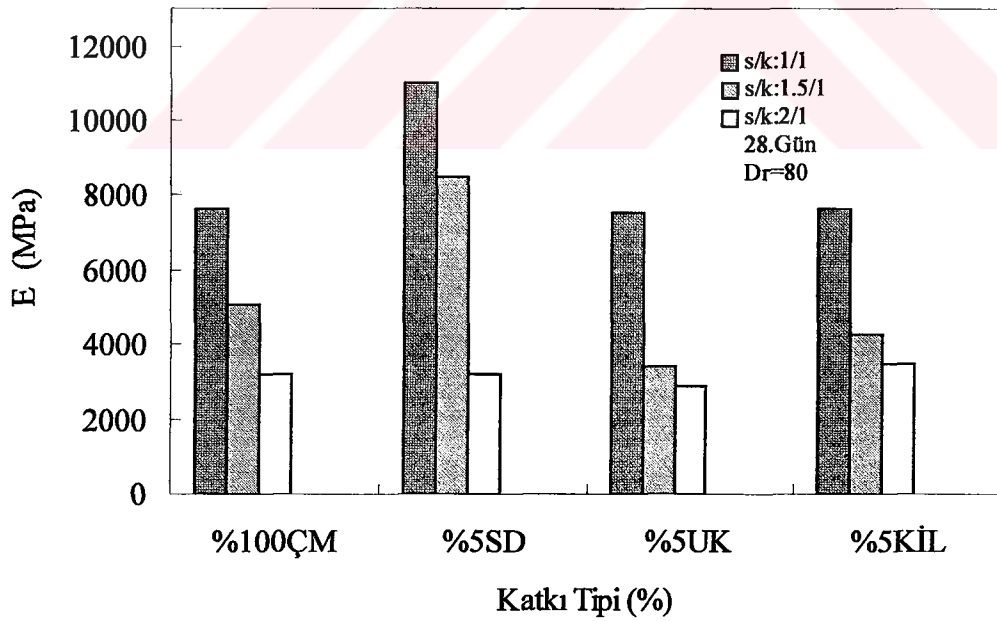
Şekil 4.48b. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 28.Günde Katkı Tipi İle Basınç Mukavemeti Değişimi (Dr=0.80)



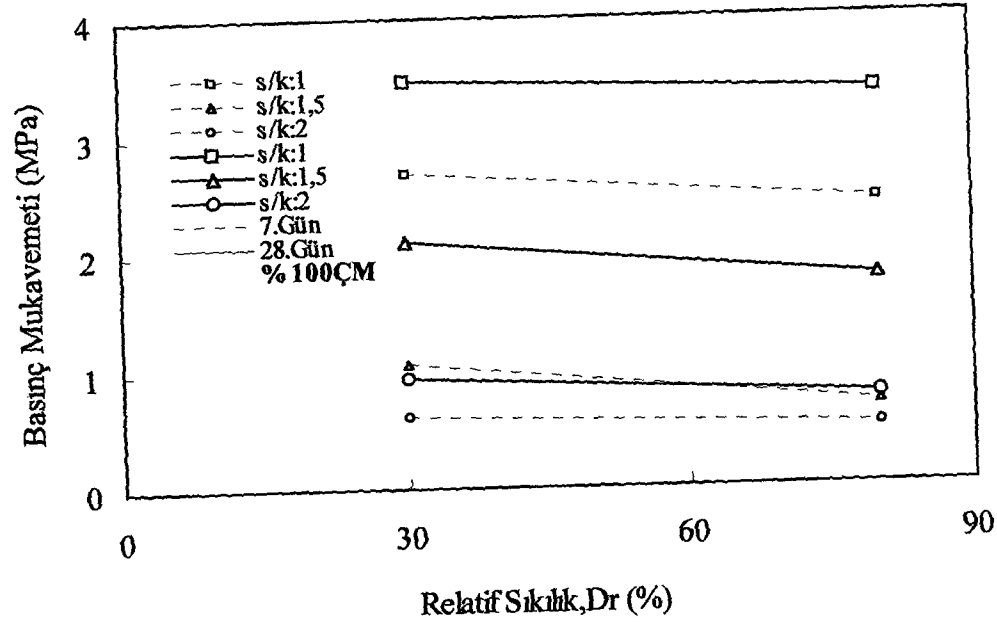
Şekil 4.49. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Elastisite Modülünün Su/Katı Oranı ile Değişimi ($Dr=0.80$, Karışım: Çimento, Silis Dumanı, Uçucu Kül, Kil)



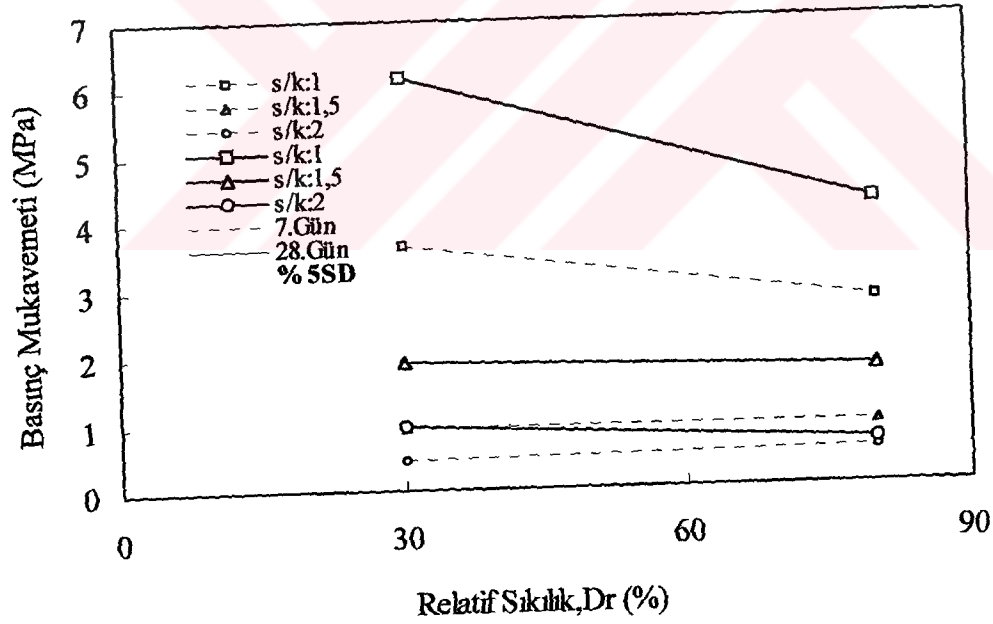
Şekil 4.50a. Enjeksiyon uygulanmış Numunelerin 7. Günde Elastisite Modülünün Katkı Tipi İle Değişimi (Dr=0.80)



Şekil 4.50b. Enjeksiyon uygulanmış Numunelerin 28. Günde Elastisite Modülünün Katkı Tipi İle Değişimi (Dr=0.80)



Şekil 4.51. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Relatif Sıklığı (Dr) ile Değişimi, (%100 Çimento)



Şekil 4.52. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Relatif Sıklığı (Dr) ile Değişimi, (SD/ÇM= 5/95)

4.4.4. D Serisi Deney Sonuçları

D serisi deneylerde $D_r=0.50$ sıklığında hazırlanan zemin numuneleri 100 kPa enjeksiyon basıncı altında 1/1, 1.5/1, 2/1 su/katı oranlarında çimento, çimento-silis dumanı (%5, 10, 20), çimento-uçucu kül (%5, 10) ve çimento-kil (%5, 10, 20, 50, 80, 100) karışımları ile enjeksiyona tabi tutulmuştur. Enjeksiyon sonucunda numunelerin 7. ve 28. gündeki permeabilite değerleri araştırılmış deney sonuçları Tablo 4.15' de özetlenmiştir. permeabilite-su/katı oranı (Şekil 4.53-55), permeabilite-zaman (Şekil 4.56-59 ve Şekil A.49-52), permeabilite-katkı yüzdesi (Şekil 4.60-62) ve permeabilite-basınç mukavemeti (Şekil 4.63-65) değişim grafikleri çizilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

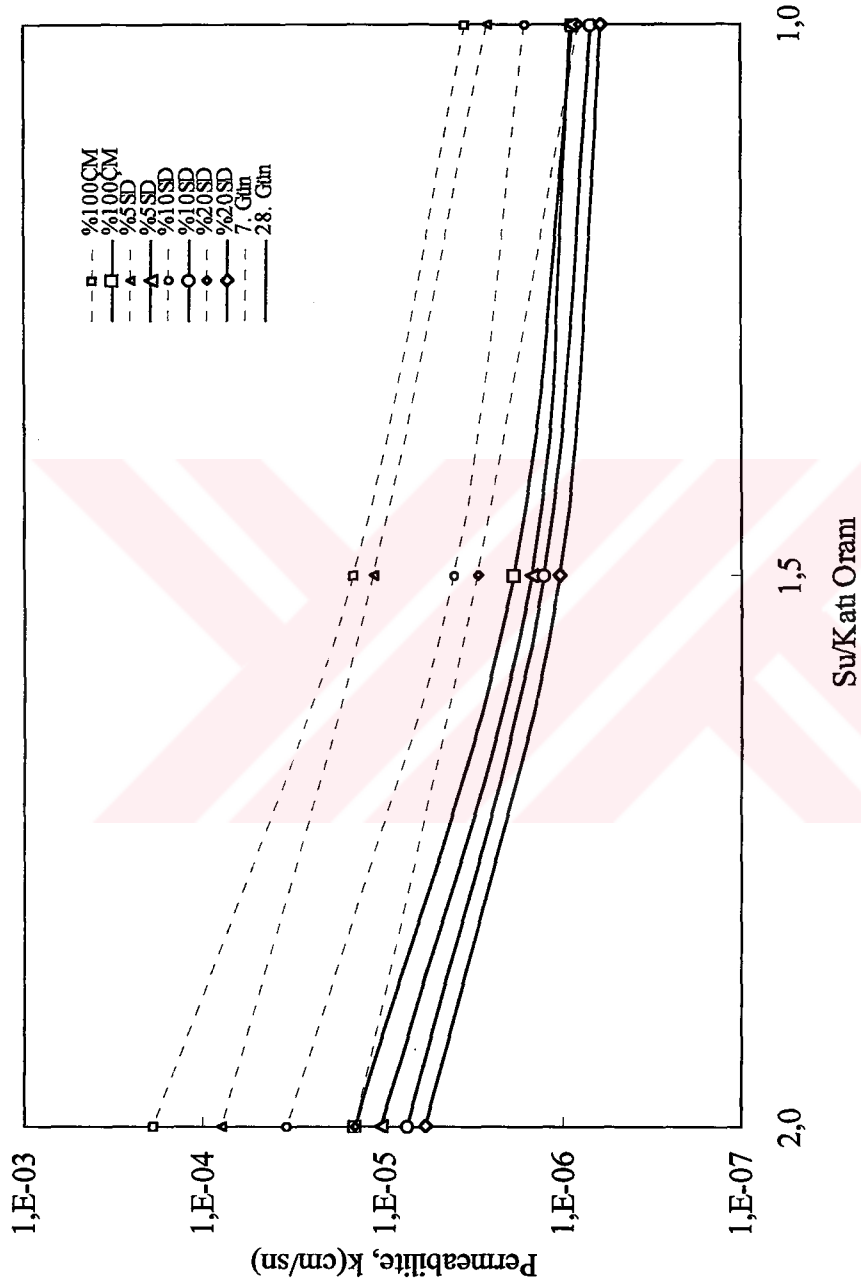
- Enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilitesi kullanılan karışımın su/katı oranının artması ile artmıştır.
- Permeabilite, %100 kil enjeksiyonu uygulanan numunelerin dışında, 28. günde 7. güne göre düşmüştür. 1.5/1 ve 2/1 Su/katı oranında, %100 kil enjeksiyonu uygulanmış numunelerde 7. ve 28. günde permeabilite önemli değişim göstermemiş ve aynı kalmıştır.
- Silis dumanı kullanılan numunelerin tümü 1/1, 1.5/1, 2/1 su/katı oranlarında, 7. ve 28. Günde, çimento enjeksiyonu uygulanmış numunelere göre permeabiliteyi düşürmüştür. Permeabilite %20 silis dumanı kullanılan numunelerde en düşük değeri (6.10^{-7} cm/sn) vermiştir.
- 7. Ve 28. Günde, su/katı oranı 1/1 ve 2/1 olan uçucu kül katkılı numunelerin permeabilitesi çimento enjeksiyonu uygulanmış numunelere göre artmıştır. Su/katı oranı 1.5/1 olan uçucu kül katkılı numunelerin permeabilitesi çimentoya göre önemli bir değişim göstermemiştir.
- %5, 10, 20 kil katkılı enjeksiyon uygulanmış numuneler, 1/1 su/katı oranında 7. ve 28. günde, çimento enjeksiyonu uygulanmış numunelere göre geçirgenliği artırmıştır. Aynı katkılar, 1.5/1 ve 2/1 su/katı oranında permeabiliteyi 7. günde düşürürken 28. günde artırmıştır. %50, 80, 100 kil katkılı numunelerde ise, 1.5/1 ve 2/1 su/katı oranlarında, 7. ve 28. günde çimentoya göre daha düşük değerler vermiştir. %5, 10, 20 Oranında kil katkılı numunelerin permeabilitesi, çimento enjeksiyonu uygulanan numunelerden büyük çıkmasının sebebi, numunelerin

yeterli oranda basınç mukavemeti vermemesinden ve kullanılan su/katı oranının karışımın enjeksiyonu zorlaştırmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

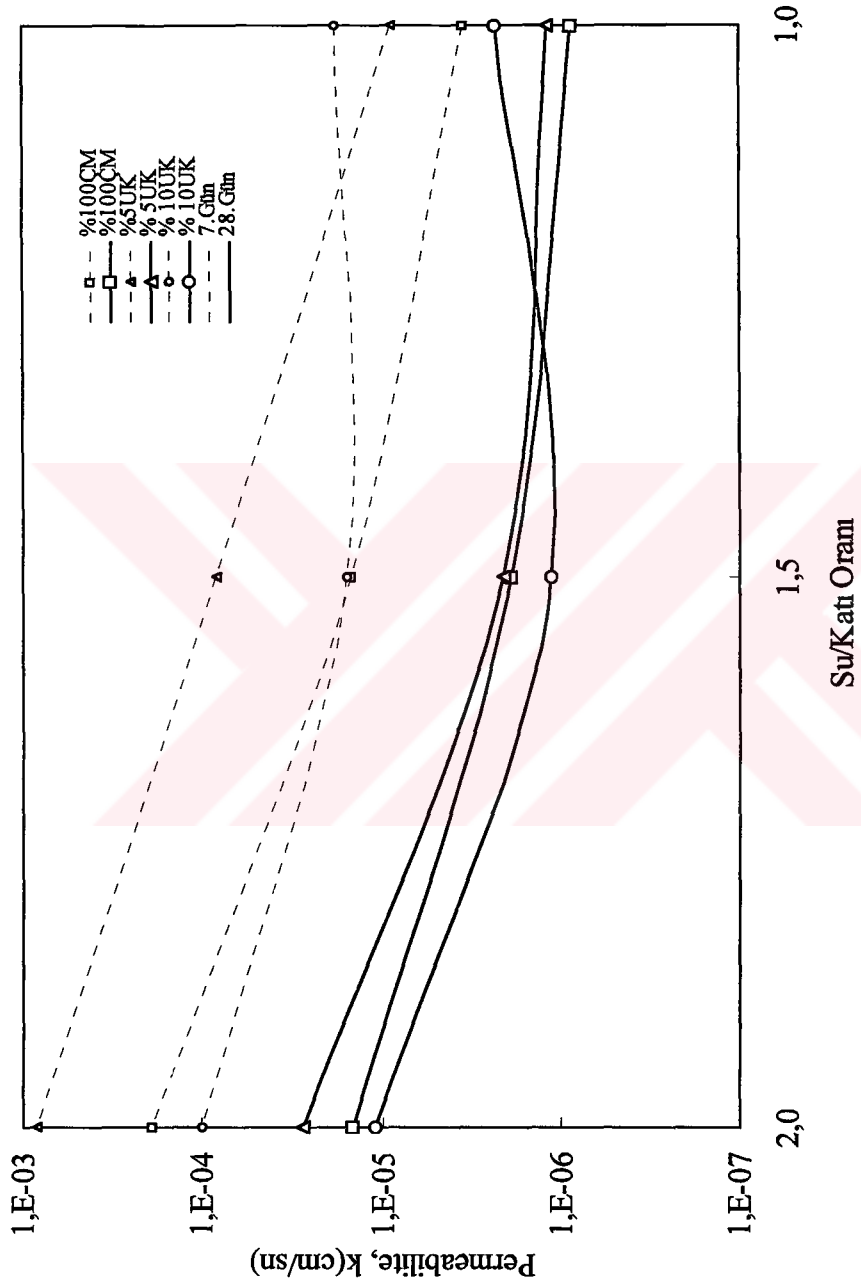
- Düşük oranlarda kil katkılı karışımların viskozitesinde ki artış, zeminin enjeksiyonunu zorlaştırmış ve permeabiliteyi çimentoya göre artırmıştır.

Tablo 4.15. D-Serisi Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Değerleri

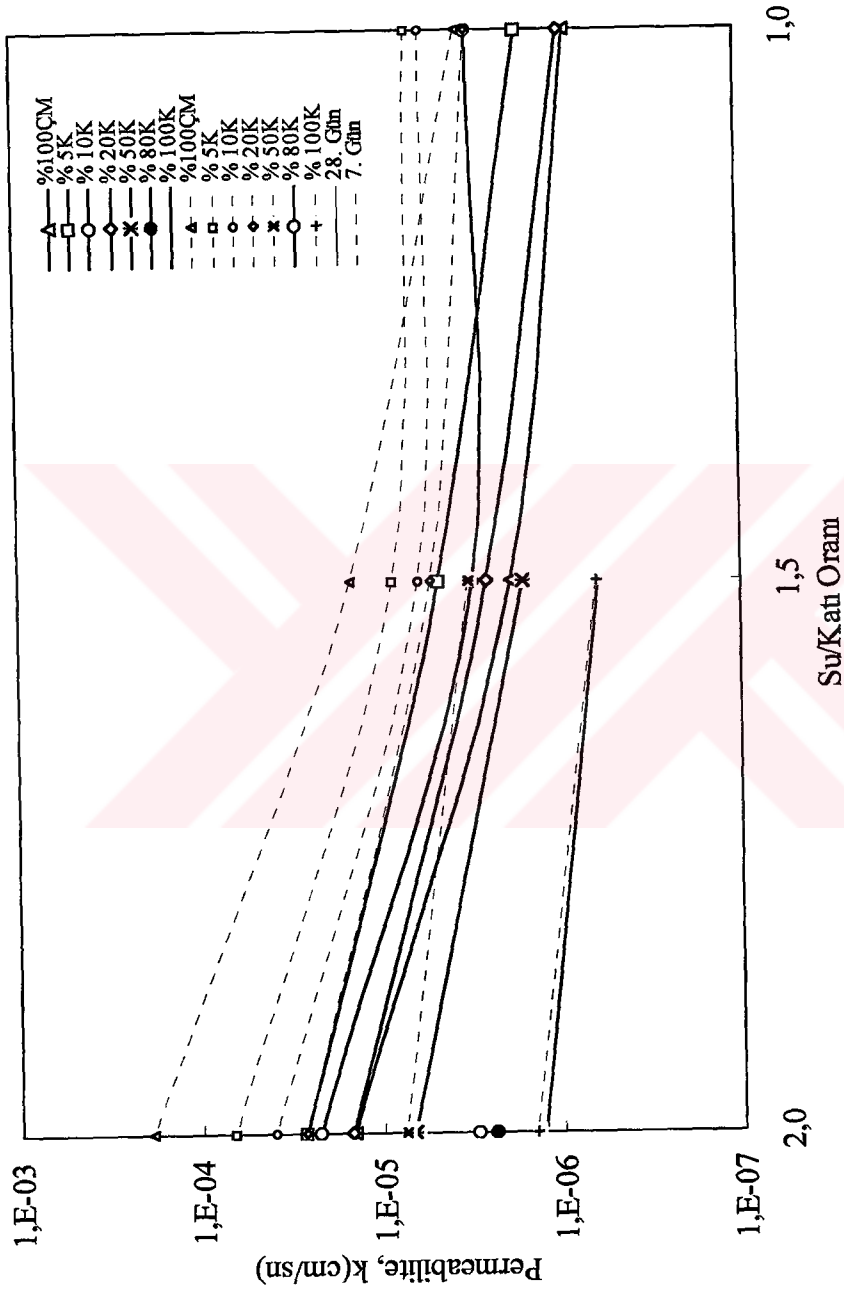
Deney No	Katkı Tipi	Katkı Oranı (%)	Su/katı (kg)	Dr (%)	Ep (kPa)	Permeabilite 7.Gün k (cm/sn)	Permeabilite 28.Gün k (cm/sn)
D101	ÇM	100	1/1	50	100	3.49E-6	8.70E-7
D102	ÇM	100	1.5/1	50	100	1.48E-5	1.91E-6
D103	ÇM	100	2/1	50	100	1.91E-4	1.46E-5
D201	SD/ÇM	5/95	1/1	50	100	2.63E-6	9.05E-7
D202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	50	100	1.14E-5	1.49E-6
D203	SD/ÇM	5/95	2/1	50	100	7.94E-5	1.04E-5
D211	SD/ÇM	10/90	1/1	50	100	1.63E-6	6.95E-7
D212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	50	100	4.13E-6	1.29E-6
D213	SD/ÇM	10/90	2/1	50	100	3.53E-5	7.5E-6
D221	SD/ÇM	20/80	1/1	50	100	8.07E-7	6.08E-7
D222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	50	100	2.99E-6	1.04E-6
D223	SD/ÇM	20/80	2/1	50	100	1.46E-5	5.91E-6
D301	UK/ÇM	5/95	1/1	50	100	8.92E-6	1.2E-6
D302	UK/ÇM	5/95	1.5/1	50	100	8.4E-5	2.11E-6
D303	UK/ÇM	5/95	2/1	50	100	8.3E-4	2.74E-5
D311	UK/ÇM	10/90	1/1	50	100	1.84E-5	2.35E-6
D312	UK/ÇM	10/90	1.5/1	50	100	1.56E-5	1.12E-6
D313	UK/ÇM	10/90	2/1	50	100	1.01E-4	1.1E-5
D401	K/ÇM	5/95	1/1	50	100	6.7E-6	1.62E-6
D402	K/ÇM	5/95	1.5/1	50	100	8.62E-5	4.86E-6
D403	K/ÇM	5/95	2/1	50	100	6.68E-5	2.68E-5
D411	K/ÇM	10/90	1/1	50	100	5.59E-6	3.06E-6
D412	K/ÇM	10/90	1.5/1	50	100	6.18E-6	3.12E-6
D413	K/ÇM	10/90	2/1	50	100	3.95E-5	2.24E-5
D421	K/ÇM	20/80	1/1	50	100	3.11E-6	9.5E-7
D422	K/ÇM	20/80	1.5/1	50	100	5.29E-6	2.6E-6
D423	K/ÇM	20/80	2/1	50	100	2.74E-5	1.49E-5
D431	K/ÇM	50/50	1/1	50	100	-	-
D432	K/ÇM	50/50	1.5/1	50	100	3.2E-6	1.61E-6
D433	K/ÇM	50/50	2/1	50	100	7.61E-6	6.75E-6
D441	K/ÇM	80/20	1/1	50	100	-	-
D442	K/ÇM	80/20	1.5/1	50	100	-	-
D443	K/ÇM	80/20	2/1	50	100	3.02E-6	2.37E-6
D451	KİL	100	1/1	50	100	-	-
D452	KİL	100	1.5/1	50	100	6.25E-7	6.16E-7
D453	KİL	100	2/1	50	100	1.43E-6	1.28E-6



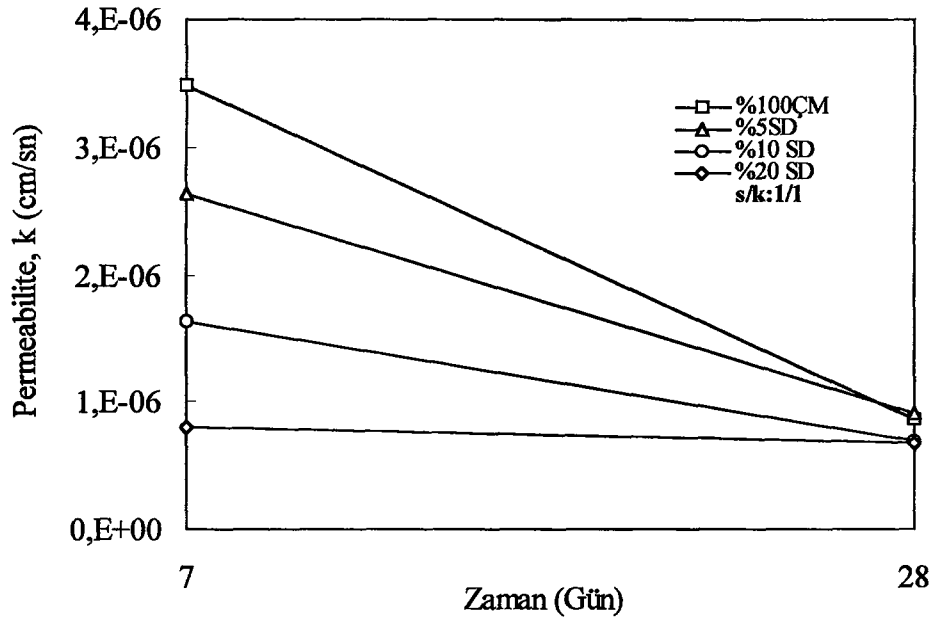
Şekil 4. 53. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Su/katı Oranı İle Değişim Eğrileri
($D_r=0.50$, Karışım: Çimento Ve Silis Dumanı)



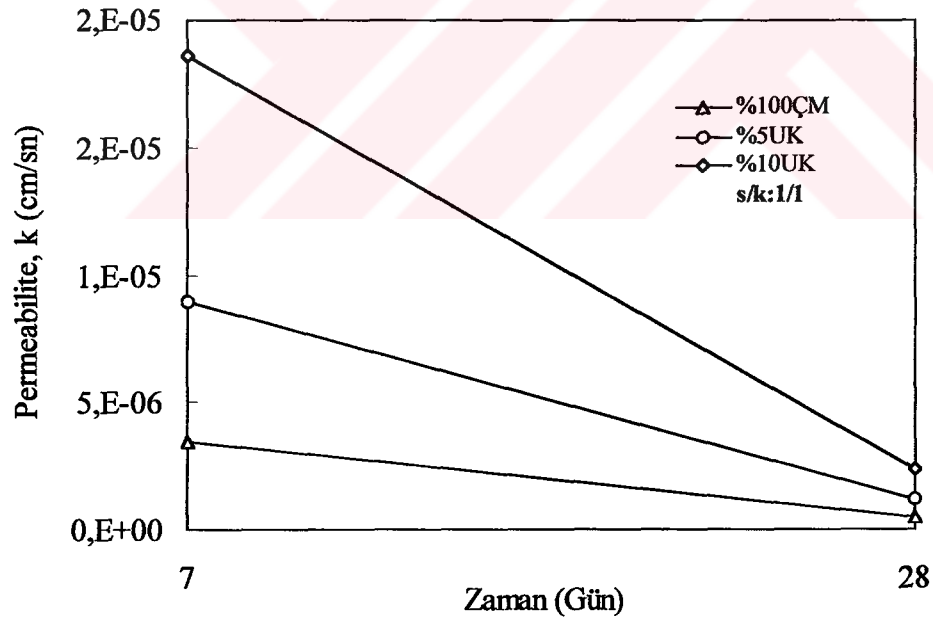
Şekil 4.54. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Su/katı Oranı İle Değişim Eğrileri
(Dr=0.50, Karışım: Çimento Ve Uçucu Kül)



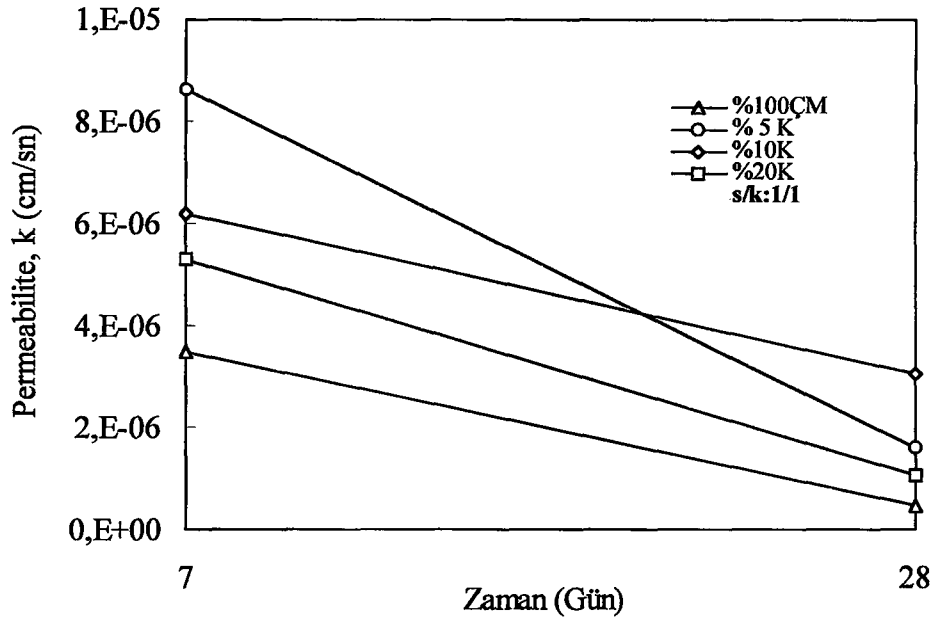
Şekil 4.55. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Su/katı Oranı İle Değişim Eğrileri
(Dr=0.50, Karışım: Çimento Ve Kil)



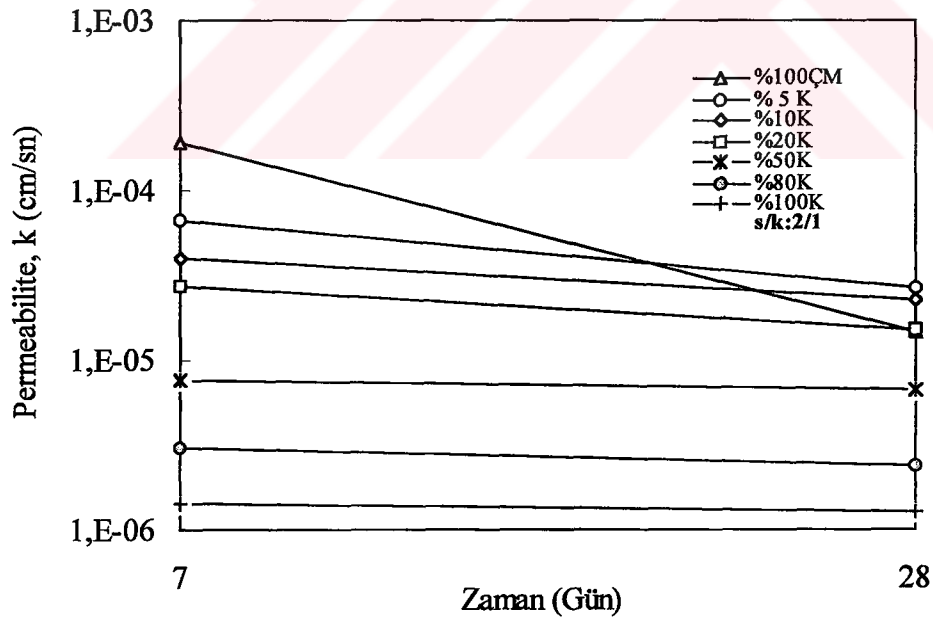
Şekil 4. 56. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Katsayısının Zamanla Değişimi ($D_r = 0.50$, Karışım: Çimento ve Silis Dumanı, Su/Katı= 1/1)



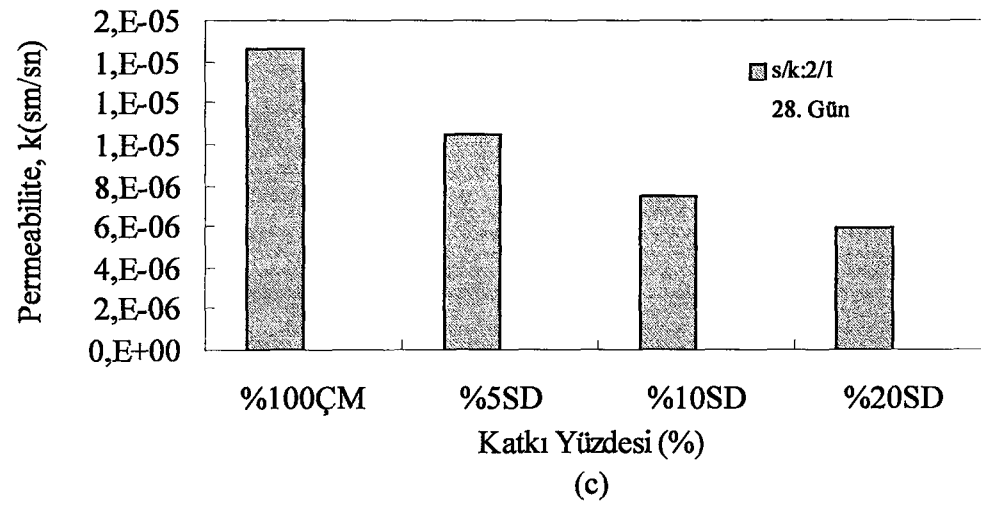
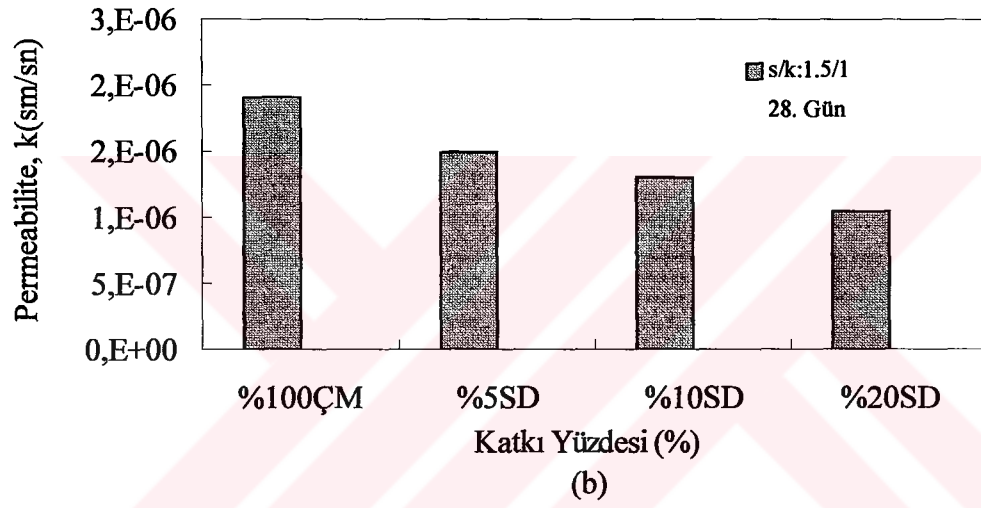
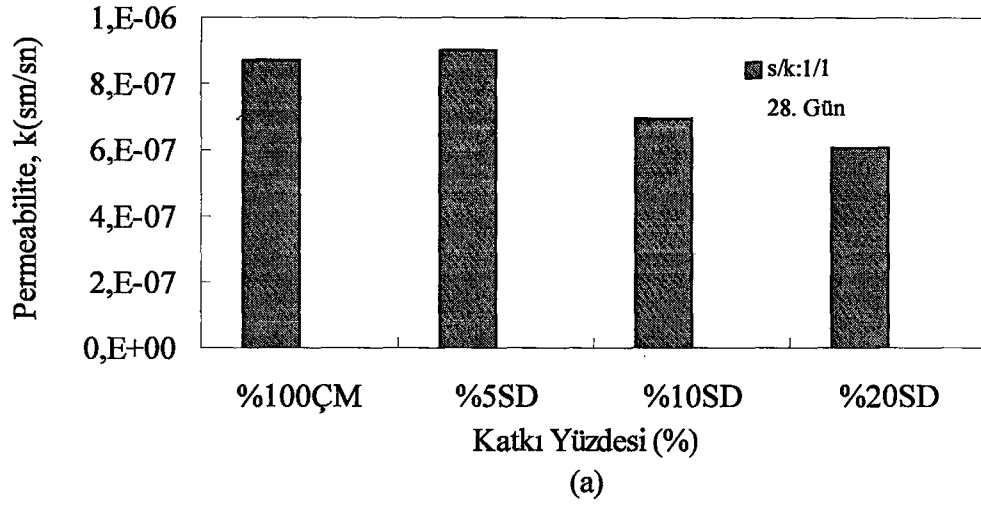
Şekil 4. 57. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Katsayısının Zamanla Değişimi ($D_r = 0.50$, Karışım: Çimento ve Uçucu Kül, Su/Katı= 1/1)



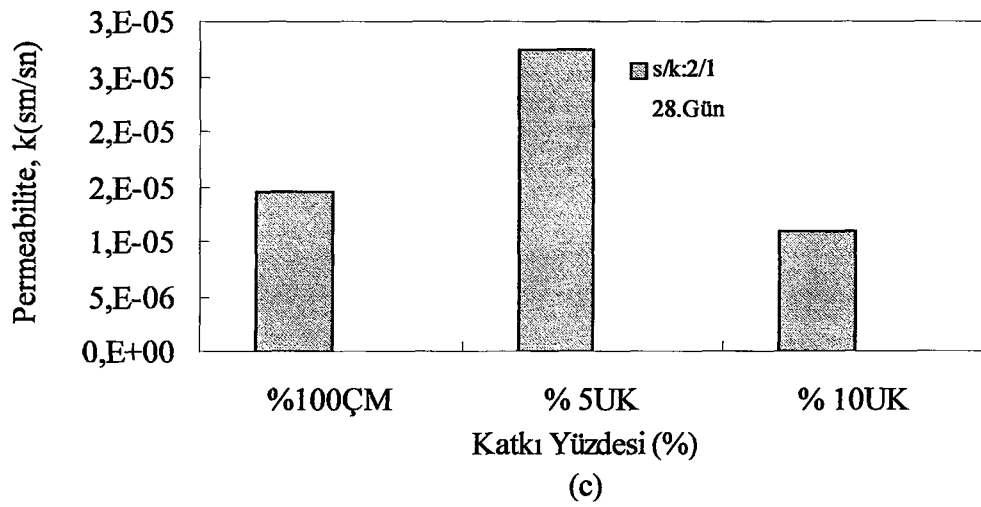
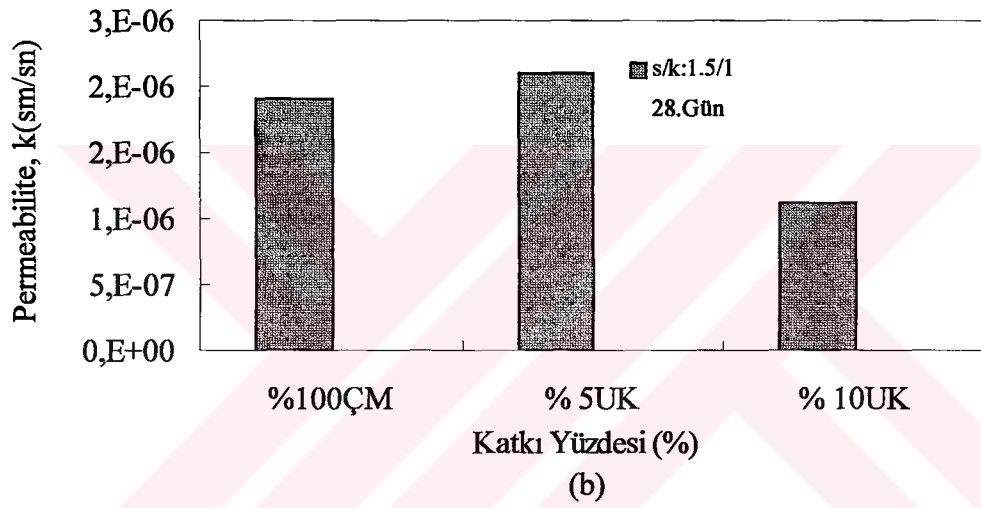
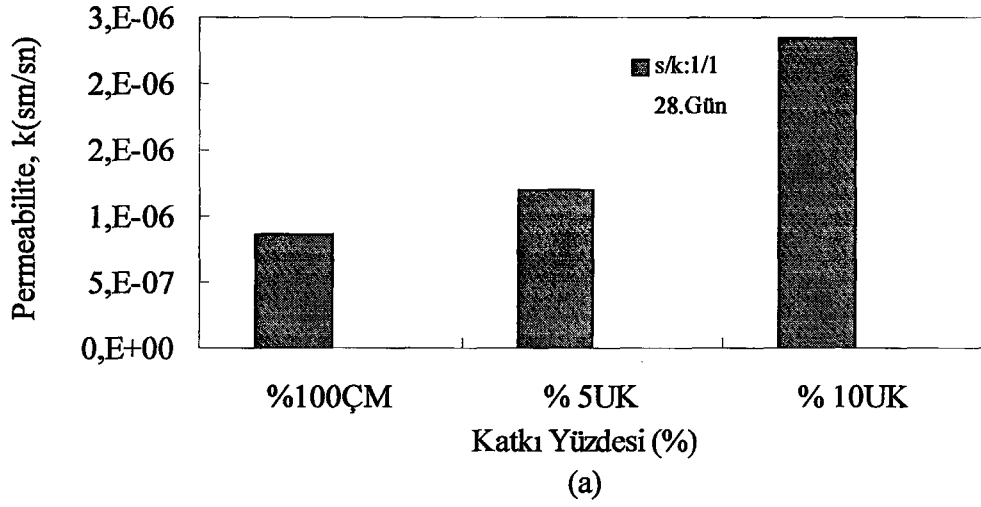
Şekil 4. 58. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Geçirgenlik Katsayısının Zamanla Değişimi ($D_r = 0.50$, Karışım: Çimento ve Kil, Su/Katı= 1/1)



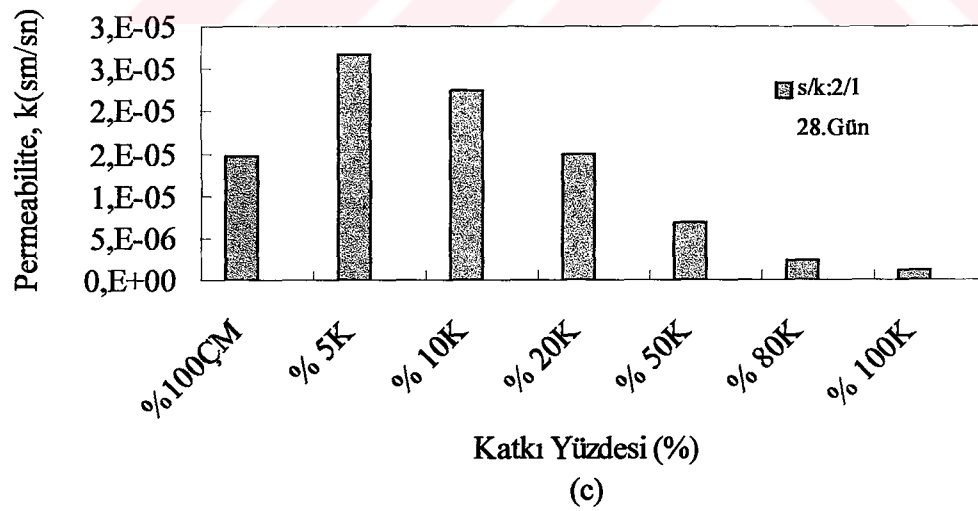
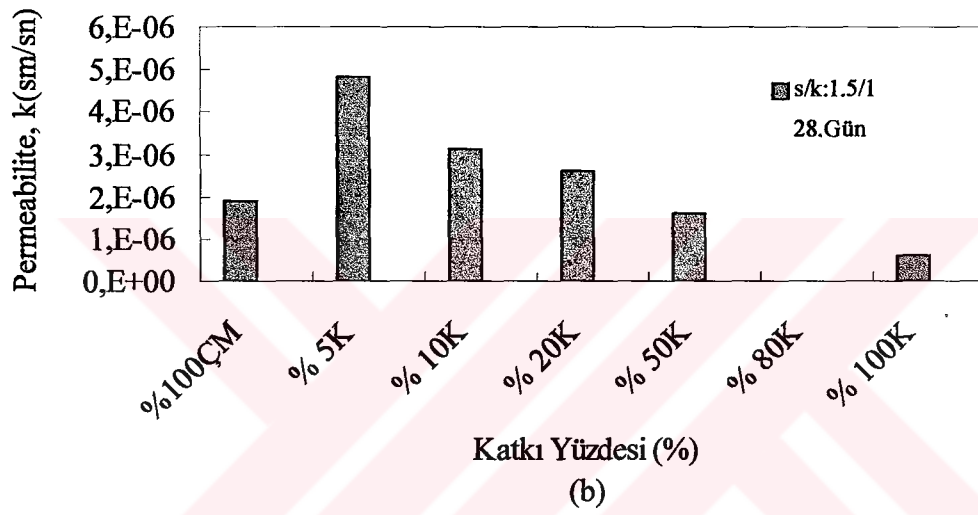
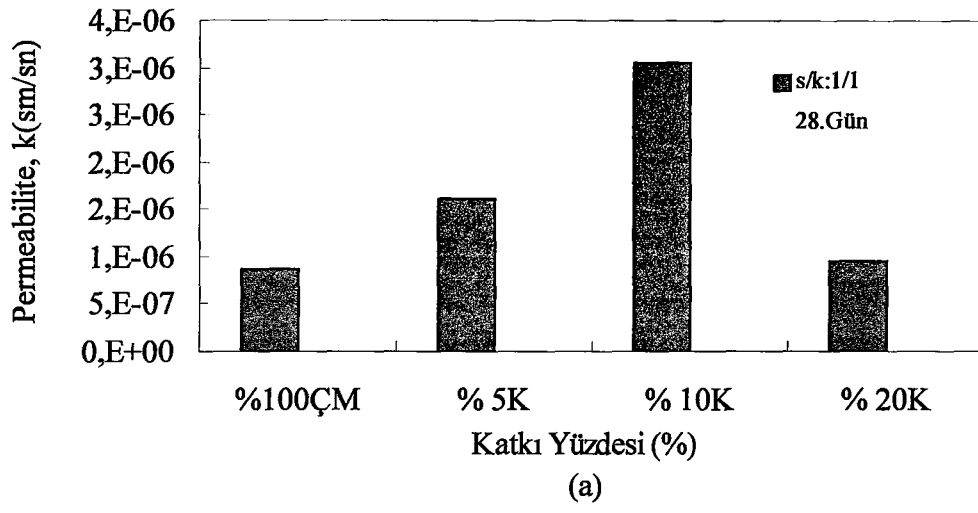
Şekil 4. 59. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Geçirgenlik Katsayısının Zamanla Değişimi ($D_r = 0.50$, Karışım: Çimento ve Kil, Su/Katı= 2/1)



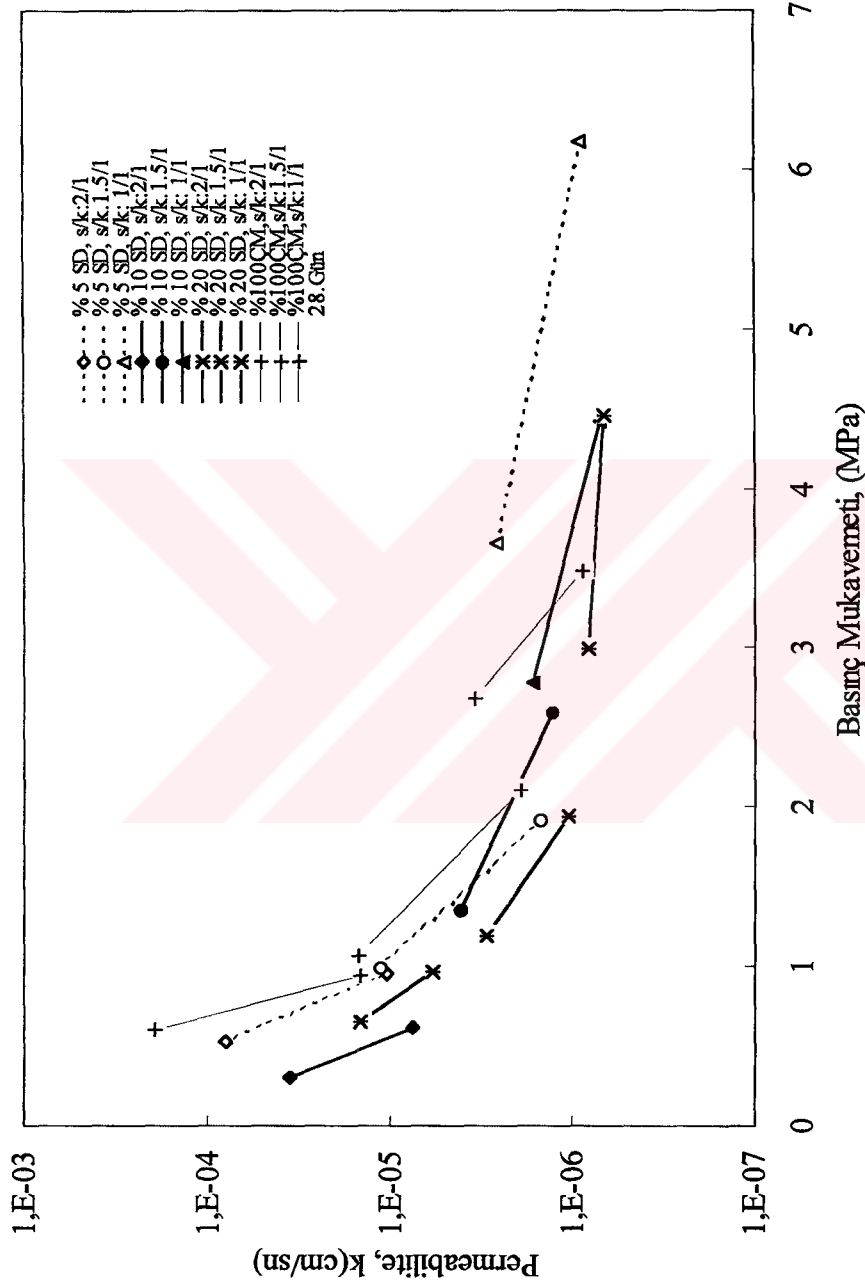
Şekil 4.60. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerinde Permeabilitenin Silis Dumanı Yüzdesi İle Değişimi (a) $s/k=1/1$, (b) $s/k=1.5/1$, (c) $s/k=2/1$



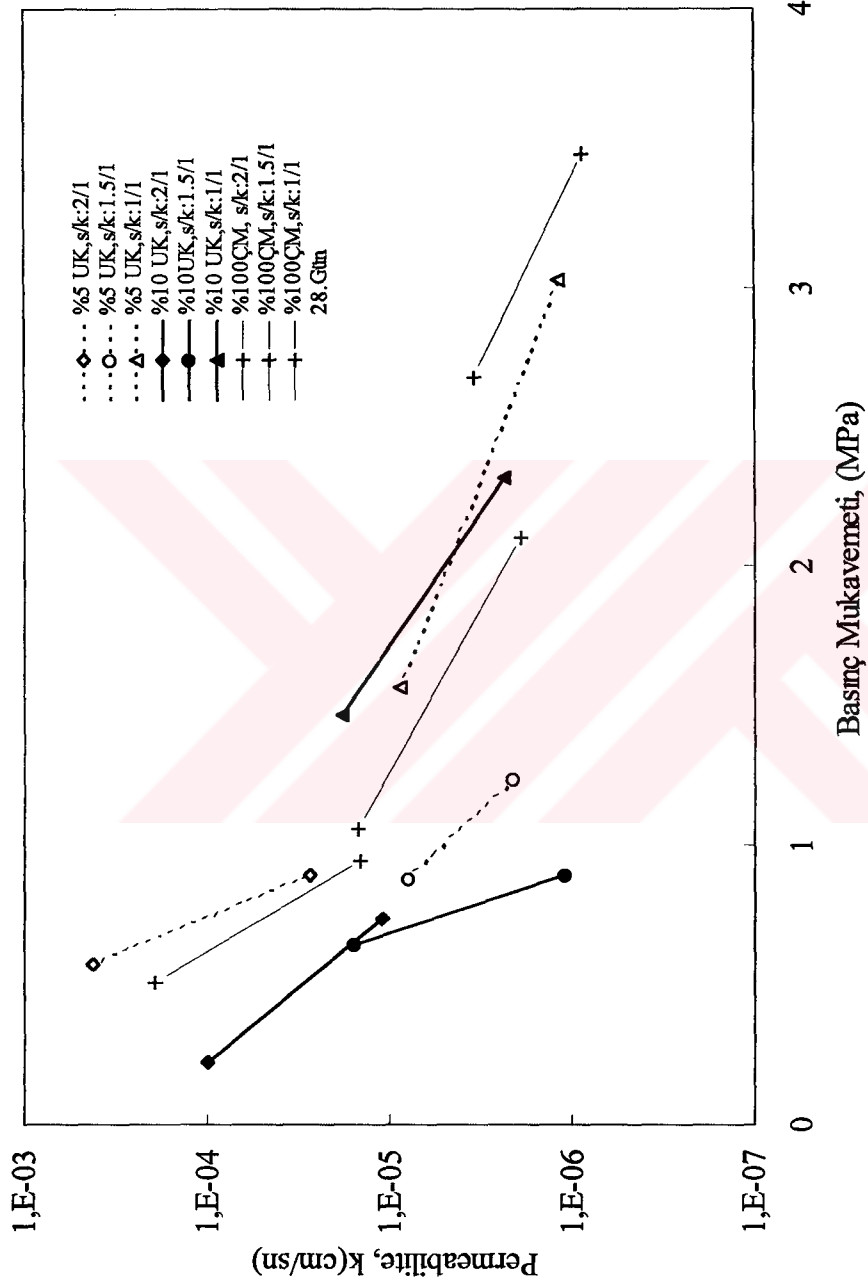
Şekil 4.61. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerinde Permeabilitenin Uçucu Kül Yüzdesi İle Değişimi (a) $s/k=1/1$, (b) $s/k=1.5/1$, (c) $s/k=2/1$



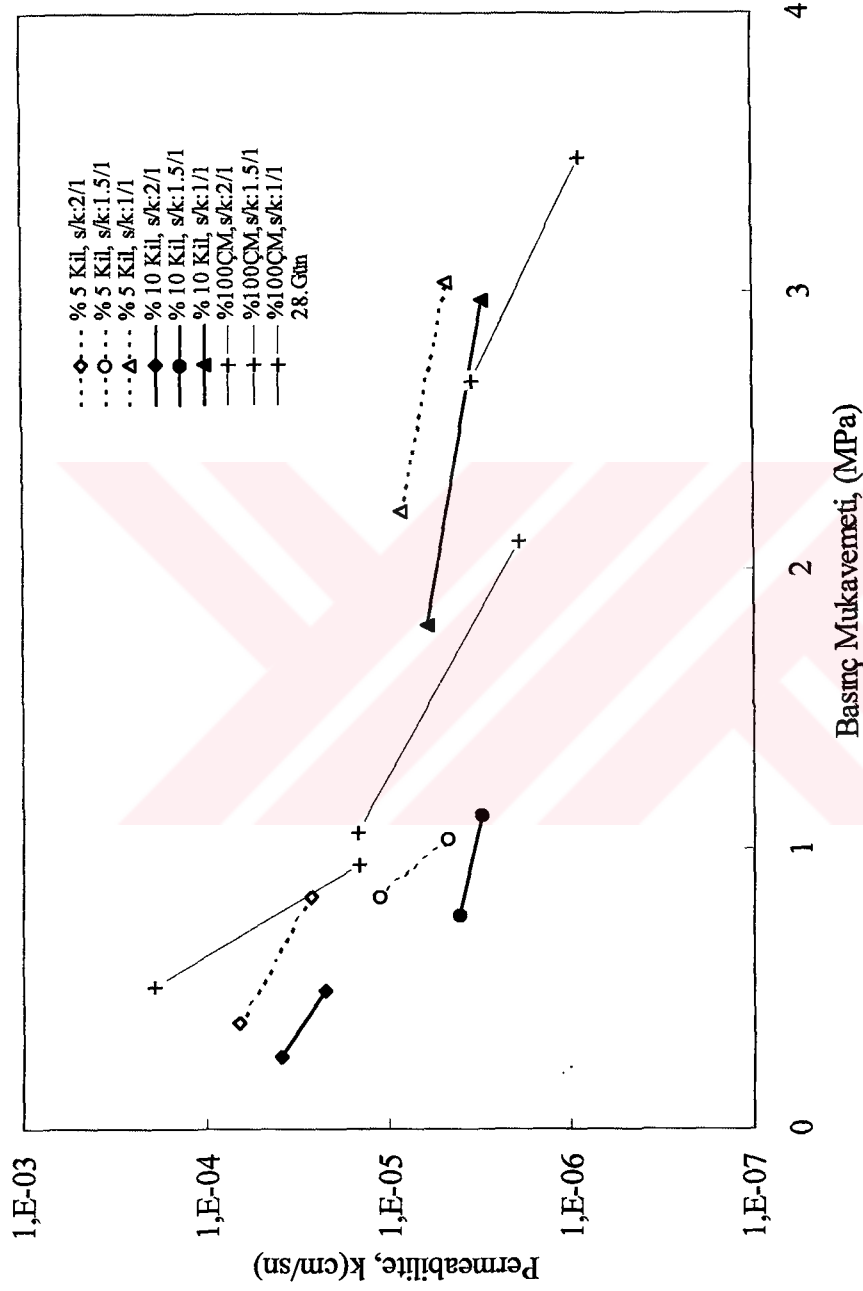
Şekil 4.62. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerinde Permeabilitenin Kil Yüzdesi İle Değişimi (a) $s/k=1/1$, (b) $s/k=1.5/1$, (c) $s/k=2/1$



Şekil 4.63. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Baskın Mukavemeti İle Değişimi
(Karışım: Çimento Ve Silis Dumanı)



Şekil 4.64. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Basma Mukavemeti İle Değişimi
(Karışım: Çimento Ve Uçucu Kül)



Şekil 4.65. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Basınç Mukavemeti İle Değişimi
(Karışım: Çimento Ve Kil)

- Enjeksiyon uygulanmış numunelerin permeabilitesi zamanla düşüş göstermiş ve 28. Günde maksimum değerlere ulaşmıştır.
- Kil katkılı enjeksiyon uygulanmış numunelerde çimentoya göre en düşük geçirgenliği, %100, 80, 50 kil katkılı numuneler vermiştir.
- Permeabilite deneyleri sonunda, silis dumanı ve %80, 100 oranında kil katkılı karışımlarla enjeksiyon uygulanmış numunelerin geçirgenliği çimento enjeksiyonu uygulanmış numunelere göre düşürürken uçucu kül ve düşük oranlarda kil karışımlar geçirgenliği artırmıştır.
- Basınç mukavemeti artarken geçirgenlik düşmüştür. En büyük basınç mukavemetini ve en düşük permeabiliteyi su/katı oranı 1/1 olan numuneler vermiştir.

4.4.5. E Serisi Deney Sonuçları

Bu seri deneylerde, su/katı oranı 1/1, 1.5/1, 2/1 olan karışımların fiziksel ve reolojik özellikleri belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen çökelme ve viskozite değerleri kullanılan malzemenin yüzdesi, su/katı oranı, basınç mukavemeti ve geçirgenlik üzerindeki değişimleri araştırılmıştır. Genel sonuçlar Tablo 4.16' da verilmiştir.

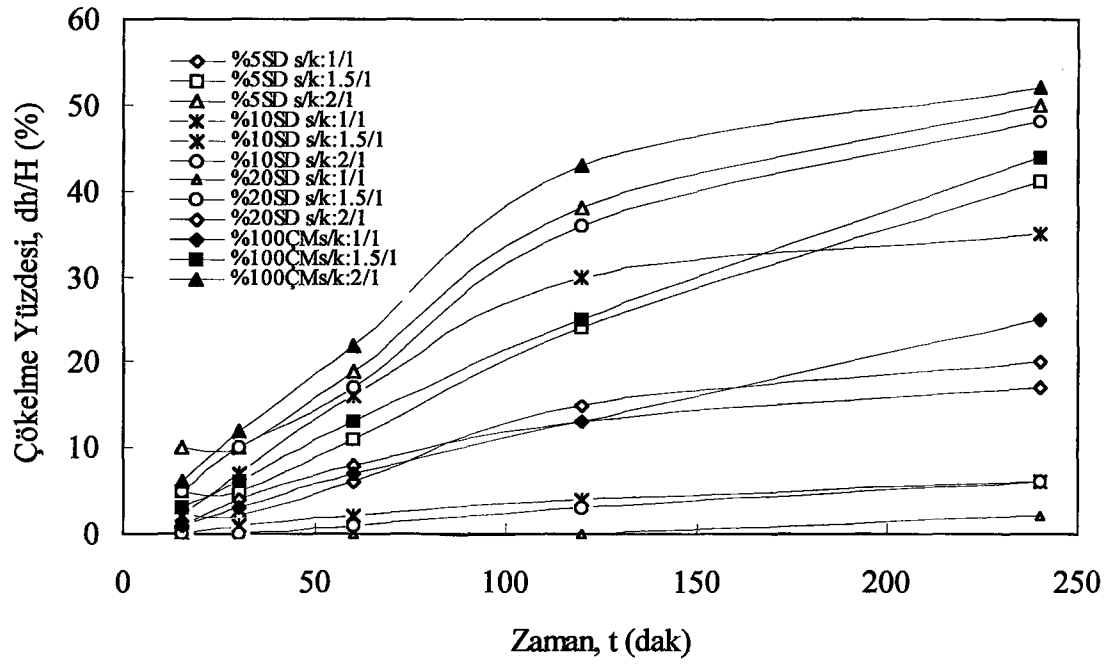
E-serisi deneylerde enjeksiyon uygulamalarında kullanılan karışımların çimento, çimento-silis dumanı (%5, 10, 20), çimento-uçucu kül (%5, 10) ve çimento-kil (%5, 10, 20, 50, 80, 100) karışımlarının 1/1, 1.5/1, 2/1 su/katı oranlarında çökelme ve viskozite (Marsh hunisi ve dinamik viskozite) değerleri belirlenmiştir. Viskozitenin enjeksiyon basıncına, numunelerin basınç mukavemetine ve geçirgenliğine etkisi araştırılmıştır. Çökelme-zaman (Şekil 4.66,68), çökelme-su/katı oranı (Şekil 4.67), çökelme-katkı yüzdesi (Şekil 4.69), çökelme-basınç mukavemeti (Şekil 4.70), çökelme-permeabilite (Şekil 4.71) ve viskozite-su/katı oranı (Şekil 4.72), viskozite-katkı yüzdesi (Şekil 4.73), arasındaki değişimler grafikler üzerinde çizilmiş ve deney sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

- Çökelme yüzdesi tüm numuneler için su/katı oranına paralel olarak artmış, viskozite değeri ters orantılı olarak düşmüştür.

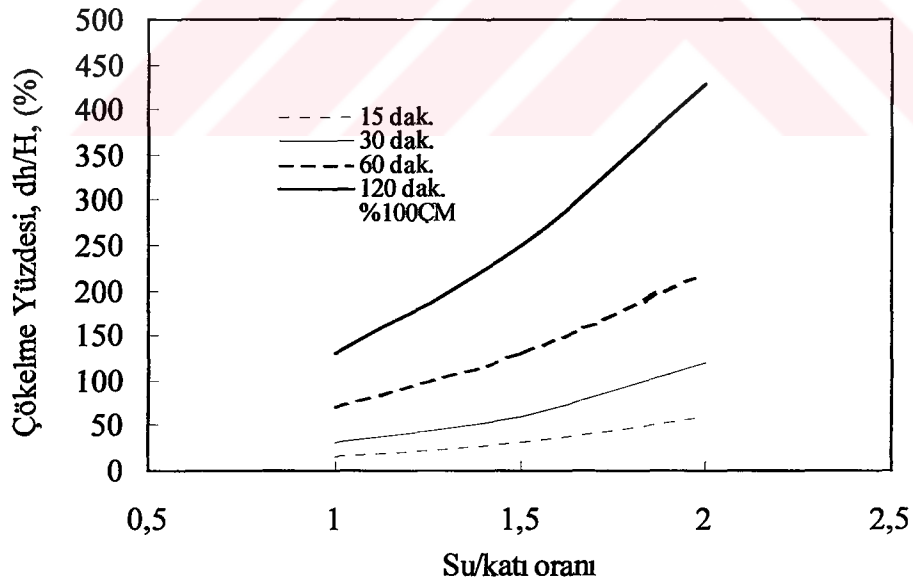
- Silis dumanı, uçucu kül ve kil katkıların kullanıldığı karışımların çökelme yüzdesi kullanılan katkı yüzdesi ile ters orantılı olarak azalmış ve viskozite değeri buna paralel olarak artmıştır.
- Silis dumanı kullanılan numunelerde en düşük çökelme yüzdesi %20 silis dumanı kullanılan numuneler vermiş ve sıfıra yaklaşmıştır. En büyük viskozite değerini 1/1 su/katı oranında %20 silis dumanı katkılı karışımlar vermiştir.
- Numunelerin çökelme yüzdesi 240 dakika boyunca okunmuş ve okunan suyun hacimsel olarak miktarı toplam hacme oranı olarak alınmıştır.
- Viskozite değeri karışımdan sonra mars hunisi ve rotasyonel viskozimetre (200 dev/dak) ile belirlenmiştir (Tablo 4.16).
- Yüksek viskoziteli silis dumanı katkılı karışımlar basınç mukavemetini artırmış ve geçirgenliği azaltmıştır. Çökelme yüzdesi artışı ile basınç mukavemeti azalmış ve geçirgenlik artmıştır.
- Basınç mukavemeti çökelme yüzdesi ile ters orantılı olarak azalırken, viskozite ile doğru orantılı bir artış göstermiştir. Uçucu kül katkılı enjeksiyon uygulanmış numunelerin geçirgenliği çökelme yüzdesiyle artarken viskozite ile düşmüştür.
- Uçucu kül katkılı karışımlarda çökelme yüzdesi, kullanılan uçucu kül oranı ile azalmış ve 1/1 su/katı oranında en düşük değeri vermiştir. Bu karışımlar çimentoya göre çökelme yüzdesini düşürmüş ve viskozite değerini artırmıştır. En düşük çökelme su/katı oranı 1/1 olan %5 uçucu kül karışımlarında gerçekleşmiştir.
- Kil katkılı karışımların çökelme yüzdesi kullanılan kil yüzdesi ile azalarak sıfıra yaklaşmıştır. En düşük çökelme değeri %80 kil kullanılan numunelerde olmuş ve sade kilin (%100) kullanıldığı karışımlarda çökelme olmamıştır.
- Kil karışımlarının viskozite değeri kilin yüzdesi ile doğru orantılı bir artış göstermiş ve en büyük değer %80 kil numunelerde elde edilmiştir. %100 kil katkılı numunelerde viskozite değeri %80'e göre düşüş göstermiştir. Çimento ve kil tanelerinin süspansiyon içinde bir birini askı halinde tutmasından viskozite daha yüksek çıkmıştır.
- Viskozite ile geçirgenlik düşerken basınç mukavemeti artış göstermiştir, yalnız kil katkılı enjeksiyon uygulanmış numunelerde basınç mukavemeti viskozite ile önemli bir artış göstermemiştir. Bu numunelerde basınç mukavemeti viskoziteden daha çok kullanılan karışımın kil yüzdesi ile değişim göstermiştir.

Tablo 4.16. Karışımların Çökelme Ve Viskozite Deney Sonuçları

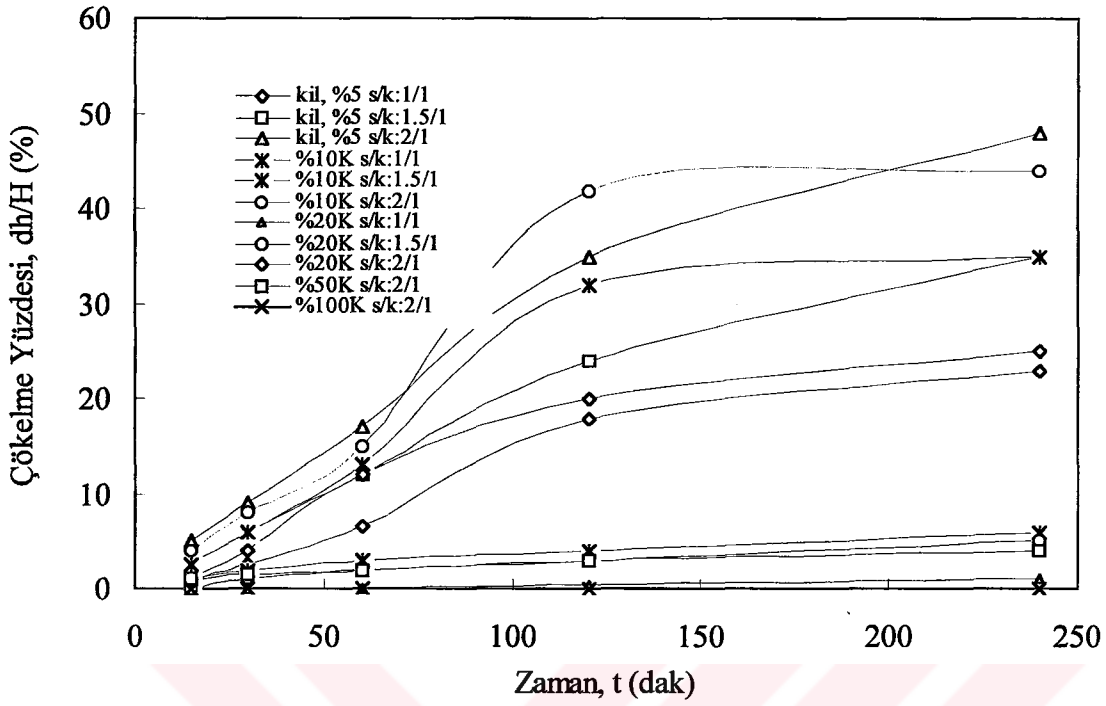
Deney No	Katkı	Katkı Oranı (%)	Su/katı (kg)	Çökelme ($\Delta h/H$) (%)	Marsh Hunisi (sn)	Rotasyonel Viskozite (cp)
E101	ÇM	100	1/1	25	34	6400
E102	ÇM	100	1.5/1	44	33	3700
E103	ÇM	100	2/1	52	32	3000
E201	SD/ÇM	5/95	1/1	22	34	7600
E202	SD/ÇM	5/95	1.5/1	41	33	4500
E203	SD/ÇM	5/95	2/1	50	32.5	3000
E211	SD/ÇM	10/90	1/1	6	36.2	9000
E212	SD/ÇM	10/90	1.5/1	35	34	5300
E213	SD/ÇM	10/90	2/1	48	32.3	3600
E221	SD/ÇM	20/80	1/1	2	38	14400
E222	SD/ÇM	20/80	1.5/1	6	35	6400
E223	SD/ÇM	20/80	2/1	17	33.2	4700
E301	UK/ÇM	5/95	1/1	22	34	8900
E302	UK/ÇM	5/95	1.5/1	42	33	4100
E303	UK/ÇM	5/95	2/1	44	32	3400
E311	UK/ÇM	10/90	1/1	25	35	9900
E312	UK/ÇM	10/90	1.5/1	39	33	4300
E313	UK/ÇM	10/90	2/1	44	32.2	3500
E401	K/ÇM	5/95	1/1	23	34	7800
E402	K/ÇM	5/95	1.5/1	35	33.2	4600
E403	K/ÇM	5/95	2/1	48	32.8	3300
E411	K/ÇM	10/90	1/1	6	34.5	10400
E412	K/ÇM	10/90	1.5/1	35	33.4	5000
E413	K/ÇM	10/90	2/1	44	33	3600
E421	K/ÇM	20/80	1/1	1	38	19900
E422	K/ÇM	20/80	1.5/1	5	34.5	7800
E423	K/ÇM	20/80	2/1	25	33.8	5100
E431	K/ÇM	50/50	1/1	-	-	-
E432	K/ÇM	50/50	1.5/1	0	40	19800
E433	K/ÇM	50/50	2/1	4	35	7800
E441	K/ÇM	80/20	1/1	-	-	-
E442	K/ÇM	80/20	1.5/1	-	-	-
E443	K/ÇM	80/20	2/1	0	46	11400
E451	KİL	100	1/1	-	-	-
E452	KİL	100	1.5/1	0	-	17700
E453	KİL	100	2/1	0	42	11400



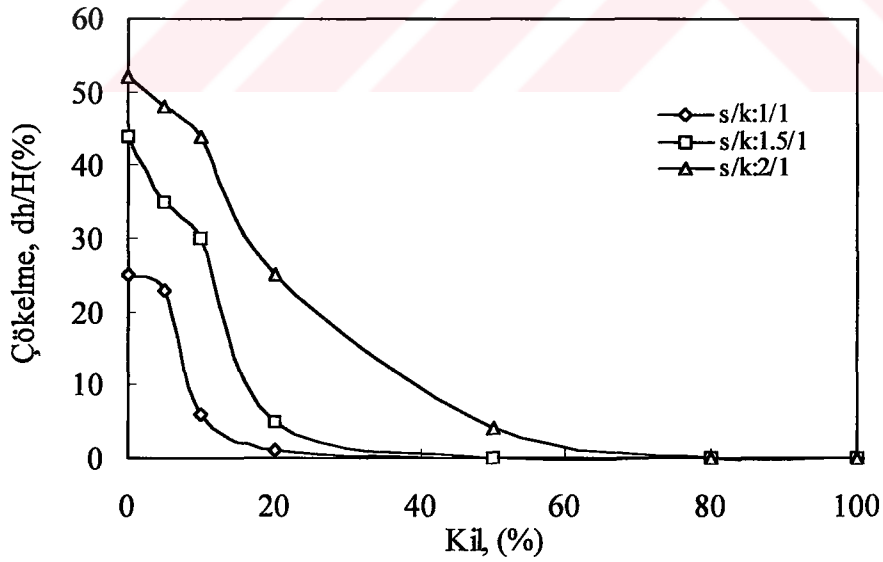
Şekil 4.66. Çimento, Silis Dumanı Katkılı Karışımların Çökelme Yüzdesinin Zamanla Değişimi



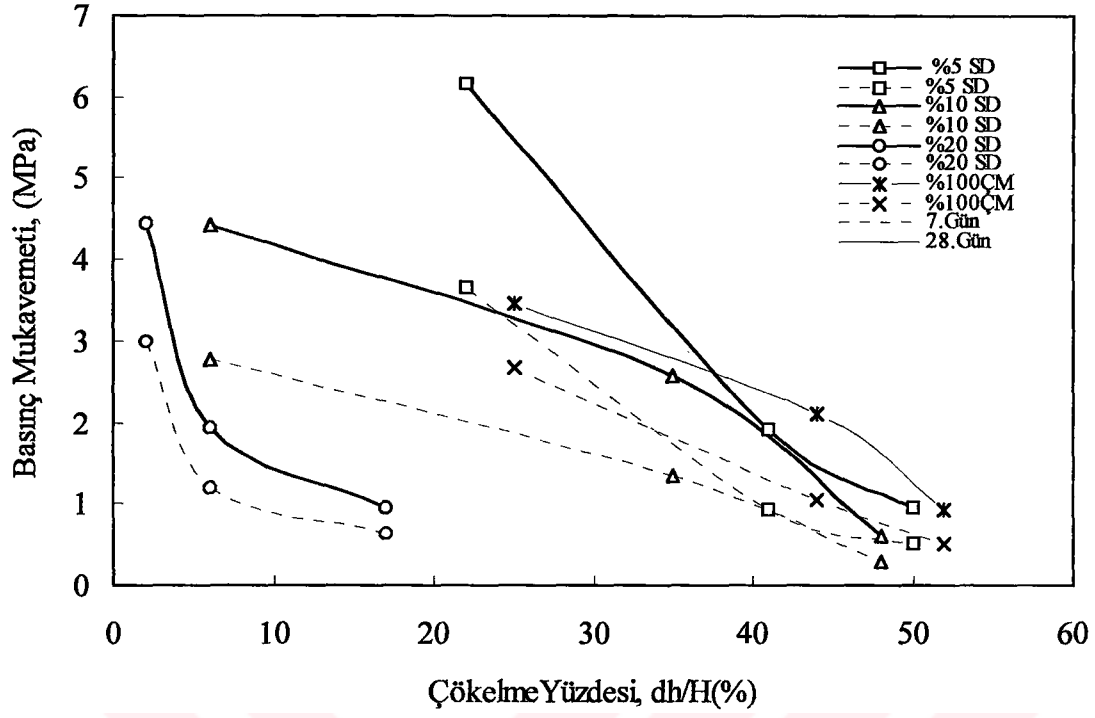
Şekil 4.67. Çimento Karışımların Su/Katı Oranı İle Çökelme Yüzdesinin Değişimi (Akbulut ve Sağlamer, 1999)



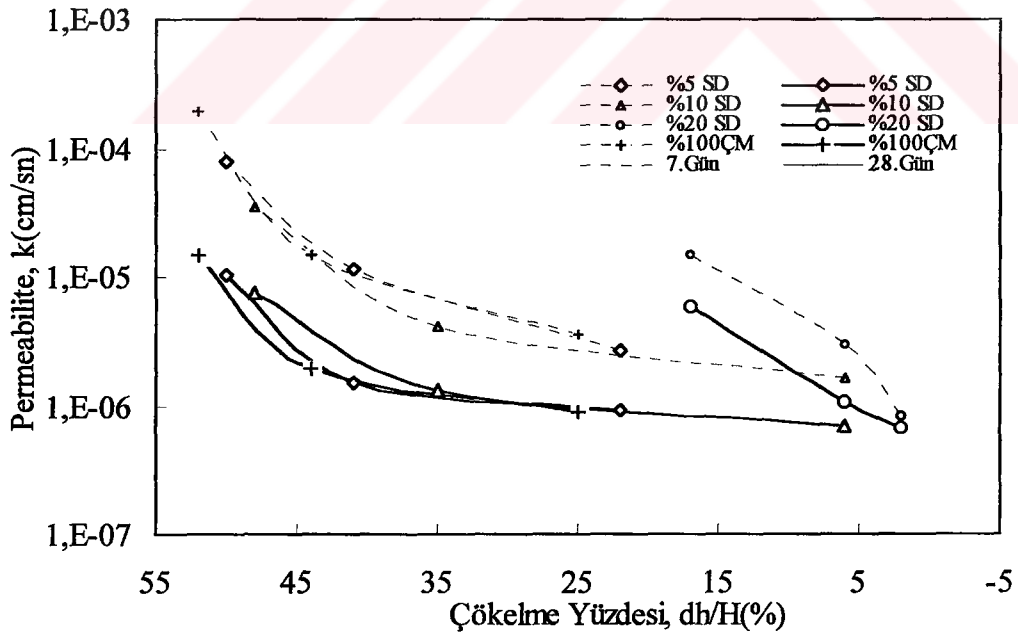
Şekil 4.68. Kil Katkılı Karışımların Çökelme Yüzdesinin Zamanla Değişimi



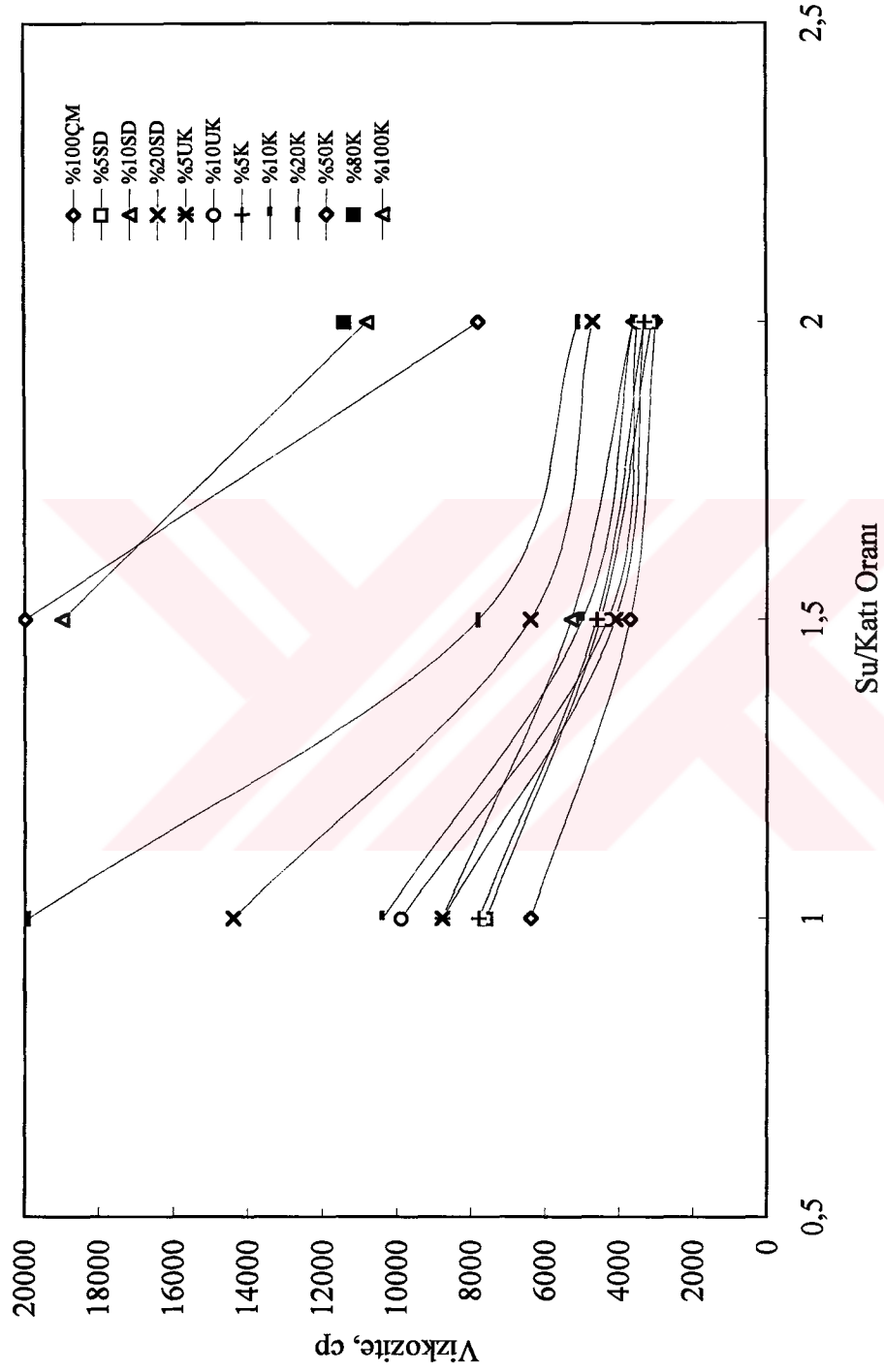
Şekil 4.69. Kil Katkılı Karışımların Çökelme Yüzdesinin Kil Yüzdesi İle Değişimi



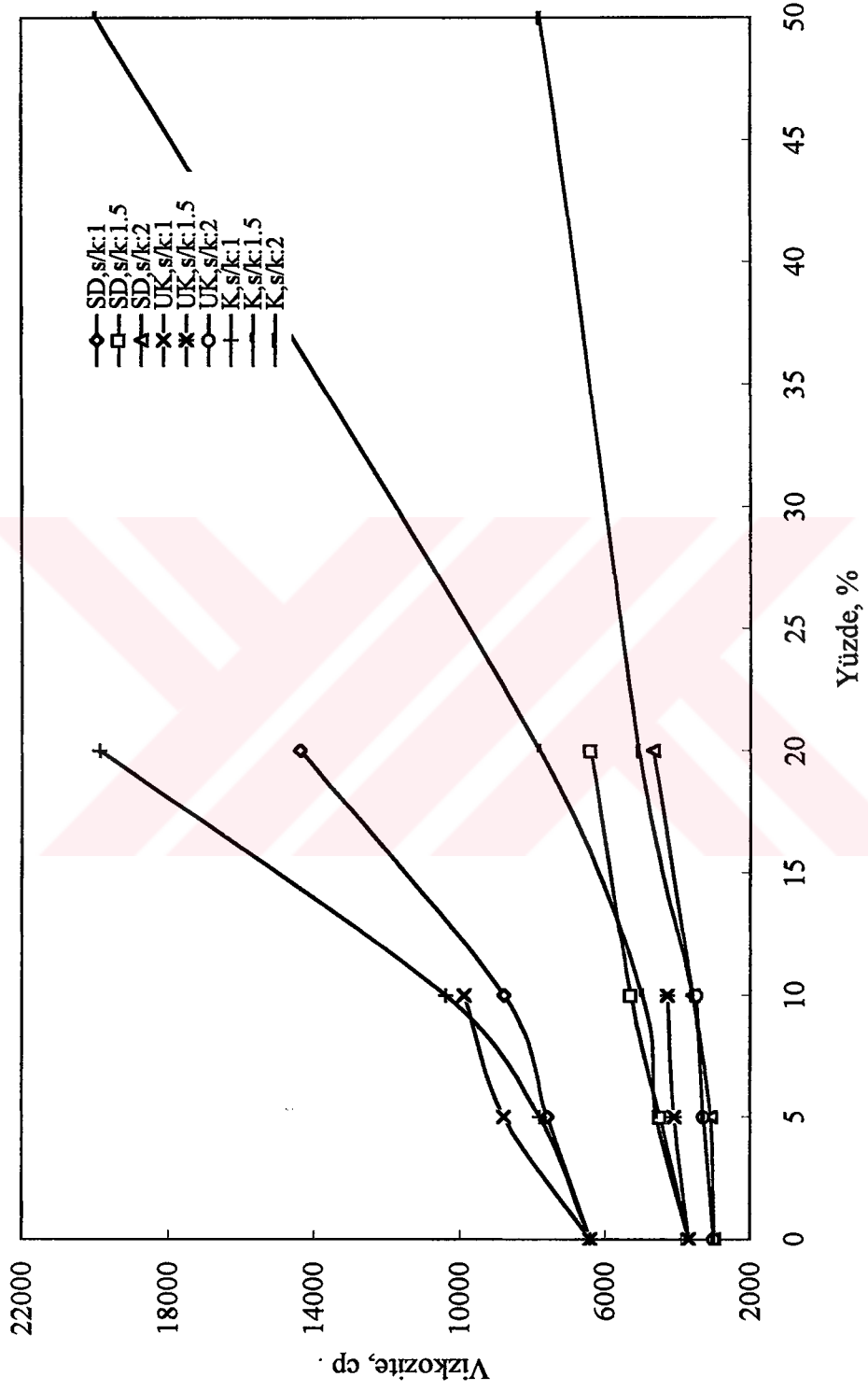
Şekil 4.70. Silis Dumanı Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerinin Basınç Mukavemetinin Çökeltme Yüzdesi İle Değişimi



Şekil 4.71. Silis Dumanı Enjeksiyonu Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Katsayısının Çökeltme Yüzdesi İle Değişimi



Şekil 4.72. Karışımların Vizkozite Değerinin Su/Katı Oranı İle Değişim Eğrileri



Şekil 4.73. Vizkozite Değerinin Silis Dumanı, Uçucu Kül Ve Kül Yüzdesi İle Değişimi

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Geoteknik problemlerin çözümünde kullanılan enjeksiyon yöntemleri, teknolojik yeniliklere paralel olarak sürekli gelişme göstermiştir. Son yıllarda araştırmacılar, enjeksiyon uygulamalarında gelişme kaydedecek önemli çalışmalar yapmışlardır. Özellikle çimento karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirecek kimyasallar ve endüstriyel baca atıklarının enjeksiyonda kullanılması araştırma konusudur. Bu çalışmada silis duman, uçucu kül ve doğal kil karışımların zeminlerin enjeksiyonunda kullanılabilirliği, laboratuarda yapılan model enjeksiyon deneyleri ile araştırılmıştır.

Çalışmada enjeksiyon yöntemleri detaylı olarak anlatılmış ve konu ile ilgili literatürde yayınlanan çalışmalar özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan zemin ve karışım malzemelerinin özellikleri belirlendikten sonra, enjeksiyon deneylerinde kullanılan zeminlerin granülometrisine, karışımların su/katı oranına ve enjeksiyon basıncına ön deneylerle karar verilmiştir.

Silis dumanı, uçucu kül, doğal kil katkılardan oluşan çimento karışımların fiziksel, mekanik ve akış özellikleri belirlenmiş ve bu karışımlarla enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon uygulanan numunelerin basınç mukavemeti ve permeabilite değişimi araştırılmıştır. Katkılı karışım enjeksiyonu uygulanan numunelerin sonuçları çimento enjeksiyonu uygulanmış numunelerin sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Enjeksiyon basıncının artırılması veya karışımın viskozitesinin düşürülmesi zemin enjeksiyonunda kolaylık sağlamıştır. Enjeksiyon basıncının artırılmasına rağmen, çimento karışımları dane çapı 0.600 mm' den daha küçük olan kumlu ortamlara enjeksiyon edilememiştir. Deneyler sırasında zeminin enjeksiyon edilebilirliği zemin ve karışım danelerinin büyüklüğü ile zeminin sıkılığı tarafından belirlenmiştir.

Enjeksiyon ile daneli (kum-çakıl) zeminlerin boşlukları doldurularak geoteknik özellikleri iyileştirilmiştir. Enjeksiyon uygulanmış zemin numunelerinin basınç mukavemeti artmış ve permeabilitesi düşmüştür. Permeabilitesi $k=1.26 \text{ cm/sn}$ olan zemin numuneleri enjeksiyon sonunda 1.10^{-5} - 1.10^{-7} cm/sn arasında değişen değerlere sahip olmuştur.

Silis dumanı katkılı karışım enjeksiyonu uygulanan numunelerin mukavemet ve hidrolik özellikleri çimento enjeksiyonu uygulanan numunelere oranla daha olumlu sonuçlar vermiştir. 7. Ve 28. günde, %5 oranında silis dumanı kullanılan ve su/katı oranı 1/1 olan numuneler çimento numunelerine göre %30-70 oranında basınç mukavemetini artırmıştır. %10 Silis dumanı kullanılan ve su/katı oranı 1.5/1 olan numuneler %20 oranında, %20 silis dumanı kullanılan ve su/katı oranı 2/1 olan numuneler %5-15 çimento numunelerine göre oranında daha yüksek basınç mukavemeti vermiştir. Silis dumanı kullanılan numunelerin permeabilitesi çimento numunelerine oranla daha düşük çıkmıştır ve en düşük permeabilite değeri ($k=1.10^{-7} \text{ cm/sn}$) %20 silis dumanı katkılı numuneler vermiştir. İnce yapısı ve puzolanik özelliği nedeni ile, silis dumanı enjeksiyonu uygulanan zemin numuneleri önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Kullanılan silis dumanı yüzdesi ile ters orantılı olarak enjeksiyon edilebilirlik azalmıştır.

Uçucu kül katkılı karışım enjeksiyonu uygulanan numunelerde, çimento enjeksiyonu uygulanan numunelere göre basınç mukavemeti, 28. günde, %5-25 oranında düşüş göstermiştir. %5 oranında uçucu kül katkılı numuneler %10 oranında uçucu kül kullanılan numunelerden daha yüksek basınç mukavemeti vermiştir. Uçucu kül katkılı numunelerin permeabilitesi çimento numunelerine göre artmıştır. Uçucu kül fiziksel ve kimyasal yapısına bağlı olarak deney sonuçlarını etkilemiştir.

Deneylerde doğal kil katkılı karışımların enjeksiyon uygulanan numunelerin permeabilitesine etkisi araştırılmıştır. Deneyler sonucunda enjeksiyon uygulanan numunelerin permeabilitesi kullanılan kil yüzdesi ile farklılıklar göstermiştir. Çimento enjeksiyonu uygulanan numunelerle karşılaştırıldığında, en düşük permeabiliteyi ($1.10^{-6} - 1.10^{-7} \text{ cm/sn}$) %50, 80, 100 oranlarında kil kullanılan numuneler vermiştir. %5, 10, 20 oranlarında kil katkılı numuneler permeabiliteyi

çimento numunelerine göre artırmıştır. Sade kil veya düşük oranlarda çimento katkı karışımların permeabiliteyi düşürmek için kullanılabileceği ortaya konmuştur. %5, 10 Oranında kil katkı enjeksiyon uygulanmış numuneler basınç mukavemetini, 28. günde, çimentoya göre %15 oranında düşürmüştür.

Çalışmada karışım ve enjeksiyonlu numunelerin basınç mukavemeti arasında direk bir korelasyon kurulamamıştır. Karışım numunelerinin basınç mukavemeti kullanılan katkı yüzdeleri artışı ile azalma gösterirken, enjeksiyonlu numunelerin tamamında aynı sonuçlar elde edilememiştir. Özellikle silis dumanı katkı numuneler karışım numunelerinin aksine basınç mukavemetini artırmıştır. Enjeksiyon karışımlarının su/karışım oranı artarken enjeksiyon işlemi kolaylaşmış fakat enjeksiyonlu numunelerin basınç mukavemeti düşmüş ve permeabilitesi artmıştır.

Literatürde, silis dumanı ve uçucu kül katkı karışımların zemin enjeksiyonunda kullanılabiliirliği araştırma konusu olup, yapılan çalışmalarda bu katkılarla enjeksiyon uygulanmış numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada yapılan yenilikler, silis dumanı, uçucu kül ve kil katkı karışımların zemin enjeksiyonunda kullanılabiliirliği, bu karışımlarla enjeksiyon uygulanmış zeminlerin basınç mukavemeti ve permeabilite değişimlerinin araştırılmasıdır.

Yapılan deneyler sonucunda silis dumanı, uçucu kül ve kil katkıların zemin enjeksiyonunda amaca bağlı olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Zeminlerin geoteknik özelliklerinde, silis dumanı katkı karışım enjeksiyonu ile belirgin bir iyileştirme yapılmış ve çimento katkı kil ve sade kil enjeksiyonları permeabiliteyi önemli oranda düşürdüğü görülmüştür.

Zemin enjeksiyonu konusunda yapılan bu çalışmada, zeminlerin daneli karışımlarla enjeksiyonu sonucu mukavemet ve hidrolik özellikleri araştırılmıştır. Enjeksiyonlu zeminlerin dinamik yükler altında davranışı ve deprem bölgelerinde kumlu zeminlerin sıvılaşmaya karşı stabilitesinin artırılması diğer araştırma konusudur. Ayrıca çimento karışımlarının yerini dolduracak kireç-silis dumanı ve kireç-uçucu kül karışımlarının zemin enjeksiyonunda kullanılmasının araştırılması, kirlenmiş zeminlerin enjeksiyon ile temizlenmesi de önemli araştırma konularıdır.

KAYNAKLAR

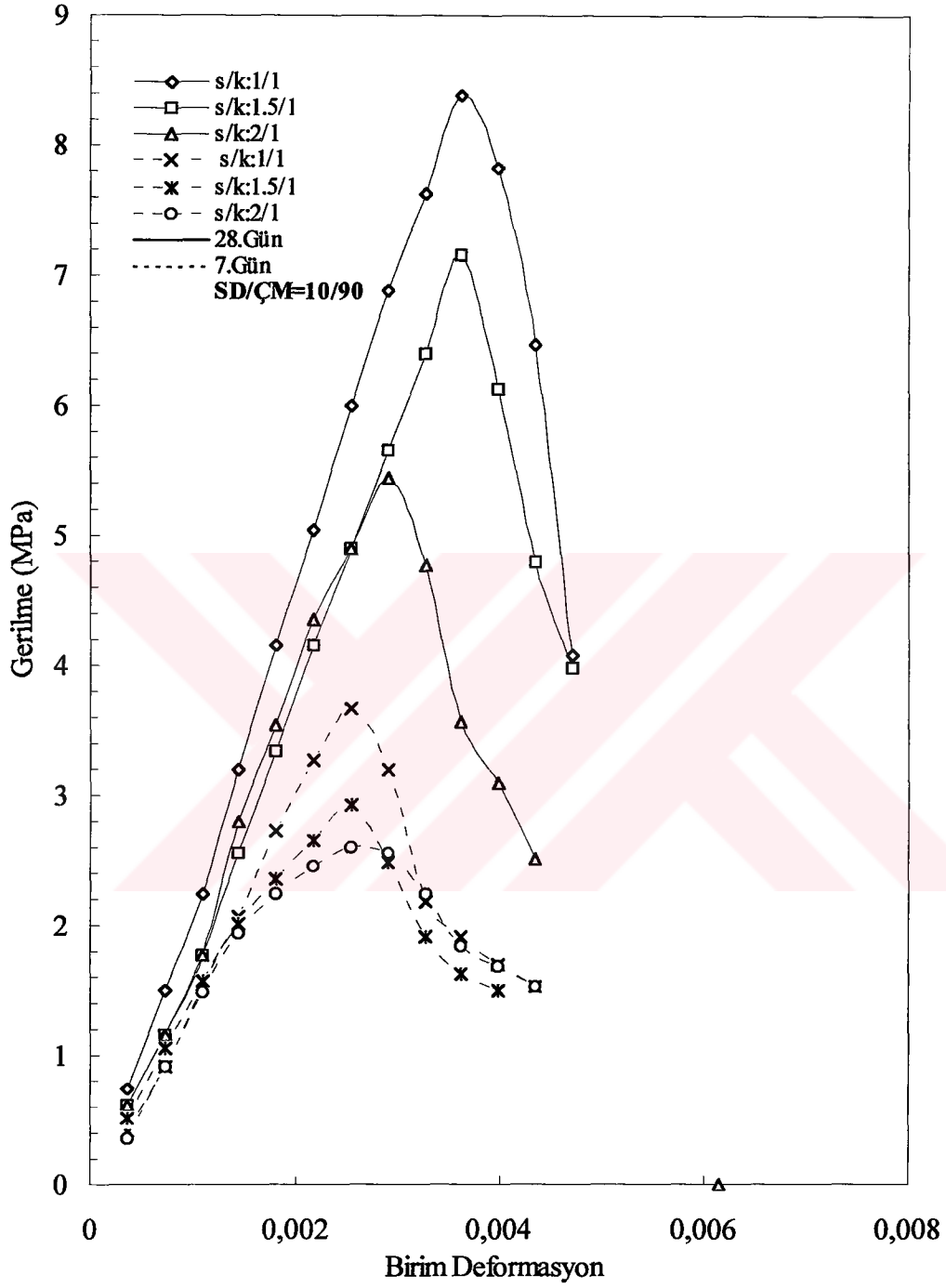
1. Akbulut, S., Sağlamer, A., 1999. Zemin İyileştirilmesinde Kullanılan Enjeksiyon Yöntemleri, X. Mühendislik Sempozyumu İnşaat Mühendisliği '99, Sayfa 427-438, Isparta
2. Alaa, A., Kumaraswamy, V., 1997. Silica Fume in Silicate an Cement Grouts and Grouted Sands, Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE, No: 66, pp. 242-258, Utah.
3. Anon., 1957. Chemical Grouting. Report of The Task Committee on Chemical Grouting. Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Soil Mechanics and Foundation Division, 83 (SM4), 1-101.
4. Arcones, A., Ruiz de Temino, R. and Soriano, A., 1985. Strengthening a Structural Fill by Claquage. Proc. 11th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 1677-82, San Francisco.
5. Bell, F. G., 1993. Engineering Treatment of Soils, Published by E&FN Spon, pp. 10-160, London.
6. Bodocsi, A. and Bowers, M. T., 1991. Permeability of Acrylate, Urethane and Silicate Grouted Sands with Chemicals. Proc. American Society Civil Engineers, Journal Geotechnical Engineering Division, 117 (8), 1227-44.
7. Bruce, D.A., Granata, R., Mauro, M., Cippo, A.P., 1993, Some Recent Developments in Ground Treatment for Tunnelling, Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling C. Inc., Ann Arbor, Mich.
8. Burwell, E. B., 1958. Cement and Clay Grouting of Foundations. Practice of the Corps of Engineers. Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Soil Mechanics and Foundation Division, 84 , 1551/1-1551/22.
9. Cambefort, H., 1977. The Principals and Applications of Grouting, Quarterly Journal of Engineering Geology, 10 (2), 57-95.
10. Caron, C., 1967. Synthetic Resins, Laboratory Tests and Applications of Grouting, Rilem Collogue, pp. 183-186.
11. Domone, P.L.J., 1994. Structural Grouts, Published by Blackie Academic and Professional, pp. 2-150, Glasgow.
12. Ewert, F.K., 1985. Rock Grouting Springer, Berlin.

13. Incecik, M. and Ceren, İ., 1995. Cement Grouting Model Tests, Bulletin of The technical University of Istanbul, Volume: 48, No: 2, pp. 305-317, İstanbul.
14. Ischy, E. and Glossop, R., 1962. An Introduction to Alluvial Grouting. Proc. Institution of Civil Engineers, 22, pp. 449-474.
15. Johnson, S. J., 1958. Cement and Clay Grouting of Foundations: Grouting with Clay-Cement Grouts. Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Soil Mechanics and Foundations Division, 84 (SM1, Paper 1545), pp. 1-12.
16. Karol, R. H., 1982. Chemical Grouts and Their Properties, in Grouting in Geotechnical Engineering, Speciality Conf., New Orleans (ed. W. H. Baker), American Society Civil Engineers, New York, pp. 359-77.
17. King, J. C. and Bush, E. G. W., 1963. Grouting of Granular Materials. Symp. on Grouting, Transactions American Society of Civil Engineers, 128, pp. 1279-1310.
18. Klein, A. M. and Polivka, M., 1958. Cement and Clay Grouting of Foundations on The Use of Admixtures in Cement Grouts. Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Soil Mechanics and Foundations Divisions, 84 (SM1, Paper 1547), pp. 1-24.
19. Koerner, R.M., Sands, R.N., Leaird ,J.S., 1985. Acoustic Emission Monitoring of Grout Movement, Issues in Dam Grouting, ASCE, pp. 149-155, New York.
20. Kravetz, G. A., 1958. Cement and Clay Grouting of Foundations: The Use of Clay in Pressure Grouting. Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Soil Mechanics and Foundation Division, 84 (SM1, Paper 1546), pp. 1-30.
21. Krizek, R. J., Liao, H-J. and Borden, R. H., 1992. Mechanical Properties of Micro Fine Cement/Sodium Silicate Grouted Sand, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, pp. 688-699, Louisiana.
22. Krizek, R. J., Michel, D. F., Helal, M. and Borden, R. H., 1992. Engineering Properties of Acrylate Polymer Grout, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, pp. 712-724, Louisiana.
23. Krizek, R.J., Helal, M., 1992. Anisotropic Behavior of Cement-Grouted Sand, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, pp. 541-550, Louisiana.
24. Kutzner, C., 1996. Grouting of Rock and Soil, pp. 10-195, Balkema, Netherlands.
25. Liao, H-J., Krizek, R. J. and Borden, R. H., 1992. Micro Fine Cement/Sodium Silicate Grout, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, pp. 676-687, Louisiana.

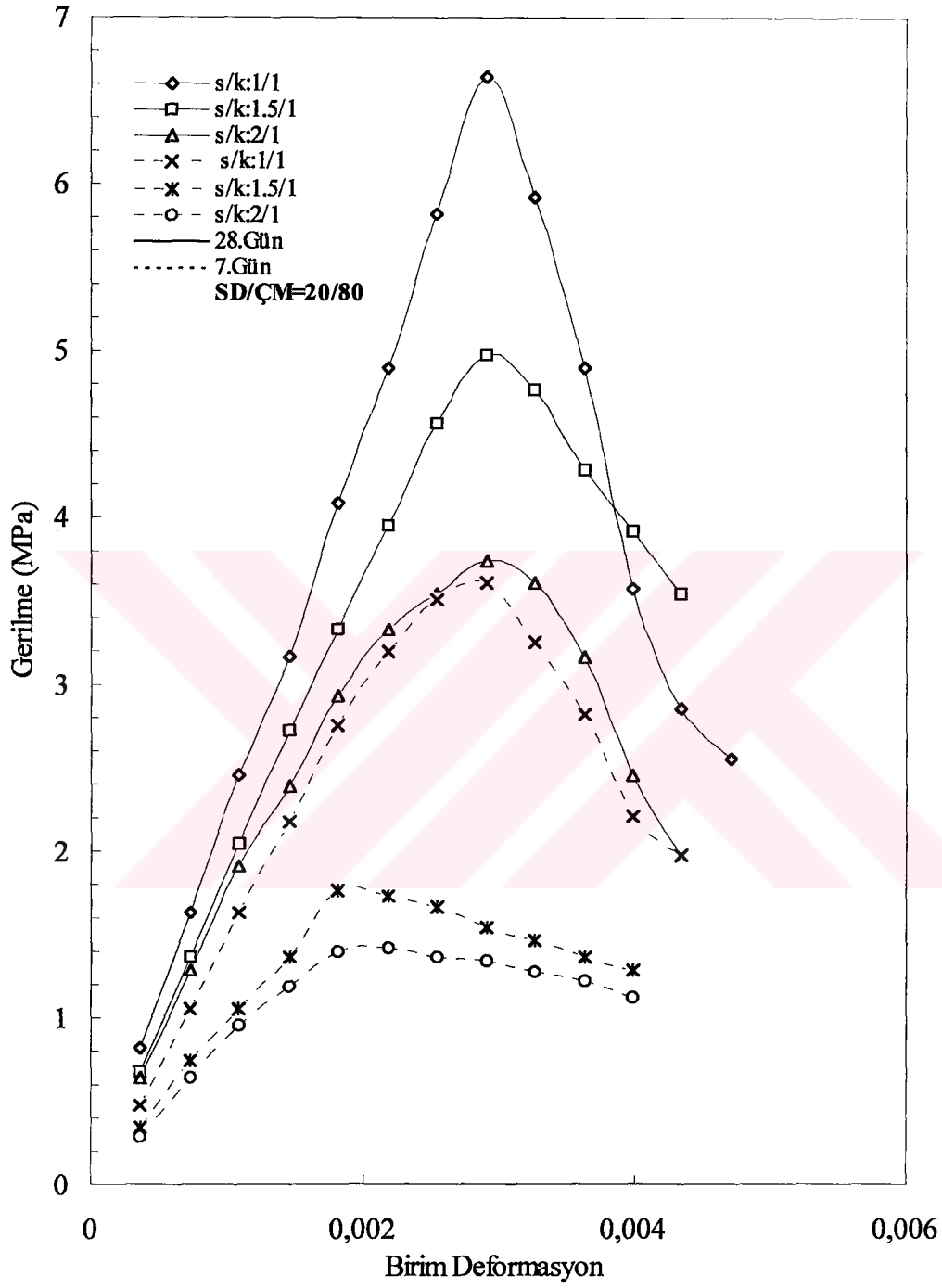
26. Littlejohn, G.S., 1982. Design of Cement Based Grouts, Grouting in Geotechnical Engineering, pp. 35-48, ASCE, New York.
27. Littlejohn, G.S., 1985. Chemical grouting. Ground Engineering, 18: Part 1, No: 2, pp. 13-18; Part 2, No. 3, pp. 23-8; Part 3, No. 4, pp. 29-34.
28. Lombardi, G., 1985. The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock. 15th ICOLD-Congress, III: 235-261, Louisiana.
29. Lowther, J., Gabr, M. A., 1997. Permeability and Strength Characteristics of Urethane-Grouted Sand, Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE, No: 66, pp. 258-270, Utah.
30. McFarlane, T. S., Holtz, R. D., 1992. Selection and Laboratory Evaluation of Modifying Additives for Soil-Cement-Bentonite, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, pp. 1006-1018, Louisiana.
31. Mistry, J.F., 1988. Important Aspects of River Valley Projects, Mahajan Book Distributors, Amdavad, India.
32. Mitchell, J. K., 1981. Soil improvement-State-of-Art Report. Proc. 10th International Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 509-65, Stockholm.
33. Mori, A., Tamura, M., Hayashi, H. and Shibata, H., 1992. Some Factors Related to Injected Shape in Grouting, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, pp. 313-324, Louisiana.
34. Nonveiller, E., 1989. Grouting Theory and Practice, Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands.
35. Özbayoğlu, F. U., 1993. Uçucu Küllerin Bentonit, Kireç ve Çimento Katkıları ile Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonunda Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Sayfa: 103-117, Ankara.
36. Perret, S., Ballivy, G., Khayat, K. and Mnif, T., 1997. Injectability of Fine Sand with Cement-Based Grout", Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE, No: 66, pp. 289-305, Utah.
37. Pierre, C. et al., 1984. The Use of Condensed Silica Fume in Grouts", Innovative Cement Grouting, Publication sp-83, pp. 1-18, ACI, Detroit.
38. Raabe, E. W. and Esters, K., 1990. Soil Fracturing Techniques for Terminating Settlements and Restoring Levels of Buildings and Structures. Ground Engineering, 23 (3), pp. 33-45.

39. Raymond, W. H., 1996. Practical Guide to Grouting of Underground Structures, Published by ASCE Press, New York.
40. Samol, H. and Priebe, H., 1985. Soil Fracturing-an Injection Method for Ground Movement. Proc. 11th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 1753-6, San Francisco.
41. Sandra, T., Jeffrey, C. E., 1992. The Effects of Fillers and Admixtures on Grout Performance, Grouting Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 1, No: 30, pp. 337-349, Louisiana.
42. Scheidegger, A.E., Johnson, E.F., 1969. Displacement Processes in Porous Media, Symposium on The Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media, Haifa, Israel.
43. Schwarz L. G., Krizek, R.J., 1992. Effects of Mixing on Rheological Properties of Microfine Cement Grout, Grouting Soil Imp. and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 1, No: 30, pp. 512-525, Louisiana.
44. Shibasaki, M. and Ohta, S., A., 1982. Unique Underpinning of Soil Solidification Utilizing Super-High Pressure Liquid Jet. Grouting in Geotechnical Engineering, Speciality Conf., New Orleans (ed. W. H. Baker), American Society Civil Engineers, pp. 680-93, New York.
45. Shroff, A. V., Shah, D. L., 1992. Time-Viscosity Relationships of Newtonian and Binghamian Grouts, Grouting, Soil Improv. and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, pp. 663-675, Louisiana.
46. Shroff, A. V., Shah, D. L., 1993. Grouting Technology In Tunnelling and Dam Construction, pp. 20-490, Balkema Publishers, Brookfield.
47. Stilley, A. N., 1982. Compaction Grouting for Foundation Stabilization, in Grouting in Geotechnical Engineering, Speciality Conf., New Orleans (ed. W. H. Baker), American Society Civil Engineers, pp. 923-37, New York.
48. Vipulanandan, C., Jasti, V. and Reddy, G., 1997. Behavior of Lightweight Cementitious Cellular Grouts, Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE, No: 66, pp. 197-211, Utah.
49. Vipulanandan, C., Shenoy, S., 1992. Properties of Cement Grouts and Grouted Sands with Additives, Grouting Soil Improv. and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 1, No: 30, pp. 500-511, Louisiana.
50. Weaver, K.D., 1991. Dam Foundation Grouting. American Society of Civil Engineer, New York.
51. Welsh, J.P., 1991. Underground Structures, Developments in Geotechnical Engineering Series, Vol. 59, Elsevier, New York.

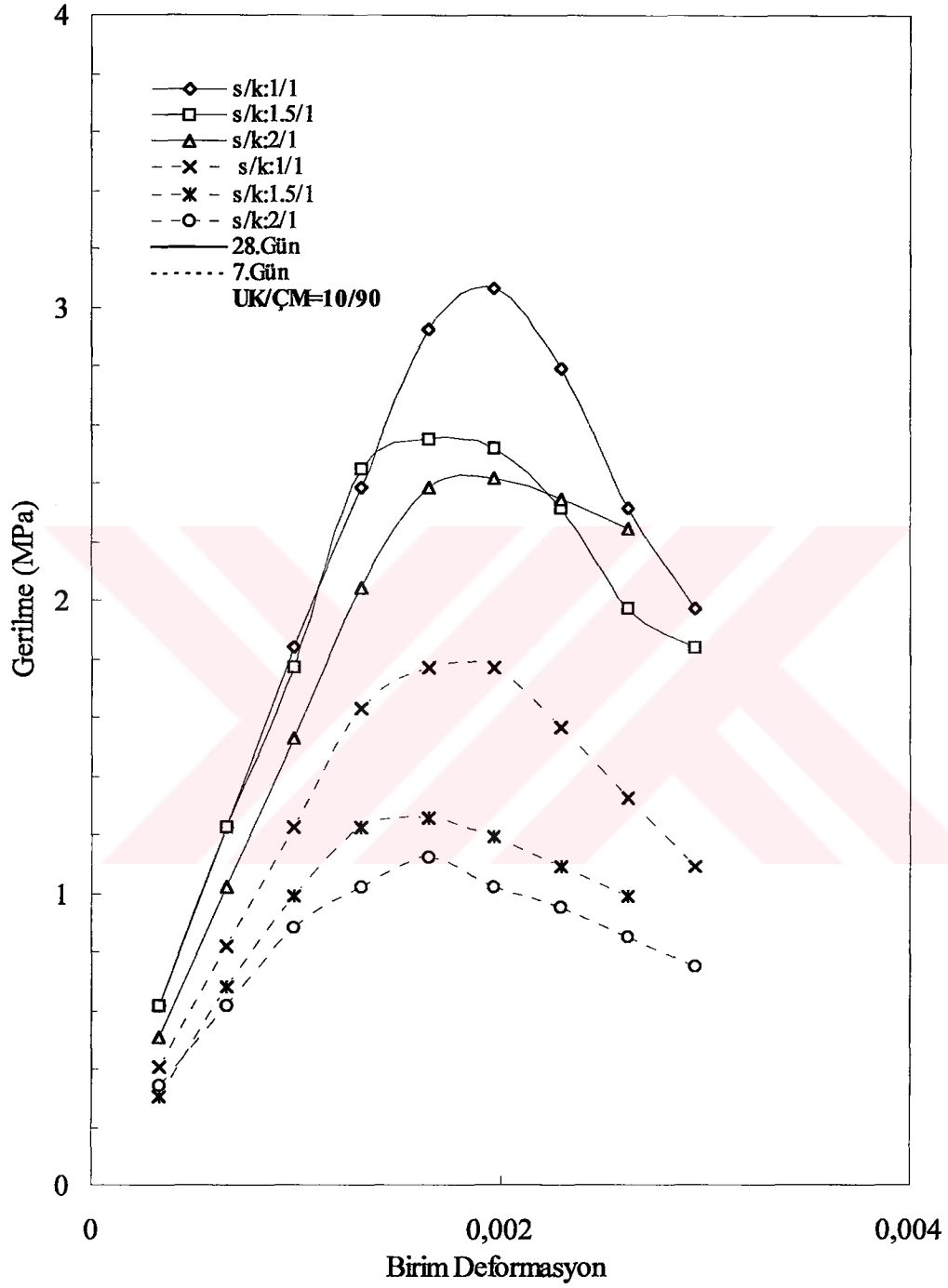




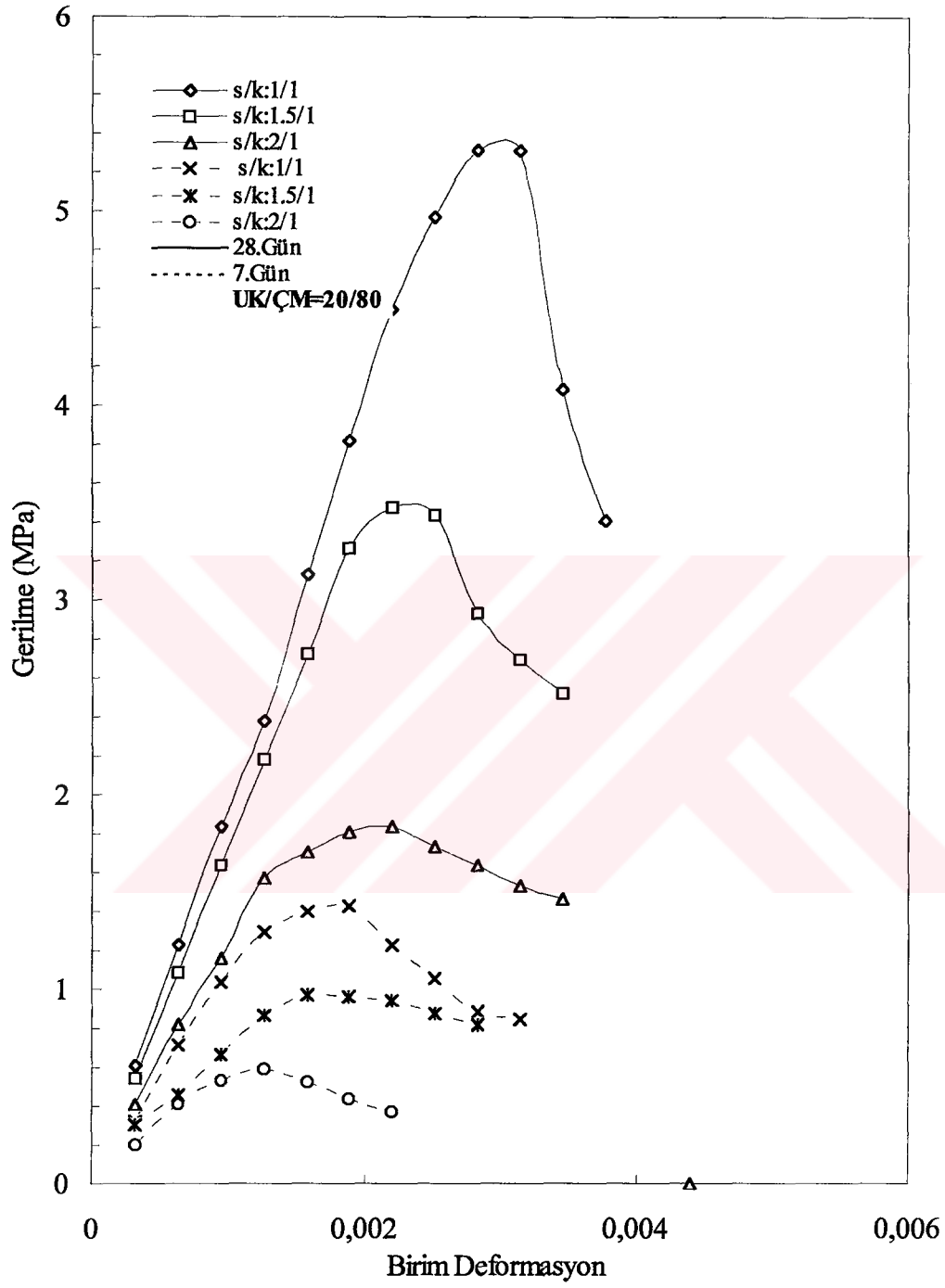
Şekil A.1. Silis Dumanı Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (SD/ÇM=10/90)



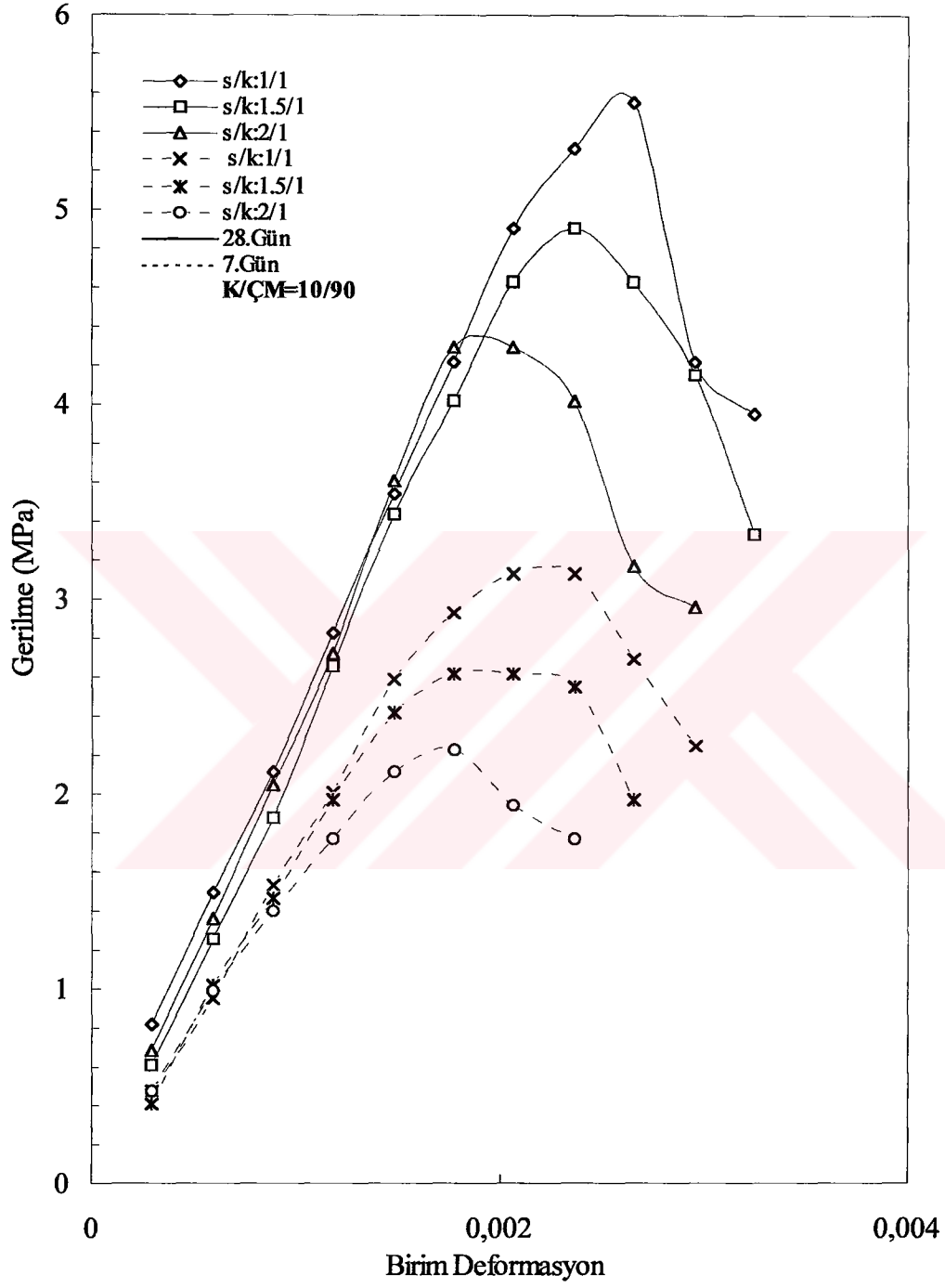
Şekil A.2. Silis Dumanı Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (SD/ÇM=20/80)



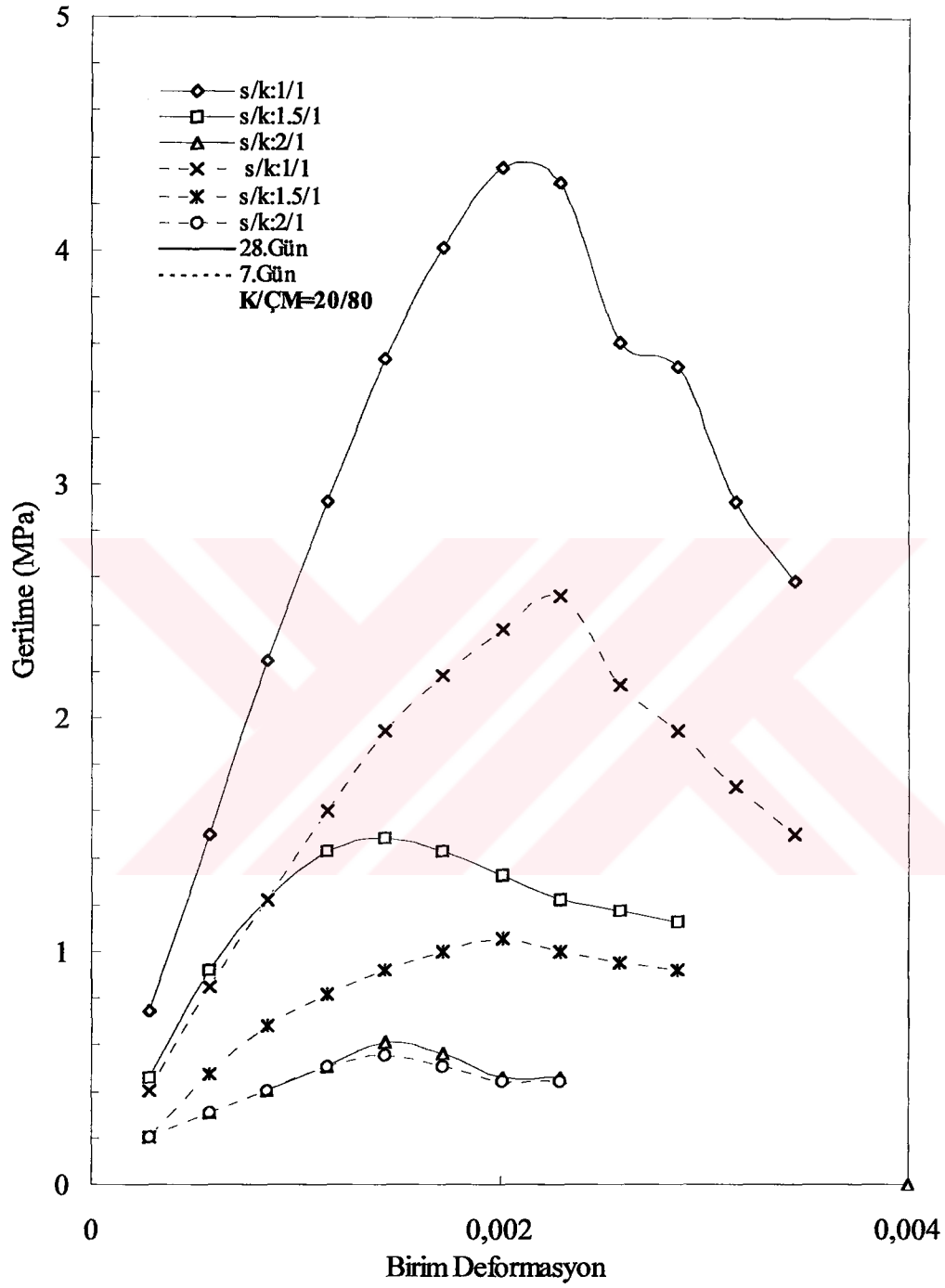
Şekil A.3. Uçucu Kül Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (UK/ÇM=10/90)



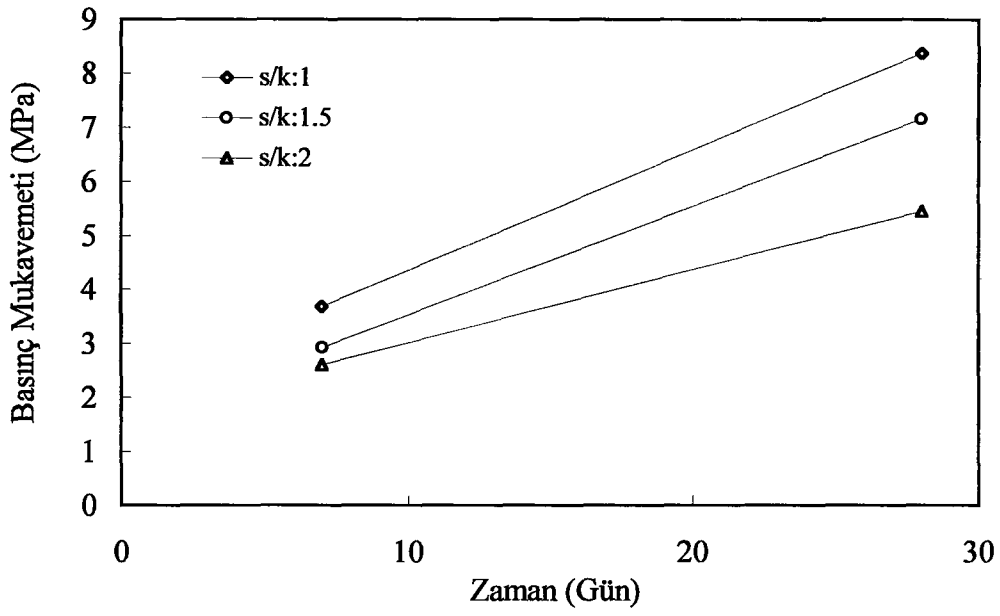
Şekil A.4. Uçucu Kül Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (UK/ÇM=20/80)



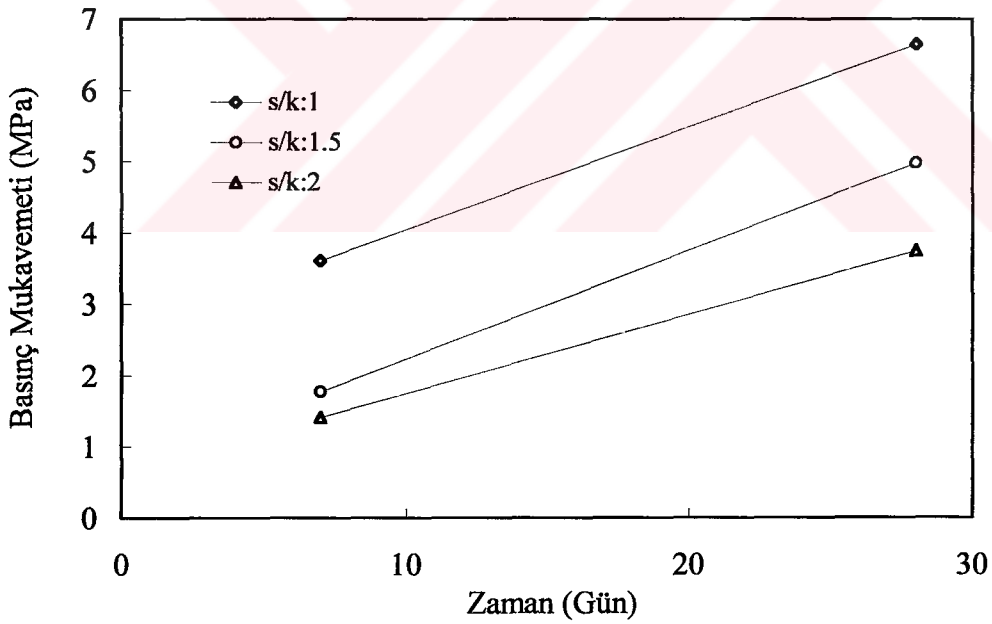
Şekil A.5. Kil Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (Kil/ÇM=10/90)



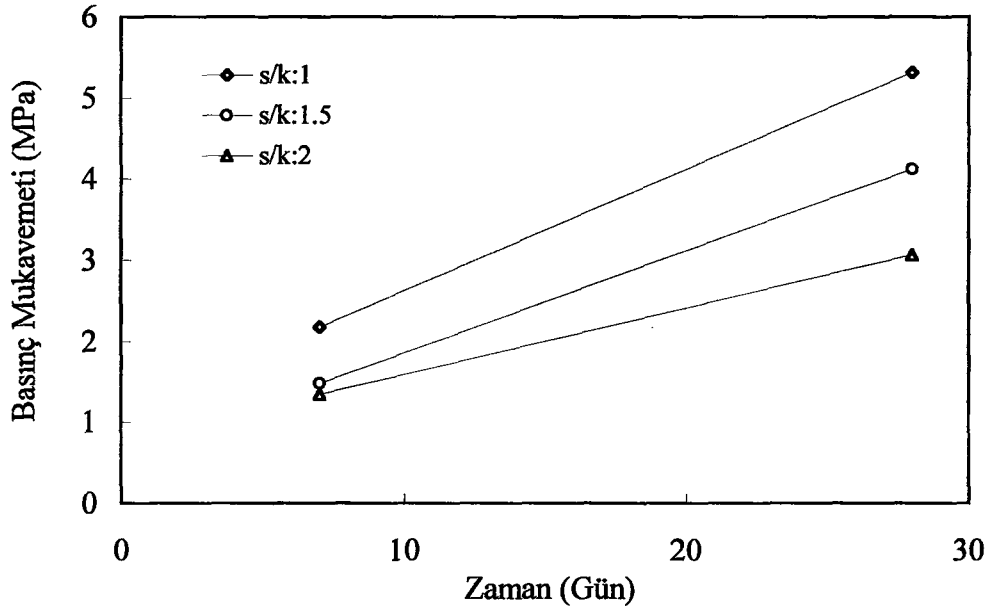
Şekil A.6. Kil Katkılı Karışımların Farklı Su/Katı Oranlarında 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (Kil/ÇM=20/80)



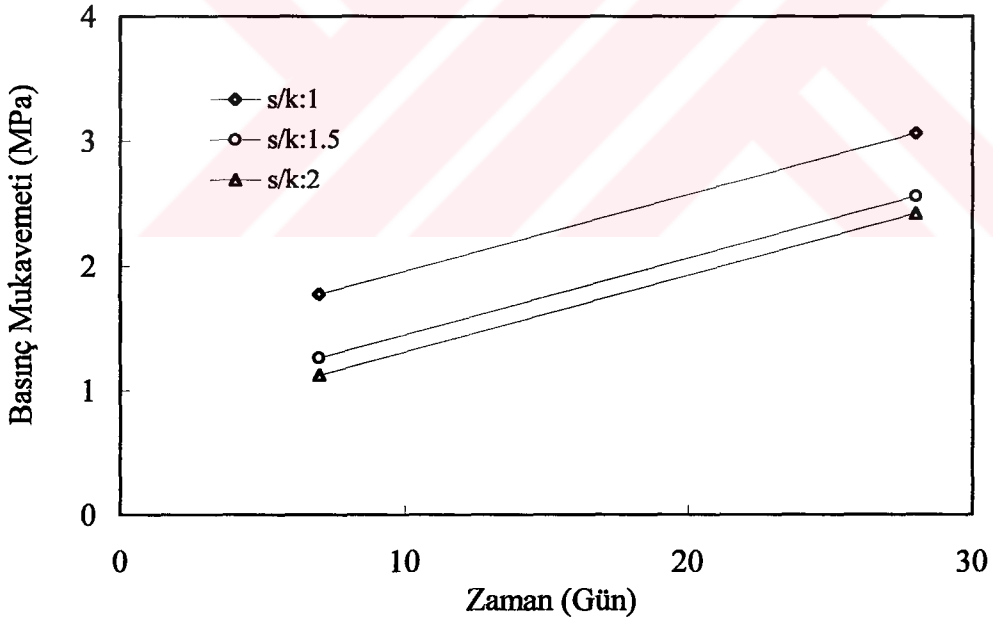
Şekil A.7. Silis Dumanı Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (SD/ÇM=10/90)



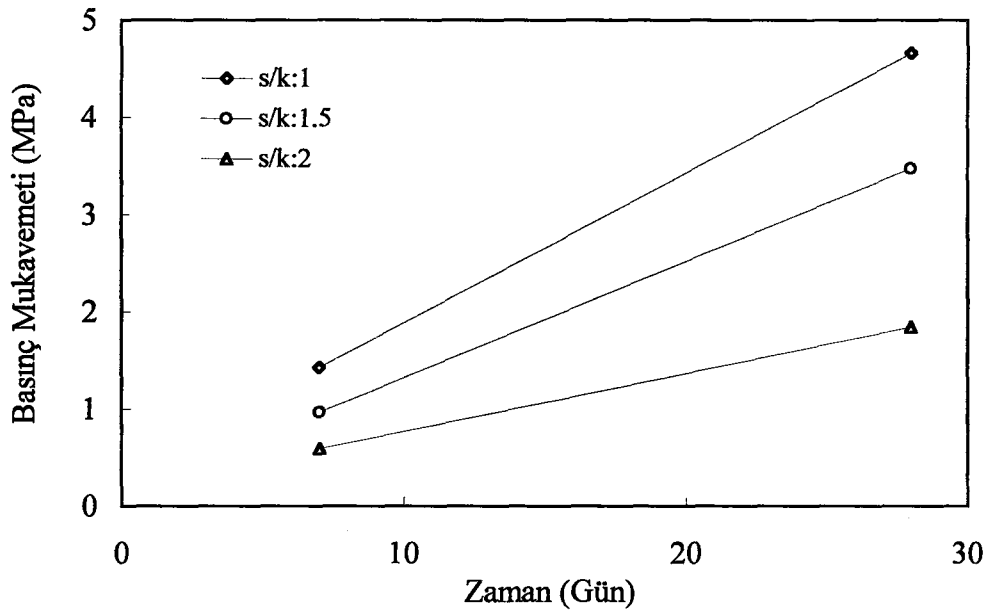
Şekil A.8. Silis Dumanı Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (SD/ÇM=20/80)



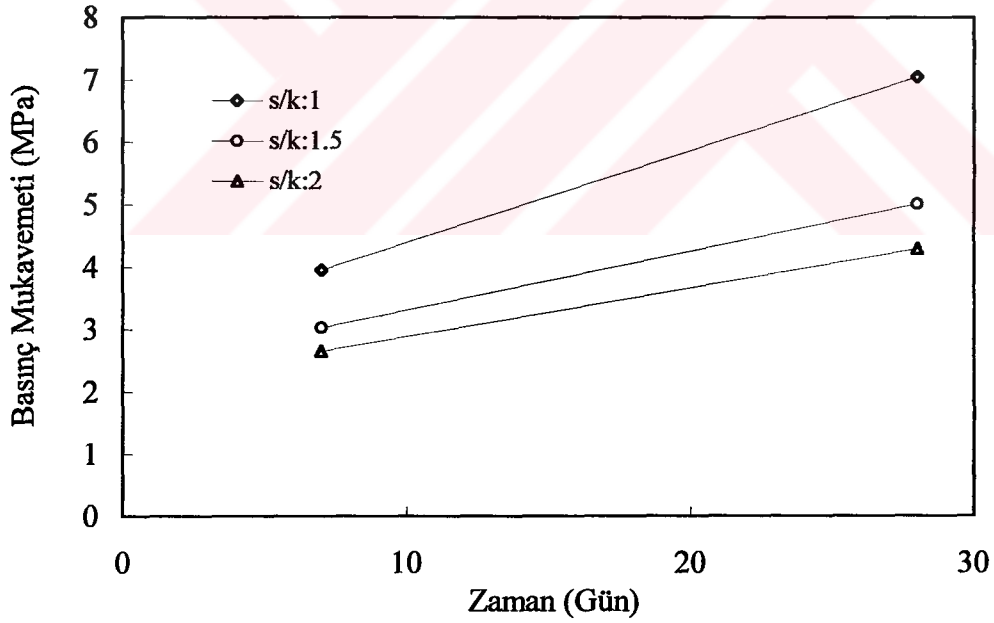
Şekil A.9. Uçucu Kül Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (UK/ÇM=5/95)



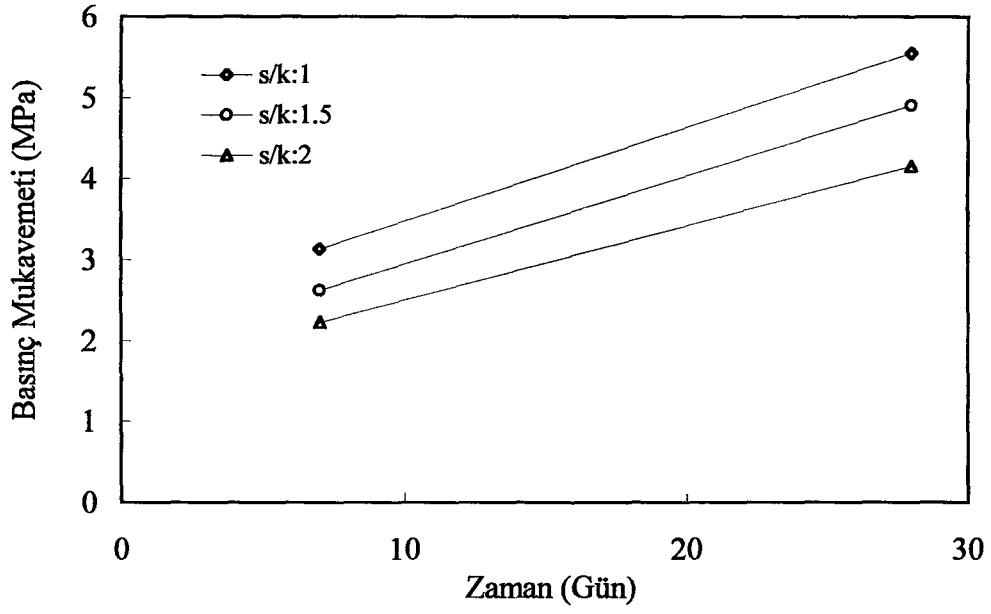
Şekil A.10. Uçucu Kül Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (UK/ÇM=10/90)



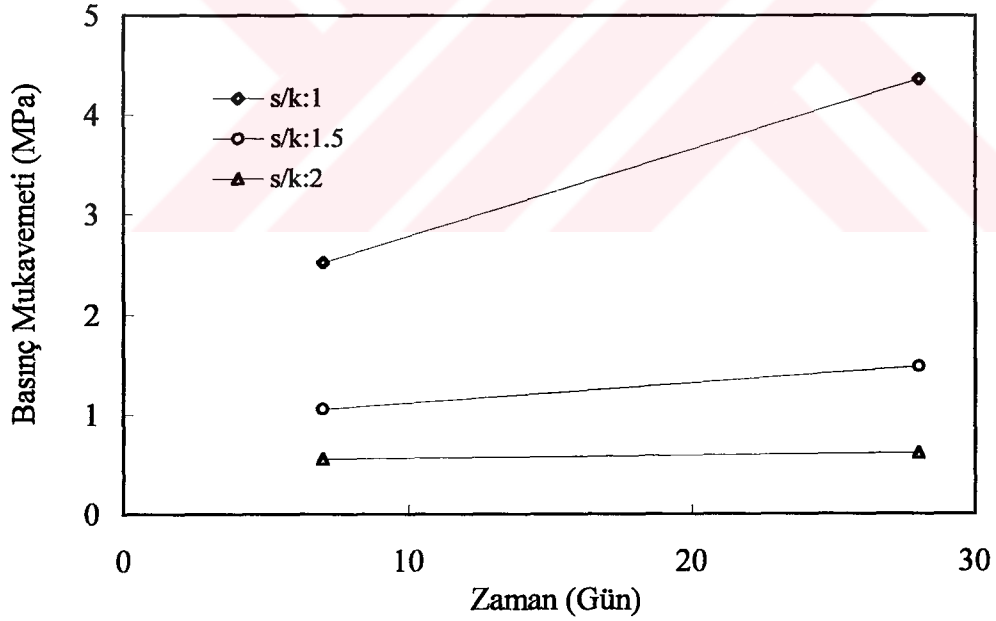
Şekil A.11. Uçucu Kül Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (UK/ÇM=20/80)



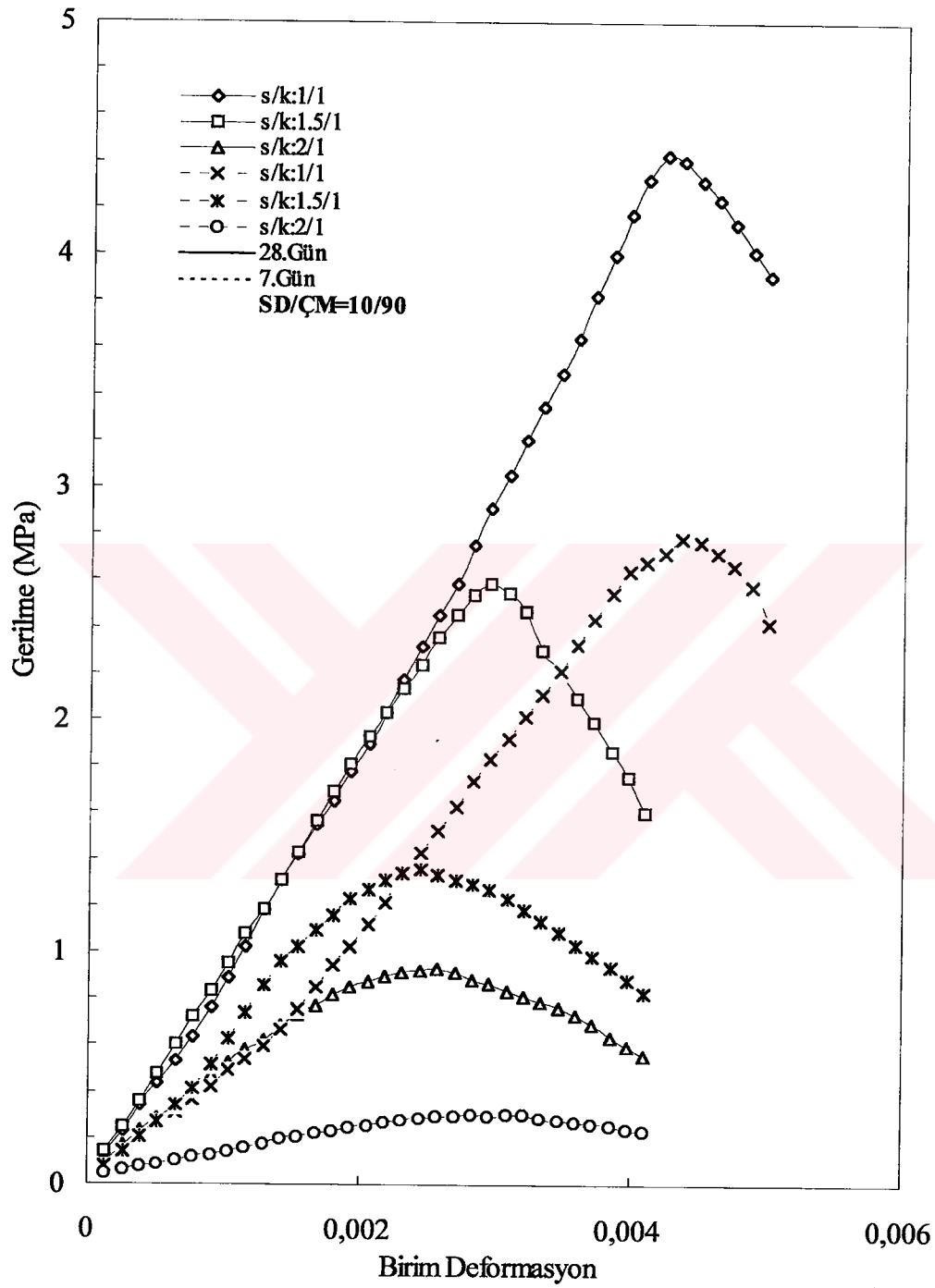
Şekil A.12. Kül Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (K/ÇM=5/95)



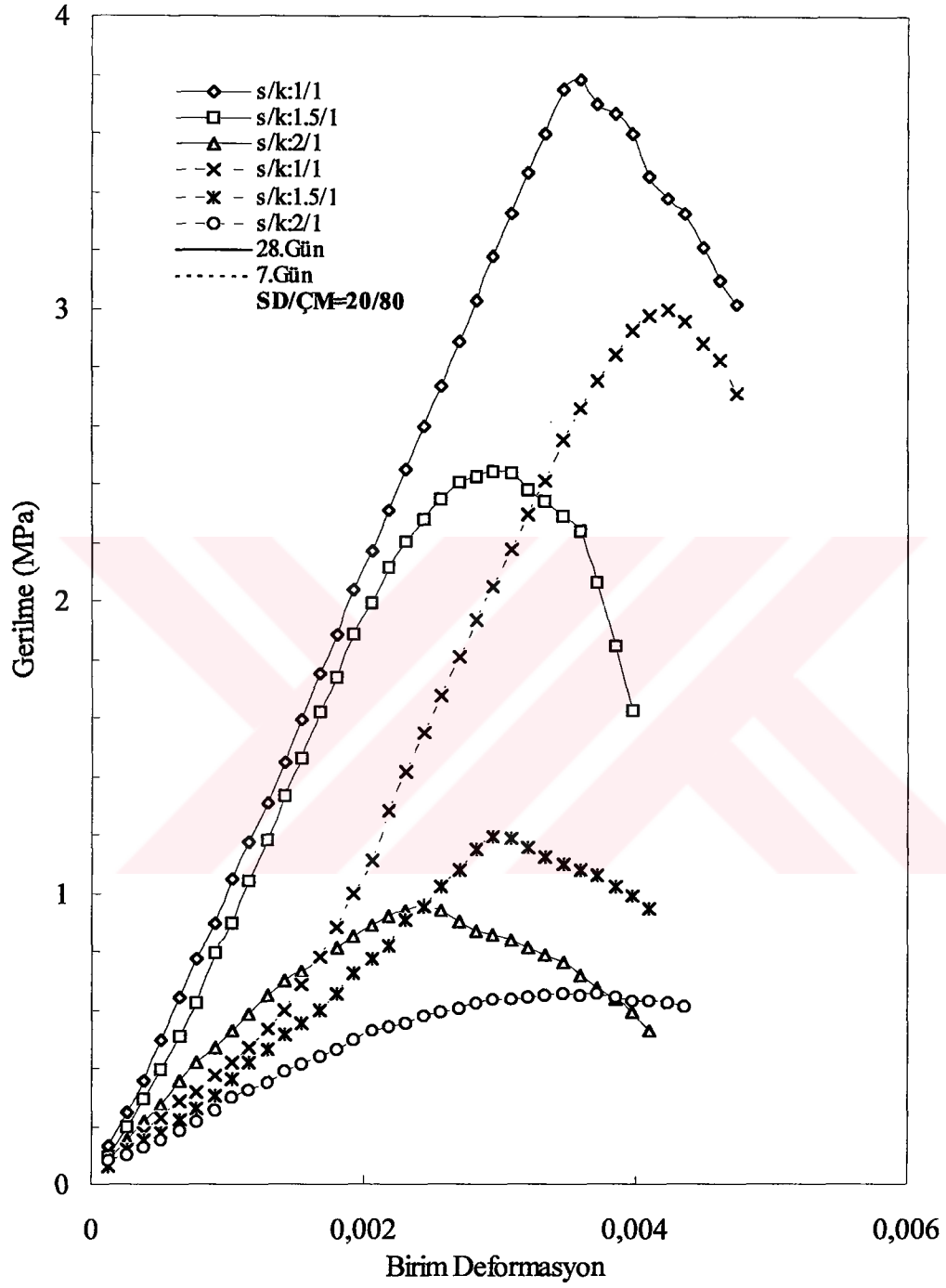
Şekil A.13. Kıl Katkılı Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (UK/ÇM=10/90)



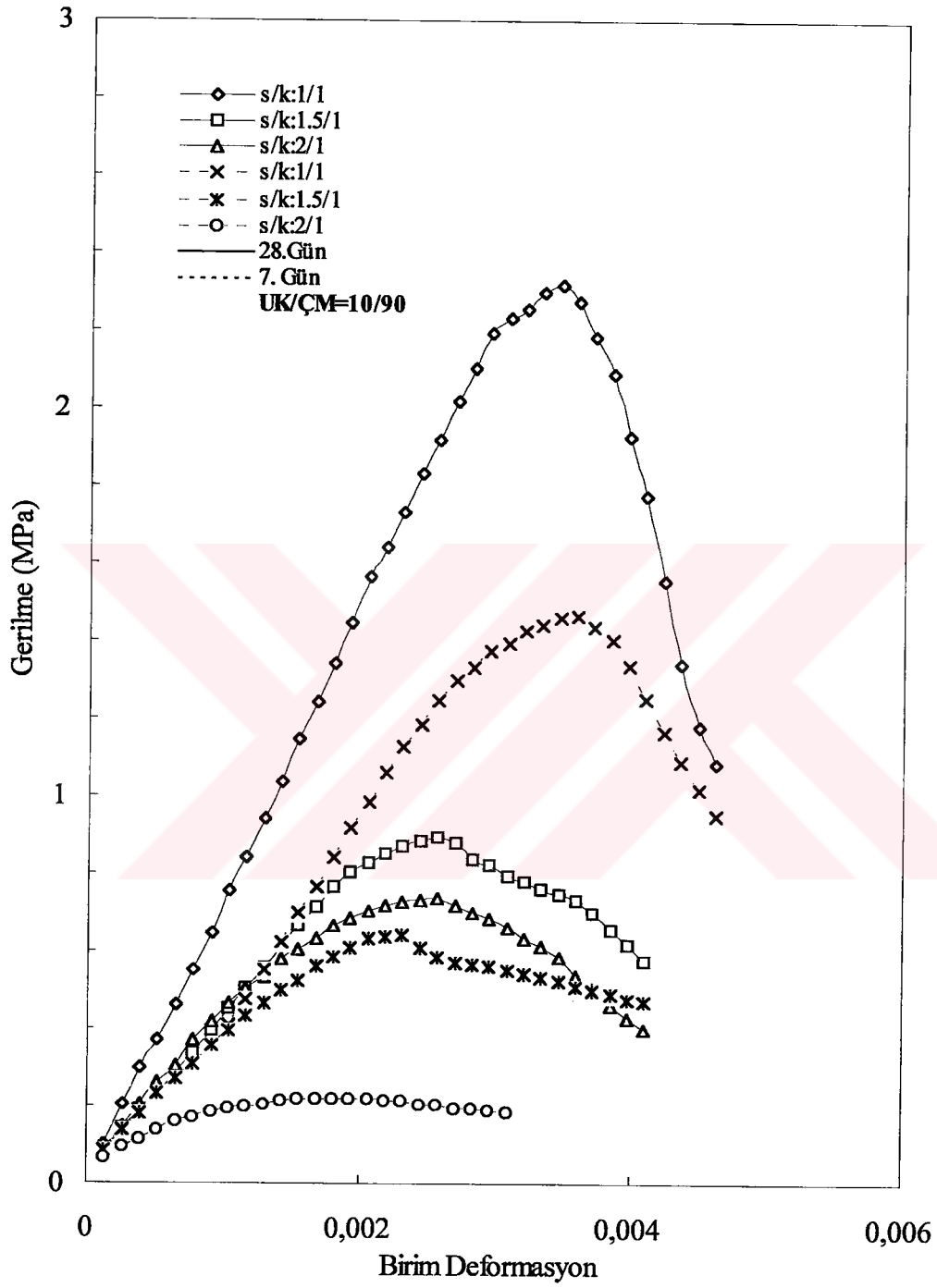
Şekil A.14. Kıl Karışımların Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi (K/ÇM=20/80)



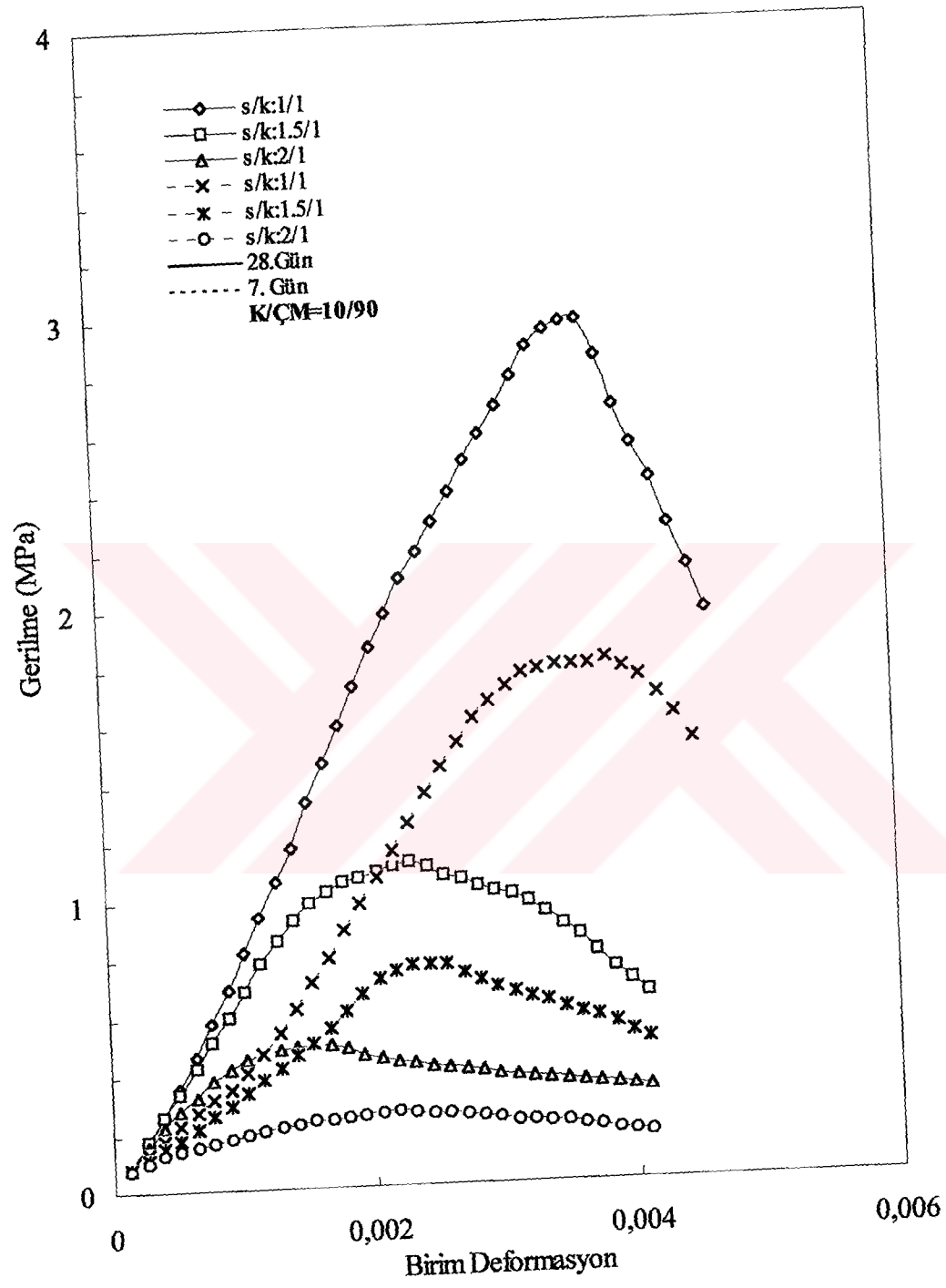
Şekil A.15. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme- Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.30$, $SD/ÇM = 10/90$)



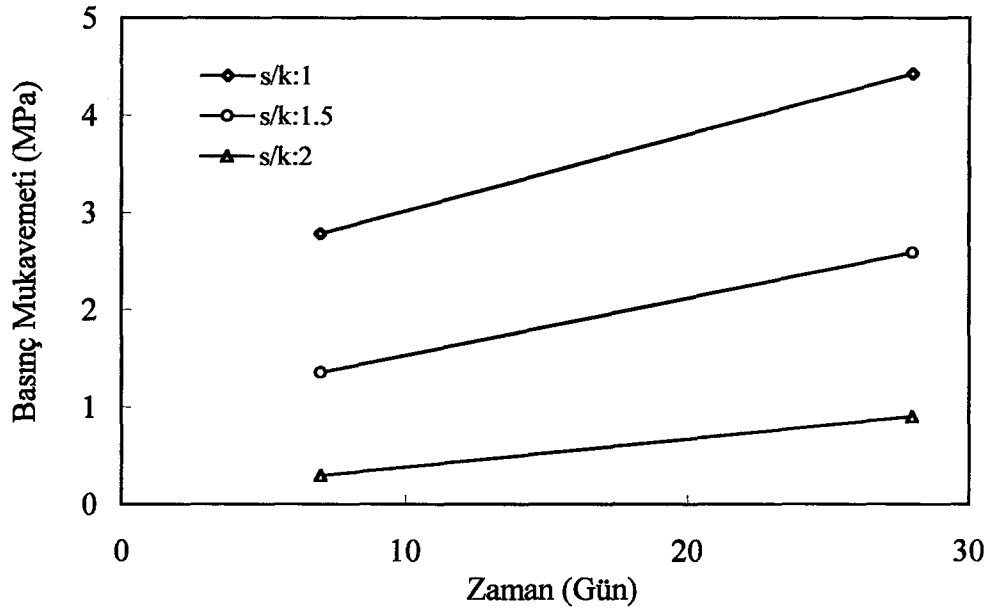
Şekil A.16. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r=0.30$, $SD/ÇM=20/80$)



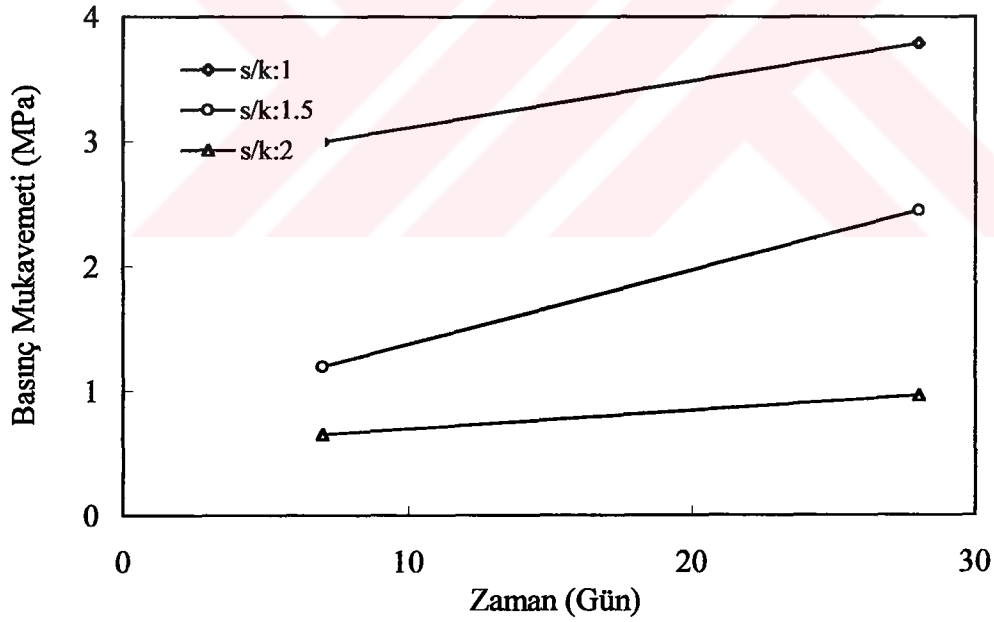
Şekil A.17. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.30$, UK/ÇM= 10/90)



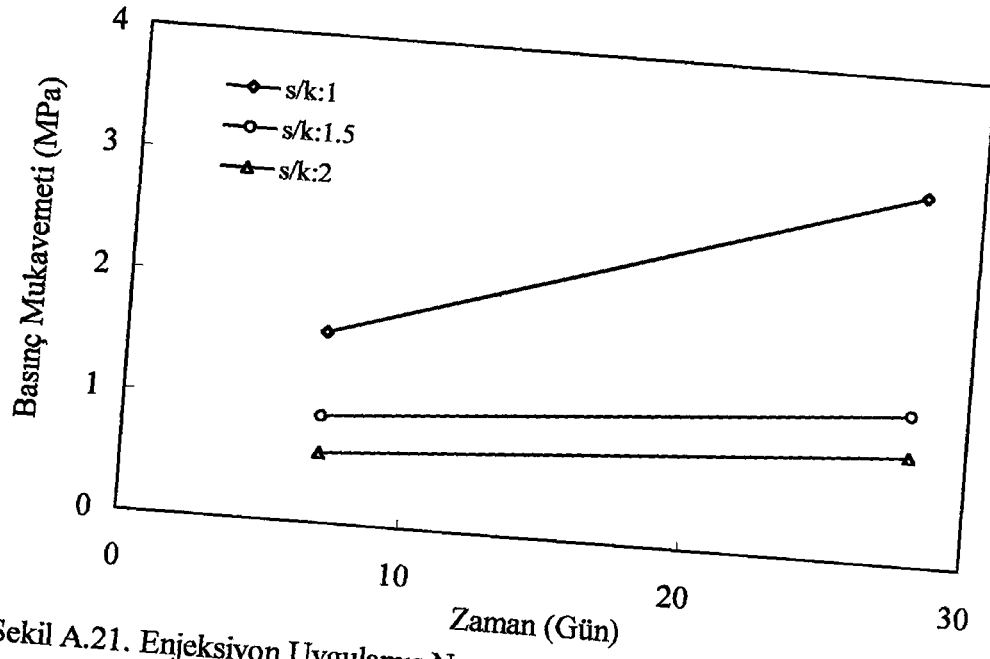
Şekil A.18. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.30$, Kıl/Çimento= 10/90)



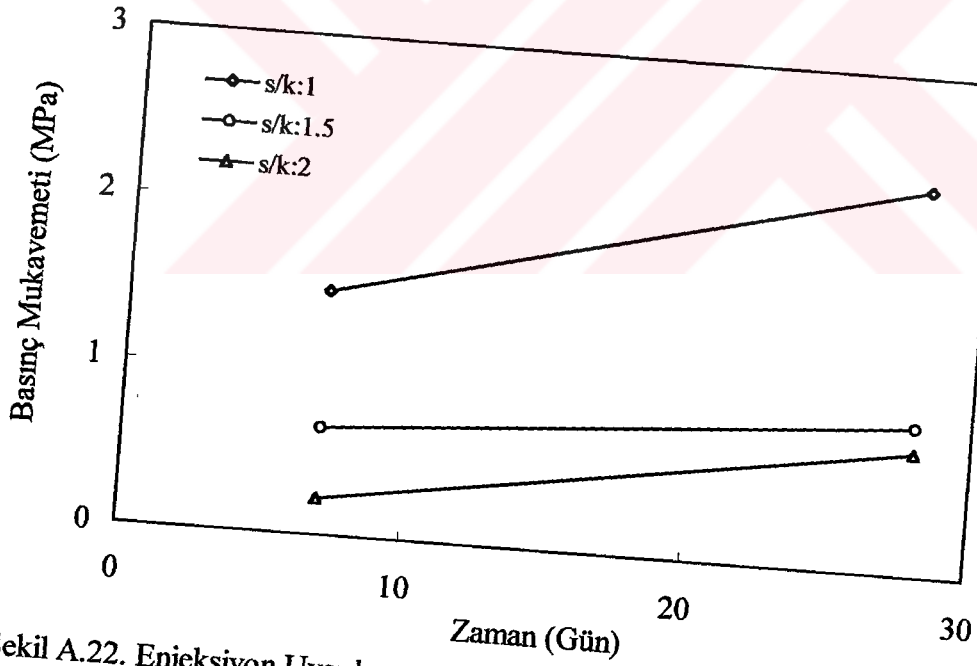
Şekil A.19. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($Dr=0.30$ $SD/\text{ÇM}=10/90$)



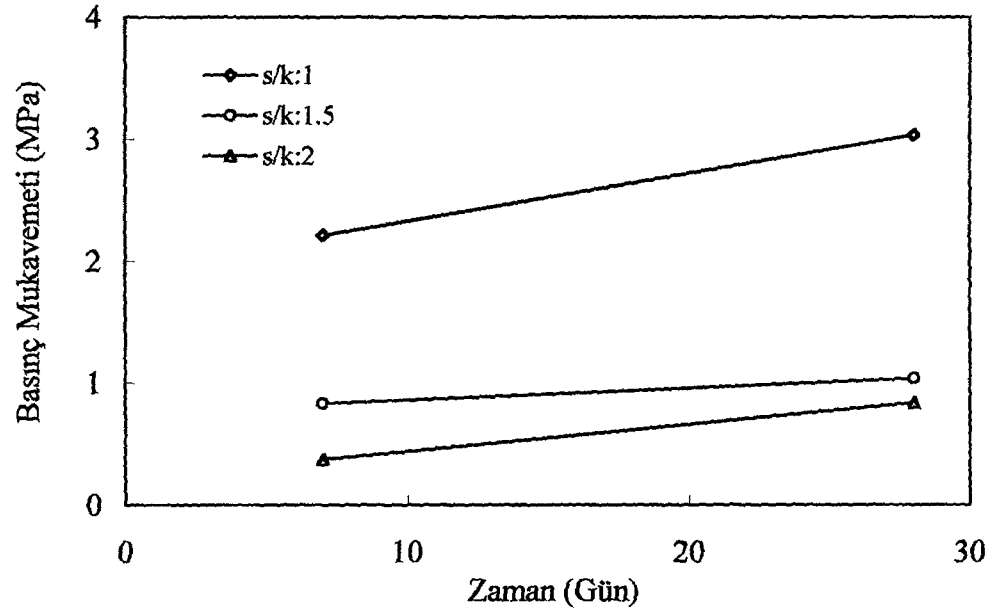
Şekil A.20. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($Dr=0.30$ $SD/\text{ÇM}=20/80$)



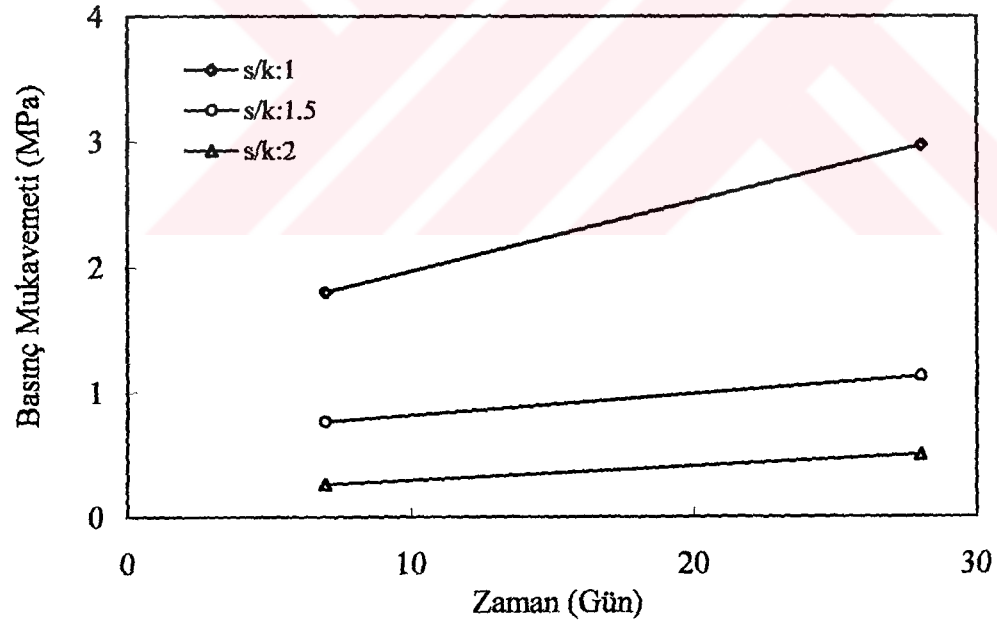
Şekil A.21. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,30$ UK/ÇM=5/95)



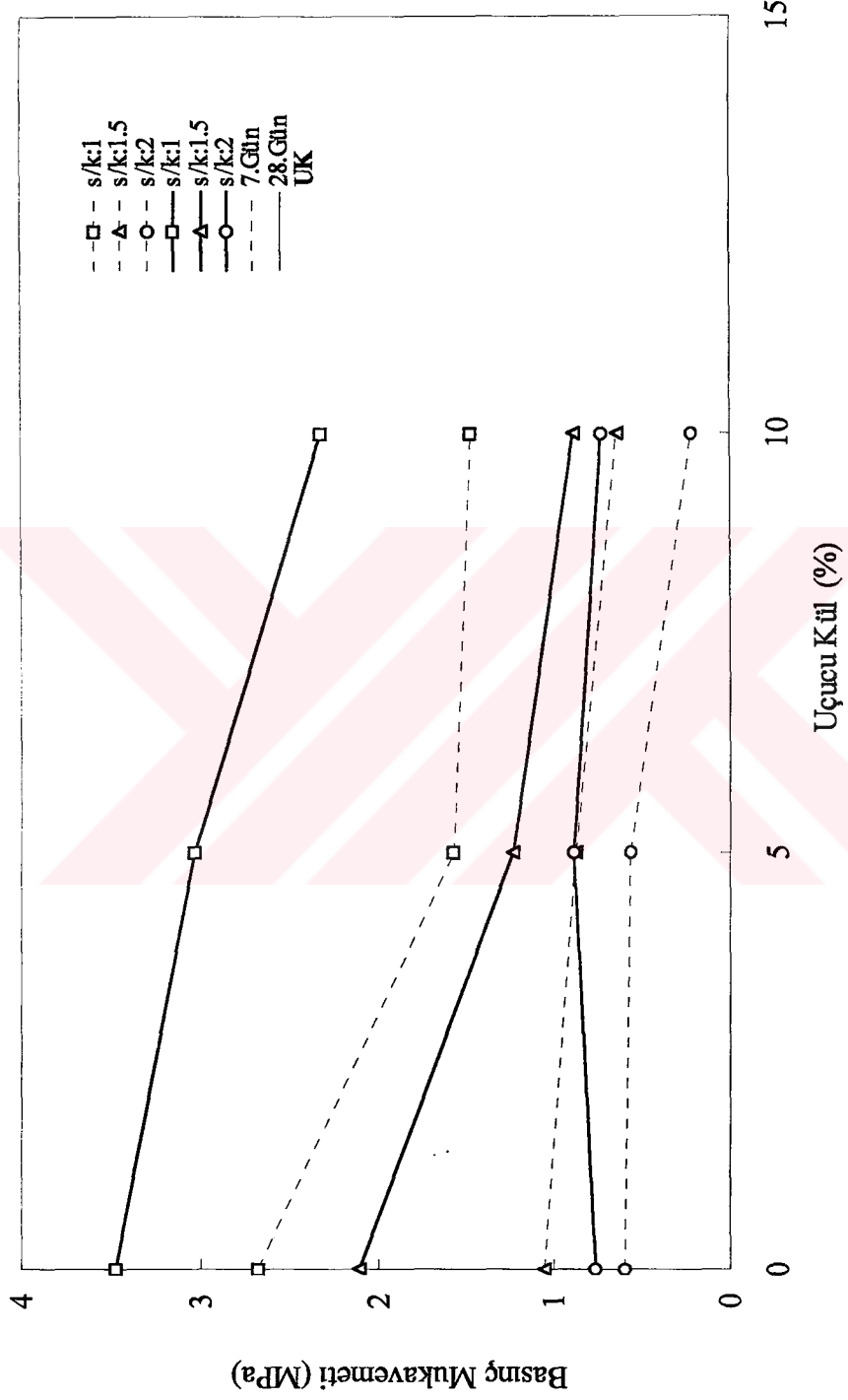
Şekil A.22. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,30$ UK/ÇM=10/90)



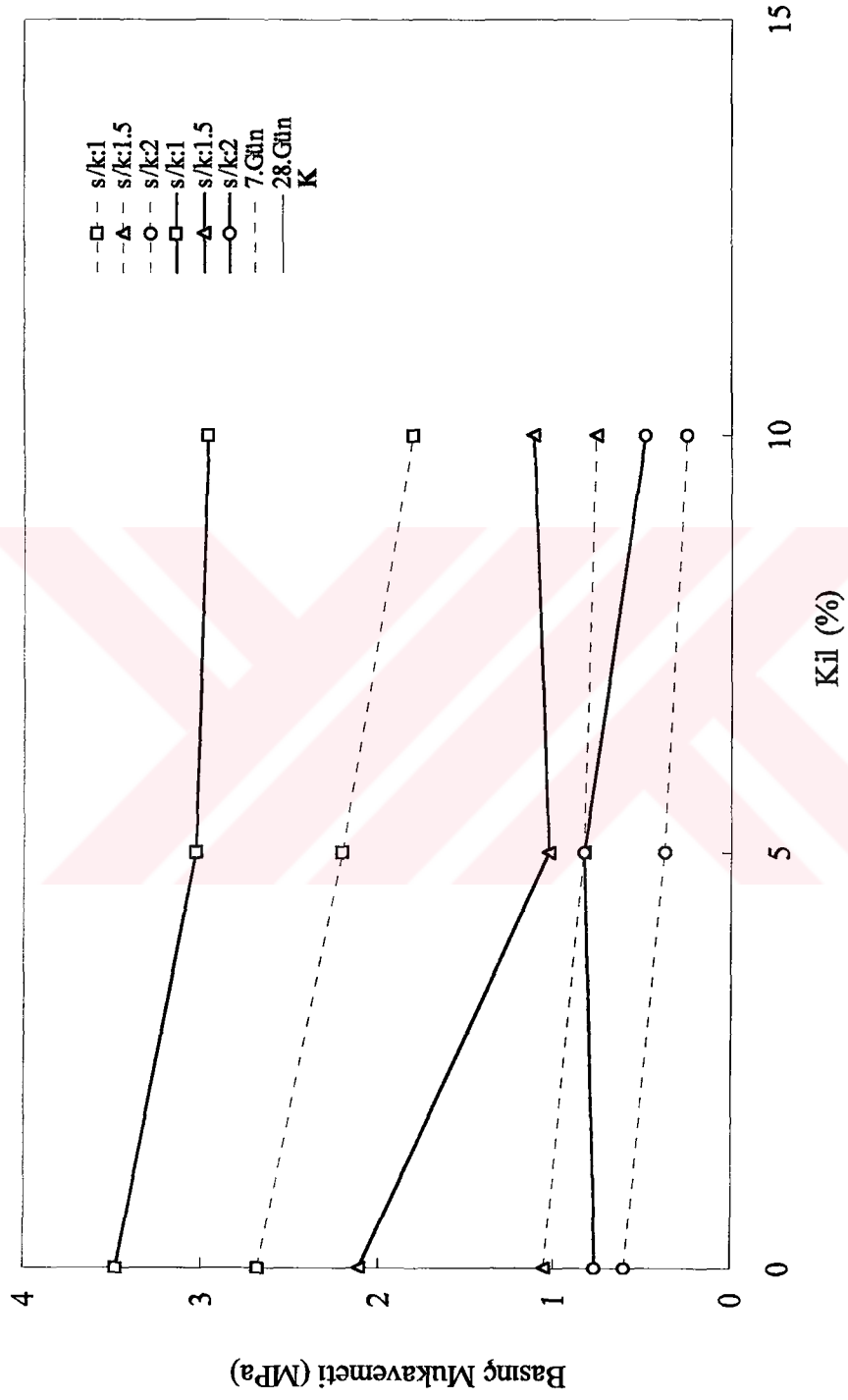
Şekil A.23. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,30$ K/ÇM=5/95)



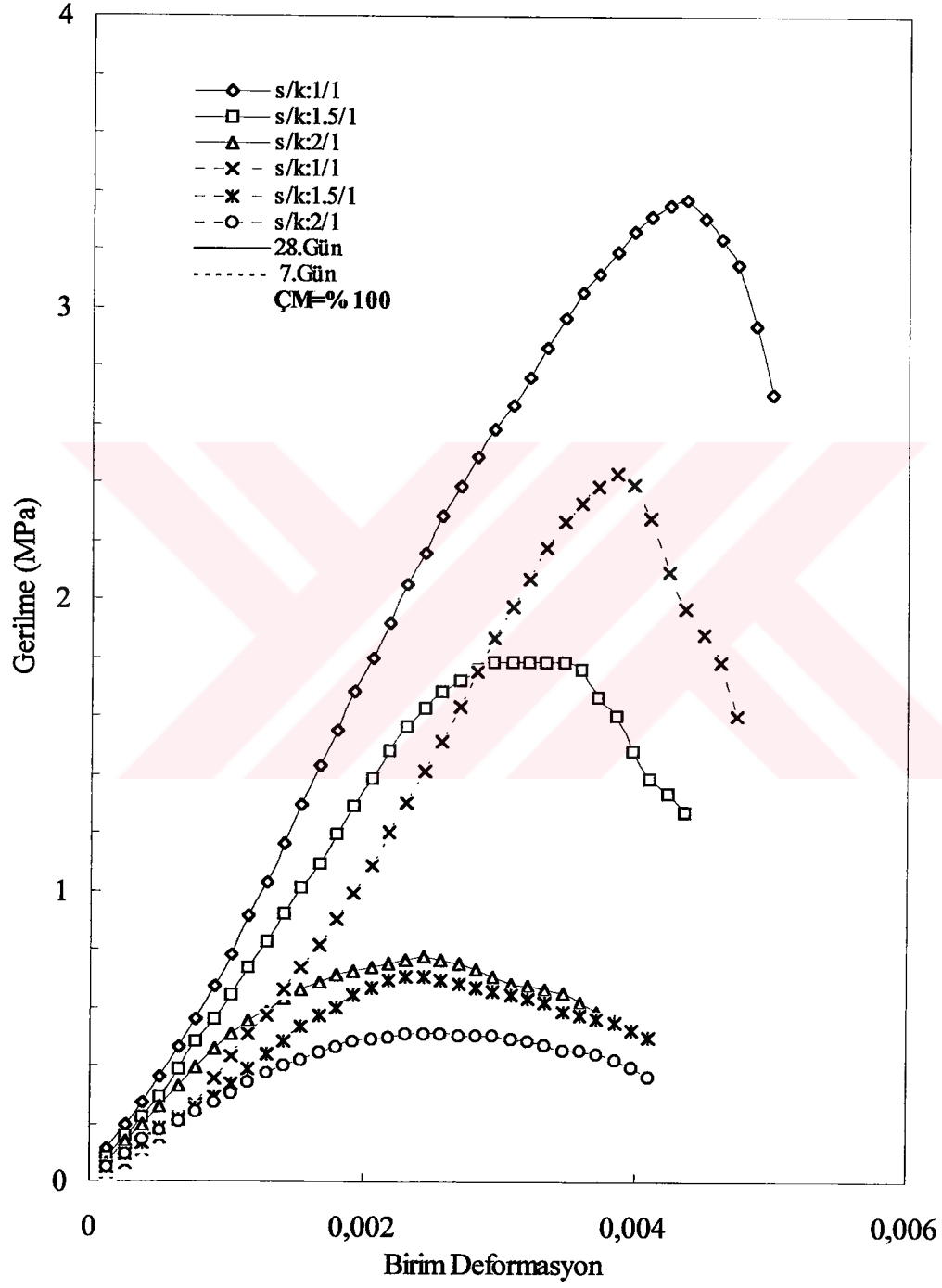
Şekil A.24. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,30$ K/ÇM=10/90)



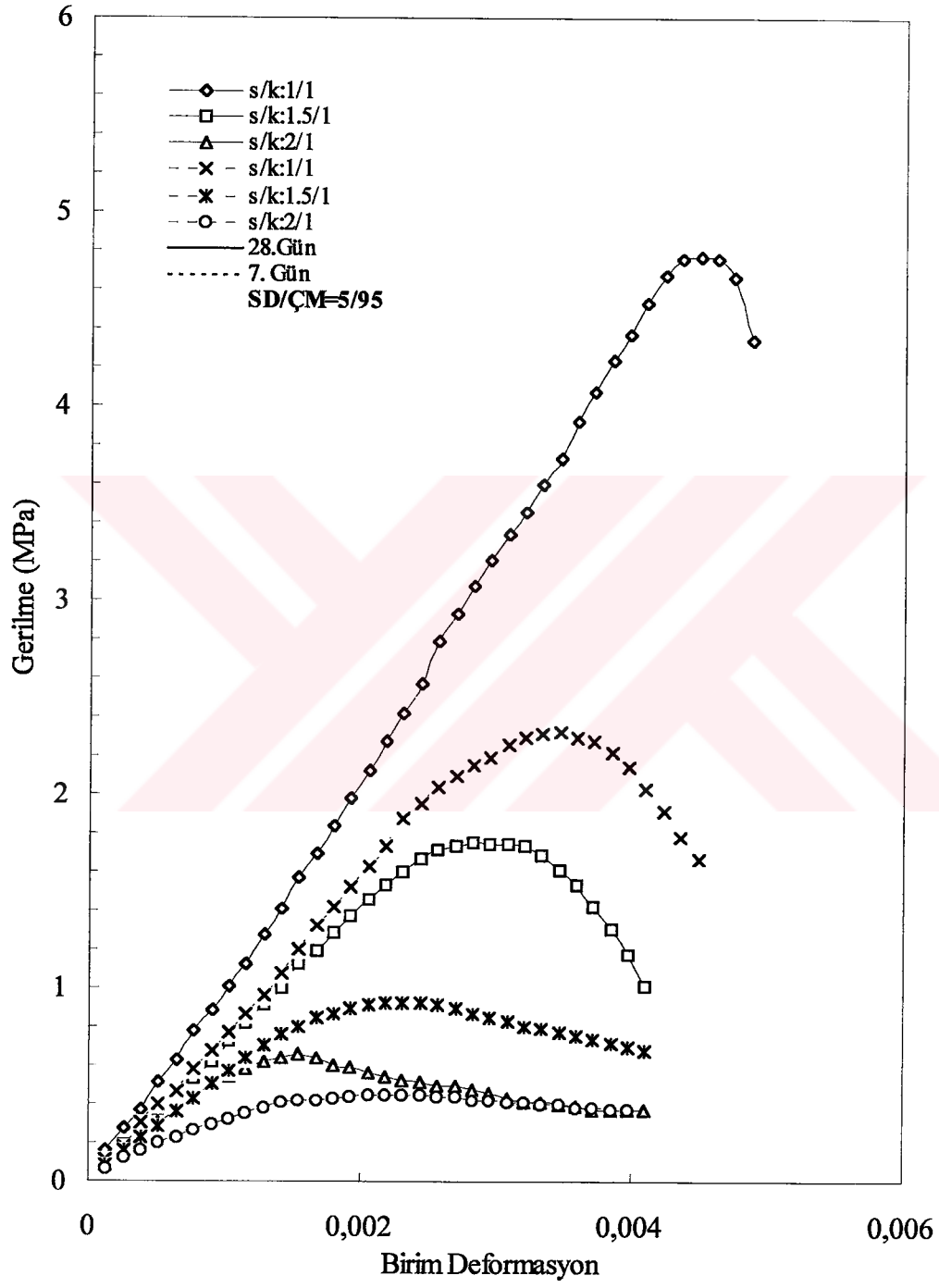
Şekil A.25. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Uçucu Kül Yüzdesi ile Değişimi
($D_r=0.30$, Karışım UK/ÇM)



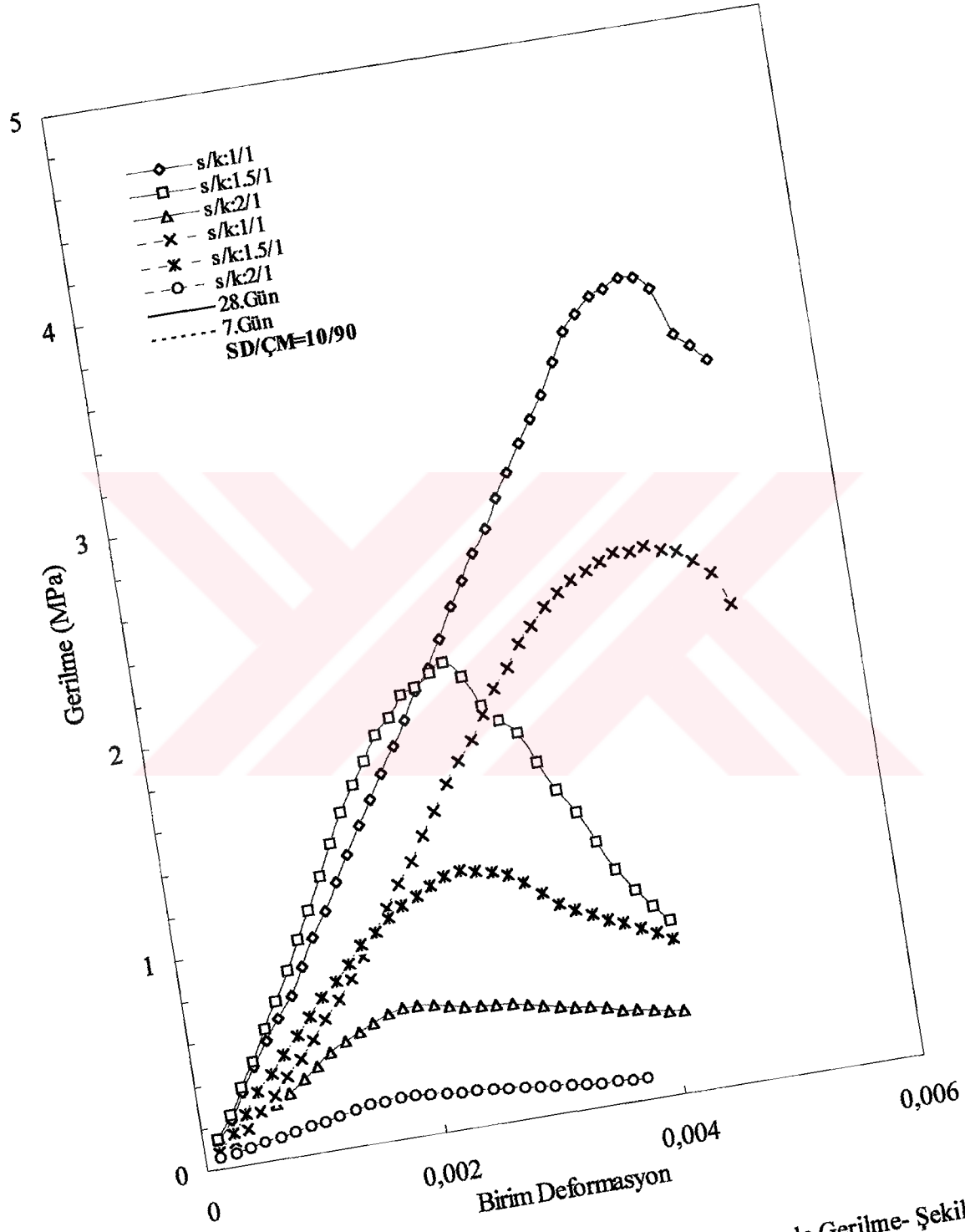
Şekil A.26. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Kil Yüzdesi ile Değişimi
($D_r=0.30$, Karışım Kil/Çimento)



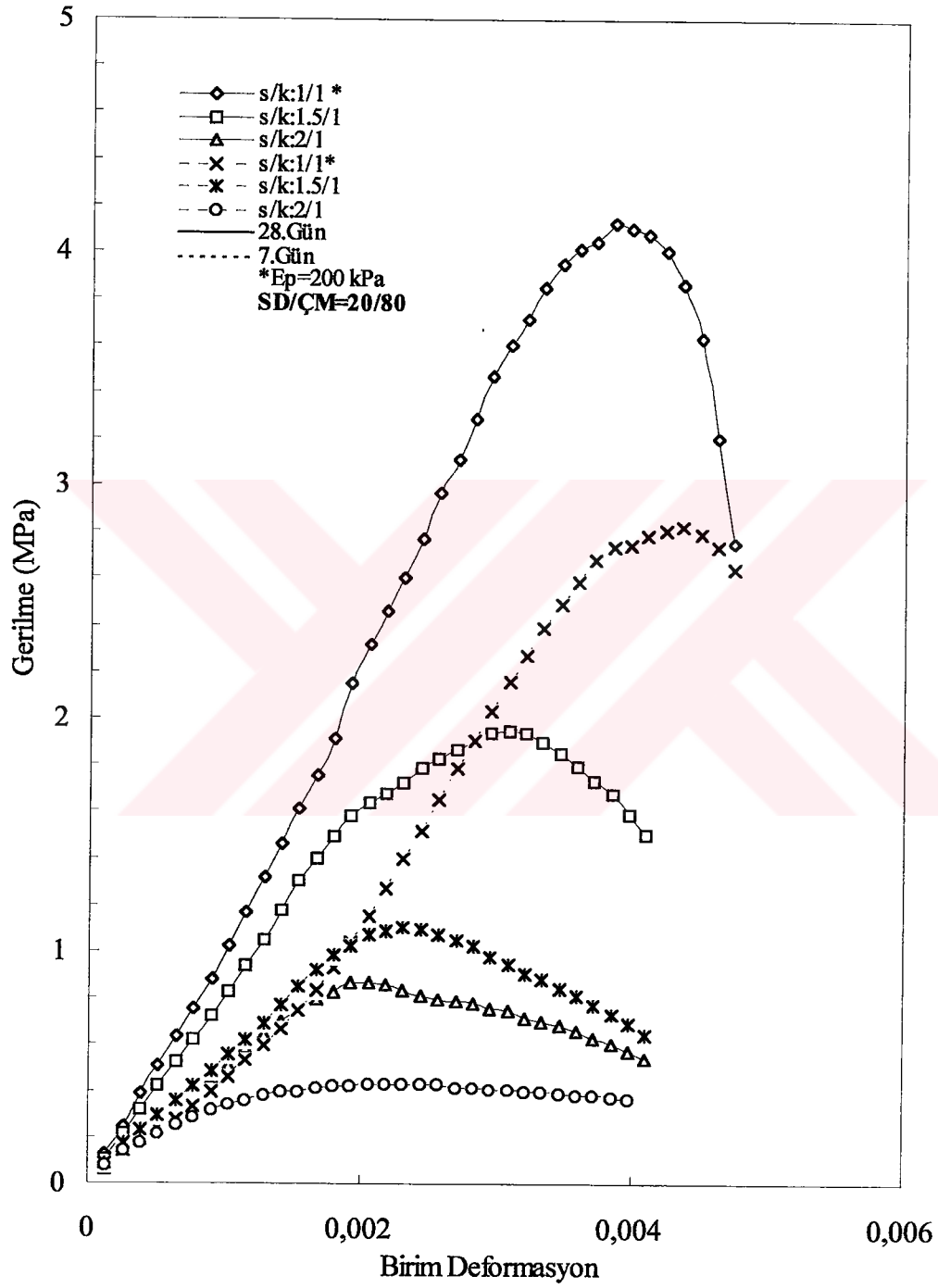
Şekil A.27. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme- Şekil Değiştirme Eğriler, ($D_r=0.80$, %100 Çimento)



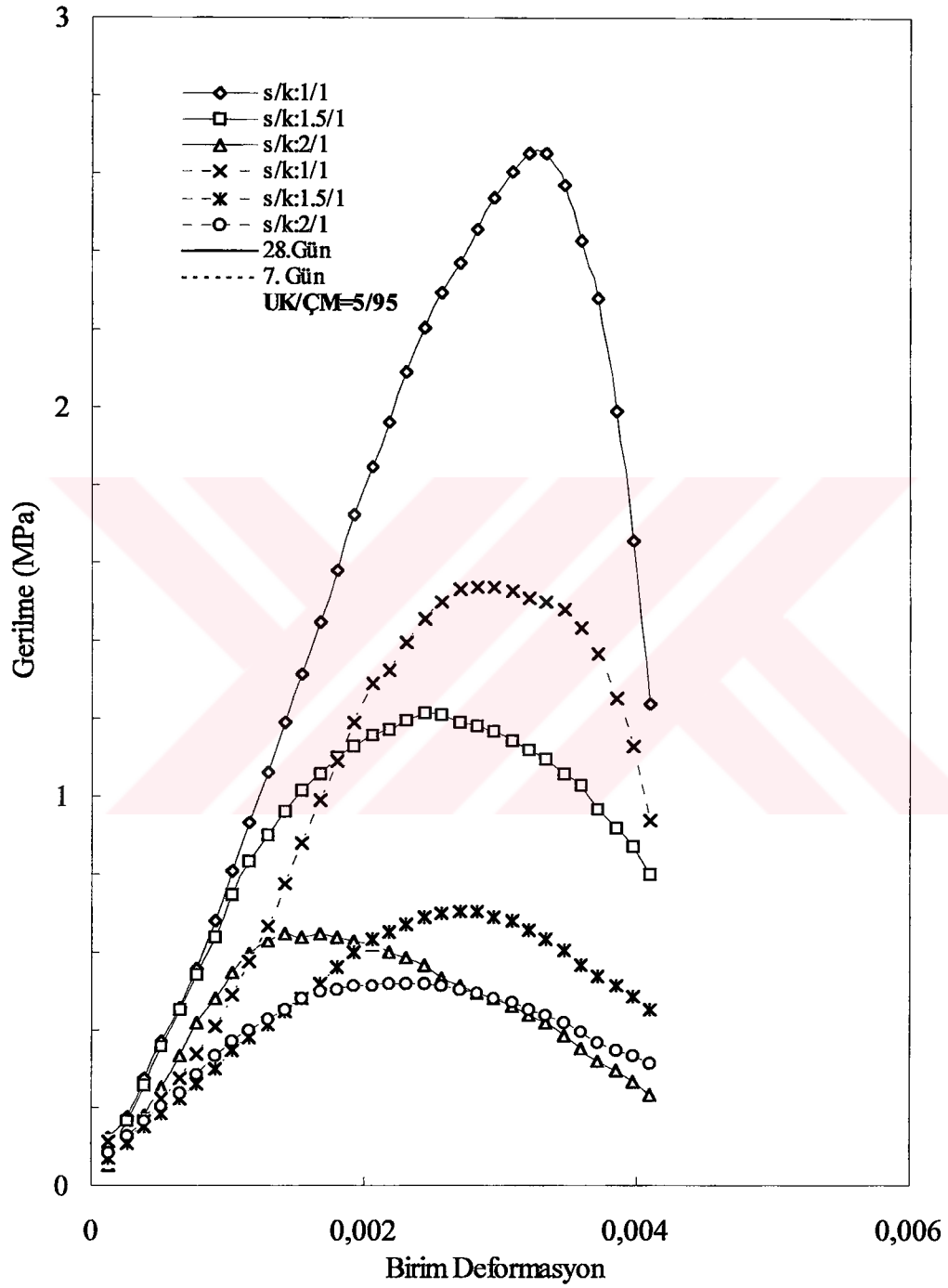
Şekil A.28. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme- Şekil Değiştirme Eğrileri, ($D_r = 0.80$, $SD/ÇM = 5/95$)



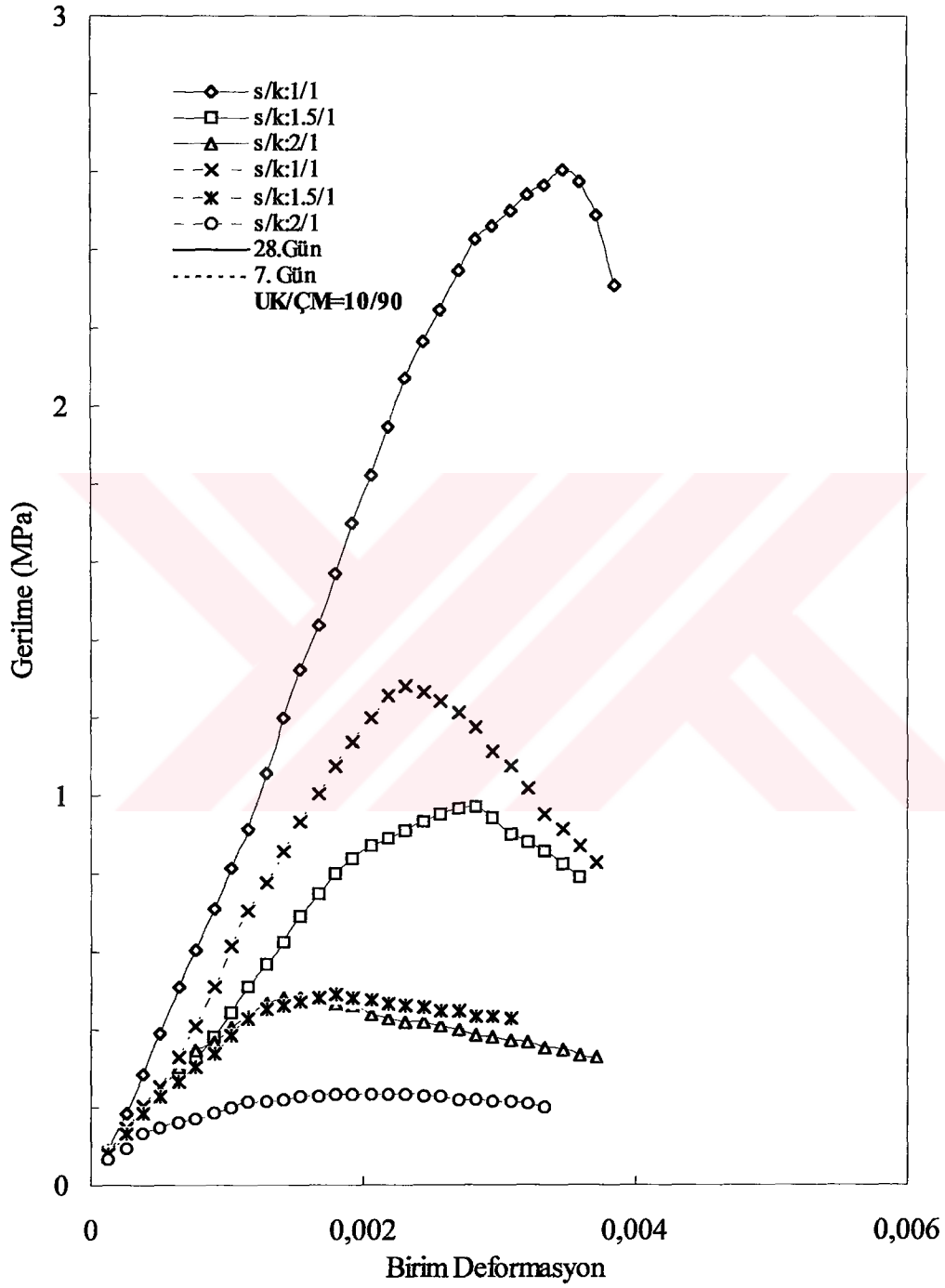
Şekil A.29. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme- Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.80$, $SD/ÇM = 10/90$)



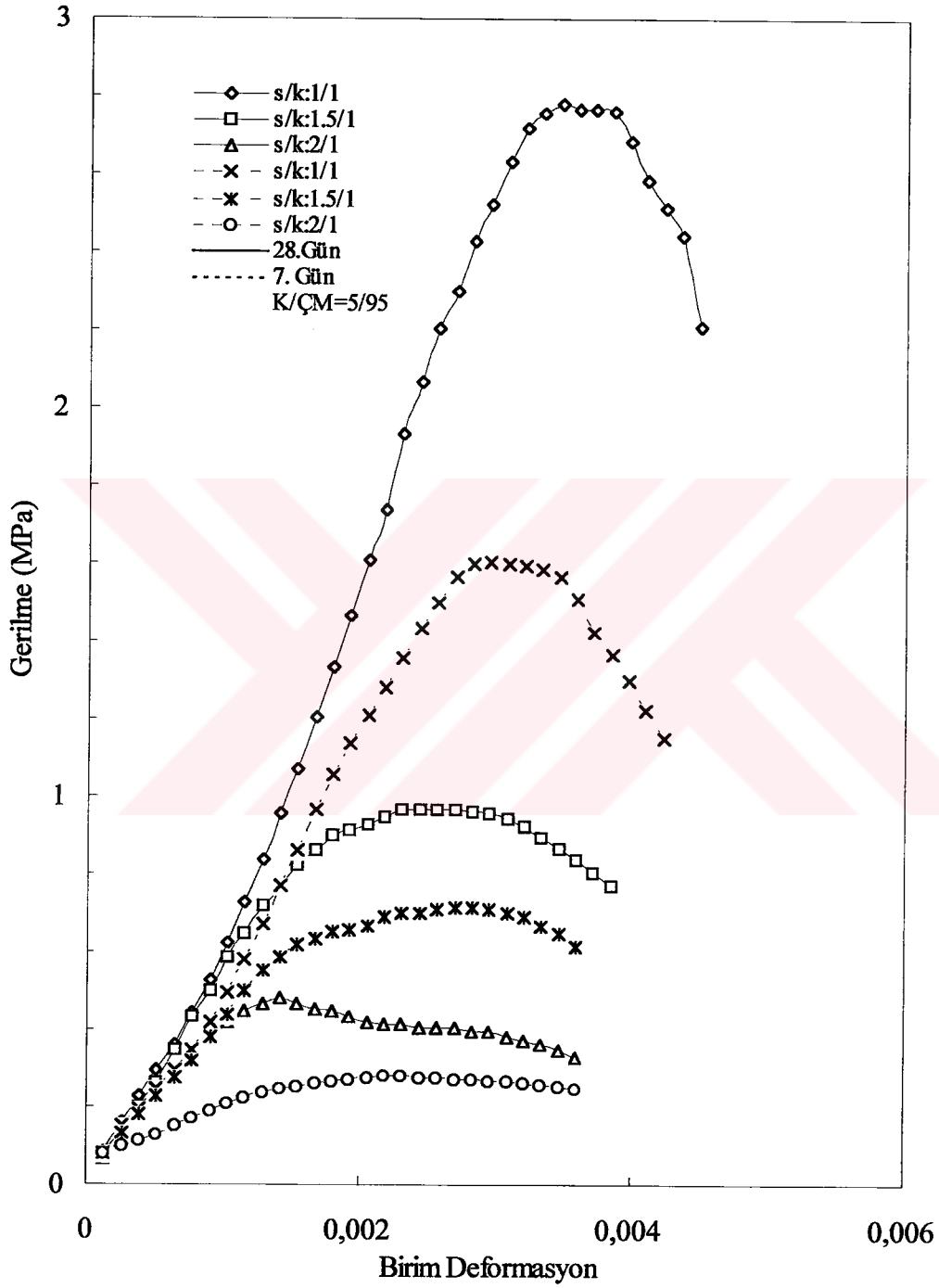
Şekil A.30. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r=0.80$, SD/ÇM=20/80)



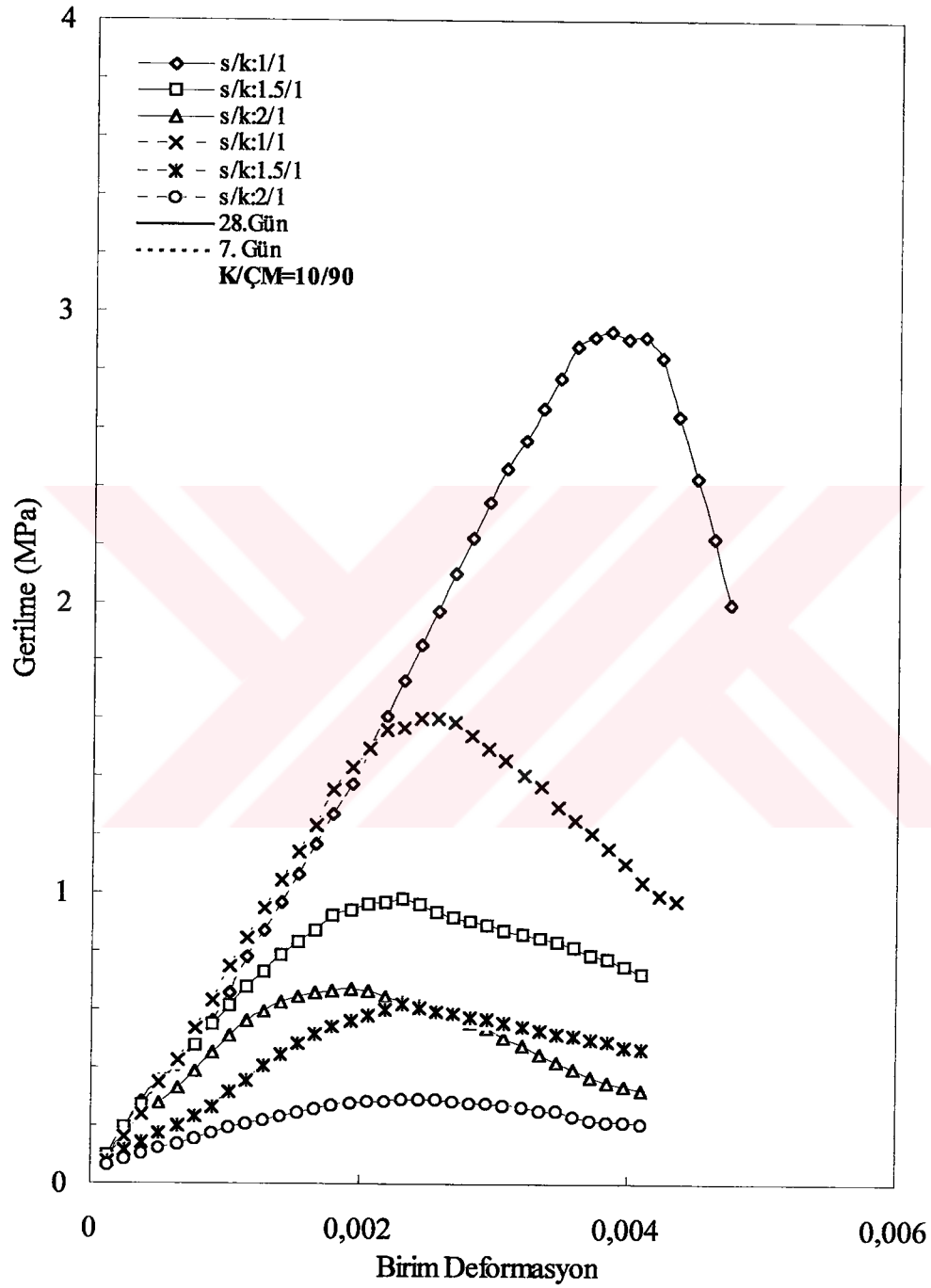
Şekil A.31. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r=0.80$, UK/ÇM= 5/95)



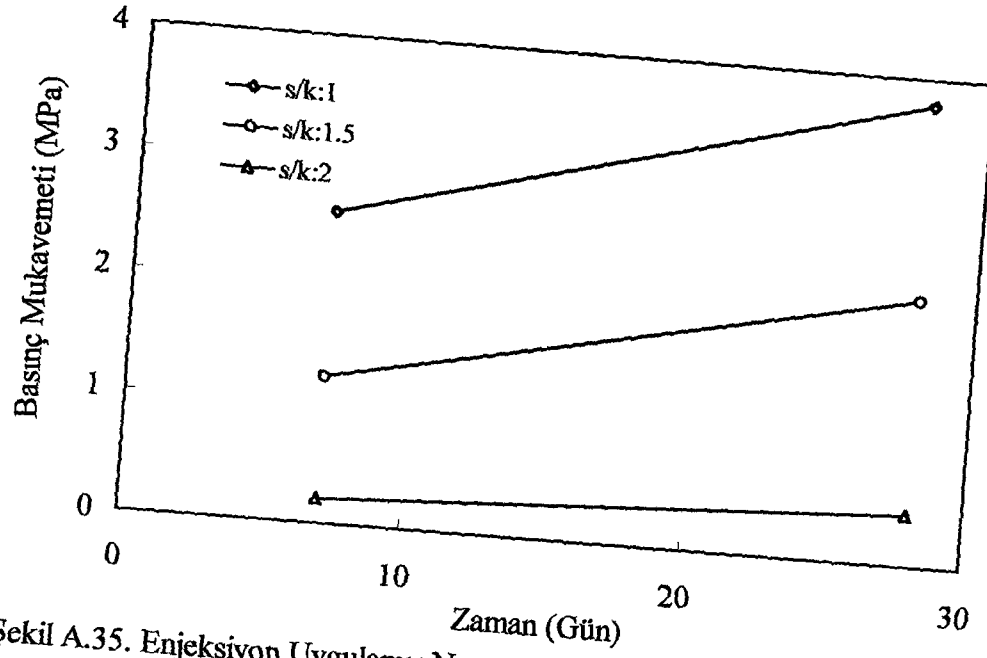
Şekil A.32. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.80$, UK/ÇM= 10/90)



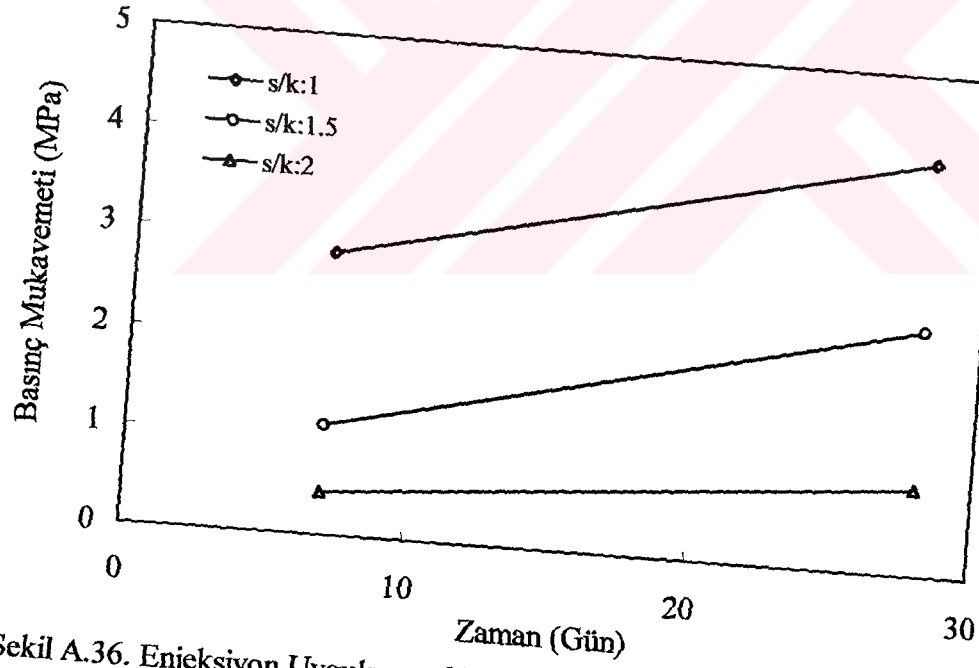
Şekil A.33. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.80$, Kil/Çimento=5/95)



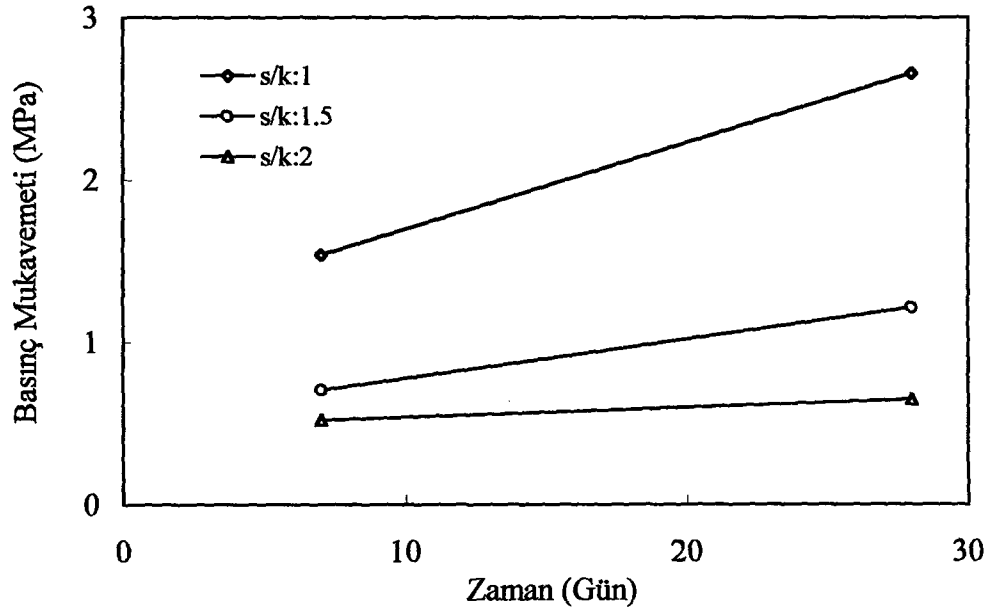
Şekil A.34. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin 7. Ve 28. Günde Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri ($D_r = 0.80$, Kil/Çimento= 10/90)



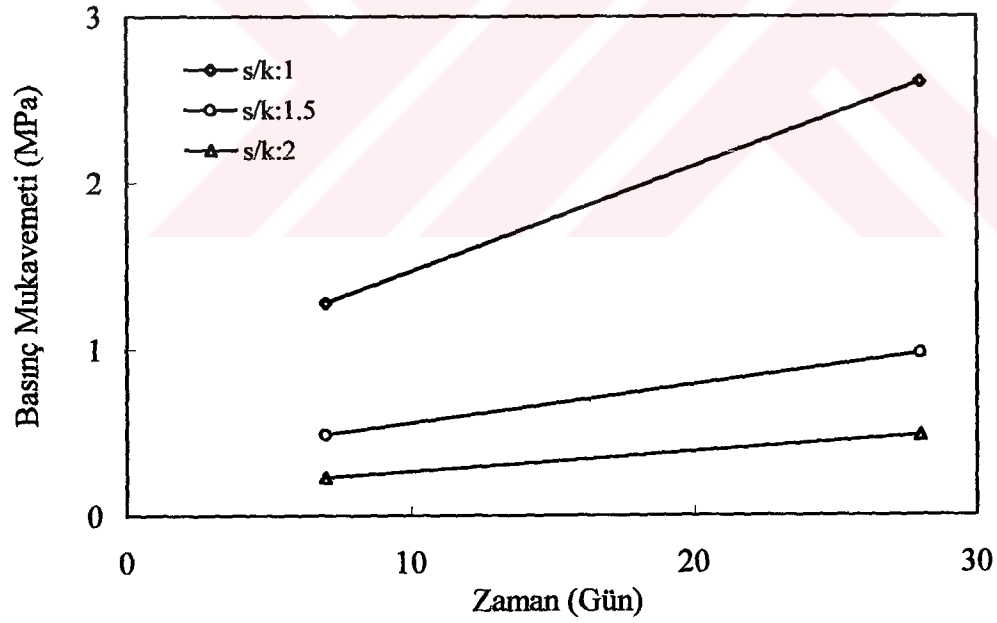
Şekil A.35. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,80$ SD/ÇM=10/90)



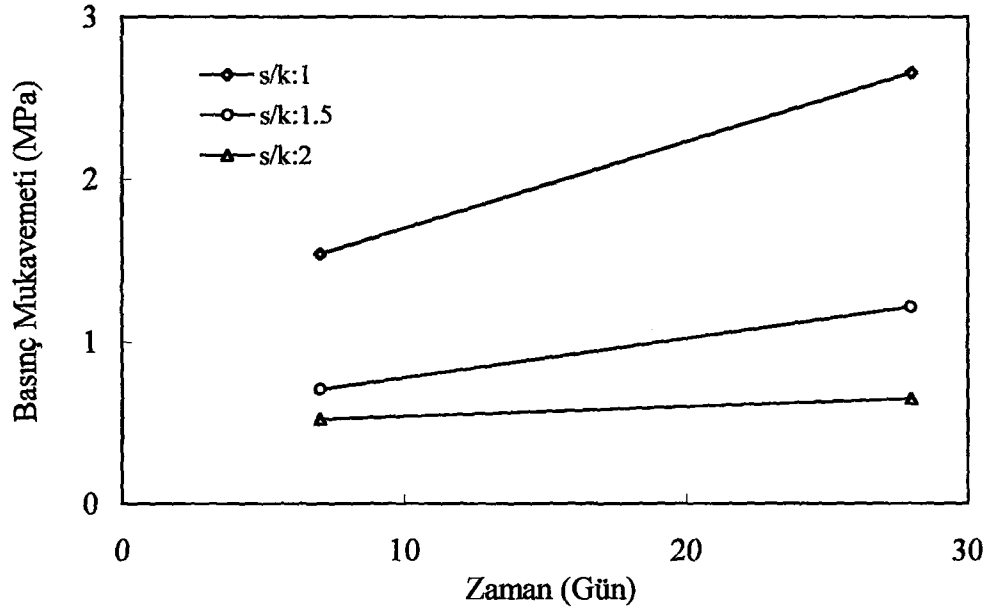
Şekil A.36. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,80$ SD/ÇM=20/80)



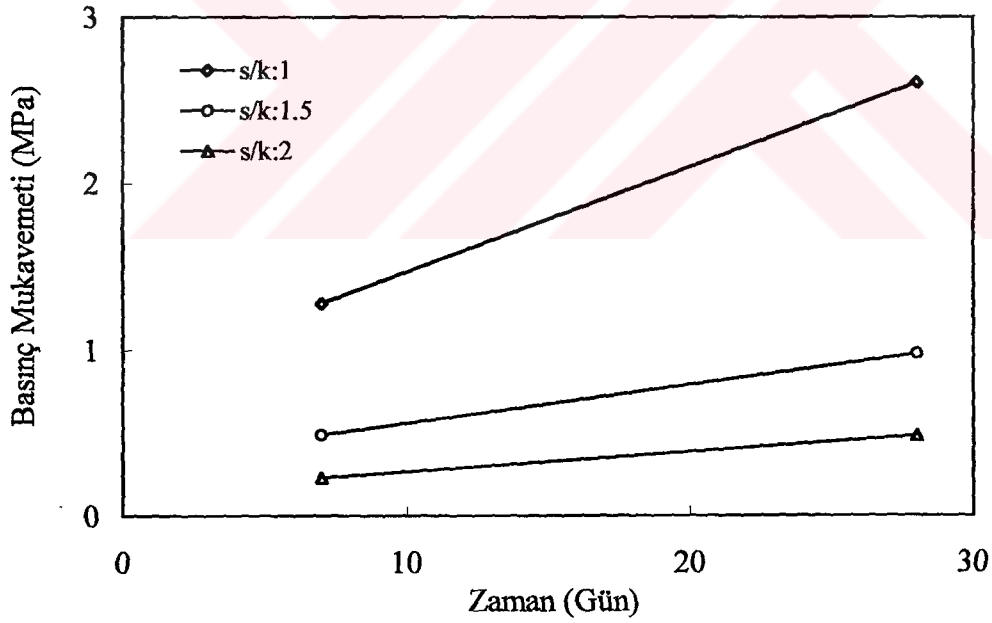
Şekil A.37. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,80$ UK/ÇM=5/95)



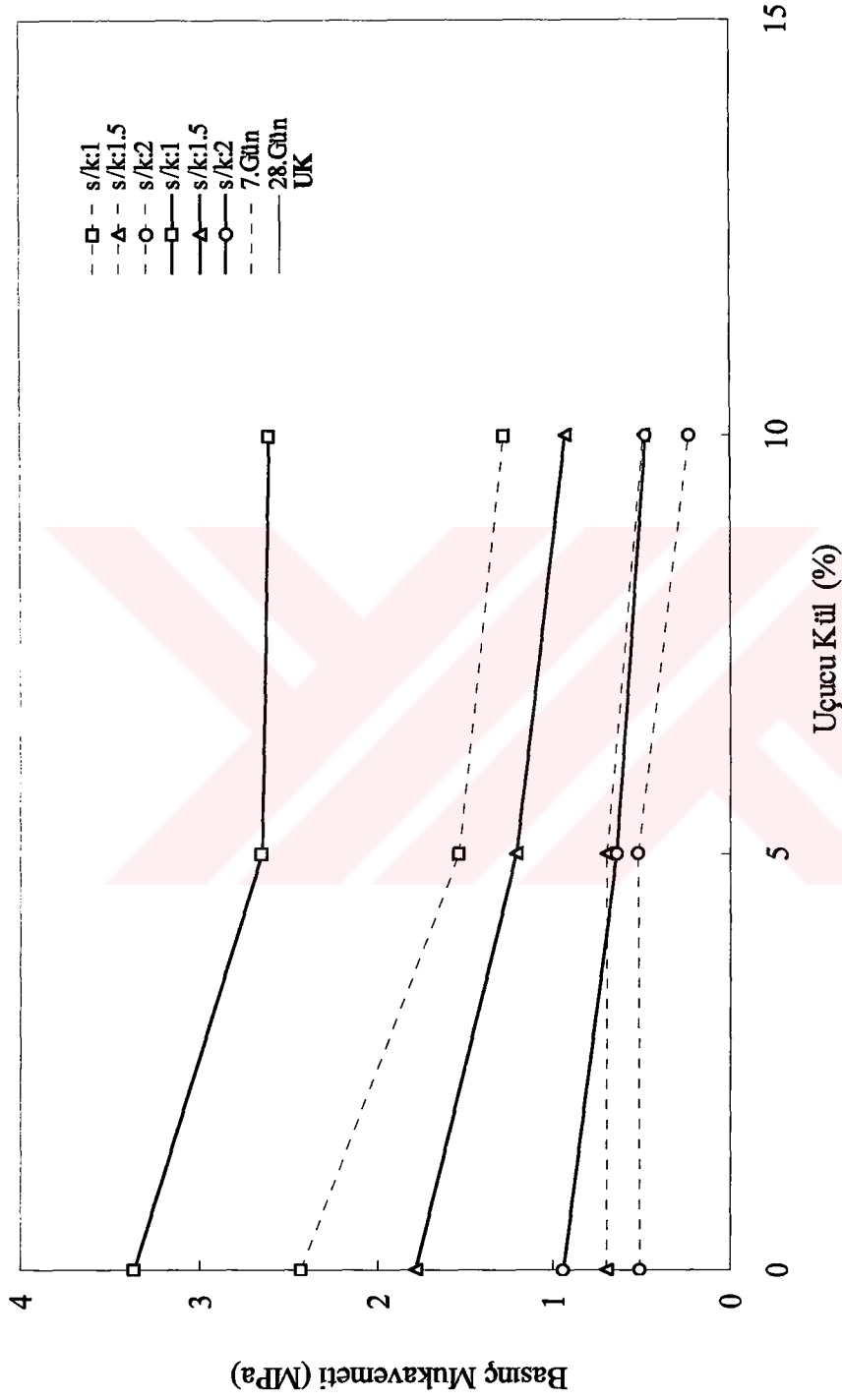
Şekil A.38. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,80$ UK/ÇM=10/90)



Şekil A.39. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,80$ K/ÇM=5/95)



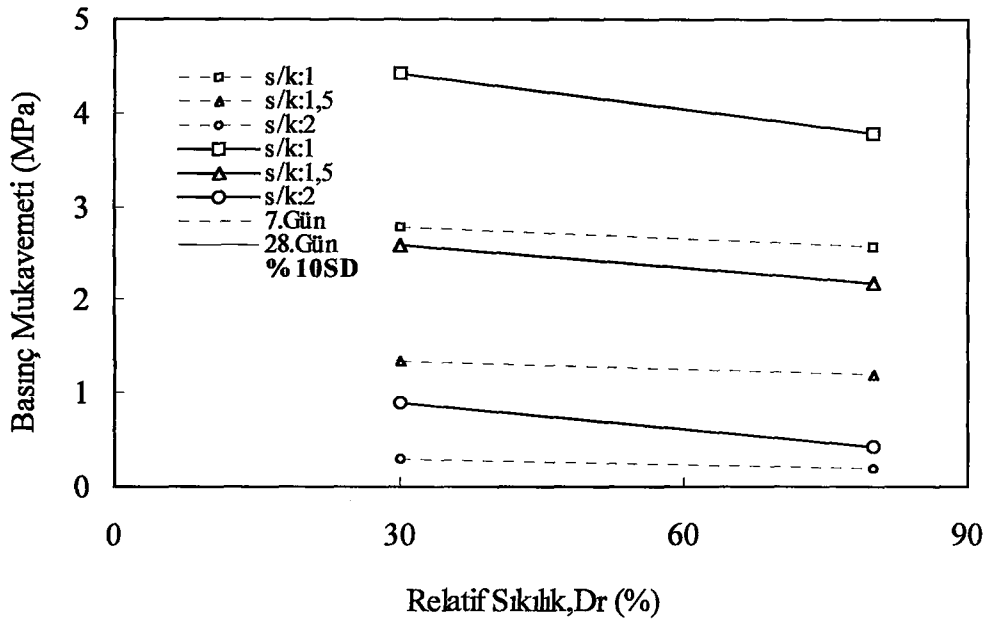
Şekil A.40. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Zamanla Değişimi ($D_r=0,80$ K/ÇM=10/90)



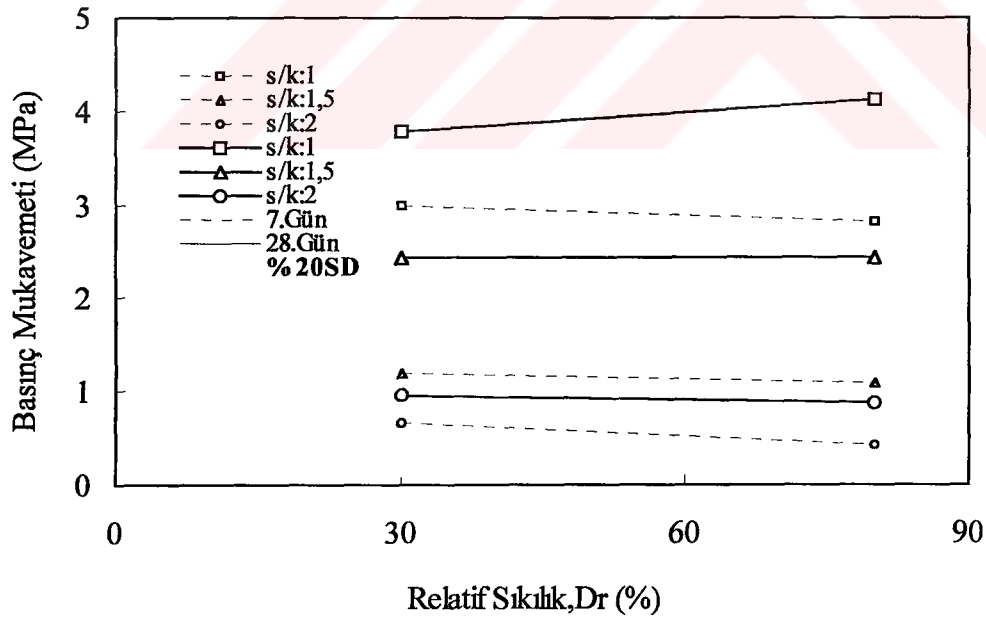
Şekil A.41. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Uçucu Kül Yüzdesi ile Değişimi
($D_r=0.80$, Karışım UK/ÇM)



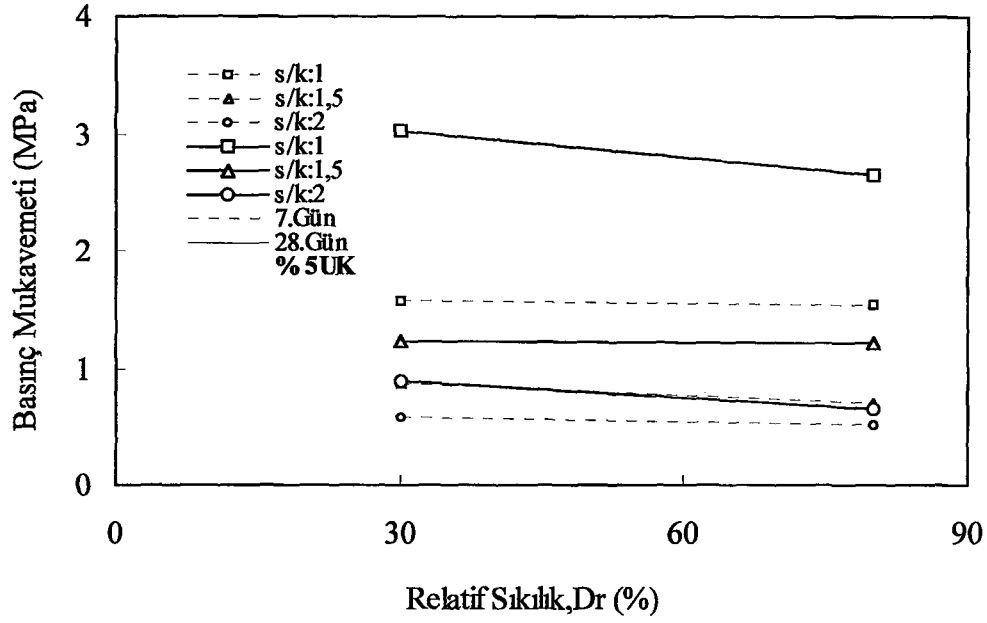
Şekil A.42. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetinin Kil Yüzdesi ile Değişimi
(Dr=0.80, Karışım Kil/Çimento)



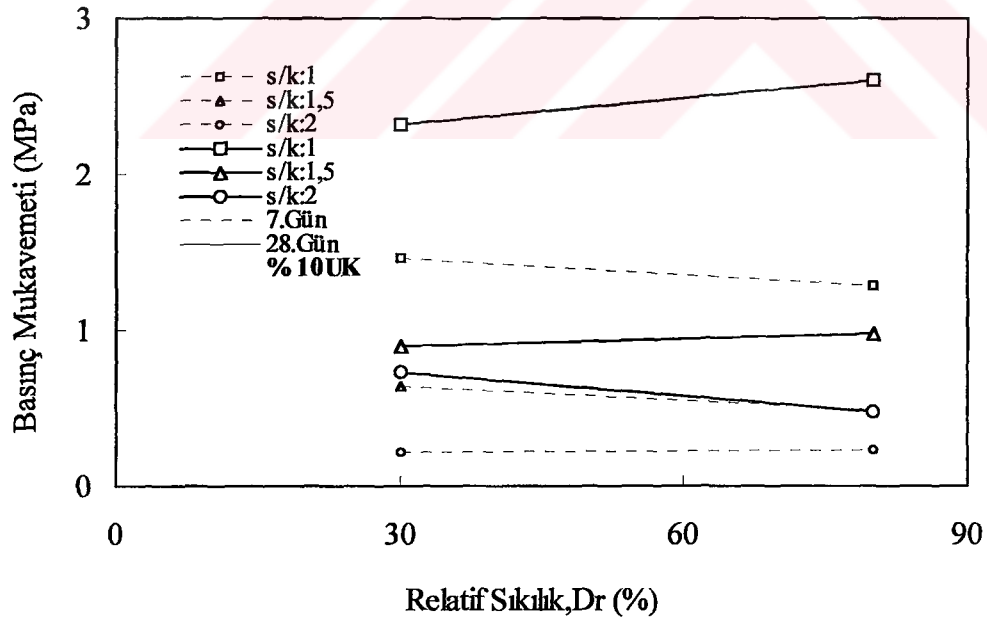
Şekil A.43. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Relatif Sıkılığı (Dr) ile Değişimi, (SD/ÇM= 10/90)



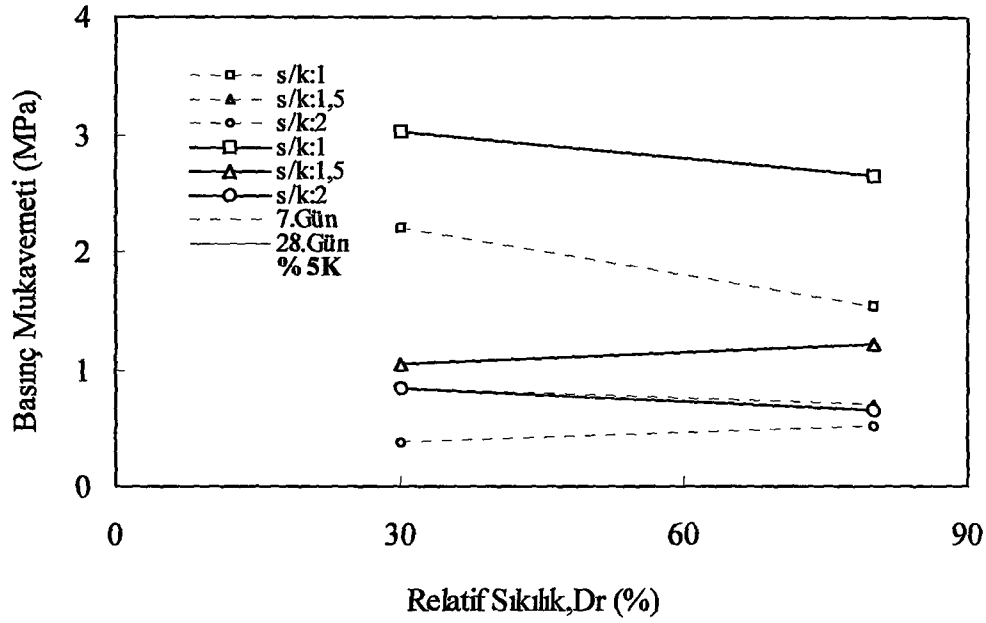
Şekil A.44. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Relatif Sıkılığı (Dr) ile Değişimi, (SD/ÇM= 20/80)



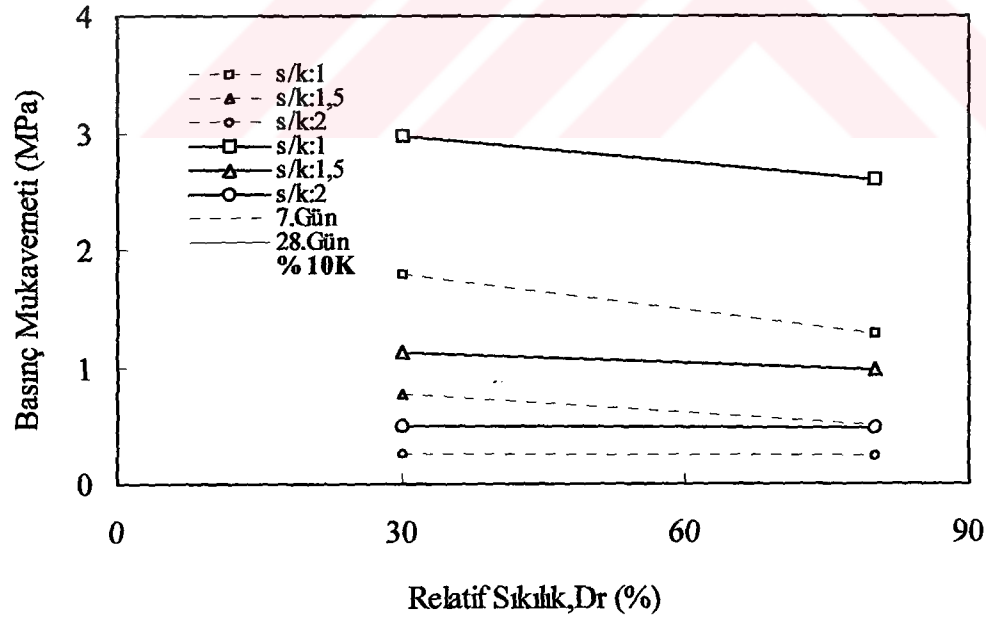
Şekil A.45. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Relatif Sıklığı (Dr) ile Değişimi, (UK/ÇM= 5/95)



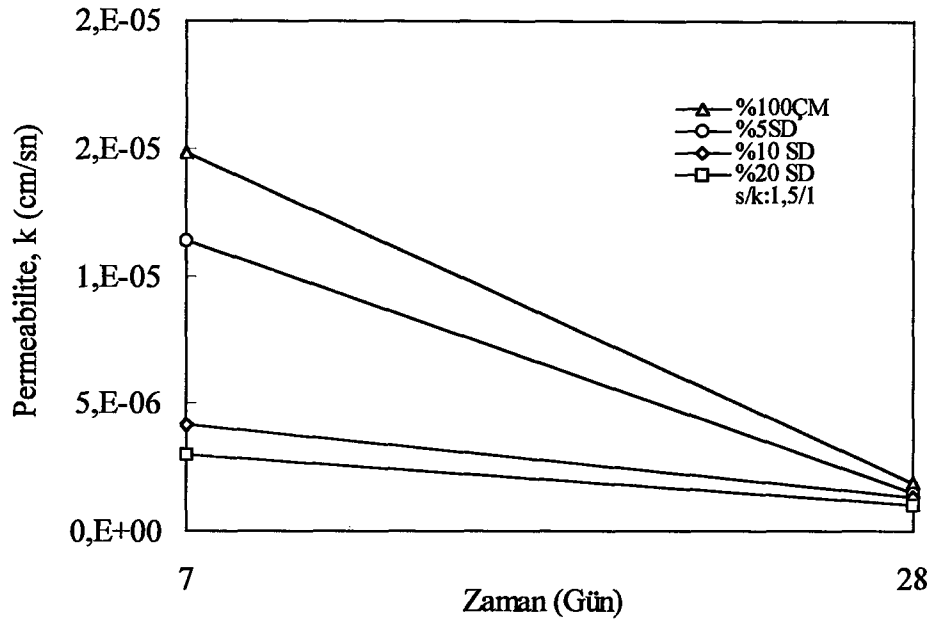
Şekil A.46. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Relatif Sıklığı (Dr) ile Değişimi, (UK/ÇM= 10/90)



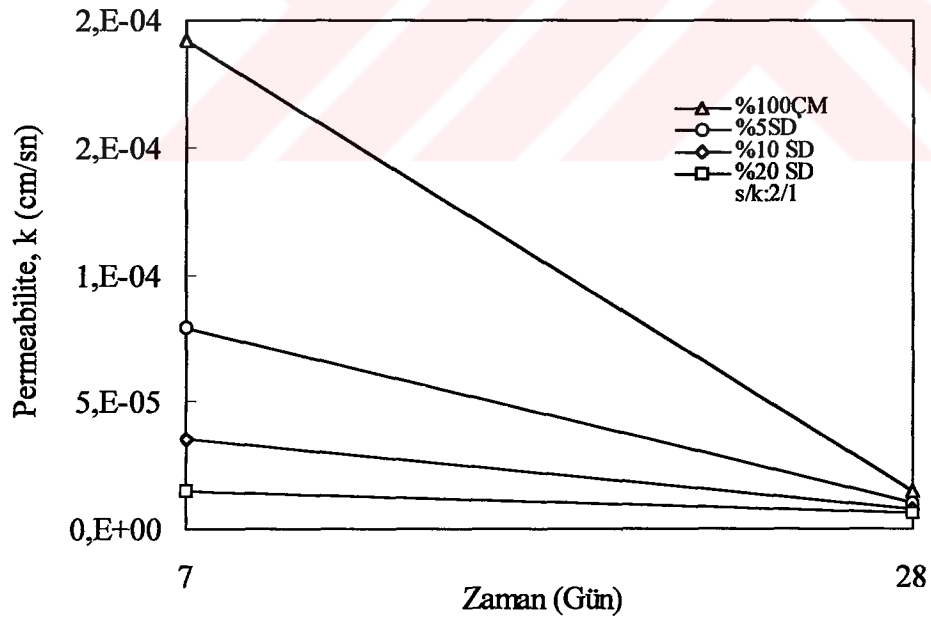
Şekil A.47. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basma Mukavemetlerinin Relatif Sıkılığı (Dr) ile Değişimi, (Kil/Çimento= 5/95)



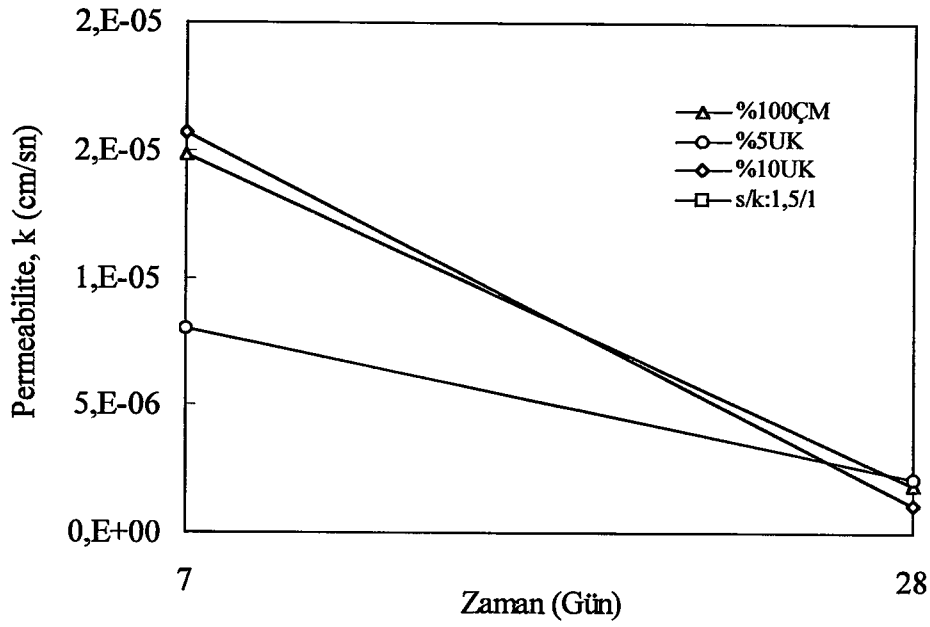
Şekil A.48. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Basma Mukavemetlerinin Relatif Sıkılığı (Dr) ile Değişimi, (Kil/Çimento= 10/90)



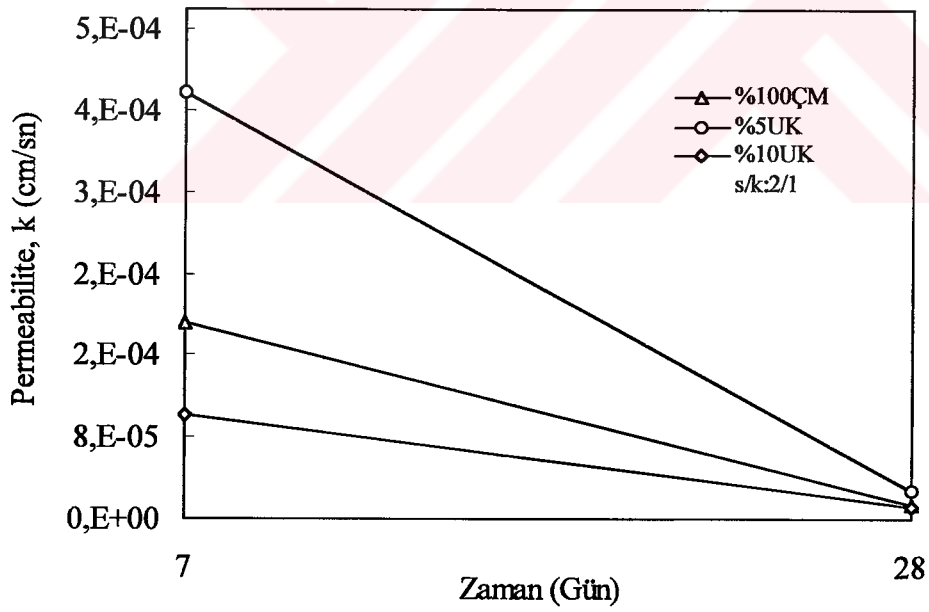
Şekil A.49. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Zamanla Değişimi ($D_r=0.50$, Çimento ve Silis Dumanı, Su/Katı= 1.5/1)



Şekil A.50. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Zamanla Değişimi ($D_r= 0.50$, Çimento ve Silis Dumanı, Su/Katı= 2/1)



Şekil A.51. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Zamanla Değişimi ($D_r = 0.50$, Çimento ve Uçucu Kül, Su/Katı= 1.5/1)



Şekil A.52. Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerde Permeabilitenin Zamanla Değişimi ($D_r = 0.50$, Çimento ve Uçucu Kül, Su/Katı= 2/1)

ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında Erzurum'un Oltu ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1985 yılında kayıt olduğu İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 1990 yılında tamamladı. 1991 yılında Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1995 yılında aynı üniversitede yüksek lisans programını tamamladı ve aynı yıl İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, Geoteknik Programında doktora başladı. Halen görevini sürdürmektedir.

