

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK BASINÇLI ÇİMENTO ENJEKSİYONU İLE ZEMİN
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Utkan MUTMAN

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Danışman: Yrd. Doç.Dr. Aydın KAVAK**

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK BASINÇLI ÇİMENTO ENJEKSİYONU İLE ZEMİN
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

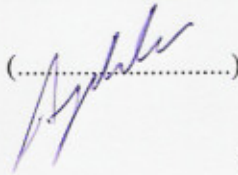
İnş. Yük. Müh. Utkan MUTMAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 01 Haziran 2007

Tezin Savunulduğu Tarih: 03 Temmuz 2007

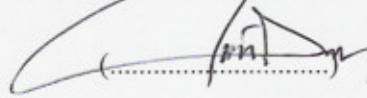
Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr. Aydın KAVAK

(.....)


Üye

Doç.Dr. Sami ARSOY

(.....)


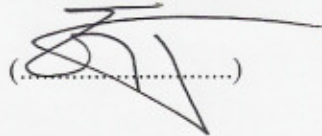
Üye

Yrd.Doç.Dr. Özkan ÇORUK

(.....)

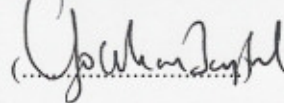

Üye

Prof.Dr. Erol GÜLER

(.....)


Üye

Prof.Dr. Gökhan BAYKAL

(.....)


KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Özellikle yaşanan deprem felaketleri sonrasında can kaybının çok olduğu konut amaçlı yapılarda zemin iyileştirmesinin önemli olduğu görülmüştür. Ülkemizde inşaat maliyetini artırdığı için küçük projelerde zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulamasından kaçınılmaktadır. Düşük basınçlı çimento enjeksiyonu, granüler zeminlerin iyileştirilmesi amacı ile ekonomik olarak uygulanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu çalışmada, düşük basınçlı çimento enjeksiyonu ile iyileştirme sonucunda farklı özellikteki zeminlerde oluşan değişimler incelenmiştir.

Düşük basınçlı çimento enjeksiyonu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda bana çalışma fırsatı veren ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Aydın KAVAK'a, laboratuvar çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen İnşaat Mühendisi Murat BÜYÜKKABASAKAL ve İnşaat Mühendisi Osman AZAY'a, hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen babam Erol MUTMAN ve annem Canan MUTMAN'a, her zaman yanımda olan eşim İnşaat Mühendisi Güneş MUTMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER.....	x
ÖZET	xii
İNGİLİZCE ÖZET.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ZEMİN ENJEKSİYONU.....	3
2.1. Enjeksiyonun Tarihçesi.....	5
2.2. Enjeksiyon Teknikleri	6
2.2.1. Permeasyon enjeksiyonu.....	7
2.2.2. Kompaksiyon enjeksiyonu	11
2.2.3. Çatlatma enjeksiyonu.....	12
2.2.4. Kontak enjeksiyonu.....	13
2.2.5. Kaya enjeksiyonu	14
2.2.6. Konsolidasyon enjeksiyonu	15
2.2.7. Perde enjeksiyonu	16
2.2.8. Yüksek basınçlı enjeksiyon (Jet grout)	16
2.3. Enjeksiyon Harçları.....	17
2.3.1. Çimento harçları.....	18
2.3.2. Kimyasal harçlar	19
2.4. Enjeksiyon Düzenekleri	19
3. KONUS İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	23
4. METODOLOJİ	34
5. LABORATUVAR ÇALIŞMASI.....	37
5.1.Laboratuvar Enjeksiyonunda Kullanılan Zemin ve Karışımların Özellikleri.....	37
5.1.1. Enjeksiyonda kullanılan zemin numunesinin özellikleri	38
5.1.2. Enjeksiyonda kullanılan çimentonun özellikleri.....	39
5.1.3. Enjeksiyonda kullanılan akışkanlaştırıcının özellikleri	39
5.2. Enjeksiyonda Kullanılan Deney Düzeneginin Özellikleri	40
5.3. Enjeksiyon Uygulamaları.....	42
5.3.1. Ön enjeksiyon uygulaması	42
5.3.2. Enjeksiyon uygulaması	47
5.4. Laboratuvar Sonuçları.....	50
5.4.1. GP sınıfı numunenin sonuçları.....	50
5.4.2. SP sınıfı numunenin sonuçları	74
5.4.3. Laboratuvar sonuçlarının değerlendirilmesi	99
6. ARAZİ ÇALIŞMASI.....	102
6.1. Enjeksiyon Sahalarının Geoteknik Özellikleri.....	102
6.1.1. Enjeksiyon sahası 1'in (ES-1) geoteknik özellikleri	103
6.1.2. Enjeksiyon sahası 2'nin (ES-2) geoteknik özellikleri	105
6.1.3. Enjeksiyon sahası 3'ün (ES-3) geoteknik özellikleri	108

6.2. Sahada Enjeksiyon Uygulaması.....	110
6.2.1. ES-1 sahasında enjeksiyon uygulaması.....	111
6.2.2. ES-2 sahasında enjeksiyon uygulaması.....	113
6.2.3. ES-3 sahasında enjeksiyon uygulaması.....	115
6.3. Enjeksiyon Sonrası Sahaların Özellikleri.....	118
6.3.1. ES-1 sahasının enjeksiyon sonrası geoteknik özellikleri.....	118
6.3.2. ES-2 sahasının enjeksiyon sonrası geoteknik özellikleri.....	119
6.3.3. ES-3 sahasının enjeksiyon sonrası geoteknik özellikleri.....	121
6.4. Arazi Çalışması Sonuçları.....	122
6.5. Bilgisayar Analizi.....	131
6.5.1. Analiz sonuçları	134
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	142
KAYNAKLAR	144
EK-A	149
EK-B	168
EK-C	187
EK-D	206
EK-E.....	225
EK-F.....	237
ÖZGEÇMİŞ	240

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Zemin enjeksiyon tekniklerinin çeşitleri.....	6
Şekil 2.2: Permeasyon Enjeksiyonu.....	8
Şekil 2.3: Kompaksiyon enjeksiyonu.....	12
Şekil 2.4: Çatlatma enjeksiyonu.....	13
Şekil 2.5: Kontak enjeksiyonu.....	14
Şekil 2.6: Kaya enjeksiyonu.....	15
Şekil 2.7: Kompaksiyon enjeksiyonu.....	15
Şekil 2.8: Perde enjeksiyonu.....	16
Şekil 2.9: Yüksek basınç enjeksiyonu (Jet-grout).....	17
Şekil 2.10: Sirkülasyonlu enjeksiyon sistemi.....	20
Şekil 2.11: Direkt enjeksiyon sistemi.....	20
Şekil 2.12: Manşetli boru.....	21
Şekil 2.13: Açık uçlu boru.....	22
Şekil 4.1: Çalışmanın akış diyagramı.....	35
Şekil 5.1: Doğal malzemenin dane dağılım grafiği.....	38
Şekil 5.2: Enjeksiyon deney düzeneği.....	41
Şekil 5.3: Enjeksiyon deney düzeneği.....	41
Şekil 5.4: Deneme enjeksiyonlarında kullanılan dane dağılımları.....	42
Şekil 5.5: Deneme enjeksiyonlarında başarısız olan numune.....	44
Şekil 5.6: Enjeksiyon uygulanan dane dağılımları.....	45
Şekil 5.7: Enjeksiyon uygulanmış numuneler.....	48
Şekil 5.8: Enjeksiyon uygulaması başarısız olan numuneler.....	50
Şekil 5.9: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	52
Şekil 5.10: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	53
Şekil 5.11: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	54
Şekil 5.12: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	55
Şekil 5.13: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	56
Şekil 5.14: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	57
Şekil 5.15: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	59
Şekil 5.16: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	60
Şekil 5.17: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	61
Şekil 5.18: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	62

Şekil 5.19: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	63
Şekil 5.20: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	65
Şekil 5.21: %25 relatif sıklılıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	66
Şekil 5.22: %50 relatif sıklılıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	67
Şekil 5.23: %75 relatif sıklılıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	68
Şekil 5.24: %100 relatif sıklılıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	69
Şekil 5.25: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklılığı %25 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	70
Şekil 5.26: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklılığı %50 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	71
Şekil 5.27: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklılığı %75 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	72
Şekil 5.28: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklılığı %100 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	73
Şekil 5.29: 100 kPa basınç ile enjeksiyon yapılmış değişik relatif sıklılıklardaki numunelerin serbest basınç mukavemetleri	74
Şekil 5.30: Serbest basınç deneyi yapılmış numuneler	74
Şekil 5.31: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	77
Şekil 5.32: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	78
Şekil 5.33: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	79
Şekil 5.34: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	80
Şekil 5.35: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	81
Şekil 5.36: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	83
Şekil 5.37: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	84
Şekil 5.38: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	85
Şekil 5.39: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	86
Şekil 5.40: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	87
Şekil 5.41: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	88
Şekil 5.42: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi.....	89
Şekil 5.43: %25 relatif sıklılıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	90

Şekil 5.44: %50 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	92
Şekil 5.45: %75 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	93
Şekil 5.46: %100 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi	94
Şekil 5.47: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %25 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	95
Şekil 5.48: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %50 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	96
Şekil 5.49: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %75 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	97
Şekil 5.50: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %100 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)	98
Şekil 5.51: 100 kPa basınç ile enjeksiyon yapılmış değişik relatif sıklıklardaki numunelerin serbest basınç mukavemetleri	99
Şekil 5.52: GP malzemesi (ç/s) ² -serbest basınç mukavemeti arasındaki regrasyon analizi	100
Şekil 5.53: SP malzemesi (ç/s) ² -serbest basınç mukavemeti arasındaki regrasyon analizi	100
Şekil 6.1: ES-1 sahası zemin kesiti	103
Şekil 6.2: ES-1 enjeksiyon öncesi CPT deneyi sonuçları	105
Şekil 6.3: ES-2 sahası zemin kesiti	107
Şekil 6.4: ES-2 enjeksiyon öncesi CPT deneyi sonuçları	108
Şekil 6.5: ES-3 sahası zemin kesiti	110
Şekil 6.6: Enjeksiyon düzeneği	111
Şekil 6.7: Enjeksiyon düzeneği	111
Şekil 6.8: ES-1 sahasında enjeksiyon noktaları	112
Şekil 6.9: ES-2 sahasında enjeksiyon noktaları	115
Şekil 6.10: ES-3 sahasında enjeksiyon noktaları	116
Şekil 6.11: ES-1 enjeksiyon sonrası CPT deneyi sonuçları	119
Şekil 6.12: ES-2 enjeksiyon sonrası CPT deneyi sonuçları	120
Şekil 6.13: ES-1 sahasının SPT deney sonuçları	122
Şekil 6.14: ES-2 sahasının SPT deney sonuçları	123
Şekil 6.15: ES-3 sahasının SPT deney sonuçları	123
Şekil 6.16: ES-1 sahasının CPT sonuçları	127
Şekil 6.17: ES-2 sahasının CPT sonuçları	128
Şekil 6.18: ES-1 sahasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı	130
Şekil 6.19: ES-2 sahasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı	130
Şekil 6.20: ES-3 sahasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı	131
Şekil 6.21: ES-1 ve ES-2 sahalarının modellenen zemin kesiti ve üst yapı	134
Şekil 6.22: ES-3 sahasının modellenen zemin kesiti ve üst yapı	134
Şekil 6.23: ES-1 sahası A noktasında hesaplanan gerilme çarpanı deformasyon grafiği	136
Şekil 6.24: ES-1 sahası A noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği	136
Şekil 6.25: ES-2 sahası A noktasında hesaplanan gerilme çarpanı deformasyon grafiği	137

Şekil 6.26: ES–2 sahası A noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği	138
Şekil 6.27: ES–3 sahası A noktasında hesaplanan gerilme çarpanı deformasyon grafiği	138
Şekil 6.28: ES–3 sahası B noktasında hesaplanan gerilme çarpanı deformasyon grafiği	139
Şekil 6.29: ES–3 sahası C noktasında hesaplanan gerilme çarpanı deformasyon grafiği	139
Şekil 6.30: ES–3 sahası A noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği	140
Şekil 6.31: ES–3 sahası B noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği	141
Şekil 6.32: ES–3 sahası C noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği	141

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Zemin özelliklerine göre enjeksiyon teknikleri	7
Tablo 5.1: Numunelerin indeks özellikleri.....	39
Tablo 5.2: Numunelerin permeabilite katsayıları ve boşluk oranları.....	39
Tablo 5.3: Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	40
Tablo 5.4: Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri	40
Tablo 5.5: Başarısız olan numunelerin enjeksiyon edilebilme değerleri	44
Tablo 5.6: Kullanılacak numunelerin enjeksiyon edilebilme değerleri	47
Tablo 5.7: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetleri	50
Tablo 5.8: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin elastisite modülleri.....	51
Tablo 5.9: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetleri	75
Tablo 5.10: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin elastisite modülleri.....	75
Tablo 6.1: ES-1 sahasında enjeksiyon öncesi SPT sonuçları.....	103
Tablo 6.2: ES-1 sahasında enjeksiyon öncesi laboratuvar deneyleri	104
Tablo 6.3: ES-1 sahasında enjeksiyon öncesi sismik kırılma ölçümleri	104
Tablo 6.4: ES-2 sahasında enjeksiyon öncesi SPT sonuçları.....	106
Tablo 6.5: ES-2 sahasında enjeksiyon öncesi laboratuvar deneyleri	106
Tablo 6.6: ES-2 sahasında enjeksiyon öncesi sismik kırılma ölçümleri	107
Tablo 6.7: ES-3 sahasında enjeksiyon öncesi SPT sonuçları.....	109
Tablo 6.8: ES-3 sahasında enjeksiyon öncesi laboratuvar deneyleri	109
Tablo 6.9: ES-3 sahasında enjeksiyon öncesi sismik kırılma ölçümleri	110
Tablo 6.10: ES-1 sahasında enjeksiyon uygulamasında kullanılan karışım miktarı	113
Tablo 6.11: ES-2 sahasında enjeksiyon uygulamasında kullanılan karışım miktarı	114
Tablo 6.12: ES-3 sahasında enjeksiyon uygulamasında kullanılan karışım miktarı	117
Tablo 6.13: ES-1 sahasında enjeksiyon sonrası SPT sonuçları.....	118
Tablo 6.14: ES-1 sahasında enjeksiyon sonrası sismik kırılma ölçümleri	118
Tablo 6.15: ES-2 sahasında enjeksiyon sonrası SPT sonuçları.....	120
Tablo 6.16: ES-2 sahasında enjeksiyon sonrası sismik kırılma ölçümleri	120
Tablo 6.17: ES-3 sahasında enjeksiyon sonrası SPT sonuçları.....	121
Tablo 6.18: ES-3 sahasında enjeksiyon sonrası sismik kırılma ölçümleri	121
Tablo 6.19: Enjeksiyon öncesi ve sonrasında SPT sonuçlarına göre taşıma gücü değerleri	124
Tablo 6.20: Enjeksiyon öncesi ve sonrasında sismik kırılma deneyi sonuçları.....	124
Tablo 6.21: ES-1 sahasının sismik kırılma deneyi sonuçlarına bağlı zemin parametreleri.....	125
Tablo 6.22: ES-2 sahasının sismik kırılma deneyi sonuçlarına bağlı zemin parametreleri.....	126
Tablo 6.23: ES-3 sahasının sismik kırılma deneyi sonuçlarına bağlı zemin parametreleri.....	126
Tablo 6.24: Enjeksiyon öncesi ve sonrasında CPT sonuçlarına göre taşıma gücü değerleri	128
Tablo 6.25: Zemin tabakalarının analizde kullanılan enjeksiyon öncesi parametreleri	133

Tablo 6.26: Zemin tabakalarının analizde kullanılan enjeksiyon sonrası parametreleri	133
Tablo 6.27: Analiz sonuçları	135

SEMBOLLER

a_{mak}	: Depremden dolayı zeminde oluşacak maksimum ivme
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
Cr	: Süreklilik katsayısı
Cu	: Üniformluk katsayısı
D_{10}	: Zeminin en ince %10'luk bölümünün en büyük dane çapı
D_{15}	: Zeminin en ince %15'lik bölümünün en büyük dane çapı
D_{30}	: Zeminin en ince %30'luk bölümünün en büyük dane çapı
D_{60}	: Zeminin en ince %60'lık bölümünün en büyük dane çapı
d_{85}	: Çimentonun en ince %85'lik bölümünün en büyük dane çapı
d_{90}	: Çimentonun en ince %90'lik bölümünün en büyük dane çapı
Dr	: Relatif sıkılık
E	: Elastisite modülü
e	: Çatlak genişliği
e_{mak}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
E_p	: Enjeksiyon basıncı
FC	: Zeminin 0,06 mm'den küçük dane oranı
f_s	: Sürtünme direnci
G	: Kesme modülü
GP	: Üniform çakıl
Gs	: Özgül kütle
K	: Bulk modülü
k	: Permeabilite katsayısı
N	: Zeminin enjeksiyon edilebilirlik sayısı
N^*	: Efektif gerilmeye göre düzeltilmiş standart penetrasyon vuruş sayısı
N_{60}	: Düzeltilmiş standart penetrasyon vuruş sayısı
P	: Enjeksiyon basıncı
PÇ	: Portland çimentosu
qc	: Uç direnci
R^2	: Korelasyon katsayısı
r_d	: Derinliğe bağlı olarak değişen gerilme düzeltme sayısı
s/ç	: su/çimento
SC	: Killi kum
SK	: Sondaj kuyusu
SM	: Siltli kum
SP	: Üniform kum
u_2	: Boşluk suyu basıncı
V_p	: Boyuna dalga hızı
V_s	: Enine dalga hızı
ϕ^o	: İçsel sürtünme açısı
γ_{doy}	: Doygun birim hacim ağırlık

γ_{kuru}	: Kuru birim hacim ağırlık
γ_{mak}	: Maksimum birim hacim ağırlık
γ_{min}	: Minimum birim hacim ağırlık
γ	: Birim hacim ağırlık
ν	: Poisson oranı
ψ	: Dilatansi açısı
σ_o	: Toplam düşey gerilme
σ'_o	: Efektif düşey gerilme

Kısaltmalar

CPT	: Koni penetrasyon sayısı
$CRR_{7,5}$: Çevrimsel direnç oranı
CSR	: Çevrimsel gerilme oranı
ES	: Enjeksiyon uygulama sahası
JSCE	: Japon inşaat mühendisleri birliği
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SPT-N	: Standart penetrasyon vuruş sayısı
TS1500/2000	: Türk standardı: Zemin Mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması
TS1900	: Türk standardı: İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri

DÜŞÜK BASINÇLI ÇİMENTO ENJEKSİYONU İLE ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Utkan MUTMAN

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon, Düşük Basıncılı Enjeksiyon, Zemin İyileştirme

Özet: Zemin enjeksiyonunda, zamanla sertleşen akışkan bir harç kontrollü olarak, basınç ile zemin ya da çatlaklı kaya içerisine içtilir. Enjeksiyon sırasında basıncı, hacmi ve akım hızı kontrol edilebilen harcın sertleşmesi sonucunda zeminin fiziksel özellikleri iyileştirilir. Zemin enjeksiyonu zeminin permeabilite değerinin düşürülmesinde, kayma mukavemetlerinin arttırılmasında veya deformasyonların azaltılmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmanın ilk aşamasında, laboratuvarda %25, %50, %75 ve %100 relatif sıklıkta hazırlanmış GP ve SP sınıfı iki farklı malzemeye, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa basınçlar ile çimento enjeksiyonu yapılmıştır. Enjeksiyonda 0,7, 1,0 ve 1,5 olmak üzere üç farklı su/çimento oranında çimento harcı kullanılmıştır. Enjeksiyon edilmiş numuneler 7 ve 28 gün boyunca suda kür edilmiştir. Kür süreleri sonunda numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Laboratuvar çalışması sonucunda enjeksiyon basıncı değişiminin serbest basınç mukavemetlerini etkilemediği, serbest basınç mukavemetinin harcın su/çimento oranıyla ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Çalışmanın ikinci aşamasında, seçilen üç arazide çimento enjeksiyonu yapılmıştır. Enjeksiyon öncesinde sahalarda zemin incelemesi yapılarak sahanın geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Zemin incelemesinde SPT, CPT ve sismik kırılma deneyleri yapılmıştır. Su/çimento oranı 1 olan harç, zemine derinliğe bağlı olarak, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa basınç ile enjekte edilmiştir. Enjeksiyondan 28 gün sonra sahalarda tekrar zemin incelemesi yapılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Vp ve Vs hızlarında % 64 ve %36 artışlar olmuştur. Enjeksiyon uygulanan tabakaların yerel zemin sınıfları Vp ve Vs hızındaki artışlara bağlı olarak bir sınıf yükselmiştir. Enjeksiyon öncesi ve sonrasında belirlenen geoteknik özellikler kullanılarak zemin üç boyutlu olarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda enjeksiyon sonrası için belirlenen zeminin son limit gerilmesi enjeksiyon öncesine göre %30 ile %60 arasında artmıştır.

IMPROVEMENT OF SOIL PROPERTIES WITH LOW PRESSURED CEMENT GROUTING

Utkan MUTMAN

Keywords: Grouting, Low Pressure Grouting, Soil Improvement

Abstract: In soil grouting, a fluid grout which was hardened in the course of time, is injected in soil or cracked rock with pressure under control. In the first stage of this study, cement grouting has been done with 100 kPa, 150 kPa and 200 kPa pressure to two different kinds of materials in GP and SP classes which were prepared with 25, 50, 75 and 100% relative density in the laboratory. During grouting, three different kinds of cement grout that have a concentration of water-cement ratio of 0,7, 1,0 and 1,5 is used. Grouted materials are cured for 7 and 28 days in water and after cure stage, unconfined compression test is performed on samples. As a result of laboratory study, it has been observed that the change in grouting pressure will not have an effect on unconfined compressive strengths; unconfined compressive strength has changed inversely proportional with water-cement ratio of grout. In the second stage, cement grouting is performed in-situ. Before grouting, selected fields are inspected to determine the geotechnical properties. SPT, CPT and seismic refraction tests are performed. According to soil's depth, grout which has a concentration of water-cement ratio of 1,0, grouted with 100 kPa, 150 kPa and 200 kPa pressure. At the end of 28 days after grouting, on fields, soil is inspected again to determine the geotechnical properties of it. V_p and V_s velocities have increased 64% and 36% times respectively. Due to increase in V_p and V_s velocities, layers local soil classes which were grouted, have increased one soil class. Three-dimensional analysis has been analyzed by using the geotechnical properties which were determined before and after grouting. At the end of analysis, soil's ultimate limit state that is determined after grouting, has increased between 30%-60% when it is compared to the natural state of the same soil.

1. GİRİŞ

Zemin enjeksiyonu, zamanla sertleşen akışkan bir harcın basınç ile zemin ya da çatlaklı kaya içerisine enjekte edilmesi şeklinde uygulanan bir yöntemdir. Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi, temel takviyesi, oturma ve deformasyonların azaltılması için enjeksiyon uygulaması, özellikle çatlaklı kaya ve granüler zeminlerde, yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca barajlarda sızdırmazlığın sağlanması, tünellerde yapı ile doğal zeminin birleştirilmesi için zemin enjeksiyonu uygulanmaktadır.

Zemin iyileştirilmesi amacı ile çok kullanılan bir yöntem olmasına rağmen, enjeksiyonun farklı zeminlerin geoteknik özelliklerine olan etkileri ile ilgili çalışmalar mevcut değildir. Genellikle enjeksiyon ile ilgili daha önce yapılmış olan laboratuvar çalışmalarında, enjeksiyon harcının özellikleri ve harcın zemine enjeksiyon edilebilirliği incelenmiştir. Özellikle çimento karışumlu harçların, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda, kil, uçucu kül, silis dumanı, cüruf gibi katkılar çimento harcına katılarak, harçların viskozitesi, mukavemeti ve çökme miktarı ile ilgili özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca laboratuvar da aynı numuneye enjeksiyon edilen değişik harçların numunelerin mukavemetine olan etkileri değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Bu çalışmada, düşük basınçlı çimento enjeksiyonu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında laboratuvar da yapılan çalışmalarda farklı dane dağılımındaki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi incelenmiştir. Laboratuvar çalışması sonunda yeterli serbest basınç mukavemeti için gerekli olan enjeksiyon basıncı ve harcın su/çimento (s/ç) oranı belirlenmiştir. Daha sonra seçilen farklı özellikteki sahalarda enjeksiyon uygulaması yapılarak zemin özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

Laboratuvar da farklı dane dağılımındaki iki zemin numunesi kullanılmıştır. Üniform çakıl (GP) sınıfındaki zemin ile üniform kum (SP) sınıfına giren zemin, laboratuvar

enjeksiyon uygulamasında kullanılmıştır. Her iki zemin %25, %50, %75 ve %100 olarak dört farklı relatif sıklıkta hazırlanmıştır.

Laboratuvar enjeksiyon uygulamalarında portland çimentosu PÇ 42,5 ile hazırlanan çimento harcı kullanılmıştır. Enjeksiyon harcı 0,7, 1,0 ve 1,5 olmak üzere ağırlıkça üç farklı su/çimento (s/ç) oranında hazırlanmıştır. Hazırlanan bu harçlar zemin numunesine 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiştir.

Enjeksiyon edilmiş numuneler 7 gün ve 28 gün su içerisinde oda sıcaklığında kür edilmiştir. Kür süreleri dolan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Zemin özelliklerine, enjeksiyon basıncına ve harcın s/ç oranına bağlı olarak numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi incelenmiştir.

Laboratuvar deneyleri sonrasında gerekli zemin mukavemeti için yeterli olan enjeksiyon basıncı ve s/ç oranları kullanılarak arazide enjeksiyon uygulanmıştır. Seçilen üç sahada s/ç oranı 1 olan enjeksiyon harcı, uygulama derinliğine göre 100 kPa ve 150 kPa basınç altında enjeksiyon yapılmıştır.

Arazide enjeksiyon yapılmadan önce sahalarda özellikleri belirlenmesi amacıyla standart penetrasyon deneyi, koni penetrasyon deneyi ve sismik kırılma deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra da aynı arazi deneyleri yapılarak sahanın enjeksiyon sonrasındaki özellikleri belirlenmiştir. Arazi çalışması sonunda düşük basınçlı çimento enjeksiyonu ile zemin özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

Zeminlerin, enjeksiyon öncesi ve sonrasında arazi deneyleri ile elde edilen, zemin parametreleri kullanılarak bilgisayarda sahalarda modellenmiştir. Sahaya dört katlı bir bina yapılacağı düşünülerek, bilgisayarda yapılan üç boyutlu analiz ile enjeksiyon öncesi ve sonrasında, zeminde oluşacak deformasyon ve gerilmeler ile zeminin yenildiği son limit gerilme değerleri belirlenmiştir.

2. ZEMİN ENJEKSİYONU

Zemin enjeksiyonunda, zamanla pekleşen akışkan bir harç kontrollü olarak, basınç ile zemin ya da çatlaklı kaya içerisine içtilir. Basıncı, hacmi ve akım hızı enjeksiyon sırasında kontrol edilebilen harcın pekleşmesi sonucunda zeminin fiziksel özellikleri iyileştirilir. (Hontoria ve Sanchez, 2006) Enjeksiyon geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan sorunların çözümünde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Zemin enjeksiyonu, zeminin permeabilite değerinin düşürülmesi, kayma mukavemetlerinin artırılması veya deformasyonların azaltılması için kullanılır. Zeminde açılan delikten harcın basınç ile verilerek zemin içerisindeki boşlukların doldurulması şeklinde uygulanır. (Nonveiller, 1989) Geoteknik mühendisliğinde enjeksiyon tek başına kullanıldığı gibi diğer bazı zemin iyileştirme yöntemlerini desteklemek amacı ile de kullanılabilir. Örneğin kazık temel sistemlerinde ve zemin ankrajlarında taşıma kapasitelerini artırmak, derin kazılarda yanal gerilmeleri karşılamak için kullanılır. (Warner, 2004) Enjeksiyon yöntemi vibroflasyon, dinamik kompaksiyon gibi derin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında hem uygulama ve mobilizasyondaki kolaylığı hem de daha ekonomik olması sebebiyle avantajlıdır.

Enjeksiyon çok yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem ile kayaların çatlaklarını veya kum çakıl gibi granüler zeminlerin boşluklarını doldurarak zemin daha yoğun ve sıkı hale getirilir. Enjeksiyon harcı zemine basınç altında gönderildikten sonra belli bir sürede sertleşir. Enjeksiyonlarda kullanılan harçların özellikleri uygulama amacına göre değişir. Örneğin mukavemeti artırmak için kullanılan harcın mukavemetinin yüksek olması önemli iken geçirimsizlik için kullanılan harcın mukavemetinin yüksek olması önemli değildir. (Çinicioğlu, 1997)

Enjeksiyon işleminde çimento veya farklı reçinelerden oluşan kimyasal harçlarda kullanılır. Genellikle iki veya daha fazla malzemenin karışımından oluşan harçlar zemin enjeksiyonunda kullanılır. Enjeksiyon harcı, uygulamanın amacına göre akıcı halden katı hale kadar değişik kıvamda olabilir. Harç enjeksiyondan sonra zemindeki

bazı bölgelerde daneleri birleştirerek kayma mukavemetini artırır. Enjeksiyon harcı kullanılan karışım malzemelerine ve amaca uygun olarak, sertleştiginde katı, esnek jel veya hafif bir formda olabilir. (Warner, 2004)

Enjeksiyonun başarılı olması karışım özelliklerinin ve bunların zemine gönderilme yöntemlerinin her yönü ile karşılaştırmalı olarak bilinmesine bağlıdır. Ayrıca enjeksiyon öncesinde yeterli zemin etütlerinin yapılmış olması gerekir. Her ne kadar yukarıda söylenenler hakkında en iyi şekilde bilgi sahibi olursa da zeminin homojen olmamasından dolayı operatörün becerisi enjeksiyon uygulamalarında önemli bir etkidir. (Çiniciöglü, 1997)

Zemin enjeksiyonunun inşaat mühendisliğinde geniş uygulama alanları vardır. Zemin enjeksiyonunun uygulama alanları;

- Baraj gibi su yapılarının temel altlarında zeminin geçirimsizliğini azaltarak sızmaları ve baraj gölündeki su kayıplarını kontrol etmek,
- Şev duraylılığını artırmak,
- Zeminin kayma mukavemetini artırmak ve bu şekilde zeminin deformasyonunu azaltmak,
- Farklı oturma yapan eğik yapıları düzeltmek,
- Tünel yüzey betonu ile kaya arasındaki boşlukları doldurmak,
- Ankrajları sabitlemek,
- Derin kazılarda kazı çukuruna suyun girmesini engellemek,
- Derin kazılarda yanal gerilmeleri azaltmak,
- Çevreye zararlı sıvıların akışını önlemek,
- Kazıkların taşıma gücünü arttırmak,
- Sıvılaşma riskini azaltmak

şeklinde sıralanabilir. (Nonveiller, 1989 , Warner, 2004)

2.1. Enjeksiyonun Tarihçesi

Zemin enjeksiyonu 1800'lerin başından günümüze kadar geçen sürede çeşitli projelerde uygulanmıştır. İlk uygulamalar çimento, kireç ve kil içeren sıvı harçların, barajların altında sızdırmazlık sağlamak için, delik veya çatlaklardan enjeksiyon edilmesi şeklindedir. İlk uygulamalar zemindeki boşlukları doldurmak amacıyla yapıldığı için harçlarda mümkün olduğunca akıcı ve dane çapı çatlak genişliğinden daha küçük olan karışımlar kullanılmıştır.

Kayalardaki çatlaklardan daha küçük olan zemin boşluklarında, enjeksiyon işlemi kısmen başarılı olmasından dolayı granüler zeminlere sızabilen ve enjeksiyon sonrasında kimyasal olarak sertleşebilen düşük viskoziteli kimyasal harçlar geliştirilmiştir. 1887'de sodyum silikat esaslı kimyasal harçlar kullanılmaya başlanmıştır. Fakat bu kimyasal harcın hemen reaksiyona girmesi hızlı bir enjeksiyon işlemini gerekli kılmıştır. Bu nedenle 1925 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Joosten tarafından çift aşamalı sodyum silikat esaslı harç geliştirilmiştir. Bu yöntemde sodyum silikat esaslı harç zemine enjeksiyon edildikten sonra silikatu sertleştirmek için kalsiyum kloroit esaslı harç zemine enjeksiyon edilir. İşlemin zorluğundan dolayı 1960'lı yıllardan sonra bu tip enjeksiyon harçları fazla kullanılmamıştır.

Zemin enjeksiyonundaki önemli aşama güçlü pompaların 1933 yılında geliştirilmesi olmuştur. Bu tarihten itibaren boşlukların doldurulup farklı oturma yapmış binaların düzeltilmesi için balçık yada killi karışımlar zemine enjekte edilmiştir. Portland çimentosunun kullanılmaya başlamasıyla zemine daha mukavemetli ve daha sert harçlar enjeksiyon edilmiştir. Enjeksiyon uygulamalarında daha koyu kıvamdaki harçlar kullanılmaya başlanmıştır. Bunun doğal sonucu olarak birçok projede kompaksiyon enjeksiyonu uygulanmıştır.

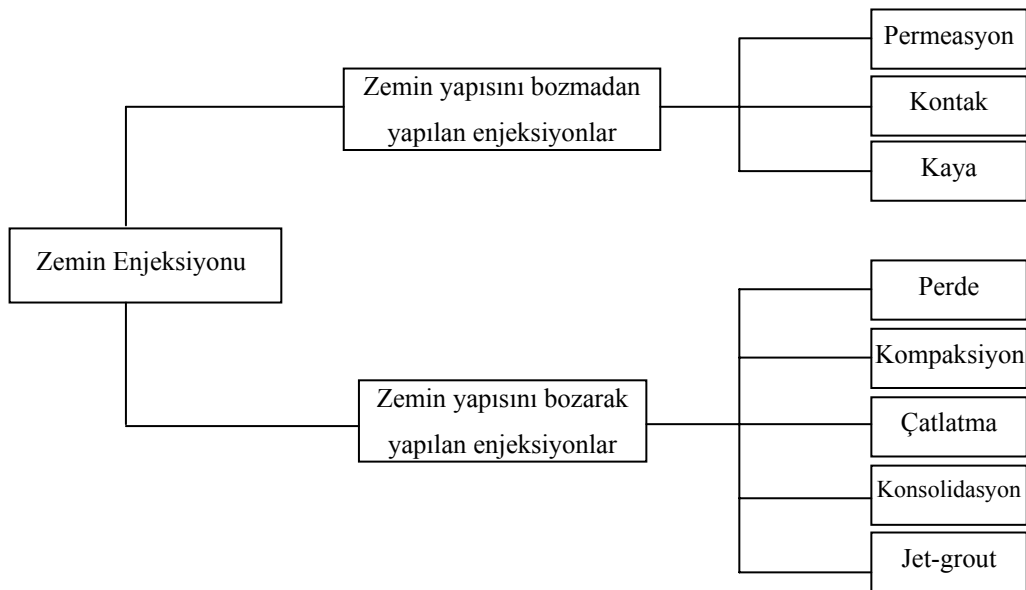
İnce daneli zeminlerde sadece kimyasal harçların kullanılabilmesi projelerin maliyetini artırması sebebi ile çimento bazlı harçların kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde ince daneli çimentoların üretilmesi, ince daneli zeminlerde çimento harçlarının kullanılmasını sağlamıştır. (Warner, 2004)

2.2. Enjeksiyon Teknikleri

Enjeksiyon teknikleri karışımın zemin içerisine verilmiş şekline ve zemin yapısında sebep olacağı davranış değişikliğine göre sınıflandırılır. (Çinicioğlu, 1997) Bunlar;

- Permeasyon (sızdırma) enjeksiyonu
- Kompaksiyon enjeksiyonu
- Konsolidasyon enjeksiyonu
- Kontak enjeksiyonu
- Kaya enjeksiyonu
- Çatlatma enjeksiyonu
- Perde enjeksiyonu
- Yüksek basınç enjeksiyonu (Jet-grout)

olarak sıralanabilir. Bazı enjeksiyon teknikleri zemin yapısını bozmadan boşluklara harcın doldurulması şeklinde uygulanır iken bazı enjeksiyon teknikleri zemin danelerini yer değiştirip oluşan boşluk veya çatlaklara harcın doldurulması şeklinde uygulanmaktadır. Enjeksiyonun zemin yapısını bozmasına göre sınıflandırılması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Zemin enjeksiyon tekniklerinin çeşitleri

Enjeksiyon tekniğinin belirlenmesinde en önemli faktör zeminin geçirimsizliğidir. Doğal zemin ve kayada farklı geçirimsizliğin olması bazı durumlarda iki yada daha fazla enjeksiyon tekniğinin bir arada kullanılmasını gerektirebilir. (Hontoria ve Sanchez, 2006) Tablo 2.1’de zeminin geçirimsizliğine göre enjeksiyon tekniklerinde kullanılan harçlar gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Zemin özelliklerine göre enjeksiyon teknikleri

	Zemin Tipi	Zemin yapısını bozmayan enjeksiyonlar için harçlar	Zemin yapısını bozan enjeksiyonlar için harçlar
Kum	Çakıl, Kumlu çakıl ve iri kum $k > 10^{-3}$ m/s	Çimento harçları	Yüksek viskoziteli çimento harcı
	Kum, orta kum $10^{-3} < k < 10^{-5}$ m/s	Mikro-ince daneli harçlar	Çimento harçları
	İnce kum, silt $10^{-5} < k < 10^{-6}$ m/s	Özel kimyasal harçlar	Çimento harçları
Kaya	Çatlaklı $e > 100$ mm	Çimento harçları	Çimento harçları
	Kırık, çatlaklı $0,1 \text{ mm} < e < 100$	Çimento harçları	
	Mikro çatlaklı $0,05 \text{ mm} < e < 0,1$	Mikro-ince ve ultra-ince daneli harçlar	
	$e < 0,05$ mm	Özel kimyasal harçlar	

2.2.1. Permeasyon enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonu düşük viskoziteye sahip harcın zemin danelerinin arasındaki boşluklara zemin yapısını bozmayacak düşük basınç ile enjekte edilmesidir. Permeasyon enjeksiyonunda, daneler yer değiştirmeden veya boşluk hacmi değişmeden harç zemine enjekte edilir.(Şekil 2.2) Enjeksiyon sırasında zeminin boşluklarındaki su, zemin yapısını bozmadan, enjeksiyon harcı ile yer değiştirir. Bu tip enjeksiyonun ana amacı gevşek zemin içerisindeki boşlukları harç ile doldurup zeminin mukavemetini ve geçirimsizliğini arttırmaktır. (Andrus ve Chung, 1995)

Permeasyon enjeksiyonu

- Derin kazılarda suyun kazı alanına girişini önlemek
- Barajlarda sızdırmazlık sağlamak

- Baraj çekirdeklerini iyileştirmek
- Temeli alttan desteklemek
- Zemini güçlendirmek
- Kazık oturmalarını azaltmak
- Zeminin sıvılaşma riskini azaltmak

amaçları ile uygulanır.



Şekil 2.2: Permeasyon Enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonu temiz iri daneli zeminlerde daha verimli uygulanır. Enjeksiyonun başarısı için zeminin dane çapı dolayısıyla permeabilitesi en önemli endekstir. Zemine verilecek karışım miktarı zeminin boşluk oranına bağlıdır. Enjeksiyon basıncının zeminin düşey gerilmesinden oldukça yüksek tutulması zeminde çatlaklara ve kabarmaya neden olur. Yeraltı suyunun zemin içerisindeki hareketi ile karışım enjeksiyon bölgesinden uzaklaşabilir. Permeasyon enjeksiyonunda kullanılan bazı kimyasal karışımlar ise su seviyelerinin değişimi ile zeminde çatlama neden olabilir. (Littlejohn, 1993)

Permeasyon enjeksiyonunda harç danelerinin zemin içerisinde süzülmesi enjeksiyon yolunun tıkanmasına ve uygulamanın başarısız olmasına neden olabilir. Ayrıca karışımın viskozitesi de enjeksiyon işlemini kısıtlayan bir diğer faktördür.

Harcın zemin içerisindeki akım yönünü zeminin permeabilitesi belirler. İdeal olarak üniform zeminde karışım küresel yada radyal olarak yayılır. Enjeksiyonun yayılması heterojen ve anisotropik olarak oluşmakta ve genellikle zemin içerisinde üniform olmayan harçlı bölgeler oluşturmaktadır.

Permeasyon enjeksiyonu zemini iyileştirerek taşıma gücünü artırmak amacı ile de kullanılır. Permeasyon enjeksiyonu ile zeminin iyileştirilmesi, yapılacak zemin incelemesi sonucu zeminin gradasyonu, yapısı ve geçirimsizliğinin iyi bir şekilde belirlenmesine bağlıdır.

Enjeksiyon basıncı harcın boşluklardaki su ile yer değiştirmesine izin verecek ve harcın boşluk suyu ile karışmasını önleyecek şekilde seçilir. Ayrıca enjeksiyon basıncı zemindeki boşluk suyu basıncını artırmayacak düzeyde olmalıdır.

Enjeksiyon harcının zemin içerisindeki çatlak ve boşluklara yeterli bir şekilde enjekte edilmesi uygulamanın ana amacıdır. Bu amaç için bazen farklı malzemelerden hazırlanmış harçlar uygulamada kullanılır. Örneğin çimento bentonit karışımı harçlar zemindeki büyük boşlukları doldurmak için kullanıldıktan sonra bu harçların giremediği zemindeki daha küçük boşluklar kimyasal harçlar ile doldurulur.

Permeasyon enjeksiyonunda harcın zemin içerisine girme kabiliyeti zeminin boşluk oranı, geçirgenlik ve dane büyüklüğü dağılımına bağlıdır. Ayrıca enjeksiyon basıncı, enjeksiyon aralığı ve karışımın viskozitesi önemli parametrelerdir. Daneli karışımlarla yapılan enjeksiyon, karışımın dane boyutu ile ortamın dane boyutuna bağlıdır. (Akbulut ve Sağlamer, 2002) Zeminin harç ile enjeksiyon edilebilirliği için çeşitli araştırmacılar çalışmalar yapmıştır. Burwell (1958) bağıntı 2.1 ile zeminin harç ile enjeksiyon edilebilirliğini ifade etmiştir. Bağıntıdan elde edilen N sayısı 25'ten büyük ise zemine enjeksiyon yapılabileceğini, N sayısı 11'den küçük ise zemine enjeksiyonun mümkün olmadığını belirtmiştir.

$$N = \frac{D_{15(\text{zemin})}}{d_{85(\text{harç})}} \quad (2.1)$$

İncecik ve Ceren (1995) zeminin harç ile enjeksiyon edilebilirliği için bağıntı 2.2 önermişlerdir. Bağıntıdan elde edilen N sayısı 10'dan büyük ise zemine enjeksiyon yapılabileceğini belirtmişlerdir.

$$N = \frac{D_{10(\text{zemin})}}{d_{90(\text{harç})}} \quad (2.2)$$

Akbulut ve Sağlamer (2002) yaptıkları çalışmada bağıntı 2.3 önermişlerdir. Araştırmacılara göre hesaplanan N sayısı 28'den büyük olmalıdır.

$$N = \frac{D_{10(\text{zemin})}}{d_{90(\text{harç})}} + 0,5 \cdot \frac{s/c}{FC} + 0,01 \cdot \frac{P}{D_r} \quad (2.3)$$

Enjeksiyon türleri arasında en çok uygulanan permeasyon enjeksiyonunda enjeksiyon basıncı ve kuyuların seçimi zeminin heterojen yapısından dolayı tecrübeye dayalıdır. Permeasyon enjeksiyonunda zemin durumundan dolayı gözlemsel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Enjeksiyon işlemi genellikle tekrarlanır. Gerekirse enjeksiyon uygulanmış kuyularda veya aralarında açılan ikinci kuyularda tekrar enjeksiyon uygulanabilir.

Permeasyon enjeksiyonunda enjeksiyon kuyularının yerleri, harcın zemine üniform bir şekilde enjekte edilmesini sağlayacak şekilde planlanır. Enjeksiyon kuyuları zeminin porozitesine, dane dağılımına ve permeabilitesine göre belirlenir. Enjeksiyon kuyularının belirlenmesi enjeksiyon işlemi yapacak olan uzman kişiye de bağlıdır.

Enjeksiyon kuyularının yerleşimi için basit matematiksel modeller geliştirilmiş olmasına rağmen bu modeller sadece kimyasal harçların üniform bir zemindeki enjeksiyon uygulamaları için geçerlidir. Harcın akım sırasındaki sürtünme mukavemetleri ve zeminin homojen olmamasından dolayı bu modeller çoğu

zeminlerde uygulanamamaktadır. Basit olarak enjeksiyon kuyuları arası 1,2–2,0 m arasında olması yeterlidir. Daha yakın olan kuyularda yapılan enjeksiyon uygulamaları oldukça maliyeti artırır.

Enjeksiyon basıncı, enjeksiyon süresi gibi parametreler enjeksiyon kuyularının yerleri belirlendikten sonra dizayn edilir. Bu parametreler projenin amacına, enjeksiyon ekipmanlarının teminine, enjeksiyon harcına ve sahanın özelliklerine göre belirlenir. Genel olarak her 1 m derinlik için 10-20 kPa basınç ile enjeksiyon yapılabilir.

2.2.2. Kompaksiyon enjeksiyonu

Kompaksiyon enjeksiyonu zemini sıkıştıracak basınç ile yüksek viskozitedeki harcın zemin içerisine enjekte edilmesi şeklinde uygulanır. Enjeksiyonda kullanılan harç, yüksek viskozitede olmasından dolayı zemin içerisinde homojen bir kütle halinde kalır ve zemin gözeneklerine nüfuz etmez. Karışımın hacmi arttıkça çevreleyen zemini iter ve sıkılaştırır. (Andrus ve Chung, 1995)

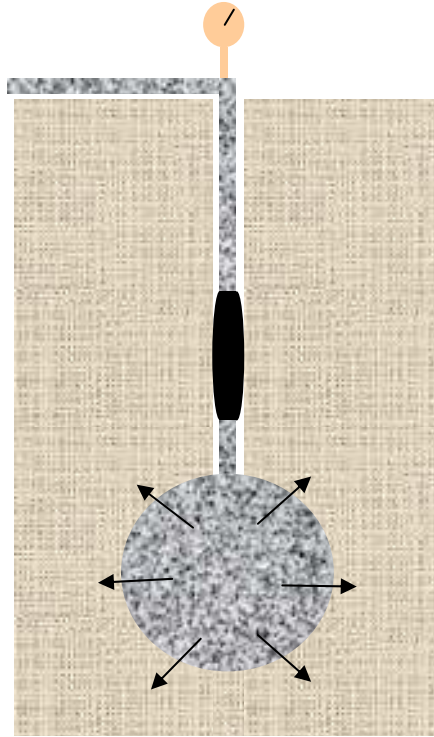
Kompaksiyon enjeksiyonu, enjeksiyon borusunun hemen yanındaki gevşek zemini yer değiştirerek sıkıştıran enjeksiyon türüdür.(Şekil 2.3) Enjeksiyon harcı zemin içerisinde sertleşerek bir öbek oluşturur. Karışım zeminin boşluklarına sızmaz ve zeminde her hangi bir çatlatma yapmaz. Enjeksiyon işlemi sırasında enjeksiyon borusu yukarı doğru çekildikçe zeminde silindirik harç öbekleri oluşur. Eğer enjeksiyon borusu enjeksiyon işlemi durdurulduktan sonra çekilip farklı yükseklikte tekrar enjeksiyona devam edilirse küresel harç öbekleri oluşur.

Bu metot tercihen sıvılaştırılabilir zeminlerde kullanılır. İnce kum ve en fazla % 40 oranında silt içeren siltli kumlarda uygulanır. S/Ç oranı 1 ve daha az olan çimento karışımları kullanılır.

Kompaksiyon enjeksiyonu zeminde harçlanmış tabaka oluşturmaz. Harç öbeklerinin çapı en fazla 1 m'dir. Harç öbeklerinin yatayda birbirleri arasında bir bağlantısı

yoktur. Sadece aralarında kalan zemin tabakalarını sıkıştırırlar. Harç öbekleri arasında en fazla 2 m mesafe bulunur. (Kutzner, 1996)

Kompaksiyon enjeksiyonunda enjeksiyon basıncı çatlatma basıncından azdır. Enjeksiyon basıncı zemin ve karışımın özelliklerine göre belirlenir. Enjeksiyon basıncı her bir metre derinlik için en fazla 400 ile 500 kPa olarak seçilir. Karışım debisi başlangıçta 20 ile 30 lt/dak arasında seçilirken enjeksiyon işlemi sonunda 2 ile 3 lt/dak'ya kadar düşer. Enjeksiyon yüksek basınç ile hızlı bir şekilde uygulanırsa zeminde çatlaklar oluşur. (Warner, 1982)



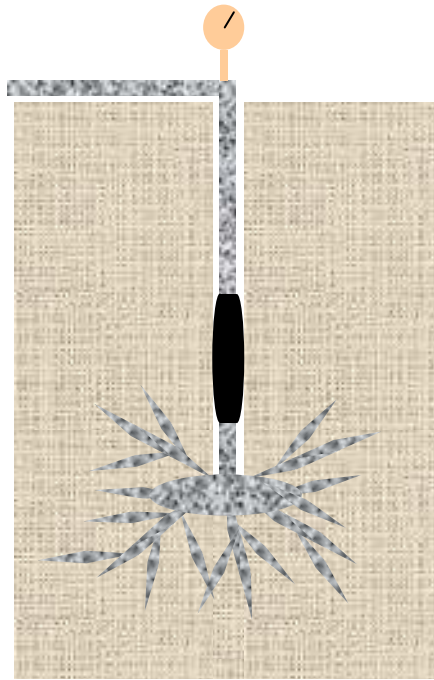
Şekil 2.3: Kompaksiyon enjeksiyonu

2.2.3. Çatlatma enjeksiyonu

Yapıların oturmasını önlemek veya farklı oturma yapmış yapıları düzeltmek için uygulanan bir enjeksiyon türüdür. İlk önce zemin çatlatılıp sonra çatlaklara karışımın enjekte edilmesi şeklinde uygulanır.

DüŖey yönde açılan kuyudan yatay yönde verilen basınç ile zeminde çatlaklar oluşturulur. Bu çatlakların büyümesi ile zeminde sıkışmalar oluşur. Daha sonra aynı kuyudan basınç ile enjeksiyon edilen viskozitesi yüksek karışım zeminde oluşan çatlakları doldurur.(Şekil 2.4)

Enjeksiyon kuyuları 2 m mesafe ile açılır. Zemin zayıf ise kuyular arasındaki mesafe 4 m.'ye çıkabilir. Zemini çatlatmak için basınç yüksek tutulur. Daha sonra karışımı enjekte etmek için gerekli enjeksiyon basıncı yeni bir çatlak oluşturmamak için daha düşük tutulur. Uygulanacak basınç en fazla 1,50 MPa olarak alınır. Enjeksiyon karışımı projeye uygun olarak iki farklı malzemeden oluşabilir. Eğer gerekli görülürse çimento karışımının içerisinde bentonit ilave edilebilir. Karışımın s/ç oranı en fazla 1 olmalıdır. (Kutzner, 1996)



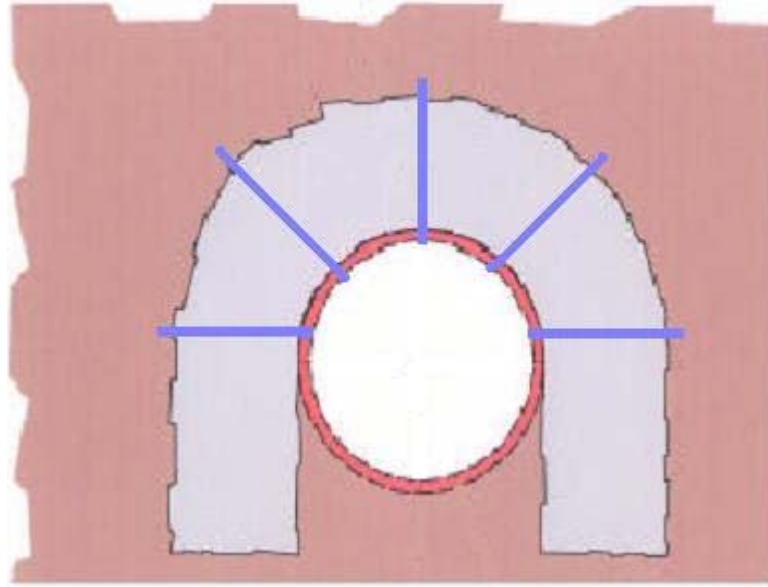
Şekil 2.4: Çatlatma enjeksiyonu

2.2.4. **Kontak enjeksiyonu**

Kontak enjeksiyonu, yapı ile temas ettiği zemin arasındaki boşlukları doldurmak için uygulanan bir yöntemdir. Tünellerde ve barajlarda yaygın olarak kullanılır. (Şekil 2.5)

Çatlak genişliğine ve boşluğuna bağlı olarak gerekli görüldüğünde 10 cm veya daha üstünde bir aralıkta kontak enjeksiyonu yapılabilir. Enjeksiyon kuyuları 0,5–1,0 m derinliğe kadar açılır.

Enjeksiyon basıncının büyüklüğü, kayanın karakterine, zeminin özelliklerine ve yapının mukavemetine göre değişir. Enjeksiyon basıncı en fazla 200 kPa olarak alınır. Enjeksiyon basıncını yüksek tutmak tünel hattında veya başka bir yapıda göçmelere neden olabilir.



Şekil 2.5: Kontak enjeksiyonu

2.2.5. Kaya enjeksiyonu

Kaya içerisinde bulunan çatlak veya kırıkların harç ile tamamen veya kısmen doldurulması için kullanılan enjeksiyon tekniğidir.(Şekil 2.6) Bu tür enjeksiyonda kayada yeni çatlaklar oluşturulmaz. Kaya enjeksiyonu ortamın geçirimsizliğini ve rijitliğini artırmak için kullanılır.



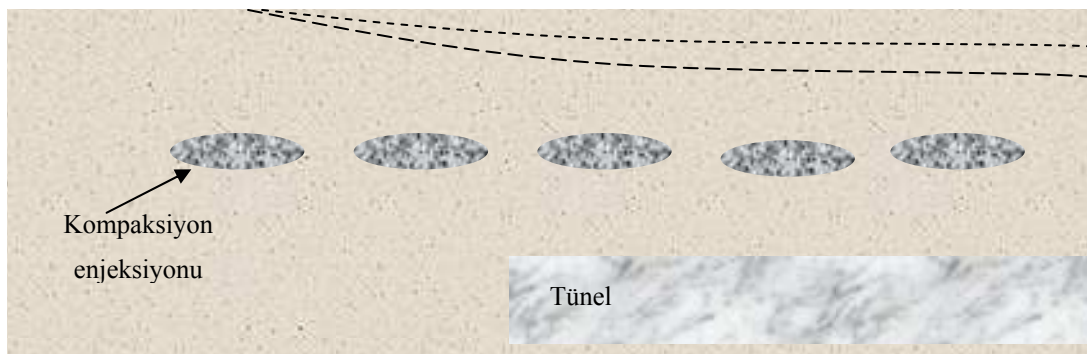
Şekil 2.6: Kaya enjeksiyonu

2.2.6. Konsolidasyon enjeksiyonu

Konsolidasyon enjeksiyonunun ana amacı kaya kütlesinin deformasyonunu azaltarak, mukavemetini arttırmak, çatlak ve boşlukları yüksek mukavemetli sıkışmayan karışım ile doldurmaktır.(Şekil 2.7) Konsolidasyon enjeksiyonu yapılarak temel zemininin mukavemeti arttırılır, zemin suyunun akışı azaltılır.

Uygulanacak enjeksiyon basıncı, çatlak ve boşlukların durumuna bağlıdır. Zeminin iyi konsolidasyonu için uygulanabilecek en yüksek basınç tercih edilir. Basınç seçiminde diğer önemli faktör yüzey derinliğidir. Yüzeyde çatlaklara ve yukarı hareketin oluşmasına neden olabilecek yüksek basınçlar uygulanmaz.

Konsolidasyon enjeksiyonu yapılacak bölgede 2 ile 6 m aralıkla açılan kuyulardan enjeksiyon yapılır.



Şekil 2.7: Kompaksiyon enjeksiyonu

2.2.7. Perde enjeksiyonu

Perde enjeksiyonu, hidrolik yapılarda, yeraltı tünellerinde, su, doğalgaz ve petrol depolarında kayanın ve zeminin teorik bir hat boyunca birbirine bağlanmasıyla geçirgenliğin en aza indirgenmesi ve yeraltı suyu sızma boyunun uzatılması amacıyla yapılır. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8: Perde enjeksiyonu

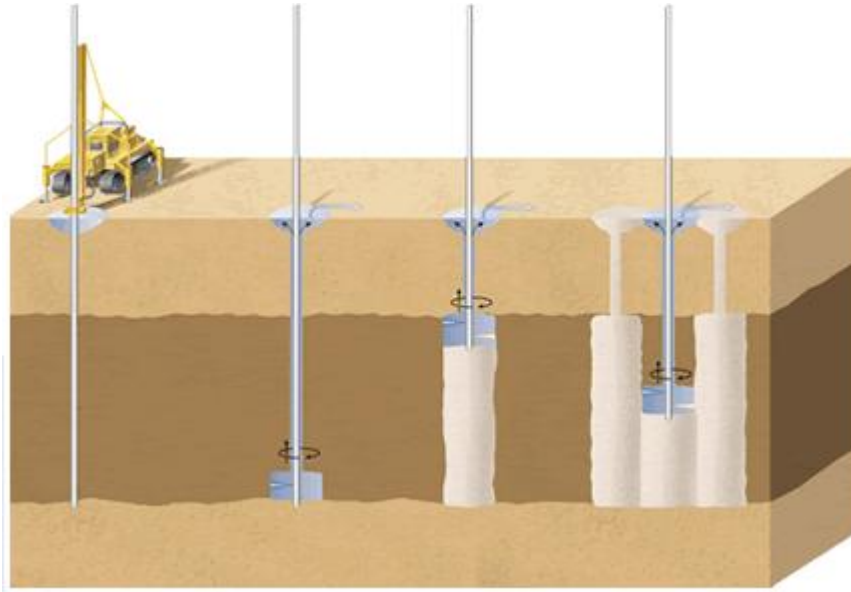
2.2.8. Yüksek basınçlı enjeksiyon (Jet grout)

Yüksek basınçlı enjeksiyon zeminin iyileştirilmesi veya yapı yüklerinin daha derindeki tabakalara aktarılması amacı ile kullanılır. Bu teknik çok farklı zemin koşullarında uygulanabilir.

Bu yöntemle zemin, doğrudan doğruya çok yüksek basınçla (en az 30 MPa) zemine enjekte edilen harç ile (genellikle su-çimento karışımı) karıştırılır. Bu yöntemde, enjeksiyon borusundaki memelerden yüksek hızla gelen enjeksiyon harcı zeminin doğal yapısını bozarak zemin ile harcı karıştırır. Bu şekilde zeminin taşıma gücü ve elastisite modülü artar permeabilitesi azalır. Homojen ve sürekli yapıda olan bu yeni malzemenin karakteristik özellikleri önceden belirlenebilir.

Diğer enjeksiyon yöntemlerine nazaran yüksek basınçlı enjeksiyon yöntemi farklı türlerdeki zeminlerde rahatça uygulanabilir. Ayrıca bu yöntem sonunda zeminde elde edilecek mukavemet ve geçirgenlik gibi parametreler başlangıçta tahmin edilebilir.

Genellikle 100 ile 150 mm. çaplı enjeksiyon kuyusu öngörülen derinlikte açıldıktan sonra 70 MPa'a kadar ulaşan basınçla enjeksiyon harcı püskürtülür. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi yüksek basınç altında kontrollü olarak verilen bu enjeksiyon harcı ince püskürtme memelerinden büyük bir enerji ile çıkar, karşılaştığı zemini keser, koparır ve karıştırır. Bu şekilde zeminde kolonlar oluşturulur. Zemini bozma işlemi bazı sistemlerde yüksek basınçlı su ile yapılır. Sonra yüksek basınç ile harç enjekte edilir. Bu yöntem ile 3 m çapına kadar kolonlar oluşturulabilir.



Şekil 2.9: Yüksek basınç enjeksiyonu (Jet-grout)

2.3. Enjeksiyon Harçları

Birçok enjeksiyon uygulamasında sadece çimento ve su karışımından oluşan harç kullanılır. Bunun en büyük sebebi çimentonun diğer karışım malzemelerine göre rahat bulunabilmesidir. Çimento karışımlarında en fazla su altında sertleşebilen hidrolik çimentolar kullanılır. Bunun yanında farklı çimento türleri de kullanılır. Enjeksiyon uygulamalarında sadece çimento esaslı karışımlar kullanılmaz. Farklı kimyasal solüsyonlar ve reçinelerden oluşan karışımlarda enjeksiyon uygulamalarında kullanılır. Bazen gerekli durumlarda çimento esaslı karışımlarla kimyasal karışımlar bir arada kullanılır. Çimento ve kimyasal harçların enjeksiyonda kullanımı genel kullanımları yanında çok az bir oranda olması nedeniyle, enjeksiyon harçları üzerinde belirli standartlar bulunmamaktadır.

Enjeksiyonda kullanılan harçların viskozitesi, dane boyutu ve mukavemeti, enjeksiyon uygulamasını etkileyen, önemli parametrelerdir.

Permeasyon ve kaya enjeksiyonlarında düşük viskoziteli harçlar kullanılır. Bu şekilde harç zemin boşlukları içerisindeki su ile yer değiştirebilir ve zemin içerisindeki boşluklardan oluşan kanallar boyunca uzak noktalara gidebilir. Harçların içerisinde iri danelerin bulunması harcın zemin içerisinde uzak noktalara ulaşamamasına ve bu sebeple yakın enjeksiyon kuyularının açılmasına neden olur. Bu da sonuçta enjeksiyon süresini ve doğal olarak enjeksiyonun maliyetini artırır. Bunun yanında kompaksiyon enjeksiyonu, çatlatma enjeksiyonu gibi zemin danelerini yerdeğiştiren enjeksiyonlarda yüksek viskoziteli harçlar kullanılır. Bu şekilde harcın basınç yardımıyla zemini sıkıştırması veya çatlatması sağlanır.

Özellikle permeasyon ve kaya enjeksiyonlarında, harcın dane boyutu, zemin içerisinde süzölmelere neden olmamak için, zeminin en küçük dane boyutundan üç ile beş kat daha küçük olmalıdır. Fakat kompaksiyon enjeksiyonunda ise, harcın dane boyutunun zeminin en küçük dane boyutundan büyük olması enjeksiyonun başarısı için önemli etkindir.

Sertleşmiş harç, enjeksiyon edildiği zemini iyileştirmek için yeterli mukavemette olmalıdır. Zemindeki kayma mukavemetlerinin iyileştirilmesi için küçük mukavemetli harçlar yeterlidir. Zemindeki boşlukları, iri sağlam karışım yerine kısmen daha zayıf karışım ile doldurmak ekonomi bakımından genellikle daha uygundur. Bunun yanında sızdırmazlık için yapılan perde enjeksiyonlarında harcın mukavemeti önemli değildir.

2.3.1. Çimento harçları

Enjeksiyon uygulamalarında en çok kullanılan çimento türü portland çimentosudur. Yukarıda da bahsedildiği gibi çimentoların değişik kullanımları için çeşitli standart ve şartnameler bulunmasına rağmen enjeksiyon uygulamaları için bir standart

bulunmamaktadır. Enjeksiyon harcı için karışım ve dane boyutu hakkında yeterli araştırmalar bulunmamaktadır.

Çimento harçlarında portland çimentosunun dışında ince daneli çimentolarda kullanılır. Enjeksiyon uygulanacak zeminin geçirirmliliği düşük ise bu tip çimentolar tercih edilir. Bazı uygulamalarda geniş zemin boşluklarını doldurmak için çimento harcının içerisine kil, ince kum gibi malzemeler katılır. Bazen çimentonun reaksiyonunu artıracak puzzolan katkıları ya da süper akışkanlaştırıcılar da kullanılmaktadır.

Çimento harcına katılan malzemeler harcın mukavemetini düşürebileceği gibi çimento danelerinin harç içerisinde çökmelerini de azaltabilirler. Bu nedenle çimento harcına karıştırılan malzemeler enjeksiyon uygulamasının amacına göre kullanılmalıdır.

2.3.2. Kimyasal harçlar

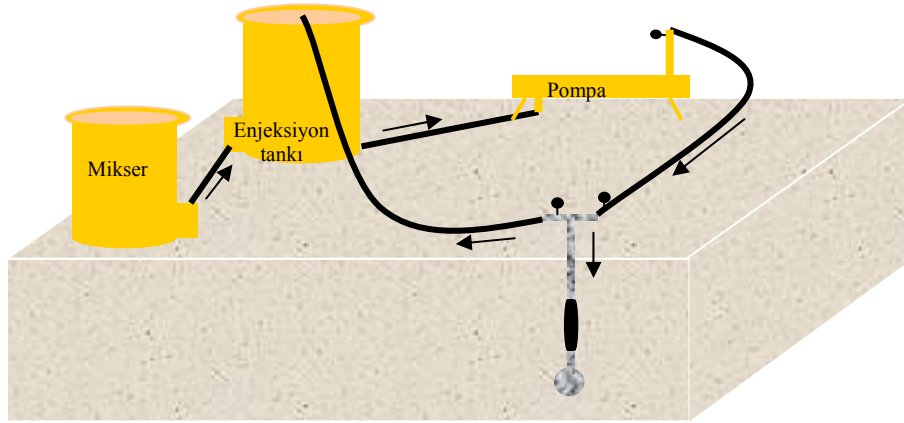
Enjeksiyon uygulamalarında en fazla kullanılan kimyasal harçlar sodyum silikatlardır. Ayrıca akrilamid, lügnosülfat, penoplast ve aminoplast gibi farklı kimyasal harçlar da kullanılmaktadır. Joosten tarafından uygulamaya başlanılan çift aşamalı kimyasal harçlarda sık kullanılmaktadır. Sodyum silikatların ekonomik oluşu ve yeraltı suyunu kimyasal olarak etkilememesi enjeksiyonda kullanımını artırır.

Kimyasal harçlar katı danecik içermediği için özellikle ince kum tabakalarında kullanılır. Kimyasal harçlar çimento harçlarına göre daha pahalıdır. Kimyasal harçların kimyasal özellikleri, stabiliteleri, mukavemetleri, zehirlilik ve maliyetleri uygulamalarda tercih edilme aşamasında önemli rol oynarlar.

2.4. Enjeksiyon Düzenekleri

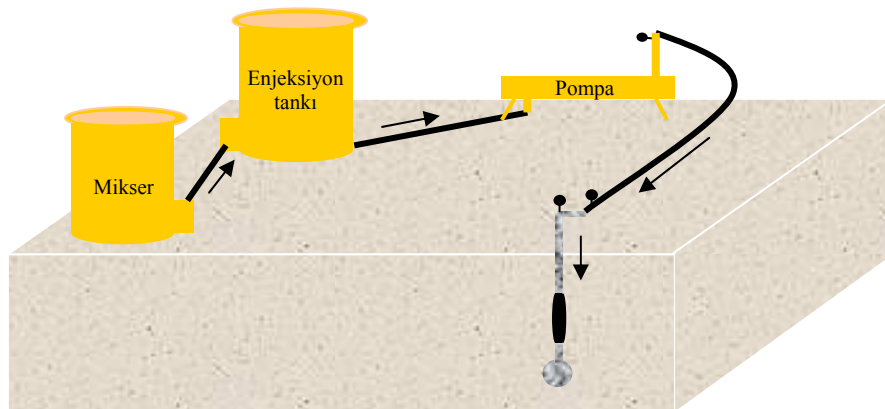
Permeasyon enjeksiyonunda iki farklı enjeksiyon düzeneği kullanılır. İlki Şekil 2.10'da gösterilen sirkülasyonlu enjeksiyon sistemidir. Bu sistemde harç

karıştırıcıdan çıkar ve tekrar karıştırıcıya geri gelir. Harç sistemdeki bu çevrimi sırasında enjeksiyon kuyusuna yerleştirilmiş enjeksiyon borusundan geçer. Sistemde devir daim olan harç, enjeksiyon borusu ile, zemine enjekte edilir. Enjeksiyon borusunda basıncı kontrol edecek saat ve vanalar bulunur. Vanalardan ilki bağlantı borusunda, diğeri ise dönüş hortumunda bulunur. Bu vanalar sayesinde akış miktarı ve enjeksiyon basıncı kontrol edilir.



Şekil 2.10: Sirkülasyonlu enjeksiyon sistemi

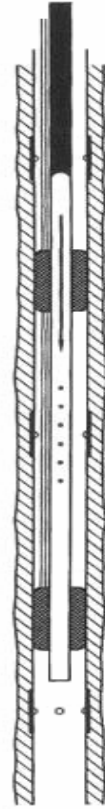
Diğeri sistem ise Şekil 2.11’de gösterilen direkt enjeksiyon sistemi olarak isimlendirilir. Bu sistemde sadece karıştırıcı ile enjeksiyon borusu arasında bağlantı vardır. Enjeksiyon basıncı pompanın çıkışından ayarlanır. Bu sistemin sirkülasyonlu sisteme göre avantajı, sürekli olarak taze harcın kullanılmasıdır. Sirkülasyonlu sistemde enjekte edilemeyen harç karıştırıcıya geri döner ve karıştırıcının içerisindeki harcın özelliklerini değiştirir. Özellikle bu durum düşük basınçla yapılan enjeksiyonlarda önem kazanmaktadır. (Warner, 2004)



Şekil 2.11: Direkt enjeksiyon sistemi

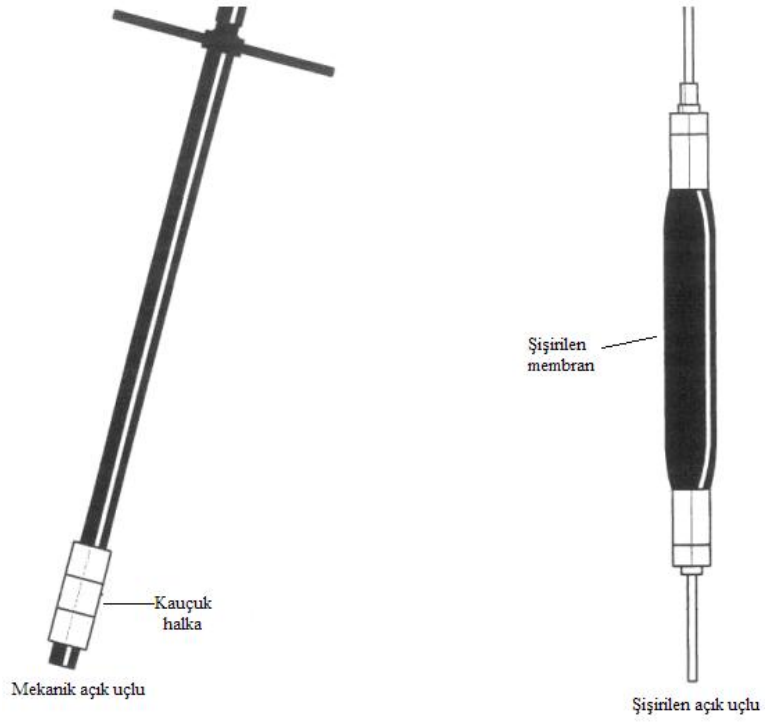
Uygulamada manşetli boru (tube-a-manchette) ve açık uçlu boru (packer) isimli iki farklı enjeksiyon borusu kullanılır.

Manşetli boruda, yüzeyinde kauçuk manşet bulunan deliklerden harç enjekte edilir. (Şekil 2.12) Enjeksiyon basıncı uygulandığı zaman deliklerdeki manşetler açılır ve harç zemine iletilir. Bu sistemin avantajı enjeksiyon noktalarının istenildiğinde tekrar kullanılması ve aynı zamanda da kuyunun çökmemesidir.



Şekil 2.12: Manşetli boru

Açık uçlu boru sisteminde, boru etrafındaki membran şişirilerek kuyu içerisinde sabitlenir ve harç borunun ucundan enjekte edilir. (Şekil 2.13) Eğer tekrar aynı kuyuda enjeksiyon yapılmak istenirse kuyunun tekrar açılması gerekir. Ayrıca bu yöntemde gerekli görülürse, kumlu ve çakıllı zeminlerin kuyu içerisine çökmesini önlemek için, kuyulara kaplama borusu yerleştirilir.



Şekil 2.13: Açık uçlu boru

3. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Yaklaşık 200 yıllık bir geçmişi olan zemin enjeksiyonu ile ilgili olarak yapılmış birçok çalışmalar mevcuttur. Enjeksiyon ile ilgili olarak laboratuvar ve arazide yapılmış çeşitli araştırmalar vardır. Laboratuvarda yapılan araştırmalar enjeksiyon harcının reolojik özellikleri ve zemin içerisine nüfuz edebilmesi konularında yoğunluk kazanmaktadır. Ayrıca laboratuvarda zemin mukavemetlerini enjeksiyon ile mümkün olduğunca yükseltecek harçlar ve enjeksiyon teknikleri amacıyla yapılan çalışmalarda mevcuttur. Arazide yapılan çalışmalar enjeksiyonun uygulamasına yöneliktir. Arazide yapılan çalışmalarda daha çok uygulama yöntemleri incelenmiştir. Fakat enjeksiyonun değişik geoteknik özelliklere sahip zeminlere etkileri üzerinde çalışmalar mevcut değildir. Farklı dane dağılımına sahip zeminlerle yapılmış laboratuvar ve arazi çalışmaları literatürde bulunmamaktadır. Zemin enjeksiyonu ile ilgili olarak daha önce yapılmış çalışmalardan bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Aitcin vd. (1984) çimentoya farklı oranlarda silis dumanı katarak elde ettikleri harçların viskozite, sulanma, küçülme ve basınç mukavemetinin zamanla değişimlerini incelemişlerdir. Silis dumanını, çimento ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karıştırarak beş farklı harç elde etmişlerdir. Su/çimento oranını başlangıçta 0,4 alır iken silis dumanı oranını artırdıkça s/ç oranı da arttırmışlardır. Çimento ağırlığının %0,8–1,2 arasında süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Basınç mukavemeti değerlerinin ve viskozitenin silis dumanı oranı ile arttığını gözlemlemişlerdir. En büyük basınç mukavemetini %20 silis dumanı kullanılan numunelerde bulan araştırmacılar silis dumanı olan harçlarda sulanmanın azaldığı gözlemlemişlerdir.

Tosca ve Evans (1992) 1,25 mm'den büyük olan kaya çatlakları ile zemin boşluklarının ekonomik olarak doldurulması için çimento, uçucu kül, bentonit ve hava sürükleyici katkıları farklı oranlarda karıştırarak çok sayıda harç elde

etmişlerdir. Kum ve uçucu külü %50 ile %100 oranlarında doğal katkı olarak kullanmışlardır. Bazı karışımlarda %0,5 bentonit ve %1 hava sürükleyici katkı maddeleri kullanmışlardır. Mikserde karıştırdıkları harçları 7,1 cm. çapında ve 14 cm yüksekliğinde kalıplara dökerek 28 gün boyunca nemli ortamda kür etmişler ve 1 gün, 7 gün, 14 gün ve 28 günlük basınç mukavemetlerini ölçmüşlerdir. %100 kum dolgu kullanılan numunelerden en yüksek basınç dayanımını elde etmişlerdir. Hava sürükleyici katkıların kullanıldığı kum/uçucu kül ve uçucu kül karışımlarından ise en düşük basınç dayanımını elde etmişlerdir. %50 kum ve uçucu kül ile yaptıkları harçlarda bentonit oranına bağlı olarak şişmenin meydana geldiğini fakat bentonitin sulanmayı azaltmasından dolayı büzülmeyi önlediğini belirtmişlerdir.

Schwarz ve Krizek (1992) farklı su/çimento oranlarına sahip ince daneli çimento harçlarını değişik hızda sahip karıştırıcılar ile hazırlamışlardır. Bu harçların basınç mukavemetlerinin karıştırma mekanizmasıyla ilişkisini incelemişlerdir. Deneylerde normal portland, ince daneli MC-100, MC-300 ve MC-500 çimentolarından farklı hızlarda beş karıştırıcı kullanarak harç hazırlamışlardır. Karışımların su/çimento oranını 1, 2, 3 ve 4 olarak almışlar ve karıştırıcılarda 1 ve 10 dakika karıştırmışlardır. 10 dakika karıştırılarak yapılan karışımların 1 dakika karıştırılan karışımlara göre daha hızlı çöktüğü ve sonuçta aynı çökme yüzdesine ulaştıklarını gözlemişlerdir. Ayrıca karıştırma süresinin artması ile viskozitenin arttığını gözlemlemişler ve karıştırma sürelerinin priz süresini değiştirmediğini Blender karıştırıcı ile elde edilen karışımın basınç mukavemetinin daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir.

Mori vd. (1992) iki farklı laboratuvar enjeksiyon model düzeneği ve renkli harçlar kullanarak harcın sertleştikten sonraki geometrik şekli ve enjeksiyon edilebilirliğine etkisini incelemişlerdir. Enjeksiyon oranı, enjeksiyon basıncı, harcın jelleşme süresi, çevre basıncı ve zemin geçirgenliğinin enjeksiyon şekli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Önce üç eksenli basınç uygulayabilen, çap ve yüksekliği 50 cm olan enjeksiyon deney düzeneğine yerleştirdikleri kum numuneleri su ile doymuş hale gelmiş ortamda çevre basıncı uygulayarak enjeksiyon yapmışlar ve enjeksiyon esnasında numunede oluşan boşluk suyu basıncı, enjeksiyon oranı ve basıncını ölçmüşlerdir. Aynı özellikteki numunelere çapı ve yüksekliği 80 cm olan ve sadece düşey doğrultuda 100 kPa basınç veren deney düzeneğinde enjeksiyon

uygulamışlardır. Enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilebilirliğin arttığını fakat çevre basıncının artması ile enjeksiyon edilebilirliğin azaldığını belirtmişlerdir.

McFarlane ve Holtz (1992) geçirimsiz duvarlarda yaygınca kullanılan zemin-çimento-bentonit karışımlarının flexibilitelerini artırmak, ortamın permeabilitesini düşürmek için ince kum ve silte çelik lif, karbon lif, kevlor, polipropilen lif, stirene-lateks, akrilik lateks, epoksi reçinesi ve asfalt emülsiyonu enjekte etmişlerdir. Katkılı ve katkısız numunelerin basınç, çekme, eğilme mukavemetleri ile elastisite modülü ve permeabilitesini incelemişlerdir. Katkıları %63–70 zemin, %12–14 çimento, %5–0,2 bentonit, %15–18 su ve %0–0,4 oranında katkı kullanılarak numuneleri hazırlamışlardır. Deney sonucunda katkıların, numunelerin elastisite modülünü, basınç mukavemetini ve geçirgenliğini düşürdüğü saptamışlardır. Katkılı numunelerin basınç mukavemetinin katkısız numuneye göre %40 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

Vipulanandan ve Shenoy (1992) çimento, çimento-sodyum silikat, çimento-bentonit, çimento-kalsiyum silikat, çimento-silis dumanı ve çimento-uçucu kül karışımlarının vizkosite, sertleşme süresi, sulanma ve basınç mukavemetini incelemişlerdir. Harçları kuma enjeksiyon ederek 38 mm. çapında 74–90 mm. uzunluğunda elde ettikleri numunelerin 7 ve 28 günlük basınç mukavemetlerini belirlemişlerdir. En yüksek basınç mukavemetini çimento karışımının verdiği, silis dumanı ile yapılan karışımın basınç mukavemetinin bentonit ile yapılan karışımdan daha yüksek çıktığını, buna karşılık en fazla sulanmanın çimento karışımlarında olduğunu diğer karışımlarda ise sulanma miktarının büyük ölçüde düştüğünü belirtmişlerdir.

Krizek ve Helal (1992) çimento enjeksiyonu yapılan kum içerisindeki boşluk yapılarını incelemişlerdir. 70 kPa enjeksiyon basıncı altında ince daneli çimento harcı ile enjeksiyon ettikleri relatif sıklığı %65 olan Ottawa kumunun 7 ve 28 gündeki geçirgenliği, basınç ve çekme mukavemetlerini incelemişlerdir. Numunelerin yarısını yatay olarak kür ederken diğerlerini düşey doğrultuda kür etmişlerdir. Düşey olarak kür edilen numunelerin geçirgenliğinin daha küçük değerde olduğunu, s/ç oranı arttıkça numunelerin geçirgenliğinin de arttığını, yatay

kür edilen s/ç oranının 1,5 olan numunelerde basınç mukavemetinin daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir.

İncecik ve Ceren (1995) çimento, bentonit, akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkılarla farklı su/çimento oranlarında harçlar hazırlamışlardır. Çimento ağırlığının %4'ü kadar bentonit, %1 oranında da akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları kullanmışlardır. Relatif sıkılığı %50 olan çakıl ile yaptıkları deneylerde 15 cm. çapında 30 cm. uzunluğundaki silindir kalıplar kullanmışlardır. Elde edilen karışımlara 100 kPa düşey basınç uygulayarak enjeksiyon yapmışlar ve numunelerin 7 ve 28 günlük basınç mukavemetlerini, gerilme-deformasyon ilişkilerini, su/çimento oranlarının basınç mukavemeti ve viskozite ile değişimlerini incelemişlerdir. Enjeksiyon uygulanmış numunelerin basınç mukavemetinin su/çimento oranının artmasıyla azaldığını fakat zamanla arttığını, maksimum basınç mukavemetini akışkanlaştırıcı katılan çimento harçları ile enjeksiyon yapılan numunelerin verdiğini, en düşük basınç mukavemetinin ise %4 bentonit katkılı numunelerin verdiğini belirtmişlerdir.

Perret vd. (1997) normal portland çimentosu ve ince daneli çimento kullanarak değişik su/çimento oranlarında harçlar hazırlamışlar, harçlarda değişik miktarda silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı ve su tutucu katkıları kullanmışlardır. Harçların reolojik özelliklerini ve enjeksiyon edilebilirliklerini incelemişlerdir. Tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. İnce daneli çimento harcının vizkozitesinin normal portland çimento harcından daha yüksek bulmuşlardır. İnce daneli çimento karışımlarının enjeksiyon edilebilirliğini 1,2 ve 2,0 s/ç oranlarında %100 gerçekleştiğini, çimento ağırlığının %6'sı kadar katılan silis dumanının enjeksiyon edilebilirliği ve sulanmayı azalttığını, vizkoziteyi ise arttırdığını belirtmişlerdir.

Akbulut (1999) daneli karışımlarla daneli zeminlere enjeksiyon uygulaması yapmış, çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento-kil harçlarını kullanmıştır. Relatif sıkılığı %30 ve %80 olan numunelere enjeksiyon yapmış, basınç mukavemeti, harçlar, katkı yüzdeleri ve relatif sıkılıkların zaman ile değişimlerini araştırmıştır. %50 relatif sıkılıktaki enjeksiyon uygulanmış numunelerde

permeabilite değişimlerini incelemiştir. Silis dumanı ile hazırlanmış numunelerde basınç mukavemetinin arttığını fakat geçirgenliğin düştüğünü belirtmiştir. Uçucu külle yapılan enjeksiyonda basınç mukavemetinin biraz düştüğünü, geçirgenliğin arttığını, kil katkılı numunelerde ise basınç mukavemetinin düştüğünü belirtmiştir.

Akbulut ve Sağlamer (2002) zemine başarılı bir şekilde enjeksiyon yapılabilmesi için göz önüne alınması gereken parametreleri incelemiş ve enjeksiyonun yapılabilirliğinin tahmini için bir yöntem geliştirmişlerdir. Granüler zeminlerin harçlanabilmesinin kesin tahmini için, zeminin ve enjeksiyon karışımının granülometresi, relatif sıklık, ince dane yüzdesi, su/çimento yüzdesi ve enjeksiyon basıncı gibi çeşitli zemin parametrelerinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Relatif sıklığı %30 ve %80 olarak hazırladıkları numunelere su/çimento oranı 0,8, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 olan harçları 50 kPa ile 250 kPa basınç altında enjeksiyon etmişlerdir. Deneyle sonuçunda elde edilen sonuçlara göre zemine enjeksiyon yapılabilmesinin üç farklı parametreye bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar kullandıkları parametrelerden oluşan bağıntıdan elde edilen sonucun 28'den büyük olduğunda zemine enjeksiyon yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Coric vd (2003) yüksek oranlı su azaltıcı içeren s/ç oranı 0,4 olan harçların akışkanlık, akma özellikleri, kararlılık, sertleşme ve hidrasyon oranı parametrelerini incelemişlerdir. Harçların ayrıca dayanım, gözenek boyutu ve dağılımı ile mikro yapı özelliklerini de incelemişlerdir. Aynı kıvam için, viskozite değiştirici karışımlar ile polinaftalin sülfonat veya polimelemin sülfonat bileşimi için yüksek oranlı su azaltıcı ihtiyacının %10 ile %40 arasında arttığını belirtmişlerdir.

Chupin vd. (2003) doygun zeminde yapılan çimento enjeksiyonunun sayısal simülasyonu için kuramsal bir model önermişlerdir. Modeli iki kütleli dengesel eşitliğinden oluşturmuşlardır. İlki, gözenekli ortamdaki akışkanın toplam kütleli taşınmasını, diğeri ise akışkan faz içindeki adveksiyon, difüzyon ve dispersiyon tarafından gerçekleştirilen enjeksiyon harcının taşınmasını temsil ettiğini, modelin sonlu farklar kullanılarak çözümlendiğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri sayısal sonuçları ile yaptıkları enjeksiyon uygulamaları ile karşılaştırmışlardır.

Liao vd (1992) MC-500 ince daneli çimento ile farklı oranlarda sodyum silikat katkılarından oluşan harçların karışım oranlarının viskozite ve jel süresi üzerindeki etkilerini ve mukavemet değişimlerini incelemiştir. 1,0 ile 0,2 s/ç oranlarında hazırlanmış harçların sodyum silikat karışım hacmini %10 ile %80 oranlarında değiştirilerek enjeksiyon harcı elde etmişlerdir. 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinde sodyum silikat oranının artması ile %30 artış olduğunu belirtmişlerdir.

Krizek vd (1992) AC-400 akrilit polimer harcı ve bu harç ile enjeksiyon yapılan kum numunelerinin gerilme-şekil değiştirme, sünme davranışı ve şişme basıncını incelemiştir. Enjeksiyon deneylerinde numuneler serbest basınç, çekme ve sünme için %90 relatif sıklıkta, şişme için %60 relatif sıklıkta hazırlamışlardır. %40'ı akrilamid, %60'ı su olan harcı 30 kPa basınç ile alttan üste doğru 5 dakika enjeksiyon yapmışlardır. Suda kür ettikleri numunelerin 28 günlük basınç mukavemetlerinde artış olduğunu, basınç mukavemetlerinin 0,28 MPa'dan 0,55 MPa'a çıktığını belirtmişlerdir.

Krizek vd (1992) ince daneli çimento ve sodyum silikat karışımlarının kum numunelerine enjeksiyon yapılması sonucunda numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarını incelemiştir. Numunelere basınç, çekme, drenajlı ve drenajsız üç eksenli deneyler uygulamışlardır. 0,59, 0,70, 0,95 boşluk oranlarında hazırladıkları numunelere s/ç oranı 2 ve sodyum silikat oranı %20-%40 arasındaki harçları enjekte etmişlerdir. Basınç mukavemeti, harcın kür süresi ve başlangıçtaki yoğunluğu ile artış gösterdiğini, relatif sıklığı %21'den %81'e çıkan numunelerde basınç mukavemetlerinin 3,2 MPa'dan 3,5 MPa'a çıktığını, çekme gerilmelerinin 0,35 MPa'dan 0,43 MPa'a yükseldiğini gözlemişlerdir.

Shroff ve Shah (1992) polimer-çimento harçlarının sulu ortamdan etkileşimini, toprak ve kaya dolgu barajların temellerinin iyileştirmesinde kullanımını, karışımların viskozite ve mukavemetlerinin zamanla değişimini araştırmışlardır. Çimento karışımlarında sertleşmeyi sağlamak amacıyla kalsiyum klorit, sodyum silikat, hızlandırıcı olarak metil metilekrlit ve su tutucu olarakta kalsiyum lignosülfat kullanmışlardır. Deneylerde portland çimentosu ve katkı olarak karışımların %90 ile

%95 oranında kimyasallar kullanmışlardır. s/ç oranı 0,6 ve 1,0 olarak seçtikleri karışımlarda metil ve sodyum silikatın çimentoya göre daha yüksek basınç mukavemeti verdiğini belirtmişlerdir.

Ata ve Vipulanandan (1997) sodyum silikat, çimento, silis dumanı katılmış karışımların sertleşme süresi, sulanma, viskozite, basınç, çekme mukavemeti ve enjeksiyon yapılan kumların davranışlarını incelemişlerdir. Silis dumanını çimento ağırlığının %5-10-15 oranında çimento harcına, sodyum silikatın %1,5-10 oranında silikat harcına katmışlardır. Karışımların priz süresini, sulanma oranlarını ve vizkozite değerlerini belirlemişlerdir. Silis dumanı yüzdesinin harçların jelleşme sürelerini düşürdüğünü, çökelme yüzdesini azalttığını, viskozite değerlerini arttırdığını belirtmişlerdir. %5 silis dumanı karıştırdıkları çimento karışımının çekme dayanımının %30 arttığını, silikat karışımında ise azaldığını, %1 ve %5 oranında silis dumanı karıştırdıkları silikat karışımlarında basınç mukavemetinin %50 ile %100 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Vipulanandan vd. (1997) petekli hafif harçların davranışlarını inceleyerek sertleşme süresi, viskozite, pompalanabilirlik ve mekanik özellikleri araştırmışlardır. Birim ağırlığı 6,4 ve 8,8 kN/m³ olan petekli hafif karışımlar elde etmişler, 3,7 kN/m³ birim hacim ağırlıklı olan laury sülfat katkılı köpük kullanmışlardır. Karışımın yoğunluğu azalırken viskozitesinin, priz süresinin ve basınç mukavemetinin azaldığını belirtmişlerdir.

Lowther ve Gabr (1997) üretan enjeksiyonu yaptıkları kumun geçirgenlik ve mukavemet özellikleri ile üretanın kimyasal karışım olarak kullanımını incelemişlerdir. Mukavemet deneyleri için %50 jel süresi ayarlayıcısı, %45 su ve %5 jel sertleştiricilerden oluşan harçları kullanmışlardır. Üniform kumu 30 cm çapında 60 cm uzunluğundaki kolon içerisine koymuşlar ve daha sonra 2 litre/dakika hızda üretan enjeksiyonu yapmışlardır. 24 saat sonra kalıptan aldıkları numunelerden 7 mm çapında numuneler hazırlamışlardır. Üretan harçların viskozite değerlerinin 43-225 cp, jelleşme sürelerinin 15-21 dakika arasında değiştiğini, geçirgenliklerin $4,6 \times 10^{-8}$ mm/s ile $1,5 \times 10^{-8}$ mm/s arasında değiştiğini ve 7 günde 12,4 kPa kayma gerilmeleri elde edildiğini belirtmişlerdir.

Snuparek ve Soucek (2000) laboratuvarında kimyasal harçların reolojik özellikleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Poliüretan reçine üzerinde yaptıkları deneylerde dinamik viskozitenin, numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimini ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışma sonrasında kimyasal enjeksiyonlar için inşaat sektöründe var olan standart laboratuvar deneylerinden farklı yaklaşımlara ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Gallagher ve Mitchell (2002) sulandırılmış silika harcı ile doymuş gevşek kuma yapılan enjeksiyon sonrasında zeminde oluşacak deformasyon miktarını tekrarlı üç eksenli deneylerle belirlemişlerdir. Sıvılaşma riski olan gradasyon aralığında bulunan Monterey kumunu, 7,5 cm çapında 15 cm yüksekliğindeki kalıplara %22 relatif sıklıkta yerleştirmişlerdir. Ağırlıkça %5–20 arasında olan silika harcını zemin numunesine enjekte etmişlerdir. Enjeksiyon uygulanmış zemini sertleştikten hemen sonra ve 4 ile 56 gün arasında kür ettikten sonra tekrarlı üç eksenli deneyine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda silika karışım oranının arttıkça zeminin sıvılaşma riskinin aynı oranda azaldığını ifade etmişler, %5 oranında silika karışımının sıvılaşma riskini kabul edilebilir miktarda düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Toumbakari (1999) enjeksiyon harçlarının mekanik ve ultrasonik mikser ile karıştırma işlemlerini araştırmışlardır. Harçların yeni karıştırıldığı andaki nüfuz edilebilmesi ve viskozitesinin karıştırma metotlarıyla nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Mekanik karıştırma işleminde çimento ve ince parçacıklardan oluşan karışımların zemin içerisine nüfuz edilemediğini, ultrasonik karıştırma işleminde sınırlı s/ç oranında bile çok yüksek nüfuz edebildiğini belirtmişlerdir.

Chen vd (2000) enjeksiyon uygulamalarını görüntülemek için yeni bir flüoresan yaklaşım geliştirmişlerdir. Flüoresan maddeler içeren farklı enjeksiyon karışımların dağılımlarını bir muayene çukurunda morötesi ışık altında açıkça gözlemlemişlerdir. Flüoresanlı çimento harcını 5 m derinliğindeki kuyulardan enjekte etmişlerdir. Daha sonra enjeksiyon kuyusunda harcın dağılımını morötesi ışık ile incelemişlerdir. Bu teknik ile harcın zemin içerisindeki dağılımının rahatça gözlemlenmesinin enjeksiyon uygulamalarının planlanmasında kolaylık sağladığını bildirmişlerdir.

Gallagher ve Mitchell (2002) kolloidal silis enjeksiyonunun, doymuş gevşek kumun deformasyon özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için tekrarlı üç eksenli deneyler yapmışlardır. %5, %10, %15 ve %20 oranındaki kolloidal silis harcı ile enjeksiyon yaptıktan sonra numuneler üzerinde tekrarlı üç eksenli deneyler yapmışlardır. Doğal numunelerin tekrarlı üç eksenli deneylerinde eksenel deformasyonlarının artışı ve deney ilerledikçe toptan göçtüğünü buna karşılık silis ile enjeksiyon yapılmış numunelerinde deformasyonların küçük olduğunu belirtmişlerdir. Tekrarlı yüklemeye maruz kalan gevşek kumun deformasyon mukavemetinin kolloidal silis enjeksiyonu ile önemli ölçüde yükseldiğini belirtmişlerdir.

Soga vd (2004) çoklu ve tekli enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon süresinin ve enjeksiyon kuyularının arasındaki mesafelerin enjeksiyon verimliliğini incelememişlerdir. Kompaksiyon enjeksiyonunu temsilen balon genişleme testi ve çatlatma enjeksiyonunu temsilen de epoksi enjeksiyonunu uygulamışlardır. Epoksi enjeksiyonunun balon genişletmeden daha düşük enjeksiyon etkisi olmasına rağmen çatlakların oluşturulmasında meydana gelen boşluk suyu basınçlarının büyük olmasından dolayı her iki enjeksiyon tekniğinin de enjeksiyon süresi ve enjeksiyon kuyusu mesafelerinde aynı etkilere sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Salley vd. (1987) Pianopolis Batı Barajının yüzeyden 1,2–2,4 m arasındaki gevşek kum ve siltli kum tabakalarının iyileştirilmesi için kompaksiyon enjeksiyonu uygulamışlardır. Enjeksiyon öncesi düzeltilmiş SPT-N değerlerinin 0 ile 7 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Barajın memba kısmında kum-çimento harcı kullanarak enjeksiyonu uygulamışlardır. Zemin içerisinde 30 cm'lik tabakalarla enjeksiyonu uygulamışlar ve enjeksiyon sonrasında yaptıkları SPT deneylerinde düzeltilmiş SPT-N değerlerinin 11 ile 38 arasında olduğunu belirtmişlerdir.

Türkmen (2003) Kalecik Baraj'ında su seviyesinin yükselmesi ile gövdede meydana gelen sızıntıları önlemek için perde enjeksiyonu uygulamıştır. Perde enjeksiyonundan önce basınçlı su testleri yapmış ve tahmini su kaybını belirlemiştir. Enjeksiyon kuyularının 3 m arayla açıldığını ve perde enjeksiyonunun baraj temelini 15–20 m altına kadar yapıldığını belirtmiştir. Enjeksiyon harcında çimento,

bentonit, kum ve sodyum silikat kullanmıştır. Enjeksiyon sonrasında sızıntıların azaldığını, sızıntı yolunun dolu savağa doğru yöneldiğini belirtmiştir.

Hussin and Ali (1987) 15 m derinliğe kadar siltli kum ve kum tabakalarının bulunduğu Kings Bay Denizaltı Üssünde kompaksiyon enjeksiyonu uygulamışlardır. Zeminin SPT-N değerlerinin 1 ile 40 arasında, CPT uç direncinin 0,5 ile 24 MPa arasında olduğunu, kum ve çimento harcının kullanıldığı enjeksiyon sonrasında iyileştirilmiş bölgenin CPT uç dirençlerinin %100'e yakın arttığını belirtmişlerdir.

Gambin (1991) gevşek kum dolgu, çakıl ve silt tabakalarında kompaksiyon enjeksiyonu uygulamıştır. Enjeksiyon öncesinde zeminin elastisite modülünün 4–5 MPa arasında olduğunu bildiren araştırmacı aşağıdan yukarıya doğru enjeksiyonu uyguladığını, uygulama noktalarının kare şablon halinde birincil ve ikincil deliklerin kritik olmayan alanlarda 3,6 m aralık ile kritik alanlarda 2,5 m aralık ile konumlandırıldığını belirtmiştir. Kritik olmayan alanlarda zemin hacminin % 3,8'i kadar, kritik olan alanlarda ise % 4,8 oranında harç hacminin kullanıldığını bildirmiştir. Enjeksiyon sonrasında zeminin elastisite modülünün 8-10 MPa arasında olduğunu belirtmiştir.

Mitchell and Wentz (1991) bir hastane binası inşaatında yüzeyden 2,4–10,7 m derinlikteki gevşek ile orta sıkı kum tabakasında kompaksiyon enjeksiyonu uygulamıştır. Enjeksiyon öncesi zeminin düzeltilmiş SPT-N değerlerinin 15-26 arasında olduğunu, kum-çimento harcının 1,2 m aralıklı kuyulardan 90 cm yüksekliklerle enjeksiyon edildiğini belirtmiştir. Enjeksiyon sonrasında yaptıkları SPT deneyinde SPT-N değerlerini 21-36 arasında bulmuşlardır.

Mitchell and Wentz (1991) gevşek-orta sıkı arası çakıllı kumlu tabakada permeasyon enjeksiyonu uygulamışlardır. Uygulamada sodyum silikat, MC 500 mikro-ince çimento ve priz süresi kontrolünde hacimce %0,1'den az fosforik asit karışımı harç kullanmışlardır. Uygulama sonrasında olan Loma Prieta depreminde zeminde oturma veya zararlı yer hareketinin olmadığını bildirmişlerdir.

Graf (1992) gevşek - orta sıkı siltli kum tabakalarında permeasyon enjeksiyonu uygulamıştır. Enjeksiyon öncesi SPT-N değerlerinin 3 ile 15 arasında olduğu sahada, sodyum silikat esaslı harcı kullanarak yaptıkları enjeksiyon sonrasında zeminin serbest basınç mukavemetinin 269 kPa ile 879 kPa arasında olduğunu belirtmiştir.

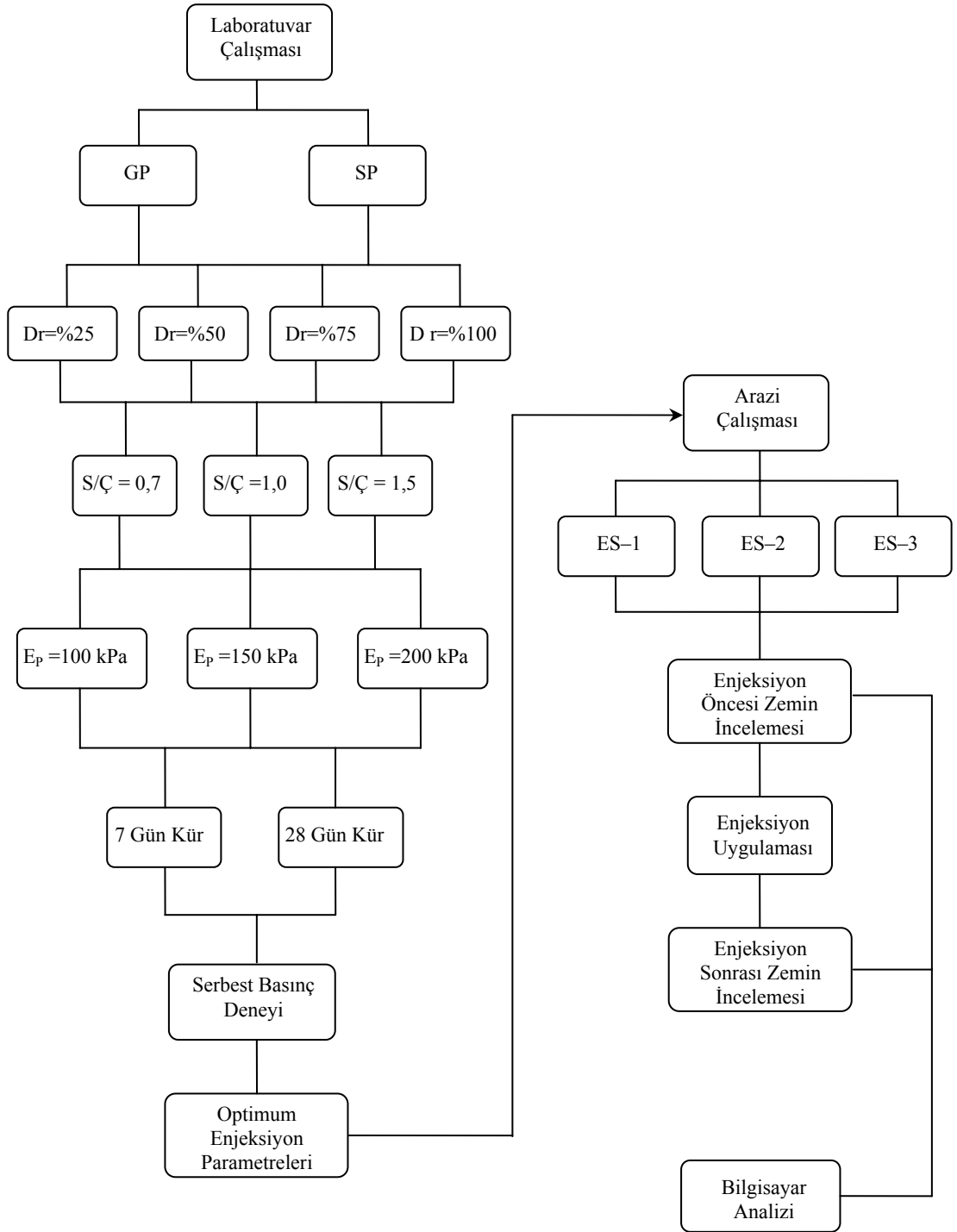
4. METODOLOJİ

Düşük basınçlı çimento enjeksiyonu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile yapılan çalışmada farklı dane dağılımına sahip zeminlerin mukavemet ve parametrelerinin enjeksiyon ile değişimi incelenmiştir. Bu amaç ile yapılan çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Enjeksiyon, çalışmanın ilk bölümünde laboratuvarda, ikinci bölümünde ise arazide uygulanmıştır. Laboratuvar enjeksiyon uygulamasında, iyileştirme için yeterli düzeyde serbest basınç mukavemeti için gerekli olan enjeksiyon basıncı ve harcın s/ç oranı belirlenmiştir. Arazide, laboratuvarda belirlenen enjeksiyon basıncı ve s/ç oranında harç kullanılarak enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon uygulaması öncesinde ve 28 gün sonra sahalarda zemin incelemesi yapılmış ve arazide enjeksiyon uygulaması ile zemin parametrelerinin değişimi belirlenmiştir. Çalışmanın son kısmında, arazi uygulamasından elde edilen zemin parametreleri kullanılarak, sahalarda bilgisayarla üç boyutlu olarak modellenerek analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda zeminde oluşan deformasyonlar ve son limit gerilme değerleri hesaplanmıştır. Çalışma metodolojisinin akım şeması şekil 4.1’de verilmiştir.

Laboratuvar çalışmasında, üniform çakıl (GP) ve üniform kum (SP) sınıfında olan iki farklı zemin kullanılmıştır. Her bir zemin %25, %50, %75 ve %100 olarak dört farklı relatif sıklıkta kalıplara yerleştirilmiştir. s/ç oranı 0,7, 1,0 ve 1,5 olan harçlar 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa basınç ile numunelere enjeksiyon edilmiştir. Enjeksiyon sonrasında numuneler 7 ve 28 gün süresince kür havuzunda bekletilmiştir. Kür süreleri sonunda numunelere serbest basınç deneyi yapılarak serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Zemin iyileştirilmesi için yeterli olan serbest basınç mukavemetini sağlayan s/ç oranı ve enjeksiyon basıncı belirlenmiştir.

Laboratuvar çalışmasında belirlenen s/ç oranı ve enjeksiyon basıncı ile arazide seçilen üç farklı sahada enjeksiyon uygulanmıştır. Enjeksiyon öncesinde seçilen sahalarda standart penetrasyon deneyi (SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT) ve

sismik kırılma deneyleri yapılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Enjeksiyon her sahada farklı aralıklarla açılan kuyularda uygulanmıştır. Enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için sahalarda zemin incelemesi yapılmıştır. Enjeksiyon öncesi ve sonrasında zeminin geoteknik özellikleri arasında değişimler incelenmiştir.



Şekil 4.1: Çalışmanın akış diyagramı

Sahaların, geoteknik özellikleri kullanılarak, bilgisayarda üç boyutlu analizleri yapılmıştır. Sahalarda dört katlı binanın yapılacağı göz önünde bulundurularak, analizde tanımlanan temel üzerine dört katlı bina yükü uygulanmıştır. Enjeksiyon öncesi ve sonrasında uygulanan bina yükü altında zeminde oluşacak deformasyonlar ve gerilmeler belirlenmiştir. Ayrıca analizde zeminin yenileceği son limit gerilme değeri belirlenerek enjeksiyon öncesi ve sonrasındaki değişimler incelenmiştir.

5. LABORATUVAR ÇALIŞMASI

Laboratuvar çalışmasında, düşük basınçlı çimento enjeksiyonu uygulanan farklı iki dane dağılımına sahip zeminlerin enjeksiyon sonrasındaki mukavemet değişimleri araştırılmıştır. Çalışmada ön deneylerle enjeksiyon uygulamasında kullanılacak zeminin dane dağılımı, enjeksiyon harcının ağırlıkça su/çimento (s/ç) oranı ve uygulanacak enjeksiyon basıncı tespit edilmiştir. Belirlenen parametreler ile üniform çakıl (GP) ve üniform kum (SP) zemin sınıfındaki numunelere düşük basınç ile permeasyon enjeksiyonu uygulanmıştır.

Laboratuvar çalışması için her iki sınıftaki numuneler %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere dört farklı relatif sıklıkta hazırlanmıştır. Çalışmada yaklaşık dört yüz elli civarında numune hazırlanmıştır. Su/çimento oranı 0,7, 1,0 ve 1,5 olmak üzere üç farklı enjeksiyon harcı kullanılmıştır. Laboratuvar enjeksiyonu 100, 150 ve 200 kPa basınç ile uygulanmıştır. Deney sonucunda elde edilen numuneler 7 ve 28 gün kür edildikten sonra serbest basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Serbest basınç mukavemetlerinin dane dağılımı, enjeksiyon basıncı ve harcın s/ç oranına göre değişimleri incelenmiştir.

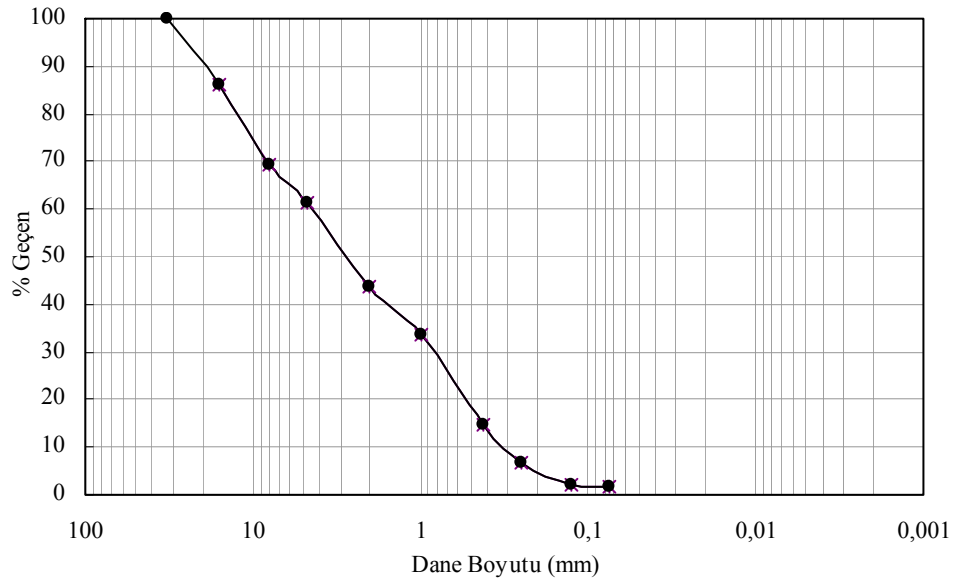
5.1. Laboratuvar Enjeksiyonunda Kullanılan Zemin ve Karışımların Özellikleri

Laboratuvar çalışmasında Kocaeli Aslanbey bölgesinde bulunan dere yatağından temin edilen zemin, Nuh Çimento Fabrikasından alınan portland çimentosu ve Sika Şirketinden temin edilen süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan zeminin geoteknik özellikleri laboratuvarda yapılan deneylerle tespit edilmiştir. Çimento ve süperakışkanlaştırıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri üretici firmalardan temin edilmiştir. Laboratuvar enjeksiyonunda kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

5.1.1. Enjeksiyonda kullanılan zemin numunesinin özellikleri

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan zemin Kocaeli Aslanbey bölgesinde bulunan dere yatağından alınmıştır. Doğal zemin numunesi üzerinde elek analizi yapılmış ve TS 1500/2000 zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı üniform çakıl (GP) olarak bulunmuştur. (Şekil 5.1)

Laboratuvarda yapılan enjeksiyonlarda belirli bir riski bulunan ve literatürde kabul görmüş dane dağılımına sahip zemin kullanılmıştır. Bu amaçla Japonya İnşaat Mühendisleri Odası (JSCE) (1977) ve Ishihara vd. (1989) tarafından önerilen sıvılaştırılabilir zeminler için dane dağılım sınırlarında kalan zemin kullanılmıştır. Bu sınırların kullanımındaki amaç, sıvılaşma riskinin azaltılması değil, bilinen bir dane dağılımına sahip zeminler üzerinde laboratuvar enjeksiyonunun yapılmasıdır.



Şekil 5.1: Doğal malzemenin dane dağılım grafiği

Akbulut ve Sağlamer (1999) yaptıkları çalışmada çimento enjeksiyonunun uygulanması için zemin içerisinde en fazla %10 oranında 0,6 mm'den daha küçük dane boyutunun bulunması gerektiğini belirtmişlerdir. Ön enjeksiyonlarda başarılı enjeksiyon uygulanamadığından sıvılaşma riski bulunan dane dağılımının üst sınırında iki zemin seçilmiş ve laboratuvar enjeksiyonu başarılı olmuştur.

Hazırlanan numuneler birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre üniform çakıl (GP) ve üniform kum (SP) sınıfına girmektedir. Numunelerin laboratuvar deneyleri ile belirlenen indeks özellikleri tablo 5.1’de verilmiştir. Numunelerin değişik relatif sıklıktaki boşluk oranları ve permeabilite katsayıları tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Numunelerin indeks özellikleri

Numune	γ_{\max} (kN/m ³)	γ_{\min} (kN/m ³)	e_{\max}	e_{\min}	D ₁₀ (mm)	D ₁₅ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu	Cc	Gs
GP	17.07	15.11	0.733	0.534	1.10	1.20	1.85	3.00	2.73	1.04	2.67
SP	17.20	15.10	0.739	0.527	0.99	1.06	1.52	2.30	2.32	1.02	2.68

Tablo 5.2: Numunelerin permeabilite katsayıları ve boşluk oranları

Numune	Relatif sıklık (%)	Permeabilite katsayısı (cm/s)	Boşluk oranı
GP	25	0,050	0,683
	50	0,042	0,634
	75	0,037	0,584
	100	0,031	0,534
SP	25	0,062	0,686
	50	0,054	0,633
	75	0,042	0,580
	100	0,035	0,527

5.1.2. Enjeksiyonda kullanılan çimentonun özellikleri

Laboratuvar enjeksiyonunda Nuh Çimento Fabrikasının ürettiği CEM1–42.5-R (PÇ42.5R) portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento tipi kolay temin edilebilen, dayanımı yüksek ve kısa sürede prizini alabilecek özellikte olduğu için seçilmiştir. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 5.3’te verilmiştir.

5.1.3. Enjeksiyonda kullanılan akışkanlaştırıcının özellikleri

Enjeksiyon deneylerinde su/çimento oranı 0,7 olan harçta viskoziteyi düşürmek için Sika şirketinin ürettiği Sikament FFN isimli süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.3: Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal özellikler	%	Fiziksel özellikler	
SiO ₂	20.34	Özgül ağırlık, gr/cm ³	3.17
Al ₂ O ₃	4.24	Donma süresi, başlangıç, (vicat, dakika)	181
Fe ₂ O ₃	3.89	Donma süresi, son, (vicat, dakika)	261
CaO	63.97	Hacim sabitliği, (Le Chatelier, mm)	2
MgO	1.17	Özgül yüzey, (Blaine cm ² / g)	3504
SO ₃	2.57	50 µ % geçen	92
Çözünmeyen kalıntı	0.71	45 µ % geçen	90
Kızdırma kaybı	1.95	37 µ % geçen	85
Serbest kireç	0.96	30 µ % geçen	78
Klorür	0.0089	2 günlük basınç dayanımı (MPa)	26.9
Kireç standardı (LSF)	99.20	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	47.0
Hidrolik modül (H.M.)	2.25	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	59.9
Silikat modülü (S.M.)	2.50		
Ton modülü (Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃)	1.09		
C ₃ S	60.55		
C ₂ S	12.63		
C ₃ A	4.65		
C ₄ AF	11.84		

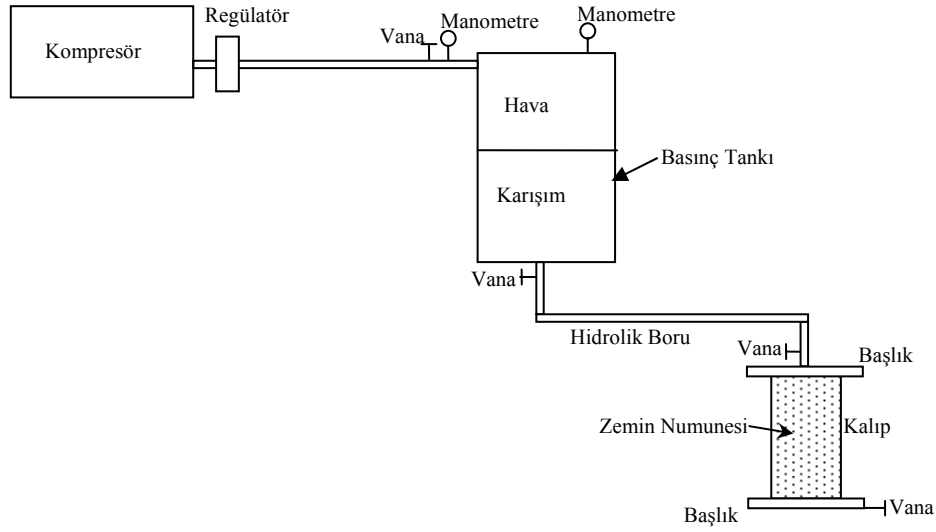
Tablo 5.4: Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Kimyasal yapı	Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı
Yoğunluk	1,22±0,02 kg/l.
pH Değeri	7-11
Donma Noktası	-10°C
Viskozite	38 cP, +20°C'de
Toplam Klorür İçeriği	Max. % 0,1
Alkali Miktarı (%Na ₂ O Eşdeğeri Olarak)	Max. % 7

5.2. Enjeksiyonda Kullanılan Deney Düzenekinin Özellikleri

Şekil 5.2'de şematik olarak gösterilen enjeksiyon düzenekği kompresör, basınç tankı ve kalıptan oluşmaktadır. Düzenekte 800 kPa sabit basınç verebilen kompresör kullanılmıştır. Basınç tankı 6 lt hacminde 5 mm kalınlığında olup 800 kPa sabit basınçla test edilmiştir. Basınç tankının girişinde basıncı ayarlamak için regülatör bulunmaktadır. Enjeksiyon sırasında regülatör yardımı ile istenilen enjeksiyon basıncı ayarlanmıştır. Basınç tankının kapağında tankın içerisindeki basıncı ölçmek için ikinci bir manometre bulunmaktadır. Kapak ile gövde arasına sızdırmazlık için conta konulmuştur. Basınç tankının alt kısmında çıkış vanası bulunmaktadır. Basınç tankı ile kalıp arasında basınca dayanıklı hidrolik boru yardımıyla bağlantı

sağlanmıştır. Kalıplar 50 mm çapında 100 mm uzunluğunda silindir şeklindedir. 150 mm çapında merkezinde kalıbın oturması için 50 mm çapında kanal bulunan metal başlıklar arasına kalıplar yerleştirilmiştir. Üst başlığın merkezinde basınç tankıyla bağlantının yapıldığı küresel vana bulunmaktadır. Alt başlıkta kalıp içinde sıkışan havanın tahliyesi için tahliye vanası bulunmaktadır. Kalıp ile başlıklar arasında sızdırmazlık için conta kullanılmıştır. Şekil 5.3'te düzeneğin resmi verilmiştir.



Şekil 5.2: Enjeksiyon deney düzeneği



Şekil 5.3: Enjeksiyon deney düzeneği

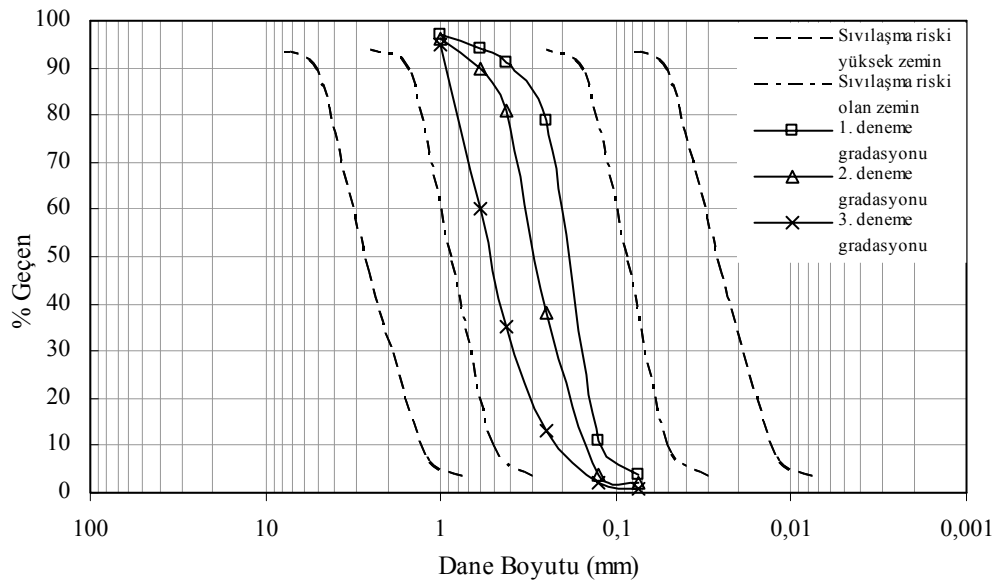
Zemin numunelerini kalıplara yerleştirmek için alt ucu 20 mm olan huni ve 5 mm çapında 200 mm uzunluğunda metal çubuk kullanılmıştır. Numuneler hidrolik numune çıkarıcı ile kalıplar içerisinden çıkarılmıştır. Serbest basınç deneyinde 0,5 mm/dak yükleme hızına sahip deney düzeneği kullanılmıştır.

5.3. Enjeksiyon Uygulamaları

Laboratuvar çalışmasında ilk önce ön deneyler yapılarak enjeksiyon uygulanacak numunenin dane dağılımı belirlenmiştir. Belirlenmiş dane dağılımındaki numuneler değişik relatif sıklıkta hazırlanarak enjeksiyon uygulanmıştır. 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyi yapılmıştır.

5.3.1. n enjeksiyon uygulaması

Enjeksiyon uygulaması için JSCE (1977) ve Ishihara vd. (1989) nerdiği sıvılaşabilir zeminlerin dane dağılımı sınırları kullanılmıştır. Dane dağılımı grafiğinde ilk önce sıvılaşma riski yüksek olan dane dağılımındaki zemin numuneleri, enjeksiyon uygulaması için seçilmiştir.(şekil 5.4)



şekil 5.4: Deneme enjeksiyonlarında kullanılan dane dağılımları

Araziden getirilen zemin laboratuarda 16,00, 8,00, 4,75, 2,00, 1,00, 0,600, 0,425, 0,250, 0,125 ve 0,075 mm çapındaki eleklerden elenerek farklı dane boyutlarında malzemeler elde edilmiştir. Başlangıçta sıvılaşma riski yüksek bölgeler için önerilen alt sınıra yakın dane dağılımındaki numuneler hazırlanmıştır. Bunun için temiz ve kuru olan zeminden 1,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %3, 0,600 mm elek üzerinde kalan danelerden %3, 0,425 mm elek üzerinde kalan danelerden %3, 0,250 mm elek üzerinde kalan danelerden %12, 0,125 mm elek üzerinde kalan danelerden %68, 0,075 mm elek üzerinde kalan danelerden %7 ve 0,075 mm elekten geçen danelerden %4 oranında karıştırılmıştır. Bu dane dağılımındaki numune kalıp içerisine %25 relatif sıklıkta yerleştirilmiş ve su/imento oranı 1 olan harç 100 kPa basınç altında bu numuneye enjeksiyon edilmiştir. Numuneye yapılan enjeksiyon başarılı olmamış ve harcın içindeki imento daneleri zemin daneleri arasında szlmüştr. Enjeksiyon basıncı 300 kPa'a harcın su/imento oranı ise 2 değerine çıkarılmış olmasına rağmen enjeksiyon uygulaması bu dane dağılımı için başarılı olmamıştır.

Daha sonra dane dağılımı sıvılaşma riski yüksek bölgenin ortasında seçilmiştir. Bunun için 1,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %4, 0,600 mm elek üzerinde kalan danelerden %6, 0,425 mm elek üzerinde kalan danelerden %9, 0,250 mm elek üzerinde kalan danelerden %43, 0,125 mm elek üzerinde kalan danelerden %34, 0,075 mm elek üzerinde kalan danelerden %2 ve 0,075 mm elekten geçen danelerden %2 oranında kuru ve temiz olarak karıştırılıp zemin numunesi elde edilmiştir. Kalıp içerisine %25 relatif sıklıkta yerleştirilmiş olan numuneye su/imento oranı 1 olan harç 100 kPa enjeksiyon basıncı altında uygulanmıştır. Fakat bu numunede de enjeksiyon başarılı olmamıştır. Harcın su/imento oranı ve enjeksiyon basıncının yükseltilmesine rağmen enjeksiyon deneyi başarılı olmamış, zemin daneleri harcın içindeki imento danelerini süzümüştür.

Son olarak Ishihara vd. (1989)'nin sıvılaşma riski yüksek bölgeler için önerdiği st sınıra yakın dane dağılımında numuneler hazırlanmıştır. 1,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %5, 0,600 mm elek üzerinde kalan danelerden %35, 0,425 mm elek üzerinde kalan danelerden %25, 0,250 mm elek üzerinde kalan danelerden %22, 0,125 mm elek üzerinde kalan danelerden %11, 0,075 mm elek üzerinde kalan

danelerden %1 ve 0,075 mm elekten geçen danelerden %1 oranında kuru ve temiz olarak karıştırılmıştır. Kalıp içerisine %25 relatif sıklıkta yerleştirilen bu numuneye su/çimento oranı 1 olan harç ile 100 kPa basınç altında yapılan enjeksiyon başarılı olmamıştır.(Şekil 5.5)

Enjeksiyon uygulaması için ön deneyleri yapılan numunelerin çimento harçları ile enjeksiyon edilebilirliğini gösteren N değeri denklem 2.1, 2.2 ve 2.3'e göre hesaplanmıştır. Denklem 2.3 için su/çimento oranı 1, enjeksiyon basıncı 100 kPa ve relatif sıklık %25 olarak alınmıştır. Tablo 5.5'te verilen sonuçlardan da anlaşılacağı gibi enjeksiyon deneyleri başarısız olan üç numunenin çimento harcı ile enjeksiyon edilebilirliği sınır değerlerin altında çıkmıştır.

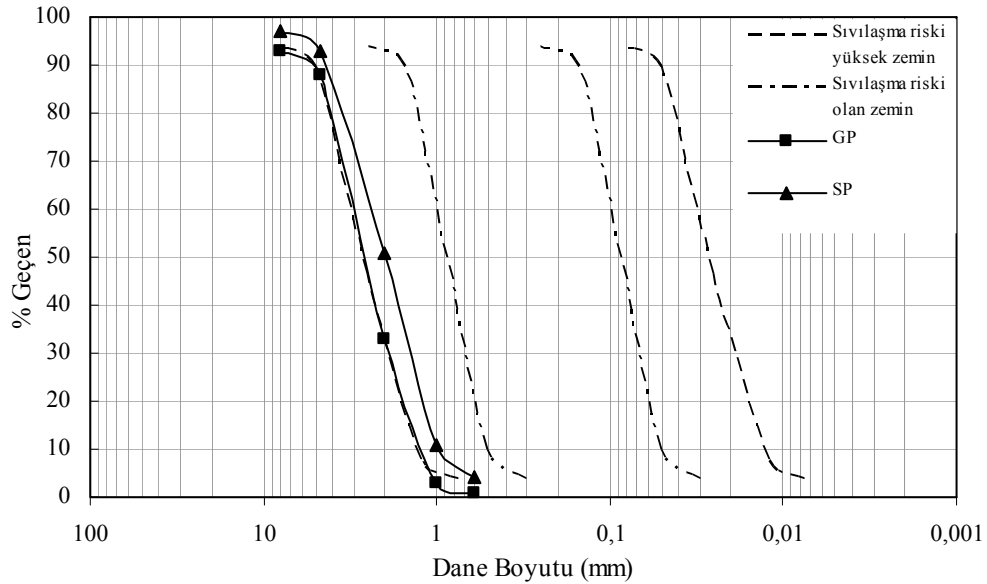
Tablo 5.5: Başarısız olan numunelerin enjeksiyon edilebilme değerleri

Bağıntı	N	Deneme 1	Deneme 2	Deneme 3
Burwell (1958)	>25	4	5	7
İncecik ve Ceren (1995)	>10	3	4	6
Akbulut ve Sağlamer (2001)	>28	7	9	11



Şekil 5.5: Deneme enjeksiyonlarında başarısız olan numune

Akbulut ve Sağlamer'in (2002) yaptıkları çalışma ve laboratuvarında yapılan ön deneylerden elde edilen sonuçlara göre, 0,600 mm elekten geçen dane miktarı %10'dan az olan dane dağılımındaki zemin numuneleri çimento enjeksiyonu için seçilmiştir. Sıvılaşma riski olan zeminler için önerilmiş olan dane dağılımının üst sınırı seçilmiştir. Kuru ve temiz olarak elenen zeminden 8,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %7, 4,75 mm elek üzerinde kalan danelerden %5, 2,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %55, 1,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %30, 0,600 mm elek üzerinde kalan danelerden %2 ve 0,425 mm elek üzerinde kalan danelerden %1 oranında karıştırılmıştır. Numune kalıp içerisine %25 relatif sıkılıkta yerleştirilmiştir. Su/çimento oranı 1 olan harç 100 kPa basınç altında numuneye enjeksiyon edilmiştir. Enjeksiyon uygulaması bu numunede başarılı olmuştur. Bunun üzerine numune kalıp içerisinde %100 relatif sıkılıkta hazırlanmış, aynı su/çimento oranı ve aynı enjeksiyon basıncında deney tekrarlanmıştır. Bu sıkılıktaki numunede de enjeksiyon başarılı olmuştur. TS 1500/2000 zemin sınıflandırma sistemine göre üniform çakıl (GP) sınıfına giren bu dane dağılımındaki numune enjeksiyon uygulaması için kullanılmıştır. (Şekil 5.6)



Şekil 5.6: Enjeksiyon uygulanan dane dağılımları

Enjeksiyon uygulamalarında kullanılacak ikinci numunenin dane dağılımı GP numunesinin altında seçilmiştir. Kuru ve temiz olarak elenen zeminden 8,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %3, 4,75 mm elek üzerinde kalan danelerden %4, 2,00 mm elek üzerinde kalan danelerden %42, 1,00 mm elek üzerinde kalan danelerden

%40, 0,600 mm elek üzerinde kalan danelerden %7 ve 0,425 mm elek üzerinde kalan danelerden %4 oranında karıştırılmıştır. Elde edilen numune kalıp içine %25 relatif sıklıkta yerleştirilmiş ve su/çimento oranı 1 olan harç 100 kPa basınç altında enjeksiyon edilmiştir. Enjeksiyonun başarılı olması nedeniyle numune %100 relatif sıklıkta kalıplara yerleştirilmiş ve 1 su/çimento oranındaki harç 100 kPa basınç altında enjeksiyon edilmiştir. Bu sıklıktaki numuneye uygulanan enjeksiyon başarılı olmuştur. TS1500/2000 zemin sınıflandırma sistemine göre üniform kum (SP) sınıfına giren bu numune enjeksiyon uygulamasında kullanılmıştır.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak karışımın su/çimento oranının belirlenmesi için seçilen zemin numuneleri ile deneme enjeksiyonları yapılmıştır. GP ve SP numuneleri %25, %50, %75 ve %100 relatif sıklıkta kalıp içine yerleştirilmiştir. Su/çimento oranı 1,0, 1,5 ve 2,0 olan harç numunelere 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiştir. Her iki numunenin tüm sıklıklarında 100 kPa basınç altında yapılan enjeksiyon başarılı olmuştur. Su/çimento oranı 2 olan harç ile enjeksiyon yapılan numunelerin üst kısmı bozuk çıkmıştır. Bu nedenle deneylerde su/çimento oranı 2 olan harç kullanılmamıştır. Su/çimento oranı 1'den daha düşük harçlar ile enjeksiyon denemeleri yapılmıştır. 0,7 s/ç oranından düşük harçlarda enjeksiyonun zorlaştığı görülmüştür.

Su/çimento oranı 0,7 olan harcın viskozitesi yüksek olduğundan her iki numunenin tüm sıklıktaki bazı numunelere başarılı enjeksiyon yapılamamıştır. Bu nedenle su/çimento oranı 0,7 olan harca çimento ağırlığının % 1 oranında süper akışkanlaştırıcı katılmıştır. Bu harç ile her iki numuneye yapılan enjeksiyon başarılı olmuştur. Enjeksiyon deneyleri için kullanılacak karışımın su/çimento oranı 0,7, 1,0 ve 1,5 olarak seçilmiştir. Enjeksiyon basıncı da 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa olarak seçilmiştir.

Enjeksiyon uygulamasında kullanılacak olan GP ve SP numunelerinin çimento harçları ile enjeksiyon edilebilirliği denklem 2.1, 2.2 ve 2.3'te verilen bağıntılara göre hesaplanmıştır. Akbulut ve Sağlamer (2001) önerdikleri 2.3 bağıntısında, her bir relatif sıklık için, su/çimento oranı ve enjeksiyon basıncı değerleri, sonucu en küçük yapacak şekilde, sırasıyla 0,7 ve 100 kPa olarak alınmıştır. 0,600 mm elekten geçen

danelerin yüzde oranı ise GP numunesi için %1, SP numunesi için %4 olarak alınmıştır. Tablo 5.6'da verilen sonuçlardan da anlaşılacağı gibi enjeksiyon deneyleri için seçilen numunelerin enjeksiyon edilebilirliği sınır değerlerin üzerinde çıkmıştır.

Tablo 5.6: Kullanılacak numunelerin enjeksiyon edilebilme değerleri

Bağıntı	N	GP	SP
Burwell (1958)	>25	32	29
İncecik ve Ceren (1995)	>10	24	22
Akbulut ve Sağlamer (2001)			
Dr=25%	>28	63	35
Dr=50%	>28	61	33
Dr=75%	>28	60	32
Dr=100%	>28	60	32

5.3.2. Enjeksiyon uygulaması

Laboratuvar deneylerinde her iki numune kalıplar içerisine %25, %50, %75 ve %100 relatif sıklıklarda yerleştirilmiştir. Relatif sıklıkların hesaplanmasında denklem 5.1'de verilen bağıntı kullanılmıştır. Her iki numunenin maksimum ve minimum birim hacim ağırlıkları, kalıbın hacmi ve istenilen relatif sıklıklar bilindiği için denklem 5.1 denklem 5.2 şeklinde düzenlenmiştir.

$$D_r = \frac{\gamma - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \times \frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \quad (5.1)$$

$$M = \frac{V \cdot \gamma_{\max} \cdot \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - D_r \cdot (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})} \quad (5.2)$$

Deneyleerde kullanılacak numunelerin dane dağılımları her bir kalıp için ayrı ayrı hazırlanmıştır. Numuneler yağlanmış kalıplara huni yardımı ile dökülmüş ve şişlenerek yerleştirilmiştir.

Enjeksiyon harcı ağırlıkça 0,7, 1,0 ve 1,5 su/çimento oranında hazırlanmıştır. Miksere ilk önce su konulmuş sonra çimento dökülerek 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Sadece su/çimento oranı 0,7 olan harçta süper akışkanlaştırıcı

kullanılmıştır. Miksere konulmuş olan suya önce çimento ağırlığının %1'i oranında süper akışkanlaştırıcı eklenmiş sonra çimento ilave edilerek mikserde 10 dakika karıştırılmıştır.

Harç hazırlandıktan sonra basınç tankına dökülmüştür. Basınç tankı sızdırmazlık sağlanarak kapatılmıştır. Hidrolik plastik boru ile basınç tankı ve kalıp arasında bağlantı sağlanmıştır. Kompresör yardımıyla basınç tankına istenen basınç verilmiştir. Basıncın planlanan seviyede sabit kalması basınç tankının girişindeki regülatör yardımı ile sağlanmıştır. Regülatör üzerinde bulunan manometrenin yanında basınç tankının kapağında bulunan manometre yardımıyla da tankın içerisindeki basınç uygulama süresince kontrol edilmiştir. Enjeksiyon düzeneğinde gerekli hazırlıklar tamamlandıktan sonra basınç tankının altında bulunan vana açılarak enjeksiyon işlemi başlatılmıştır. Enjeksiyon uygulaması sırasında kalıp içerisindeki havanın sıkışıp başarısız enjeksiyona neden olmasını önlemek amacı ile kalıpların alt başlığında bulunan tahliye vanası açılmış ve kalıp içerisinde bulunan havanın tahliyesi sağlanmıştır. Bu tahliye vanası, çimento karışımı çıkmaya başladığında kapatılmış bir süre sonra enjeksiyon işlemi bitirilmiştir. Her bir gruptan altı adet enjeksiyon uygulaması yapılmıştır.

Kalıplar içerisinde 1 gün bekletilen numuneler hidrolik numune çıkarıcı ile kalıplardan çıkartılmıştır.(Şekil 5.7) 7 ve 28 gün süresince numuneler su içerisinde 21°C sıcaklıkta kür edilmiştir. Her bir gruptan üç numune 7 gün, diğer üç numune de 28 gün kür edilmiştir.



Şekil 5.7: Enjeksiyon uygulanmış numuneler

Numuneler serbest basınç deneyi öncesinde sudan çıkartılarak kurutulmuştur. 5 cm çapında 10 cm boyunda olan numunelere başlık yapılmıştır. 0,5 mm/dak hızla yapılan serbest basınç deneyi süresince numuneye uygulanan yük ve bu yüklemeye oluşan deformasyonlar okunmuştur. Deney sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemeti bulunmuştur. Ayrıca gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden elastisite modülleri de hesaplanmıştır.

İlk önce GP sınıfındaki malzeme ile deneyler yapılmıştır. Kalıplara %25 relatif sıklıkta yerleştirilen numuneye, su/çimento oranı 0,7 olan harç 100 kPa basınç altında enjeksiyon edilmiştir. Bir gün sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 7 ve 28 gün kür edilmiştir. Aynı relatif sıklıktaki numuneye 0,7 su/çimento oranındaki harç 150 kPa basınç altında enjeksiyon yapılmış, sonra aynı relatif sıklıktaki numuneye 0,7 su/çimento oranındaki harç 200 kPa basınç altında enjeksiyon edilmiştir. 0,7 su/çimento oranındaki harç ile enjeksiyon deneyleri tamamlandığında %25 relatif sıklık için su/çimento oranı 1,0 olan harç sırasıyla 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiştir. Su/çimento oranı 1,0 olan harç ile enjeksiyon deneyleri tamamlandığında %25 relatif sıklıktaki numuneye 1,5 su/çimento oranındaki harç her üç basınç altında enjeksiyon yapılmıştır.

GP sınıfındaki malzemenin %25 relatif sıklıktaki numuneleriyle enjeksiyon uygulamasından sonra aynı malzemenin %50 relatif sıklıktaki numuneleriyle yukarıda anlatılan sırayla enjeksiyon uygulaması yapılmıştır. Daha sonra enjeksiyon uygulaması %75 ve %100 relatif sıklıktaki numuneler için tekrarlanmıştır.

GP sınıfı malzemenin her dört relatif sıklıkta hazırlanmış numunelerinde enjeksiyon uygulaması tamamlandıktan sonra SP sınıfı malzemeyle aynı işlem sırasıyla enjeksiyon uygulamaları tekrar edilmiştir. Enjeksiyon uygulamasında başarısız numuneler hariç 432 numune hazırlanmıştır.

Basınç tankında harcın çökmesinden dolayı bazı numunelerde başarısız enjeksiyon uygulamaları görülmüştür.(Şekil 5.8) Başarısız numuneler için enjeksiyon tekrarlanmış ve başarılı numuneler elde edilmiştir.



Şekil 5.8: Enjeksiyon uygulaması başarısız olan numuneler

5.4. Laboratuvar Sonuçları

5.4.1. GP sınıfı numunenin sonuçları

GP sınıfı numune ile yapılan enjeksiyon deneylerinde 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonrasında üçer numune üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış ve elde edilen serbest basınç mukavemetleri Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Dr	S/Ç	7 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)			28 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)		
		Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa	Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa
25	0,7	8,85	8,53	8,77	13,71	13,51	13,64
	1,0	2,40	2,53	2,24	4,83	4,59	4,89
	1,5	0,82	0,77	0,85	1,67	1,83	1,77
50	0,7	8,09	8,11	8,08	12,23	12,09	12,36
	1,0	2,72	2,79	2,62	3,48	3,66	3,51
	1,5	0,71	0,71	0,70	1,75	1,75	1,77
75	0,7	7,52	7,75	7,37	15,96	15,92	15,90
	1,0	2,94	2,84	2,99	7,35	7,45	7,25
	1,5	1,03	1,23	1,12	2,51	2,42	2,66
100	0,7	8,28	8,71	8,43	18,93	18,92	18,95
	1,0	3,15	3,74	3,34	5,46	5,11	5,30
	1,5	1,55	1,39	1,75	3,68	4,29	3,71

GP sınıfı numunelerin çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden elastisite modülleri hesaplanmış ve Tablo 5.8’de verilmiştir.

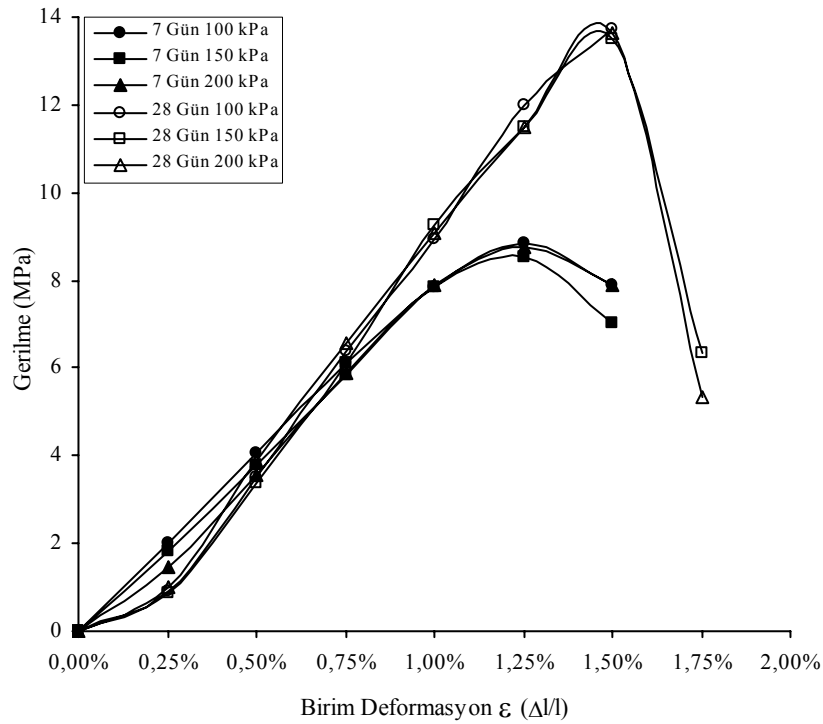
Tablo 5.8: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin elastisite modülleri

Dr	S/Ç	7 Günlük Elastisite Modülleri (MPa)			28 Günlük Elastisite Modülleri (MPa)		
		Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa	Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa
25	0,7	791	789	810	1103	1178	1110
	1,0	274	217	284	435	400	450
	1,5	130	149	126	175	205	180
50	0,7	929	995	963	1116	1191	1141
	1,0	290	324	341	402	408	442
	1,5	114	135	111	189	185	198
75	0,7	869	900	875	1280	1239	1291
	1,0	311	316	312	556	538	546
	1,5	168	165	152	330	315	326
100	0,7	1025	1063	1044	1183	1202	1196
	1,0	494	492	514	816	895	820
	1,5	280	246	275	548	532	549

Enjeksiyon uygulanmış numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda, aynı s/ç oranındaki harcın farklı basınçlarla enjekte edildiği aynı relatif sıklıktaki numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine yakın çıkmıştır. Özellikle grafiğin maksimum noktasına kadar olan eğimlerin paralel oldukları görülmüştür. Bunun sonucunda hesaplanan elastisite modüllerinin, aynı s/ç oranı ve relatif sıklık için, farklı enjeksiyon basınçlarına rağmen, yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde maksimum noktaya kadar artışta benzerlik olmasına rağmen numunenin kırıldıktan sonraki gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde farklı hareketler gözlenmiştir. Özellikle s/ç oranı 0,7 olan numunelerin bir kısmında gevrek olmalarından dolayı kırılma noktasından sonra okuma alınamamasına rağmen bazılarında düşüğe olsa okuma alınmıştır. Harcın s/ç oranı yükseldikçe numunelerde sünek kırılmanın olduğu, harcın s/ç oranı azaldıkça kırılmanın gevrekleşmeye başladığı gözlenmiştir.

0,7 s/ç oranındaki harcın enjeksiyon edildiği %25 relatif sıklıktaki 28 gün kür edilmiş numunelerin her üç enjeksiyon basıncına ait gerilme-şekil değiştirme

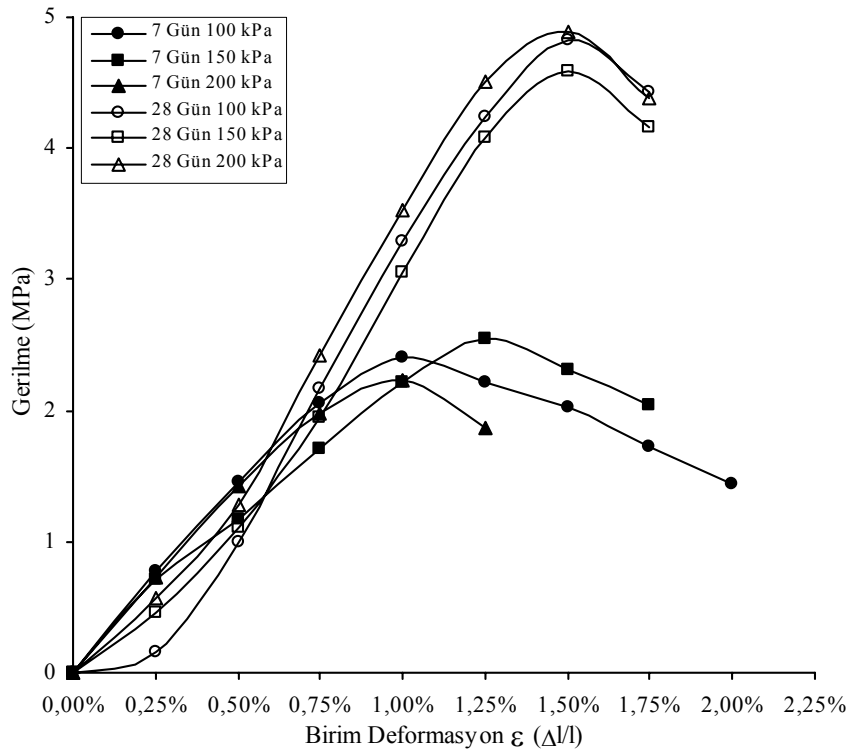
grafikleri birbirlerine teğet şeklidir.(Şekil 5.9) Her üç numunenin %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarında ezilme oluşmuştur. Bu birim deformasyondan itibaren numuneler, %1,50 birim deformasyona kadar lineer artış olmaktadır. Bu noktada 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede ani kırılma olmakta iken diğer iki numunede %1,75 birim deformasyona kadar lineer bir düşüş olmaktadır. 7 günlük kür edilen numunelerde ise her üç numune %0,75 birim deformasyona kadar lineer bir artış olmakta, bu noktadan sonra numunelerde sünek kırılma oluşmaktadır. Her üç numunede %1,25 birim deformasyonda kırılmaktadır. 7 gün kür edilmiş numunelerinde grafikleri %0,50 birim deformasyondan itibaren birbirine teğet şeklinde elde edilmiştir. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin kırılma anındaki gerilme değeri diğer numunelerden daha düşük olup bu noktadan sonrada daha düşük olarak devam etmiştir.



Şekil 5.9: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

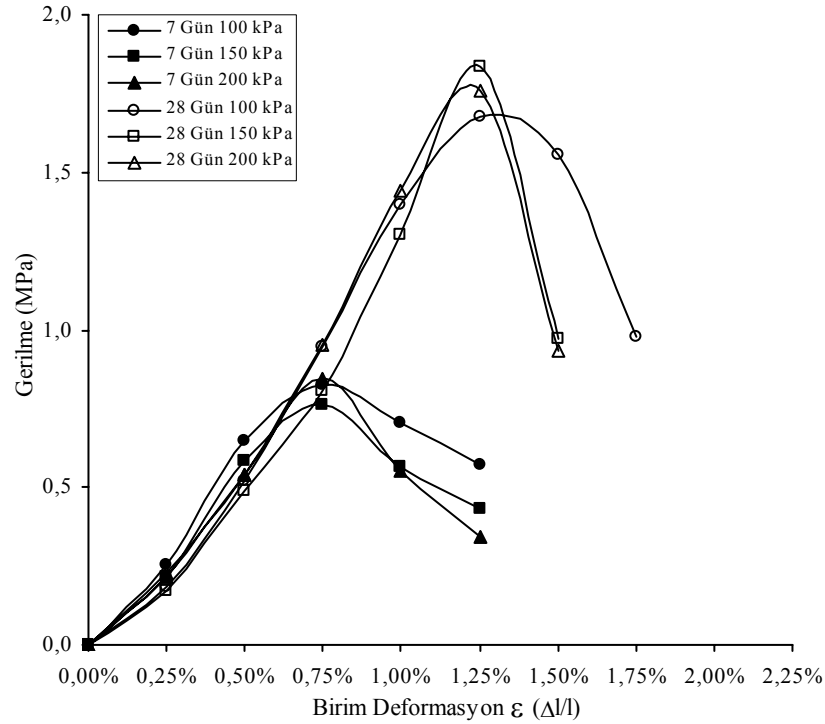
1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.10) 100 kPa enjeksiyon basıncı için elde edilen grafikte %0,25 birim deformasyona kadar başlıkta ezilmeler olmuş bu noktadan itibaren %1,25 birim deformasyona kadar gevrek bir kırılma

gözlenmiştir. %1,25 birim deformasyondan itibaren sünek kırılma olmuş ve numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncıyla elde edilmiş numunelerde ise %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarda 100 kPa enjeksiyon basıncıyla elde edilmiş numuneye göre daha az ezilme oluşmuştur. Bu noktadan itibaren %1,25 birim deformasyona kadar gevrek kırılma gözlemlenmiş bu birim deformasyondan itibaren ise sünek kırılma oluşmaya başlamıştır. Her iki numunede %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda ise 100 kPa ve 200 kPa basınç altında enjeksiyon edilen numunelerde %0,75 birim deformasyona kadar aynı gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu birim deformasyondan sonra 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilen numunenin gerilme değerleri azalmakta fakat her iki numunede %1,00 birim deformasyonda kırılmaktadır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin gerilme şekil değiştirme grafiği %0,25 birim deformasyona kadar 100 kPa ve 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunelerle aynı gerilme değerinde iken bu noktadan sonra gerilme değerleri düşmekte fakat kırılma %1,25 birim deformasyonda diğerlerinden daha büyük gerilme değerinde olmaktadır.



Şekil 5.10: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

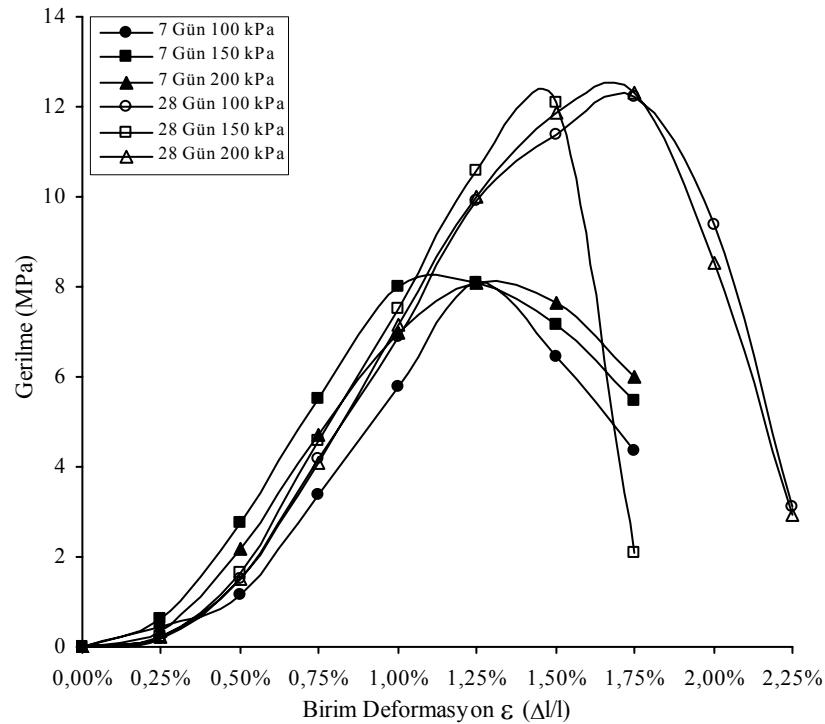
1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş %25 relatif sıklıktaki numunelerin 100 kPa ve 200 kPa enjeksiyon basınçları için 28 günlük gerilme birim deformasyon grafikleri %1,00 birim deformasyona kadar birbiriyle aynı elde edilmiştir.(Şekil 5.11) Her üç basınç ile enjeksiyon edilmiş numuneler %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarında bir miktar ezilme olmakta bu noktadan itibaren 100 kPa ve 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numuneler %1,00 birim deformasyona kadar birbirleriyle aynı gerilme değerlerinde gevrek olarak kırılmışlardır. Bu noktadan itibaren 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin gerilme değeri düşmekte ve sünek kırılma olmaktadır. Buna karşın 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune gevrek kırılma davranışıyla kırılmıştır. Her üç numunede %1,25 birim deformasyonda kırılmışlardır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek kırılmıştır. 7 günlük kür süreleri sonunda her üç enjeksiyon basıncı için elde edilen grafiklerde %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarda ezilme olmuş bu noktadan itibaren her üç numunede birbirlerine paralel olarak sünek kırılmışlardır. Kırılma %0,75 birim deformasyonda olmuştur.



Şekil 5.11: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

0,7 s/ç oranındaki harcın enjeksiyon edildiği %50 relatif sıklıktaki 28 gün kür edilmiş numunelerin her üç enjeksiyon basıncına ait gerilme-şekil değiştirme

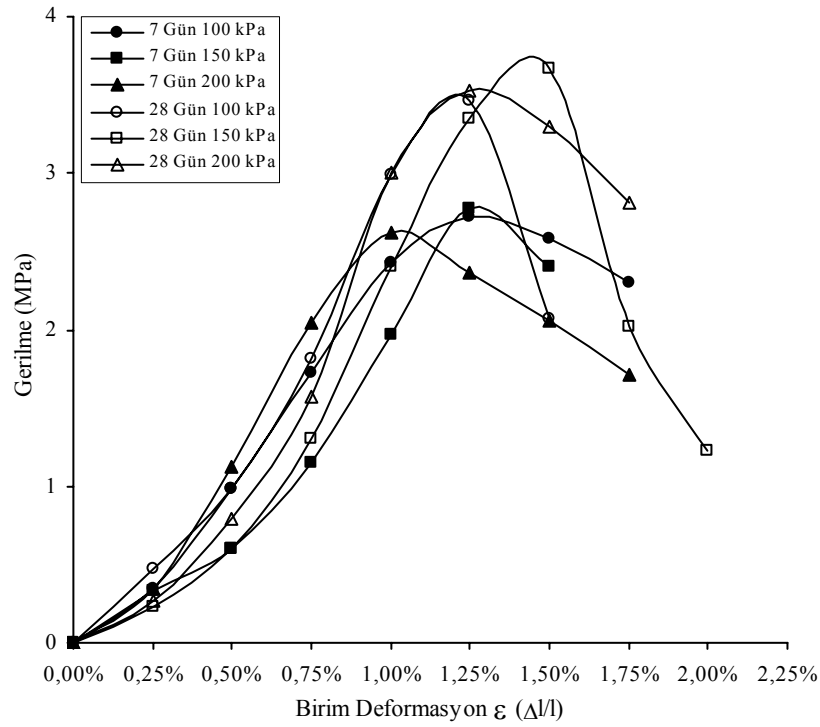
grafikleri birbirlerine teğet şeklindedir.(Şekil 5.12) Her üç numunenin %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarında ezilme oluşmuştur. Bu birim deformasyondan itibaren 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune, %1,50 birim deformasyona kadar gevrek kırılmıştır. Bu noktada numunede kırılma olmakta iken diğer iki numune %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 100 kPa ile 200 kPa basınçla enjeksiyon edilmiş numuneler %1,25 birim deformasyona kadar gevrek kırılmış iken bu noktadan itibaren kırılma sünek olarak devam etmiştir. 7 günlük kür süreleri sonundaki gerilme birim deformasyon grafiklerinde ise her üç basınçla enjeksiyon edilmiş numuneler %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarda ezilme olmuştur. 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin başlığındaki ezilme %0,50 birim deformasyona kadar devam etmiştir. Bu numunede %1,25 birim deformasyona kadar kırılma gevrek olmuş iken diğer iki numunede ise %1,00 birim deformasyona kadar gevrek kırılma olmuştur. Bu noktadan itibaren kırılma sünek olmuş ve 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,00 birim deformasyonda diğer numuneler ise %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.12: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme

grafikleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.13) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilen numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuş bu noktadan itibaren %1,25 birim deformasyona kadar gevrek kırılma olmuştur. Numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa ve 200 kPa basınç ile enjeksiyon yapılmış numunelerde %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarda ezilme oluşmuş bu noktadan sonra her iki numunede birbirine paralel olarak gevrek kırılma gözlenmiştir. 150 kPa basınç ile enjeksiyon yapılmış numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon yapılmış numune ise %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek kırılma meydana gelmiş ve numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır.

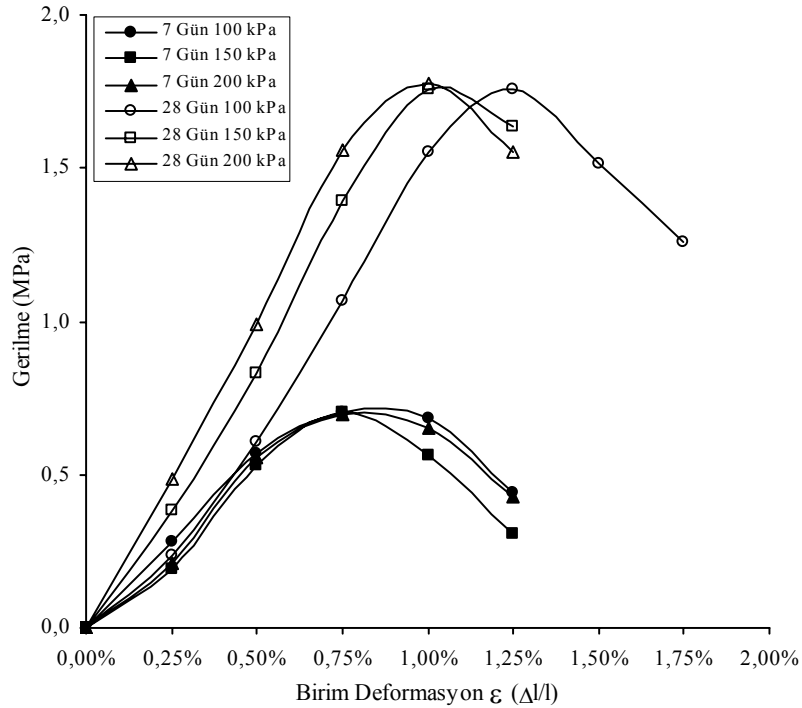


Şekil 5.13: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıkılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde ise 100 kPa ile enjeksiyon yapılmış numune %0,25 birim deformasyona kadar başlıkta ezilme olmuş bu noktadan itibaren %0,75 birim deformasyona kadar gevrek kırılmıştır. Numune bu noktadan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,50 birim deformasyona kadar başlıklarda ezilme olmuş bu noktadan itibaren %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 200

kPa ile enjeksiyon yapılmış numune %0,25 birim deformasyona kadar başlıkta ezilme olmuş bu noktadan itibaren %0,75 birim deformasyona kadar gevrek kırılmıştır. Numune %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.

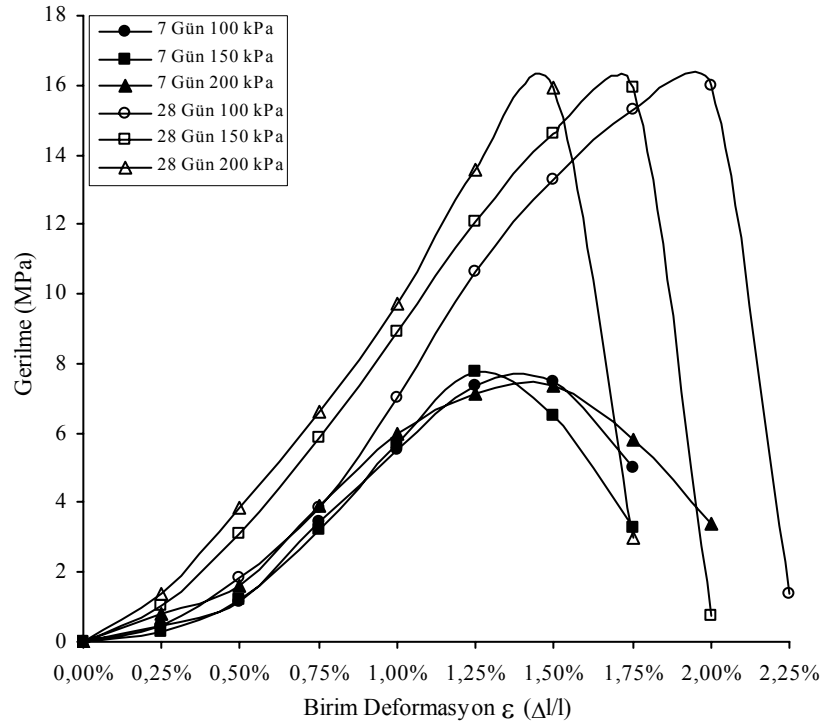
1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.14) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,00 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.14: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde ise 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede de %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır.

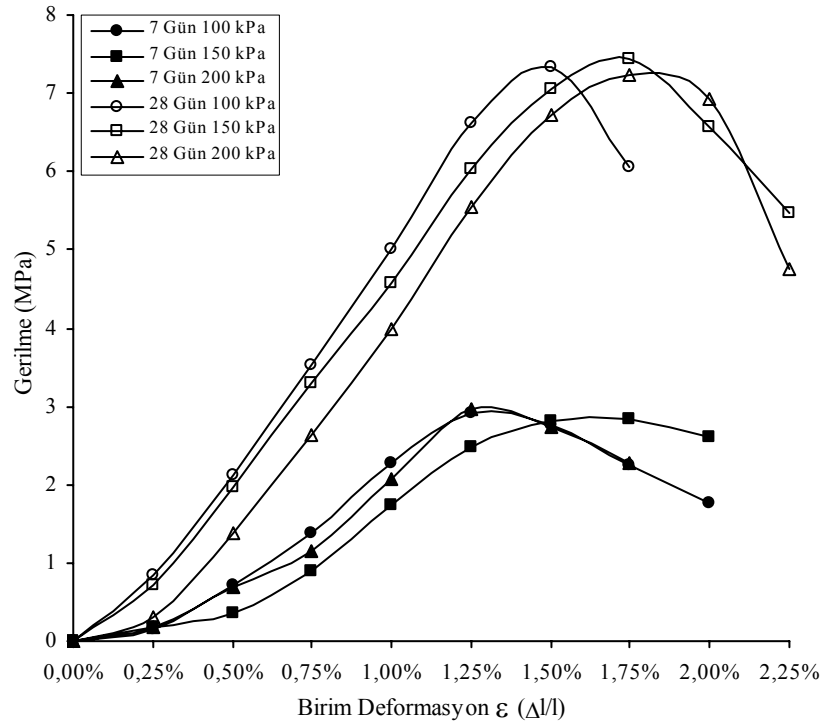
0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.15) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,25 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %2,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve bu noktada kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,50 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.15: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıkılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıkılıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.16) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,25 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,25 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim

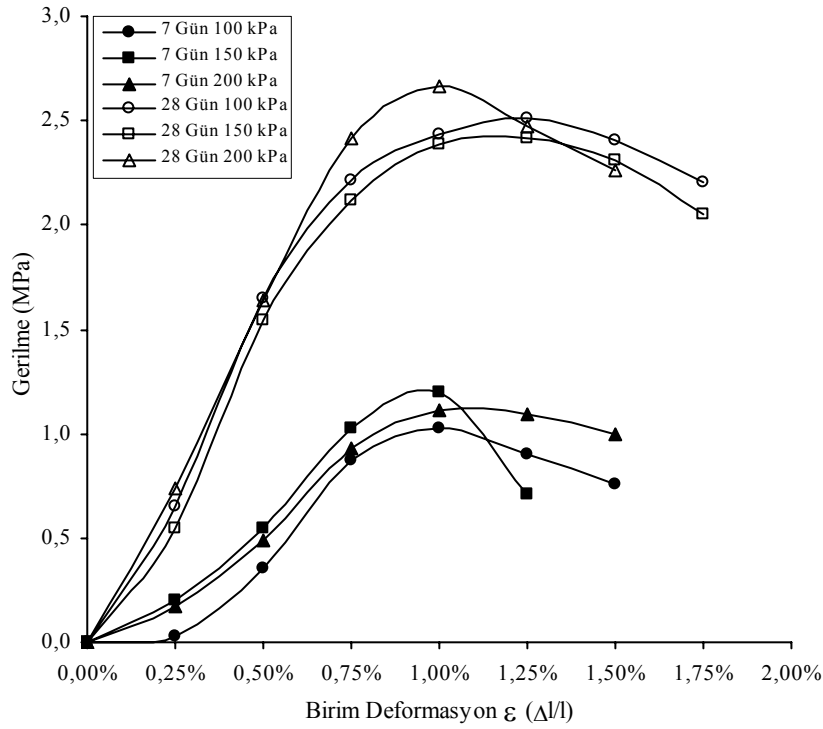
deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.16: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.17) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,50 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,50 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim

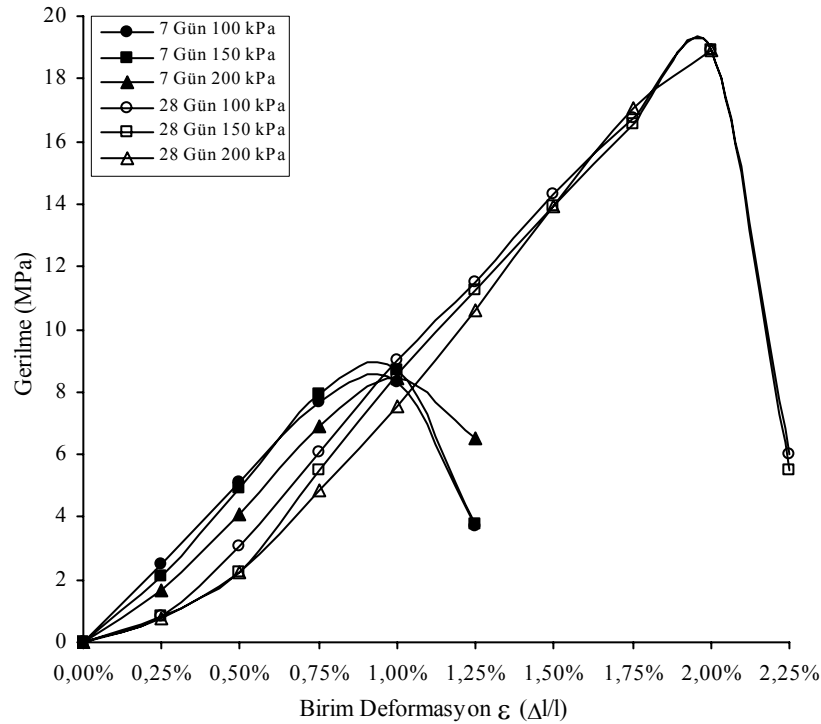
deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.17: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

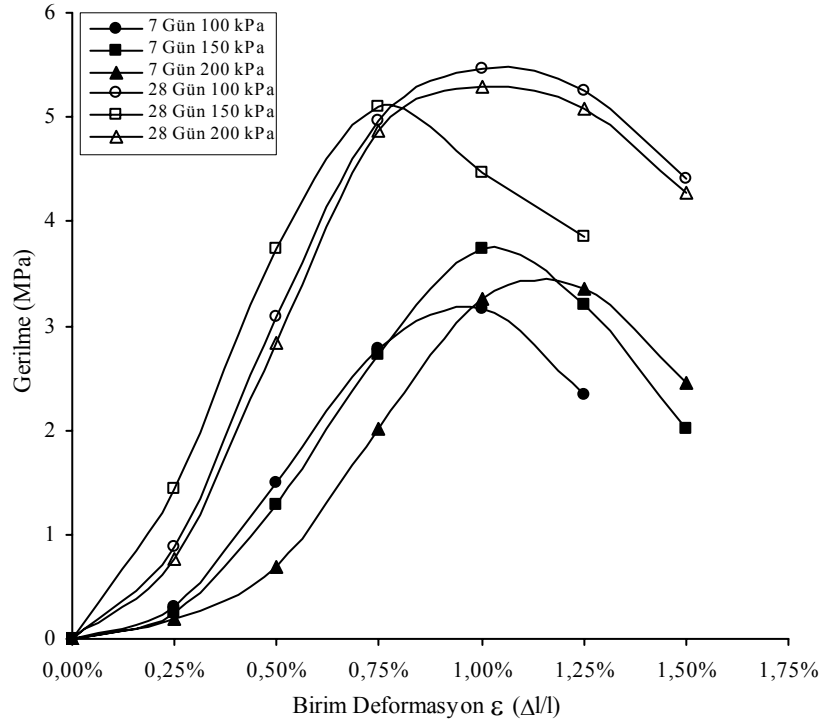
0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.18) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlıklarında ezilme

olmuş, bu noktadan itibaren numune %2,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %2,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlıklarında ezilme olmuş, bu noktadan itibaren numune %2,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve %2,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlıklarında ezilme olmuş, bu noktadan itibaren numune %2,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve %2,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.18: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.19) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuş fakat gerilme değeri 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilen numuneden daha yüksek çıkmıştır. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.



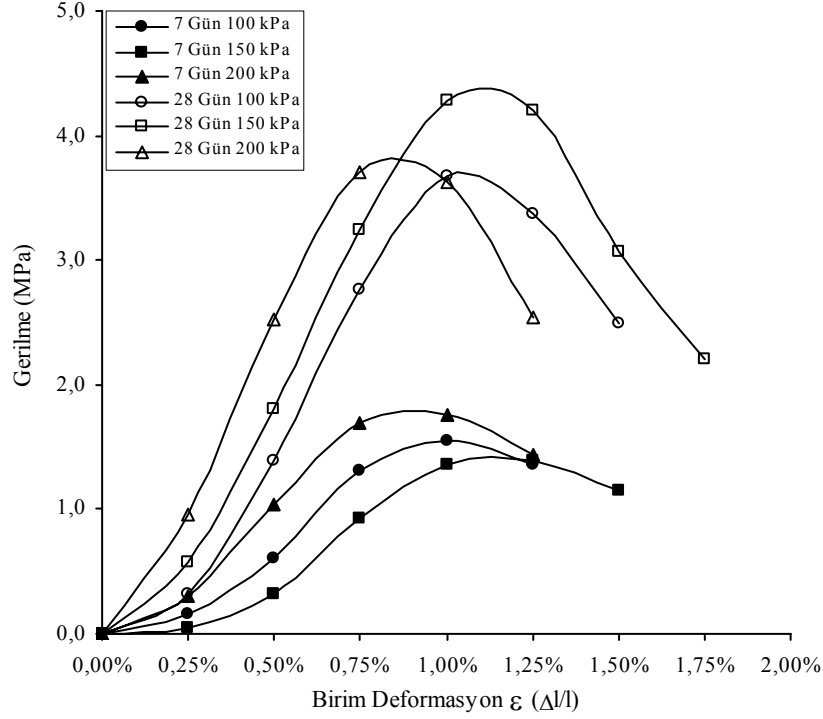
Şekil 5.19: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde ise 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu

noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numuneden daha yüksek gerilmede kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır.

1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıkılıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.20) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu

noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır.

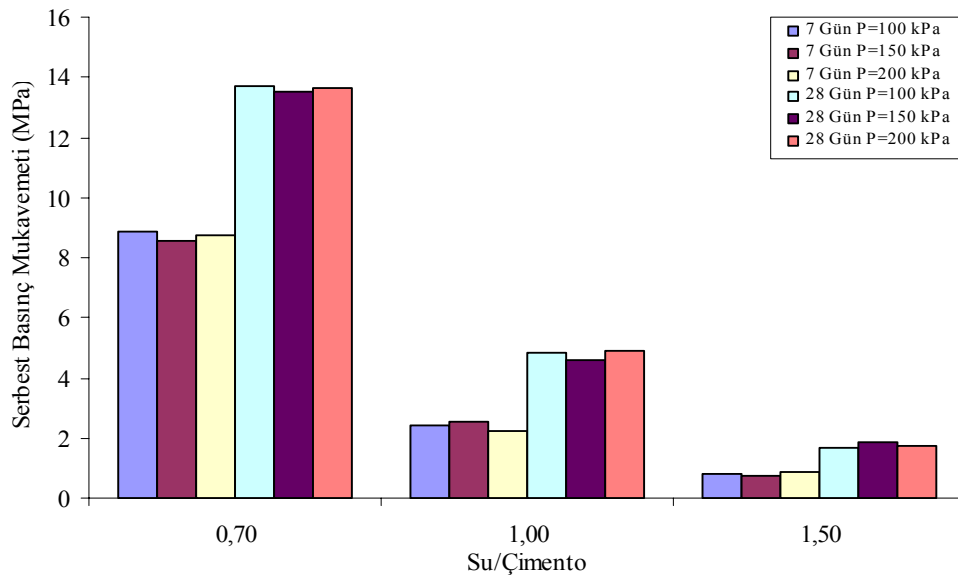


Şekil 5.20: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

Enjeksiyon sırasında uygulanan basınçlar ile serbest basınç mukavemetlerinin değişimini gösteren şekil 5.21–5.24’deki grafiklerde de görüldüğü gibi enjeksiyon basıncı artmasına rağmen serbest basınç mukavemetleri değişmemektedir. Enjeksiyon için yeterli basınçtan daha yüksek basınç ile uygulama yapıldığında serbest basınç mukavemetlerinde değişiklik olmamaktadır.

%25 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı farklı harçlar ile değişik basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik, şekil 5.21’de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 13,71 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 13,51 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 13,64 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 4,83 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 4,59 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 4,89 MPa olarak bulunmuştur. 1,5

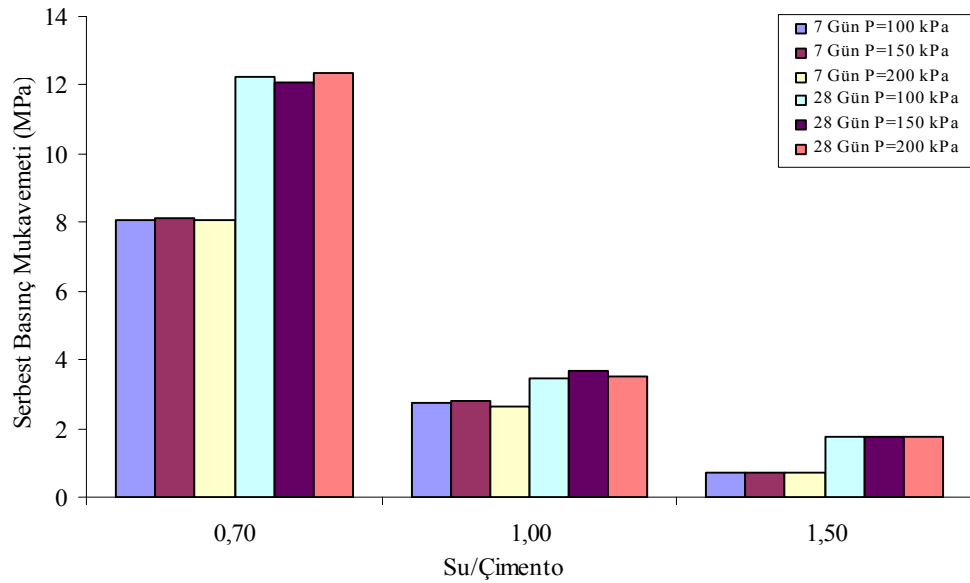
s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 1,67 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,83 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,77 MPa olarak bulunmuştur. 7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 8,85 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 8,53 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 8,77 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,40 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,53 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,24 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 0,82 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 0,77 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 0,85 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.21: %25 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

%50 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı değişen harçlar ile farklı basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.22’de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 12,23 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 12,09 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 12,36 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 3,48 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı

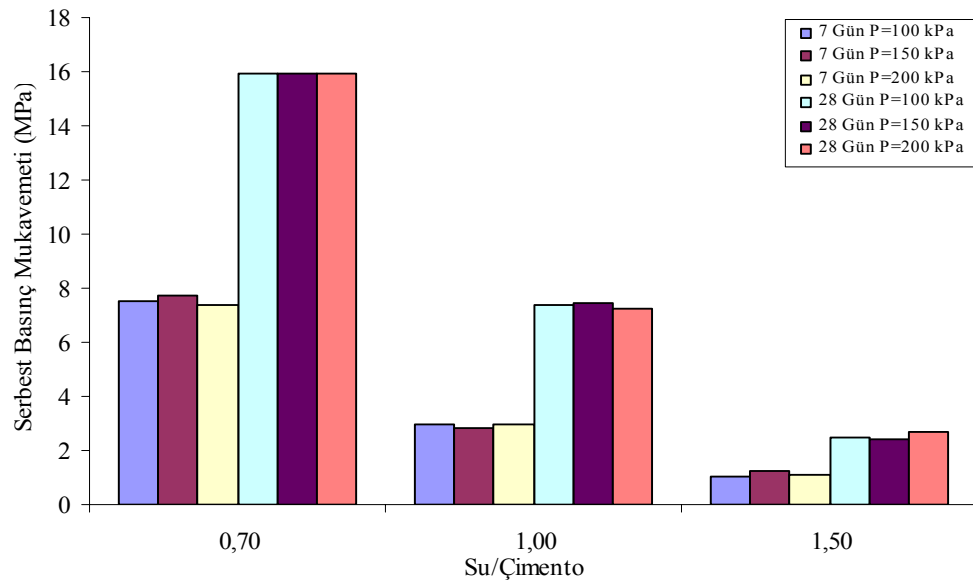
için 3,66 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 3,51 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 1,75 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,75 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,77 MPa olarak bulunmuştur. 7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 8,09 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 8,11 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 8,08 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,72 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,79 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,62 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 0,71 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 0,71 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 0,70 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.22: %50 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

%75 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı değişen harçlar ile farklı basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.23'de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 15,96 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 15,92 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 15,90 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç

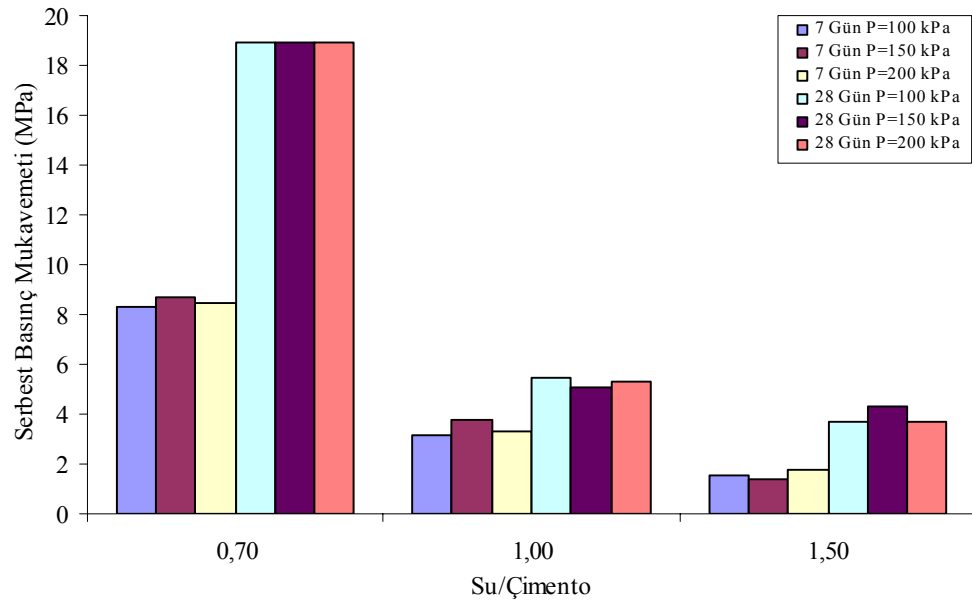
mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 7,35 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 7,45 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 7,25 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,51 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,42 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,66 MPa olarak bulunmuştur. 7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 7,52 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 7,75 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 7,37 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,94 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,84 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,99 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 1,03 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,23 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,12 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.23: %75 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

%100 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı değişen harçlar ile farklı basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.24'de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 18,93 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 18,92 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 18,95 MPa olarak bulunmuştur.

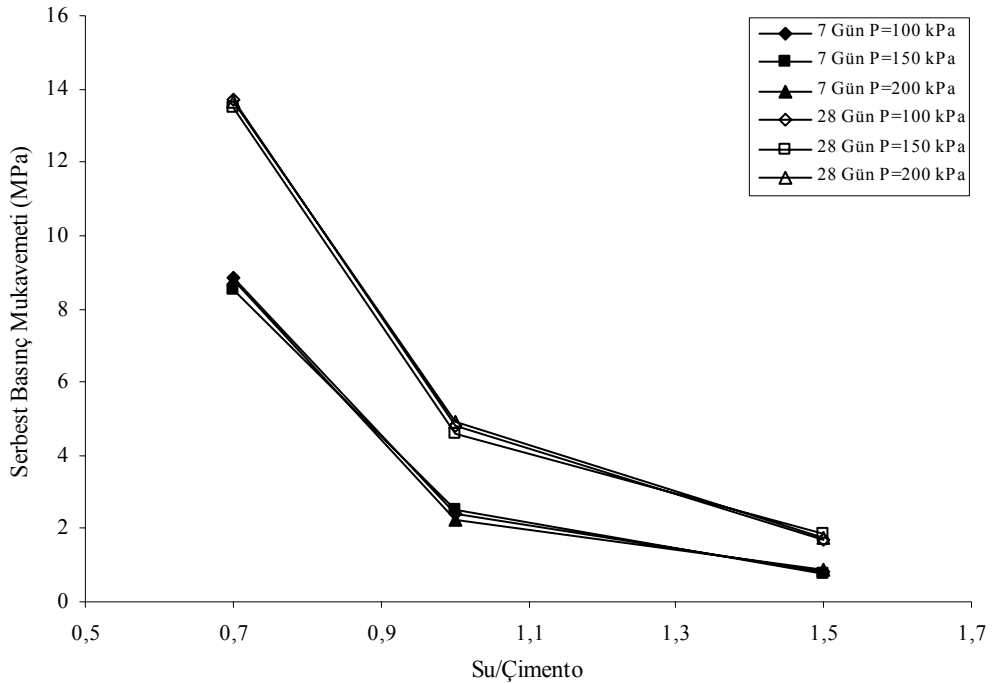
1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 5,46 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 5,11 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 5,30 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 3,68 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 4,29 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 3,71 MPa olarak bulunmuştur. 7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 8,28 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 8,71 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 8,43 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 3,15 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 3,74 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 3,34 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 1,55 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,39 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,75 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.24: %100 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

Su/çimento oranı ile serbest basınç mukavemetleri arasında çizilen grafikler Şekil 5.25–5.28’de verilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı gibi s/ç oranı arttıkça numune daha sünek hale gelmekte ve serbest basınç mukavemeti beklenildiği gibi azalmaktadır.

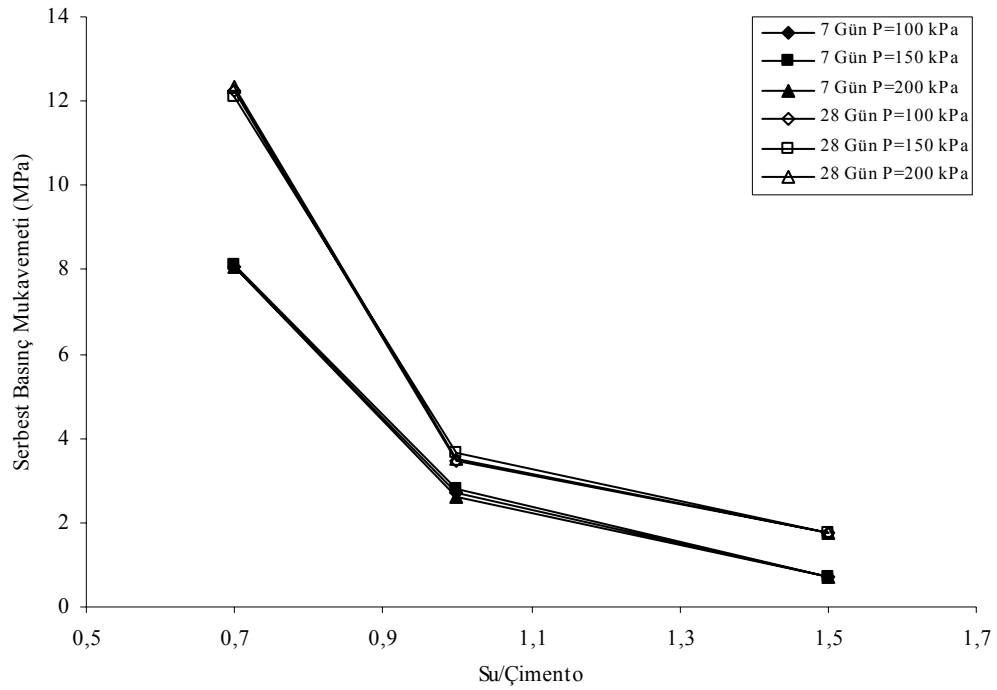
%25 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.25’de verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 13,50 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 4,70 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,75 MPa değerine düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 8,65 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,40 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 0,80 MPa değerine düşmüştür.



Şekil 5.25: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %25 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

%50 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.26’da verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon

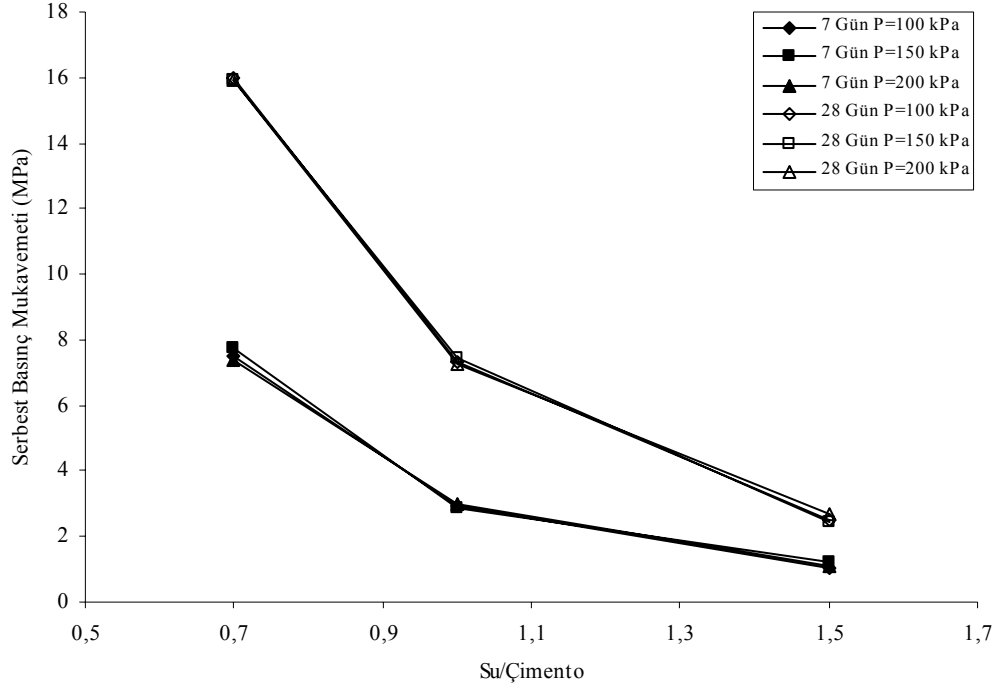
basıncı için ortalama 12,20 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 3,55 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,75 MPa değerine düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 8,10 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,70 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 0,70 MPa değerine düşmüştür.



Şekil 5.26: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %50 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

%75 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.27’de verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 15,90 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 7,35 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,50 MPa değerine

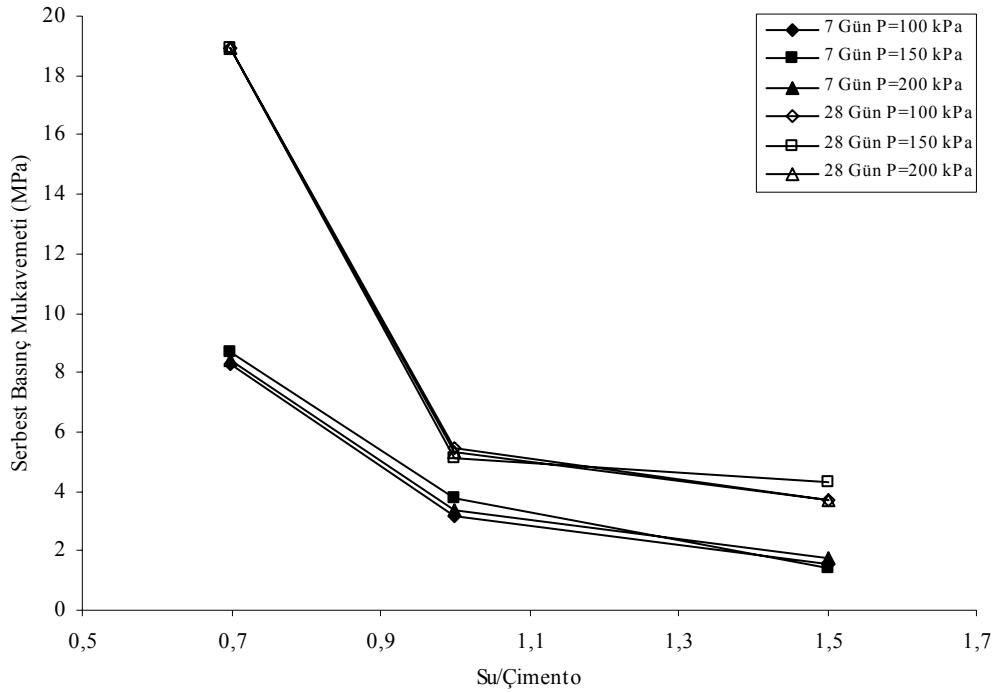
düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 7,50 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,90 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,13 MPa değerine düşmüştür.



Şekil 5.27: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %75 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

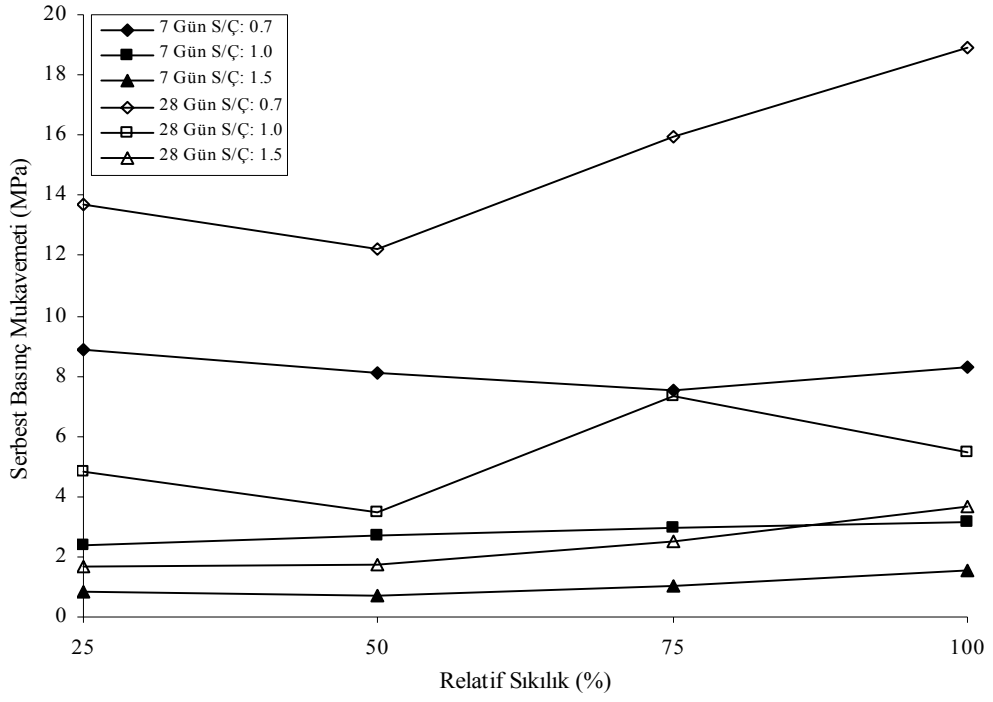
%100 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.28’de verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 18,90 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 5,30 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 3,80 MPa değerine düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 8,45 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 3,35 MPa

değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,55 MPa değerine düşmüştür.



Şekil 5.28: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %100 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

GP sınıfı numunelerle yapılan uygulamalarda s/ç oranı 0,7 için 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %100 olan gruptan elde edilmiştir. Buna karşılık aynı s/ç oranı için en düşük serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %50 olan gruptan elde edilmiştir. Su/çimento oranı 1,0 olan harçlar için 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %75 olan gruptan elde edilmiş olmasına rağmen en düşük serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %50 olan gruptan elde edilmiştir. Su/çimento oranı 1,5 olan harçlar için 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %100 olan grupta elde edilmiştir. Bu karışım oranında %25 ve %50 relatif sıklıktaki serbest basınç mukavemetleri birbirine yakın çıkmıştır. 1,5 s/ç oranındaki harç ile yapılan enjeksiyonlarda en düşük serbest basınç mukavemeti değerleri bulunmuştur. 7 günlük serbest basınç mukavemetleri tüm relatif sıklıklar için birbirine yakın çıkmıştır. 7 günlük ile 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemetleri arasında paralellik gözlenmemiştir.



Şekil 5.29: 100 kPa basınç ile enjeksiyon yapılmış değişik relatif sıklıklardaki numunelerin serbest basınç mukavemetleri

5.4.2. SP sınıfı numunenin sonuçları

SP sınıfı numune ile yapılan enjeksiyon deneylerinde 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonrasında üçer numune üzerinde serbest basınç deneyleri uygulanmıştır.(Şekil 5.30)



Şekil 5.30: Serbest basınç deneyi yapılmış numuneler

Serbest basınç deneyi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemetleri Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Dr	S/Ç	7 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)			28 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)		
		Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa	Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa
25	0,7	11,69	10,80	11,52	18,02	17,88	18,40
	1,0	4,14	4,85	4,64	7,79	8,25	7,97
	1,5	1,44	1,45	1,43	2,10	2,04	2,03
50	0,7	10,97	11,22	10,69	19,44	19,20	19,83
	1,0	4,30	4,17	4,47	5,68	5,12	5,38
	1,5	1,57	1,72	1,68	2,36	2,36	2,35
75	0,7	7,59	7,85	7,77	13,03	13,67	13,26
	1,0	4,05	4,05	3,81	7,53	7,45	7,20
	1,5	1,42	1,35	1,41	2,37	2,41	2,39
100	0,7	6,39	6,44	6,38	10,38	10,12	10,73
	1,0	3,13	3,08	3,23	6,24	5,88	6,46
	1,5	1,77	1,59	1,66	2,43	2,80	2,64

SP sınıfı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden elastisite modülleri hesaplanmış ve Tablo 5.10'de verilmiştir.

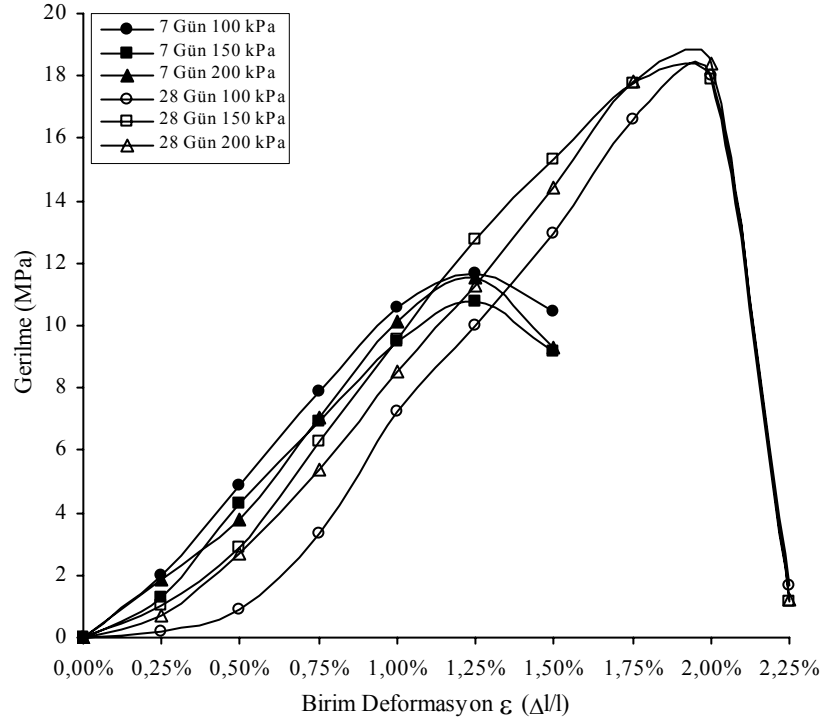
Tablo 5.10: Enjeksiyon uygulanmış numunelerin elastisite modülleri

Dr	S/Ç	7 Günlük Elastisite Modülleri (MPa)			28 Günlük Elastisite Modülleri (MPa)		
		Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa	Ep=100 Kpa	Ep=150 Kpa	Ep=200 Kpa
25	0,7	1078	1092	1042	1260	1252	1240
	1,0	558	564	594	827	828	837
	1,5	207	196	192	282	269	268
50	0,7	1073	1140	1136	1384	1360	1399
	1,0	552	521	553	660	632	640
	1,5	231	216	224	394	362	386
75	0,7	631	653	627	1370	1357	1399
	1,0	430	452	414	871	896	883
	1,5	255	249	222	429	424	418
100	0,7	759	755	768	1030	1056	1086
	1,0	422	452	446	785	788	776
	1,5	245	247	238	332	376	327

Aynı s/ç oranındaki harcın farklı basınçlarla enjekte edildiği aynı relatif sıklıktaki numunelerin, çizilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine yakın çıkmıştır. Özellikle grafiğin maksimum noktasına kadar olan eğimlerin paralel oldukları görülmüştür. Bunun sonucunda hesaplanan elastisite modüllerinin, aynı s/ç oranı ve relatif sıklık için, farklı enjeksiyon basınçlarına rağmen, yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde maksimum noktaya kadar artışta benzerlik olmasına rağmen numunenin kırıldıktan sonraki gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde farklı davranışlar gözlenmiştir. Özellikle s/ç oranı 0,7 olan numunelerin bir kısmında gevrek kırılmadan dolayı kırılma noktasından sonra okuma alınamamasına rağmen bazılarında okuma alınmıştır. Su/çimento oranı yükseldikçe numunelerde sünek kırılmanın olduğu, s/ç oranı azaldıkça kırılmanın gevrekleşmeye başladığı gözlenmiştir.

0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.31) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %2,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %2,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %2,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %2,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,00 birim deformasyondan

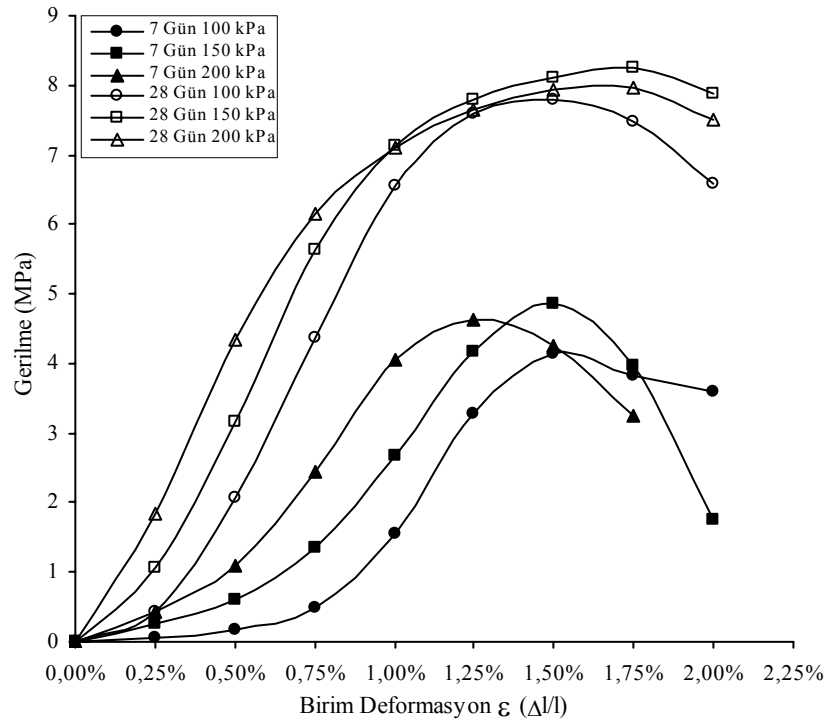
itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.31: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıkılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıkılıktaki numunenin 28 günlük kuru süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.32) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune bu noktadan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktada numune 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numuneden daha yüksek gerilmeye sahiptir. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir.

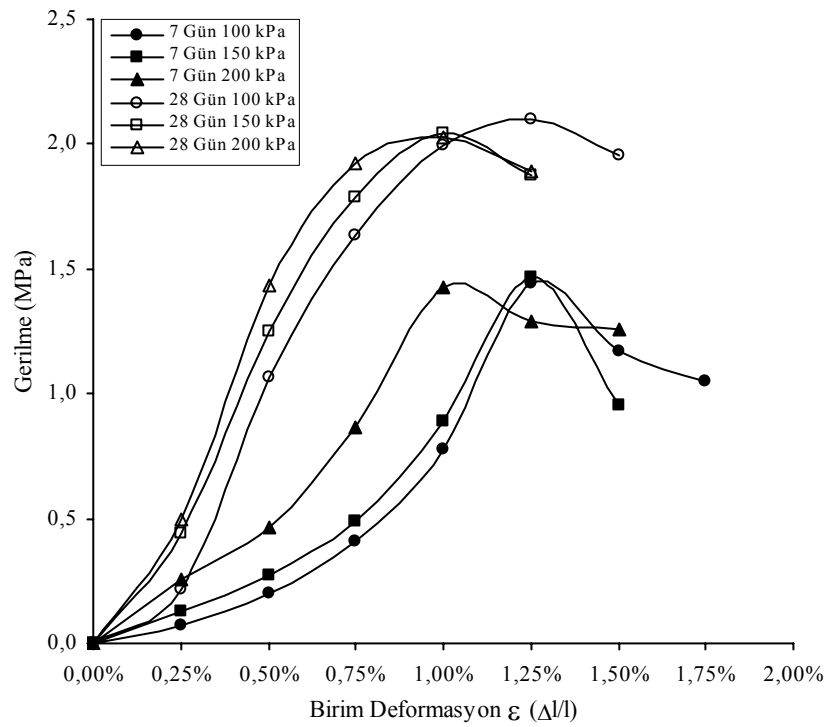
%0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,75 birim deformasyona başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş olan numune %1,25 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,75 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,25 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş olan numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.32: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

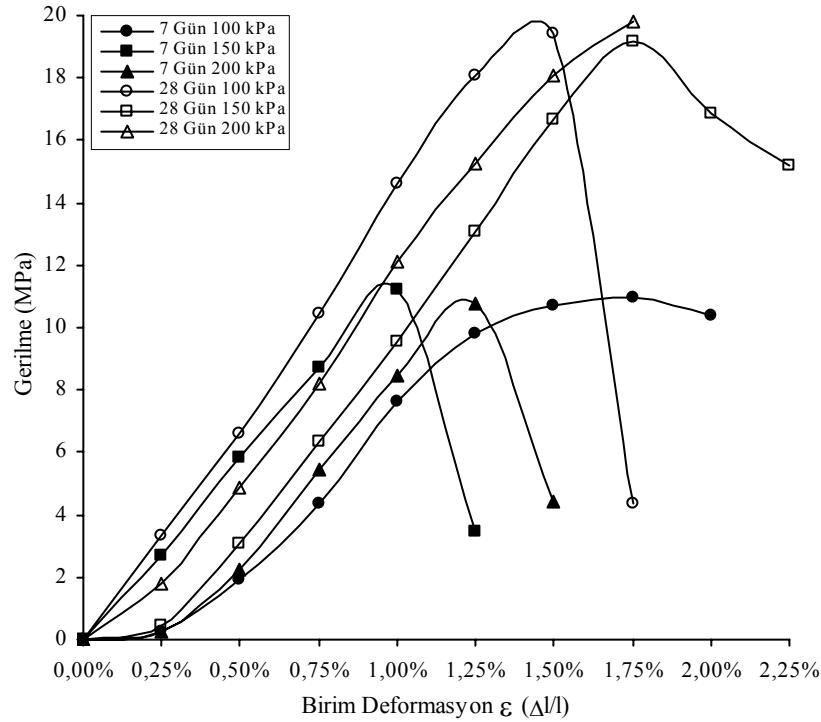
1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.33) 100 kPa basınç ile

enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune bu noktadan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktada 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numuneden daha yüksek gerilmeye sahiptir. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede sünek davranış gözlenmiştir. Numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede sünek davranış gözlenmiş olup numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune sünek davranış göstererek %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.



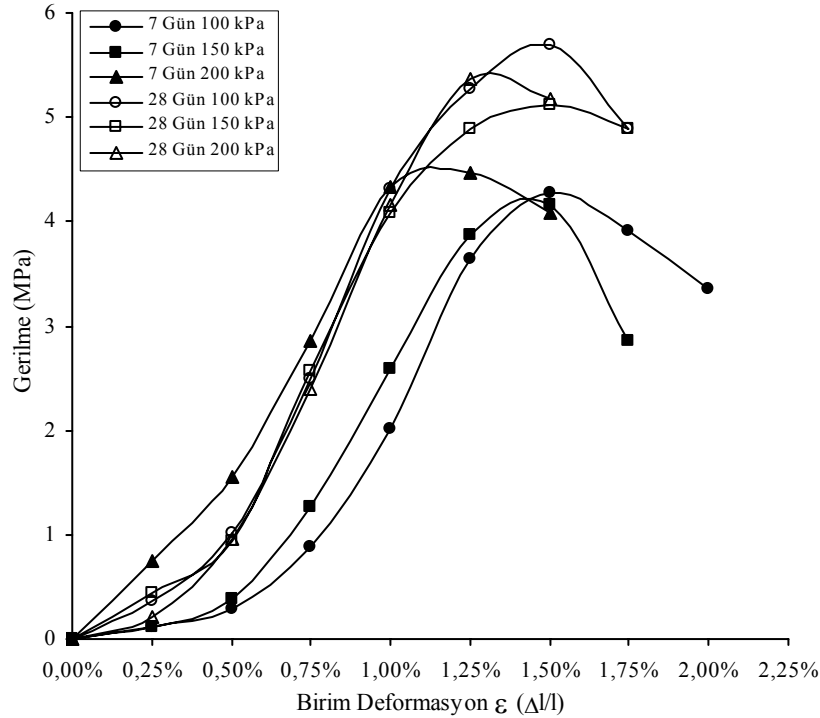
Şekil 5.33: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %25 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.34) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune bu noktada kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve bu noktada kırılmıştır.



Şekil 5.34: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıkılıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.35) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş olan numune %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiştir. Numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda numune kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,00 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda numune kırılmıştır.

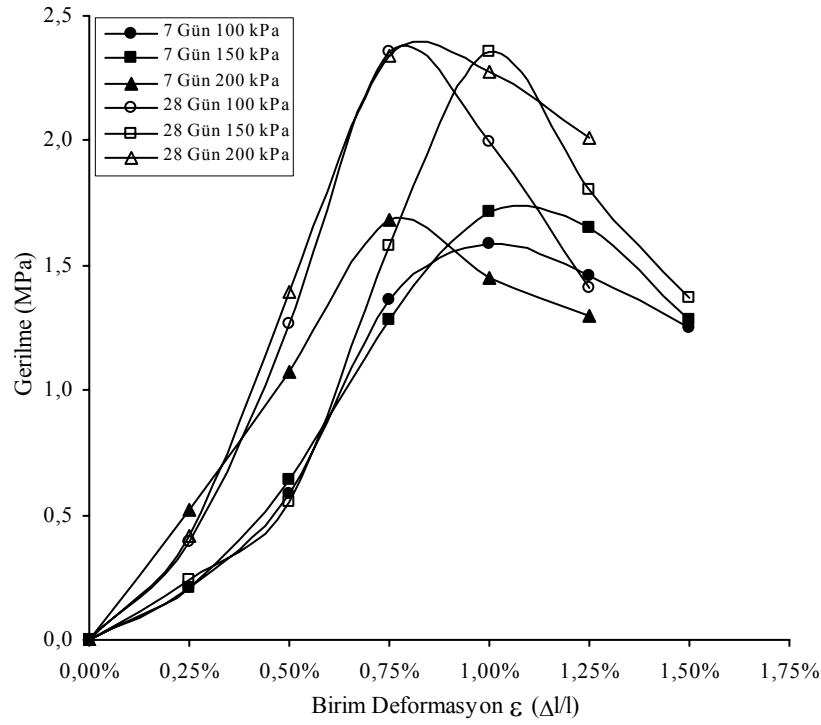


Şekil 5.35: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıkılıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,75 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir.

Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,25 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş olan numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %1,25 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş olan numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.

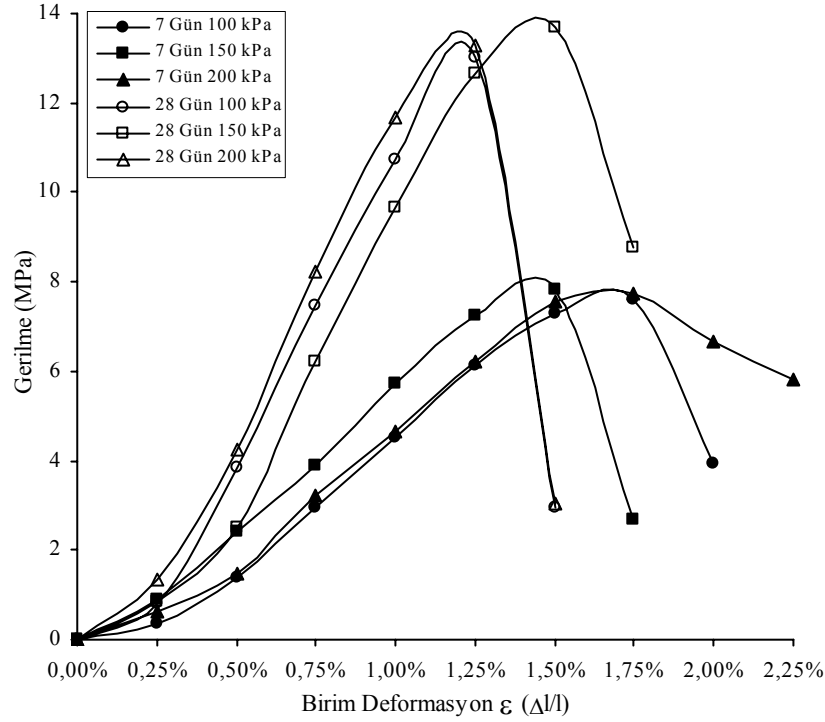
1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.36) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş olan numune bu noktada kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve numune bu noktada kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda numune kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. %0,75 birim deformasyondan itibaren sünek davranış göstermiş olan numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş olan numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve bu noktada kırılmıştır.



Şekil 5.36: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %50 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.37) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune bu noktada kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune gevrek davranış göstermiş ve %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa

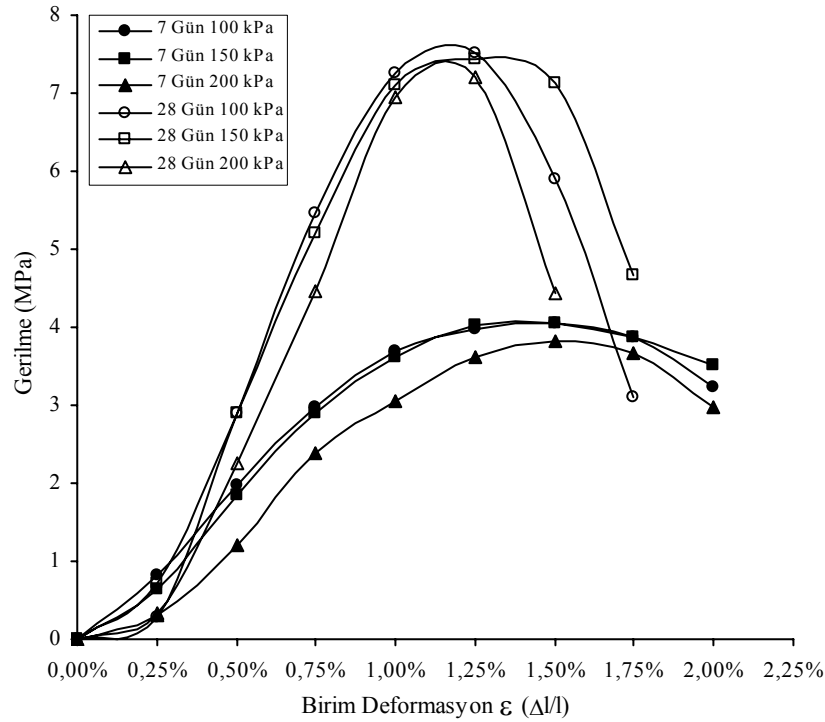
basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren malzeme %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.37: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.38) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,75 birim deformasyonda kırılmıştır.

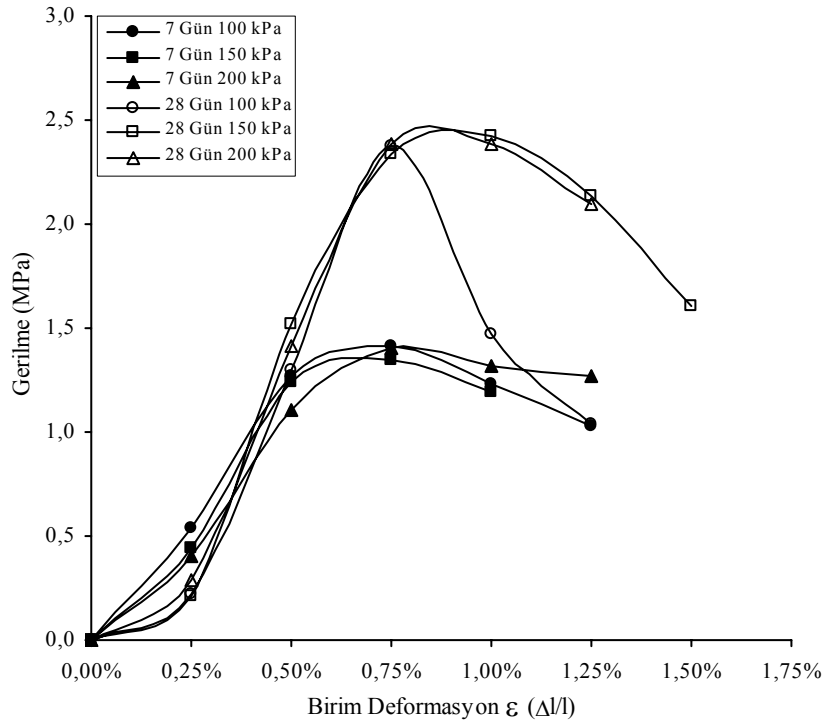
%1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.38: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.39) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve bu noktada numune kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25

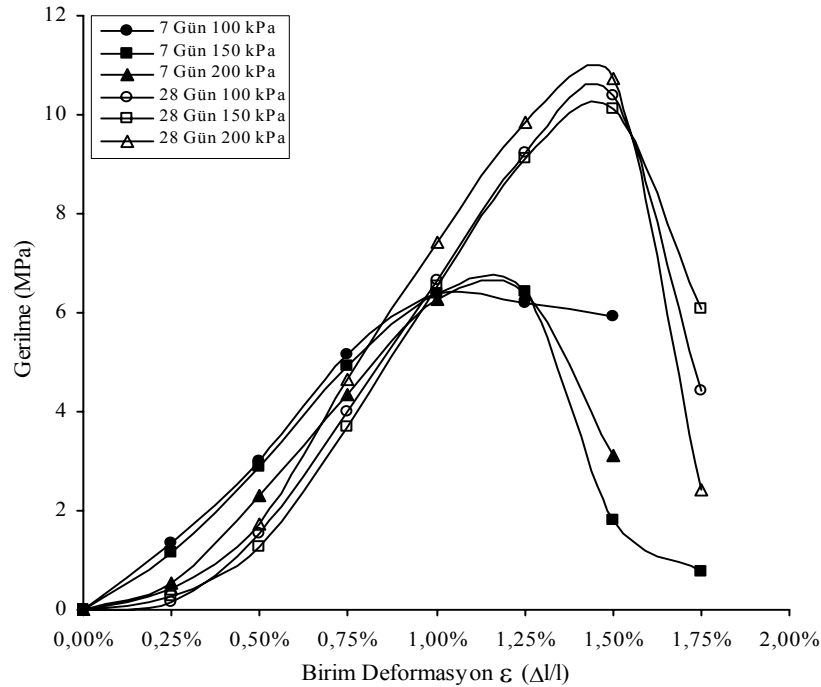
birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan sonra sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan sonra sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan sonra sünek davranış göstermiş ve %0,75 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.39: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %75 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.40) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune bu noktada kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş

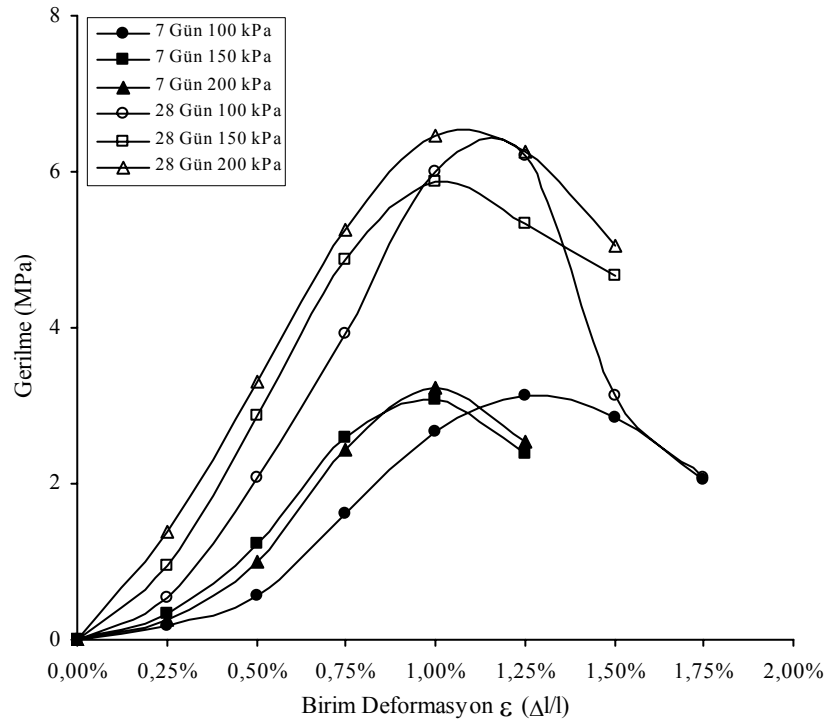
numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %1,50 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir ve bu noktada numune kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda numune kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme gözlenmiştir. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren malzeme %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.40: s/ç oranı 0,7 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme

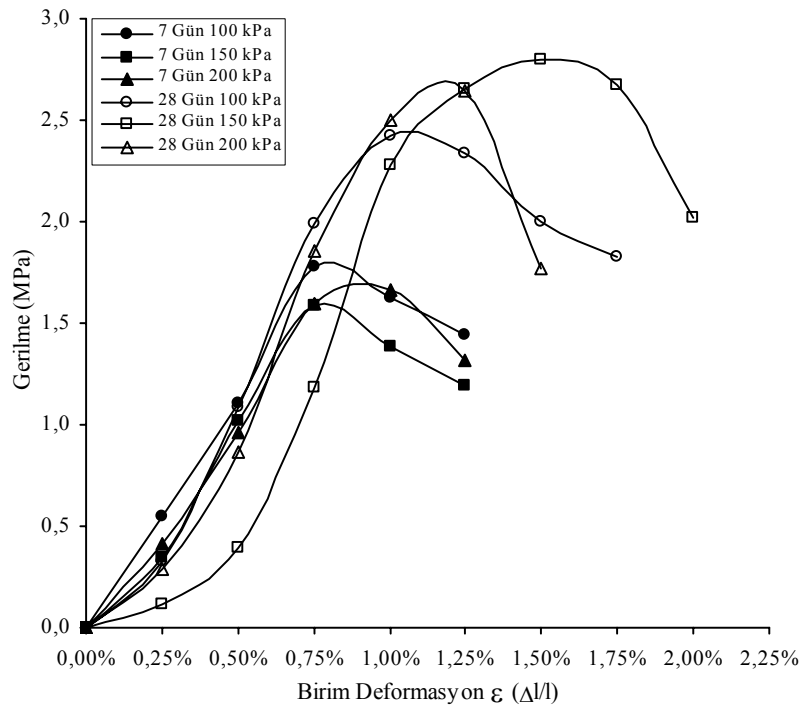
grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.41) 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranış gösteren numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune sünek davranış göstermiş ve %1,25 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.41: s/ç oranı 1,0 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin 28 günlük kür süresi sonunda her üç enjeksiyon basıncı için gerilme-şekil değiştirme grafikleri birbirine paralel olarak elde edilmiştir.(Şekil 5.42) 100 kPa basınç ile

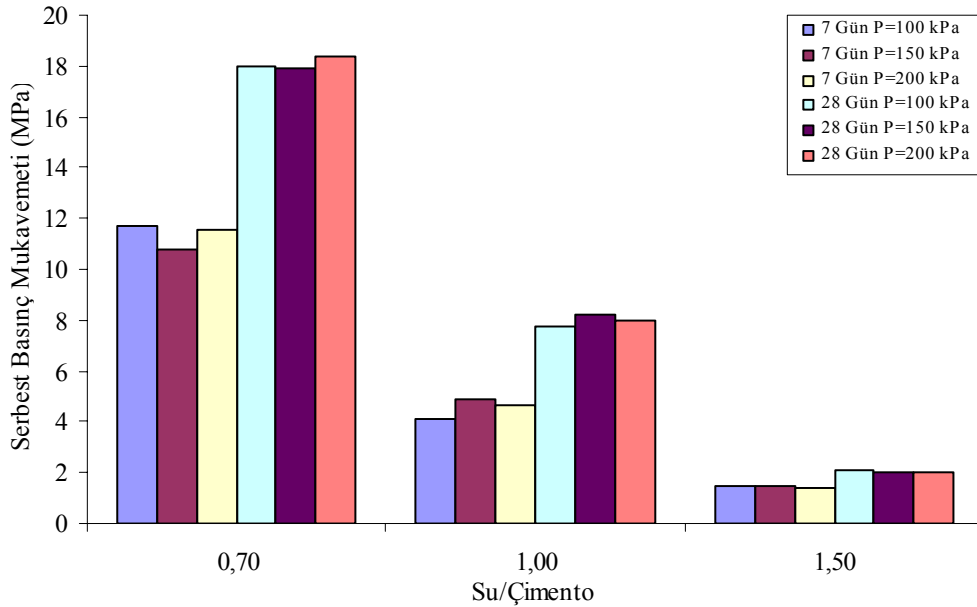
enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune bu noktadan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,50 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,00 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Numune bu noktadan itibaren sünek davranış göstermiş ve %1,50 birim deformasyonda kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunede %0,25 birim deformasyona kadar başlığında ezilme olmuştur. Bu noktadan itibaren numune %1,25 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir ve bu noktada numune kırılmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve numune bu noktada kırılmıştır. 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiş ve numune bu noktada kırılmıştır. 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numune %0,75 birim deformasyona kadar gevrek davranış göstermiştir. Bu noktadan itibaren sünek davranan numune %1,00 birim deformasyonda kırılmıştır.



Şekil 5.42: s/ç oranı 1,5 olan karışım ile enjeksiyon uygulanmış %100 relatif sıklıktaki numunenin gerilme-deformasyon eğrisi

Enjeksiyon sırasında uygulanan basınçlar ile serbest basınç mukavemetlerinin değişimini gösteren grafikler şekil 5.43–5.46’de verilmiştir. Bu grafiklerde de görüldüğü gibi enjeksiyon basıncı artmasına rağmen serbest basınç mukavemetleri değişmemektedir. Enjeksiyon için yeterli basınçtan daha yüksek basınç ile uygulama yapıldığında serbest basınç mukavemetlerinde değişiklik olmamaktadır.

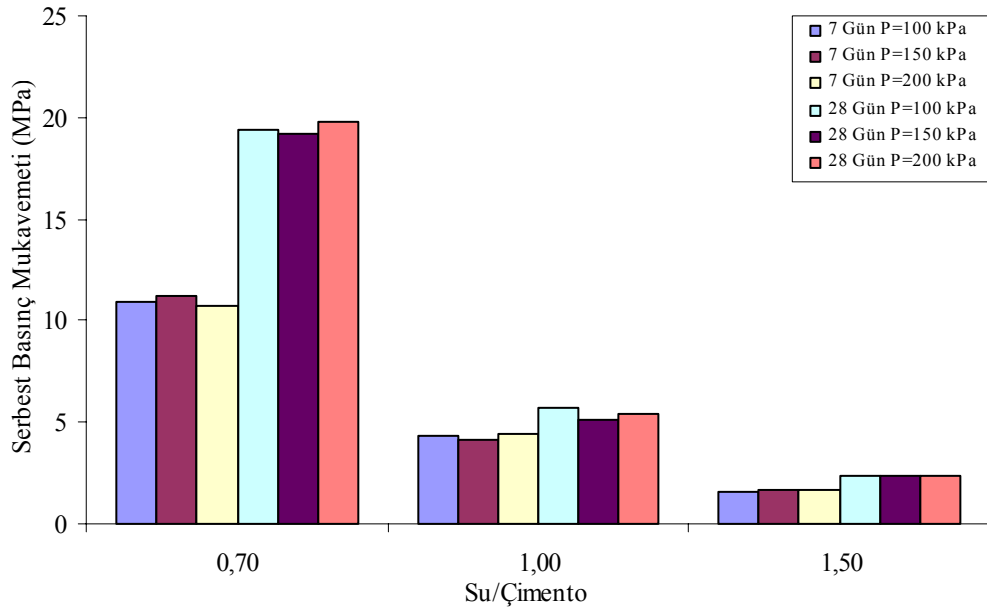
%25 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı farklı harçlar ile değişik basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik, şekil 5.43’de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 18,02 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 17,88 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 18,40 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 7,79 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 8,25 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 7,97 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,10 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,04 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,03 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.43: %25 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 11,69 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 10,80 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 11,52 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 4,14 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 4,85 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 4,64 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 1,44 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,45 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,43 MPa olarak bulunmuştur.

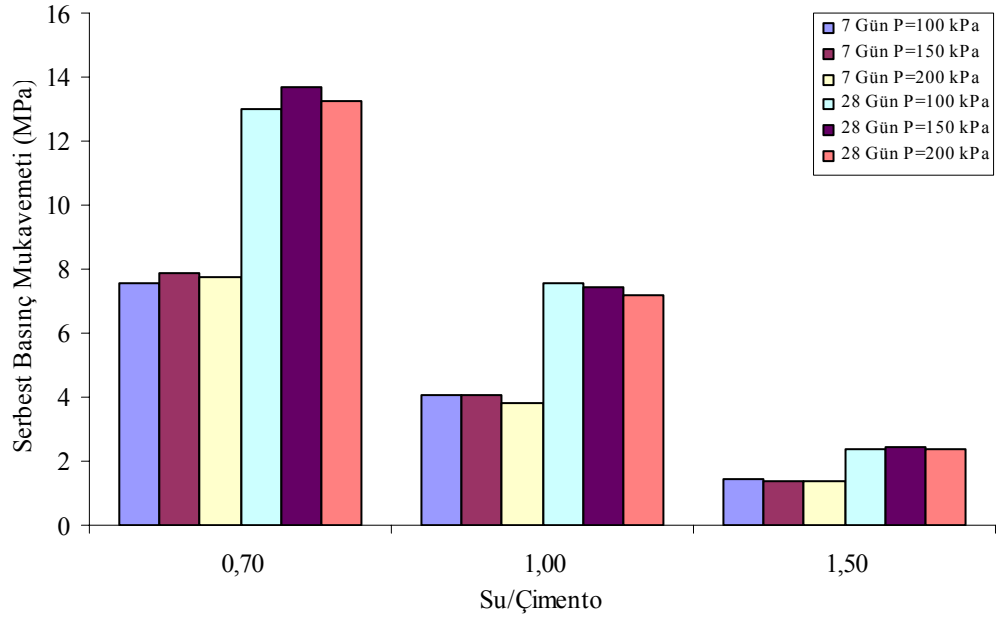
%50 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı farklı harçlar ile değişik basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik, şekil 5.44'de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 19,44 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 19,20 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 19,83 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 5,68 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 5,12 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 5,38 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,36 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,36 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,35 MPa olarak bulunmuştur. 7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 10,97 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 11,22 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 10,69 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 4,30 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 4,17 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 4,47 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 1,57 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,72 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,68 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.44: %50 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

%75 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı farklı harçlar ile değişik basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik, şekil 5.45’de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 13,03 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 13,67 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 13,26 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 7,53 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 7,45 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 7,20 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,37 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,41 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,39 MPa olarak bulunmuştur. 7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 7,59 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 7,85 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 7,77 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 4,05 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 4,05 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 3,81 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa

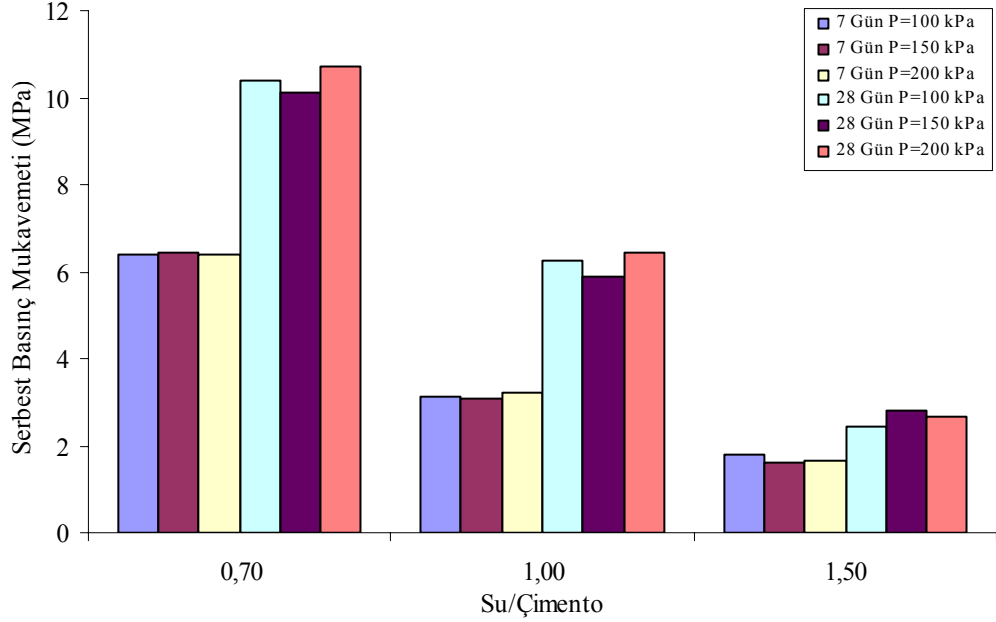
enjeksiyon basıncı için 1,42 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,35 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,41 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.45: %75 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

%100 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye s/ç oranı farklı harçlar ile değişik basınçlar altında yapılan enjeksiyon sonucunda, enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik, şekil 5.46'de verilmiştir. 28 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 10,38 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 10,12 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 10,73 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 6,24 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 5,88 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 6,46 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 2,43 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 2,80 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 2,64 MPa olarak bulunmuştur. 7 gün kür süresi sonunda s/ç oranı 0,7 olan harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti 100 kPa enjeksiyon basıncı için 6,39 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 6,44 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 6,38 MPa olarak bulunmuştur. 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 3,13 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 3,08 MPa

ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 3,23 MPa olarak bulunmuştur. 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti, 100 kPa enjeksiyon basıncı için 1,77 MPa, 150 kPa enjeksiyon basıncı için 1,59 MPa ve 200 kPa enjeksiyon basıncı için 1,66 MPa olarak bulunmuştur.

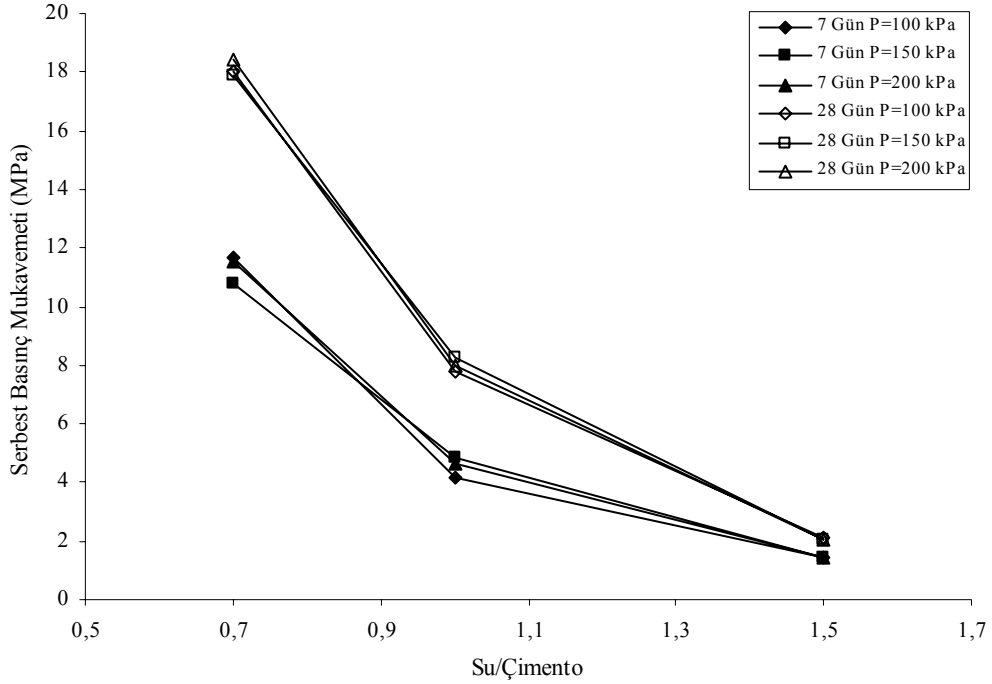


Şekil 5.46: %100 relatif sıklıktaki enjeksiyon uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin enjeksiyon basıncı ile değişimi

Su/çimento oranı ile serbest basınç mukavemetleri arasında çizilen grafikler Şekil 5.47–5.50’de verilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı gibi s/ç oranı arttıkça numune daha sünek hale gelmekte ve serbest basınç mukavemeti beklenildiği gibi azalmaktadır.

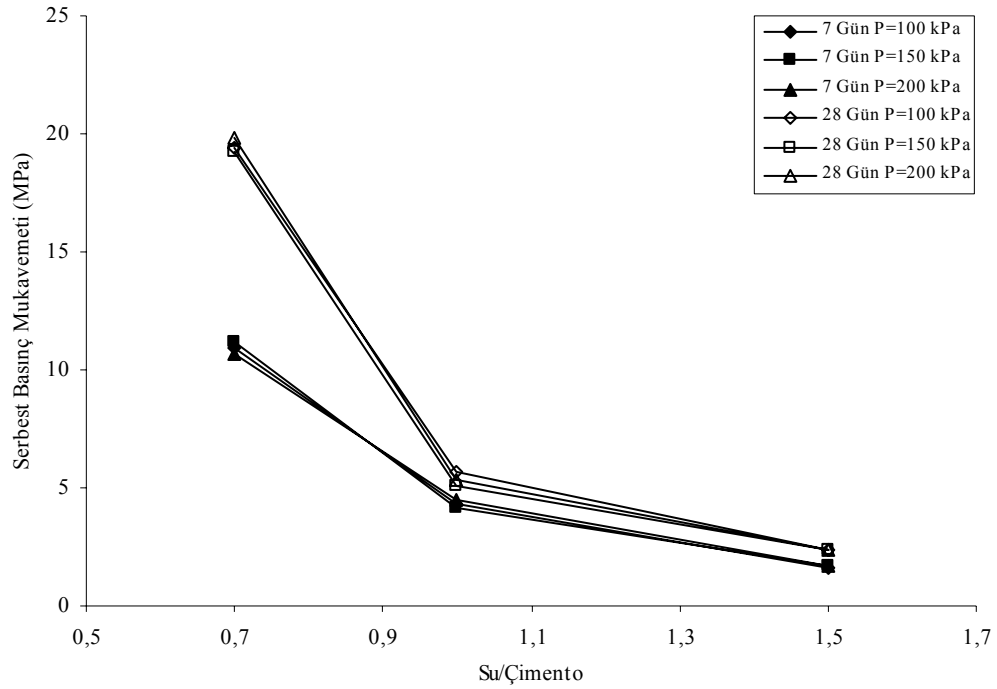
%25 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.47’de verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 18,15 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 8,00 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,05 MPa değerine düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için

ortalama 11,25 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 4,50 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,45 MPa değerine düşmüştür.



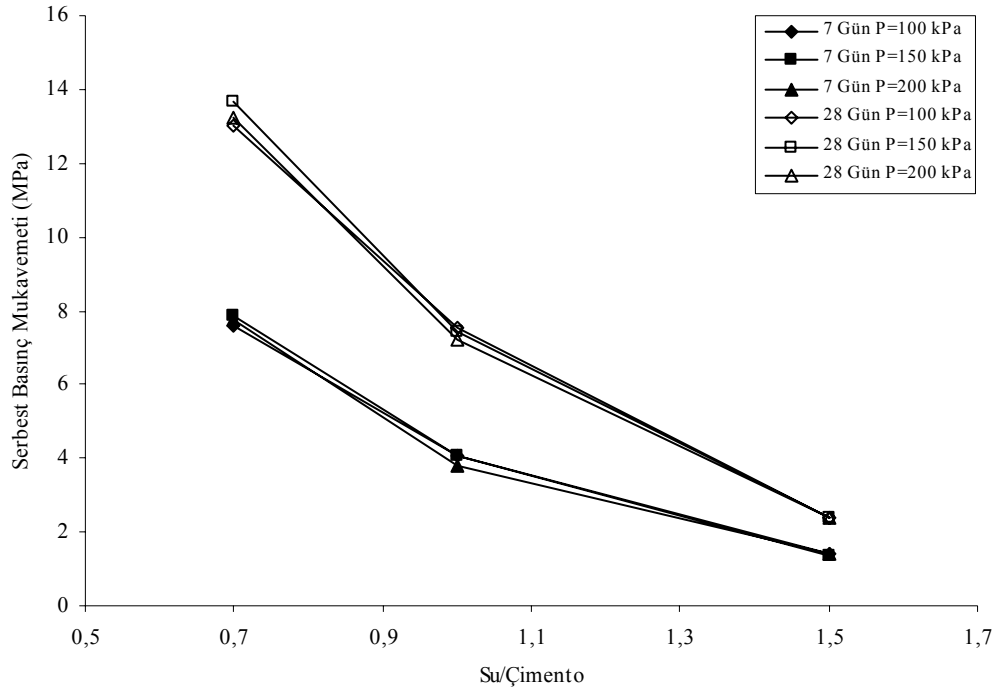
Şekil 5.47: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %25 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

%50 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.48’de verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 19,50 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 5,40 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,35 MPa değerine düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 11,00 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 4,30 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,65 MPa değerine düşmüştür.



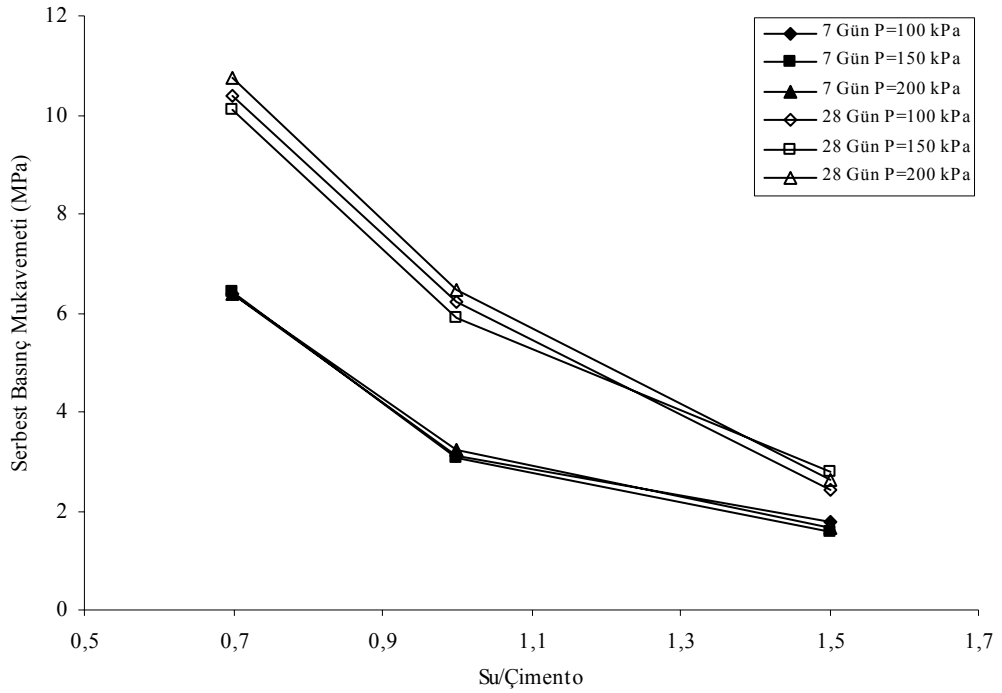
Şekil 5.48: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %50 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

%75 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.49’da verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 13,30 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 7,40 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,40 MPa değerine düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 7,75 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 4,00 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,40 MPa değerine düşmüştür.



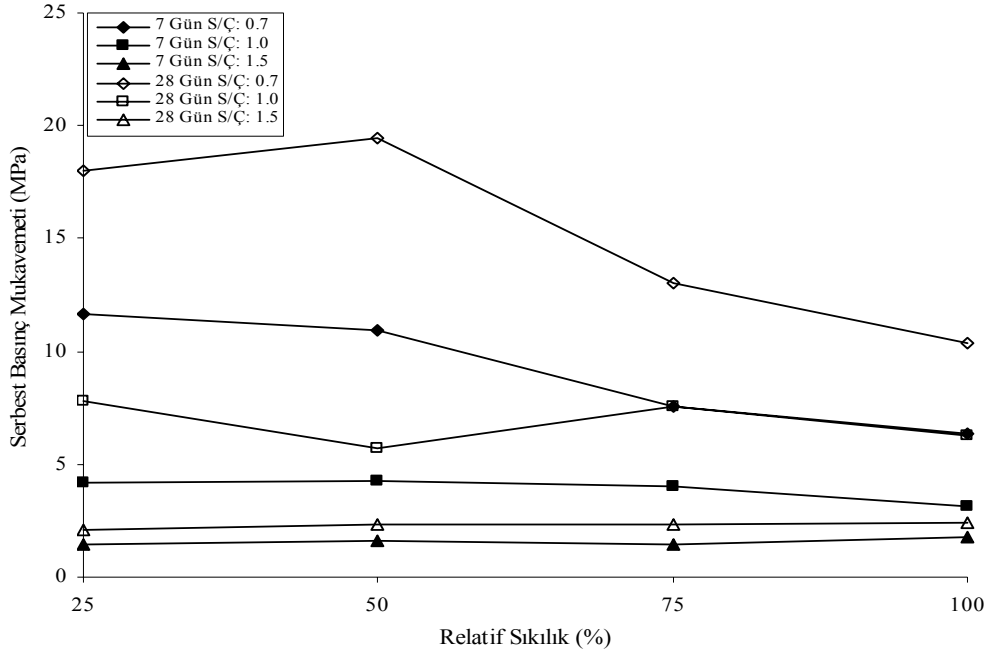
Şekil 5.49: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %75 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

%100 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneye farklı s/ç oranındaki harçlar ile yapılan enjeksiyon sonucunda, s/ç oranı ile serbest basınç mukavemeti arasında elde edilen grafik şekil 5.50’de verilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 10,50 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 6,10 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 2,75 MPa değerine düşmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda 0,7 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 6,40 MPa iken 1,0 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 3,15 MPa değerine ve 1,5 s/ç oranındaki harç ile enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti her üç enjeksiyon basıncı için ortalama 1,65 MPa değerine düşmüştür.



Şekil 5.50: Değişik su/çimento oranındaki karışımlarla enjeksiyon uygulanmış relatif sıklığı %100 olan numunelerin serbest basınç mukavemetleri (MPa)

SP sınıfı numunelerle yapılan enjeksiyon uygulamasında s/ç oranı 0,7 olan harçlar için 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %50 olan gruptan elde edilmiştir. Buna karşılık aynı s/ç oranı için relatif sıklığı %100 olan gruptan en düşük serbest basınç mukavemeti elde edilmiştir. Su/çimento oranı 1,0 olan harçlar için 28 günlük en yüksek serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %25 olan gruptan elde edilmiş olmasına rağmen en düşük serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %50 olan gruptan elde edilmiştir. Su/çimento oranı 1,5 olan harçlar için 28 günlük serbest basınç mukavemetleri tüm relatif sıklık gruplarında yakın çıkmıştır. Su/çimento oranı 0,7 olan harçlar için 7 günlük serbest basınç mukavemeti relatif sıklığı %25 ve %50 gruplarında yakın değerler bulunmuştur. %75 ve %100 relatif sıklıktaki gruplarda da aynı s/ç oranında yakın değerler bulunmuş fakat %25 ve %50 relatif sıklıktaki gruplardan daha düşük serbest basınç mukavemetleri gözlenmiştir. Su/çimento oranı 1,0 olan harçlar için 7 günlük serbest basınç mukavemeti %25, %50 ve %75 relatif sıklıktaki gruplarda yakın bulunmuş fakat %100 relatif sıklıktaki grubun serbest basınç mukavemeti daha düşük olduğu gözlenmiştir. Su/çimento oranı 1,5 olan harçla yapılan enjeksiyon sonucunda 7 günlük serbest basınç mukavemeti tüm relatif sıklıktaki numunelerde birbirine yakın çıkmıştır.



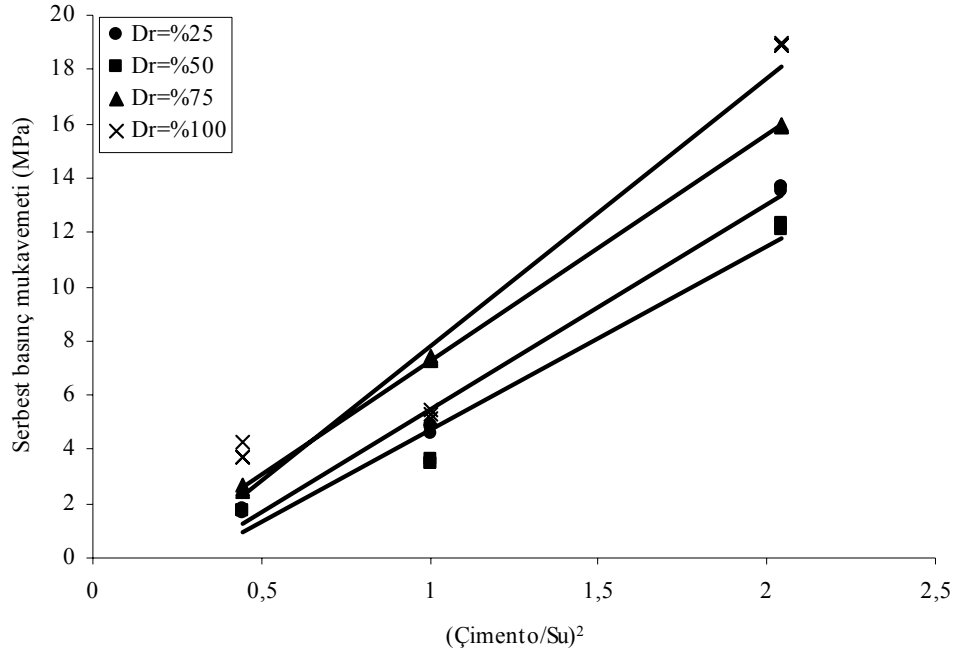
Şekil 5.51: 100 kPa basınç ile enjeksiyon yapılmış değişik relatif sıklılıklardaki numunelerin serbest basınç mukavemetleri

5.4.3. Laboratuvar sonuçlarının değerlendirilmesi

s/ç oranı 0,7'den daha düşük olan harçlar ile başarılı enjeksiyon yapılamamıştır. s/ç oranı 1,5'tan daha büyük olan harçlarda çökeltme miktarı artmakta ve buna bağlı olarak numunelerin serbest basınç mukavemeti de düşmektedir. s/ç oranı 0,7 ve 1 olan harçlar ile yapılan enjeksiyonlarda az sayıda başarısız numune elde edilmiştir.

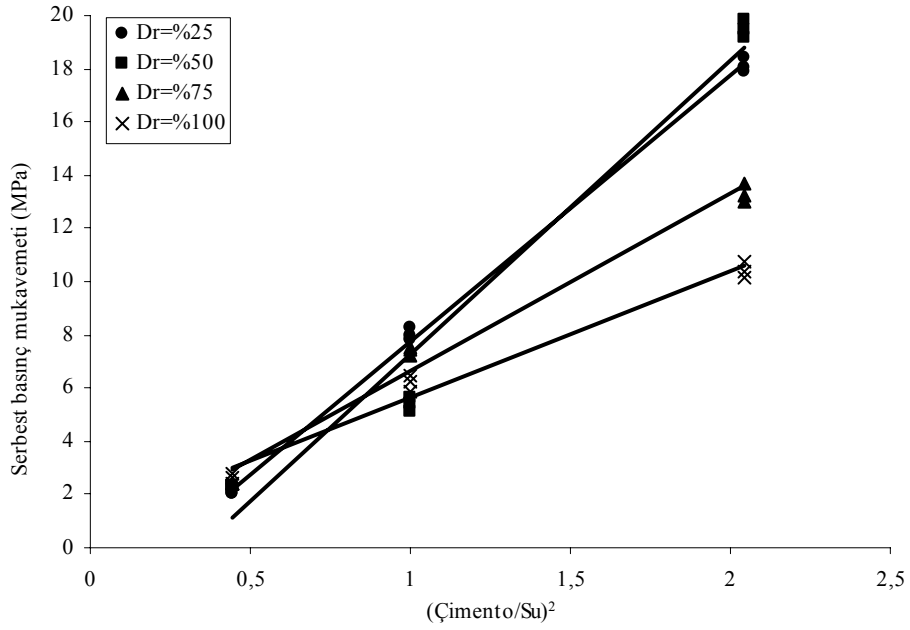
Laboratuvar enjeksiyon uygulamasında serbest basınç mukavemeti, tüm numunelerde, harcın s/ç oranına bağlı olarak değişmektedir. Serbest basınç mukavemeti, harcın çimento/su oranının karesiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Enjeksiyon sonrasında zeminin serbest basınç mukavemetinin tahmini zeminin homojen olmayan yapısı nedeniyle güçtür. Serbest basınç mukavemetinin tahmini için daha fazla numune üzerinde, s/ç aralığı daha düşük tutulan harçlar ile enjeksiyon uygulamaları yapılması gerekmektedir.

GP sınıfı numune için hesaplanan çimento/su (ç/s) oranının karesi ile serbest basınç mukavemetleri arasındaki korelasyon katsayısı (R^2), en düşük %100 relatif sıklıkta 0,93, en yüksek %75 relatif sıklıkta 0,99 olarak hesaplanmıştır. (Şekil 5.52)



Şekil 5.52: GP malzemesi (ç/s)²-serbest basınç mukavemeti arasındaki regresyon analizi

SP sınıfı numune için hesaplanan çimento/su (ç/s) oranının karesi ile serbest basınç mukavemetleri arasındaki korelasyon katsayısı (R^2), en düşük %50 relatif sıklıkta 0,97, en yüksek %25 relatif sıklıkta ise 1,00 olarak hesaplanmıştır. (Şekil 5.53)



Şekil 5.53: SP malzemesi (ç/s)²-serbest basınç mukavemeti arasındaki regresyon analizi

Enjeksiyon uygulanmış numunelerin içyapısı incelenerek boşlukların harç ile nasıl dolduğu araştırılmıştır. Yapılan incelemede tüm enjeksiyon basınçlarında numunenin içyapısında bir farklılık olmadığı görölmüşür. Boşlukların her üç enjeksiyon basınçlarında aynı şekilde harç ile dolduğu görölmüşür.

6. ARAZİ ÇALIŞMASI

Arazi çalışmasında, laboratuvar çalışmasından elde edilen, zemin iyileştirmesi için yeterli olan, enjeksiyon parametreleri kullanılarak seçilen üç arazide düşük basınçlı çimento enjeksiyonu yapılmış ve uygulanan enjeksiyon sonucunda zemin özelliklerinin değişimleri incelenmiştir.

Çimento enjeksiyonuna uygun üç farklı sahada düşük basınçlı çimento enjeksiyonu uygulanmıştır. Enjeksiyon uygulamasından önce sahada zemin incelemeleri yapılarak zemin özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvar çalışmasından elde edilen iyileştirme için yeterli olan s/ç oranı ve enjeksiyon basıncı kullanılarak enjeksiyon uygulaması yapılmıştır. Ayrıca s/ç oranı 1,0 olarak seçilmiştir. Enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra sahalarda zemin incelemeleri yapılarak enjeksiyon sonrası zemin özellikleri belirlenmiştir. Enjeksiyon öncesi ve sonrası zemindeki değişimler incelenmiştir.

Ayrıca zemin incelemeleri ile elde edilen zemin parametreleri kullanılarak sahalarda bilgisayarla üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sahaların modellenmesinde zemin deformasyonu, zemin gerilmeleri ve son limit gerilmeleri incelenmiştir.

6.1. Enjeksiyon Sahalarının Geoteknik Özellikleri

Arazide düşük basınçlı çimento enjeksiyonu uygulaması Yalova İli Merkezi'nde seçilen üç sahada yapılmıştır. Enjeksiyon öncesinde sahalarda zemin incelemeleri yapılmıştır. Yapılan zemin incelemeleri ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

6.1.1. Enjeksiyon sahası 1'in (ES-1) geoteknik özellikleri

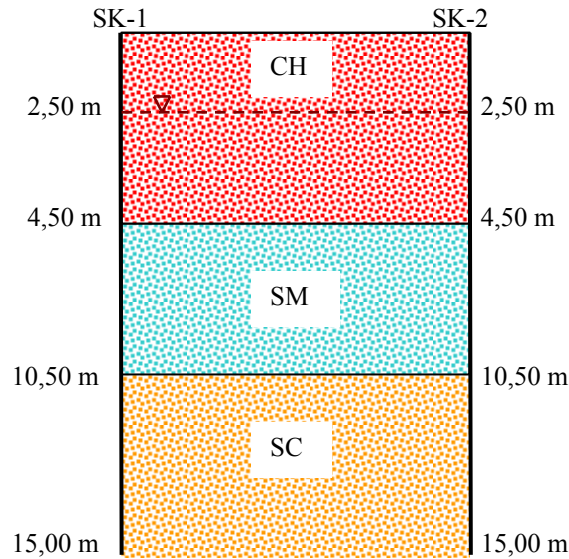
ES-1 sahasında enjeksiyon uygulaması öncesinde standart penetrasyon deneyi, koni penetrasyon deneyi ve sismik kırılma deneyi yapılarak geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Standart penetrasyon deneyi sırasında zeminden alınan numuneler üzerinde laboratuvarda sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri sonucunda zemin TS 1500/2000 standardına uygun olarak sınıflandırılmıştır.

Standart penetrasyon deneyi (SPT) 1,50 m aralıklarla 15 m derinliğe kadar yapılmıştır. Her 1,50 m derinlikte SPT deneyi yapılırken SPT kaşığına dolan zemin numuneleriyle laboratuvarda zemin sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. SPT deneyleri sonucu tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1: ES-1 sahasında enjeksiyon öncesi SPT sonuçları

SK-1	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	11	10	21	27	24	22	13	15	17	16
SK-2	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	10	12	21	23	24	23	11	15	16	15

Zeminden alınan numuneler üzerinde laboratuvarda yıkamalı elek analizi, atterberg limitleri ve doğal su muhtevası deneyleri yapılmıştır. Deneyler TS1900 standardına uygun olarak yapılmıştır. Laboratuvar deney sonuçları tablo 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1: ES-1 sahası zemin kesiti

ES-1 sahasında yeraltı su seviyesi yüzeyden 2,50 m derinliktedir. ES-1 sahasında yüzeyden 4,5 m derinliğe kadar plastisite indisi %40 olan yüksek plastisiteli kil (CH), 4,5 m ile ortalama 10,5 m arasında plastik olmayan siltli kum (SM) ve ortalama 10,5 m derinlikten itibaren plastisite indisi %22 olan killi kum (SC) tabakaları bulunmaktadır. (Şekil 6.1)

Tablo 6.2: ES-1 sahasında enjeksiyon öncesi laboratuvar deneyleri

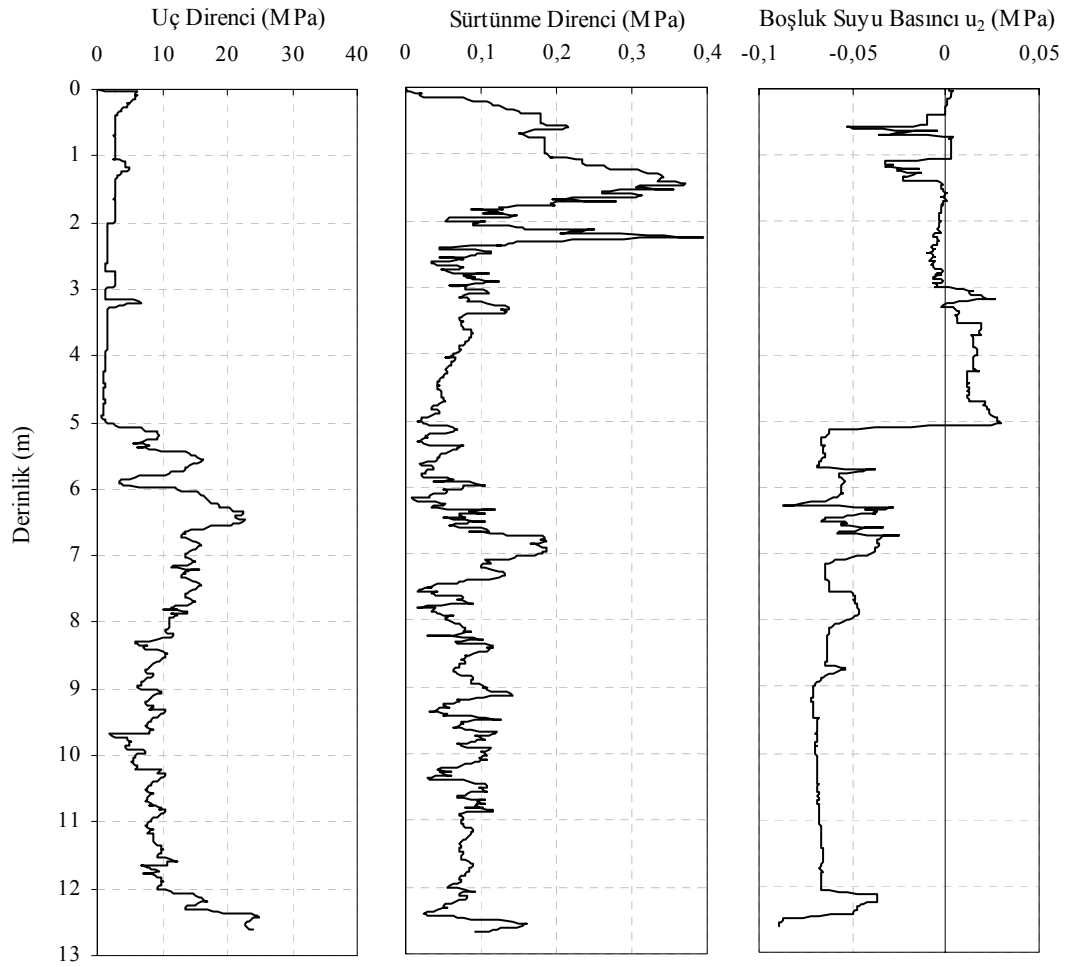
Sondaj No	Derinlik (m)	Su Muhtevası %	No 4 Kalan %	No 200 Geçen %	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi	Zemin Sınıfı (TS1500)
SK-1	1,50	33,0	0,0	95,0	64	24	40	CH
	3,00	32,0	0,0	93,0	65	23	42	CH
	4,50	20,6	2,1	21,0		NP		SM
	6,00	19,4	1,0	14,0		NP		SM
	7,50	22,9	1,4	18,0		NP		SM
	9,00	21,5	1,2	17,0		NP		SM
	10,50	21,3	0,0	49,0	35	13	22	SC
	12,00	20,9	1,0	43,0	34	13	21	SC
	13,50	24,1	1,3	43,0	34	13	21	SC
	15,00	23,3	1,1	44,0	35	13	22	SC
SK-2	1,50	30,3	0,0	92,0	63	21	42	CH
	3,00	33,0	0,0	94,0	64	22	42	CH
	4,50	18,9	2,3	29,0		NP		SM
	6,00	10,9	3,4	26,0		NP		SM
	7,50	22,1	4,0	17,0		NP		SM
	9,00	21,2	3,0	21,0		NP		SM
	10,50	22,7	0,0	47,0		NP		SM
	12,00	20,3	3,5	46,0	34	14	20	SC
	13,50	21,3	2,9	43,0	35	14	21	SC
	15,00	22,7	3,1	45,0	34	15	19	SC

Sahada sismik kırılma çalışması yapılmıştır. Sismik kırılma çalışmasında 12 kanallı sismograf cihazı kullanılmıştır. İki serim boyunca karşılıklı atışlar yapılarak 3 m aralıkla zemine yerleştirilen jeofonlardan hem yatay hem de düşey kayıtlar alınmıştır. Zeminin boyuna dalga hızı (P dalgası V_p) ve enine dalga hızı (S dalgası V_s) değerleri tespit edilmiştir. Bu yöntemle toplam 36 m uzunluğunda serim yapılmış ve 9 m kalınlığında zemin profili çıkarılmıştır. Sismik kırılma deneyi sonucunda belirlenen iki tabakanın sonuçları tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3: ES-1 sahasında enjeksiyon öncesi sismik kırılma ölçümleri

Tabaka	Kalınlık (m)	V_p (m/s ²)	V_s (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı
1	4,20	272	108	Z3
2	4,80	721	189	Z3

Ayrıca koni penetrasyon deneyi (CPT) yapılarak, uç direnci (q_c), sürtünme direnci (f_s) ve boşluk suyu basıncı (u_2) değerleri ölçülmüştür. CPT deneyinde alanı 10 cm^2 ve çevre alanı 150 cm^2 olan koni kullanılmıştır. 2 cm/sn hız ile deney yapılmıştır. CPT deneyleri Sakarya Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı tarafından yapılmıştır. Uç direnci ilk 5 m derinliğinde ortalama 3 MPa , 5 m derinlikten itibaren ortalama 10 MPa olarak bulunmuştur. Çevre sürtünmesi ise ilk 3 m derinlikte ortalama $0,20 \text{ MPa}$, 3 m derinlikten itibaren ortalama $0,09 \text{ MPa}$ olarak bulunmuştur.(Şekil 6.2)



Şekil 6.2: ES-1 enjeksiyon öncesi CPT deneyi sonuçları

6.1.2. Enjeksiyon sahası 2'nin (ES-2) geoteknik özellikleri

ES-2 sahasında enjeksiyon uygulaması öncesinde standart penetrasyon deneyi, koni penetrasyon deneyi ve sismik kırılma deneyi yapılmıştır. Standart penetrasyon

deneyi sırasında zeminden alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmış ve zemin TS 1500/2000 standardına uygun olarak sınıflandırılmıştır.

Standart penetrasyon deneyi 1,50 m aralıklarla 15 m derinliğe kadar yapılmıştır. Kaşığa dolan zemin numuneleriyle laboratuvar da zemin sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. SPT deney sonucu tablo 6.4’de verilmiştir.

Tablo 6.4: ES-2 sahasında enjeksiyon öncesi SPT sonuçları

SK-1	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	10	12	22	21	24	20	18	18	17	19
SK-2	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	12	13	21	22	21	21	18	17	17	18

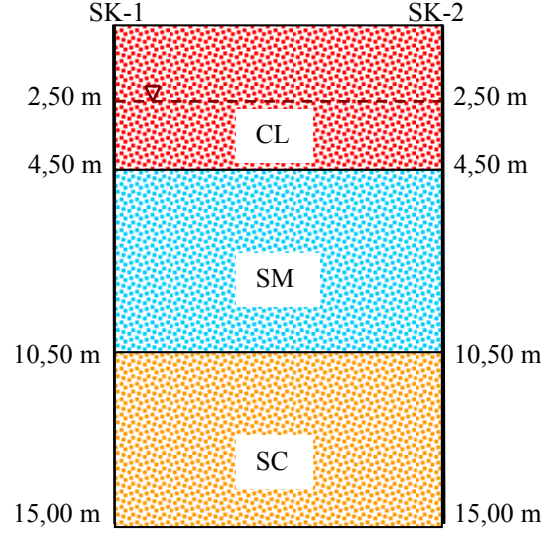
Zeminden alınan numuneler üzerinde laboratuvar da yıkamalı elek analizi, atterberg limitleri ve doğal su muhtevası deneyleri TS1900 standardına uygun olarak yapılmıştır. Laboratuvar deney sonuçları Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 6.5: ES-2 sahasında enjeksiyon öncesi laboratuvar deneyleri

Sondaj No	Derinlik m	Su Muhtevası %	No 4 Kalan %	No 200 Geçen %	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi	Zemin Sınıfı (TS1500)
SK-1	1,50	26,0	0,0	91,0	41	17	24	CL
	3,00	25,0	0,0	52,0	37	15	22	CL
	4,50	14,6	1,7	27,0		NP.		SM
	6,00	14,0	1,1	29,0		NP.		SM
	7,50	14,3	2,0	25,0		NP.		SM
	9,00	14,1	2,3	26,0		NP.		SM
	10,50	21,3	1,2	43,0	33	12	21	SC
	12,00	20,7	0,9	41,0	37	14	23	SC
	13,50	23,1	1,1	42,0	35	11	24	SC
	15,00	22,3	1,3	45,0	34	12	22	SC
SK-2	1,50	20,0	1,0	64,0	39	15	24	CL
	3,00	21,0	1,5	65,0	40	18	22	CL
	4,50	17,8	1,2	24,0		NP.		SM
	6,00	18,0	1,5	23,0		NP.		SM
	7,50	14,9	1,0	33,0		NP.		SM
	9,00	15,0	1,2	30,0		NP.		SM
	10,50	22,4	2,3	42,0	38	12	26	SC
	12,00	21,3	2,5	44,0	36	13	23	SC
	13,50	22,7	2,8	39,0	33	12	21	SC
	15,00	21,5	3,2	42,0	32	13	19	SC

ES-2 sahasında yeraltı su seviyesi yüzeyden 2,50 m derinliktedir. Yüzeyden 4,5 m derinliğe kadar plastisite indisi % 23 olan düşük plastisiteli kil (CL), 4,5 m ile 10,5 m

arasında plastik olmayan siltli kum (SM) ve 10,5 m derinlikten itibaren plastisite indisi % 20 olan killi kum (SC) tabakaları bulunmaktadır. (Şekil 6.3)



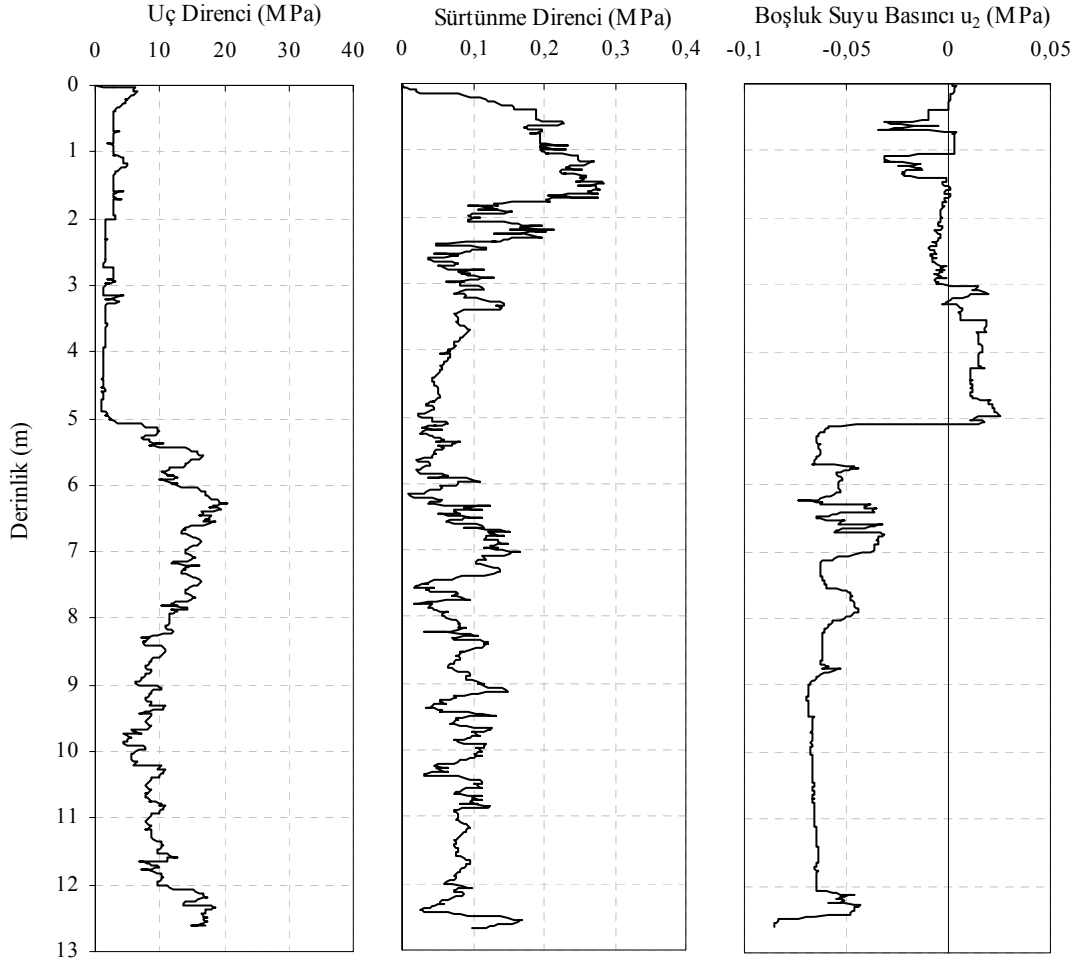
Şekil 6.3: ES-2 sahası zemin kesiti

Sahada sismik kırılma çalışması yapılmıştır. Sismik kırılma çalışmasında 12 kanallı sismograf cihazı kullanılmış ve jeofonlar 3 m aralıkla zemine yerleştirilmiştir. İki serim boyunca karşılıklı atışlar yapılarak hem yatay hem de düşey jeofon kayıtları alınmıştır. Bu yöntemle toplam 36 m uzunluğunda serim yapılmış ve 9 m kalınlığında zemin profili çıkarılmıştır. Sismik kırılma deneyi sonucunda belirlenen boyuna dalga hızı (P dalgası V_p) ve enine dalga hızı (S dalgası V_s) değerleri tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6: ES-2 sahasında enjeksiyon öncesi sismik kırılma ölçümleri

Tabaka	Kalınlık (m)	V_p (m/s ²)	V_s (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı
1	4,3	218	108	Z3
2	4,7	756	193	Z3

Koni penetrasyon deneyinde (CPT) uç direnci (q_c), sürtünme direnci (f_s) ve boşluk suyu basıncı (u_2) değerleri ölçülmüştür. CPT deneyi 12 m derinliğe kadar yapılmıştır. Uç direnci ilk 5 m derinlikte ortalama 3 MPa, 5 m derinlikten sonra ortalama 10 MPa bulunmuştur. Çevre sürtünmesi ise ilk 2 m derinlikte ortalama 0,20 MPa, 2 m derinlikten sonra ortalama 0,10 MPa olarak bulunmuştur.(Şekil 6.4)



Şekil 6.4: ES-2 enjeksiyon öncesi CPT deneyi sonuçları

6.1.3. Enjeksiyon sahası 3'ün (ES-3) geoteknik özellikleri

ES-3 sahasında enjeksiyon uygulaması öncesinde standart penetrasyon deneyi ve sismik kırılma deneyi yapılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Standart penetrasyon deneyi sırasında zeminden alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri sonucunda zemin TS 1500/2000 standardına uygun olarak sınıflandırılmıştır.

Standart penetrasyon deneyi 1,50 m aralıklarla 15 m derinliğe kadar yapılmıştır. Kaşığa dolan zemin numuneleriyle laboratuvarda zemin sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. SPT deneyleri sonucu tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7: ES-3 sahasında enjeksiyon öncesi SPT sonuçları

SK-1	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	6	7	9	11	15	19	20	22	25	22
SK-2	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	7	8	8	9	15	15	19	18	22	24

Zeminden alınan numuneler üzerinde laboratuvarda yıkamalı elek analizi, atterberg limitleri ve doğal su muhtevası deneyleri yapılmıştır. Deneyler TS1900 yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. Laboratuvar deney sonuçları tablo 6.8'de verilmiştir.

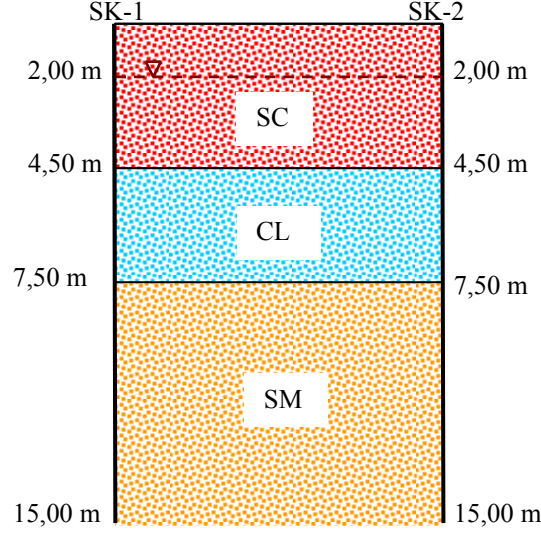
Tablo 6.8: ES-3 sahasında enjeksiyon öncesi laboratuvar deneyleri

Sondaj No	Derinlik m	Su Muhtevası %	No 4 Kalan %	No 200 Geçen %	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi	Zemin Sınıfı (TS1500)
SK-1	1,50	35,0	0,0	38,0	34	15	19	SC
	3,00	37,0	0,0	34,0	36	16	20	SC
	4,50	26,0	0,0	91,0	41	16	25	CL
	6,00	29,0	0,0	92,0	43	17	26	CL
	7,50	21,0	0,6	30,0		NP.		SM
	9,00	18,0	0,0	27,0		NP.		SM
	10,50	18,0	0,8	25,0		NP.		SM
	12,00	19,0	1,0	26,0		NP.		SM
	13,50	17,0	0,0	18,0		NP.		SM
	15,00	18,0	1,1	25,0		NP.		SM
SK-2	1,50	35,0	0,3	37,0	35	15	20	SC
	3,00	34,0	0,2	36,0	34	16	18	SC
	4,50	29,0	0,0	91,0	39	15	24	CL
	6,00	28,0	0,0	89,0	38	16	22	CL
	7,50	28,0	0,3	26,0		NP.		SM
	9,00	22,0	1,0	29,0		NP.		SM
	10,50	24,0	1,3	27,0		NP.		SM
	11,50	18,0	0,7	29,0		NP.		SM
	13,50	17,0	0,9	30,0		NP.		SM
	15,00	18,0	0,8	30,0		NP.		SM

ES-3 sahasında yeraltı su seviyesi yüzeyden 2,0 m derinliktedir. Yüzeyden 4,5 m derinlikte plastisite indisi %20 olan killi kum (SC), 4,5 m ile 7,5 m arasında plastisite indisi %24 olan düşük plastisiteli kil (CL) ve 7,5 m derinlikten itibaren plastik olmayan siltli kum (SM) tabakaları bulunmaktadır. (Şekil 6.5)

Sahada yapılan sismik kırılma çalışmasında 12 kanallı sismograf cihazı kullanılmıştır. Jeofonlar 3 m aralıkla zemine yerleştirilmiştir. İki serim boyunca karşılıklı atışlar yapılarak hem yatay hem de düşey jeofon kayıtları alınmıştır. Bu

yöntemle toplam 36 m uzunluğunda serim yapılmış ve 9 m kalınlığında zemin profili çıkarılmıştır. Sismik kırılma deneyi sonucunda belirlenen iki tabakanın sonuçları tablo 6.9’de verilmiştir.



Şekil 6.5: ES-3 sahası zemin kesiti

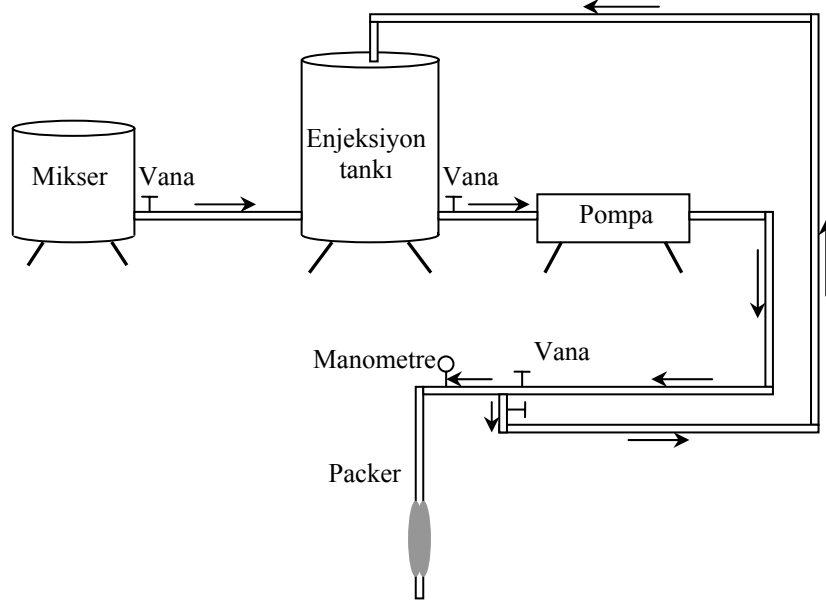
Tablo 6.9: ES-3 sahasında enjeksiyon öncesi sismik kırılma ölçümleri

Tabaka	Kalınlık (m)	Vp (m/s ²)	Vs (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı
1	4,3	645	155	Z3
2	2,7	252	110	Z3
3	2,0	737	168	Z3

6.2. Sahada Enjeksiyon Uygulaması

Sahada enjeksiyon uygulamasında sirkülasyonlu enjeksiyon düzeneği kullanılmıştır.(Şekil 6.6) Düzenek mikser, enjeksiyon tankı, pompa ve açık uçlu enjeksiyon borusundan oluşmaktadır. Mikser 200 litre hacindedir. Mikserin alt kısmında bulunan santrifüj pompa ile oluşturulan türbülans etkisiyle su ve çimento karıştırılmaktadır. Enjeksiyon harcı 300 litre hacminde olan enjeksiyon tankına bağlantı borusu yardımıyla aktarılmaktadır. Tankta bulunan harç pompa yardımıyla zemine enjeksiyon edilmiştir. Tankta çimentonun çökmemesi için pervane ile harç sürekli karıştırılmaktadır. Enjeksiyon borusu yanal olarak şişirilerek enjeksiyon yapılacak derinlikte sabitlenmiştir. Enjeksiyon tankından pompa yardımıyla alınan harç, sistemde devir daim olurken enjeksiyon borusundaki vanalar ile planlanan

basınçta zemine enjekte edilmiştir. Düzenek 1500 kPa basınca kadar dayanıklıdır. (Şekil 6.7)



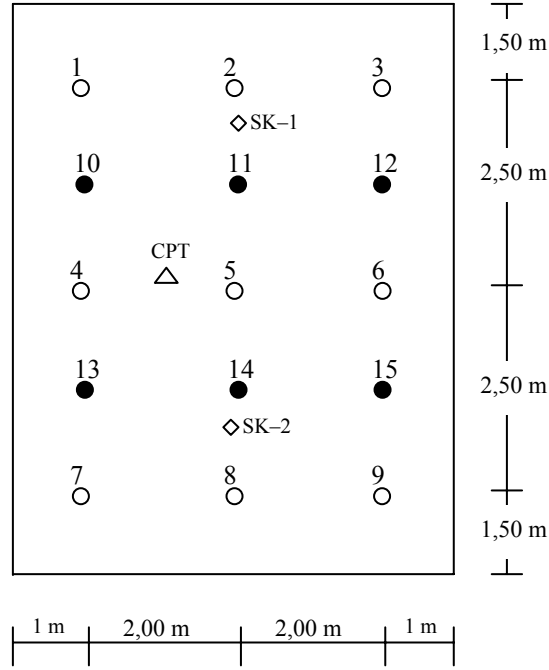
Şekil 6.6: Enjeksiyon düzeneği



Şekil 6.7: Enjeksiyon düzeneği

6.2.1. ES-1 sahasında enjeksiyon uygulaması

ES-1 sahasında toplam 9 kuyuda enjeksiyon yapılmıştır. Kuyular düşeyde 2,50 m, yatayda 2 m aralıklı açılmıştır. Sahada planlanan enjeksiyon kuyularının yerleri şekil 6.8'da gösterilmiştir.



Şekil 6.8: ES-1 sahasında enjeksiyon noktaları

Enjeksiyon üç kademede yapılmıştır. Enjeksiyon borusu 10 m derinlikte açılan kuyuda 9 m derinliğinde sabitlenmiştir. 9 m derinlikten sonra hidrostatik basınç 100 kPa civarında olmasından dolayı bu kademede 150 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Enjeksiyon uygulamasında boşluklar doldukça düzeneğin özelliğinden dolayı enjeksiyon basıncı yükselmektedir. Basınç yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiş ve enjeksiyon borusu 7 m derinlikte sabitlenmiştir. Bu kademede hidrostatik basınç 70 kPa basınç civarında olduğu için 100 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Enjeksiyon basıncı yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiştir. Daha sonra enjeksiyon borusu hidrostatik basıncı 50 kPa civarında olan 5 m derinlikte sabitlenerek 100 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Bu kademede de basınç yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiştir.

ES-1 sahasında enjeksiyon ilk olarak 4., 5. ve 6. kuyularda uygulanmıştır. Daha sonra 1., 2. ve 3. kuyularda ve 7., 8. ve 9. kuyularda enjeksiyona devam edilmiştir. Bu kuyularda enjeksiyon tamamlandığında 3. ve 6. kuyuların ortasındaki eksen ile 6. ve 9. kuyuların ortasındaki 10., 11., 12., 13., 14. ve 15. kuyularda enjeksiyon uygulanmıştır. Bu kuyularda enjeksiyon yapılamamış ve bu kuyular refü oluşmuştur. Enjeksiyon edilen çimento harcının miktarı tablo 6.10'da verilmiştir.

Tablo 6.10: ES–1 sahasında enjeksiyon uygulamasında kullanılan karışım miktarı

Kuyu No	Derinlik (m)	Karışım Oranı	Çimento (kg)	Su (kg)	Karışım hacmi (m ³)
ENJ 1	5 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	1/1	300	300	0,400
ENJ 2	5 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	1/1	600	600	0,800
ENJ 3	5 m	1/1	2400	2400	3,200
	7 m	1/1	600	600	0,800
	9 m	-	-	-	-
ENJ 4	5 m	1/1	150	150	0,200
	7 m	1/1	150	150	0,200
	9 m	1/1	150	150	0,200
ENJ 5	5 m	1/1	1100	1100	1,467
	7 m	1/1	750	750	1,000
	9 m	1/1	600	600	0,800
ENJ 6	5 m	1/1	150	150	0,200
	7 m	1/1	750	750	1,000
	9 m	1/1	2250	2250	3,000
ENJ 7	5 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	1/1	500	500	0,666
ENJ 8	5 m	1/1	400	400	0,533
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ 9	5 m	-	-	-	-
	7 m	1/1	300	300	0,400
	9 m	-	-	-	-
TOPLAM			11150	11150	14,867

6.2.2. ES–2 sahasında enjeksiyon uygulaması

ES–2 sahasında toplam 15 kuyuda enjeksiyon yapılması planlanmıştır. Kuyuların yerleri yatayda 2,0 m, düşeyde 1,50 m mesafe ile planlanmıştır. Sahada planlanan enjeksiyon kuyularının yerleri şekil 6.9’da gösterilmiştir.

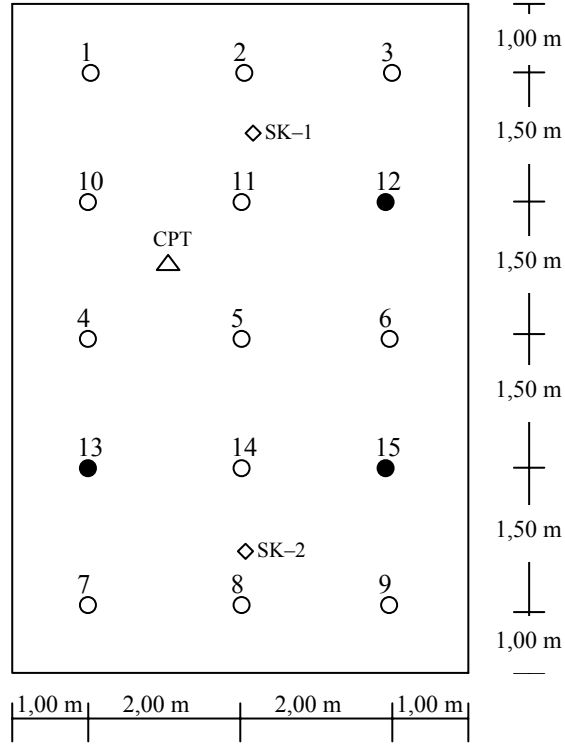
Enjeksiyon üç kademede yapılmıştır. Enjeksiyon borusu 10 m derinlikte açılan kuyuda 9 m derinliğinde sabitlenmiştir. 9 m derinlikten sonra hidrostatik basıncın 100 kPa civarında olmasından dolayı bu kademede 150 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Basınç yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiş ve enjeksiyon borusu 7 m derinlikte sabitlenmiştir. Bu kademede, hidrostatik basınç 70 kPa civarında olduğu için, 100 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Enjeksiyon basıncı yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiştir. Daha sonra enjeksiyon borusu, hidrostatik basıncı 50 kPa civarında olan 5 m derinlikte sabitlenerek 100 kPa

basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Bu kademedede de basınç yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiştir.

ES-2 sahasında ilk olarak 4., 5. ve 6. kuyularda enjeksiyon uygulanmıştır. Daha sonra 1., 2. ve 3. kuyularda ve 7., 8. ve 9. kuyularda enjeksiyona devam edilmiştir. Bu kuyularda enjeksiyon tamamlandığında 10., 11., 12., 13., 14. ve 15. kuyularda enjeksiyon yapılmıştır. 12., 13. ve 15. kuyularda enjeksiyon yapılamamış ve bu kuyular refü vermiştir. ES-2 sahasında enjeksiyon edilen çimento harcının miktarı tablo 6.11’da verilmiştir.

Tablo 6.11: ES-2 sahasında enjeksiyon uygulamasında kullanılan karışım miktarı

Kuyu No	Derinlik (m)	Karışım Oranı	Çimento (kg)	Su (kg)	Karışım hacmi (m ³)
ENJ1	5 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	1/1	300	300	400
ENJ2	5 m	1/1	300	300	400
	7 m	1/1	300	300	400
	9 m	1/1	300	300	400
ENJ3	5 m	-	-	-	-
	7 m	1/1	450	450	600
	9 m	-	-	-	-
ENJ4	5 m	1/1	450	450	600
	7 m	1/1	150	150	200
	9 m	1/1	150	150	200
ENJ5	5 m	1/1	1400	1400	1867
	7 m	1/1	1600	1600	2133
	9 m	1/1	750	750	1000
ENJ6	5 m	1/1	150	150	200
	7 m	1/1	150	150	200
	9 m	1/1	150	150	200
ENJ7	5 m	1/1	300	300	400
	7 m	1/1	300	300	400
	9 m	-	-	-	-
ENJ8	5 m	1/1	150	150	200
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ9	5 m	1/1	300	300	400
	7 m	1/1	150	150	200
	9 m	-	-	-	-
ENJ10	5 m	1/1	1200	1200	1600
	7 m	1/1	150	150	200
	9 m	1/1	150	150	200
ENJ11	5 m	-	-	-	-
	7 m	1/1	750	750	1000
	9 m	1/1	750	750	1000
ENJ14	5 m	1/1	150	150	200
	7 m	1/1	300	300	400
	9 m	-	-	-	-
TOPLAM			11250	11250	15000



Şekil 6.9: ES-2 sahasında enjeksiyon noktaları

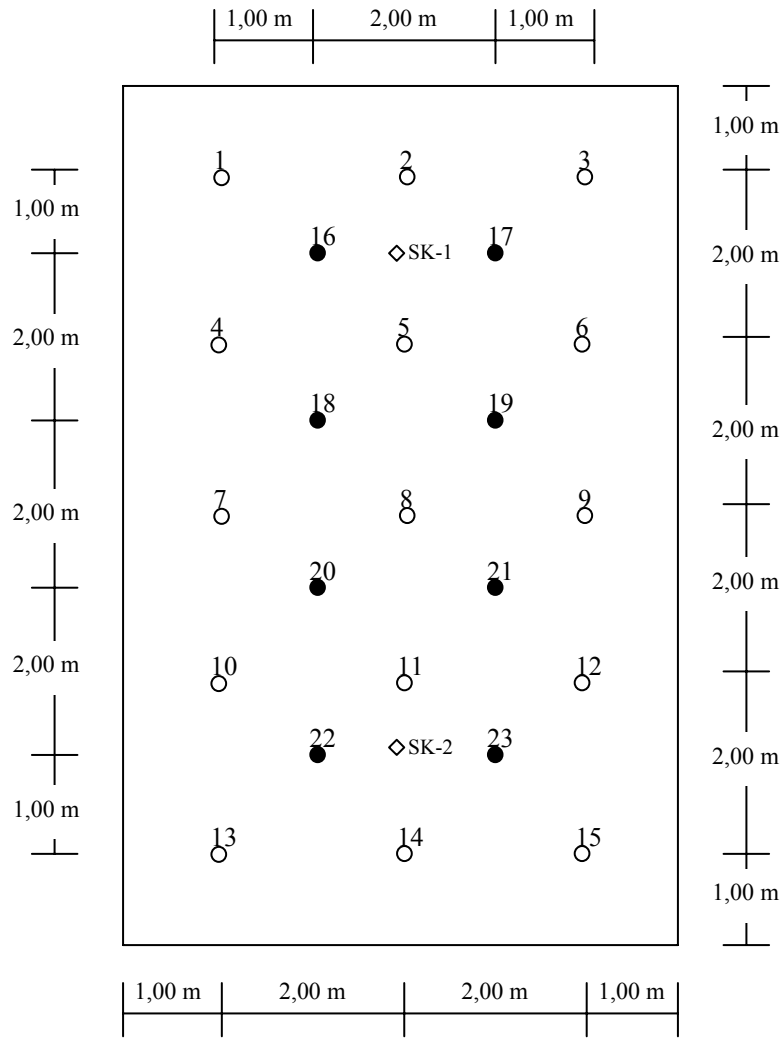
6.2.3. ES-3 sahasında enjeksiyon uygulaması

ES-3 sahasında toplam 15 kuyuda enjeksiyon yapılmıştır. Kuyular 2,00 m aralıklı olarak açılmıştır. Sahada planlanan enjeksiyon kuyularının yerleri şekil 6.10'da gösterilmiştir.

Enjeksiyon dört kademede yapılmıştır. Enjeksiyon borusu 10 m derinlikte açılan kuyuda 9 m derinliğinde sabitlenmiştir. 9 m derinlikte hidrostatik basınç 100 kPa civarında olmasından dolayı bu kademede 150 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Basınç yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiş ve enjeksiyon borusu 7 m derinlikte sabitlenmiştir. Bu kademede hidrostatik basınç 70 kPa basınç civarında olduğu için, 100 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Zemin boşlukları dolduktan sonra enjeksiyon basıncı yükselmeye başlamış ve enjeksiyona son verilmiştir. Daha sonra enjeksiyon borusu, hidrostatik basıncı 40 kPa civarında olan 4 m derinlikte sabitlenerek 100 kPa basınç ile enjeksiyon uygulanmıştır. Bu kademede de basınç yükselmeye başladığında enjeksiyona son verilmiştir. Son olarak da 2 m derinlikte enjeksiyon borusu sabitlenip 100 kPa basınç

ile enjeksiyon yapılmıştır. Bu kademedede de basınç yükseldiğinde enjeksiyona son verilmiştir.

ES-3 sahasında ilk olarak 7., 8. ve 9. kuyularda enjeksiyon uygulanmıştır. Sonra sırasıyla 4., 5. ve 6. kuyularda, 1., 2. ve 3. kuyularda, 10., 11. ve 12. kuyularda, 13., 14. ve 15. kuyularda enjeksiyona devam edilmiştir. Bu kuyularda enjeksiyon tamamlandığında 16., 17., 18., 19., 20., 21., 22. ve 23. kuyularda enjeksiyon uygulanmış ama başarılı olmamıştır.



Şekil 6.10: ES-3 sahasında enjeksiyon noktaları

ES-3 sahasında enjeksiyonda kullanılan çimento harcının miktarı tablo 6.12'da verilmiştir.

Tablo 6.12: ES-3 sahasında enjeksiyon uygulamasında kullanılan karışım miktarı

Kuyu No	Derinlik (m)	Karışım Oranı	Çimento (kg)	Su (kg)	Karışım hacmi (m ³)
ENJ1	2 m	1/1	1050	1050	1400
	4 m	1/1	450	450	600
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ2	2 m	1/1	1800	1800	2400
	4 m	1/1	450	450	600
	7 m	1/1	1500	1500	2000
	9 m	1/1	1200	1200	1600
ENJ3	2 m	1/1	900	900	1200
	4 m	1/1	300	300	450
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ4	2 m	-	-	-	-
	4 m	-	-	-	-
	7 m	1/1	600	600	800
	9 m	-	-	-	-
ENJ5	2 m	-	-	-	-
	4 m	-	-	-	-
	7 m	1/1	3000	3000	4000
	9 m	-	-	-	-
ENJ6	2 m	1/1	750	750	1000
	4 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ7	2 m	-	-	-	-
	4 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	1/1	750	750	1000
ENJ8	2 m	1/1	300	300	400
	4 m	1/1	300	300	400
	7 m	1/1	900	900	1200
	9 m	1/1	13500	13500	14625
ENJ9	2 m	-	-	-	-
	4 m	-	-	-	-
	7 m	1/1	600	600	800
	9 m	-	-	-	-
ENJ10	2 m	1/1	900	900	1200
	4 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ11	2 m	1/1	1500	1500	2000
	4 m	1/1	300	300	450
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ12	2 m	1/1	600	600	800
	4 m	-	-	-	-
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
ENJ13	2 m	1/1	1500	1500	2000
	4 m	1/1	750	750	1000
	7 m	-	-	-	-
	9 m	-	-	-	-
TOPLAM			33900	33900	45200

6.3. Enjeksiyon Sonrası Sahaların Özellikleri

Enjeksiyon işlemi tamamlandıktan 28 gün sonra sahalarda zemin incelemesi yapılmıştır. Zemin incelemesinde sahalarda enjeksiyon öncesi yapılmış olan arazi deneyleri tekrarlanmıştır.

6.3.1. ES–1 sahasının enjeksiyon sonrası geoteknik özellikleri

ES–1 sahasında enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra standart penetrasyon deneyi, koni penetrasyon deneyi ve sismik kırılma deneyi yapılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir.

Standart penetrasyon deneyi 1,50 m aralıklarla 15 m derinliğe kadar yapılmıştır. SPT deneyleri sonucu Tablo 6.13’de verilmiştir.

Tablo 6.13: ES–1 sahasında enjeksiyon sonrası SPT sonuçları

SK–1	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	12	12	27	30	29	30	22	24	23	19
SK–2	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	12	13	28	29	30	27	22	21	22	19

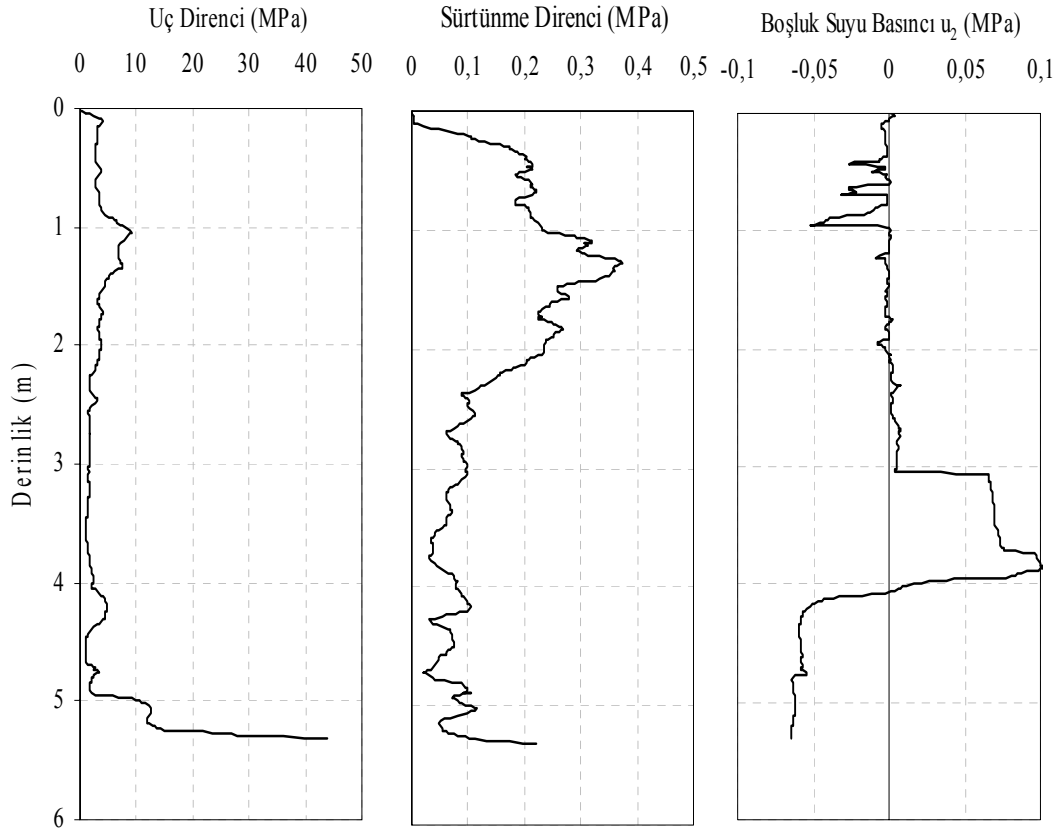
Sahada sismik kırılma çalışması yapılmıştır. 3 m aralıkla zemine yerleştirilen jeofonlardan iki serim boyunca karşılıklı atışlar yapılarak hem yatay hem de düşey kayıtlar alınmıştır. Bu yöntemle toplam 36 m uzunluğunda serim yapılmış ve 9 m kalınlığında zemin profili çıkarılmıştır. Sismik kırılma deneyi sonucunda belirlenen iki tabakanın sonuçları tablo 6.14’te verilmiştir.

Tablo 6.14: ES–1 sahasında enjeksiyon sonrası sismik kırılma ölçümleri

Tabaka	Kalınlık (m)	V _p (m/s ²)	V _s (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı
1	4,20	510	157	Z3
2	4,80	1146	256	Z2

ES–1 sahasında, enjeksiyon uygulanmış iki kuyu arasında CPT yapılmıştır. CPT deneyi ile uç direnci (q_c), sürtünme direnci (f_s) ve boşluk suyu basıncı (u_2) değerleri

ölçülmüştür. 2 cm/sn hız ile deney yapılmıştır. Uç direnci ilk 5 m derinliğe kadar ortalama 10 MPa değerinde iken enjeksiyon uygulanan bölge içerisinde kalan 5 m derinliğinde uç direnci 40 MPa değerini aşmıştır. Uç direnci CPT aletinin kapasitesini geçtiği için deneye son verilmiştir. Çevre sürtünmesi ise ilk 3 m derinlikte ortalama 0,20 MPa olarak bulunmuştur.(Şekil 6.11)



Şekil 6.11: ES-1 enjeksiyon sonrası CPT deneyi sonuçları

6.3.2. ES-2 sahasının enjeksiyon sonrası geoteknik özellikleri

ES-2 sahasında enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra standart penetasyon deneyi, koni penetasyon deneyi ve sismik kırılma deneyi yapılarak zemin özellikleri belirlenmiştir.

Standart penetasyon deneyi 1,50 m aralıklarla 15 m derinliğe kadar yapılmıştır. SPT deneyleri sonucu Tablo 6.15’de verilmiştir.

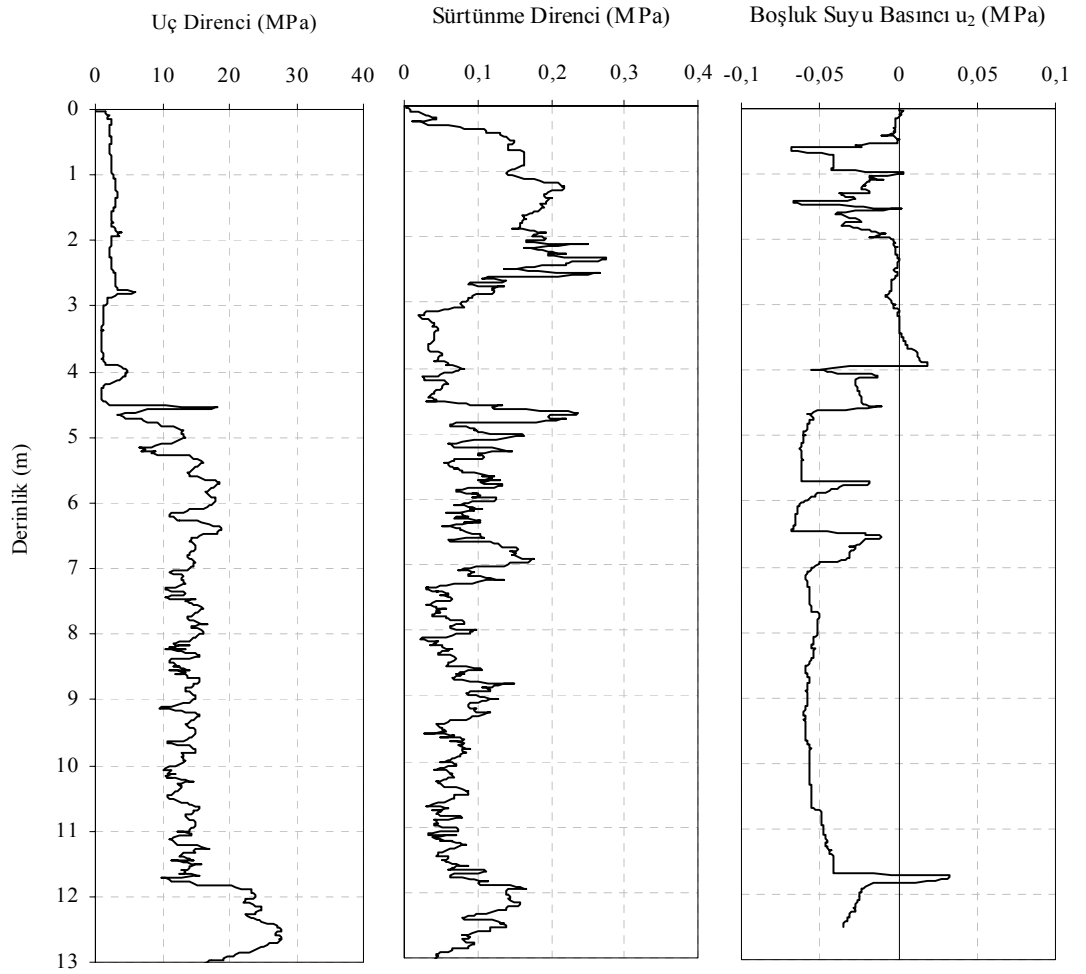
Tablo 6.15: ES-2 sahasında enjeksiyon sonrası SPT sonuçları

SK-1	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	12	14	28	30	31	26	24	25	23	27
SK-2	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	14	15	27	30	29	30	26	26	24	26

Sahada yapılan sismik kırılma çalışmasında, iki serim boyunca karşılıklı atışlar yapılarak hem yatay hem de düşey doğrultuda jeofon kayıtları alınmıştır. 3 m aralıklarla konulan jeofonlar ile 9 m kalınlığında zemin profili çıkarılmıştır. Sismik kırılma deneyi sonucunda belirlenen iki tabakanın sonuçları tablo 6.16’te verilmiştir.

Tablo 6.16: ES-2 sahasında enjeksiyon sonrası sismik kırılma ölçümleri

Tabaka	Kalınlık (m)	Vp (m/s ²)	Vs (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı
1	4,30	400	141	Z3
2	4,70	1000	246	Z2



Şekil 6.12: ES-2 enjeksiyon sonrası CPT deneyi sonuçları

ES-2 sahasında, enjeksiyon uygulanmış dört kuyu arasında CPT yapılmıştır. CPT deneyi ile uç direnci (q_c), sürtünme direnci (f_s) ve boşluk suyu basıncı (u_2) değerleri ölçülmüştür. 2 cm/sn hız ile deney yapılmıştır. Uç direnci ilk 4,5 m derinliğe kadar ortalama 4 MPa değerinde iken enjeksiyon uygulanan bölge içerisinde kalan 4,5 m derinliğinden itibaren uç direnci 15 MPa değerini aşmıştır. Çevre sürtünmesi ise ilk 3 m derinlikte ortalama 0,20 MPa olarak ölçülmüş iken 3 m derinlikten itibaren 0,10 MPa olarak ölçülmüştür. (Şekil 6.12)

6.3.3. ES-3 sahasının enjeksiyon sonrası geoteknik özellikleri

ES-3 sahasında enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra standart penetrasyon deneyi ve sismik kırılma deneyi yapılarak zemin özellikleri belirlenmiştir.

Standart penetrasyon deneyi 1,50 m aralıklarla 15 m derinliğe kadar yapılmıştır. SPT deneyleri sonucu Tablo 6.17’de verilmiştir.

Tablo 6.17: ES-3 sahasında enjeksiyon sonrası SPT sonuçları

SK-1	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	10	10	14	15	20	26	24	27	27	27
SK-2	Derinlik	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00
	SPT-N	10	10	12	16	18	22	25	26	28	27

Sahada sismik kırılma çalışmasında jeofonlar 3 m aralıkla zemine yerleştirilmiştir. İki serim boyunca karşılıklı atışlar yapılarak hem yatay hem de düşey jeofon kayıtları alınmıştır. 36 m uzunluğunda serim yapılan bu yöntemde 9 m kalınlığında zemin profili çıkarılmıştır. Sismik kırılma deneyi sonucunda belirlenen iki tabakanın sonuçları tablo 6.18’te verilmiştir.

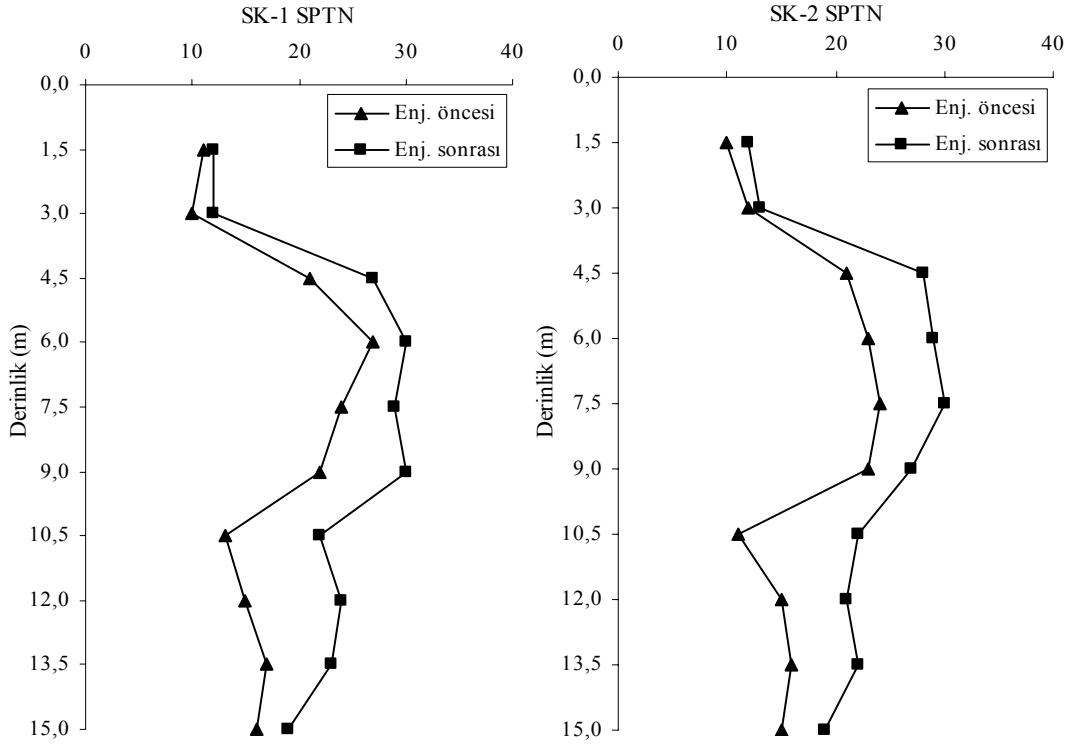
Tablo 6.18: ES-3 sahasında enjeksiyon sonrası sismik kırılma ölçümleri

Tabaka	Kalınlık (m)	V_p (m/s ²)	V_s (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı
1	4,30	1055	218	Z2
2	2,70	476	155	Z3
3	2,00	1176	232	Z2

6.4. Arazi Çalışması Sonuçları

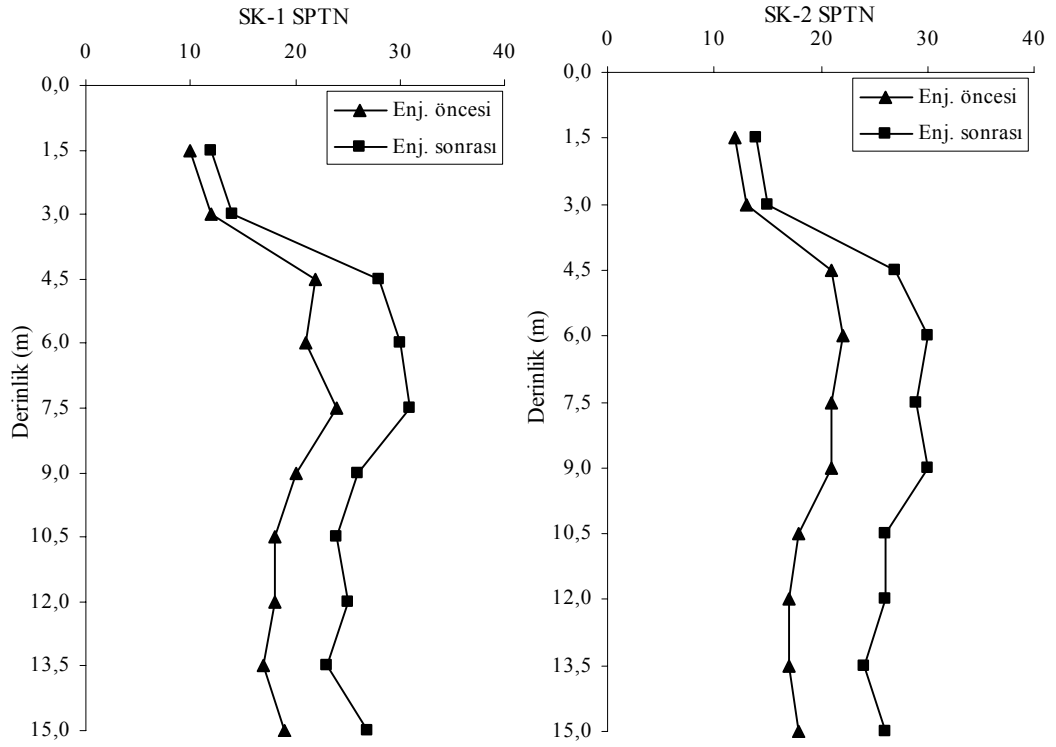
Enjeksiyon öncesi ve sonrası SPT deneylerinin sonuçları şekil 6.13–6.15'te verilmiştir. SPT grafiklerinden de anlaşılacağı üzere SPT-N değerlerinin %15 ile %30 arasında artışı gözlenmiştir.

ES-1 sahasında yapılan SPT deneylerinde enjeksiyon uygulanmış olan 5-10 m arasında vuruş sayısı, enjeksiyon öncesinde ortalama 25 iken enjeksiyon sonrasında aynı tabakada ortalama 30'a yükselmiştir. 10 m'den daha derin tabakalarda da enjeksiyon öncesinde vuruş sayısı ortalama 15 iken enjeksiyon sonrasında 22 değerine yükselmiştir. (Şekil 6.13)

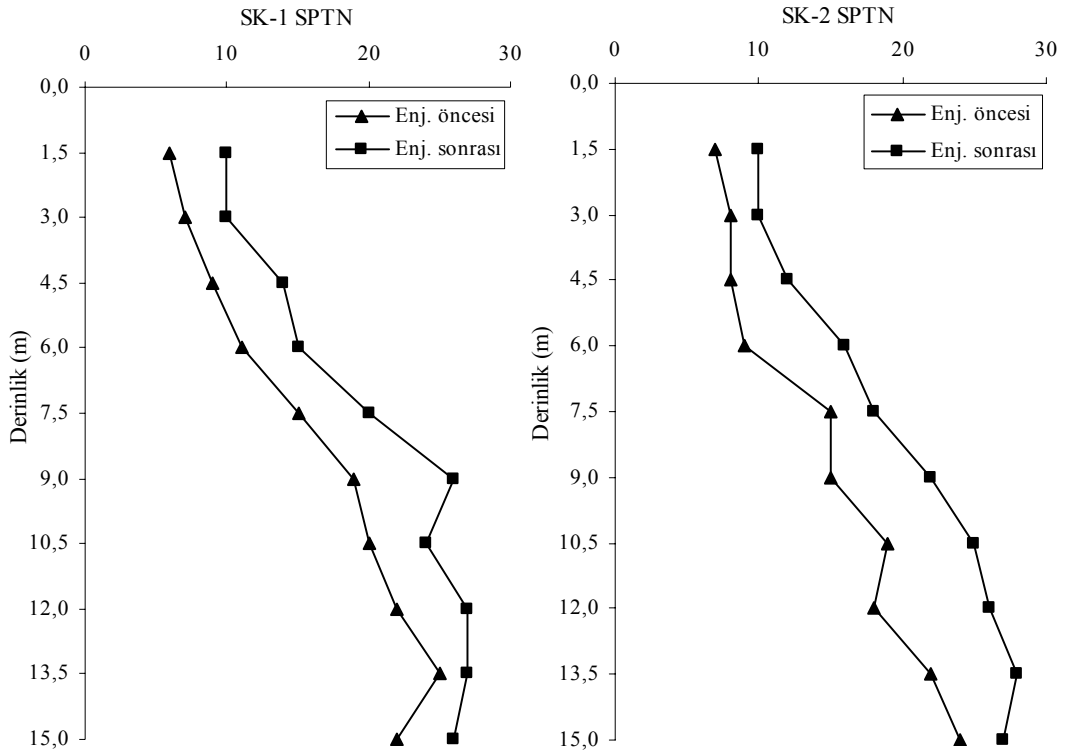


Şekil 6.13: ES-1 sahasının SPT deney sonuçları

ES-2 sahasında yapılan SPT deneylerinde enjeksiyon uygulanmış olan 5-10 m arasında vuruş sayısı, enjeksiyon öncesinde ortalama 20 iken enjeksiyon sonrasında aynı tabakada ortalama 27 değerine yükselmiştir. 10 m'den daha derin tabakalarda da enjeksiyon öncesinde vuruş sayısı ortalama 17 iken enjeksiyon sonrasında 24 değerine yükselmiştir. (Şekil 6.14)



Şekil 6.14: ES-2 sahasının SPT deney sonuçları



Şekil 6.15: ES-3 sahasının SPT deney sonuçları

ES-3 sahasında yapılan SPT deneylerinde enjeksiyon uygulanmış olan 5-10 m arasında vuruş sayısı, enjeksiyon öncesinde ortalama 20 iken enjeksiyon sonrasında

aynı tabakada ortalama 27 değerine yükselmiştir. 10 m’den daha derin tabakalarda da enjeksiyon öncesinde vuruş sayısı ortalama 17 iken enjeksiyon sonrasında 24 değerine yükselmiştir. (Şekil 6.15)

Meyerhof’un taşıma gücü formülünden yararlanılarak SPT deneyi sonuçlarından hesaplanan taşıma gücü değerlerinde de SPT-N değerlerinin artışına bağlı olarak enjeksiyon öncesine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. SPT deneyi sonuçlarına göre elde edilen taşıma gücü değerleri tablo 6.19’da verilmiştir.

Tablo 6.19: Enjeksiyon öncesi ve sonrasında SPT sonuçlarına göre taşıma gücü değerleri

Enjeksiyon sahası	Enjeksiyon öncesi taşıma gücü (kPa)	Enjeksiyon sonrası taşıma gücü (kPa)
ES-1	278	346
ES-2	287	376
ES-3	218	279

Sismik kırılma deneyleri sonucunda V_p ve V_s hızlarında % 30 ile % 50 oranlarında artışlar görülmüştür. Sismik kırılma deneyi sonucunda V_s dalga hızı değerlerine göre yerel zemin sınıfları da yükselmiştir. Sismik kırılma deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar tablo 6.20’de verilmiştir.

Tablo 6.20: Enjeksiyon öncesi ve sonrasında sismik kırılma deneyi sonuçları

Enjeksiyon sahası	Tabaka	Enjeksiyon Öncesi			Enjeksiyon Sonrası		
		V_p (m/s ²)	V_s (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı	V_p (m/s ²)	V_s (m/s ²)	Yerel zemin sınıfı
ES-1	1	272	108	Z3	510	157	Z3
	2	721	189	Z3	1146	256	Z2
ES-2	1	218	108	Z3	400	141	Z3
	2	756	193	Z3	1000	246	Z2
ES-3	1	645	155	Z3	1055	218	Z2
	2	252	110	Z3	476	155	Z3
	3	737	168	Z3	1176	232	Z2

Sismik kırılma deneyi sonucunda zemin tabakalarının elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlığı, bulk modülü ve kesme modülü denklem 6.1-6.5’te verilen formüllerle hesaplanmıştır.

Birim hacim ağırlık;

$$\gamma = 0,2 \frac{V_p}{1000} + 1,6 \quad (6.1)$$

Elastisite modülü;

$$E = 2V_s^2 (1 + \nu) \left(\frac{\gamma}{g} \right) \quad (6.2)$$

Poisson oranı;

$$\nu = \frac{1 - 2 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2} \quad (6.3)$$

Kesme modülü;

$$G = V_s^2 \frac{\gamma}{g} 10^5 \quad (6.4)$$

Bulk modülü;

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (6.5)$$

ES-1 sahasında sismik kırılma deneyi sonucunda hesaplanan zemin parametreleri tablo 6.21’de verilmiştir. Elastisite modülü ve kesme modülü değerleri enjeksiyon sonrasında %100 oranında artmıştır. Bulk modülü ise %170 oranında artmıştır.

Tablo 6.21: ES-1 sahasının sismik kırılma deneyi sonuçlarına bağlı zemin parametreleri

	Enjeksiyon Öncesi		Enjeksiyon Sonrası	
	1. Tabaka	2. Tabaka	1. Tabaka	2. Tabaka
γ (kN/m ³)	16,2	17,1	16,7	18,0
ν	0,41	0,46	0,45	0,47
E (kPa)	54260	182250	121420	353220
G (kPa)	19291	62283	41938	119838
K (kPa)	96637	823353	386621	2241715

ES-2 sahasında sismik kırılma deneyi sonucunda hesaplanan zemin parametreleri tablo 6.22’de verilmiştir. Elastisite modülü, kesme modülü ve bulk modülü değerleri enjeksiyon sonrasında %70 oranında artmıştır.

Tablo 6.22: ES-2 sahasının sismik kırılma deneyi sonuçlarına bağlı zemin parametreleri

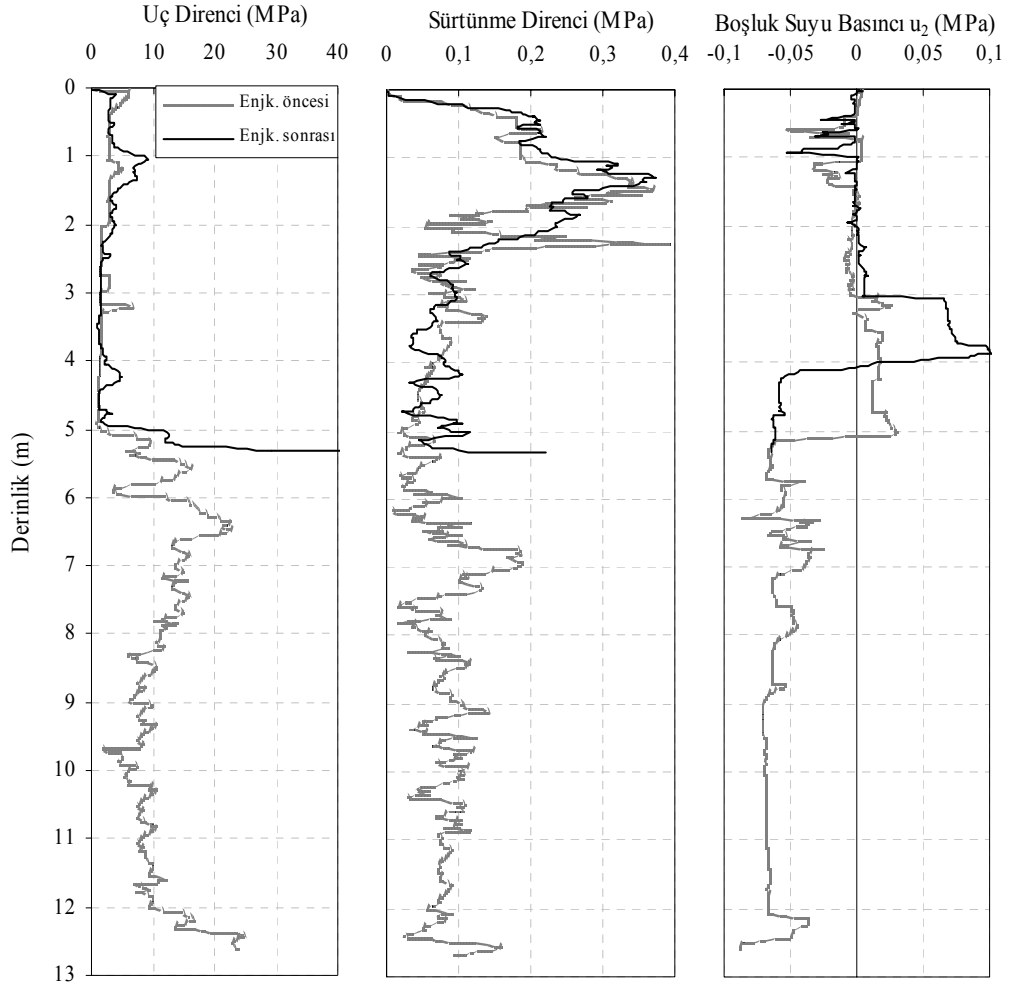
	Enjeksiyon Öncesi		Enjeksiyon Sonrası	
	1. Tabaka	2. Tabaka	1. Tabaka	2. Tabaka
γ (kN/m ³)	16,1	17,3	16,5	17,7
ν	0,34	0,46	0,43	0,47
E (kPa)	51259	191080	95429	319660
G (kPa)	19164	65207	33389	108892
K (kPa)	52531	913588	224190	1654197

ES-3 sahasında sismik kırılma deneyi sonucunda hesaplanan zemin parametreleri tablo 6.23’de verilmiştir. Elastisite modülü ve kesme modülü değerleri enjeksiyon sonrasında %100 oranında artmıştır. Bulk modülü ise %170 oranında artmıştır.

Tablo 6.23: ES-3 sahasının sismik kırılma deneyi sonuçlarına bağlı zemin parametreleri

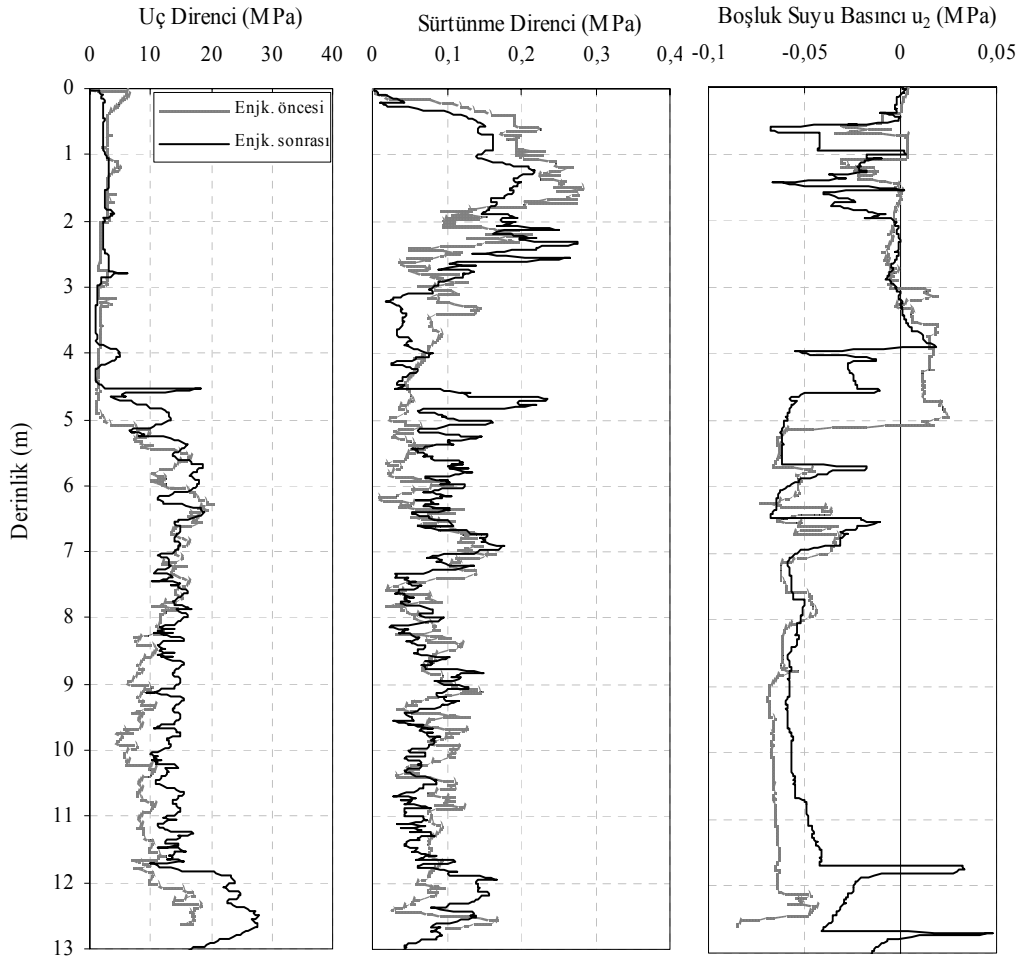
	Enjeksiyon Öncesi			Enjeksiyon Sonrası		
	1. Tabaka	2. Tabaka	3. Tabaka	1. Tabaka	2. Tabaka	3. Tabaka
γ (kN/m ³)	17,0	16,2	17,2	17,8	16,7	18,1
ν	0,47	0,38	0,47	0,48	0,44	0,48
E (kPa)	122030	55176	145200	254130	117640	293000
G (kPa)	41525	19963	49302	86037	40713	98744
K (kPa)	663695	78154	883073	1900284	329700	2405512

CPT deneyleri sonucuna göre uç direncinde ve sürtünme direncinde fazla değişimler olmamıştır. ES-1 sahasında CPT deneyi iki enjeksiyon kuyusu arasında yapılmıştır. Enjeksiyon öncesinde CPT deneyi 12,50 m derinliğe kadar yapılmıştır. Uç direnci enjeksiyon uygulanan derinliklerde yaklaşık 10 MPa değerinde elde edilmiştir. Enjeksiyon sonrasında aynı noktada yapılan CPT deneyinde enjeksiyon bölgesine girildiğinde 5 m derinlikte 40 MPa değerine ulaşılmıştır. CPT aletinin kapasitesini aştığı için deneye son verilmiştir. CPT noktası iki enjeksiyon kuyusu arasında olduğu ve bu nedenle iki kuyunun enjeksiyon bölgelerinde kaldığı için çimento tabakasına denk gelmiştir. Bundan dolayı CPT uç direnci oldukça yüksek çıkmıştır. (Şekil 6.16)



Şekil 6.16: ES-1 sahasının CPT sonuçları

ES-2 sahasında CPT deneyi dört enjeksiyon kuyusu arasında yapılmıştır. Enjeksiyon öncesinde CPT deneyi 12,50 m derinliğe kadar yapılmıştır. Uç direnci enjeksiyon uygulanan derinliklerde yaklaşık 10 MPa değerinde elde edilmiştir. Enjeksiyon sonrasında aynı noktada yapılan CPT deneyi 12,50 m derinliğe kadar yapılmıştır. Uç direnci enjeksiyon uygulanan derinliklerde yaklaşık 12 MPa değerinde elde edilmiştir. Sürtünme direncinde ise enjeksiyon öncesinde ve enjeksiyon sonrasında yakın değerler elde edilmiştir. Enjeksiyon öncesinde uç direnci grafiğinde kil tabakası 5 m kalınlığında olduğu görülürken enjeksiyon sonrasında ise kil tabakası 4,50 m kalınlığında olduğu görülmüştür. Enjeksiyon uygulanan bölgenin sınırındaki kil tabakalarının sıkıştığı ve bu şekilde geoteknik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir.(Şekil 6.17)



Şekil 6.17: ES-2 sahasının CPT sonuçları

Schmertmann'ın taşıma gücü formülünden yararlanılarak CPT deneyi sonuçlarından hesaplanan taşıma gücü değerlerinde % 15 ile % 30 arasında artışlar görülmüştür. (Tablo 6.24)

Tablo 6.24: Enjeksiyon öncesi ve sonrasında CPT sonuçlarına göre taşıma gücü değerleri

Enjeksiyon sahası	Enjeksiyon öncesi taşıma gücü (kPa)		Enjeksiyon sonrası taşıma gücü (kPa)	
	Kare temel	Şerit temel	Kare temel	Şerit temel
ES-1	361	234	492	311
ES-2	368	239	435	277

ES-1 sahasında enjeksiyon kuyuları 2,50 m mesafede açılmıştır. Bu kuyular arasında ikinci kuyular açılarak enjeksiyon uygulanmış fakat birinci kuyuların enjeksiyon bölgesinde kaldığı için enjeksiyon başarılı olmamıştır. ES-2 sahasında kuyular

1,50 m mesafede açılmış ve enjeksiyon başarılı olmuştur. ES-3 sahasında ise kuyular 2,00 m mesafe ile açılmış ve tüm kuyularda başarılı olunmuştur. Arazide enjeksiyon kuyuları arasındaki mesafe minimum 1,50 m seçilmesi enjeksiyon için yeterlidir. Enjeksiyon kuyusu arasında 3,00 m'den daha fazla olan sahalarda yeterli enjeksiyon için kuyular arasında ikinci enjeksiyon kuyusu açılarak enjeksiyon tekrarlanabilir.

Arazi çalışmasında SPT deneyi sonuçlarına göre 7,5 büyüklüğündeki deprem için sıvılaşma analizi yapılmıştır. CSR ve $CRR_{7,5}$ hesaplanarak zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı bulunmuştur. CSR ve $CRR_{7,5}$ değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formüller bağıntı 6.6, 6.7 ve 6.8'de verilmiştir. Sıvılaşma analizi 7,5 magnitütteki deprem için hesaplanmıştır. Enjeksiyon sonrasında hesaplanan güvenlik sayısı her üç arazide de daha büyük çıkmıştır.

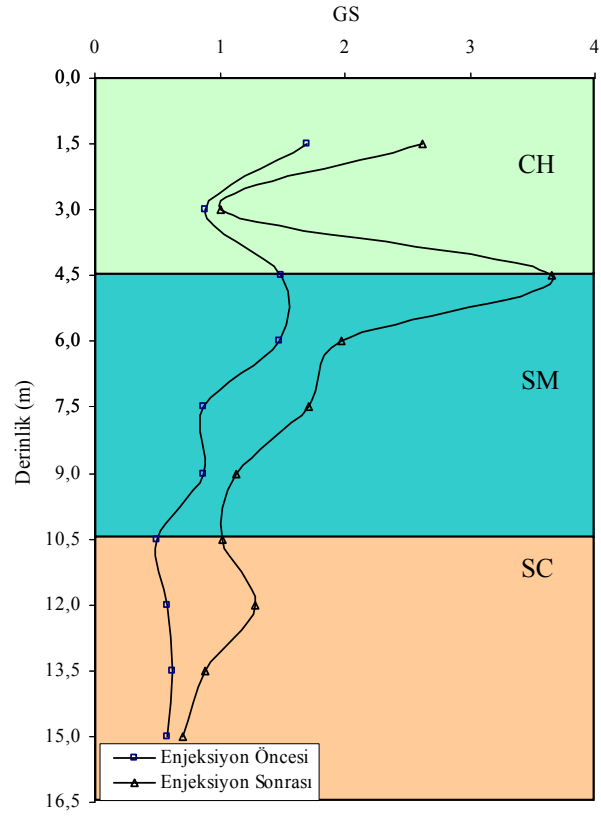
$$CSR = 0,65 \frac{\sigma_o}{\sigma_o} a_{\text{mak}} r_d \quad (6.6)$$

$$CRR_{7,5} = \frac{0,048 - 4,721 \cdot 10^{-3} N_{60} + 6,136 \cdot 10^{-4} N_{60}^2 - 1,673 \cdot 10^{-5} N_{60}^3}{1 - 0,1248 N_{60} + 9,578 \cdot 10^{-3} N_{60}^2 - 3,285 \cdot 10^{-4} N_{60}^3 + 3,714 \cdot 10^{-6} N_{60}^4} \quad (6.7)$$

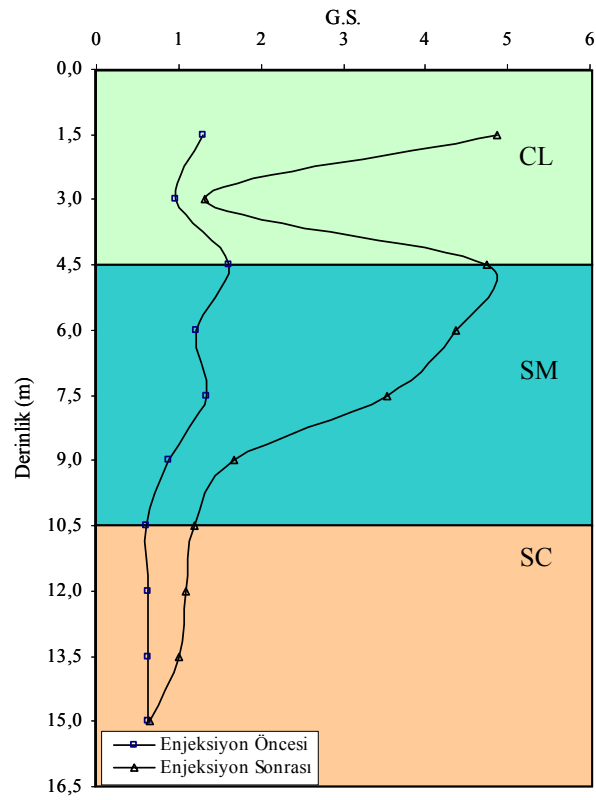
$$G.S. = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \quad (6.8)$$

ES-1 sahasında yapılan analizde enjeksiyon uygulanan bölge içerisinde kalan zemin tabakasında sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısı enjeksiyon sonrasında minimum %35 maksimum %150 oranında artmıştır. Ayrıca enjeksiyon uygulanmamış bölgelerde de sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının arttığı görülmüştür. (Şekil 6.18)

ES-2 sahasında yapılan analizde enjeksiyon uygulanan bölge içerisinde kalan zemin tabakasında sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısı enjeksiyon sonrasında minimum %90 maksimum %260 oranında artmıştır. Ayrıca enjeksiyon uygulanmamış bölgelerde de sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının arttığı görülmüştür. (Şekil 6.19)

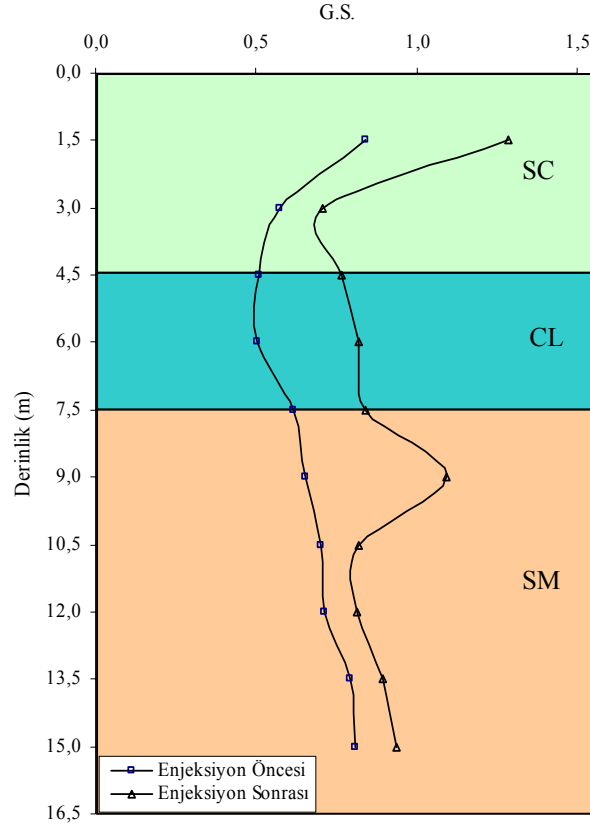


Şekil 6.18: ES-1 sahasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı



Şekil 6.19: ES-2 sahasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

ES-3 sahasında yapılan analizde enjeksiyon uygulanan bölge içerisinde kalan zemin tabakasında sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısı enjeksiyon sonrasında minimum %15 maksimum %70 oranında artmıştır. Ayrıca enjeksiyon uygulanmamış bölgelerde de sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının arttığı görülmüştür. (Şekil 6.20)



Şekil 6.20: ES-3 sahasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

6.5. Bilgisayar Analizi

Arazide enjeksiyon uygulamasından sonra bilgisayarda sonlu elemanlar yöntemi ile üç boyutlu analiz yapılmıştır. Enjeksiyon öncesinde ve sonrasında yapılan zemin incelemeleri sonucunda elde edilen zemin parametreleri analizde kullanılmıştır.

15 düğüm noktalı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılmıştır. Analizde zemin tabakaları için Mohr-Coulomb kırılma hipotezi kullanılmıştır. Analizde, gerçekte sahalarda yapılacak olan, dört katlı bina yükü zemine uygulanmış ve bu yük altında

zeminde oluşacak deformasyon ve gerilmeler hesaplanmıştır. Ayrıca bina yükü artırılarak zemine uygulanabilecek son limit gerilme hesaplanmıştır.

Analizde kullanılacak zeminin elastisite modülü ve poisson oranı sismik kırılma sonucunda elde edilen boyuna dalga hızı (V_p) ve enine dalga hızı (V_s) değerlerinden hesaplanmıştır. Zeminin içsel sürtünme açısı ve kohezyonu ise standart penetrasyon deneyi sonucuna göre hesaplanmıştır.

Zeminin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri SPT deneyi sonuçları ile hesaplanmıştır. Hatanaka ve Uchida (1996) önerdiği 6.9 denklemi ve Parry (1977) önerdiği 6.10 denklemi ile zeminin içsel sürtünme açısı hesaplanmıştır. Hatara ve Uchida (1996) tarafından önerilen 6.9 denklemi ile hesaplanan içsel sürtünme açısı değerleri daha küçük olduğu için analizde kullanılmıştır.

$$\phi^o = \sqrt{20N^*} + 20 \quad (6.9)$$

$$\phi^o = 25 + 28 \left(\frac{N^*}{\sigma_{vo}} \right)^{0,5} \quad (6.10)$$

Zeminin kohezyonu Hara vd (1971) tarafından önerilen 6.11 denklemi ve Stroud (1974) tarafından önerilen 6.12 denklemi ile hesaplanmıştır. Hara vd (1971) tarafından önerilen 6.12 denklemi ile hesaplanan kohezyon değerleri daha küçük olduğundan analizde kullanılmıştır.

$$c = 29N^{0.72} \quad (6.11)$$

$$c = 5N^* \quad (6.12)$$

Analizde ES-1 ve ES-2 sahalarında 2 m gömme derinliğinde, ES-3 sahasında ise 0,50 m gömme derinliğinde 40 cm kalınlığında elastik radye temel tasarlanmıştır. Temel üzerine dört katlı bina yükü sürşarj olarak tanımlanmıştır. Hesaplarda binanın bir katı için ağırlığı 10 kN/m² olarak alınmıştır. Dört katlı binanın toplam ağırlığı

olarak 40 kN/m² sürşarj yükü temel üzerine tanımlanmıştır. Zemin tabakalarının analizde kullanılan enjeksiyon öncesi parametreleri tablo 6.25'te verilmiştir.

Tablo 6.25: Zemin tabakalarının analizde kullanılan enjeksiyon öncesi parametreleri

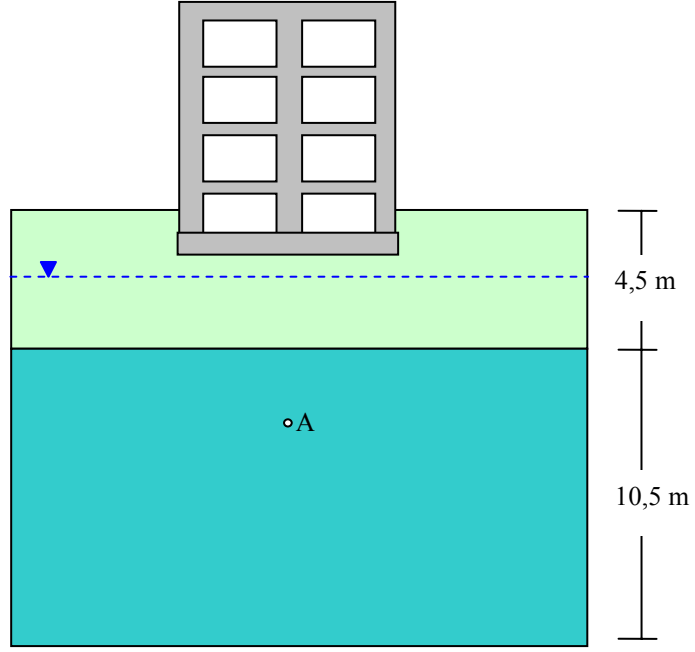
Saha	Tabaka	Tabaka kalınlığı (m)	γ_{doy} (kN/m ³)	γ_{kuru} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	C (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ (°)
ES-1	Kil	4,50	16,20	12,30	54260	0,41	68	10	0
	Kum	10,50	17,10	14,10	182250	0,46	1	43	13
ES-2	Kil	4,50	16,10	13,10	51259	0,34	101	10	0
	Kum	10,50	17,30	15,00	191080	0,46	1	43	13
ES-3	Kum	4,50	17,00	12,60	122030	0,47	1	35	5
	Kil	3,00	16,20	12,70	55176	0,38	54	10	0
	Kum	7,50	17,20	14,30	145200	0,47	1	39	9

Zemin tabakalarının analizde kullanılan enjeksiyon sonrası parametreleri ise tablo 6.26'de verilmiştir.

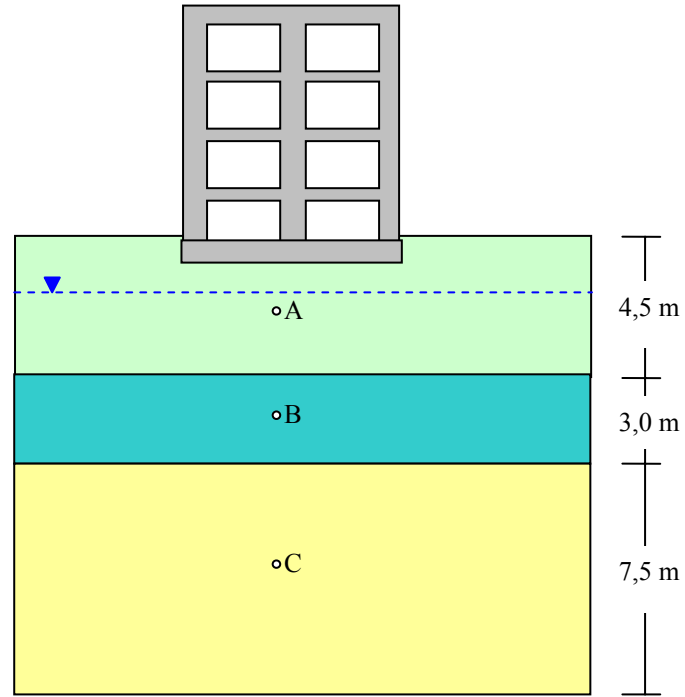
Tablo 6.26: Zemin tabakalarının analizde kullanılan enjeksiyon sonrası parametreleri

Saha	Tabaka	Tabaka kalınlığı (m)	γ_{doy} (kN/m ³)	γ_{kuru} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	C (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ (°)
ES-1	Kil	4,50	16,70	12,60	121420	0,45	86	10	0
	Kum	10,50	18,00	14,80	353220	0,47	1	46	16
ES-2	Kil	4,50	16,50	13,40	95429	0,43	119	10	0
	Kum	10,50	17,70	15,40	319660	0,47	1	46	16
ES-3	Kum	4,50	17,80	13,20	254130	0,48	1	38	8
	Kil	3,00	16,70	13,00	117640	0,44	80	10	0
	Kum	7,50	18,10	15,00	293000	0,48	1	41	11

Analiz dört hesap aşamasında yapılmıştır. İlk hesap aşamasında temelin gömme derinliği olarak ES-1 ve ES-2 sahası için 2,00 m, ES-3 sahası için 0,50 m kazı hesabı yapılmıştır. İkinci hesap aşamasında temel tasarlanmıştır. Üçüncü hesap aşamasında dört katlı bina ağırlığı olarak 40 kPa sürşarj gerilmesi temel üzerine tanımlanmıştır. Dördüncü hesap aşamasında ise sürşarj gerilmesi adım adım artırılarak zeminin yenileceği son limit gerilme hesaplanmıştır. ES-1 ve ES-2 sahası için analizde modellenen zemin kesiti ve üst yapı şekil 6.21'de, ES-3 sahası için analizde modellenen zemin kesiti ve üst yapı şekil 6.22'da verilmiştir.



Şekil 6.21: ES-1 ve ES-2 sahalarının modellenen zemin kesiti ve üst yapı



Şekil 6.22: ES-3 sahasının modellenen zemin kesiti ve üst yapı

6.5.1. Analiz sonuçları

Analiz sonucunda üçüncü hesap aşamasında, enjeksiyon öncesi için modellenen zemindeki dört katlı bina gerilmesinden dolayı oluşan deformasyon miktarı,

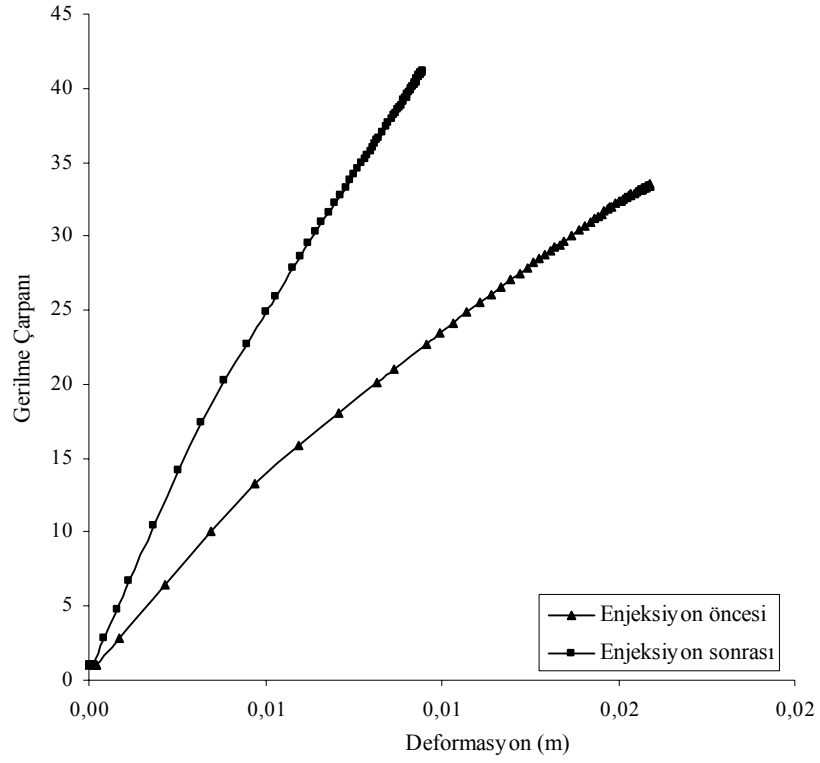
enjeksiyon sonrası için modellenen zemindeki değerlerden en az %100 oranında fazla hesaplanmıştır. ES-1 ve ES-2 sahasında temelin gömme derinliği kil tabakası içerisinde kalmış olmasına rağmen enjeksiyon sonrasında elde edilen deformasyon miktarı bu tabakalarda da en az %50 oranında daha düşük hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo 6.27’te verilmiştir.

Tablo 6.27: Analiz sonuçları

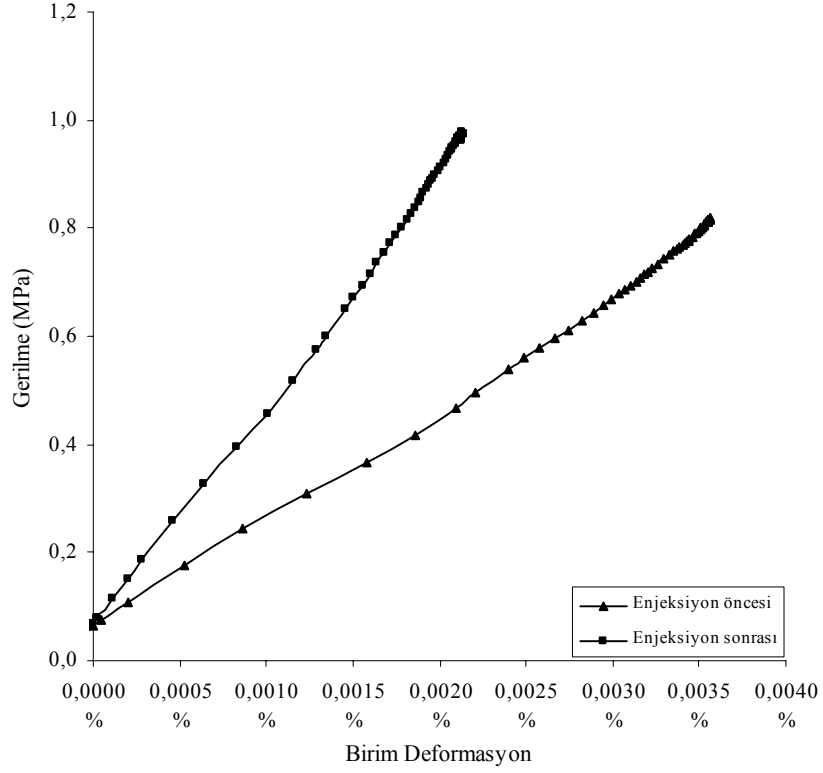
	ES-1		ES-2		ES-3	
	Enjeksiyon öncesi	Enjeksiyon sonrası	Enjeksiyon öncesi	Enjeksiyon sonrası	Enjeksiyon öncesi	Enjeksiyon sonrası
Toplam deformasyon (mm)	1,42	0,53	1,60	0,70	1,59	0,76
Düşey deformasyon (mm)	0,97	0,35	1,13	0,45	1,59	0,76
Toplam birim deformasyon (%)	$30,22.10^{-3}$	$7,28.10^{-3}$	$40,14.10^{-3}$	$12,06.10^{-3}$	$52,53.10^{-3}$	$20,28.10^{-3}$
Düşey deformasyon (%)	$25,85.10^{-3}$	$9,26.10^{-3}$	$34,68.10^{-3}$	$11,91.10^{-3}$	$27,21.10^{-3}$	$12,07.10^{-3}$
Toplam gerilme (kPa)	193,52	196,52	195,36	195,45	202,54	207,37
Düşey gerilme (kPa)	122,53	133,72	126,11	131,89	121,42	133,20

ES-1 sahasında zemine uygulanan son limit gerilme durumunda, seçilen A noktasının enjeksiyon öncesi ve sonrasında hesaplanan gerilme çarpanı ve düşey deformasyon grafiği şekil 6.23’de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, enjeksiyon sonrasında zeminin yenilmesi için gerekli olan son limit gerilme değeri 1,61 MPa iken enjeksiyon öncesinde zeminin yenilmesi için gerekli olan son limit gerilme değeri 1,31 MPa olarak hesaplanmıştır. ES-1 sahasında enjeksiyon sonrasında hesaplanan son limit gerilme değeri enjeksiyon öncesinde hesaplanan değere göre % 22 oranında artmıştır.

ES-1 sahasında son limit gerilme uygulanırken seçilen A noktası için düşey gerilme ve düşey birim deformasyon grafiği şekil 6.24’de verilmiştir. Enjeksiyon sonrası için zeminin yenilmesi durumunda A noktasında oluşan maksimum 0,98 MPa gerilmede %0,0021 birim deformasyona ulaşmıştır. Enjeksiyon öncesi analizde ise yenilme durumunda A noktasında oluşan maksimum 0,82 MPa gerilme altında %0,0035 birim deformasyon hesaplanmıştır.

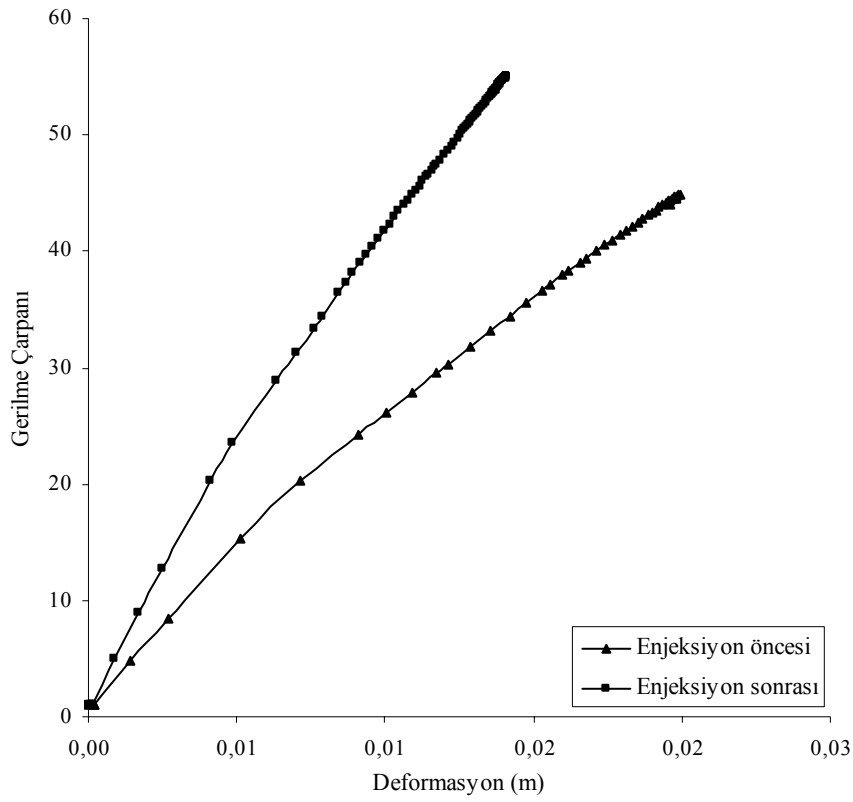


Şekil 6.23: ES-1 sahası A noktasında hesaplanan gerilme çarpanı-deformasyon grafiği



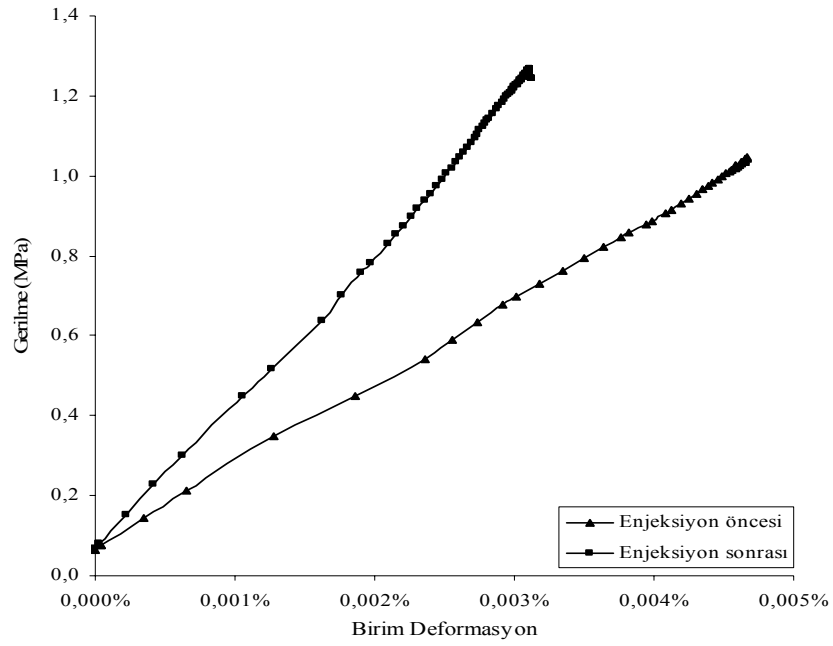
Şekil 6.24: ES-1 sahası A noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği

ES-2 sahasında zemine uygulanan son limit gerilme durumu için, seçilen A noktasında enjeksiyon öncesi ve sonrasında elde edilen gerilme çarpanı ve düşey deformasyon grafiği şekil 6.25'te verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, enjeksiyon sonrasında zeminin yenilmesi için gerekli olan son limit gerilme değeri 2,16 MPa iken enjeksiyon öncesinde zeminin yenilmesi için gerekli olan son limit gerilme değeri 1,76 MPa olarak hesaplanmıştır. ES-2 sahasında enjeksiyon sonrasında hesaplanan son limit gerilme değeri enjeksiyon öncesinde hesaplanan değere göre % 22 oranında artmıştır.



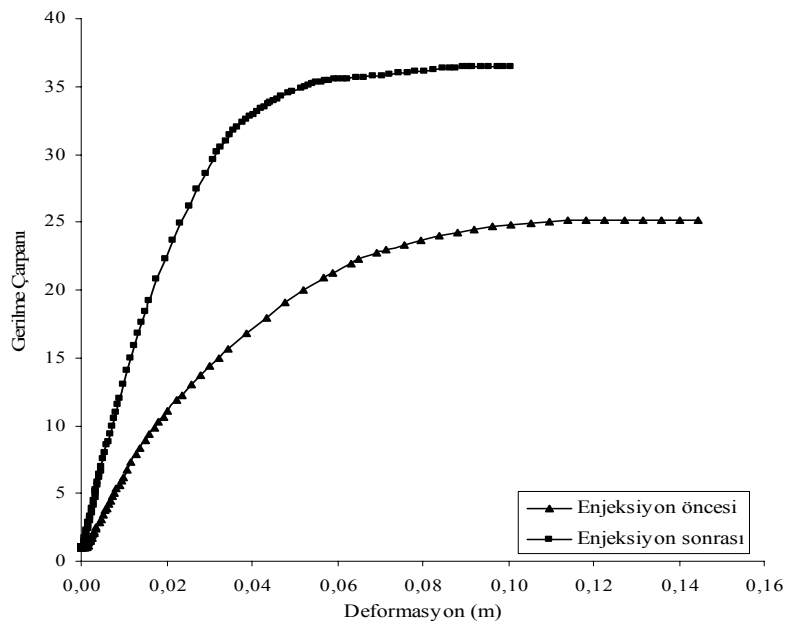
Şekil 6.25: ES-2 sahası A noktasında hesaplanan gerilme çarpanı-deformasyon grafiği

ES-2 sahasında son limit gerilme uygulanırken seçilen A noktasında oluşan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon grafiği şekil 6.26'te verilmiştir. Enjeksiyon sonrası için yenilme durumunda, A noktasında oluşan maksimum 1,27 MPa gerilme durumunda A noktasında %0,0031 birim deformasyon hesaplanmıştır. Enjeksiyon öncesi analizde ise zeminin yenilme anında A noktasında oluşan 1,05 MPa gerilme altında %0,0047 birim deformasyon hesaplanmıştır.



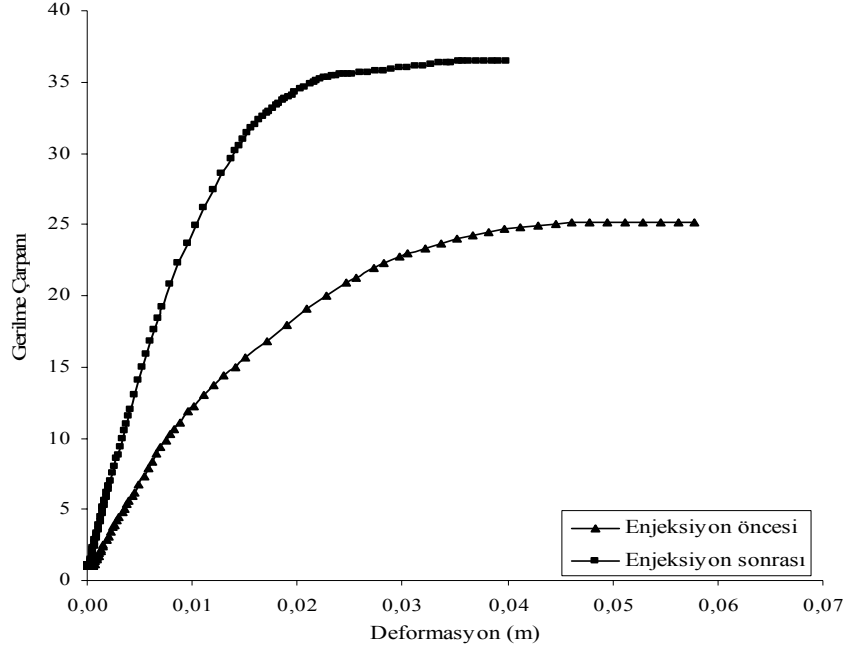
Şekil 6.26: ES-2 sahası A noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği

ES-3 sahasında zemine uygulanan son limit gerilme durumunda, seçilen A noktası için enjeksiyon öncesi ve sonrasında hesaplanan gerilme çarpanı ve düşey deformasyon grafiği şekil 6.27’de verilmiştir. Enjeksiyon sonrasında zeminin yenilmesi için gerekli olan son limit gerilme değeri 1,43 MPa iken enjeksiyon öncesinde zeminin yenilmesi için gerekli olan son limit gerilme değeri 0,99 MPa olarak hesaplanmıştır. ES-3 sahasında enjeksiyon sonrasında hesaplanan son limit gerilme değeri enjeksiyon öncesinde hesaplanan değere göre % 45 oranında artmıştır.



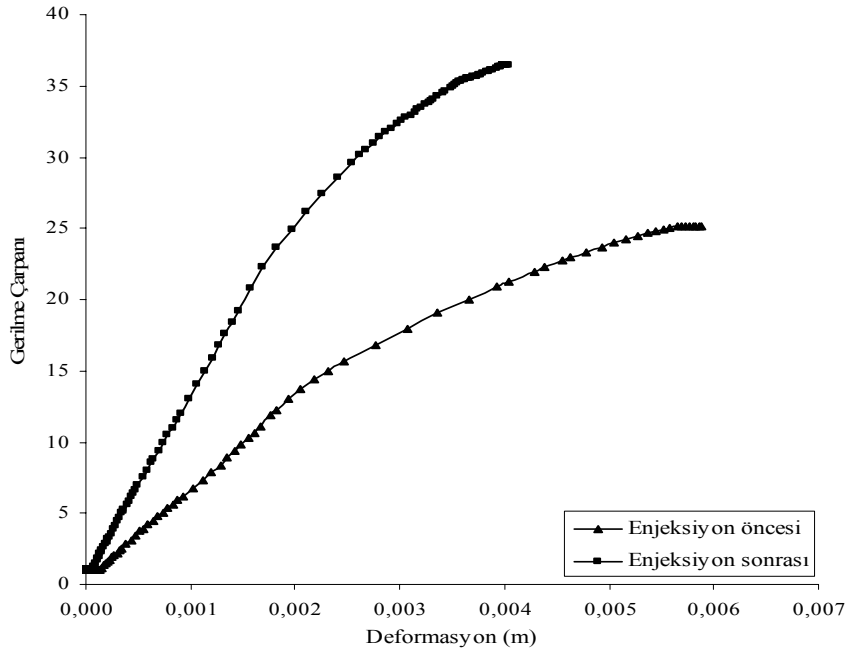
Şekil 6.27: ES-3 sahası A noktasında hesaplanan gerilme çarpanı-deformasyon grafiği

ES-3 sahasında zemine uygulanan son limit gerilme durumunda, seçilen B noktası için enjeksiyon öncesi ve sonrasında hesaplanan gerilme çarpanı ve düşey deformasyon grafiği şekil 6.28’de verilmiştir.



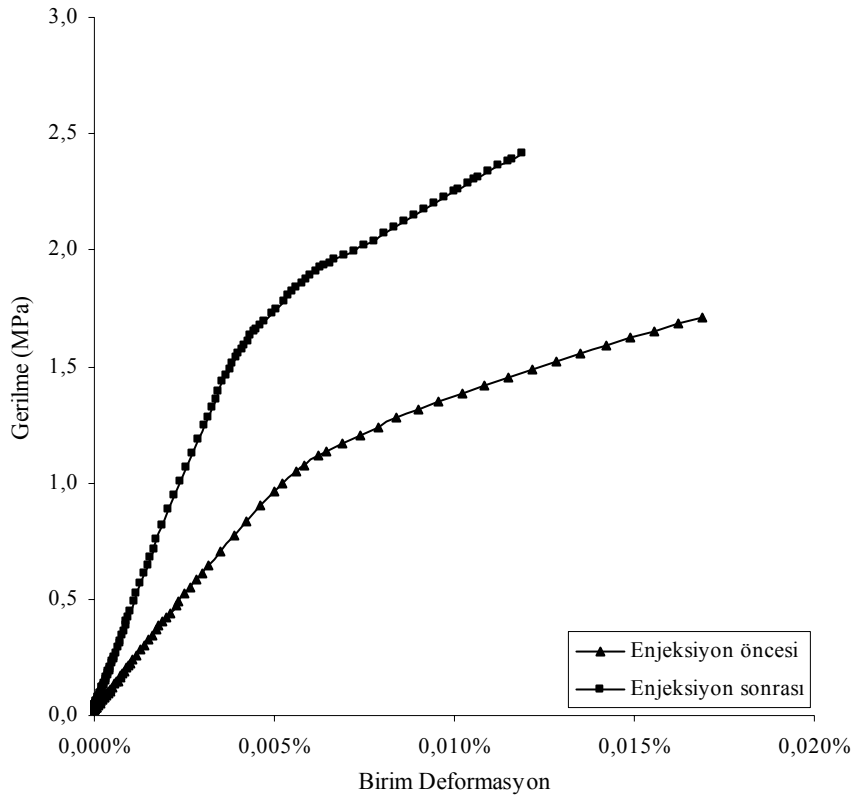
Şekil 6.28: ES-3 sahası B noktasında hesaplanan gerilme çarpanı-deformasyon grafiği

ES-3 sahasında zemine uygulanan son limit gerilme durumunda, seçilen C noktası için enjeksiyon öncesi ve sonrasında hesaplanan gerilme çarpanı ve düşey deformasyon grafiği şekil 6.29’da verilmiştir.



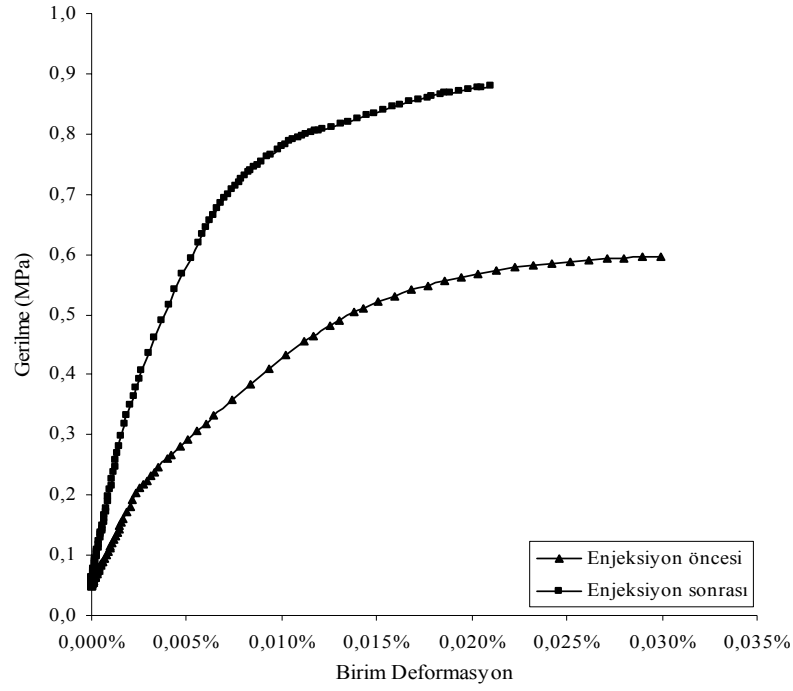
Şekil 6.29: ES-3 sahası C noktasında hesaplanan gerilme çarpanı-deformasyon grafiği

ES-3 sahasında son limit gerilme uygulanırken seçilen A noktasında hesaplanan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon grafiği şekil 6.30'da verilmiştir. Enjeksiyon sonrası için çizilmiş düşey gerilme-düşey birim deformasyon grafiğinde yenilme durumunda A noktasında oluşan 2,41 MPa toplam gerilme durumunda %0,012 birim deformasyon hesaplanmıştır. Enjeksiyon öncesi analizde ise yenilme durumunda A noktasında oluşan toplam 1,71 MPa gerilme altında %0,017 birim deformasyon hesaplanmıştır.



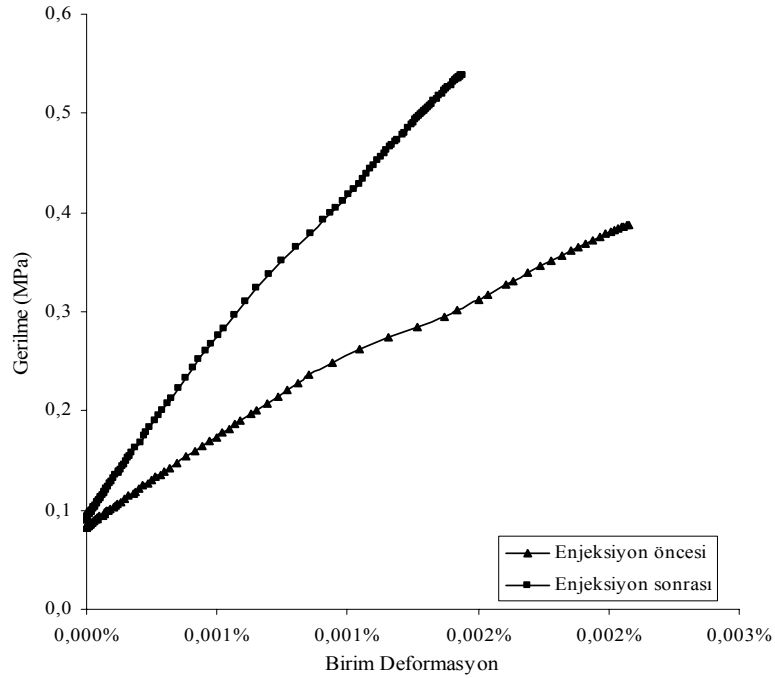
Şekil 6.30: ES-3 sahası A noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği

ES-3 sahasında son limit gerilme uygulanırken seçilen B noktasında oluşan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon grafiği şekil 6.31'da verilmiştir. Enjeksiyon sonrası zeminin yenilme durumunda B noktasında oluşan 0,88 MPa toplam gerilme altında %0,021 birim deformasyon hesaplanmıştır. Enjeksiyon öncesi analizde ise yenilme durumunda B noktasında oluşan 0,60 MPa gerilmede %0,030 birim deformasyon hesaplanmıştır.



Şekil 6.31: ES-3 sahası B noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği

ES-3 sahasında seçilen C noktasında oluşan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon grafiği şekil 6.32’de verilmiştir. Enjeksiyon sonrası için C noktasında oluşan 0,54 MPa toplam gerilme altında %0,0014 birim deformasyon hesaplanmış iken enjeksiyon öncesi analizde ise oluşan 0,39 MPa toplam gerilme altında %0,0021 birim deformasyon hesaplanmıştır.



Şekil 6.32: ES-3 sahası C noktasında hesaplanan düşey gerilme-birim deformasyon grafiği

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Laboratuvarda yapılan düşük basınçlı çimento enjeksiyonuna göre enjeksiyon basıncının artması serbest basınç mukavemetlerini değiştirmemektedir. Enjeksiyon basıncına bağlı olarak numunelerin içyapısında farklılık görülmemektedir. Bu nedenle farklı basınçlar altında yapılan enjeksiyonlarda boşluklar aynı şekilde dolmaktadır. Laboratuvar deneylerine göre, permeasyon enjeksiyonunda elde edilecek iyileştirme miktarı uygulanan enjeksiyon basıncından bağımsızdır.

Laboratuvarda yapılan çalışmalarda, su/çimento oranı arttıkça başarısız enjeksiyon uygulanmış numune sayısının arttığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak harçta çökme miktarı artmakta ve serbest basınç mukavemetinde düşük değerler elde edilmektedir. Arazide yapılacak olan uygulamalarda doğal zeminde yeraltı suyunun bulunduğu göz önüne alınarak düşük s/ç oranında harç kullanılması iyileştirme için daha uygundur. Ayrıca enjeksiyon uygulamasında seçilen çimentonun dayanımı da doğal olarak zemin iyileşmesini etkileyen diğer bir faktördür.

Laboratuvarda yapılan çalışmada, su/çimento oranı 0,7'den daha düşük harçlar ile yapılan enjeksiyonlarda başarılı numune elde edilememiştir. s/ç oranı 1,5'ten yüksek olan harçlarla yapılan enjeksiyonda çimentonun çökme miktarı arttığından başarılı numune sayısı da azalmaktadır. Enjeksiyonda s/ç oranı 0,7 ile 1 arasındaki harçların kullanılması daha uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Laboratuvar çalışmasında elde edilen serbest basınç mukavemetleri harcın çimento/su oranının karesi ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Yapılan istatistiksel çalışmada serbest basınç mukavemeti ve çimento/su oranının karesi arasındaki korelasyon katsayısının 0,93 ile 0,96 arasında kaldığı gözlenmiştir.

Arazi çalışmasında, enjeksiyon uygulanan tabakalara bitişik durumda olan kil tabakalarının da enjeksiyon etkisiyle sıkışarak iyileştiği gözlenmiştir.

Arazide yapılan enjeksiyon uygulamasında 1,50 m'den daha yakın aralıktaki kuyularda enjeksiyon bölgelerinin çakışmasından dolayı enjeksiyon yapılamamıştır. Bu nedenle arazide enjeksiyon kuyuları arasındaki mesafenin 1,50 m seçilmesi enjeksiyon için yeterli olabilir.

Enjeksiyon sonrasında tipik dört katlı bir bina yükü altında zeminde oluşan deformasyonlar, sonsuz elemanlar metodu ile yapılan analizlerde, enjeksiyon öncesine göre %50 oranında azalmıştır. Ayrıca enjeksiyon sonrasında zeminin son limit gerilmesi de %22 ile %45 arasında artmıştır.

Laboratuvar çalışmalarında, GP malzemesinde maksimum serbest basınç mukavemeti, %100 relatif sıklıkta elde edilmiştir. Harç bu malzemede %100 relatif sıklıktaki numunenin boşluklarına zemin danelerini yer değiştirmesine sebep olmadan girebilmekte ve boşlukları doldurabilmektedir. SP malzemesinde ise maksimum serbest basınç mukavemeti %50 relatif sıklıkta elde edilmiştir. Bu malzemenin %100 relatif sıklığında boşluklar harcın tam olarak girmesi için yeterli olmadığından en yüksek serbest basınç mukavemeti elde edilememiştir. Buna karşılık %50 relatif sıklıkta en fazla miktarda boşluğu doldurabildiği için en sıkı duruma göre daha yüksek mukavemetler elde edilebilmektedir. Laboratuvar çalışmalarında en yüksek serbest basınç mukavemeti olarak 19,83 MPa değeri, SP sınıfı malzemenin %50 relatif sıklıktaki numunesine s/ç oranı 0,7 olan harç ile yapılan enjeksiyon uygulamasında elde edilmiştir.

Permeasyon enjeksiyonunda, enjeksiyonun uygulanabilmesi için gerekli olan enjeksiyon basıncı, uygulama bölgesindeki hidrostatik su basıncından büyük olmalıdır. Enjeksiyon basıncının hidrostatik su basıncından daha büyük seçilmesi sadece enjeksiyon uygulama noktasında bölgenin hacmini büyütmektedir. Enjeksiyon basıncı uygulama bölgesindeki yatay efektif gerilme ve hidrostatik su basıncının toplamından daha büyük seçildiğinde kompaksiyon enjeksiyonu uygulamasına neden olmaktadır. Eğer enjeksiyon basıncı kompaksiyon enjeksiyonu için gerekli olandan daha da büyük seçilirse zeminde çatlamalara neden olabilir ve çatlatma enjeksiyonu uygulanmış olur.

KAYNAKLAR

Aitcin, P., Ballivy, G., Parizeau, R., “The Use of Condensed Silica Fume in Grouts,” *Innovative Cement Grouting*, American Concrete Institute, 1–18, (1984).

Akbulut, S., “Enjeksiyon ile Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1999).

Akbulut, S., Sağlamer A., “Estimating The Groutability of Granular Soils: A New Approach”, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 17, 371-380, (2002).

Anagnostopoulos, C., A., “Laboratory Study of an Injected Granular Soil with Polymer Grouts”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 525–533, (2005).

Andrus, R. D., Chung R. M., “Ground Improvements Techniques for Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines”, *National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5714*, (1995).

Ata, A., Vipulanandan, C., "Silicafume in Silicat and Cement Grouts and Grouted Sands", *Proceedings, Grouting: Compaction, Remediation and Testing*, 242-257, (1997).

Axelsson, M., “Mechanical Tests on a New Non-Cementitious Grout, Silica Sol: a Laboratory Study of The Material Characteristics”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 554–560, (2006).

Bezuijen, A., Talmon, A., M., “Grout Pressures Around a Tunnel Lining, Influence of Grout Consolidation and Loading on Lining”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 443–444, (2004).

Bolton, M.D., Chin, C.Y., Lu, Y.C., “Compensation Grouting”, *Lee & Tan*, (1994).

Bouchelaghem, F., Almosni, A., “Experimental Determination of the Longitudinal Dispersivity During the Injection of a Micro-Cement Grout in a One-Dimensional Soil Column”, *Transport in Porous Media*, 52, 67–94, (2003).

Bouchelaghem, F., Benhamida, A., Dumontet, H., “Mechanical Damage Behaviour of an Injected Sand by Periodic Homogenization Method”, *Computational Materials Science*, 38, 473–481, (2007).

Chen, Y., Nishiyama, T., Terada, M., Iwamoto, Y., “A Fluorescent Approach to The Identification of Grout Injected into Fissures and Pore Spaces”, *Engineering Geology*, 56, 3111-3123, (2000).

Chupin, O., Saiyouri, N., Hicher, P.Y., “Numerical Modeling of Cement Grout Injection Insaturated Porous Media”, *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, 16-18 Temmuz (2003).

Coric, M.S., Khayat, K.H., Hamou A.T. “Performance Characteristics of Cement Grouts Made with Various Combinations of High-Range Water Reducer and Cellulose-Based Viscosity Modifier”, *Cement and Concrete Research*, 33, 1999–2008, (2003).

Coulter, S., Martin, C., D., “Single Fluid Jet-Grout Strength and Deformation Properties”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 690–695, (2006).

Çinicioğlu, F., “Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu”, *Birsen Yayınevi*, (1997).

Gallagher, P., M., Mitchell, J., K., “Influence of Colloidal Silica Grout on Liquefaction Potential and Cyclic Undrained Behavior of Loose Sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1017-1026, (2002).

Gallagher, P.M., Mitchell, J.K. “Influence of Colloidal Silica Grout on Liquefaction Potential and Cyclic Undrained Behavior of Loose Sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1017–1026, (2002).

Gambin, N., P., “Lateral Static Densification at Monaco-Design, Construction, and Testing”, *Deep Foundation Improvements: Desire, Construction, and Testirw. ASTM*, 248-265. (1991).

Ghobadi, M., H., Khanlari, G., R., Djalaly, H., “Seepage Problems in The Right Abutment of The Shahid Abbaspour Dam, Southern Iran”, *Engineering Geology*, 82, 119– 126, (2005).

Graf, E., D., Zacher, E., G., “Sand to Sandstone: Foundation Strengthening with Chemical Grout,” *Civil Engineering, ASCE*, 67-69. (1979).

Greenwood, D., A., “Report on Session 1: Permeation Grouting,” *Proceeding, Grouting in the Ground*, 71-90. (1994).

Hanaka, M., Uchida, A., “Emprical Correlation Between Penetration Resistance and Intenal Friction Angle of Sandy Soils”, *Soils and Foundation*, 36, 1-10, (1996).

Hontoria, E., Sanchez, M., “Ground injections”, *Technology Innovation in Underground Construction, D2.4.4.1.*, 6-16, (2006).

Hussin, J.,D., Ali S, “Soil Improvement at the Trident Submarine Facility,” *Proceedings, Soil Immovevement-A Ten Year: Geotechnical Special Publication*, 12, 215-231, (1987).

- Incecik, M., Ceren, I., “Cement Grouting Model Tests”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Bülteni*, 2, (1995).
- Ishihara, K., Kokusho, T., Silver, M., L., “Recent Developments in Evaluating Liquefaction Characteristics of Local Soils”, *12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2719-2734, (1989).
- John, R., C., “Engineering and Design Chemical Grouting”, *U.S. Army Corps of Engineers, EM 1110-1-3500*, (1995).
- JSCE, “Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structure, Earth Structure and Foundation in Japan”, *Japan Society of Civil Engineers*, (1977).
- Kasper, T., Meschke, G., “A Numerical Study of The Effect of Soil and Grout Material Properties and Cover Depth in Shield Tunnelling”, *Computers and Geotechnics*, 33, 234–247, (2006).
- Kavanaugh, P., F., “Engineering and Design Grouting Technology”, *U.S. Army Corps of Engineers, EM 1110-2-3506*, (1984)
- Krizek, R., J., Liao, H., J., Borden, R., H., “Mechanical Properties of Micro Fine Cement/Sodium Silicate Grouted Sand”, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 688-699, (1992).
- Krizek, R., J., Michel, D., F., Helal, M., Borden, R., H., “Engineering Properties of Acrylate Polymer Grout”, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 712-724, (1992).
- Krizek, R.J., Helal, M., “Anisotropic Behavior of Cement-Grouted Sand”, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 541-550, (1992).
- Ku, C., S., Lee, D., H., Wu, J., H., “Evaluation of Soil Liquefaction in the Chi-Chi, Taiwan Earthquake Using CPT”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 659–673, (2004).
- Kutzner, C., “Grouting of Rock and Soil”, *A.A. Balkema*, (1996).
- Liao, H., J., Krizek, R., J., Borden, R., H., “Micro Fine Cement/Sodium Silicate Grout”, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 676-687, (1992).
- Littlejohn, G.,S., “Chemical Grouting”, *CRC Press, Inc.*, 100-130, (1993).
- Lowther, J., Gabr, M. A., “Permeability and Strength Characteristics of Urethane-Grouted Sand”, *Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE*, 66, 258-270, (1997).

Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., “Cone Penetration Testing”, *Blackie Academic and Professional*.

Maghous, S., Saada, Z., Dormieux, L., Canou, J., Dupla, J., C., “A Model for in-situ Grouting with Account for Particle Filtration”, *Computers and Geotechnics*, (2007)

McFarlane, T.S., Holtz, R.D., “Selection and Laboratory Evaluation of Modifying Additives for Soil-Cement-Bentonit”, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 1006-1018, (1992).

Mitchell, J., K., Wentz, F.,J., “Performance of Improved Ground During the Loma Prieta Earthquake”, *Earthquake Engineering Research Center, UCB/EERC-9 1/12*, 93, (1991).

Mori, A., Tamura, M., Hayashi, H., Shibata, H., “Some Factors Related to Injected Shape in Grouting”, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 313-324, (1992).

Nguyen, V., H., R’emond, S., Gallias, J., L., Bigas, J., P., Muller, P., “Flow of Herschel–Bulkley Fluids Through The Marsh Cone”, *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 139, 128–134, (2006).

Nonveiller, E., “Grouting Theory and Practice”, *Elsevier Science Publishing Company*, (1989)

Parry, R.H.G., “ A Direct Method of Estimating Settlement in Sand From SPT Values”, *Symposium Interaction of Structure and Foundation*, 29-37, (1977).

Perez, J., Y., Davidson, R., R., and Lacroiz, Y., “Lock and Dam No. 26 Chemical Grouting Test Program,” *Geotechnique, Institution of Civil Engineers*, 32, 217-233, (1982).

Perret, S., Ballivy, G., Khayat, K., Mnif, T., “Injectability of Fine Sand with Cement-Based Grout”, *Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE*, 66, 289-305, (1997).

Roussel, N., Roy, L., R., “The Marsh cone: a test or a rheological apparatus?”, *Cement and Concrete Research*, 35, 823-830, (2005).

Salley, J., R., Foreman, B., Baker, W., H., and Henry, J., F., “Compaction Grouting Test Program--Pinopolis West Dam”, *Proceedings. Soil Improvement--A Ten Year, Geotechnical Special Publication*, 12, 245–269, (1987).

Schwarz, L.G., Krizek, R.J., “Effects of Mixing on Rheological Properties of Microfine Cement Grout”, *Grouting, Soil Improvements and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 512-525, (1992).

Sharma, S., Raghuvanshi, T., Sahai, A., “An engineering geological appraisal of the Lakhwar Dam, Garhwal Himalaya, India”, *Engineering Geology*, 53, 381–398, (1999).

Shroff, A., V., Shah, D., L., “Time-Viscosity Relationships of Newtonian and Binghamian Grouts”, *Grouting Soil Improvements and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 663-675, (1992).

Snuparek, R., Soucek, K., “Laboratory Testing of Chemical Grouts”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15, 175-185, (2000)

Soga, K., Au, S. K. A., Jafari, M. R., Bolton, M. D., “Laboratory Investigation of Multiple Grout Injections into Clay”, *Geotechnique*, 54, No. 2, 81–90, (2004).

Stroud, M. A. “ The Standart Penetration Test in Insensitive Clays and Sof-Rocks” *Symposium on Penetration Testing*, 367-375, (1974).

Tosca S. Z., and Evans, J. C., "The Effects of Fillers and Admixtures on Grout Performance," *Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics, ASCE*, 66, 337-349, (1992).

Toumbakaria, E.E., Gemert, D.V., Tassios, T.P., Tenoutasse, N., “Effect of Mixing Procedure on Injectability of Cementitious Grouts”, *Cement and Concrete Research*, 29, 867-872, (1999).

Türkmen, S., “ Treatment of The Seepage Problems at The Kalecik Dam (Turkey)”, *Engineering Geology*, 68, 159–169, (2003).

Vipulanandan, C., Jasti, V., Reddy, G., “Behavior of Lightweight Cementitious Cellular Grouts”, *Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE*, 66, 197-211, (1997).

Vipulanandan, C., Shenoy, S., “Properties of Cement Grouts and Grouted Sands with Additives”, *Grouting, Soil Improvements and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 500-511, (1992).

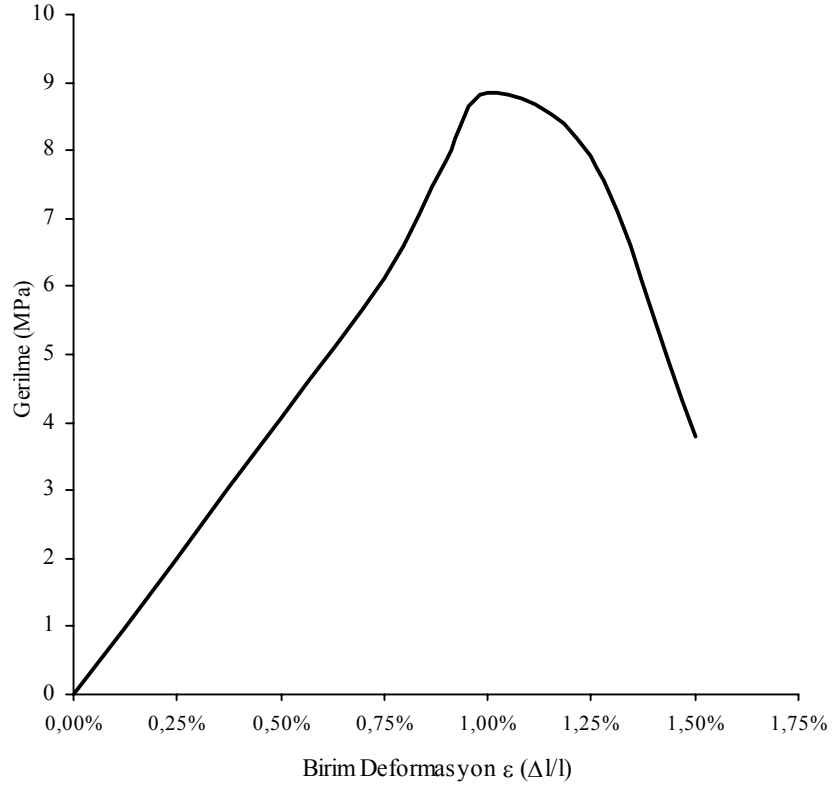
Warner, J., “Compaction Grouting-The First Thirty Years”, *Grouting in Geotechnical Engineering*, 694-707, (1982)

Warner, J., “Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures”, *John Wiley and Sons*, (2004).

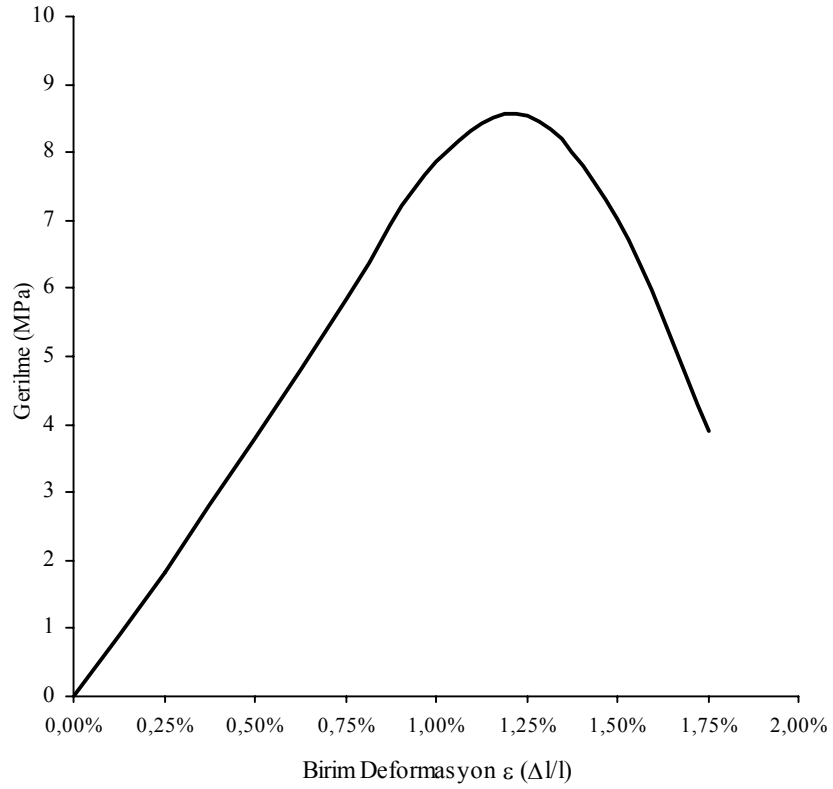
Yıldırım, S., “Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı”, *Birsen Yayınevi*, (2004).

EK-A

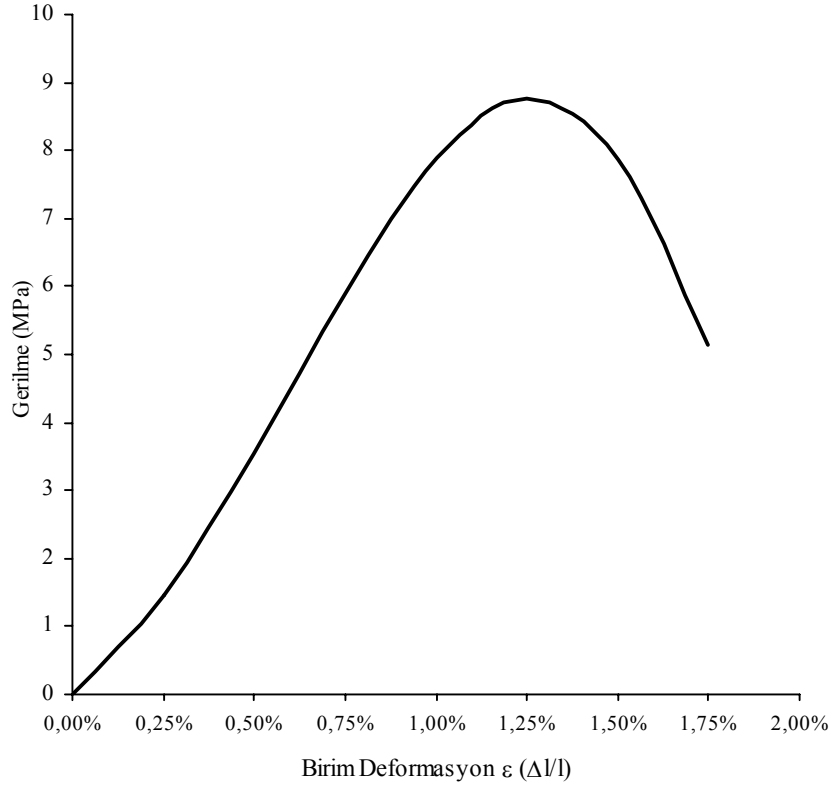
GP Numunesi 7 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)										
Dr	S/Ç	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa
25%	0,7	8,85	8,91	8,78	8,49	8,54	8,56	8,76	8,81	8,74
	1	2,40	2,45	2,36	2,61	2,54	2,49	2,24	2,20	2,29
	1,5	0,82	0,79	0,84	0,76	0,80	0,75	0,82	0,84	0,89
50%	0,7	8,07	8,11	8,08	8,10	8,08	8,14	8,07	8,04	8,17
	1	2,72	2,75	2,69	2,68	2,91	2,77	2,63	2,54	2,72
	1,5	0,71	0,65	0,76	0,74	0,69	0,70	0,70	0,67	0,73
75%	0,7	7,67	7,50	7,40	7,75	7,90	7,59	7,37	7,46	7,28
	1	2,92	2,88	2,97	2,86	2,83	2,81	2,97	2,96	3,05
	1,5	1,03	0,98	1,08	1,15	1,20	1,34	1,12	1,18	1,05
100%	0,7	8,28	8,35	8,20	8,70	8,85	8,56	8,49	8,42	8,38
	1	3,15	3,19	3,09	3,74	3,87	3,60	3,21	3,35	3,46
	1,5	1,62	1,49	1,55	1,39	1,32	1,46	1,75	1,82	1,68



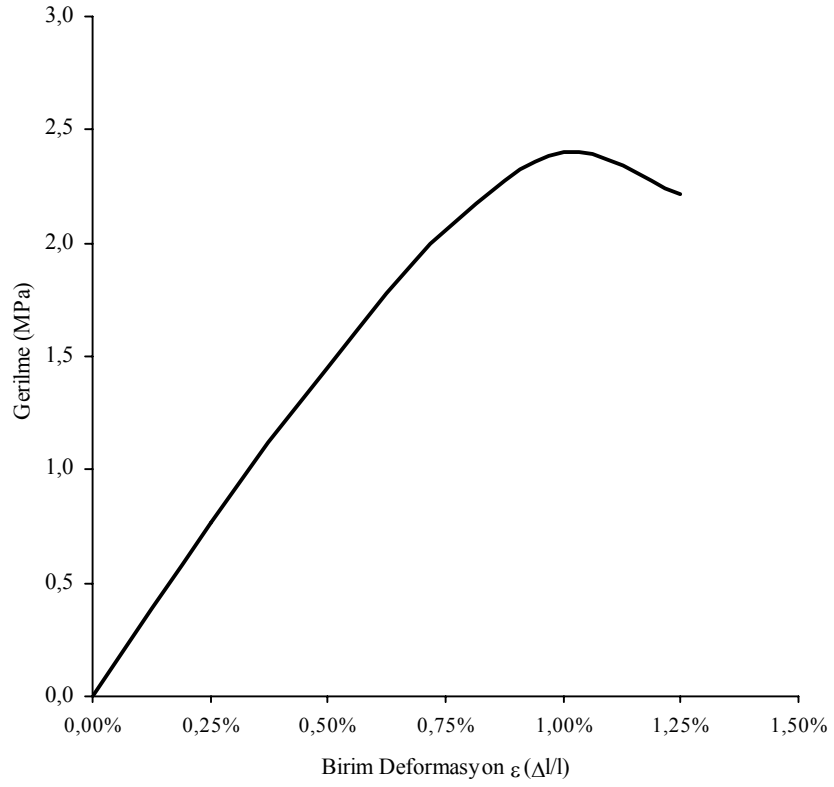
Şekil A.1: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



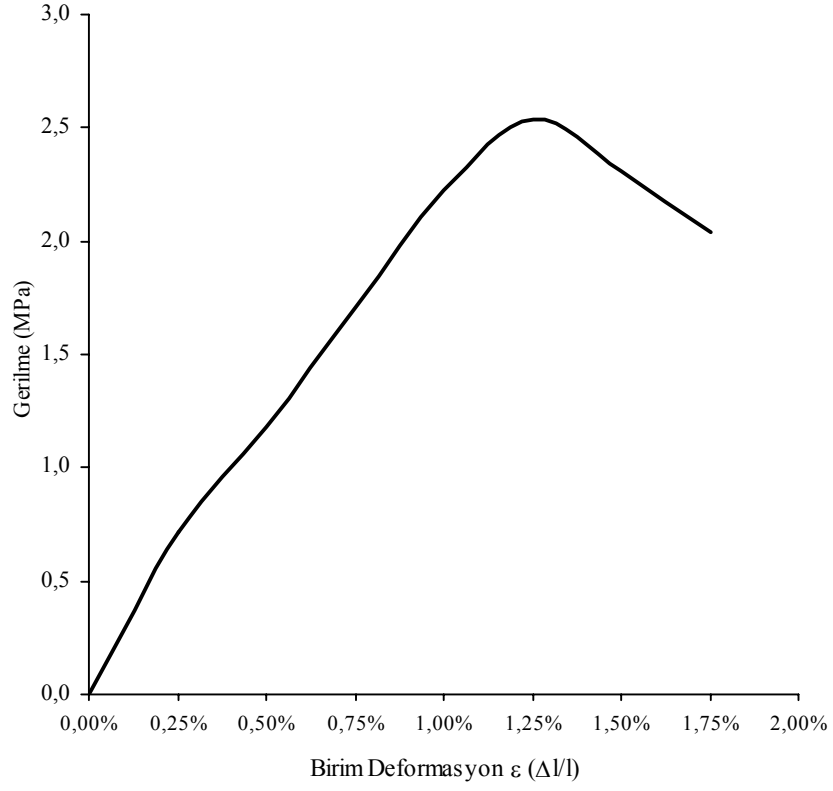
Şekil A.2: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



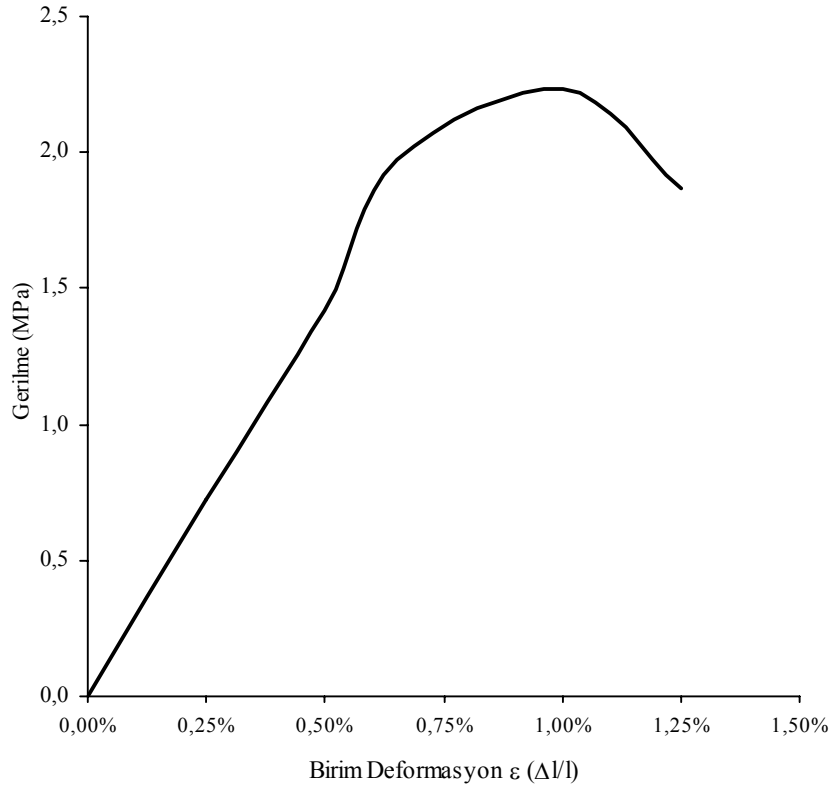
Şekil A.3: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



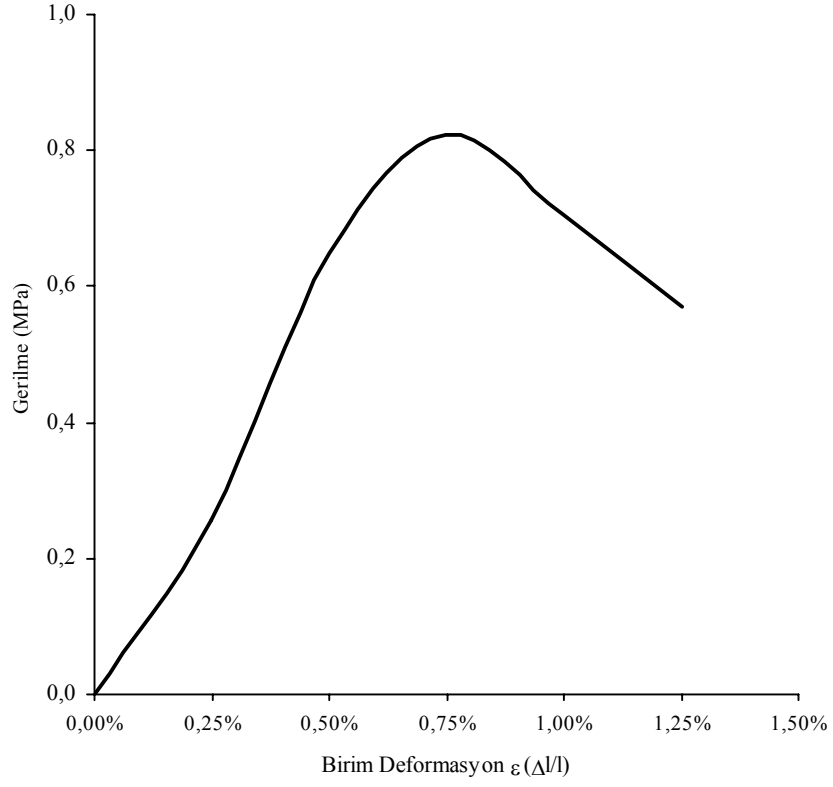
Şekil A.4: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



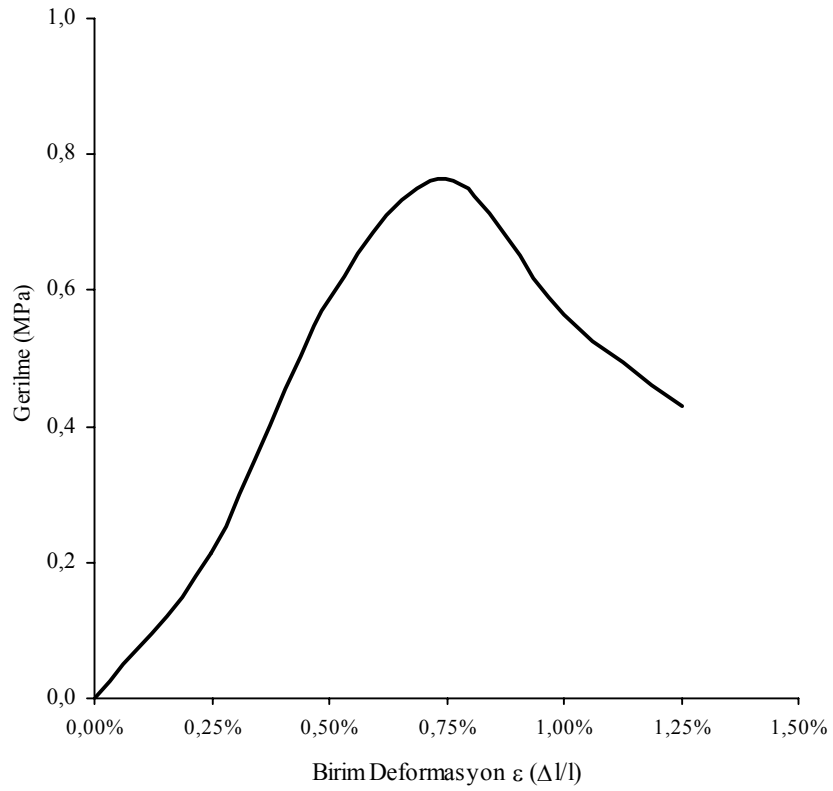
Şekil A.5: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



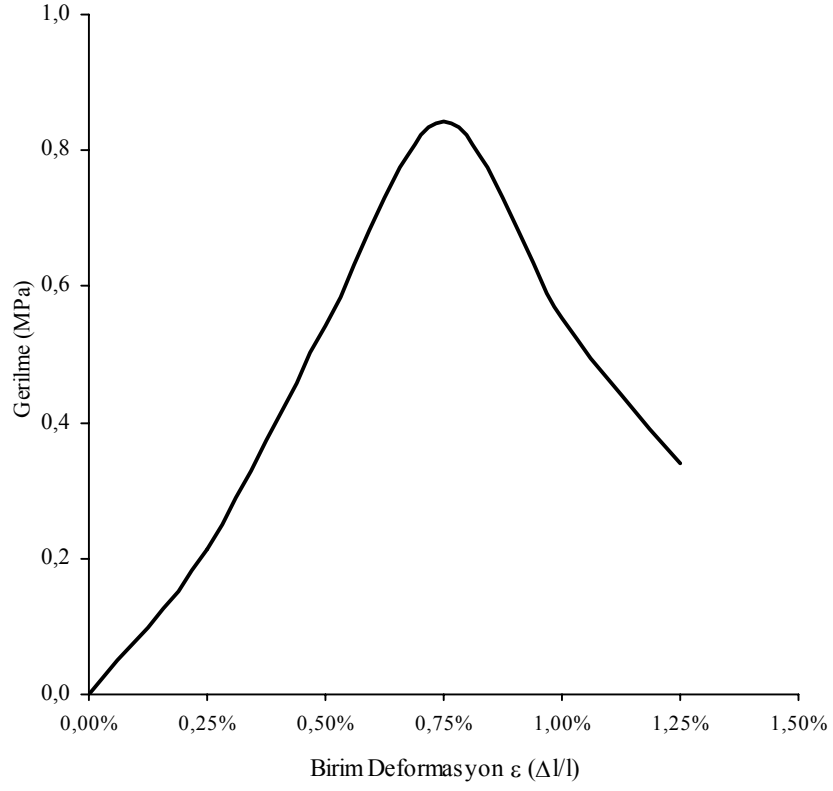
Şekil A.6: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



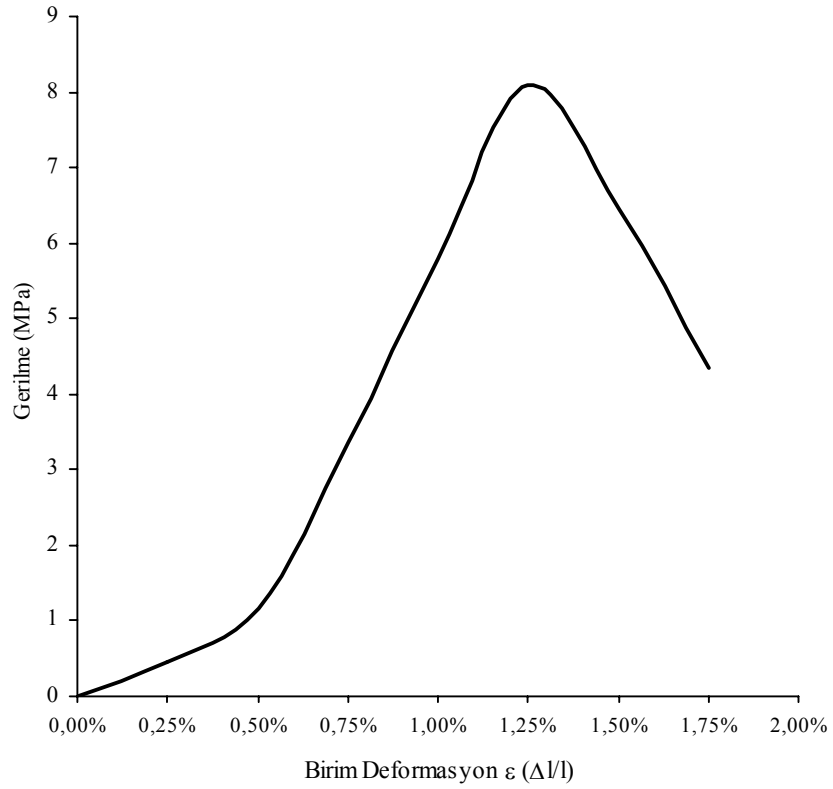
Şekil A.7: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



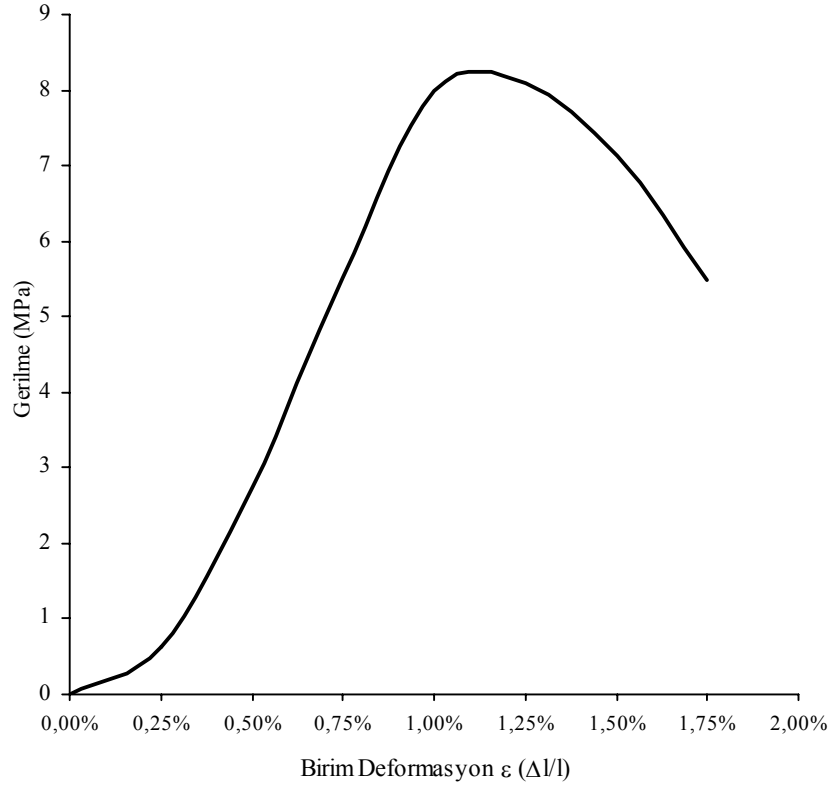
Şekil A.8: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



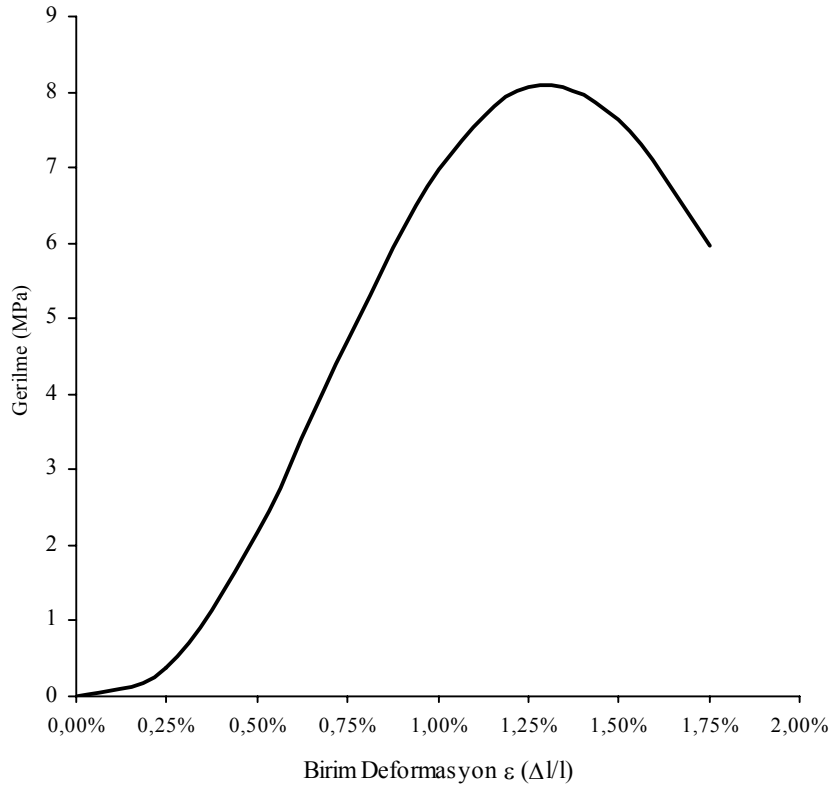
Şekil A.9: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



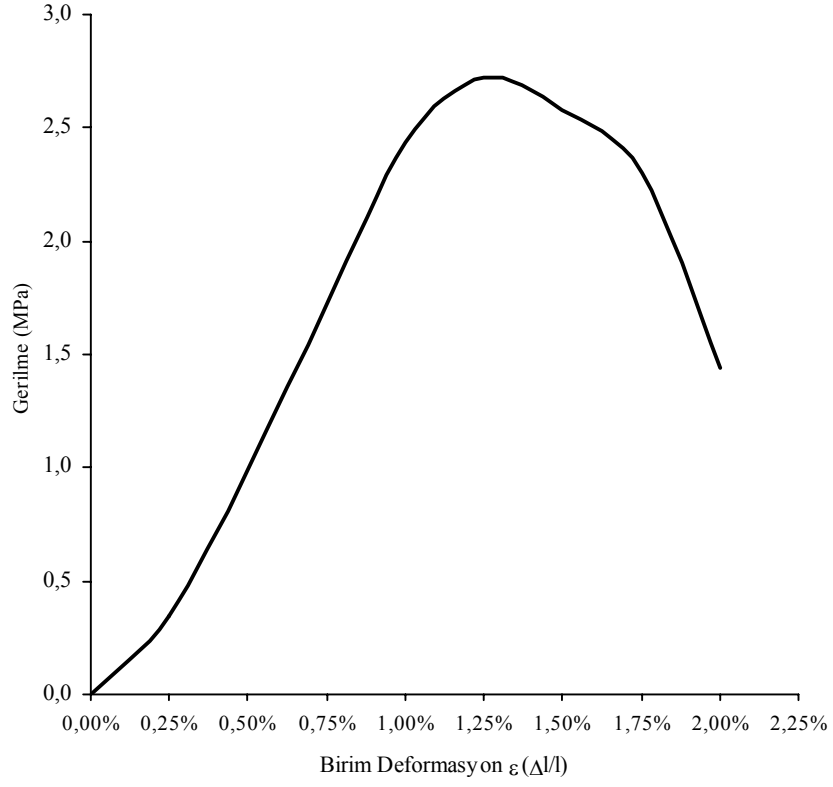
Şekil A.10: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



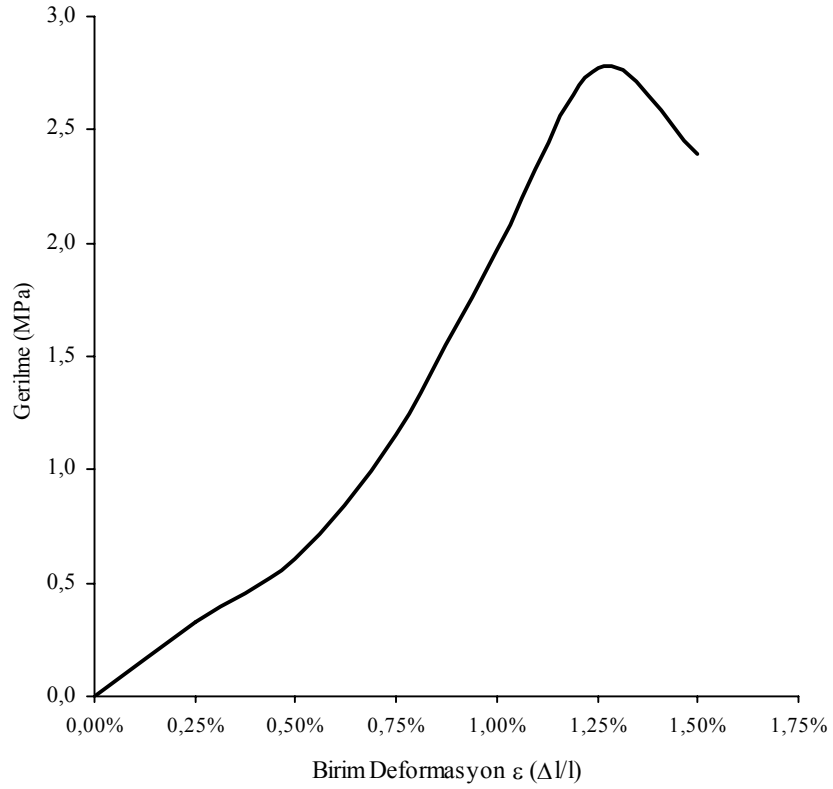
Şekil A.11: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



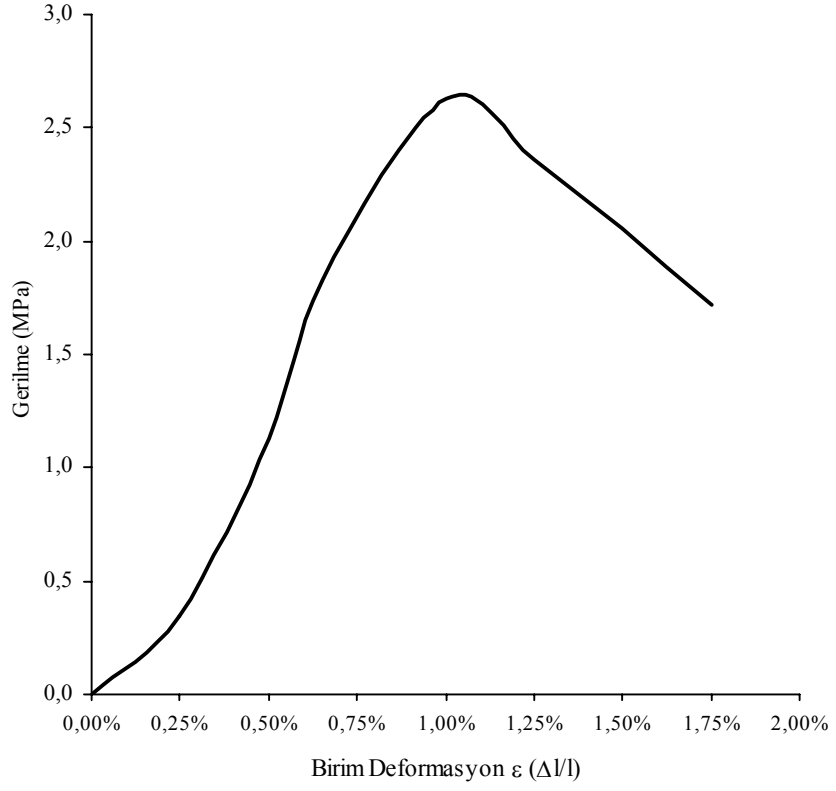
Şekil A.12: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



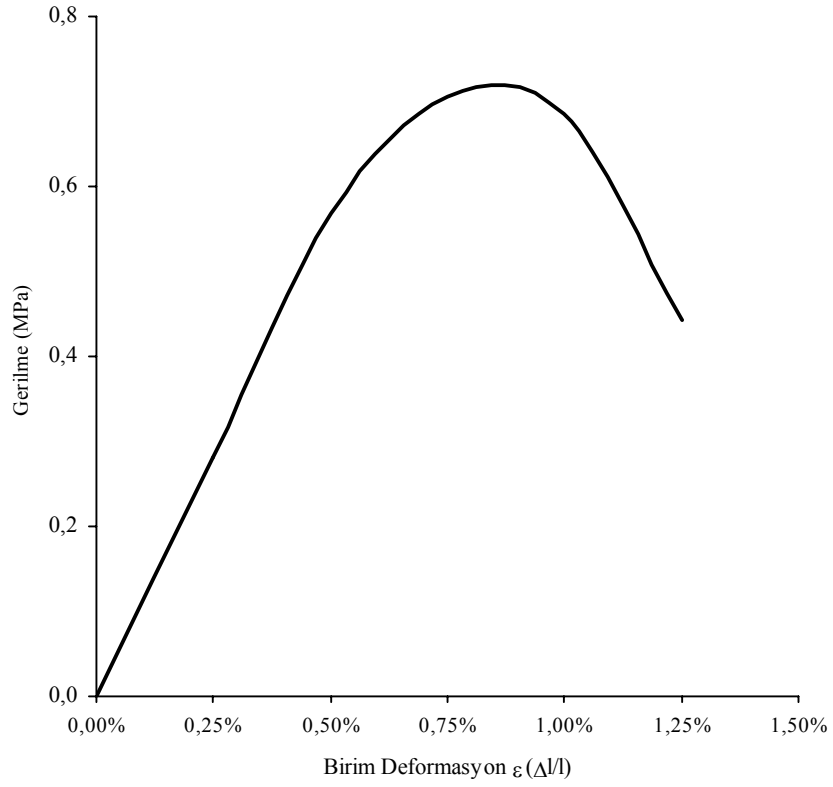
Şekil A.13: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



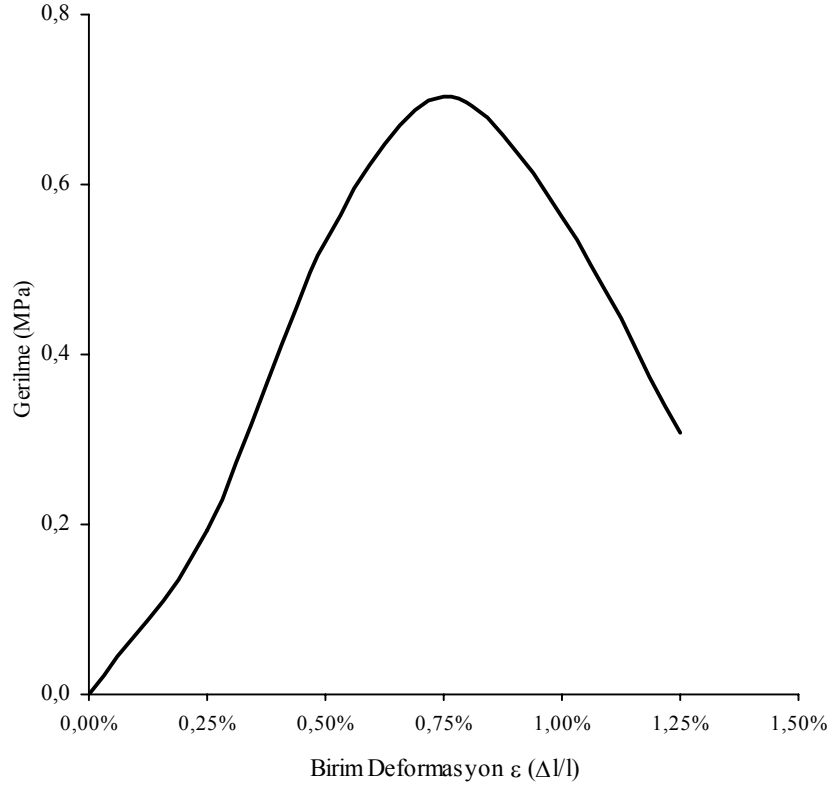
Şekil A.14: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



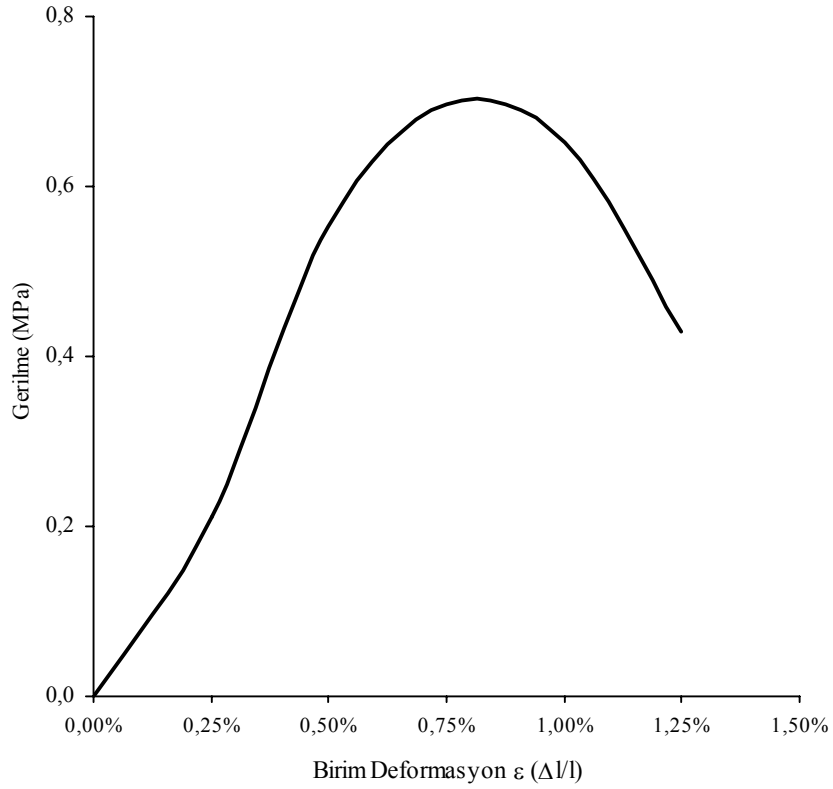
Şekil A.15: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



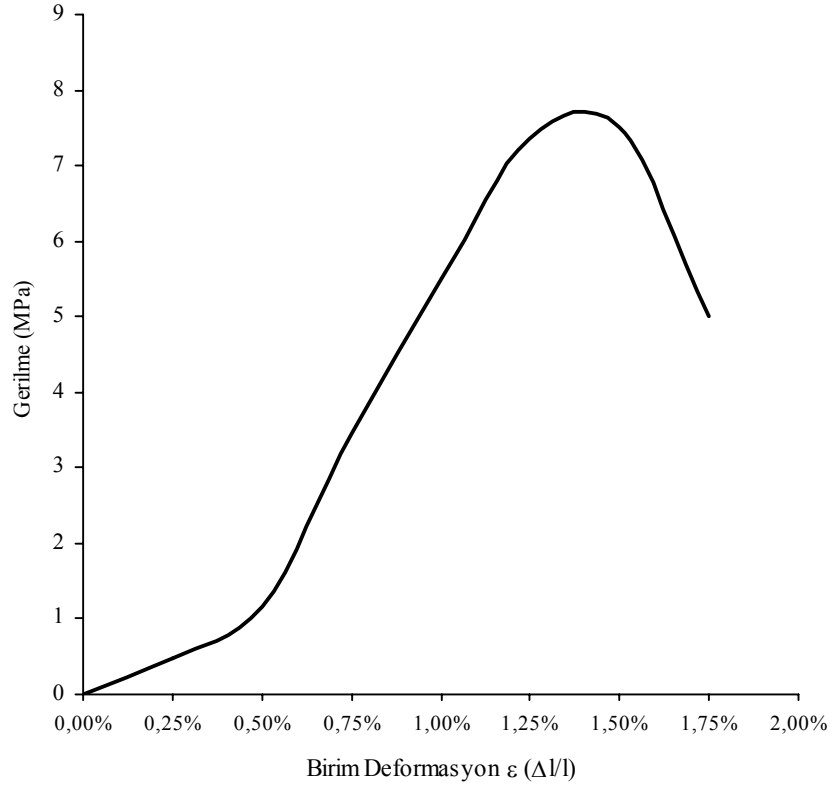
Şekil A.16: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



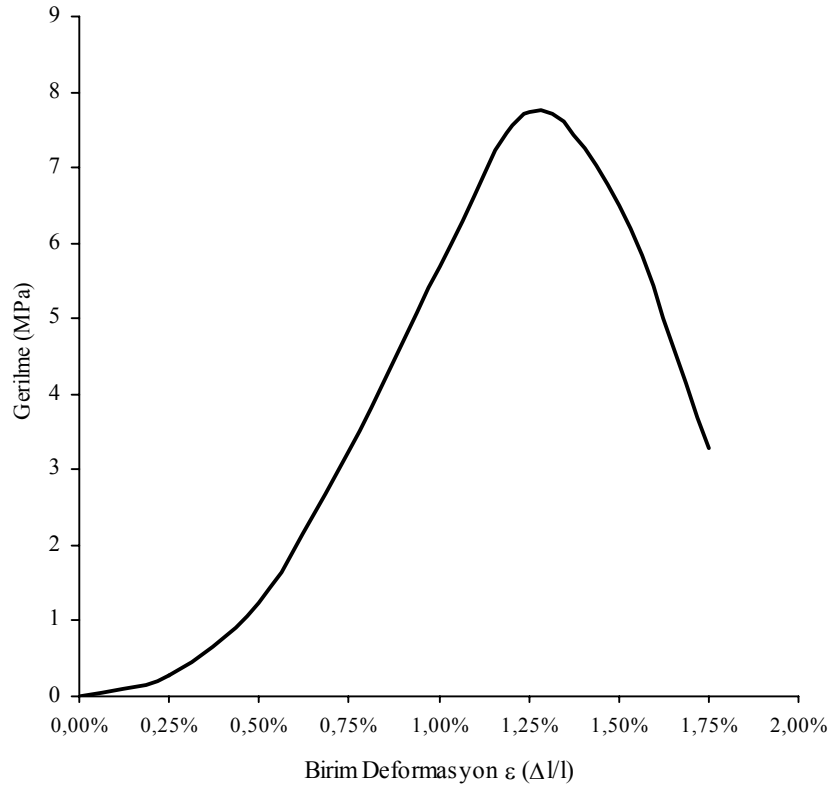
Şekil A.17: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



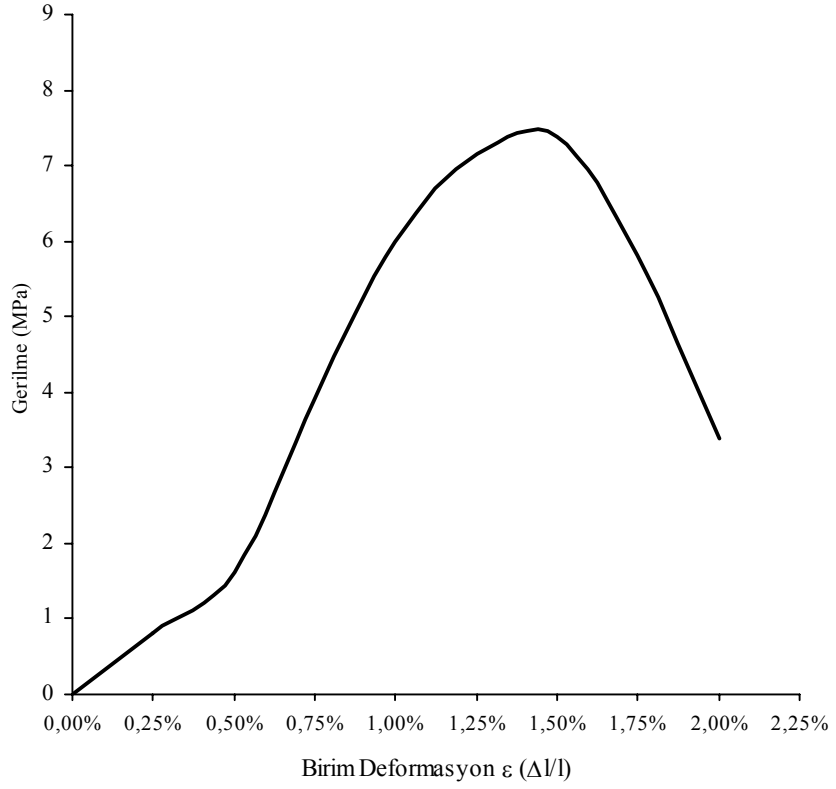
Şekil A.18: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



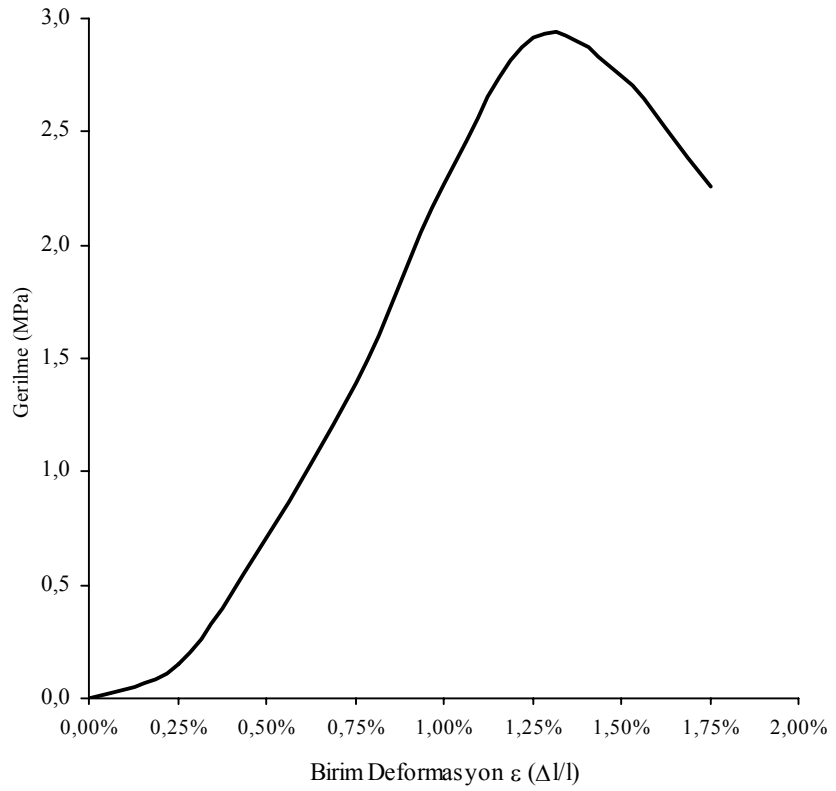
Şekil A.19: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



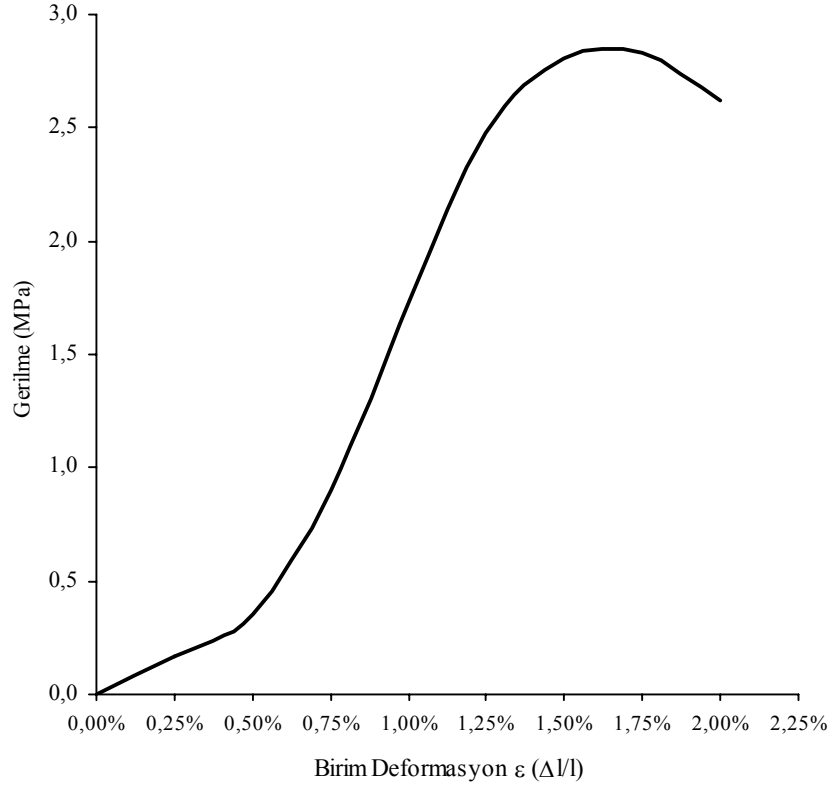
Şekil A.20: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



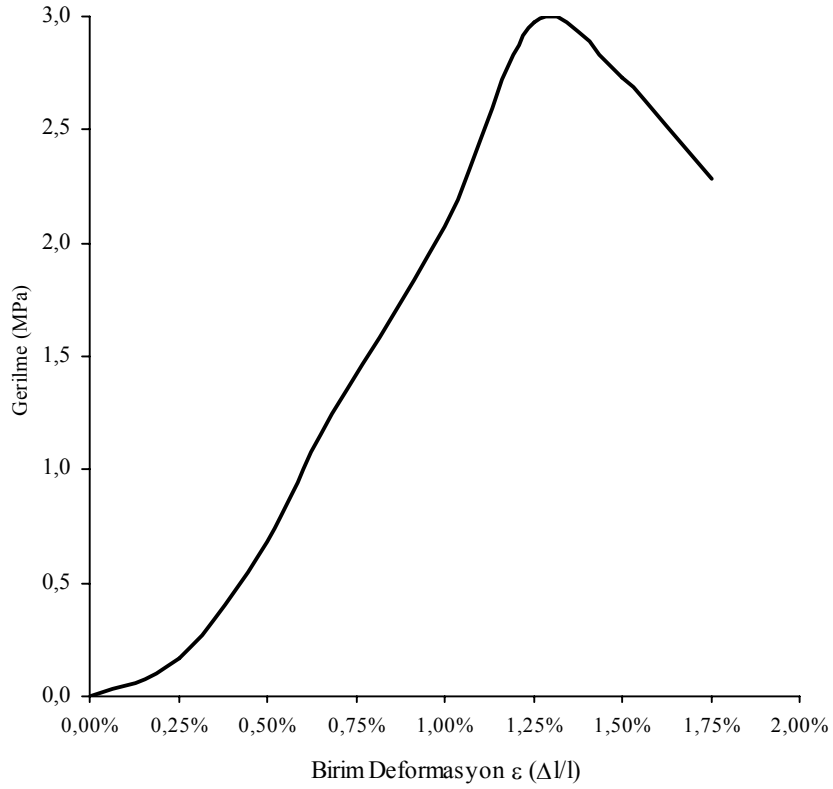
Şekil A.21: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



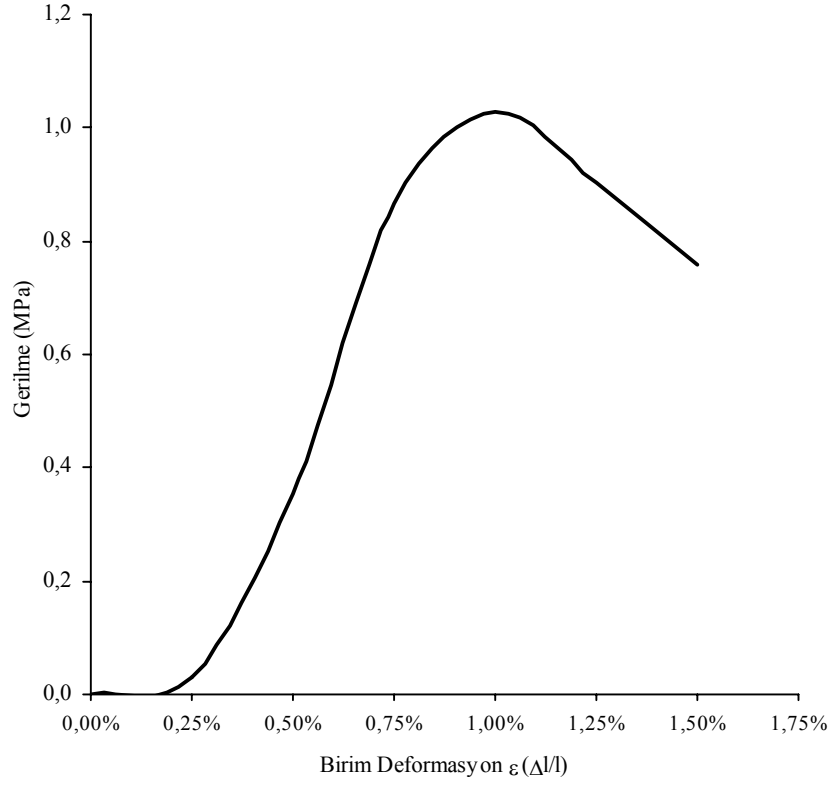
Şekil A.22: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



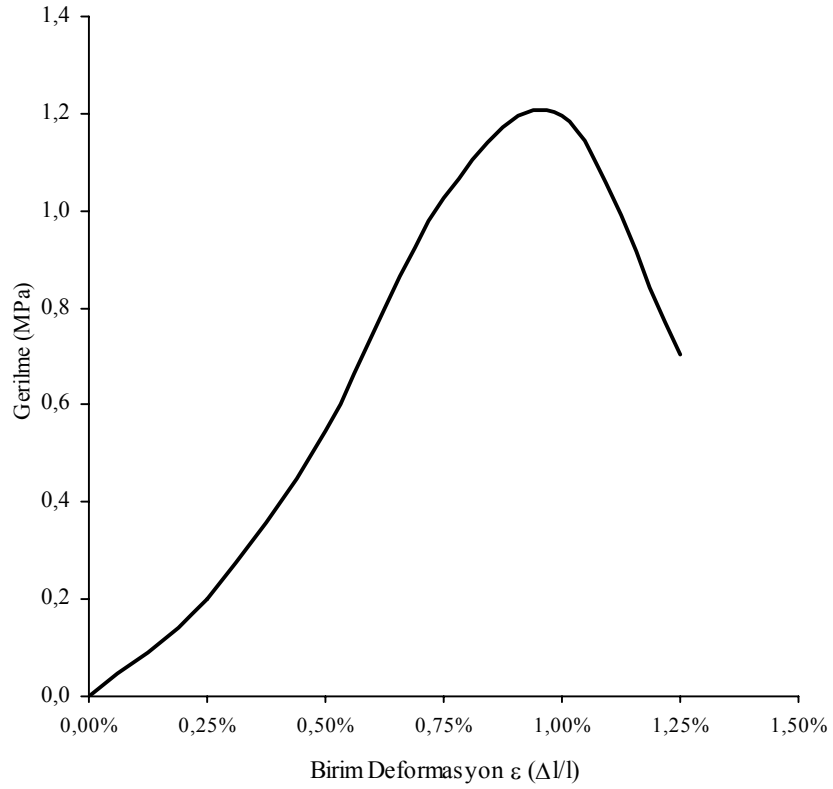
Şekil A.23: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



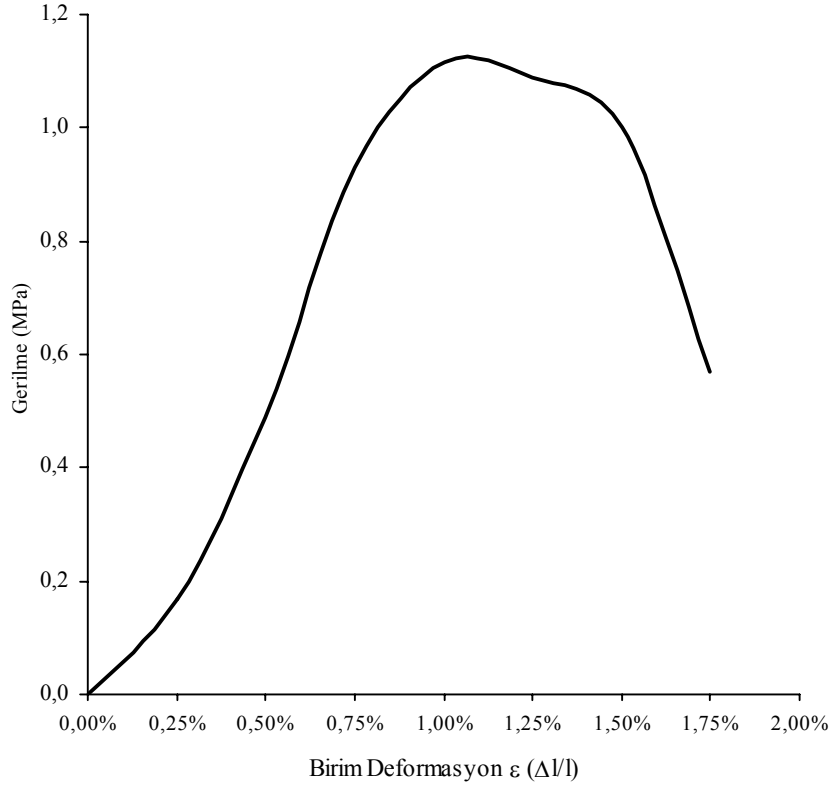
Şekil A.24: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



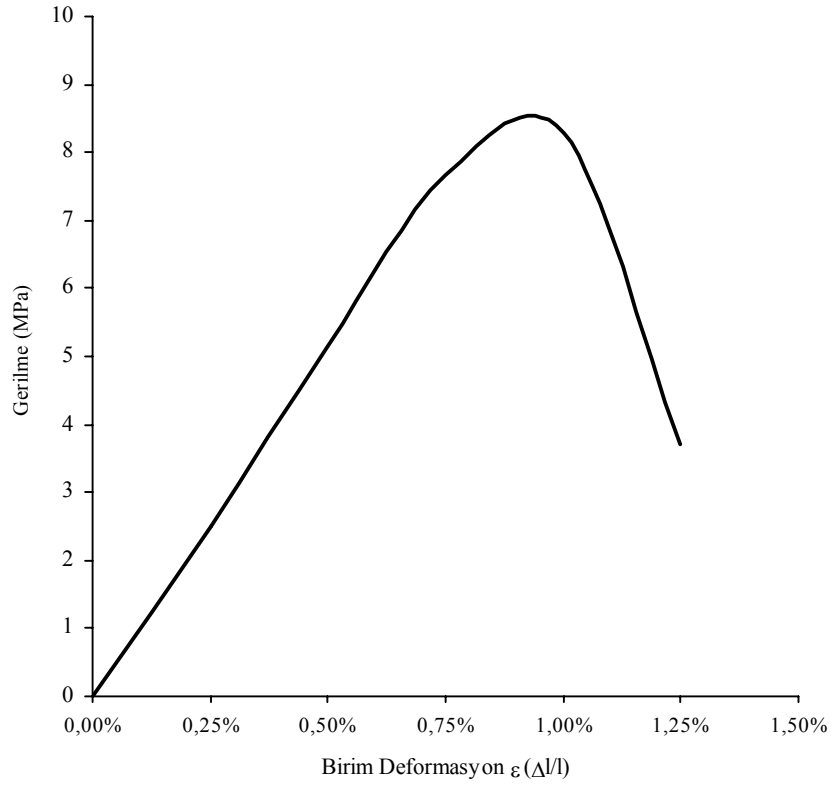
Şekil A.25: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



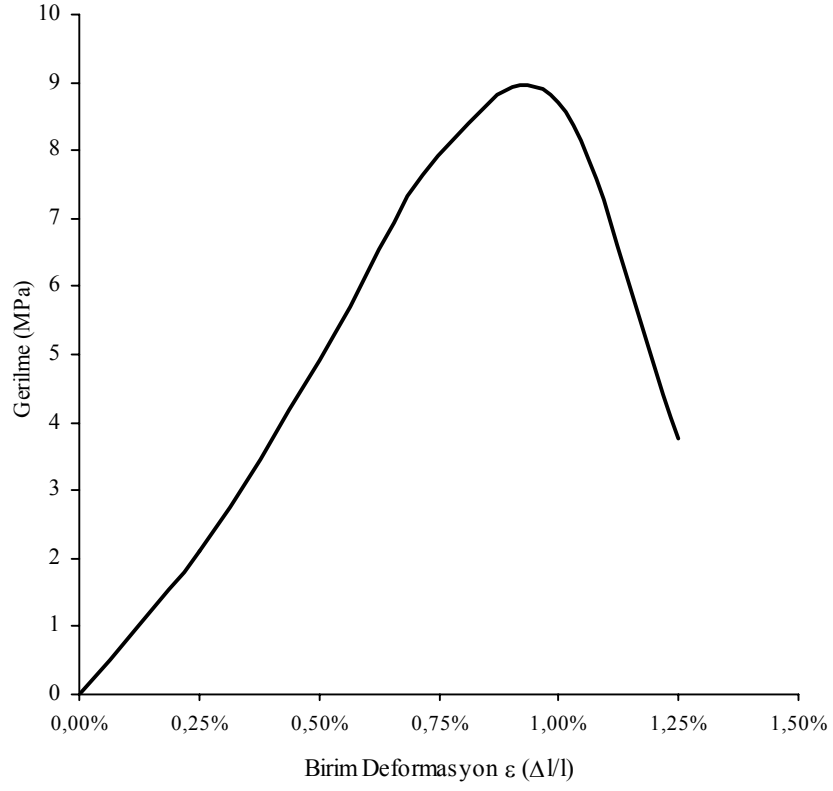
Şekil A.26: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



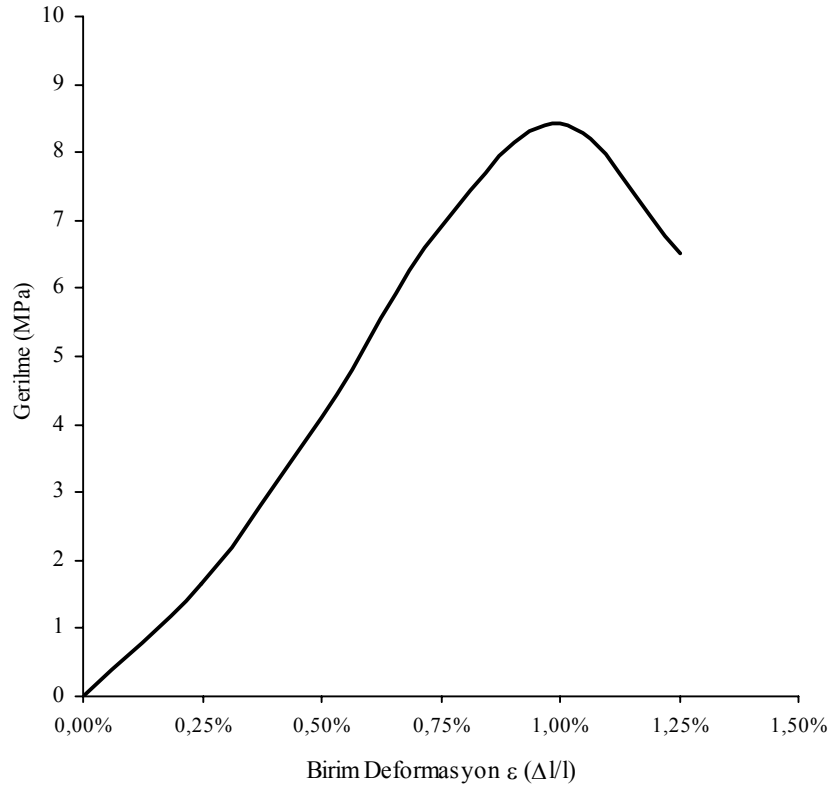
Şekil A.27: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



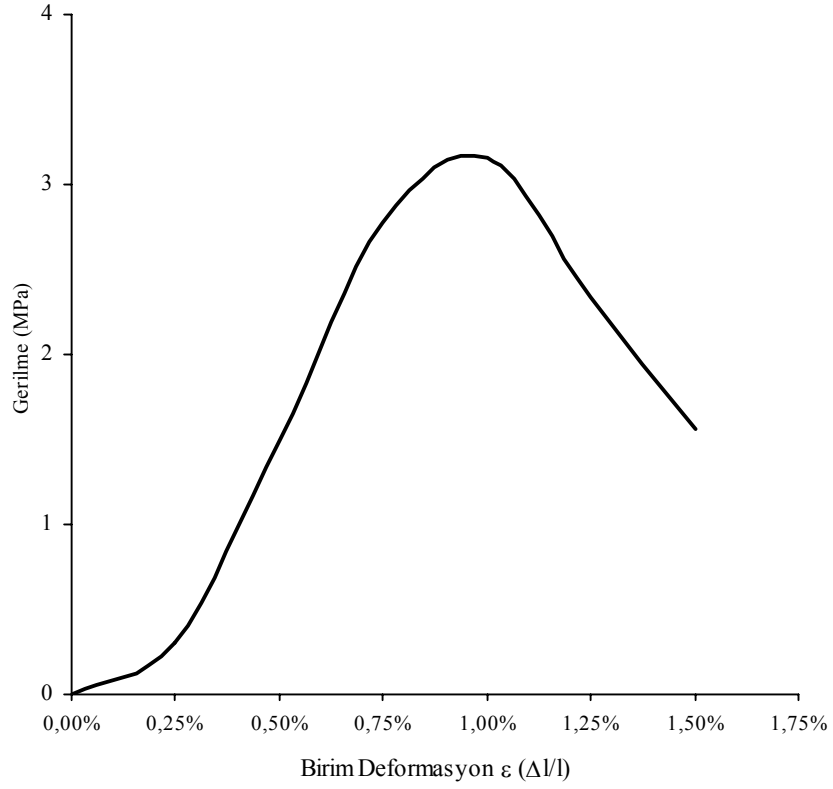
Şekil A.28: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



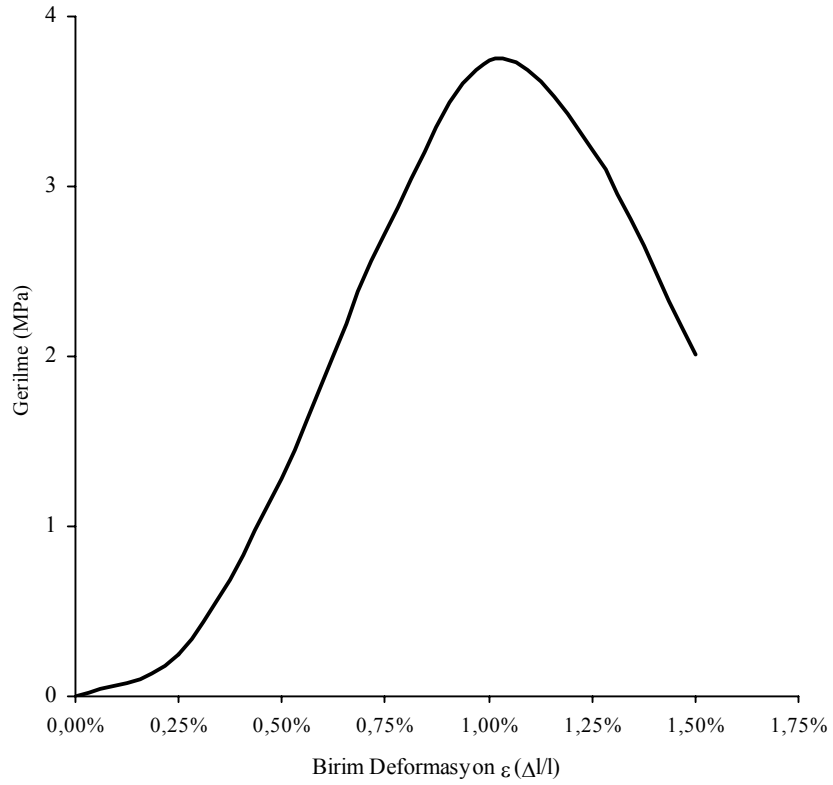
Şekil A.29: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



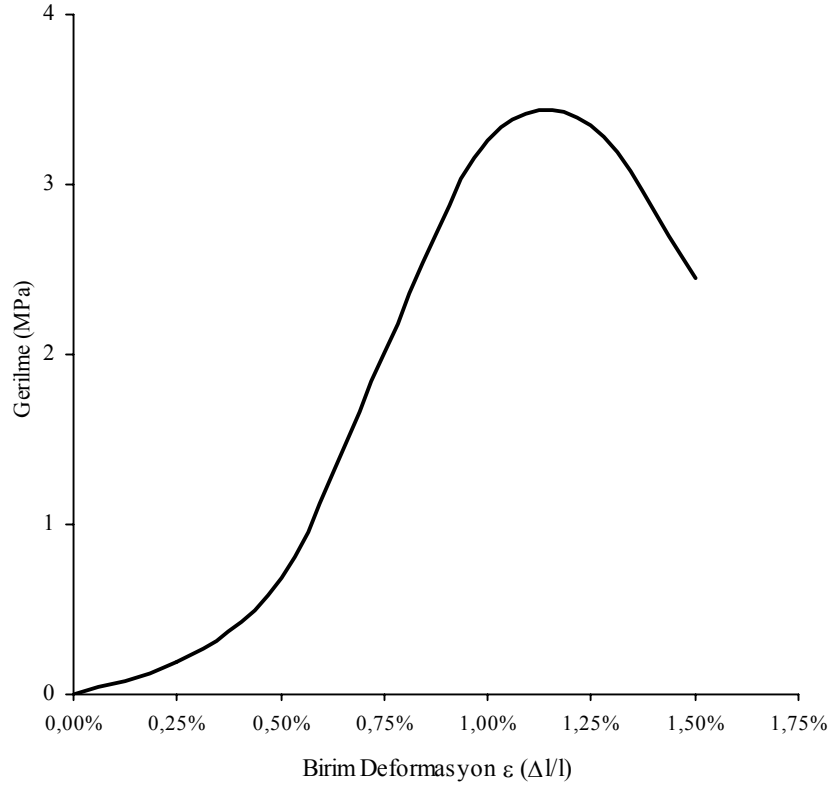
Şekil A.30: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



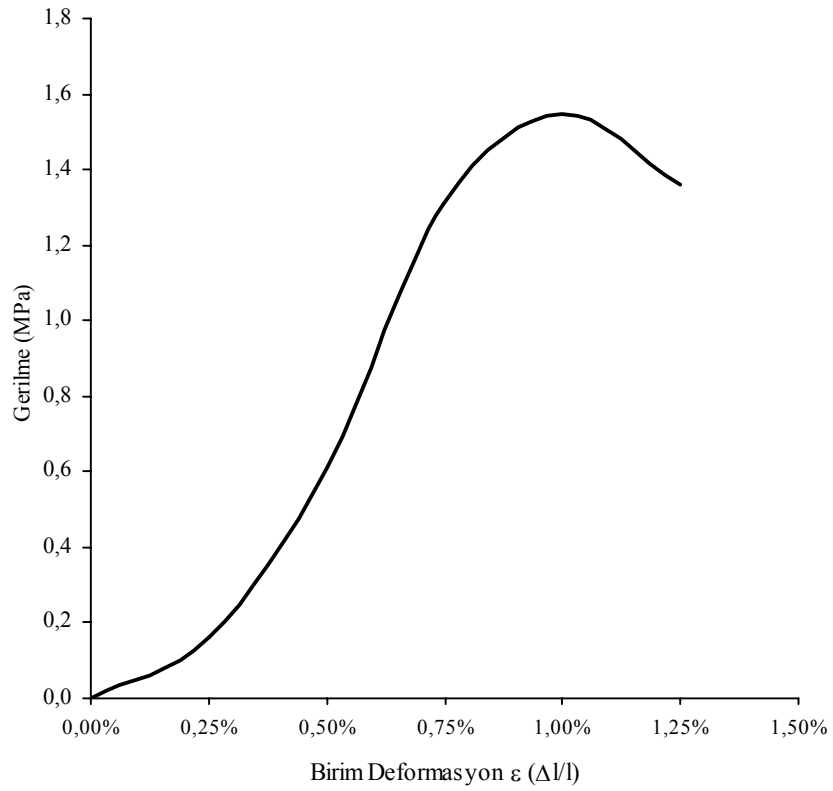
Şekil A.31: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



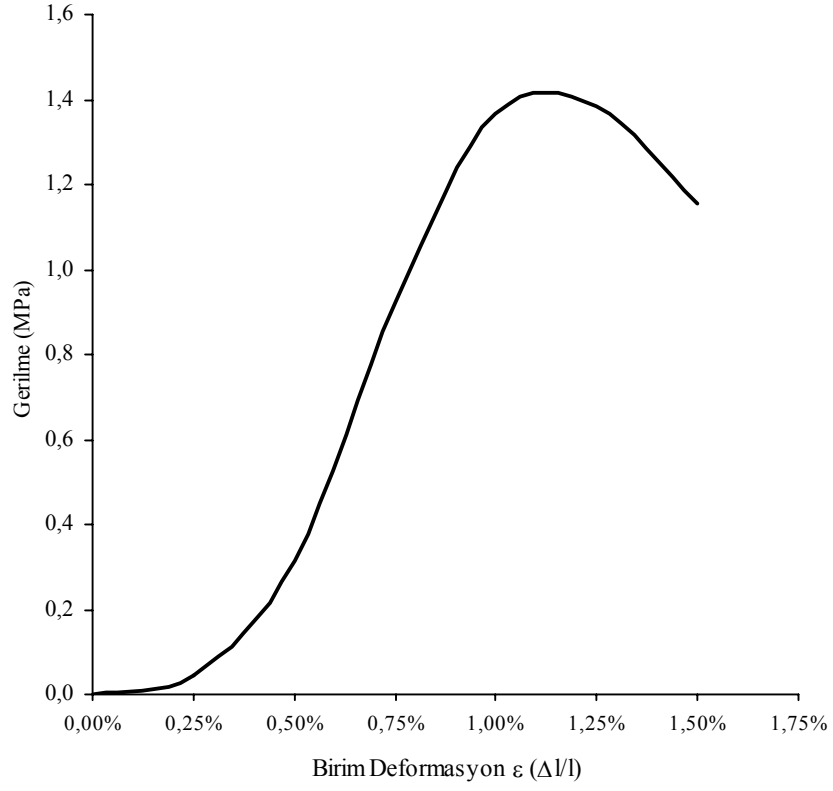
Şekil A.32: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



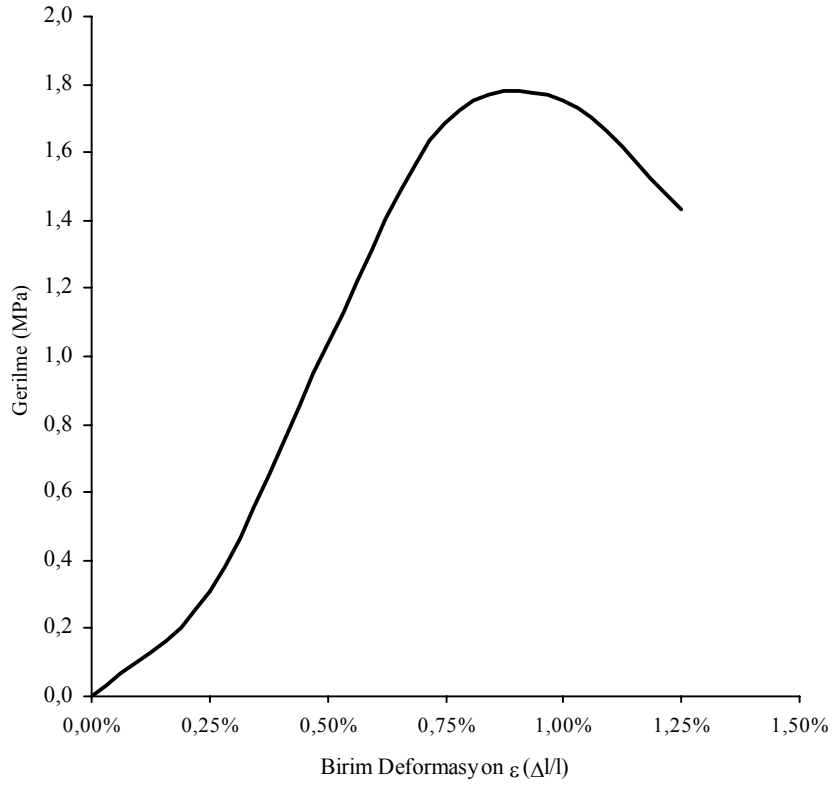
Şekil A.33: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



Şekil A.34: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



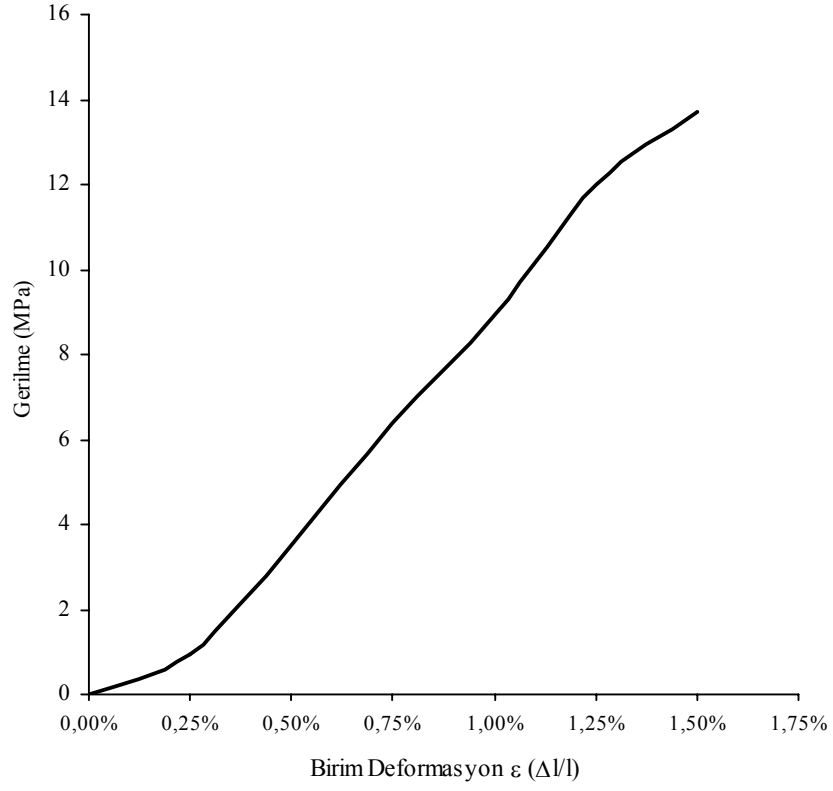
Şekil A.35: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



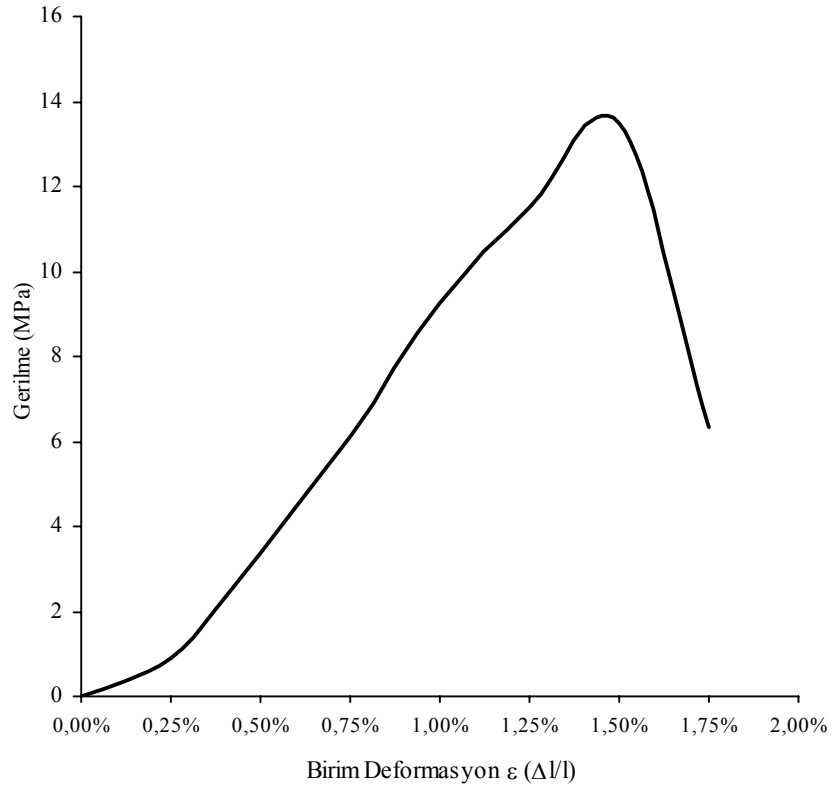
Şekil A.36: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği

EK-B

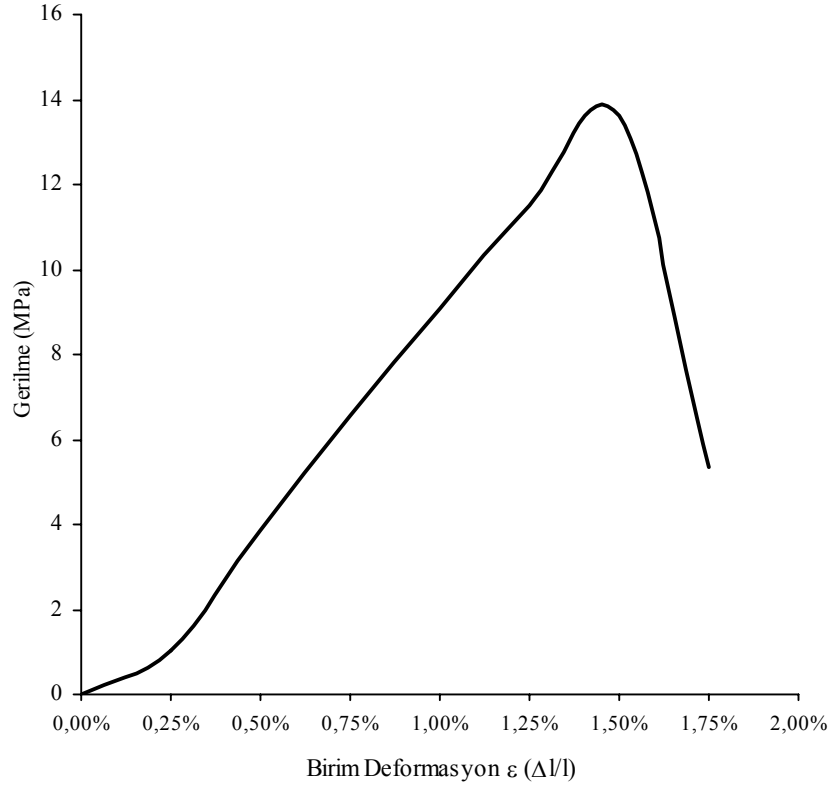
GP Numunesi 28 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)										
Dr	S/Ç	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa
25%	0,7	13,71	13,79	13,62	13,56	13,50	13,46	13,68	13,59	13,64
	1	4,83	4,79	4,88	4,56	4,59	4,53	4,89	4,93	4,86
	1,5	1,67	1,63	1,70	1,81	1,84	1,82	1,81	1,75	1,76
50%	0,7	12,34	12,12	12,24	12,09	11,93	12,24	12,33	12,49	12,22
	1	3,57	3,40	3,47	3,66	3,76	3,55	3,53	3,64	3,45
	1,5	1,76	1,81	1,68	1,83	1,76	1,70	1,78	1,65	1,92
75%	0,7	15,96	16,11	15,80	15,91	15,71	16,14	15,91	16,13	15,76
	1	7,29	7,41	7,35	7,43	7,58	7,34	7,25	7,09	7,42
	1,5	2,51	2,70	2,33	2,42	2,53	2,31	2,66	2,86	2,47
100%	0,7	18,93	18,61	19,20	18,92	18,71	19,12	18,94	19,09	18,81
	1	5,51	5,46	5,42	5,11	4,99	5,22	5,29	5,17	5,44
	1,5	3,74	3,68	3,63	4,29	4,20	4,39	3,71	3,79	3,62



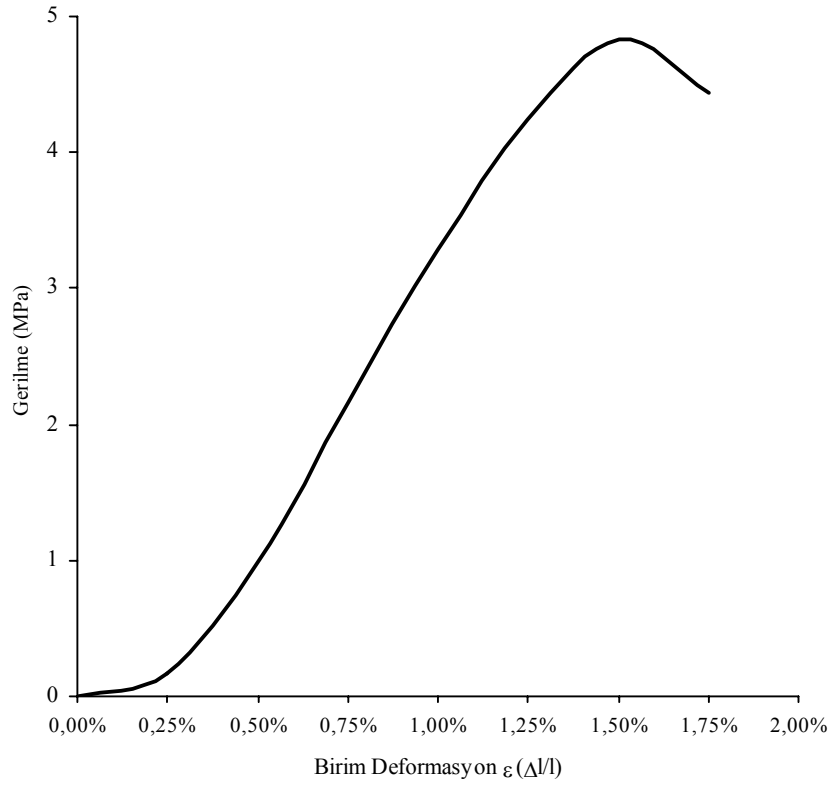
Şekil B.1: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



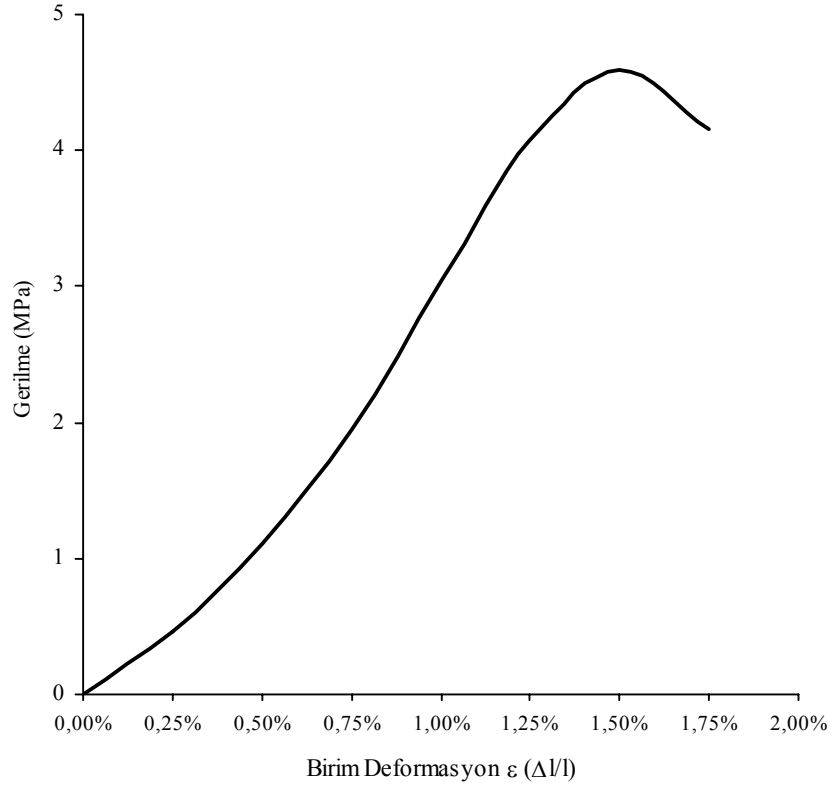
Şekil B.2: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



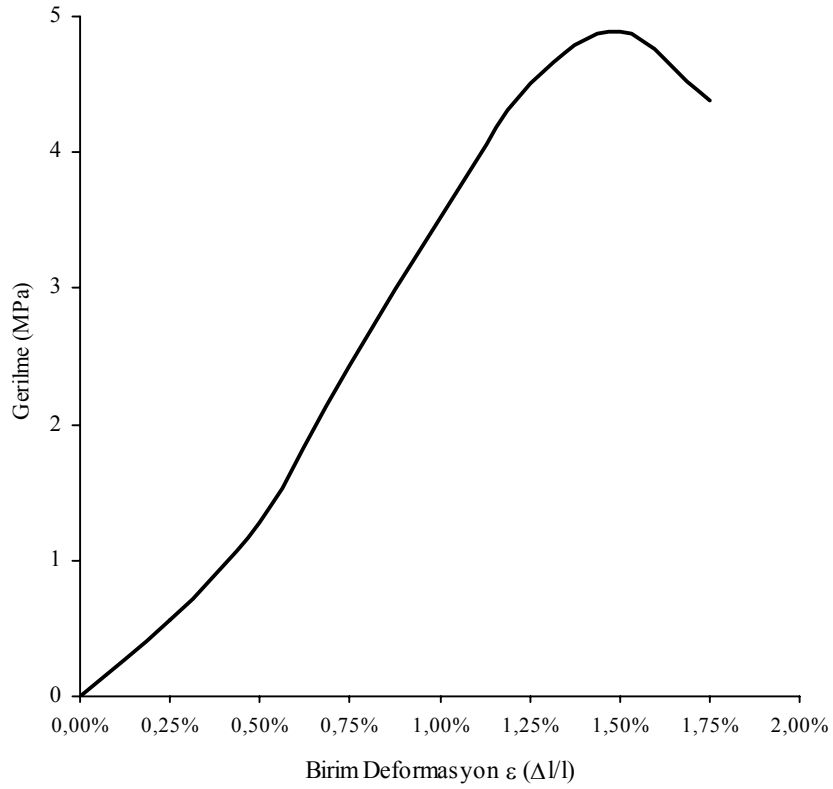
Şekil B.3: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



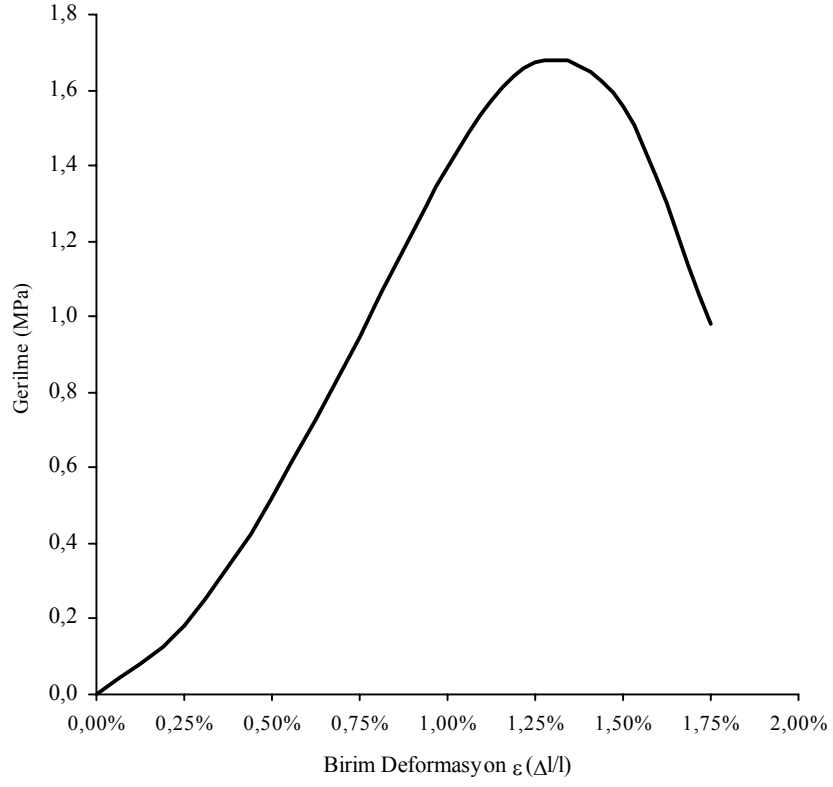
Şekil B.4: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



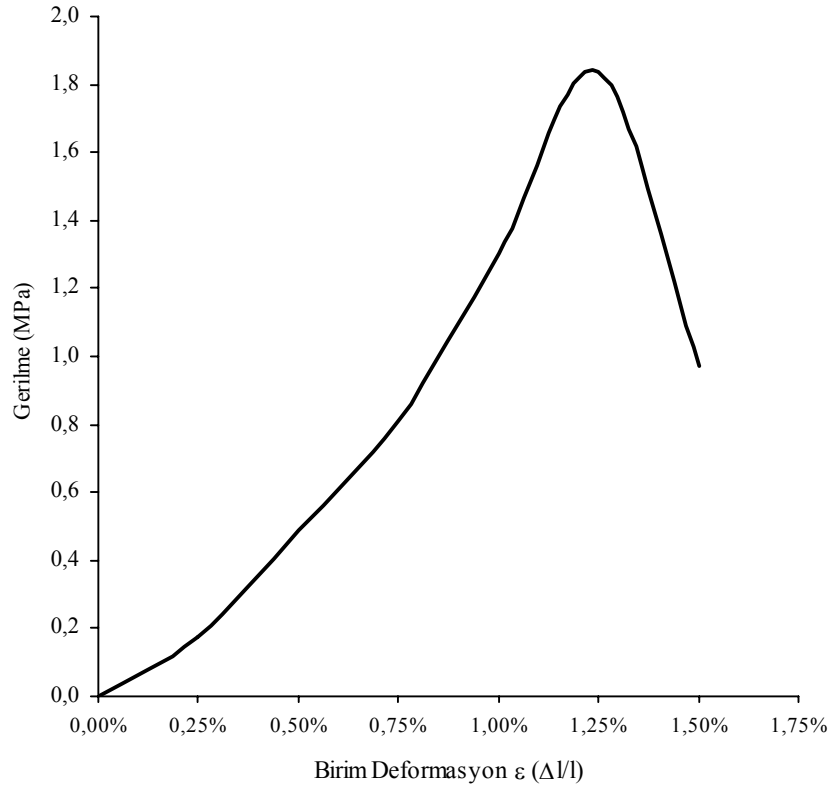
Şekil B.5: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



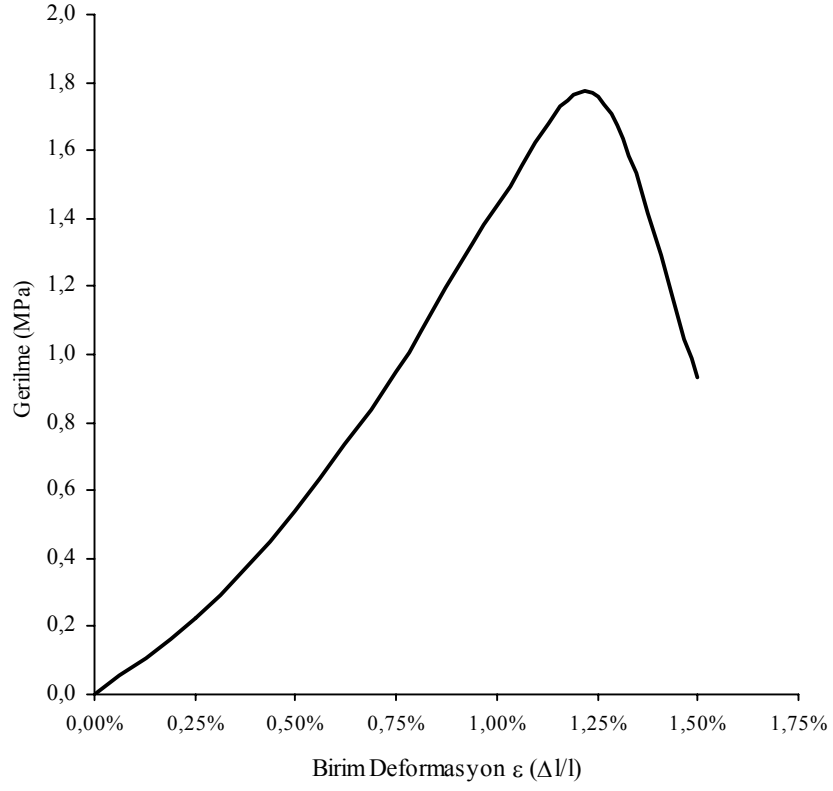
Şekil B.6: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



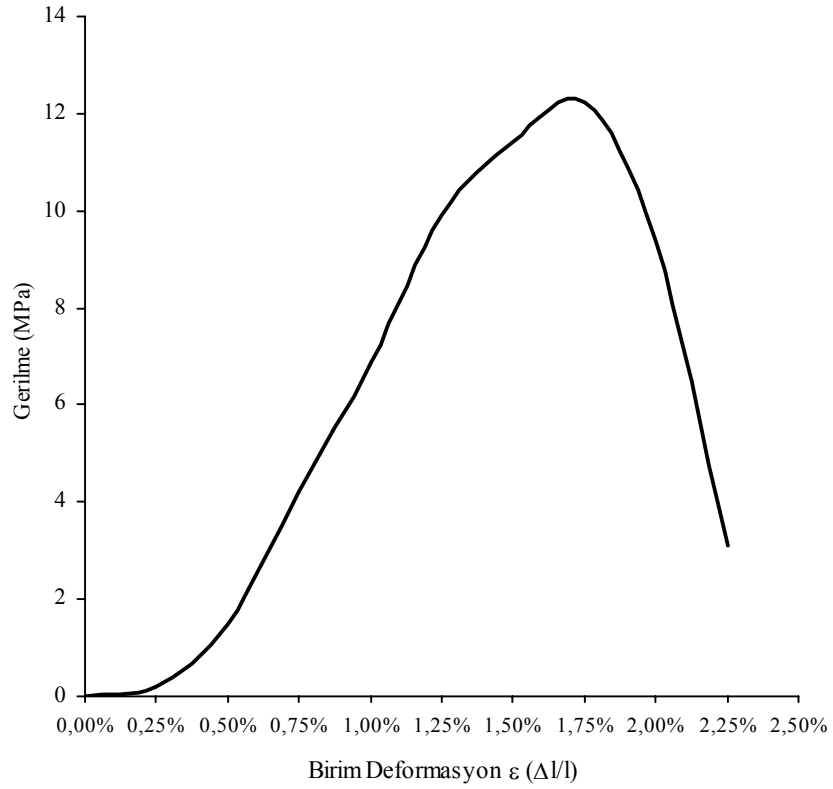
Şekil B.7: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



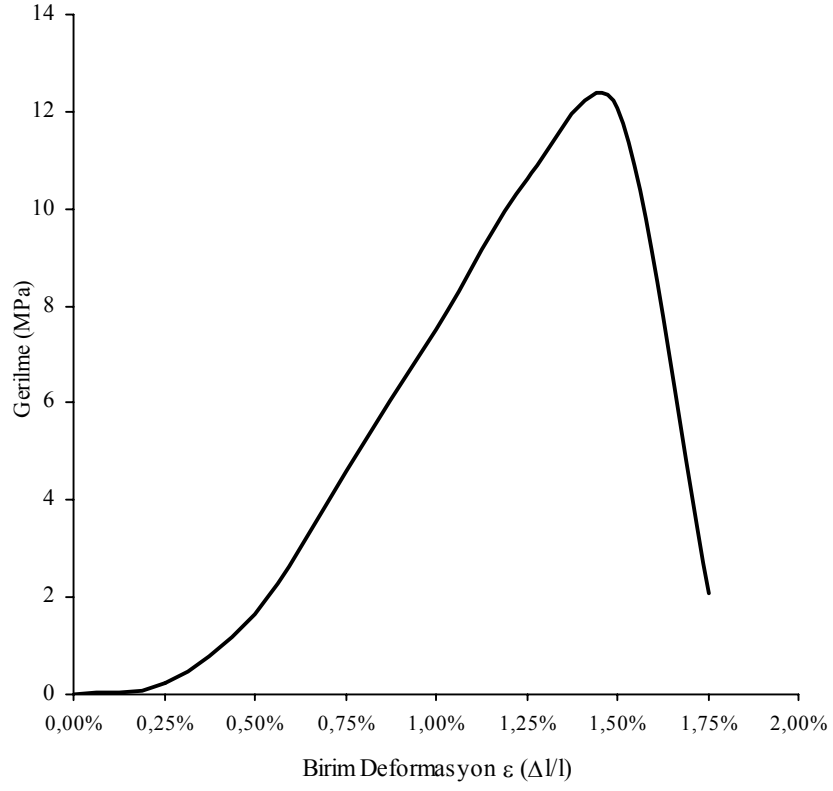
Şekil B.8: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



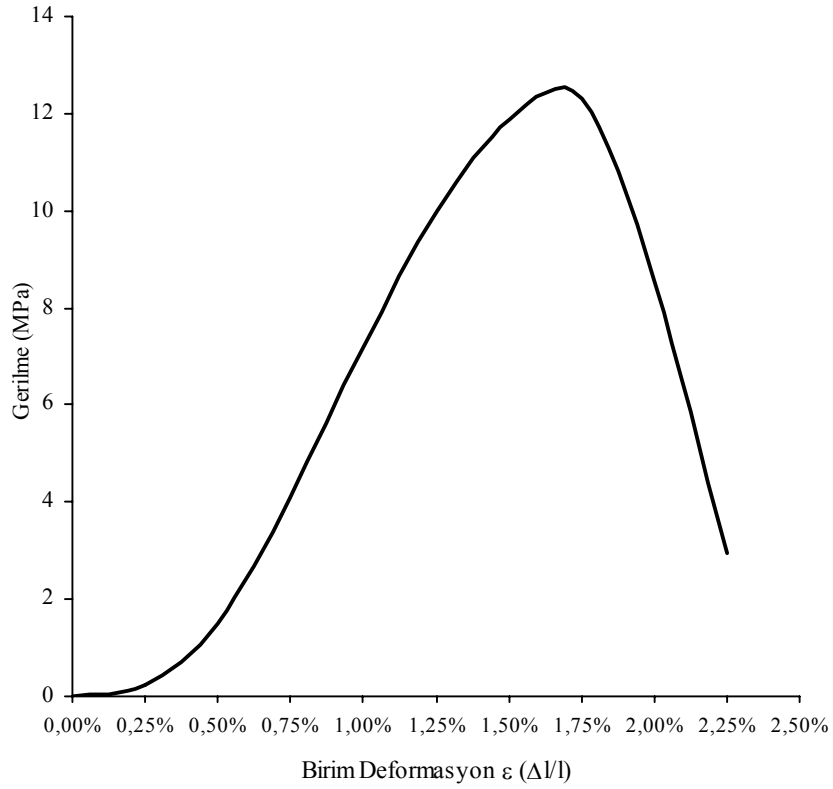
Şekil B.9: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



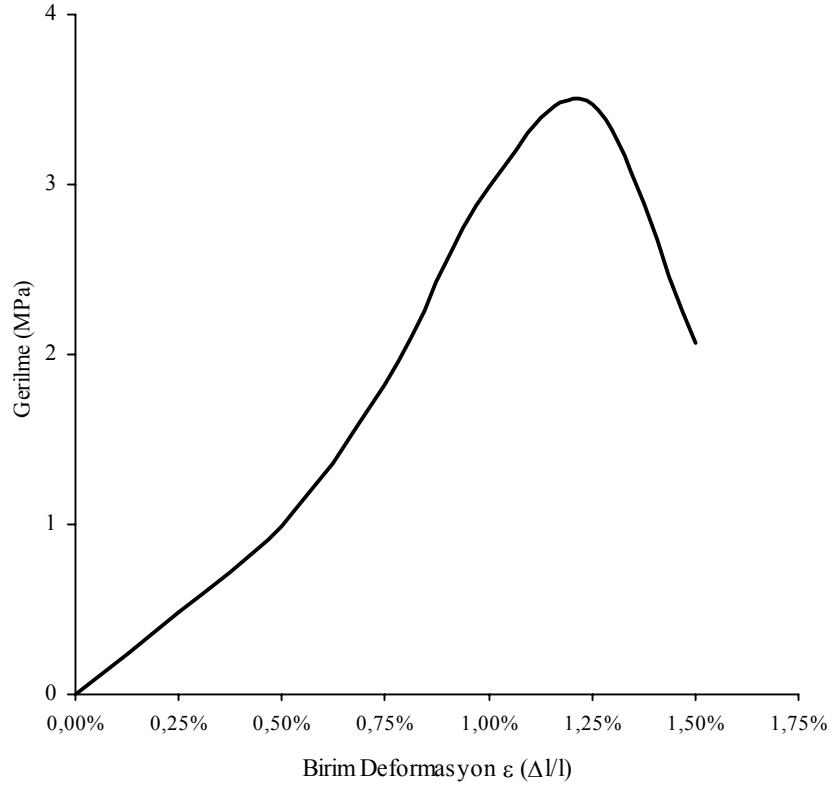
Şekil B.10: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



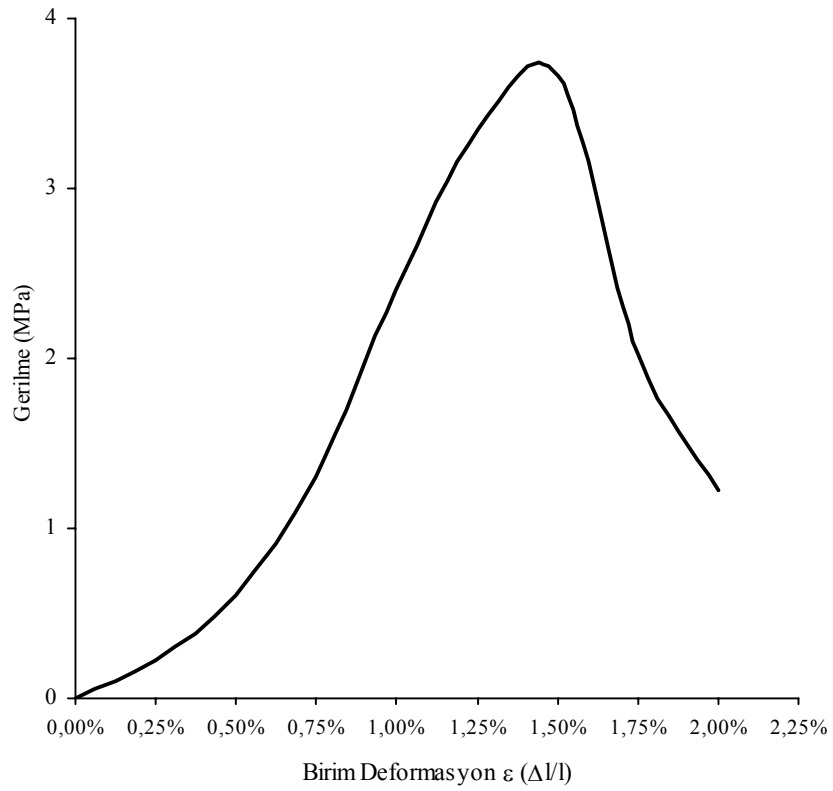
Şekil B.11: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



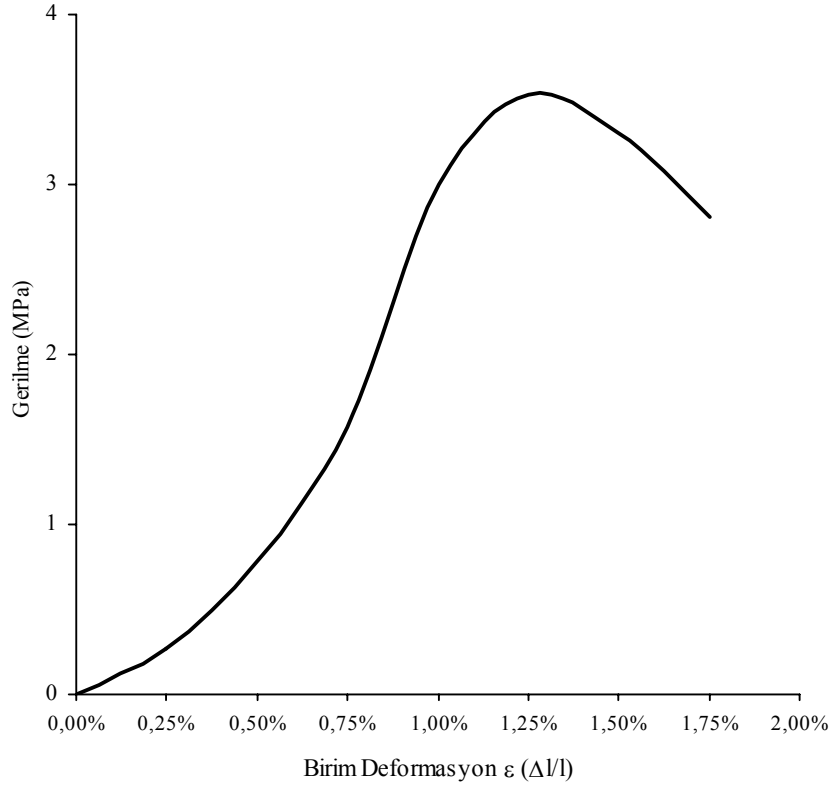
Şekil B.12: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



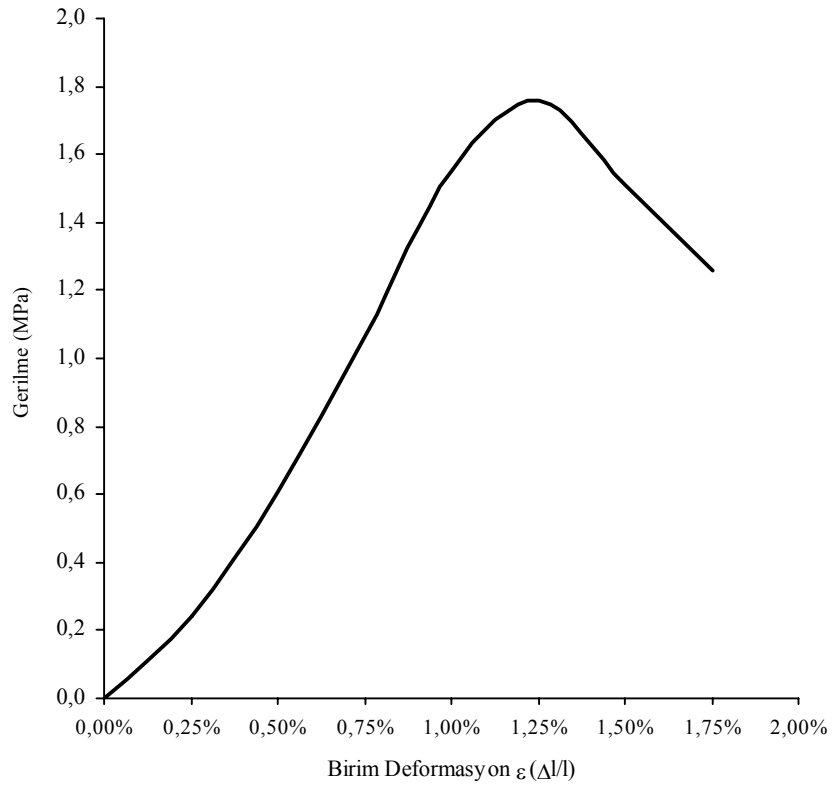
Şekil B.13: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



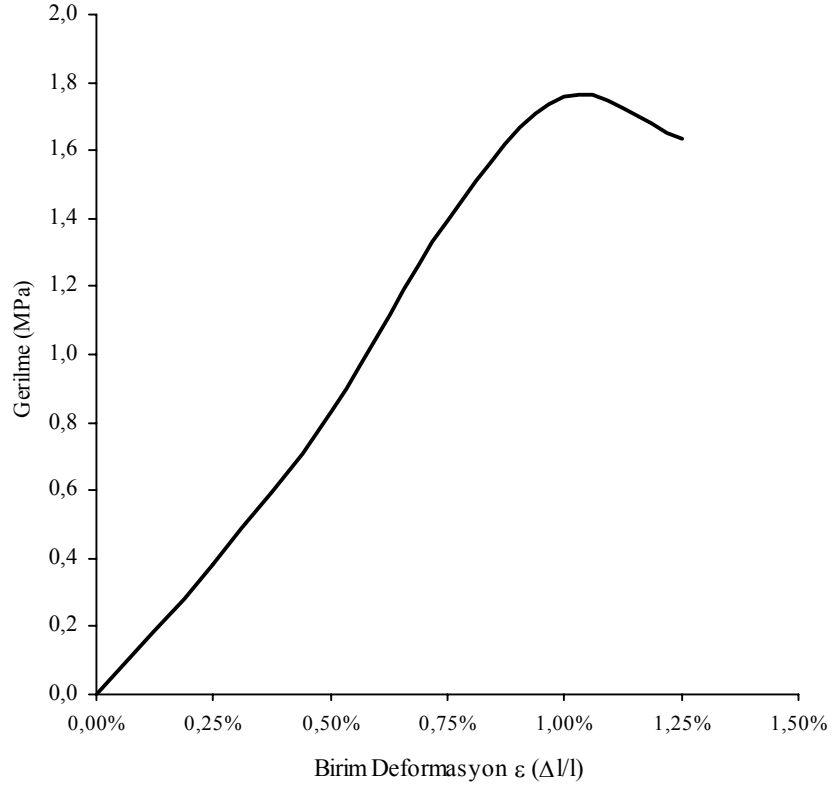
Şekil B.14: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



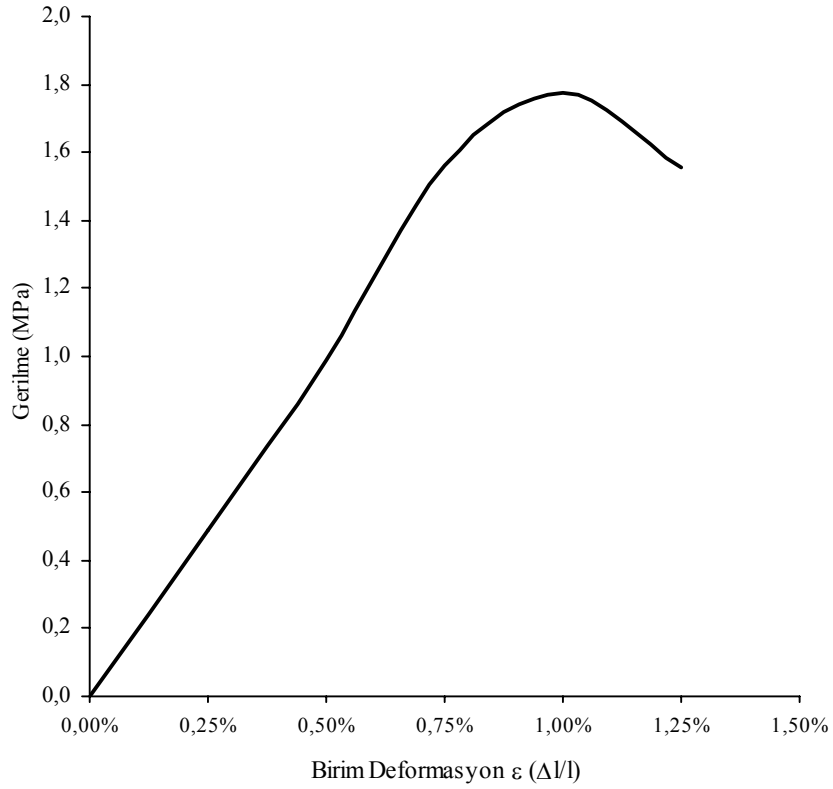
Şekil B.15: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



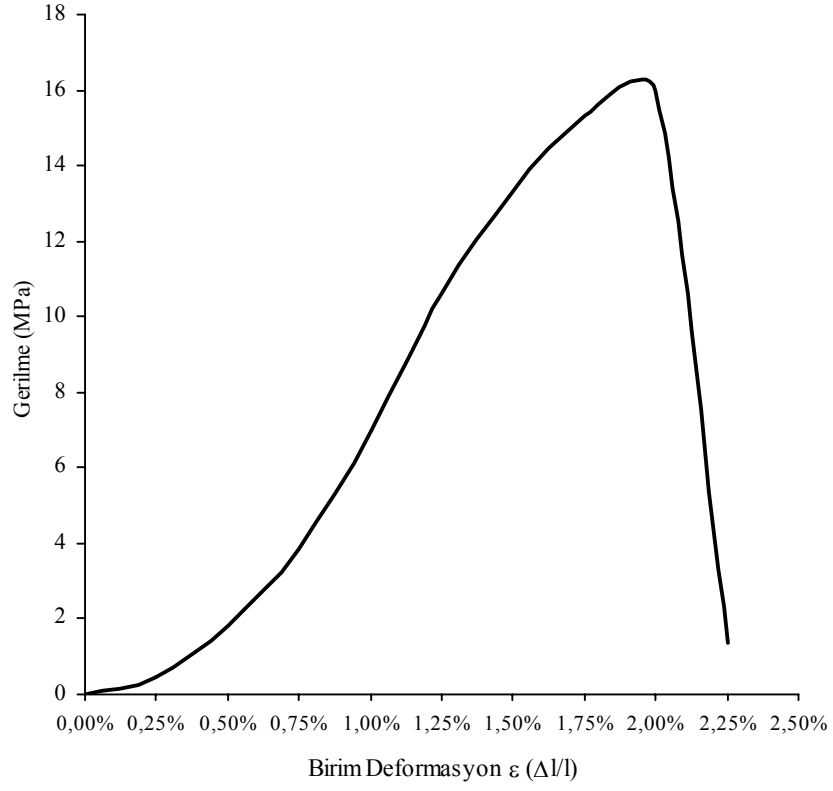
Şekil B.16: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



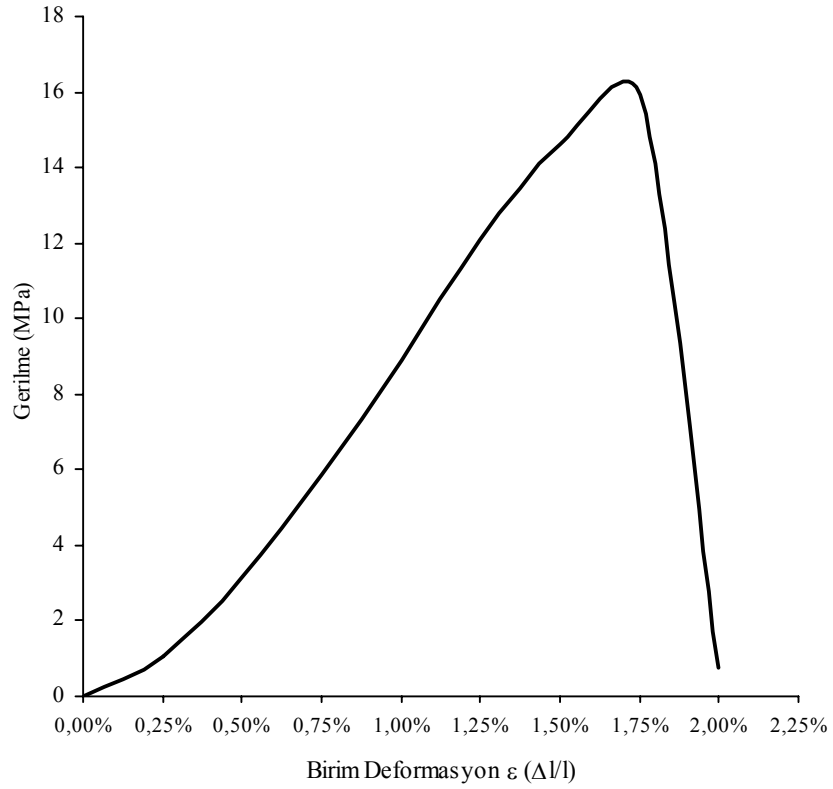
Şekil B.17: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



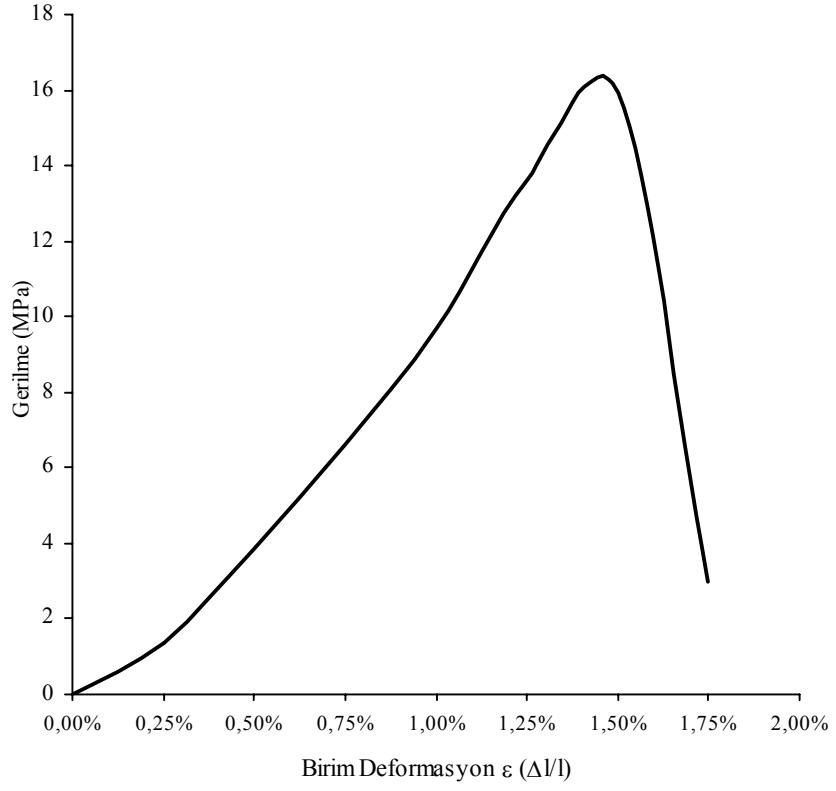
Şekil B.18: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



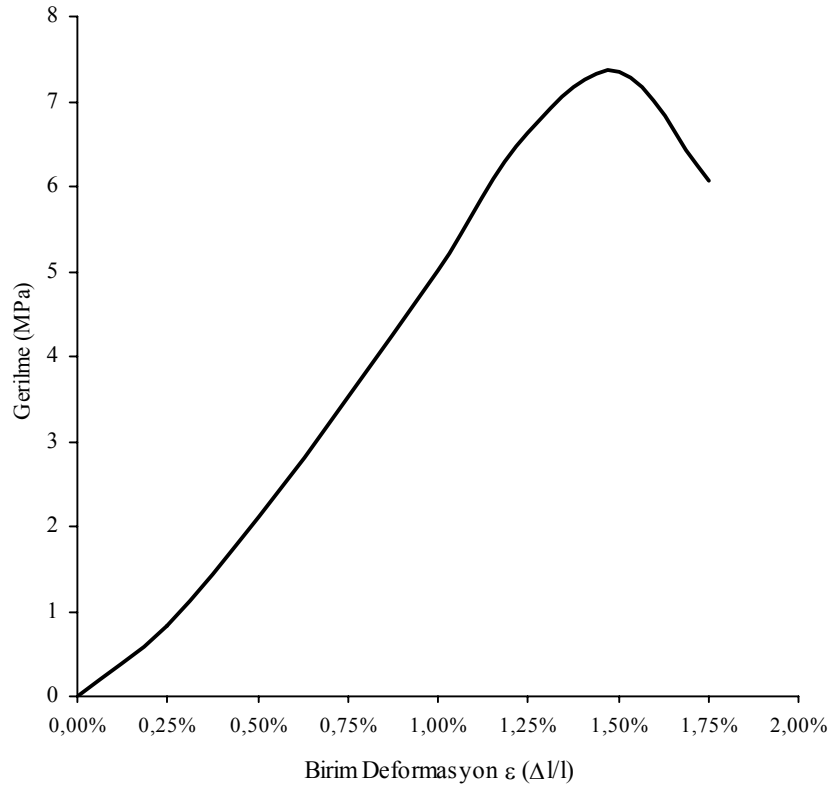
Şekil B.19: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



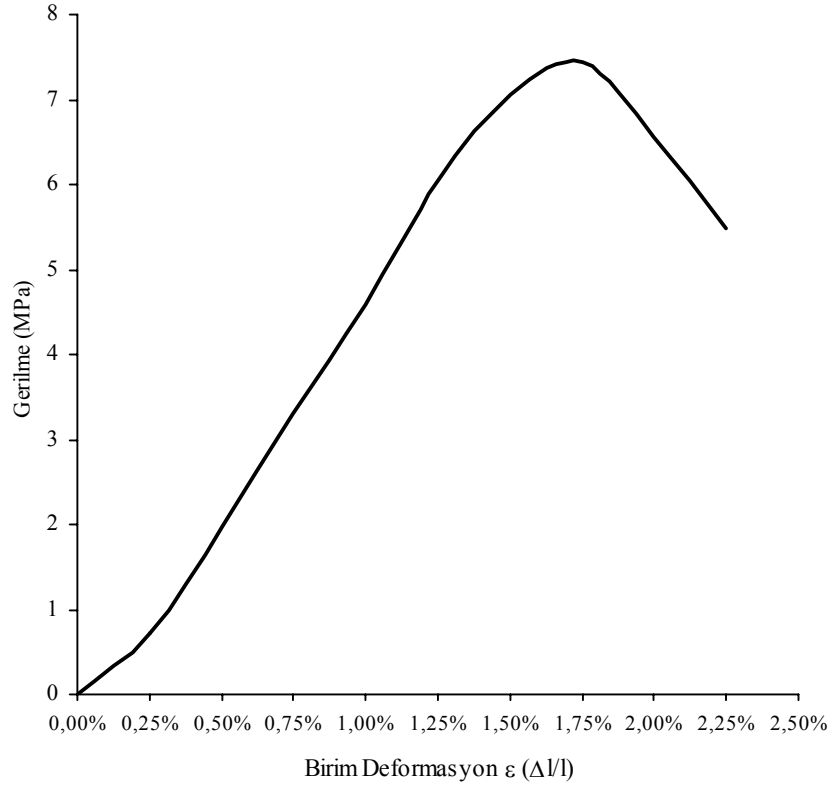
Şekil B.20: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



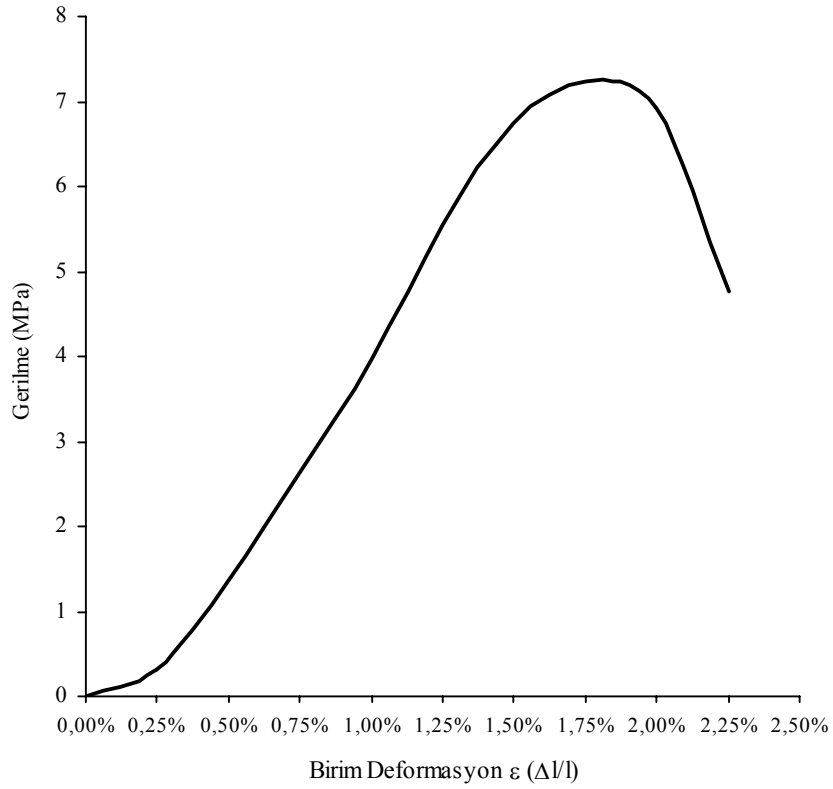
Şekil B.21: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



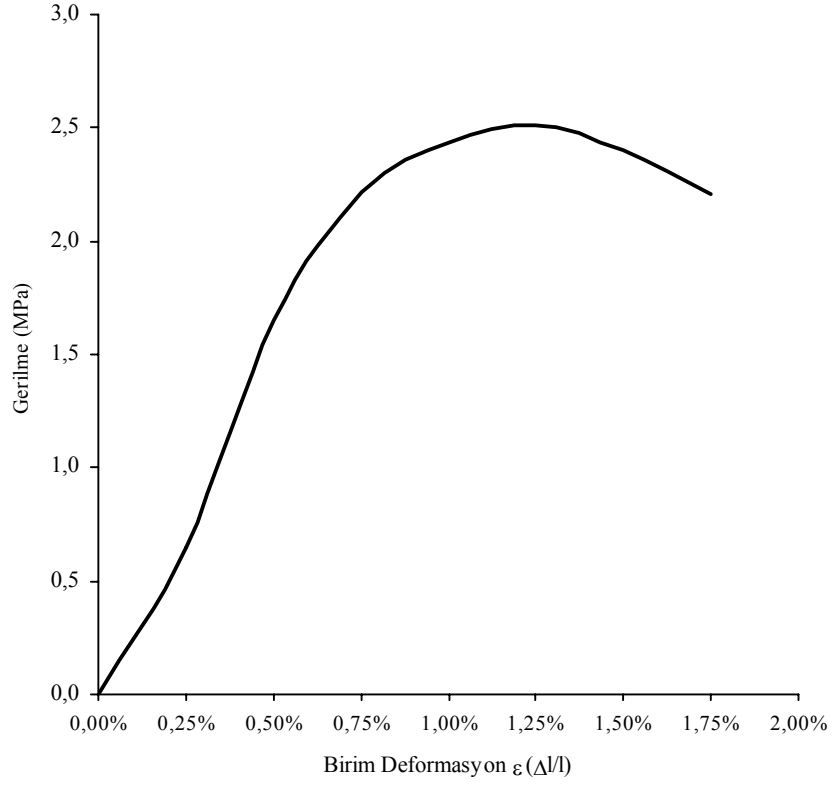
Şekil B.22: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



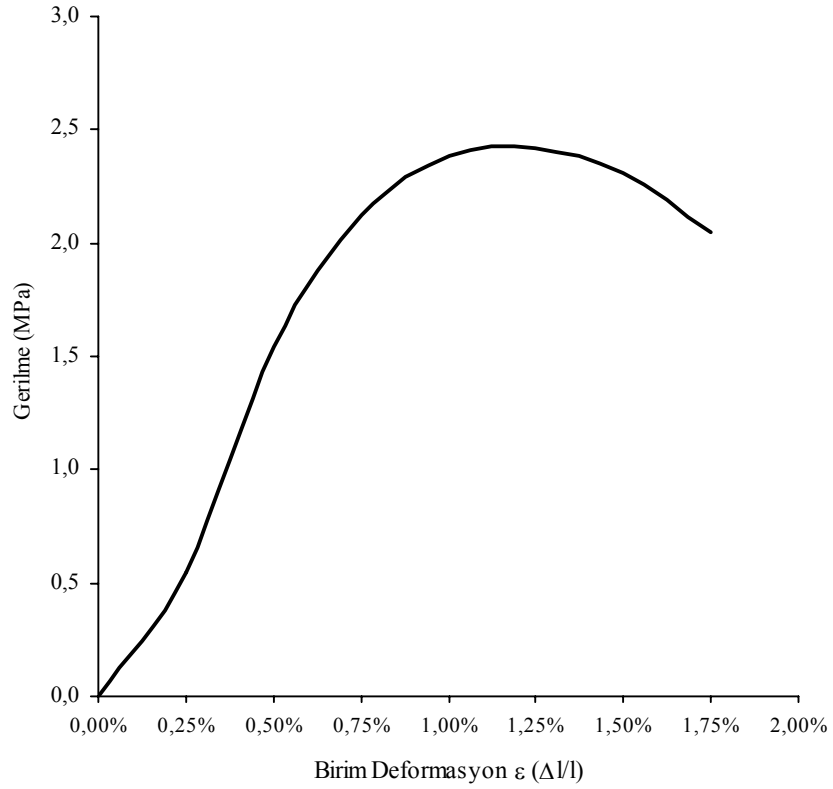
Şekil B.23: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



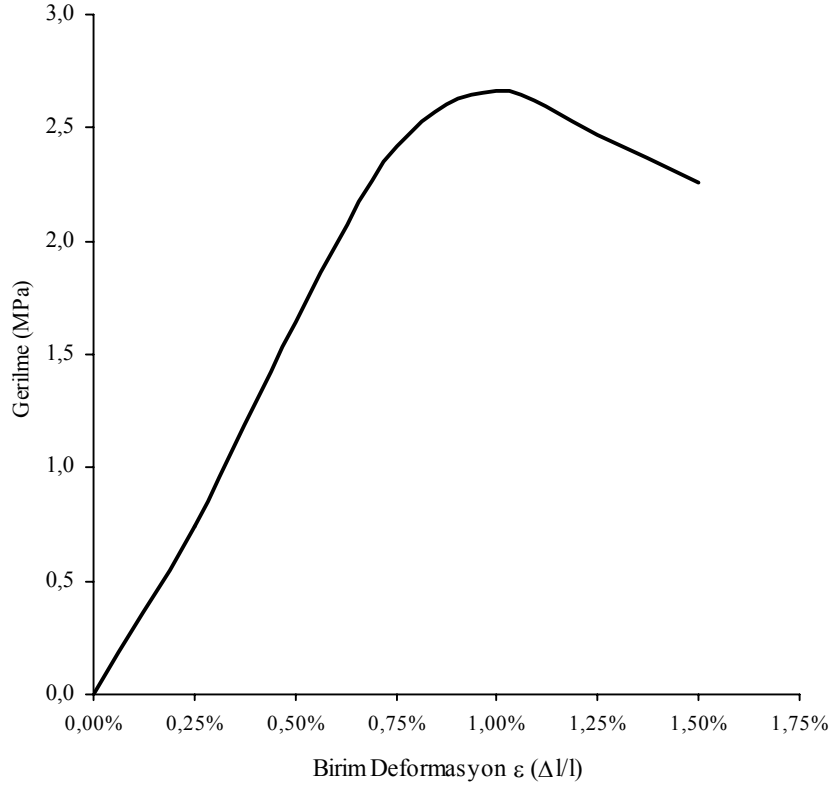
Şekil B.24: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



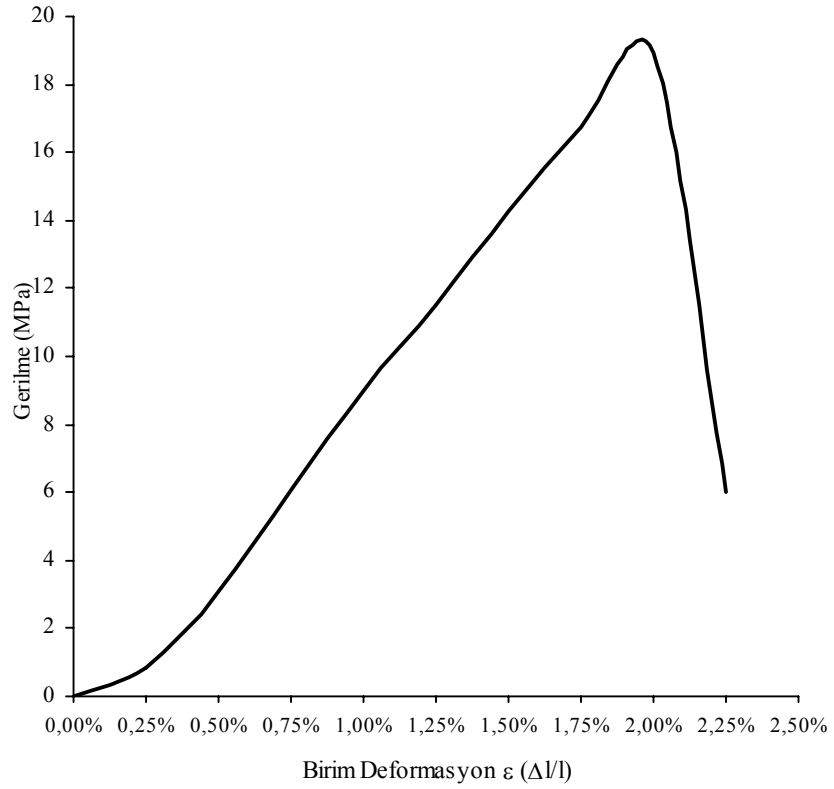
Şekil B.25: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



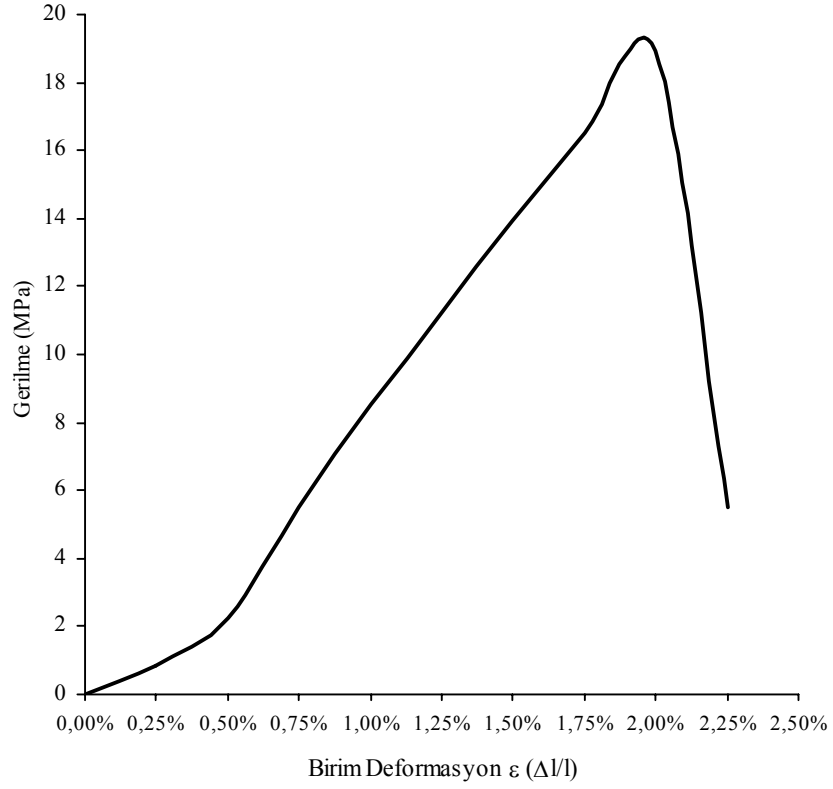
Şekil B.26: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



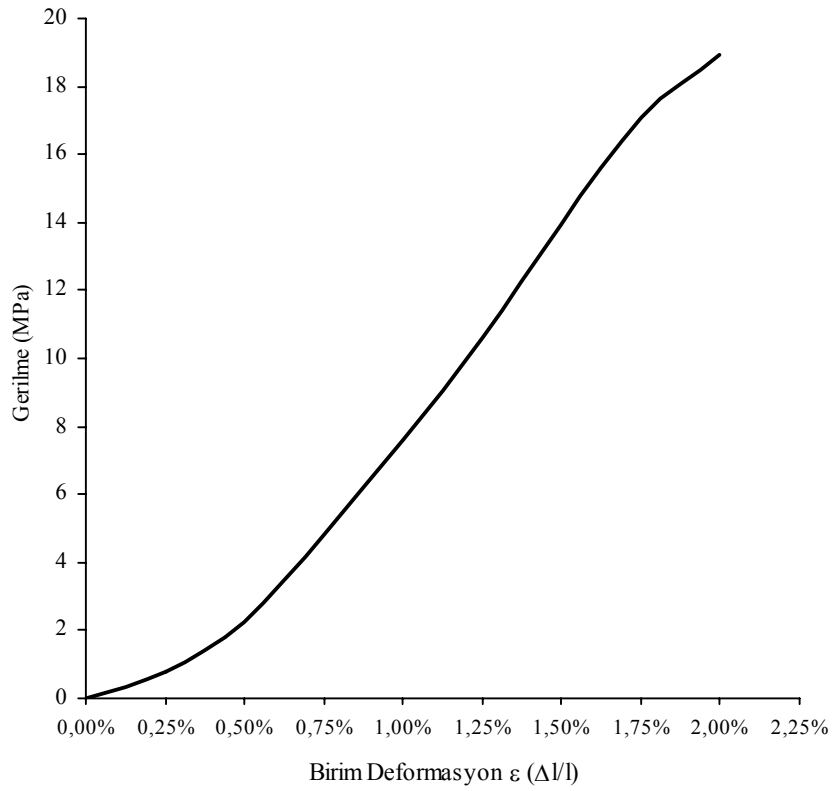
Şekil B.27: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



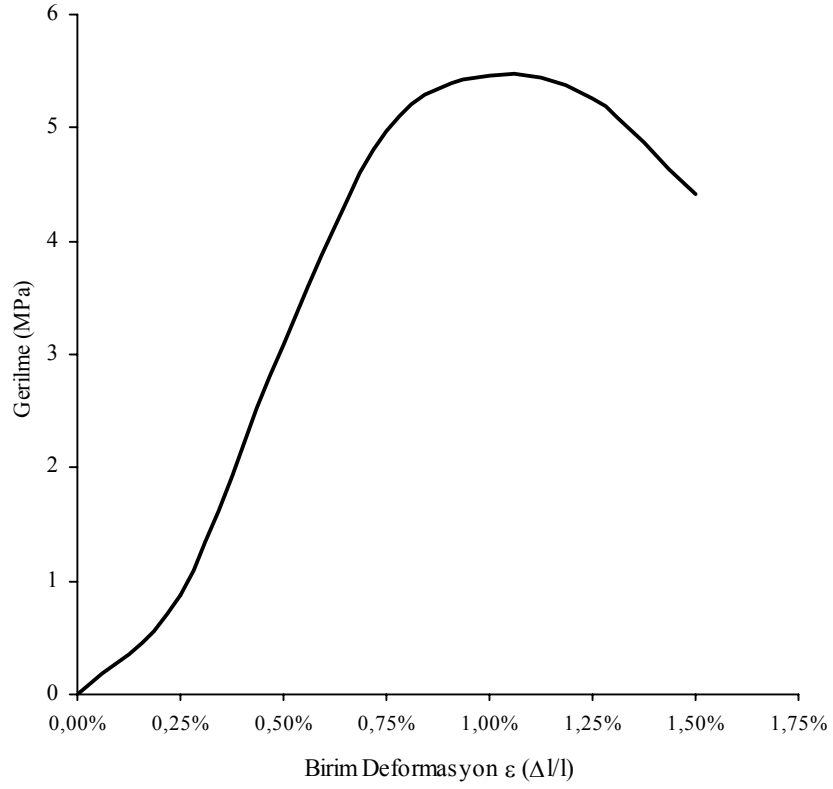
Şekil B.28: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



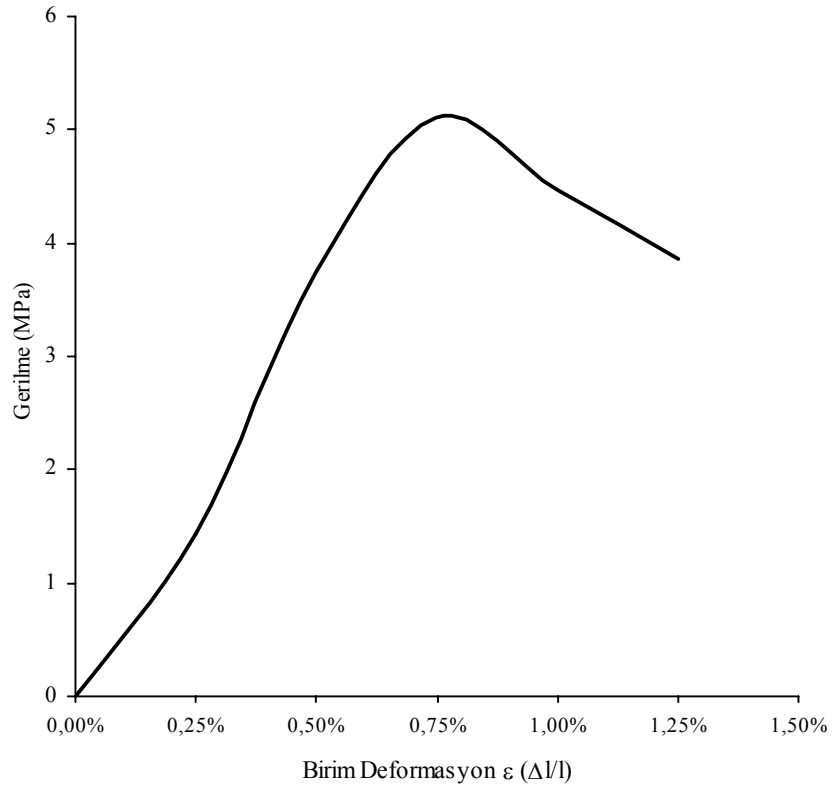
Şekil B.29: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



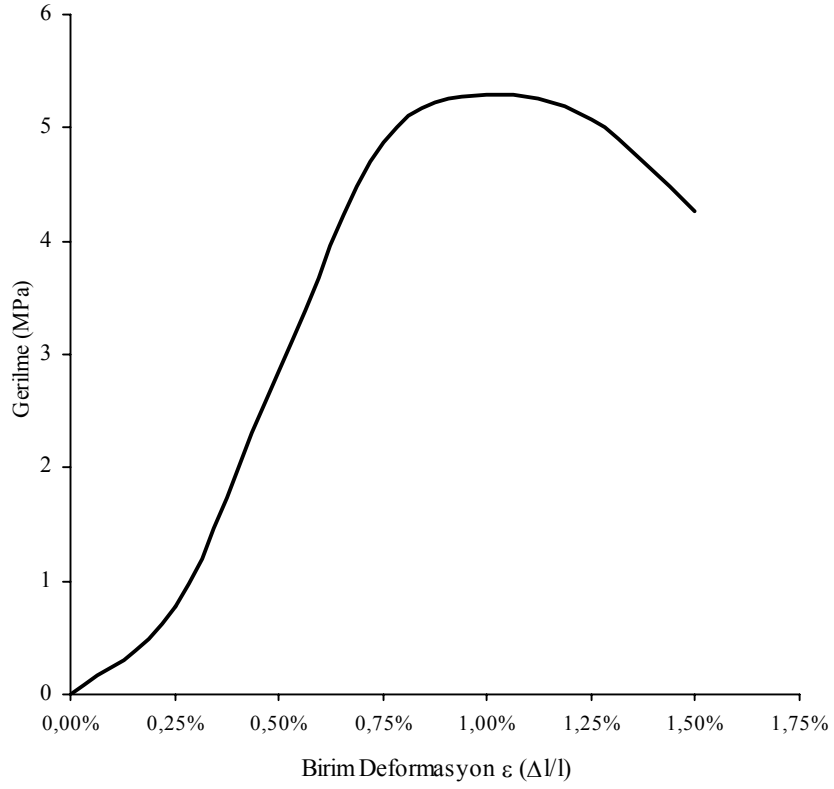
Şekil B.30: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



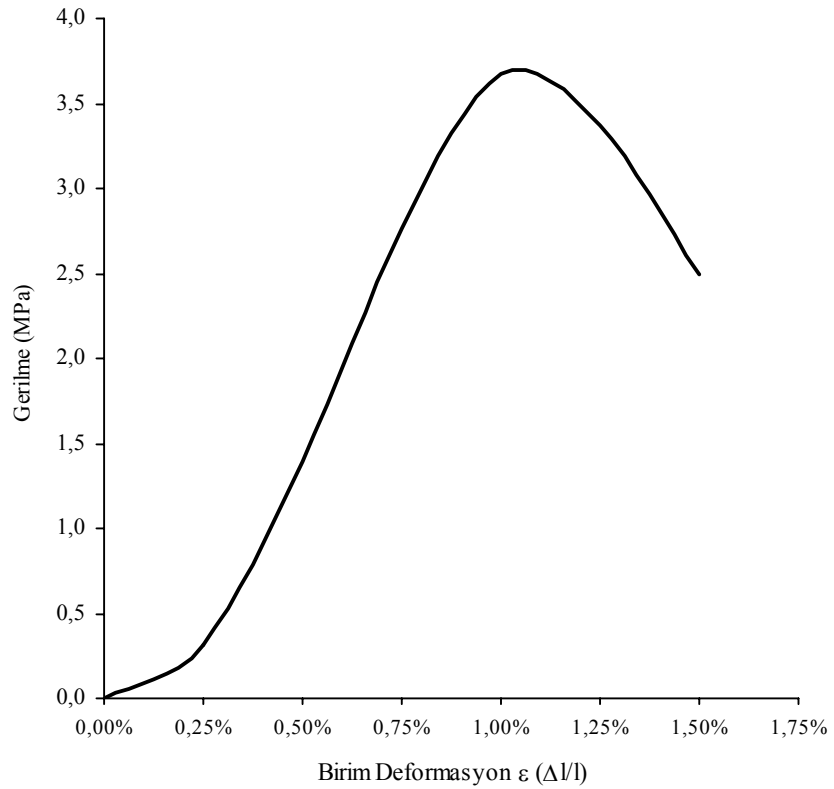
Şekil B.31: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



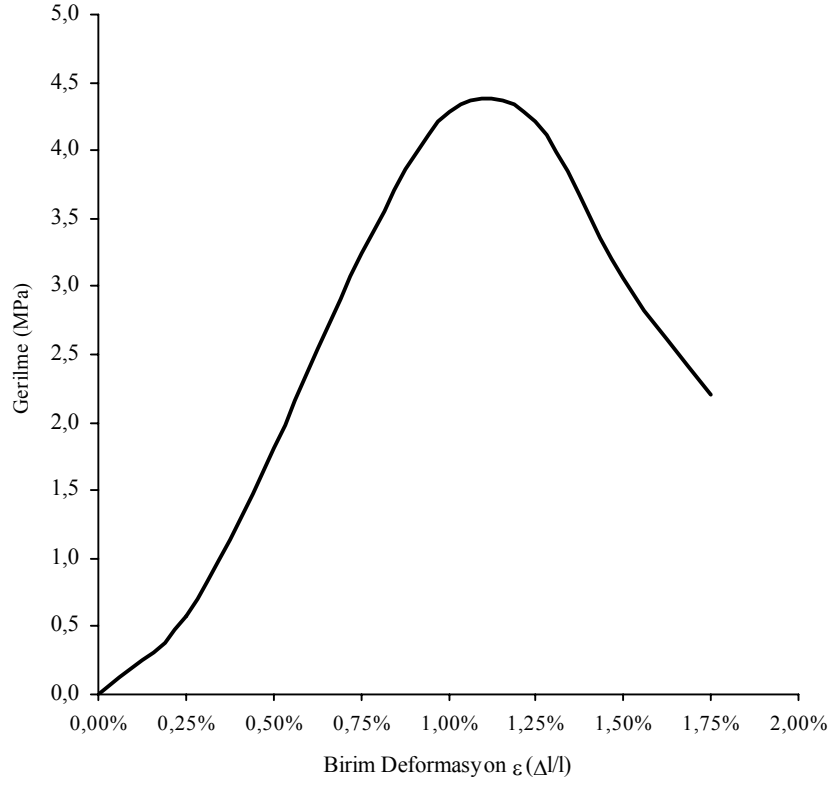
Şekil B.32: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



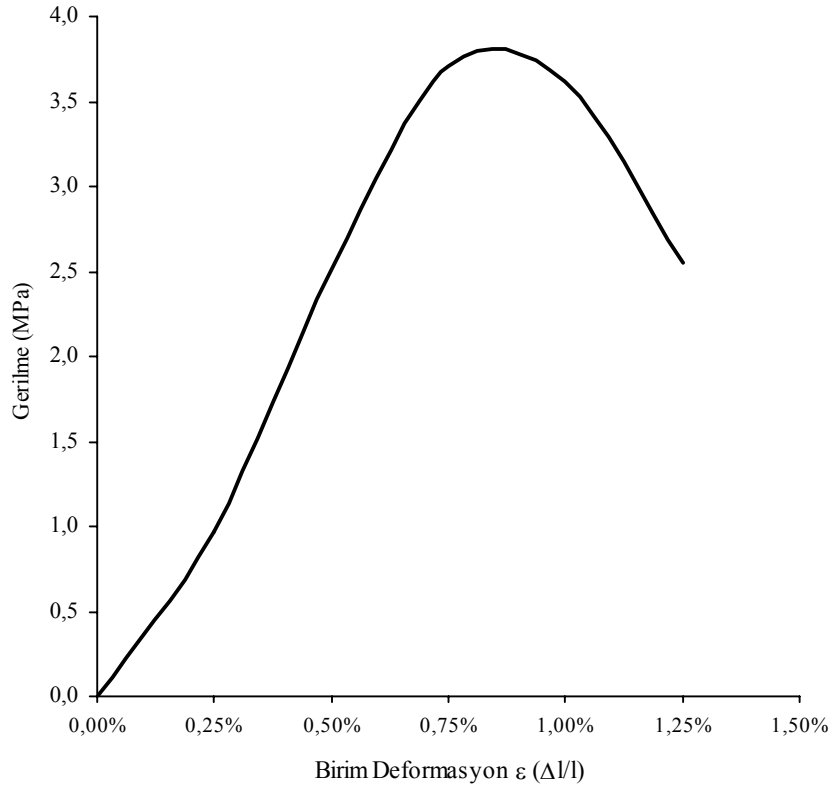
Şekil B.33: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



Şekil B.34: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



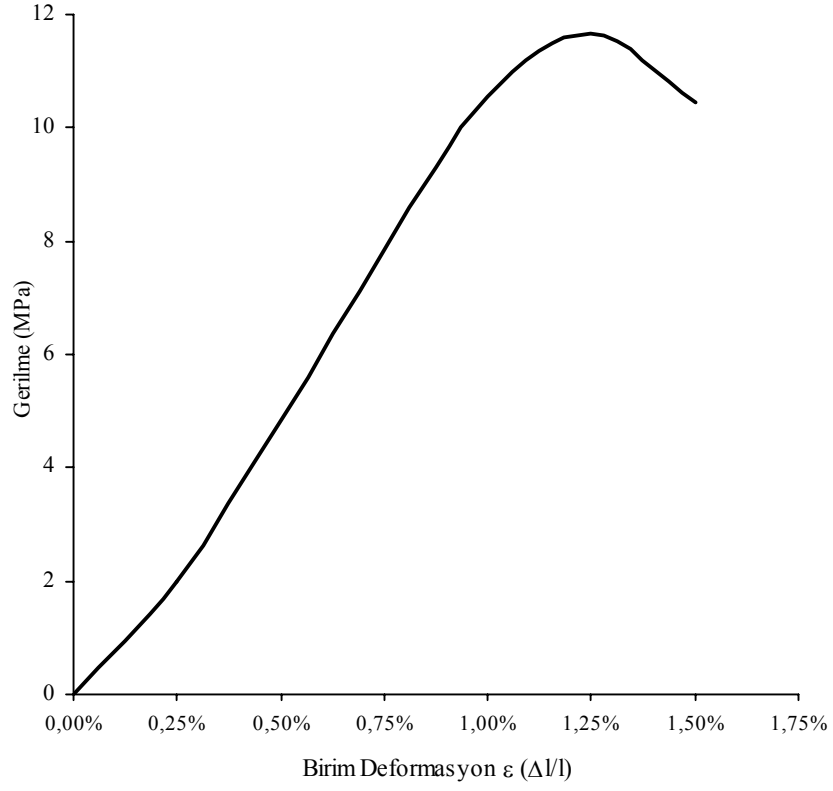
Şekil B.35: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



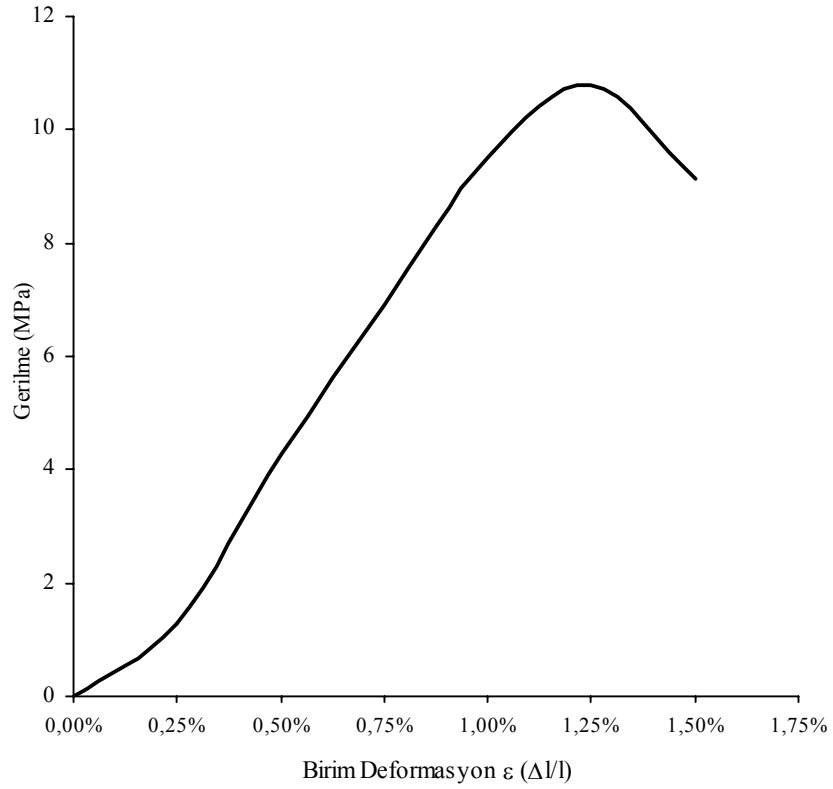
Şekil B.36: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan GP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği

EK-C

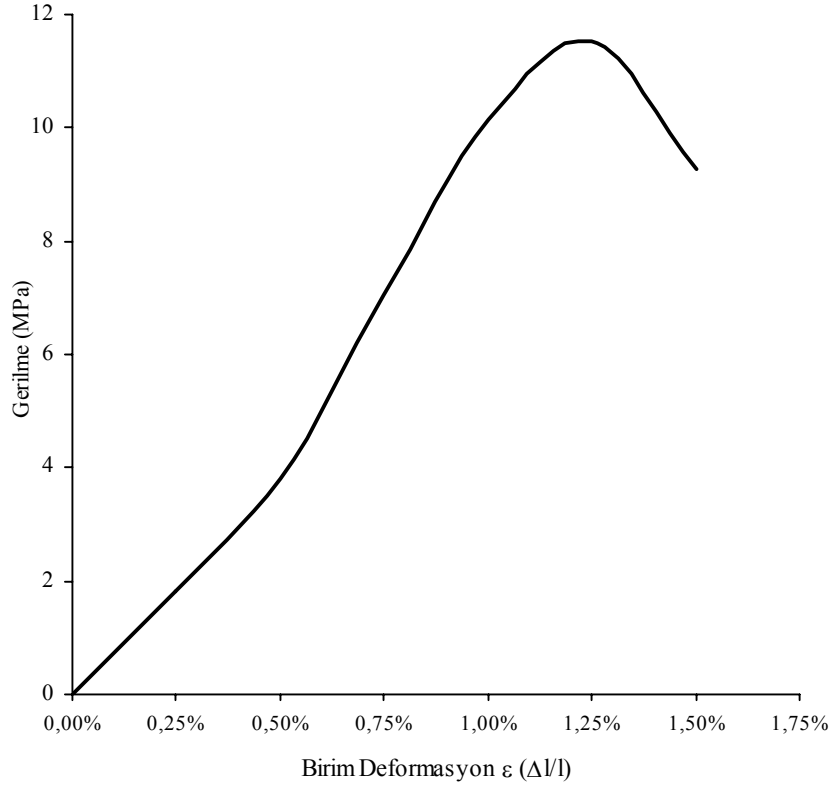
SP Numunesi 7 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)										
Dr	S/Ç	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa
25%	0,7	11,68	11,51	11,87	10,79	10,58	10,99	11,53	11,88	11,16
	1	4,14	4,26	4,02	4,86	4,73	4,98	4,64	4,48	4,81
	1,5	1,44	1,50	1,29	1,47	1,37	1,58	1,43	1,51	1,35
50%	0,7	10,96	11,13	10,79	11,22	10,95	11,48	10,29	11,06	10,74
	1	4,27	4,42	4,21	4,17	4,05	4,30	4,47	4,28	4,67
	1,5	1,58	1,49	1,65	1,72	1,66	1,77	1,68	1,60	1,76
75%	0,7	7,59	7,79	7,39	7,84	7,98	7,70	7,76	8,07	7,47
	1	4,05	3,87	4,22	4,05	3,99	4,12	3,81	3,72	3,90
	1,5	1,42	1,65	1,21	1,35	1,31	1,40	1,41	1,53	1,30
100%	0,7	6,39	6,68	6,02	6,43	6,63	6,25	6,38	6,53	6,24
	1	3,12	3,28	2,98	3,07	3,14	3,01	3,23	3,12	3,35
	1,5	1,77	1,82	1,70	1,59	1,54	1,65	1,66	1,59	1,73



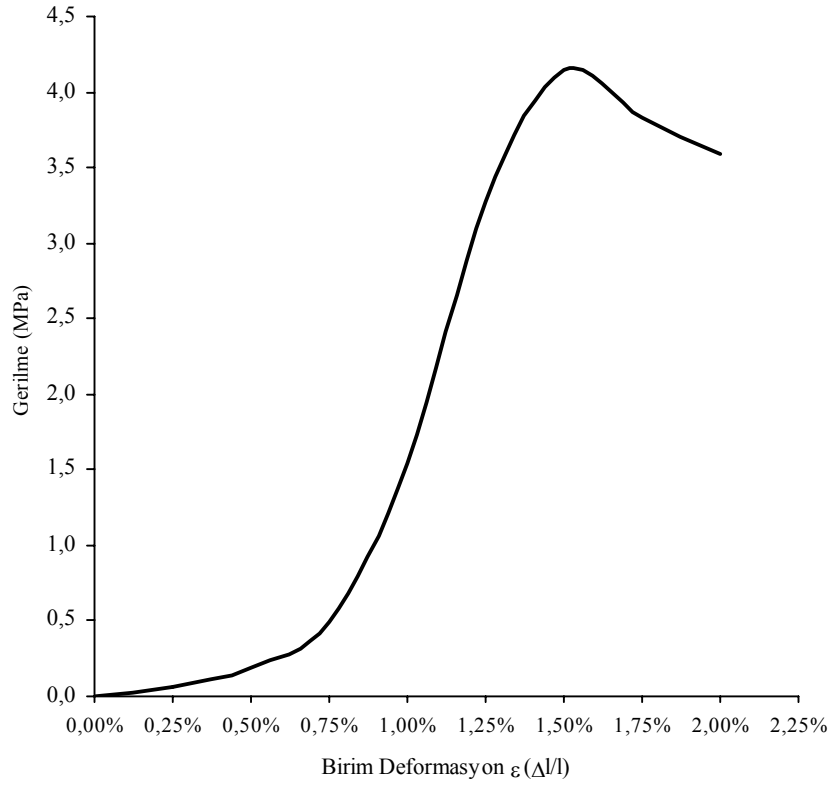
Şekil C.1: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



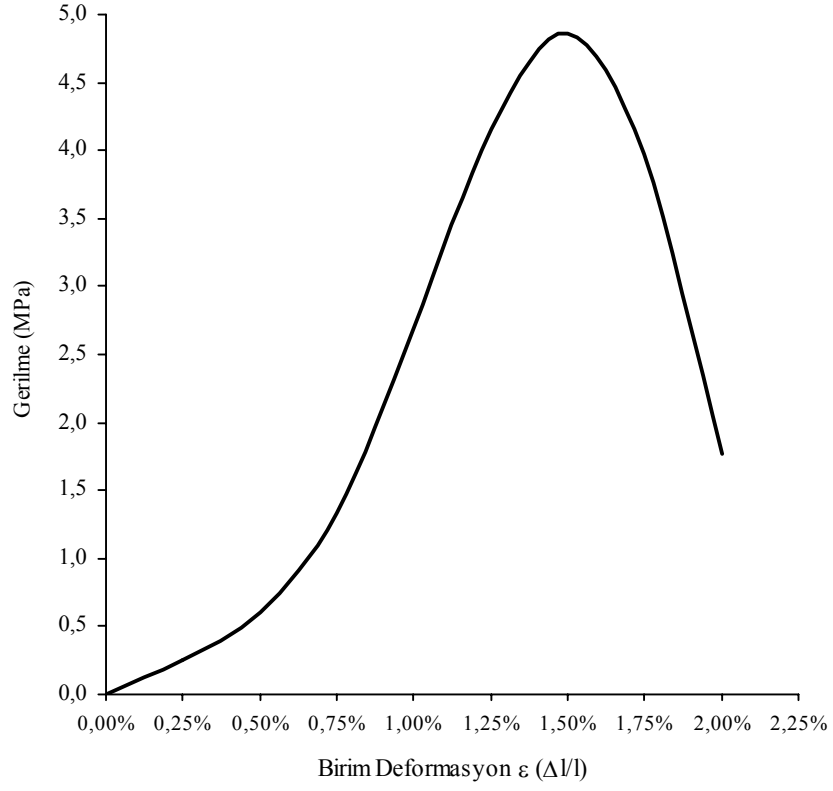
Şekil C.2: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



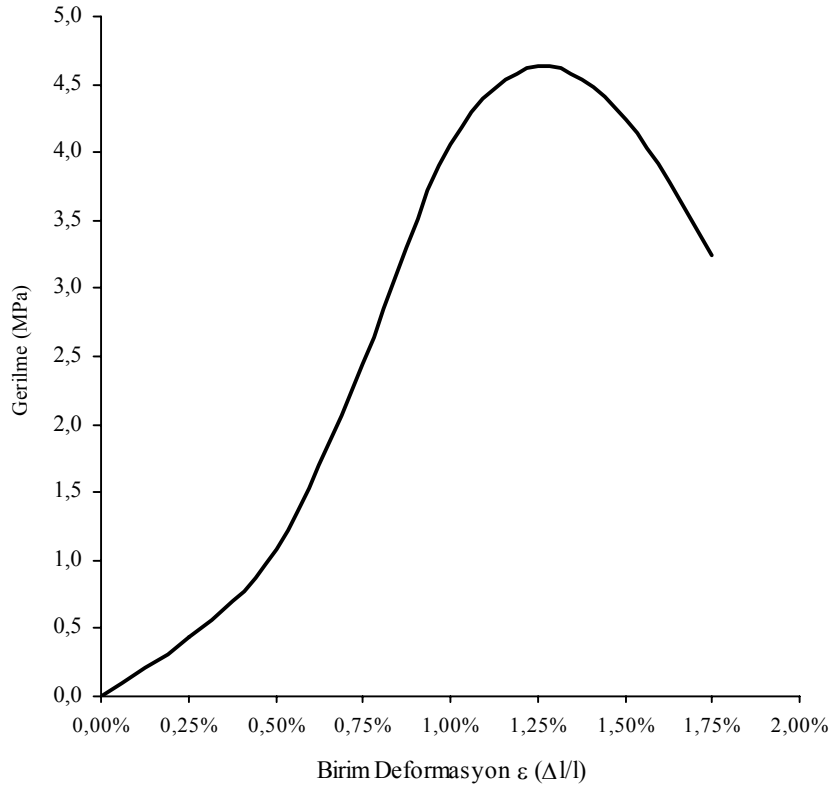
Şekil C.3: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



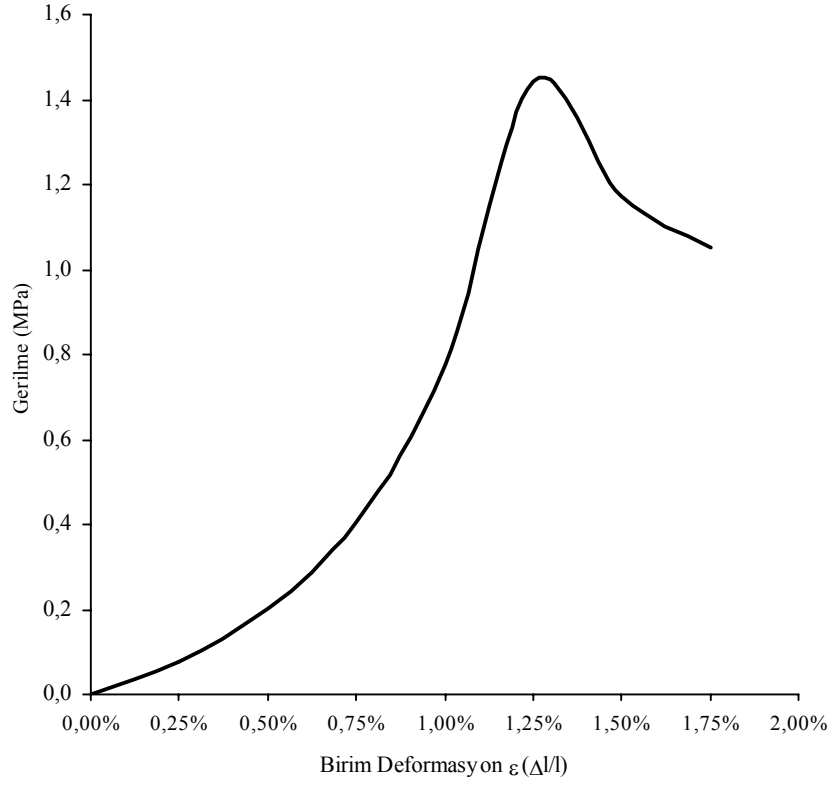
Şekil C.4: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



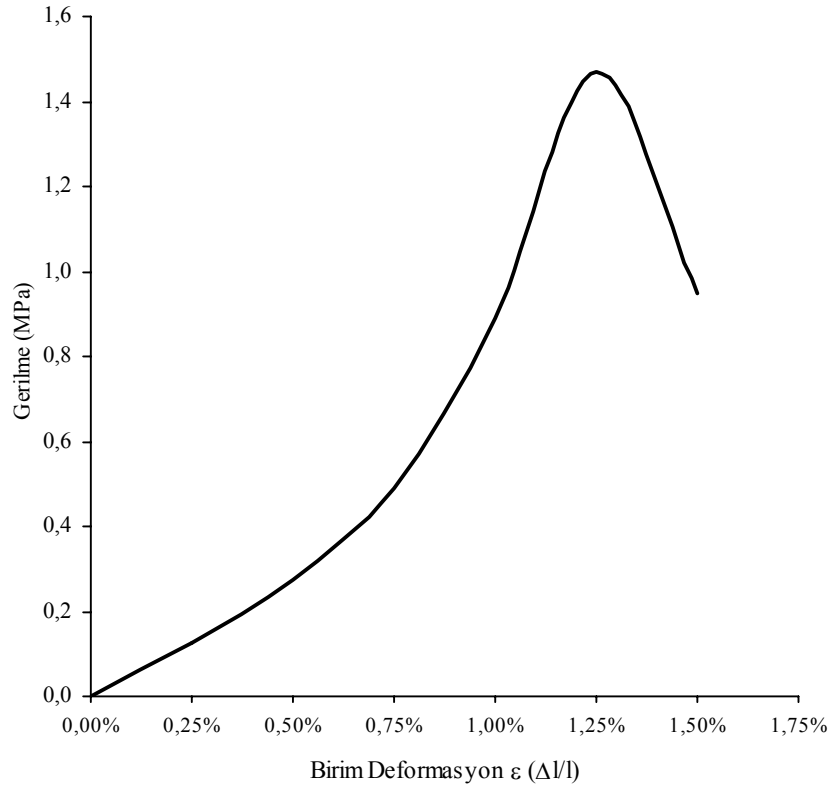
Şekil C.5: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



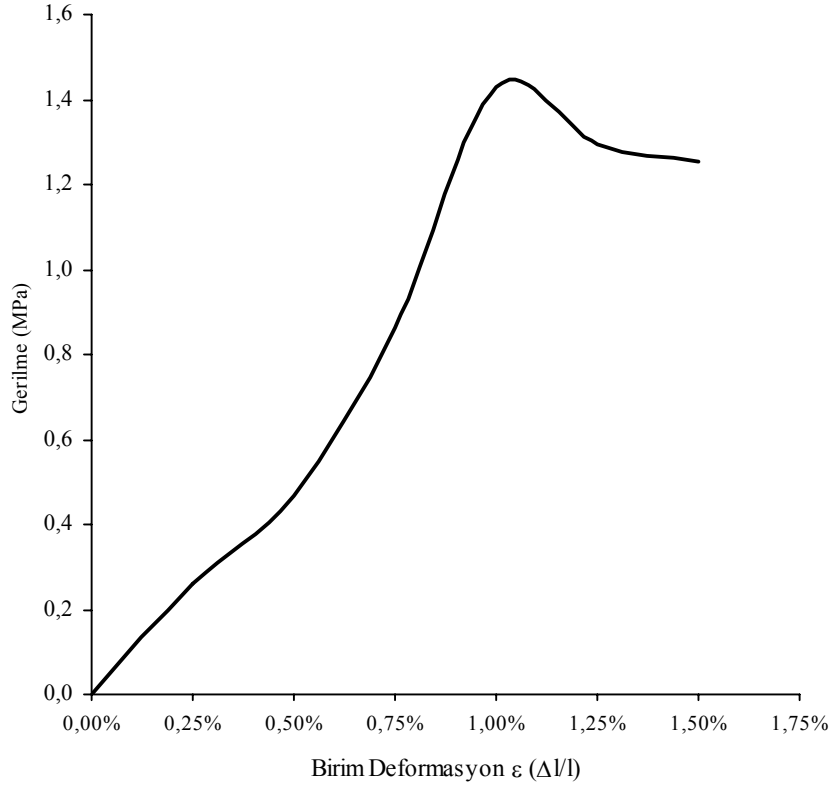
Şekil C.6: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



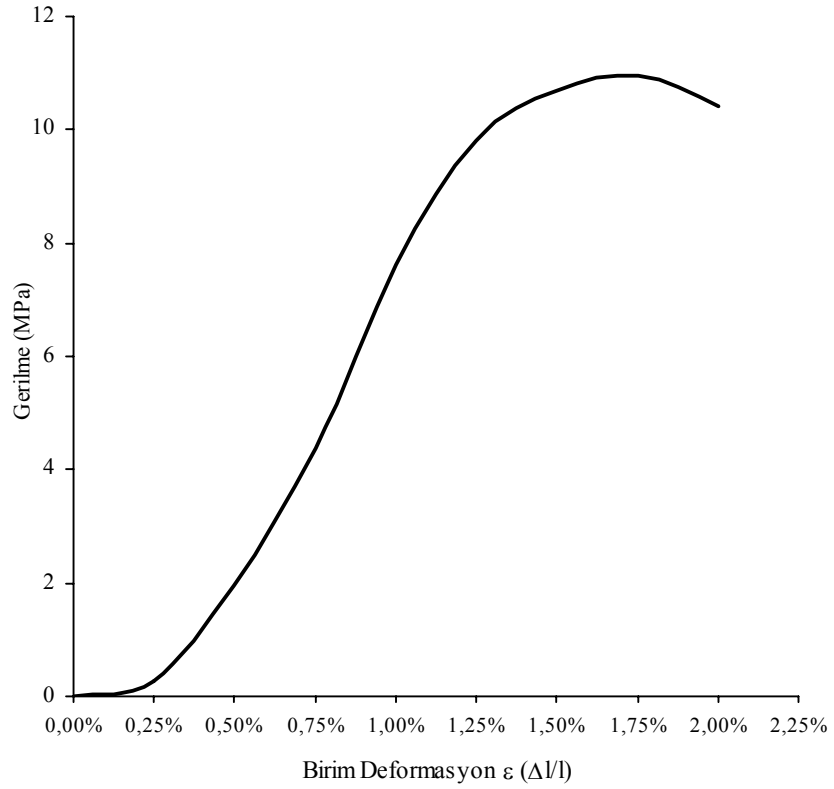
Şekil C.7: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



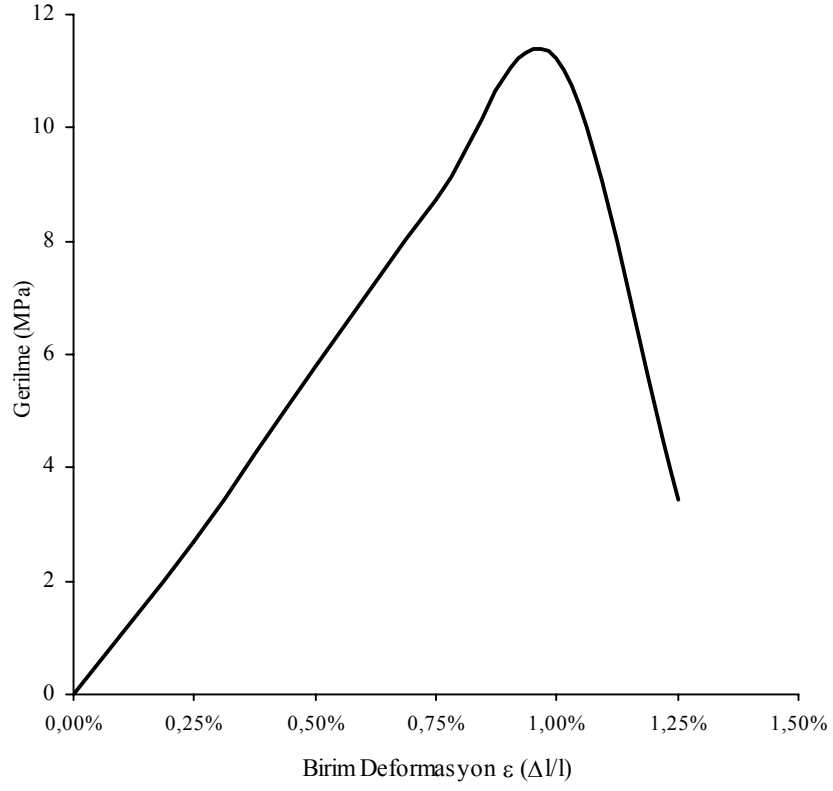
Şekil C.8: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



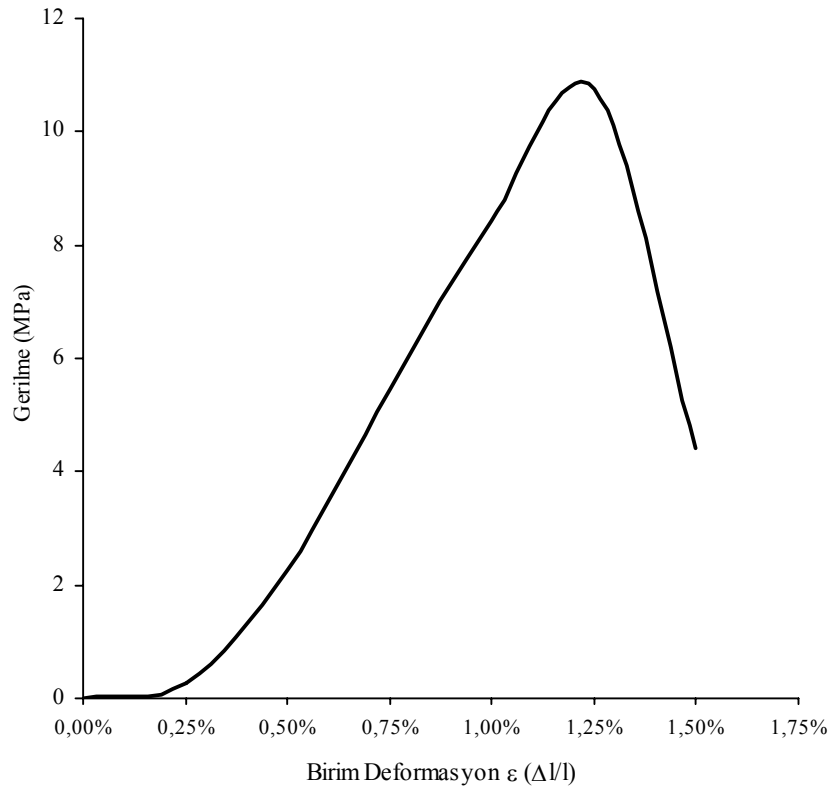
Şekil C.9: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %25 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



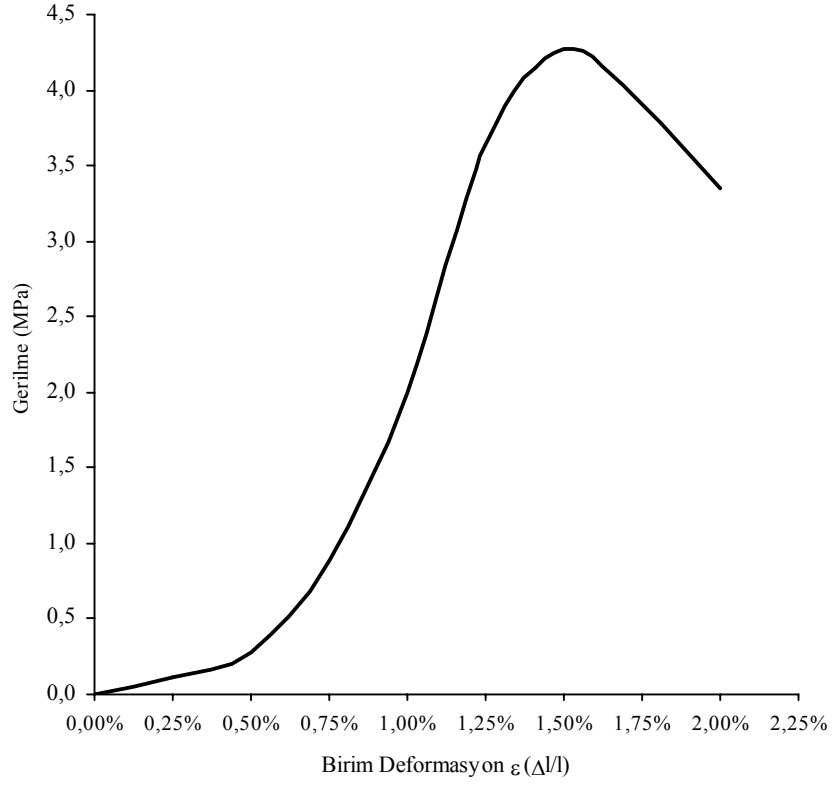
Şekil C.10: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



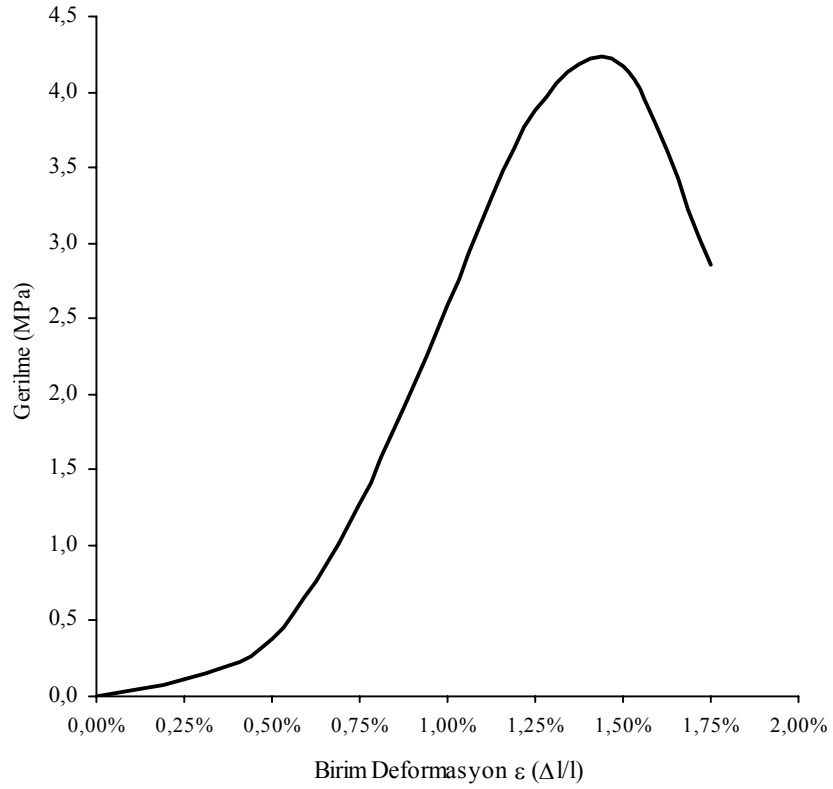
Şekil C.11: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



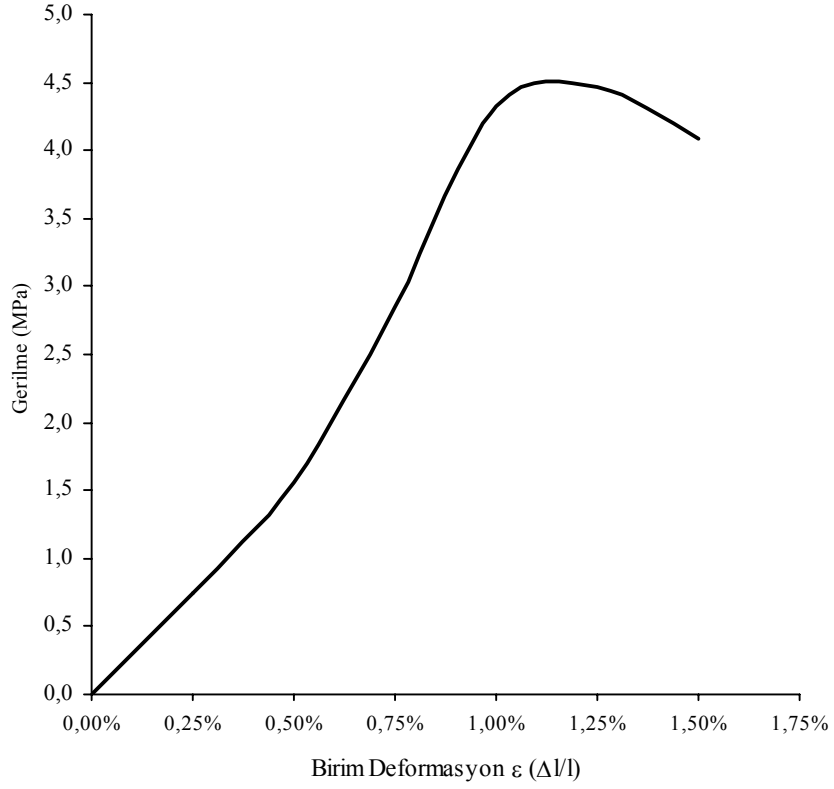
Şekil C.12: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



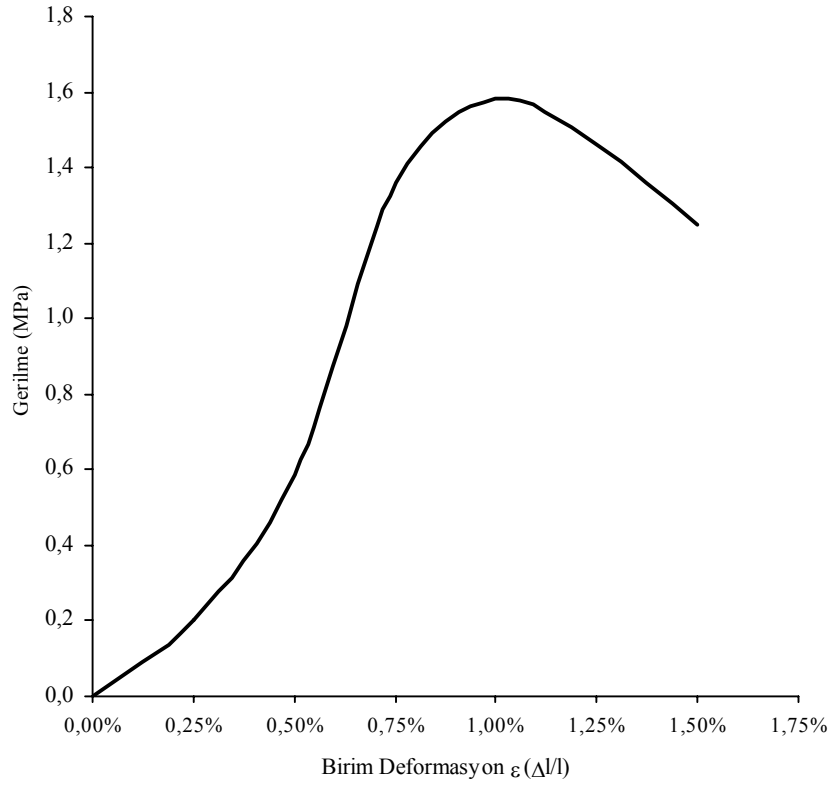
Şekil C.13: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



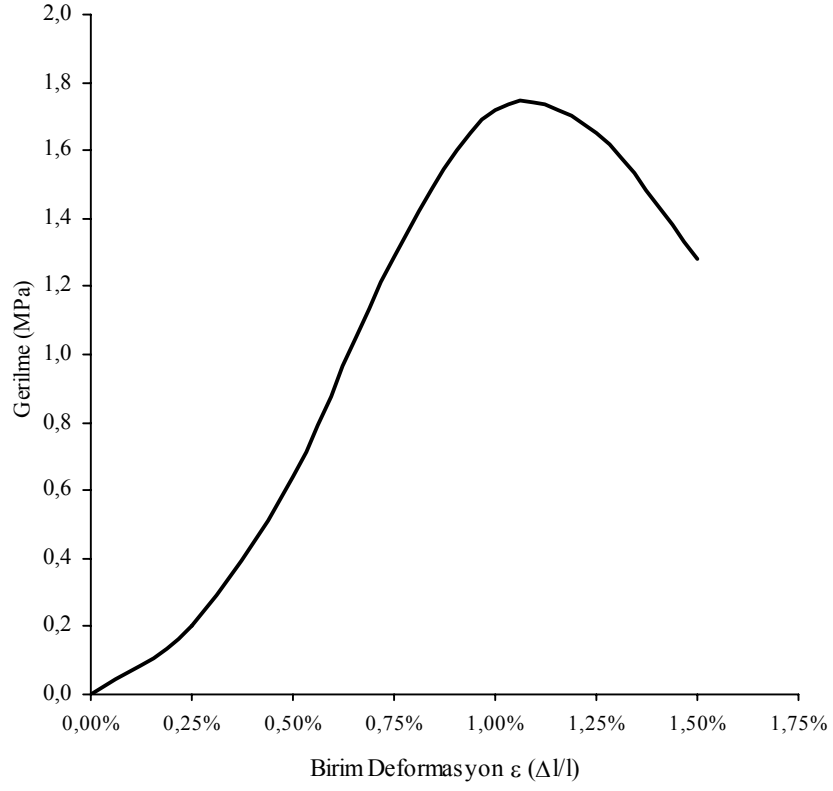
Şekil C.14: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



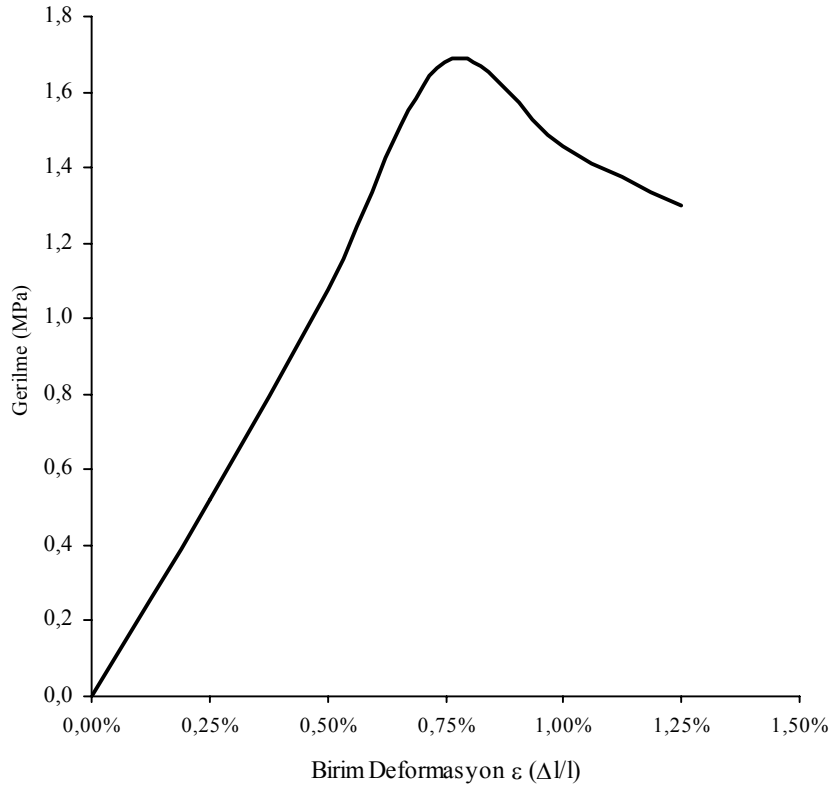
Şekil C.15: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



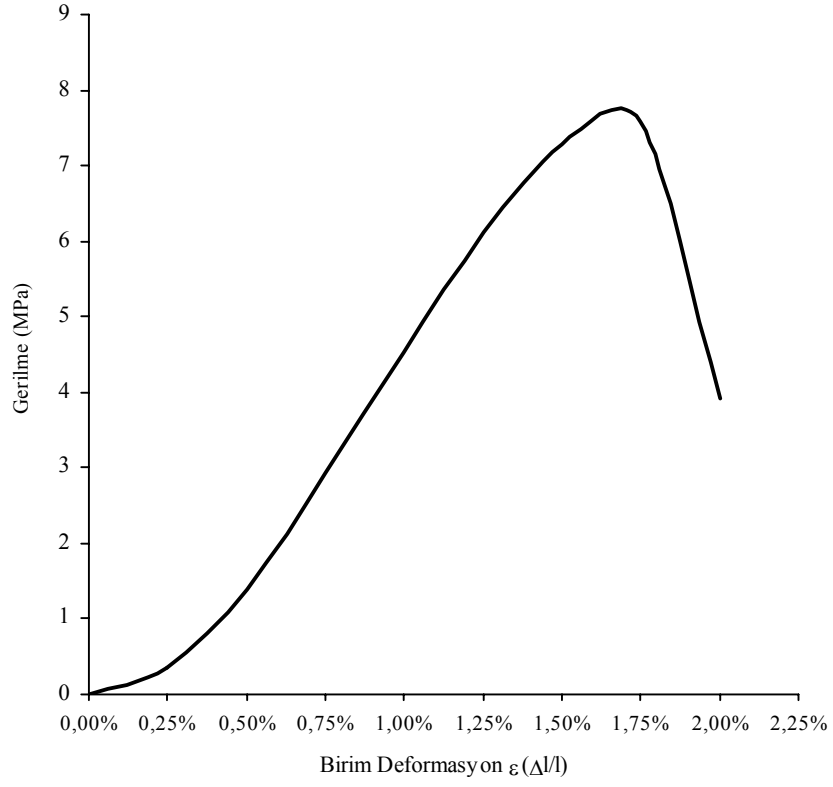
Şekil C.16: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



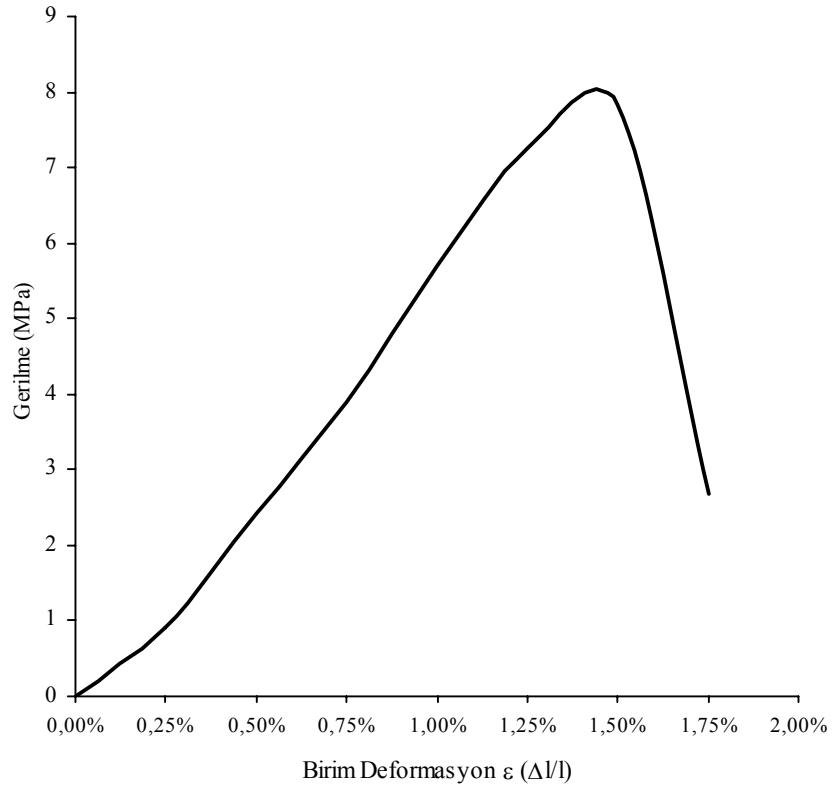
Şekil C.17: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



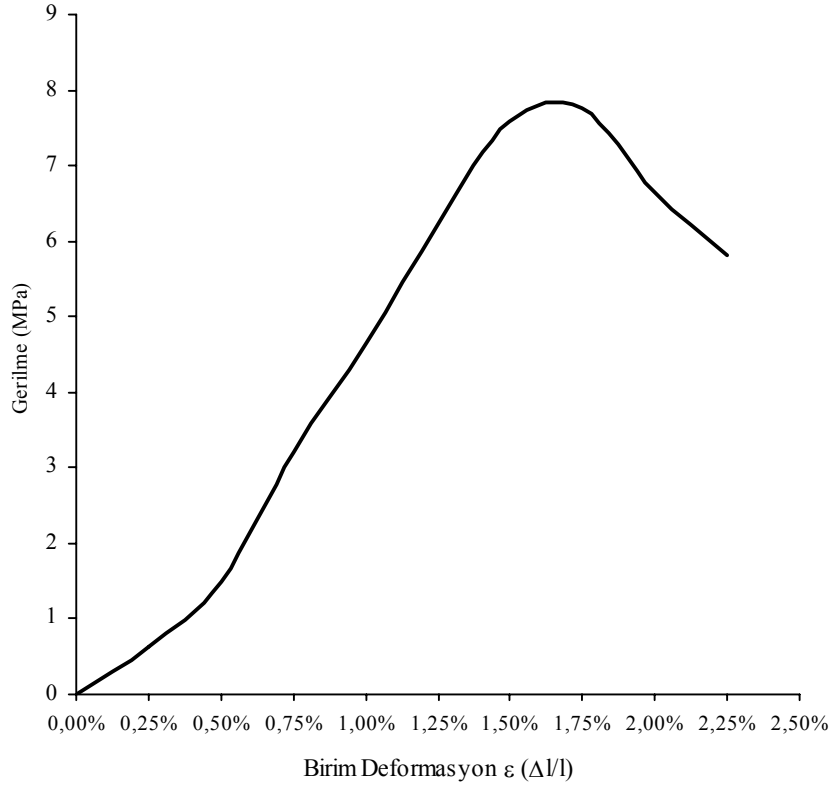
Şekil C.18: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %50 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



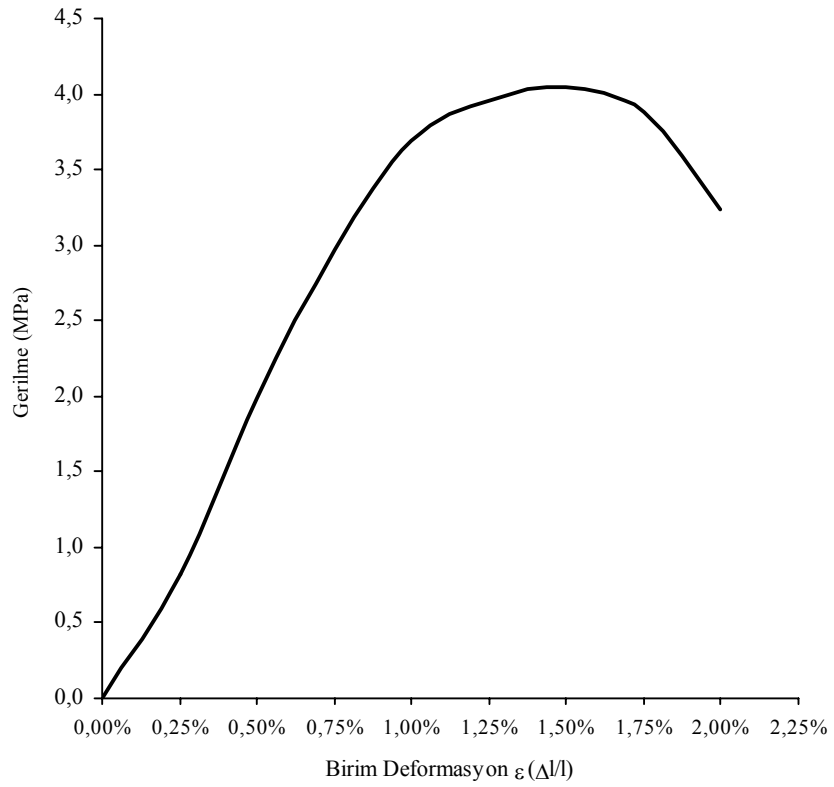
Şekil C.19: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



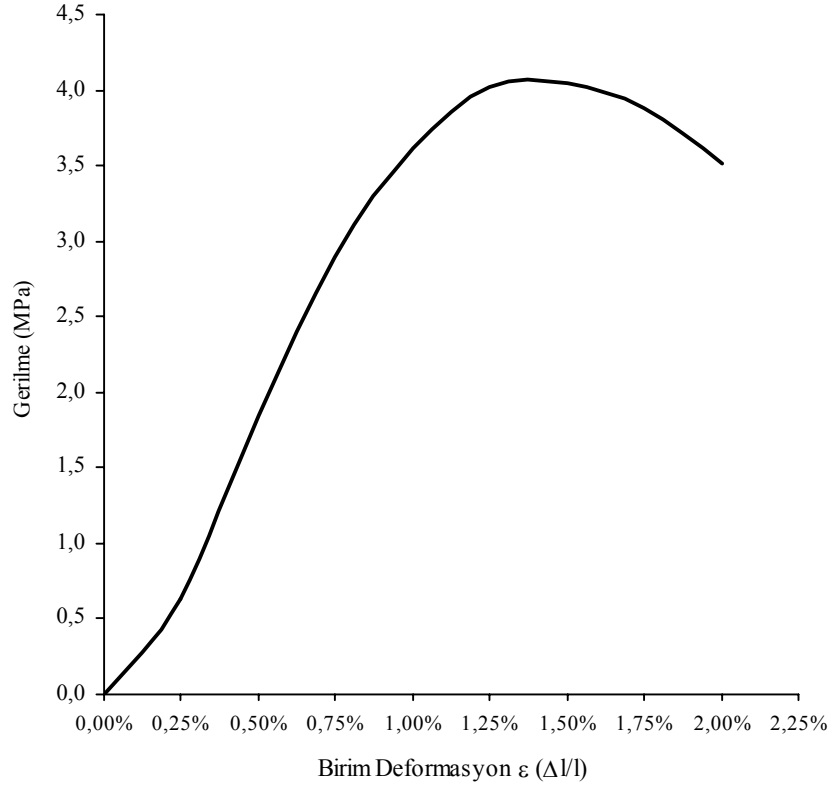
Şekil C.20: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



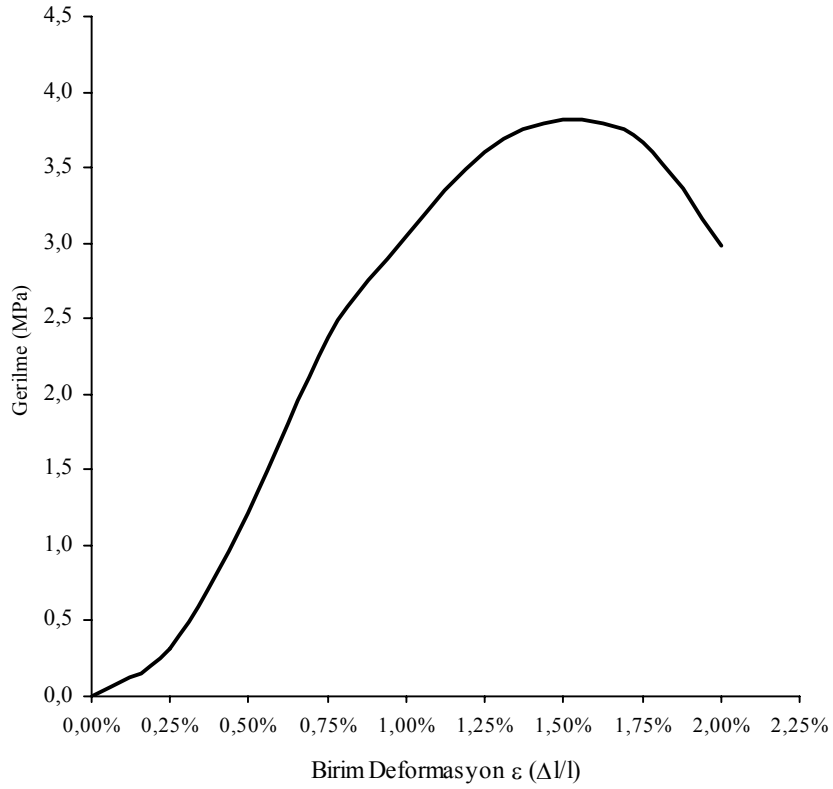
Şekil C.21: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



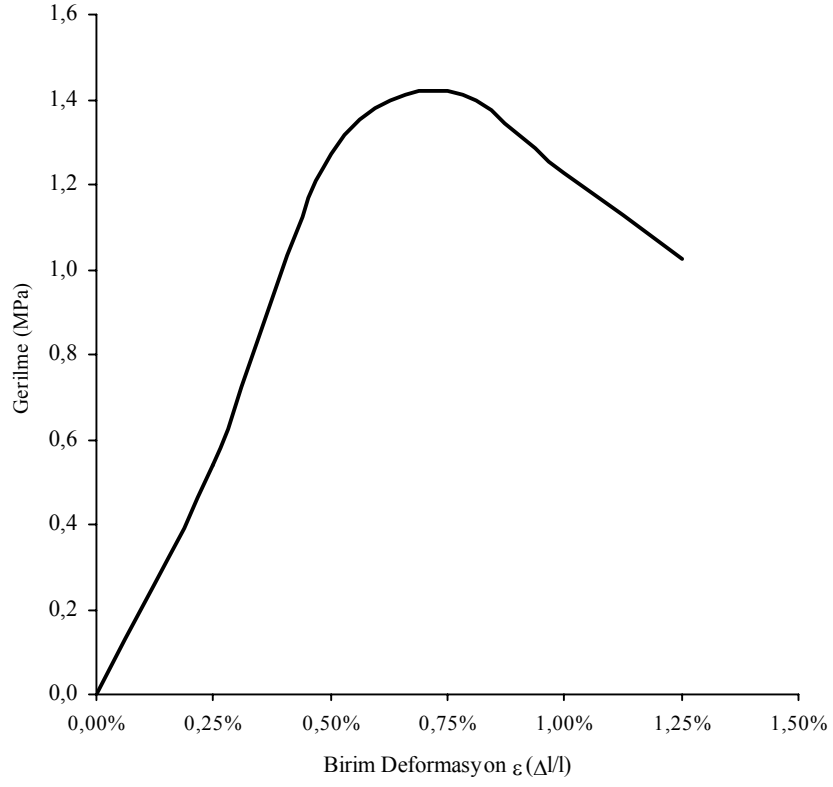
Şekil C.22: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



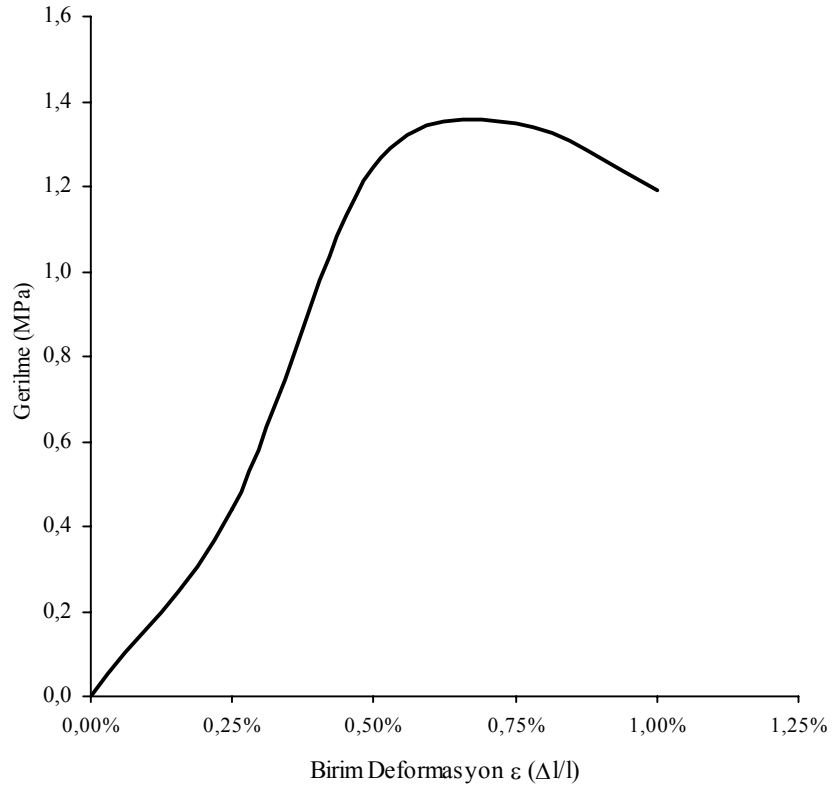
Şekil C.23: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



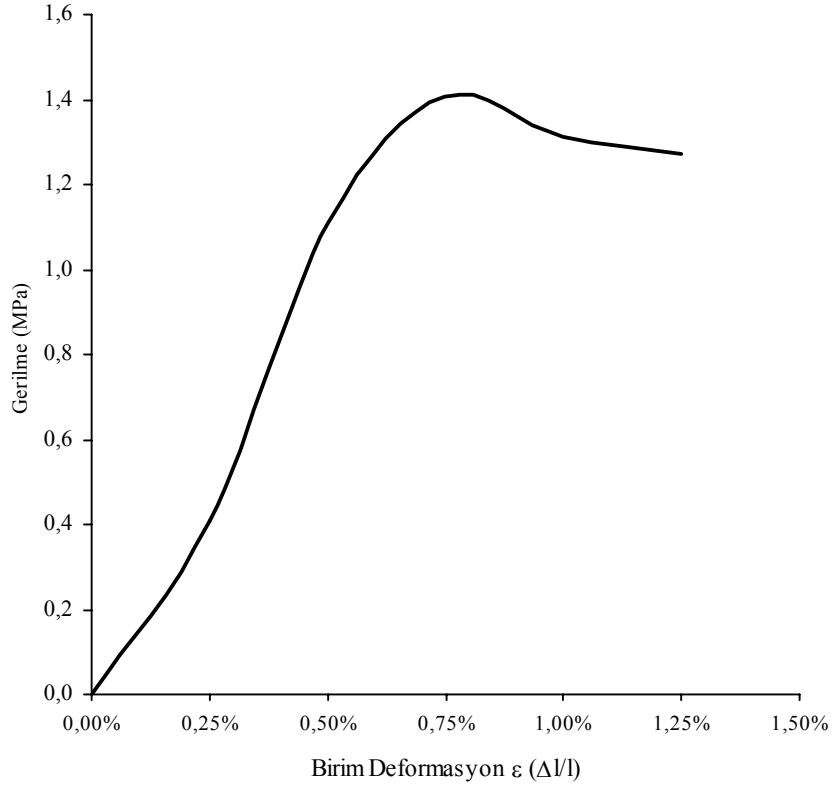
Şekil C.24: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



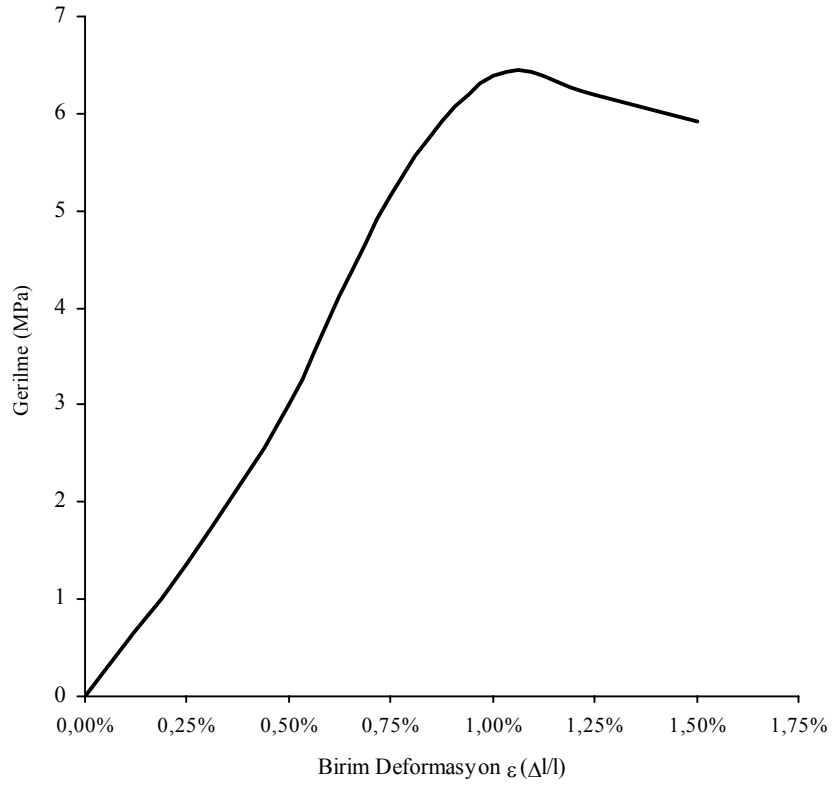
Şekil C.25: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



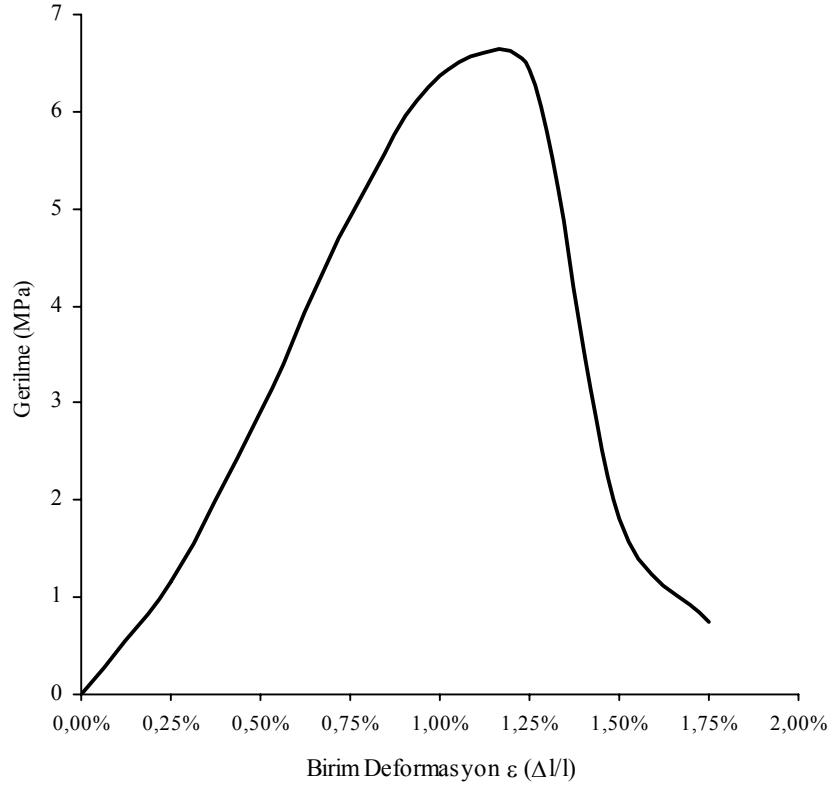
Şekil C.26: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



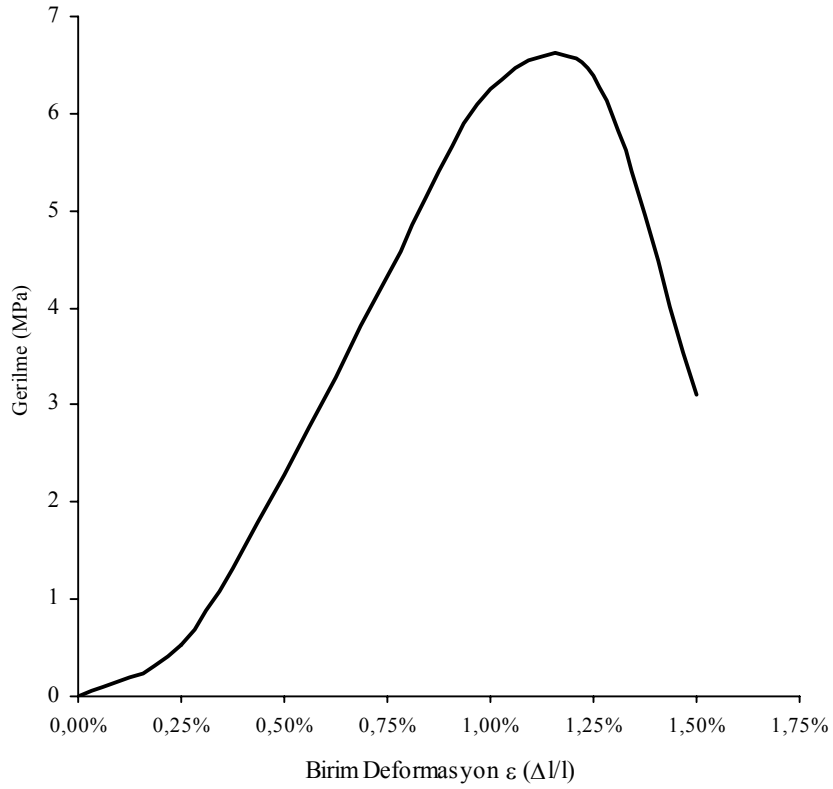
Şekil C.27: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



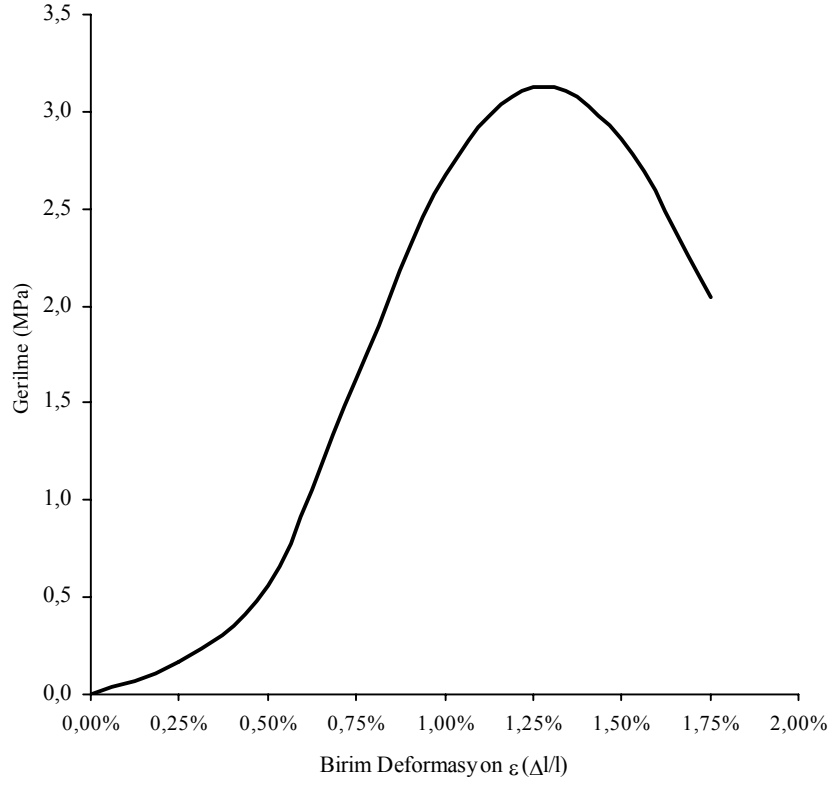
Şekil C.28: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



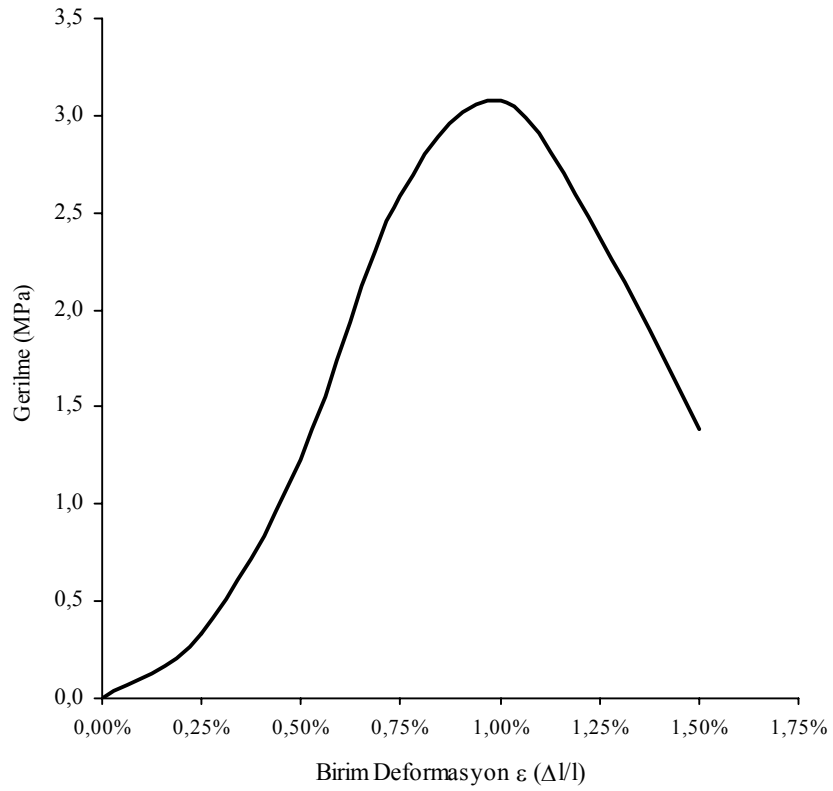
Şekil C.29: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



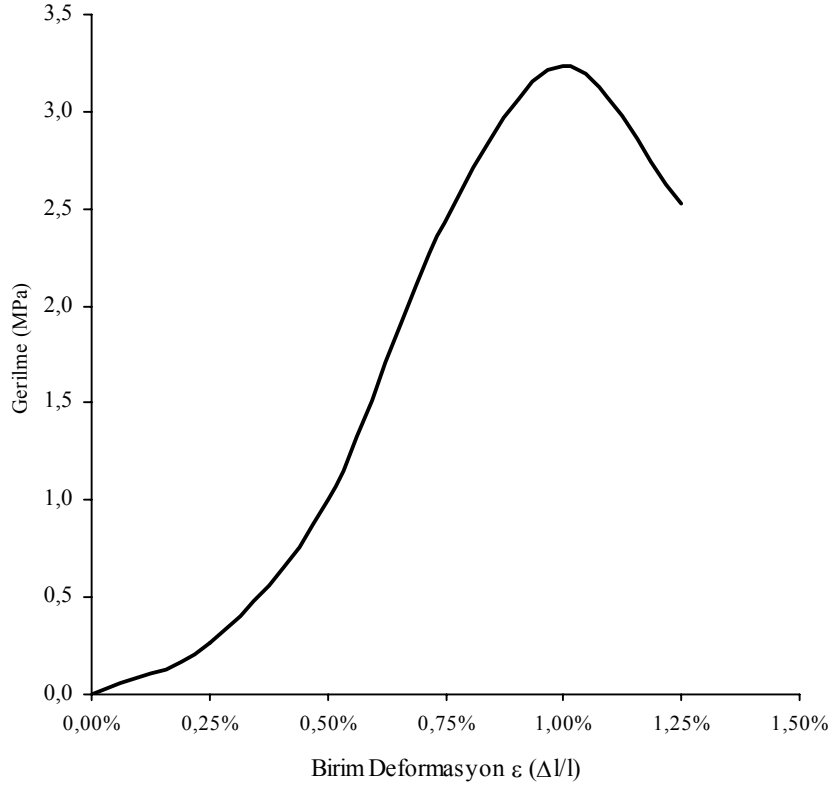
Şekil C.30: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



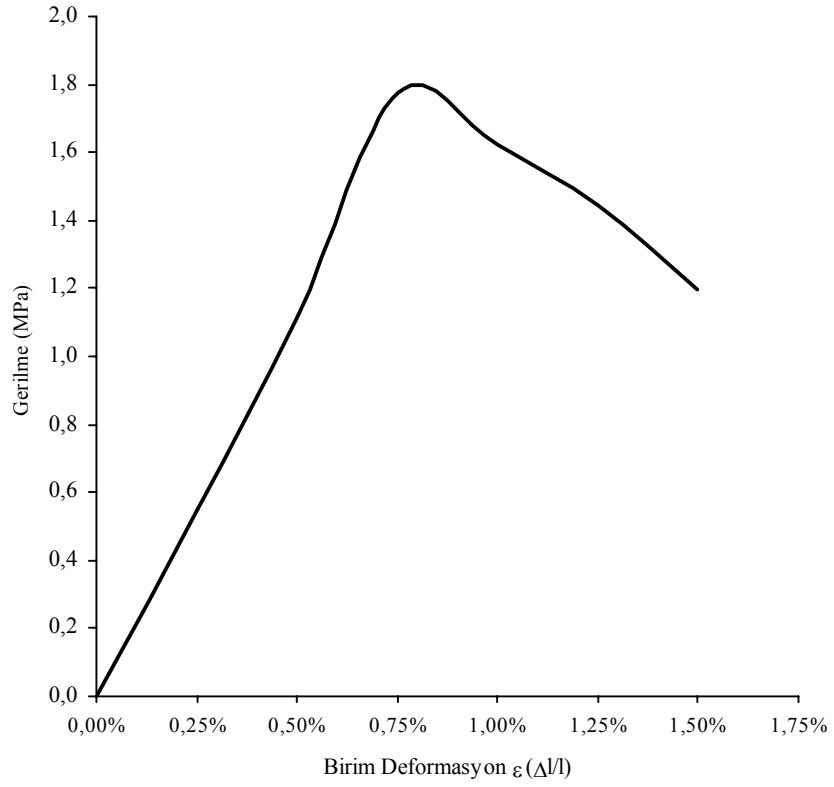
Şekil C.31: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



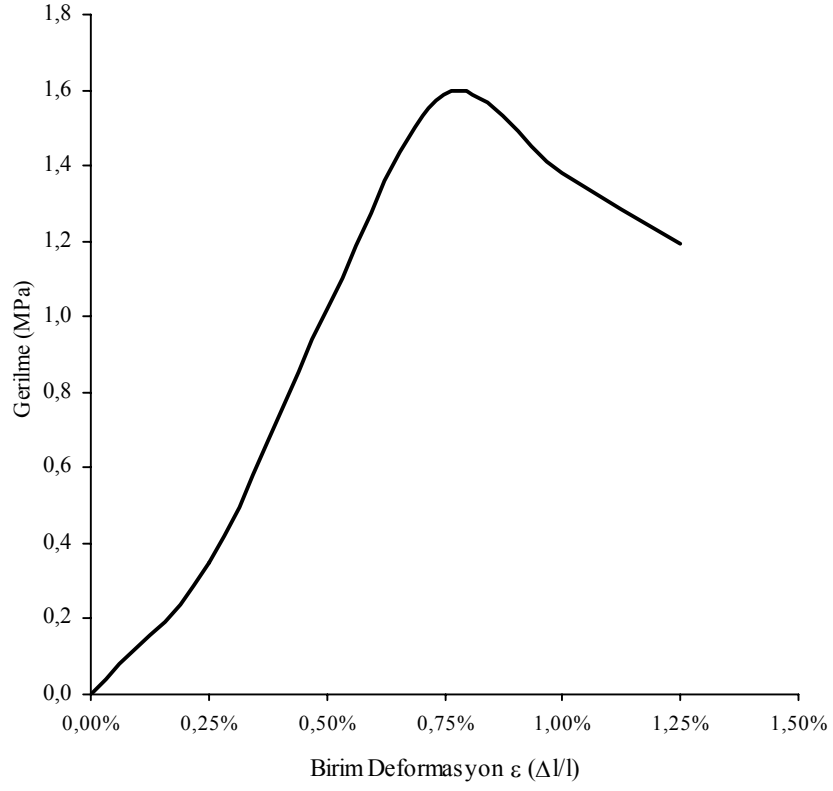
Şekil C.32: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



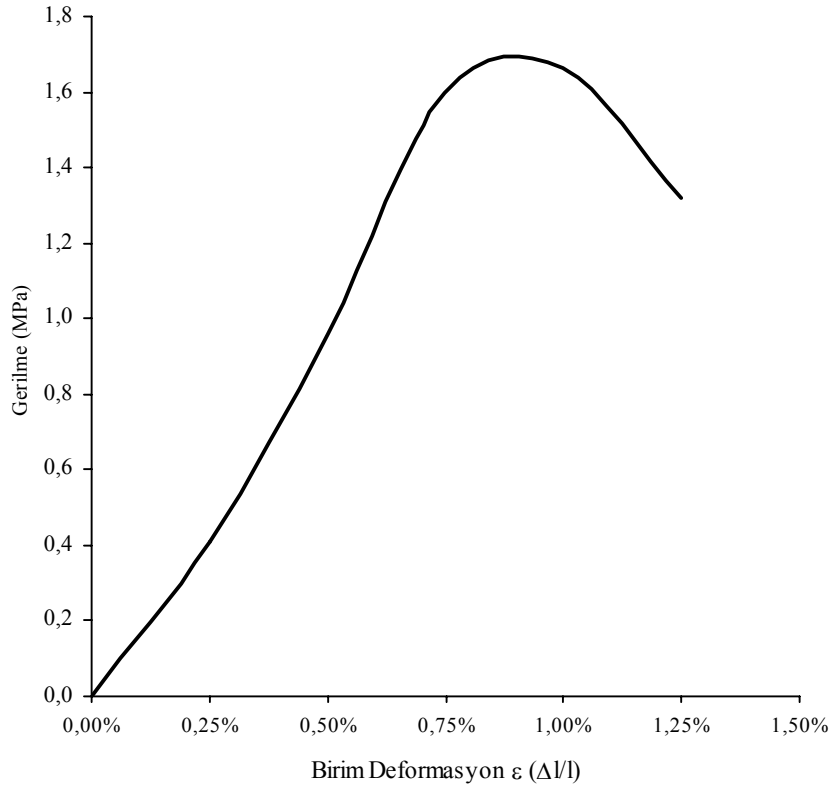
Şekil C.33: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



Şekil C.34: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



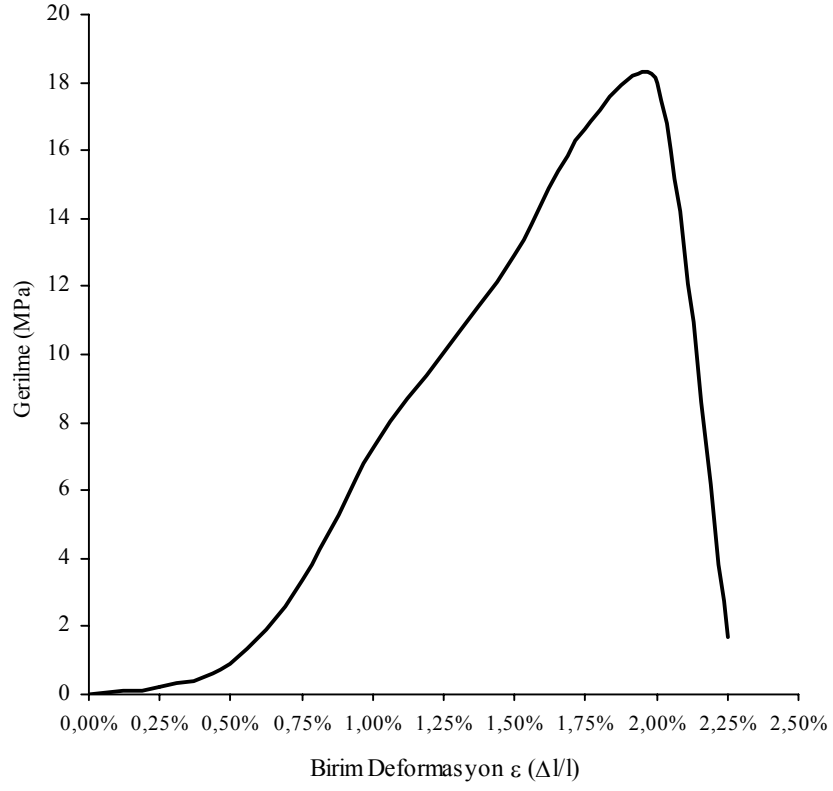
Şekil C.35: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



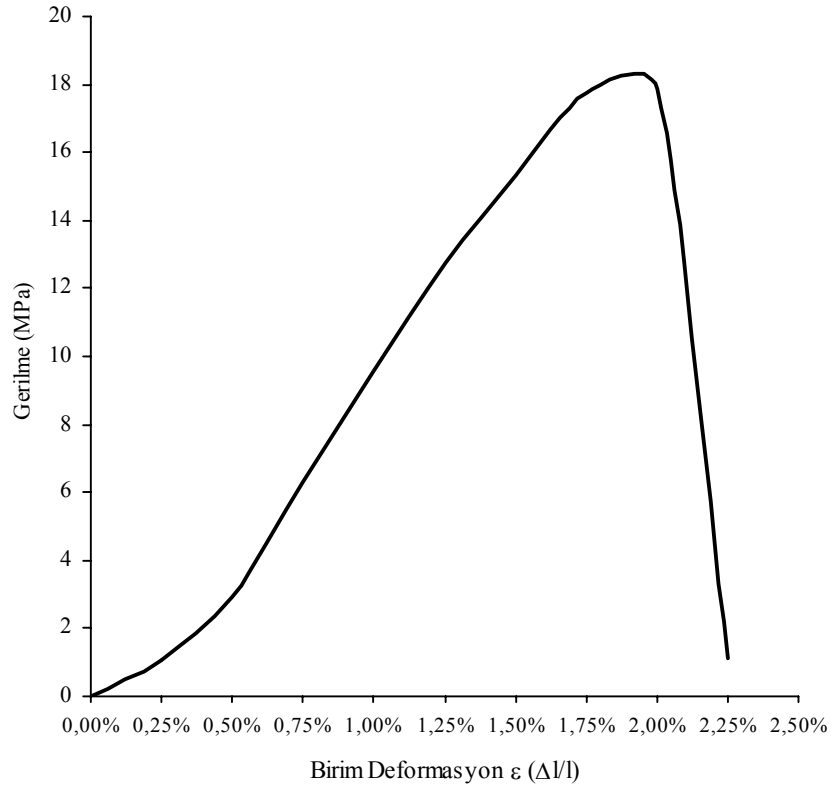
Şekil C.36: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 7 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği

EK-D

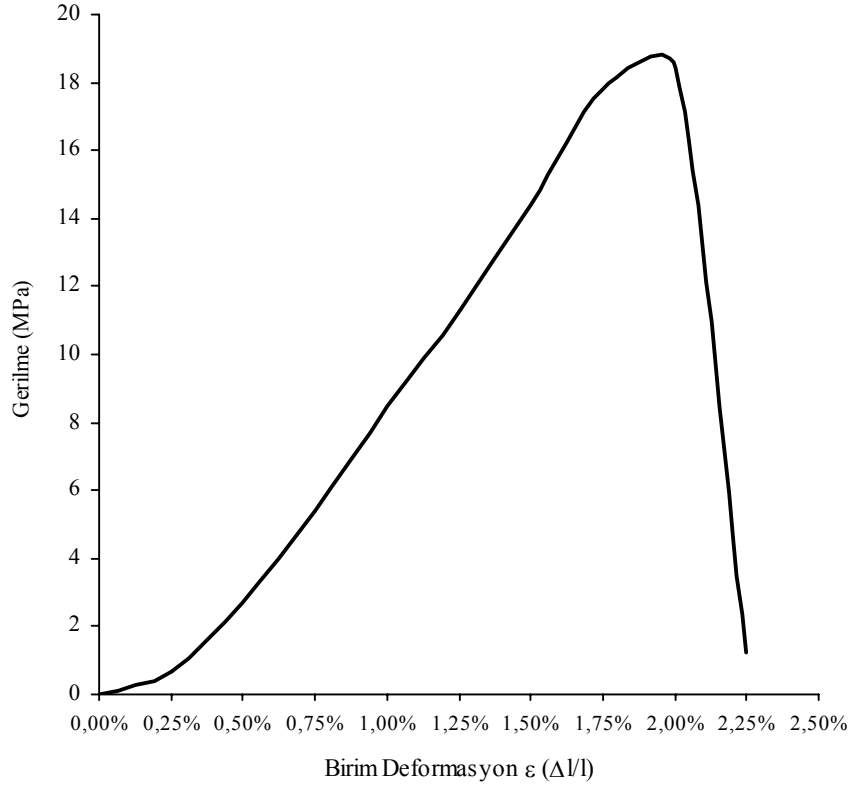
SP Numunesi 28 Günlük Serbest Basınç Mukavemetleri (MPa)										
Dr	S/Ç	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=100 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=150 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa	Ep=200 kPa
25%	0,7	17,99	18,10	17,94	17,96	17,74	17,87	18,40	18,17	18,63
	1	7,79	7,71	7,87	8,25	8,12	8,38	7,96	7,87	8,05
	1,5	2,10	2,18	2,03	2,04	2,13	1,95	2,03	1,99	2,08
50%	0,7	19,37	19,48	19,44	19,20	19,27	19,14	19,83	20,01	19,65
	1	5,63	5,68	5,74	5,12	5,03	5,21	5,38	5,27	5,50
	1,5	2,36	2,24	2,49	2,36	2,26	2,47	2,34	2,26	2,45
75%	0,7	13,03	13,15	12,82	13,72	13,61	13,67	13,27	13,21	13,33
	1	7,52	7,41	7,61	7,45	7,53	7,37	7,20	7,35	7,07
	1,5	2,37	2,30	2,45	2,42	2,46	2,35	2,39	2,30	2,48
100%	0,7	10,38	10,50	10,28	10,12	10,04	10,21	10,72	10,82	10,63
	1	6,21	6,30	6,11	5,88	5,99	5,77	6,47	6,39	6,55
	1,5	2,37	2,42	2,49	2,80	2,84	2,76	2,64	2,58	2,69



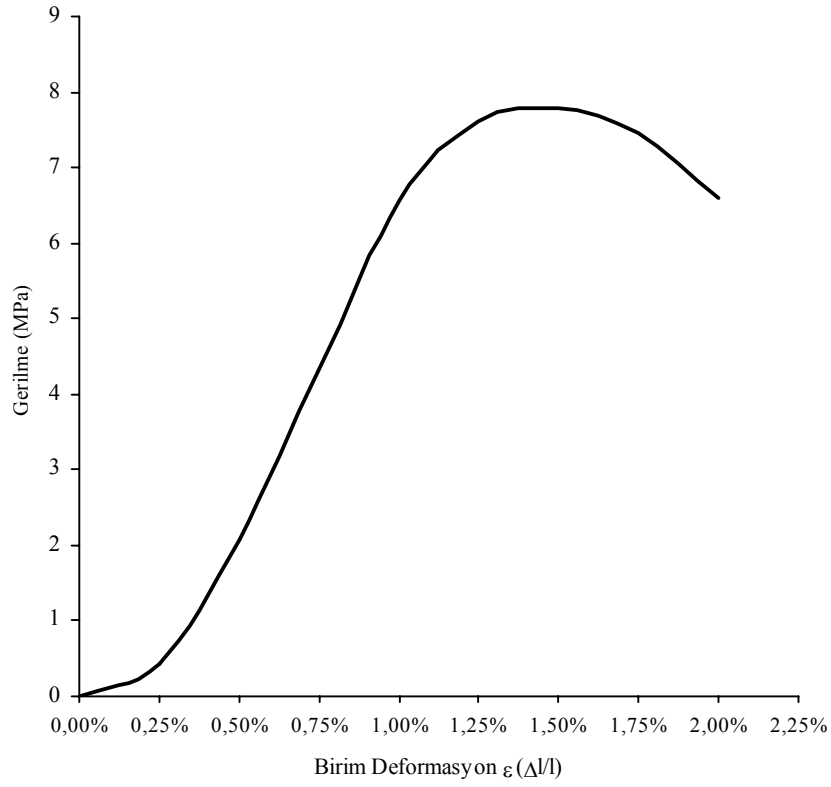
Şekil D.1: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



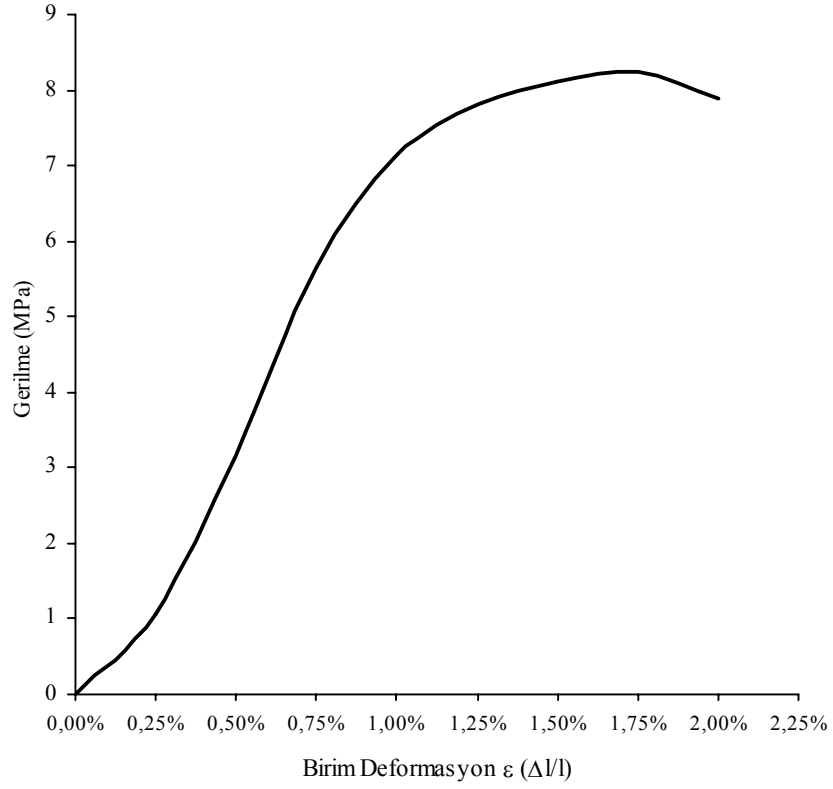
Şekil D.2: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



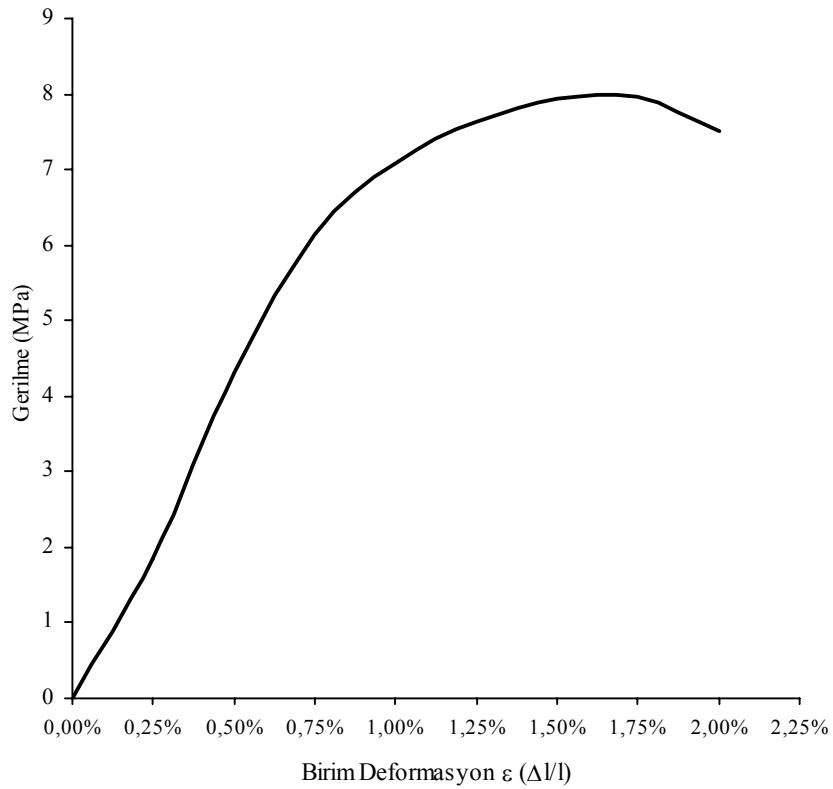
Şekil D.3: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



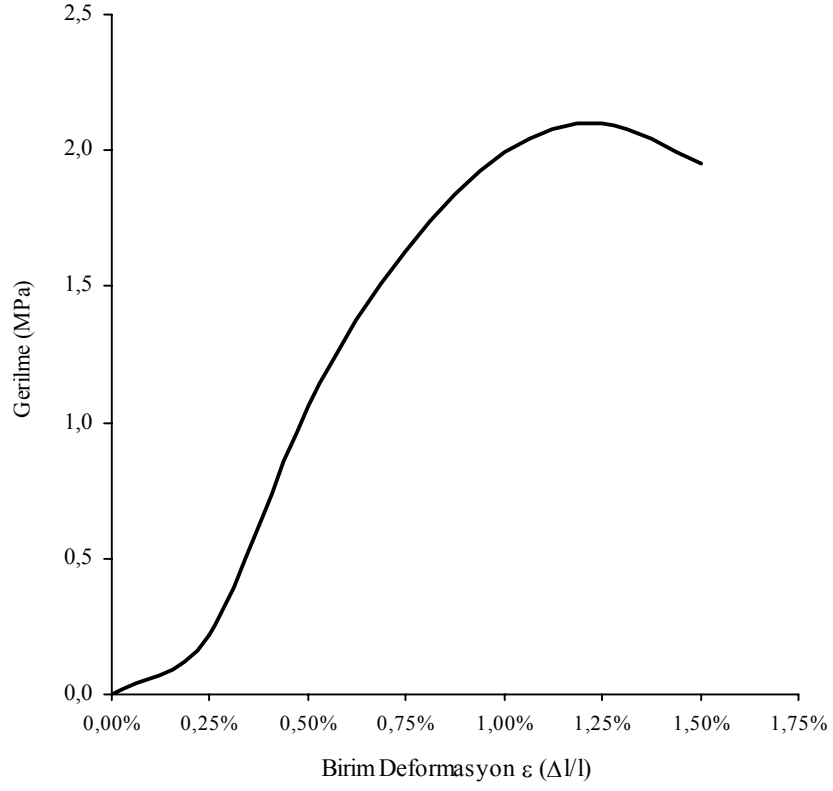
Şekil D.4: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



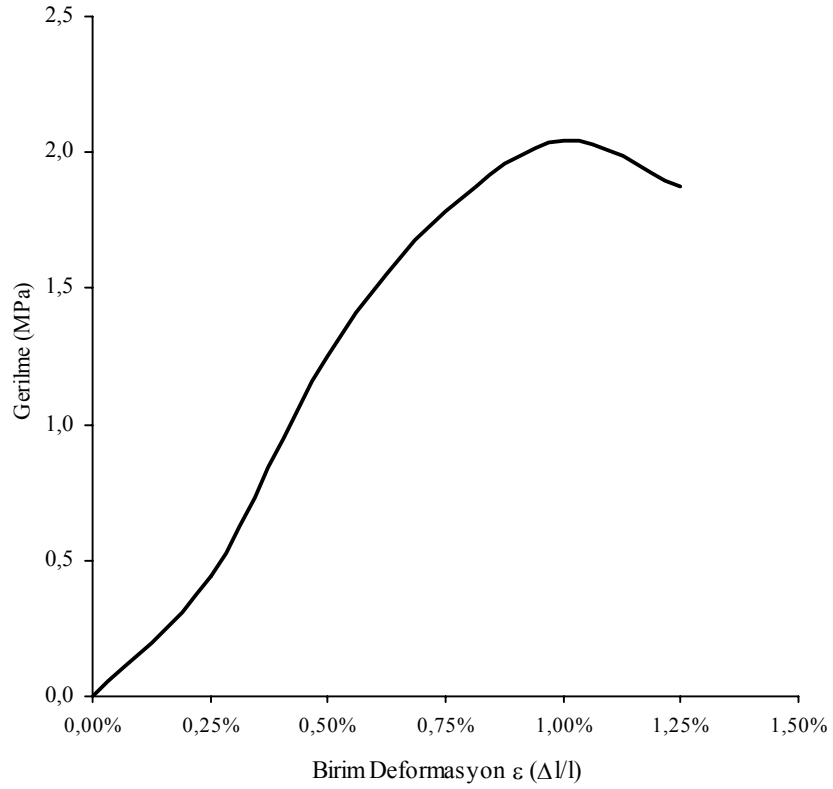
Şekil D.5: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



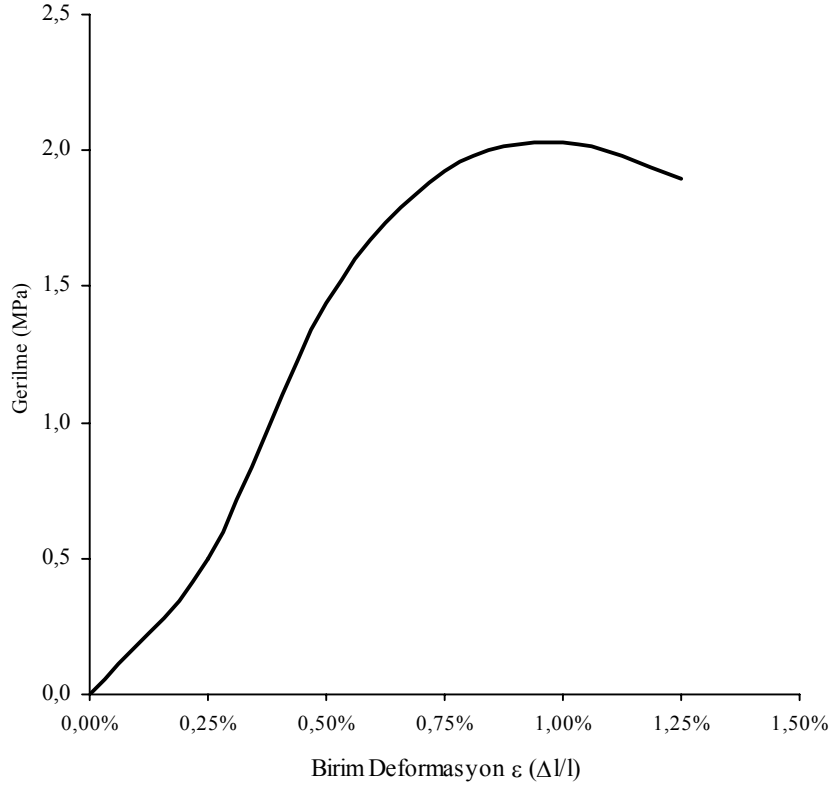
Şekil D.6: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



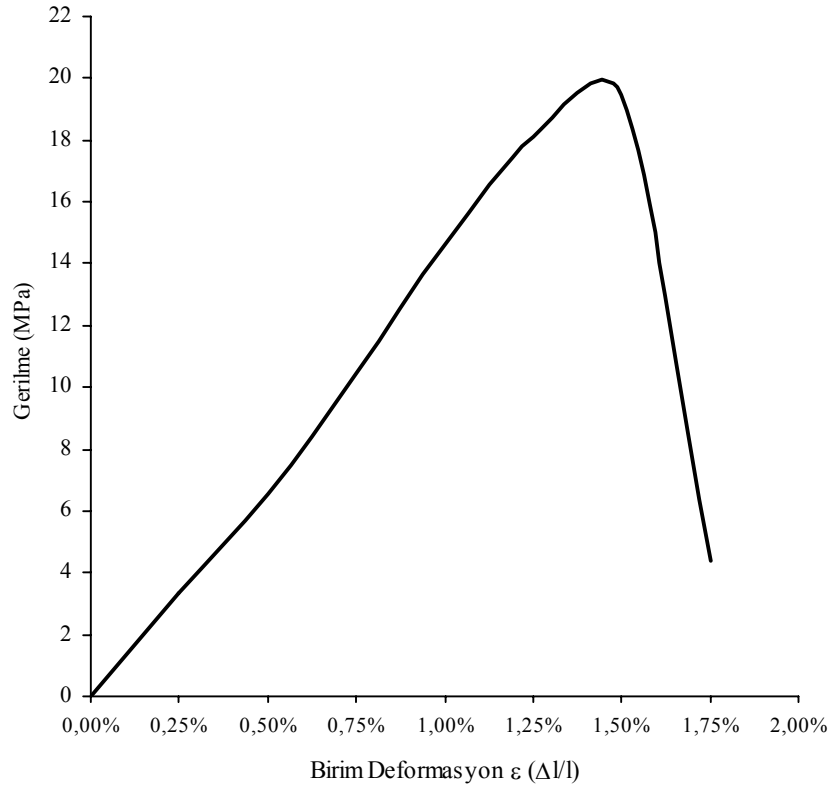
Şekil D.7: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



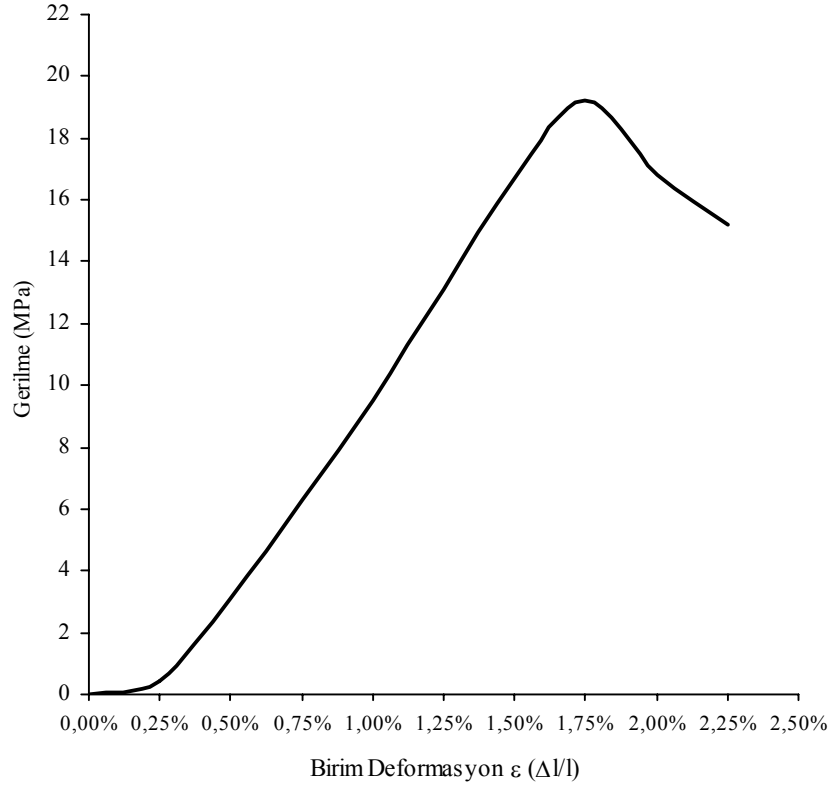
Şekil D.8: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



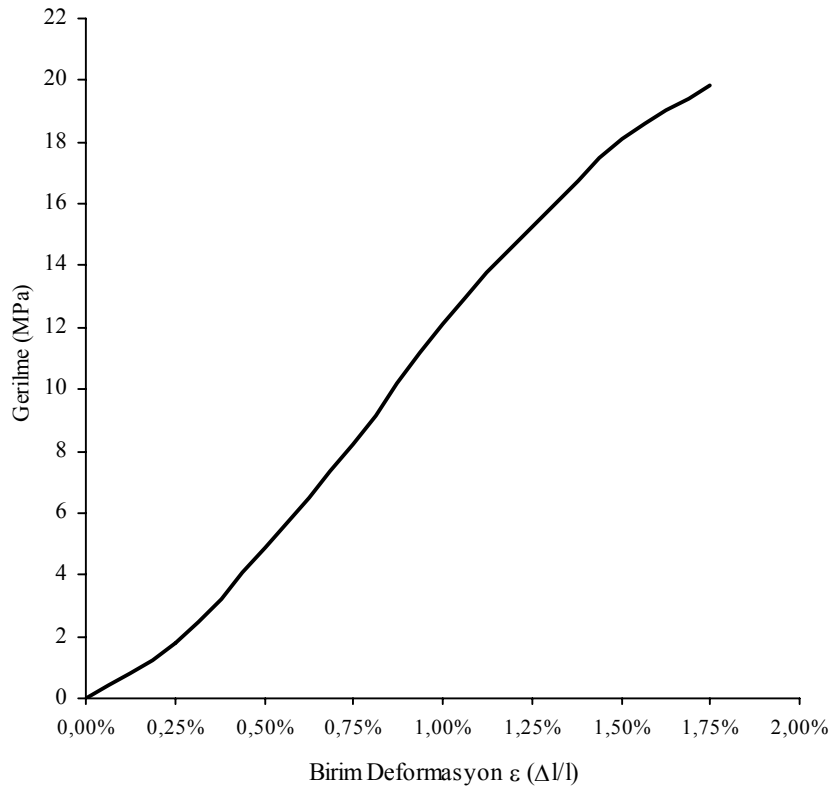
Şekil D.9: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %25 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



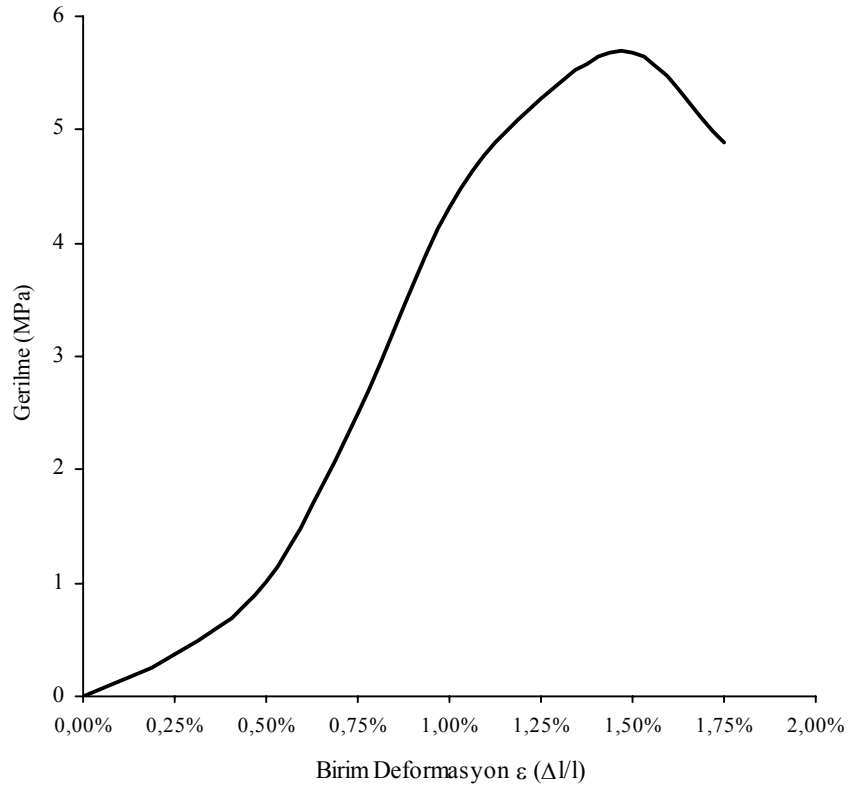
Şekil D.10: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



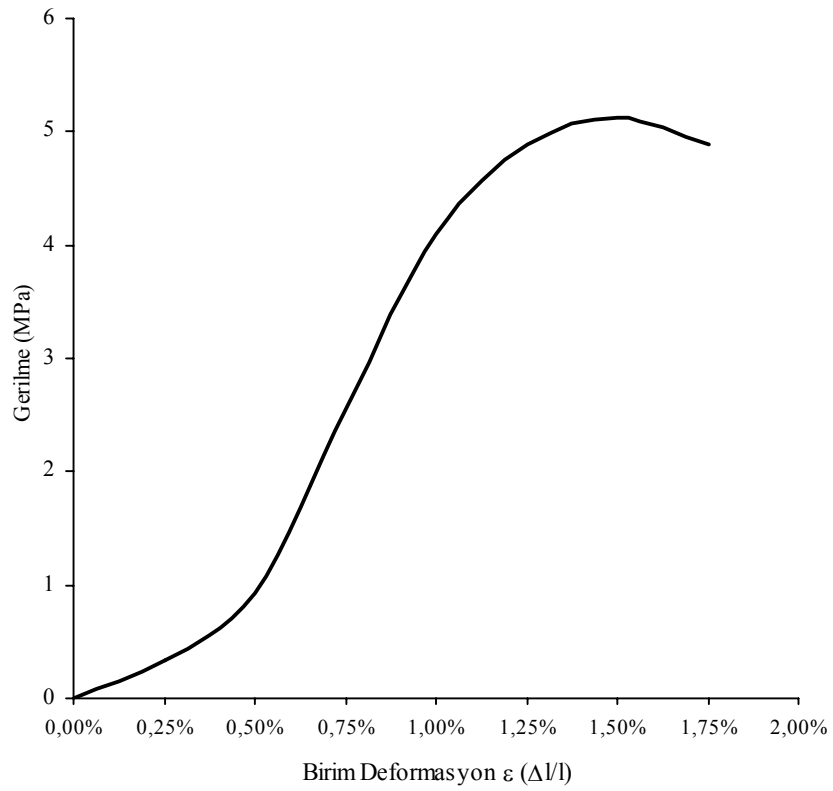
Şekil D.11: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



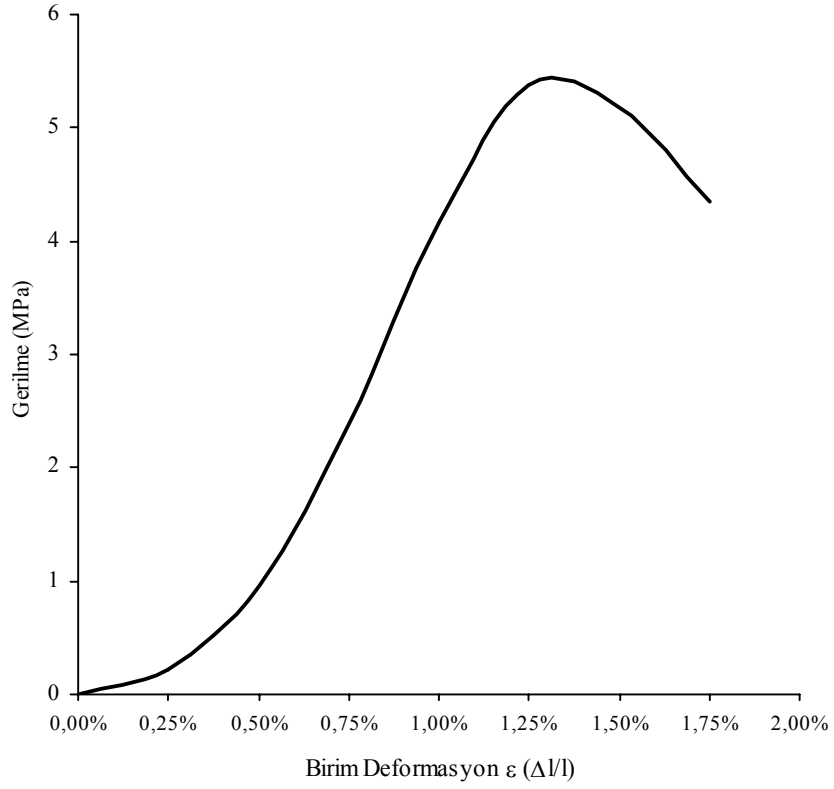
Şekil D.12: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



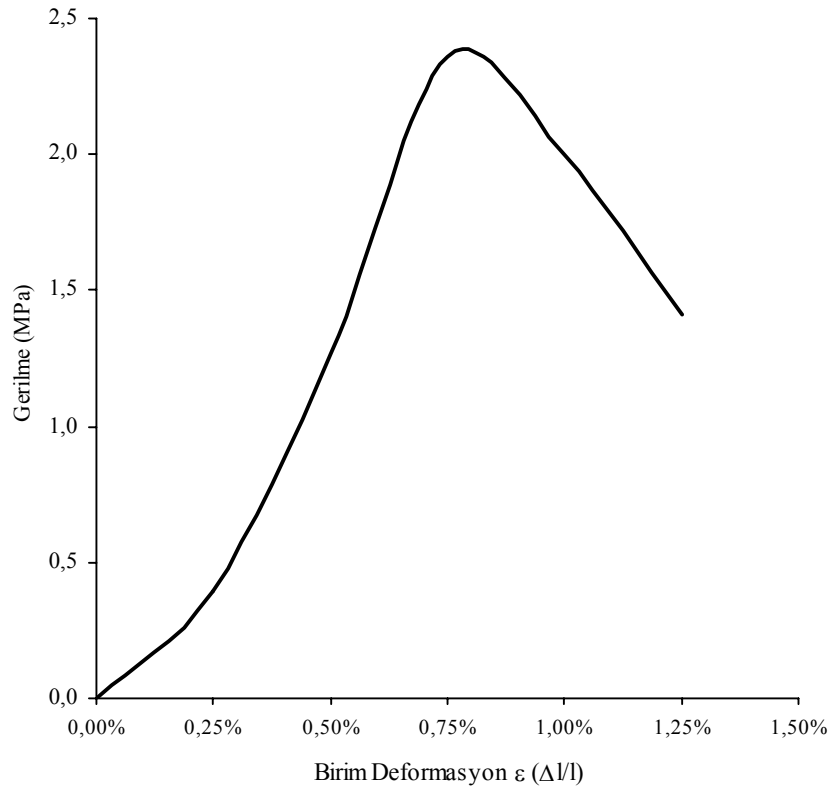
Şekil D.13: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



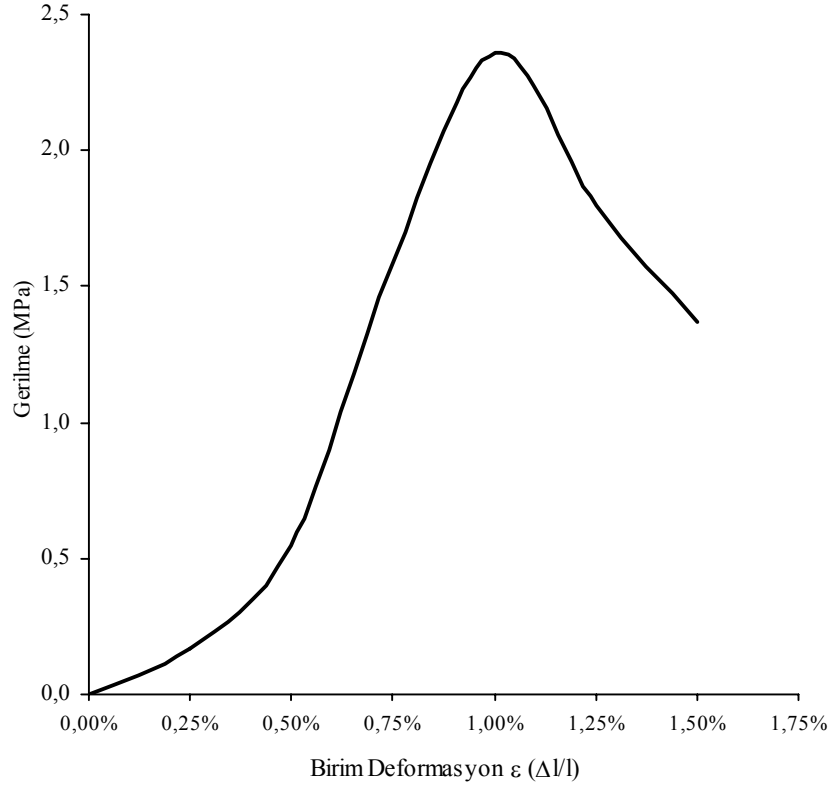
Şekil D.14: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



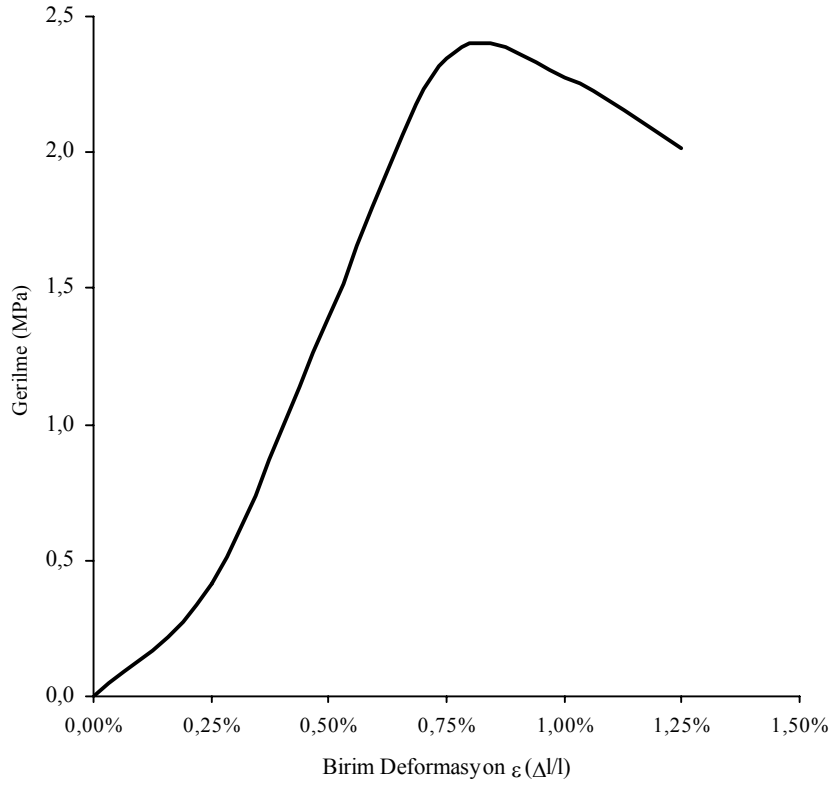
Şekil D.15: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



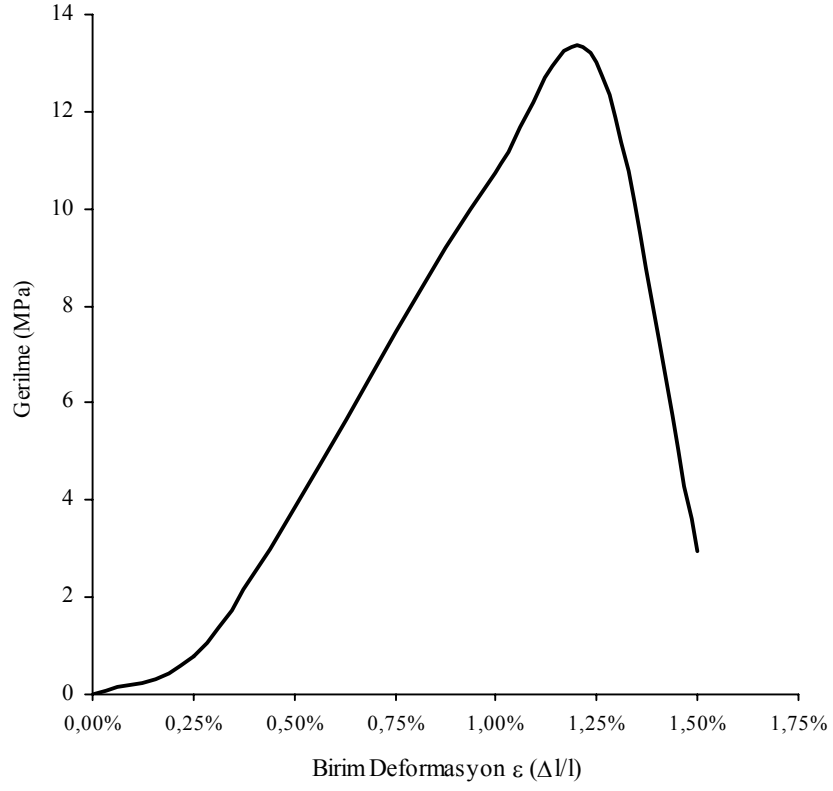
Şekil D.16: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



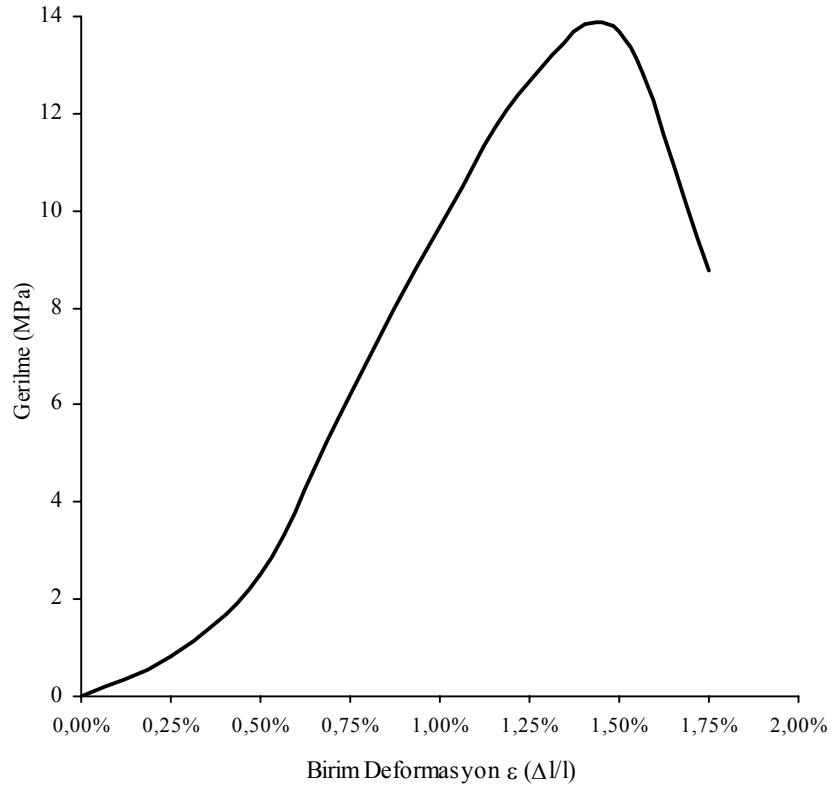
Şekil D.17: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



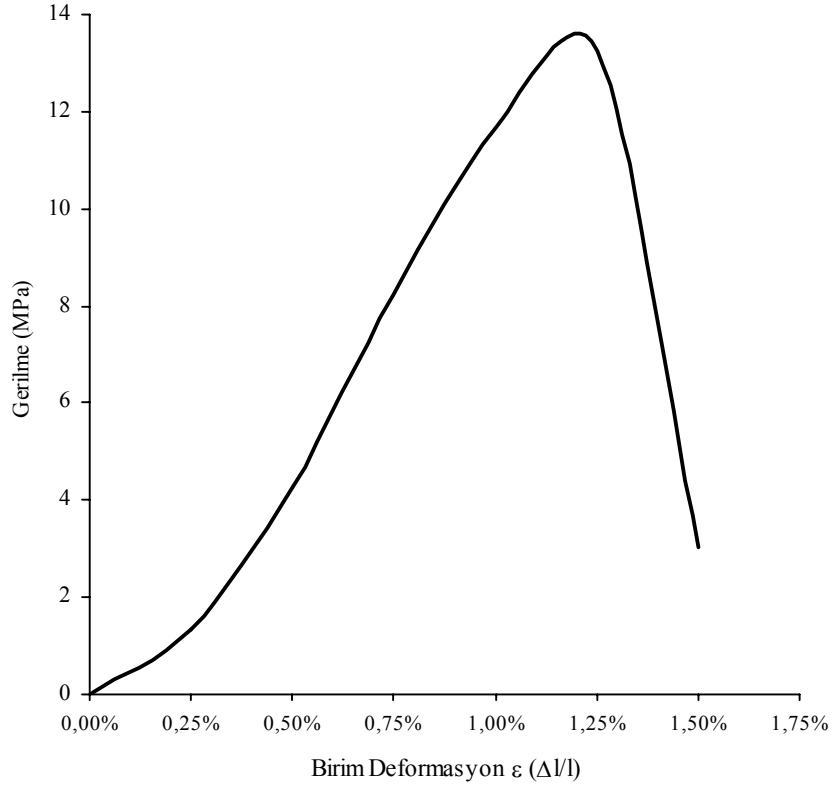
Şekil D.18: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %50 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



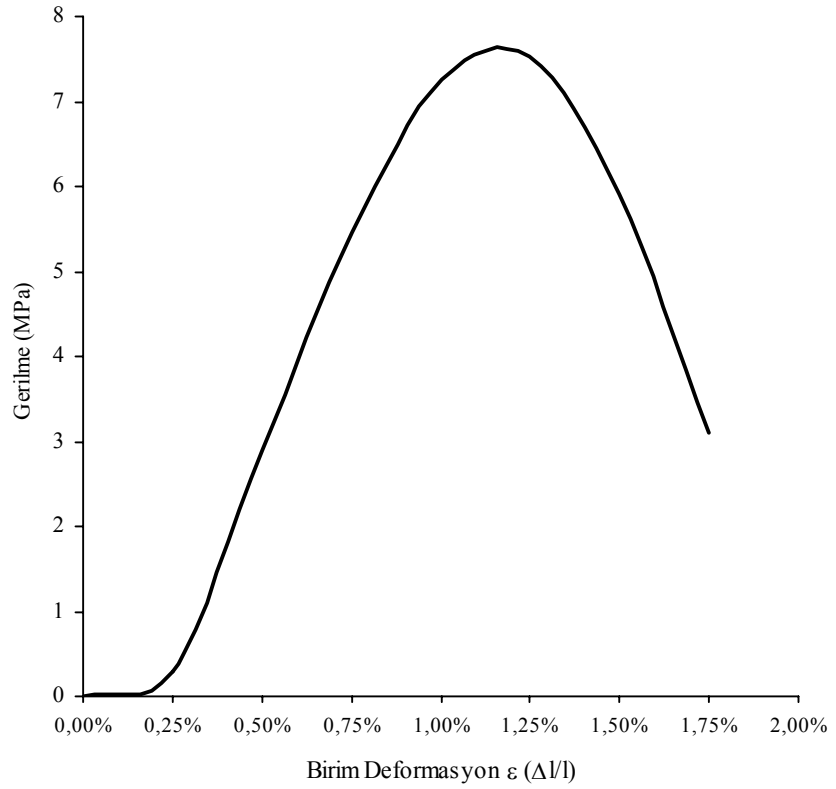
Şekil D.19: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



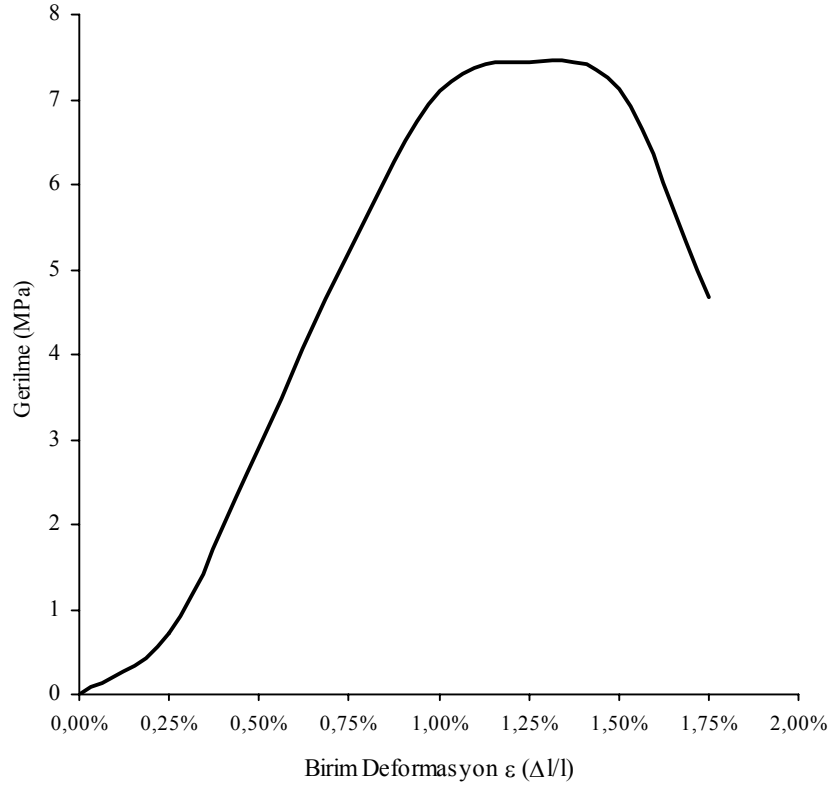
Şekil D.20: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



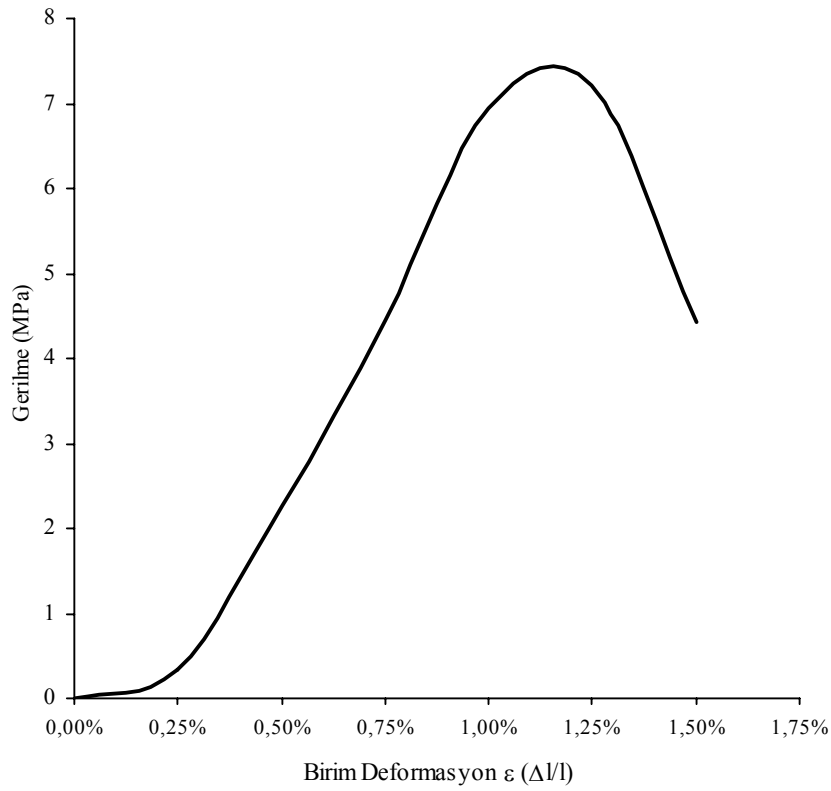
Şekil D.21: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



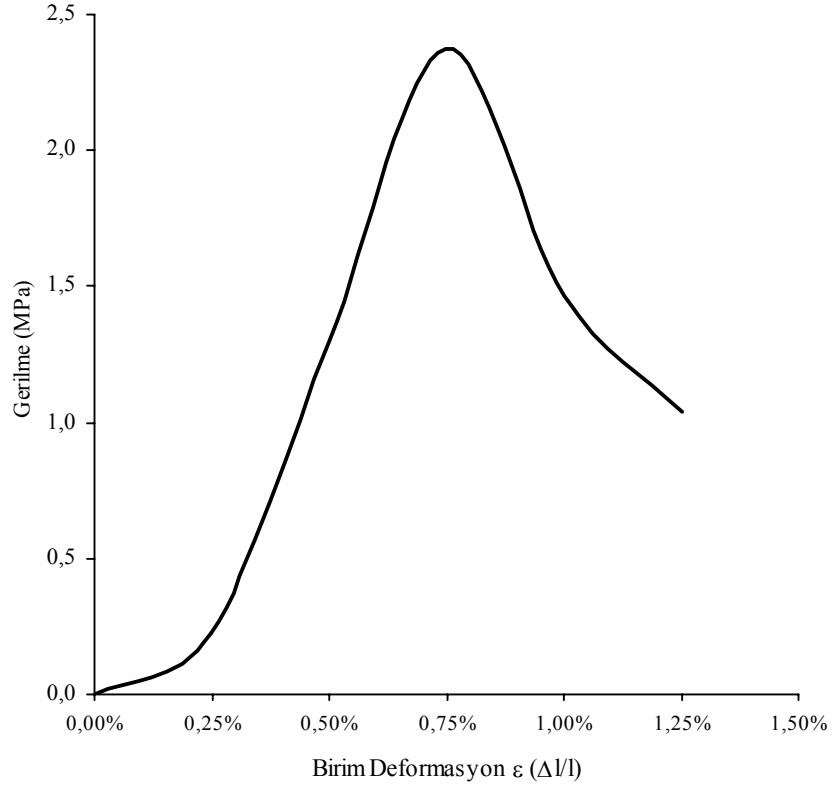
Şekil D.22: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



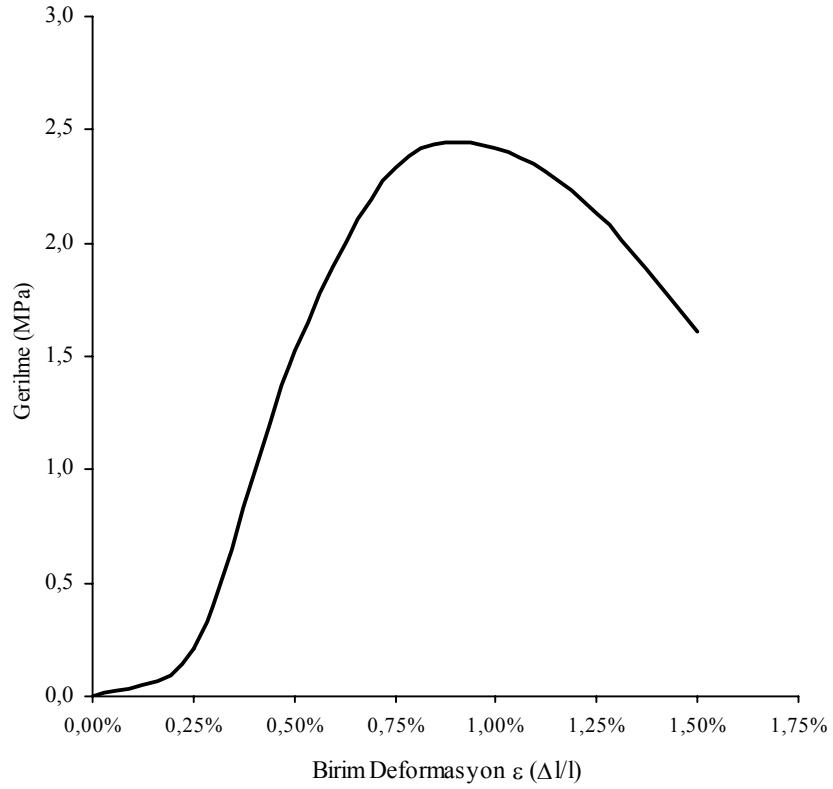
Şekil D.23: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



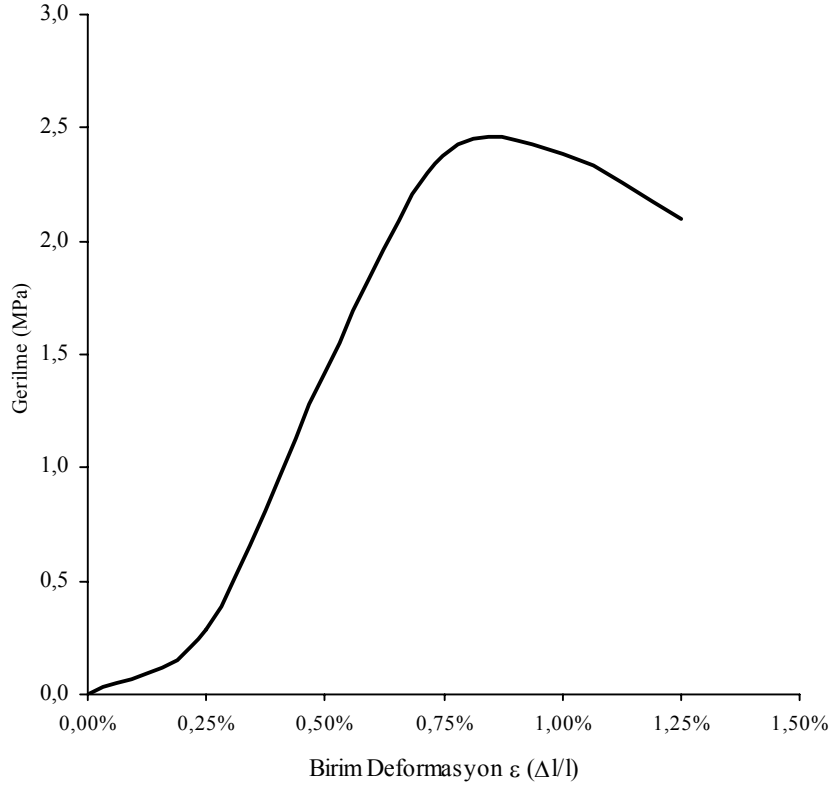
Şekil D.24: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



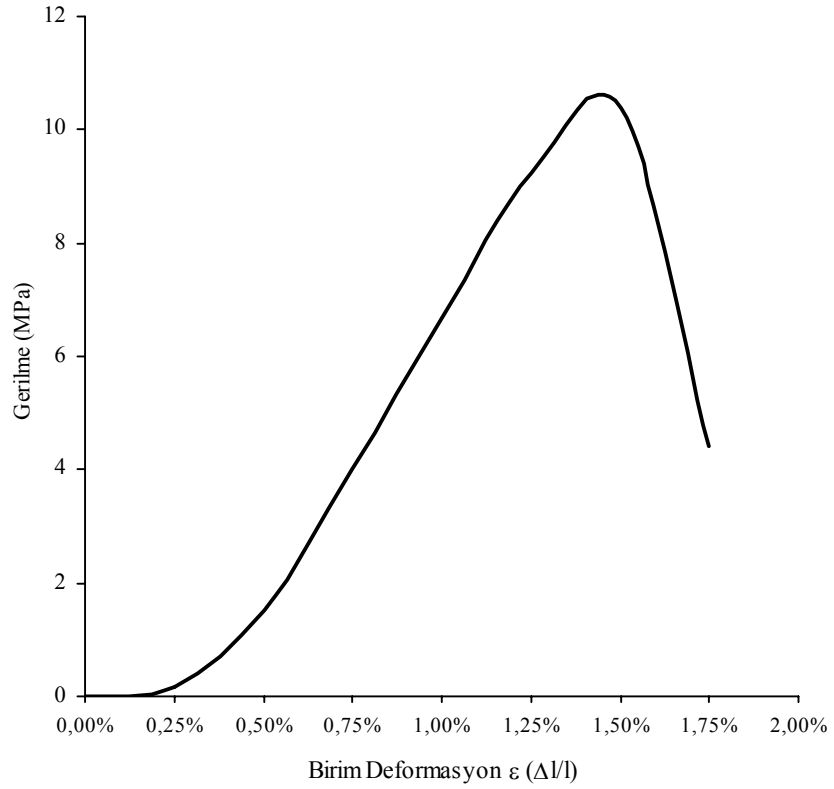
Şekil D.25: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



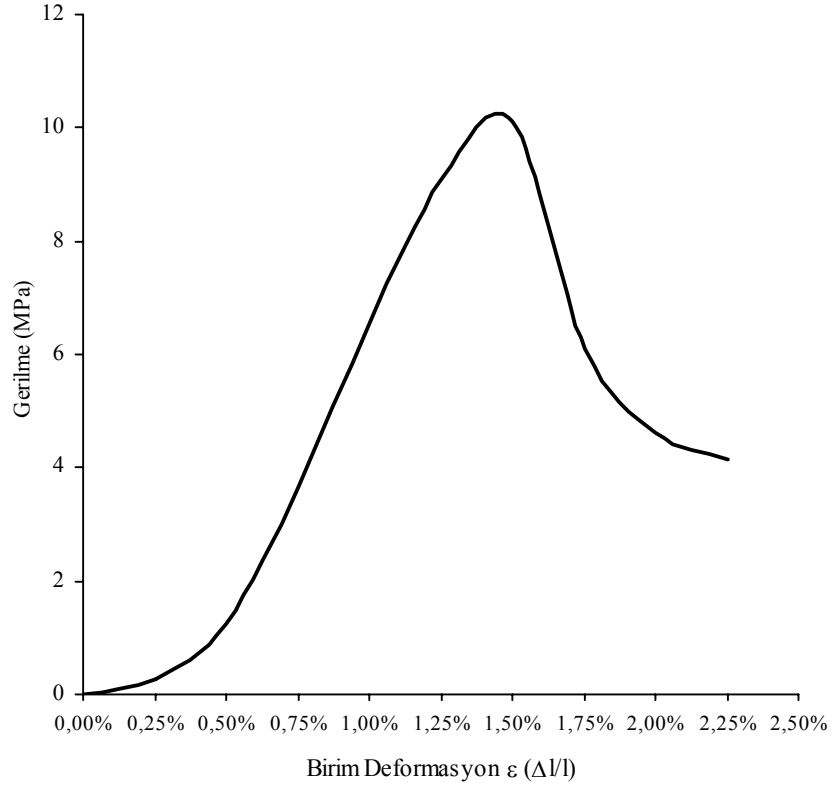
Şekil D.26: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



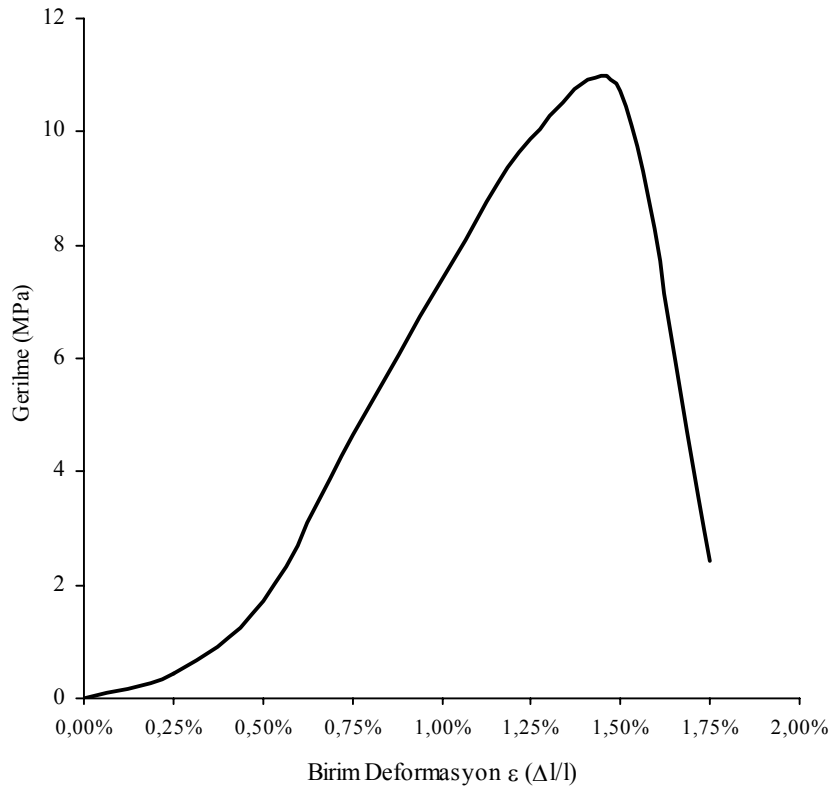
Şekil D.27: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %75 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



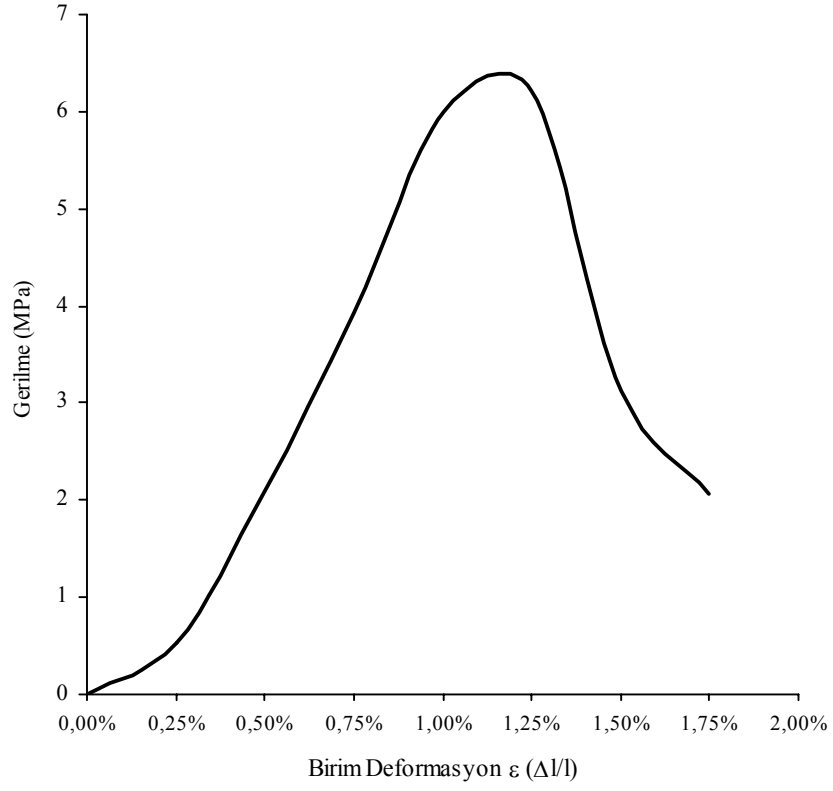
Şekil D.28: 0,7 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



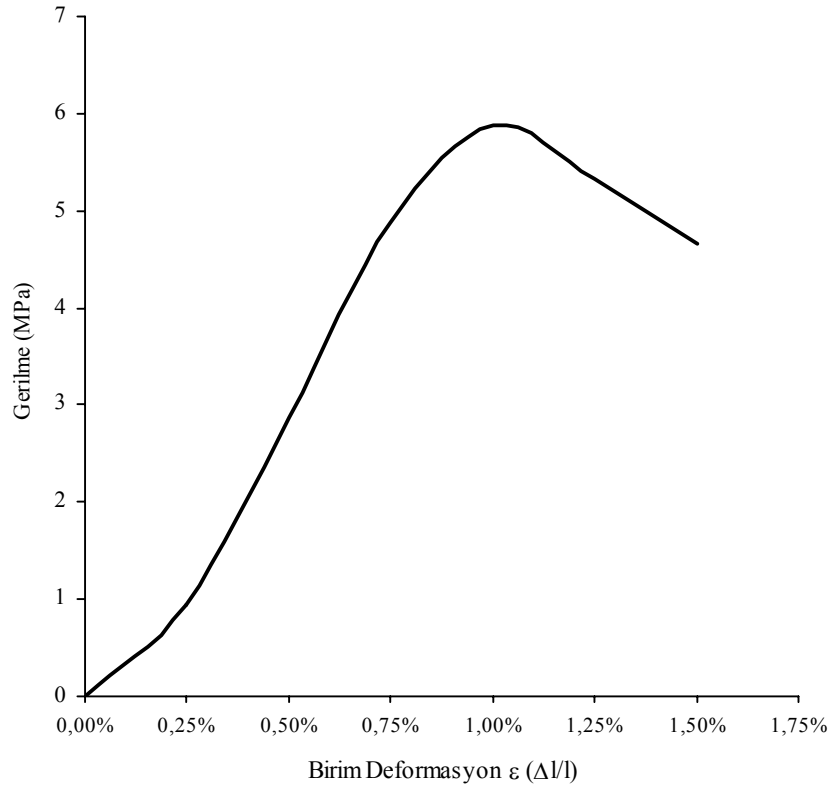
Şekil D.29: 0,7 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



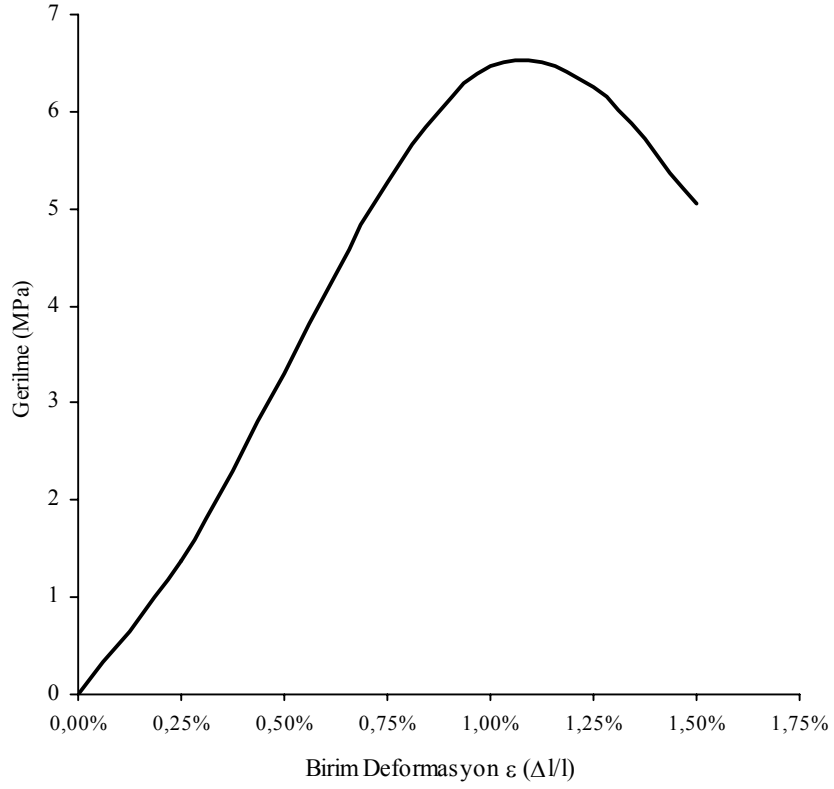
Şekil D.30: 0,7 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



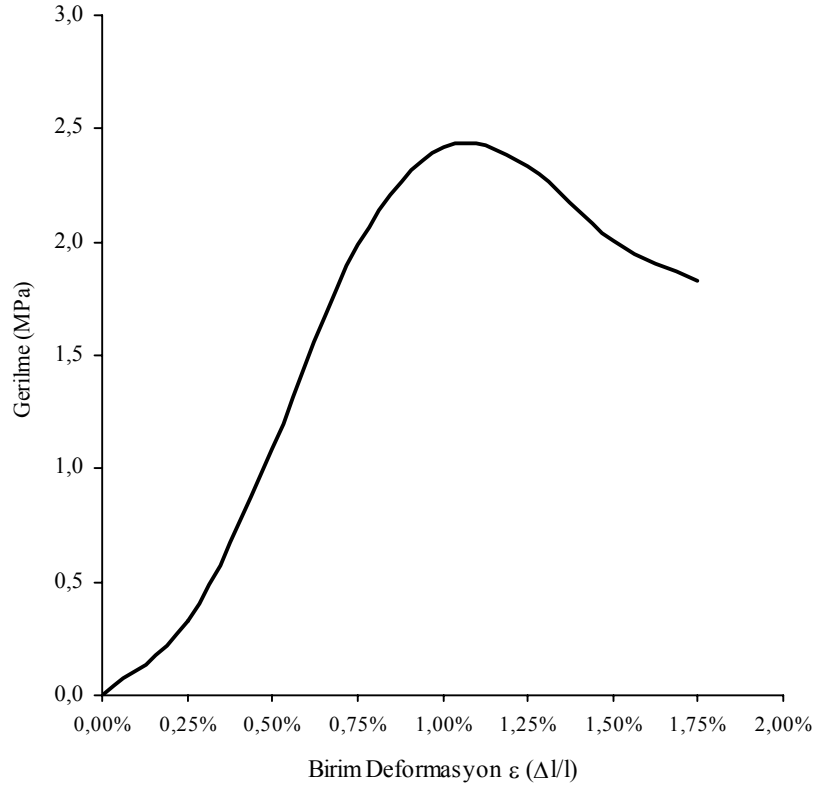
Şekil D.31: 1,0 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



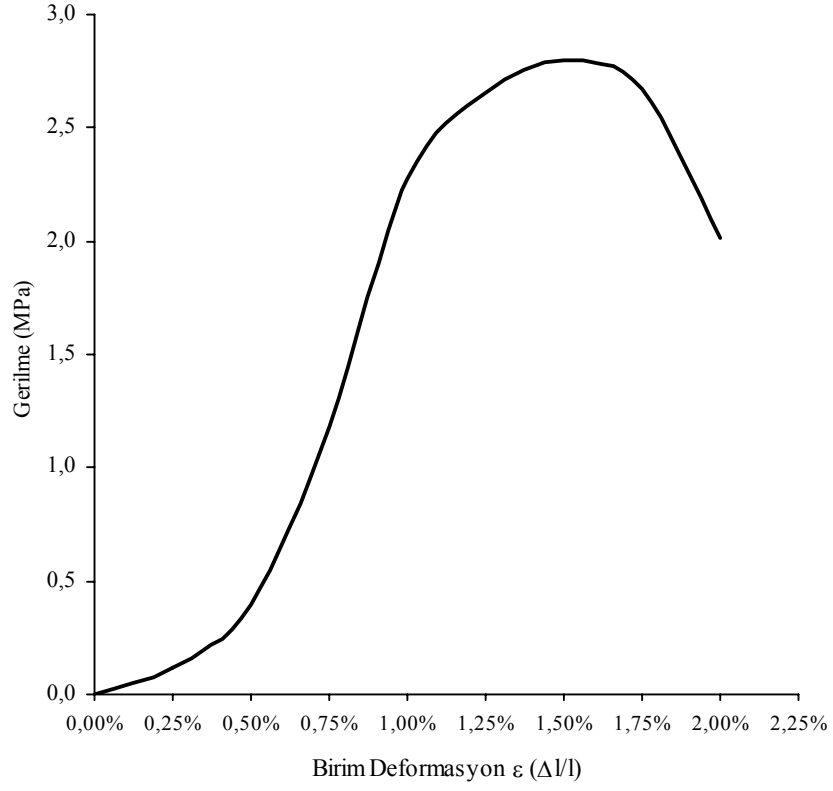
Şekil D.32: 1,0 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıkılığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



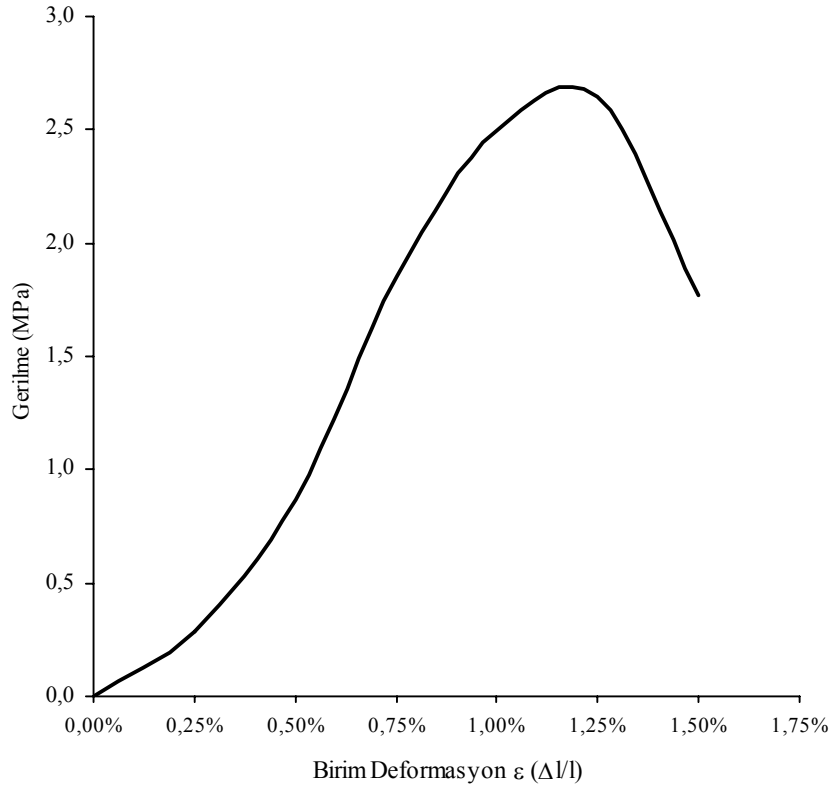
Şekil D.33: 1,0 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği



Şekil D.34: 1,5 s/ç oranındaki harcın 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği

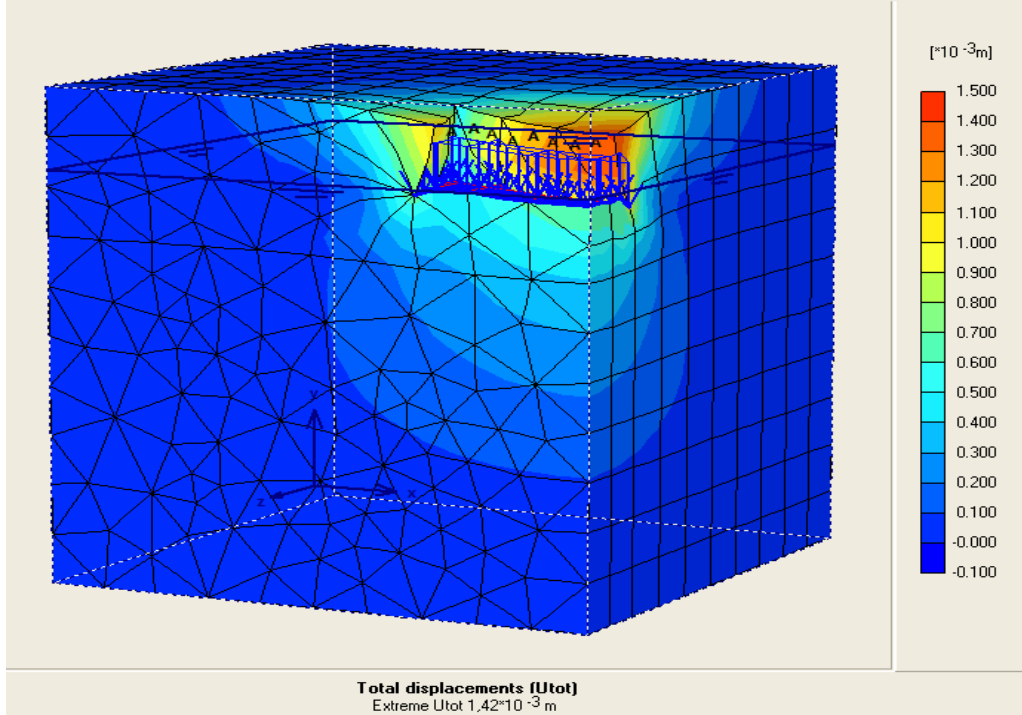


Şekil D.35: 1,5 s/ç oranındaki harcın 150 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği

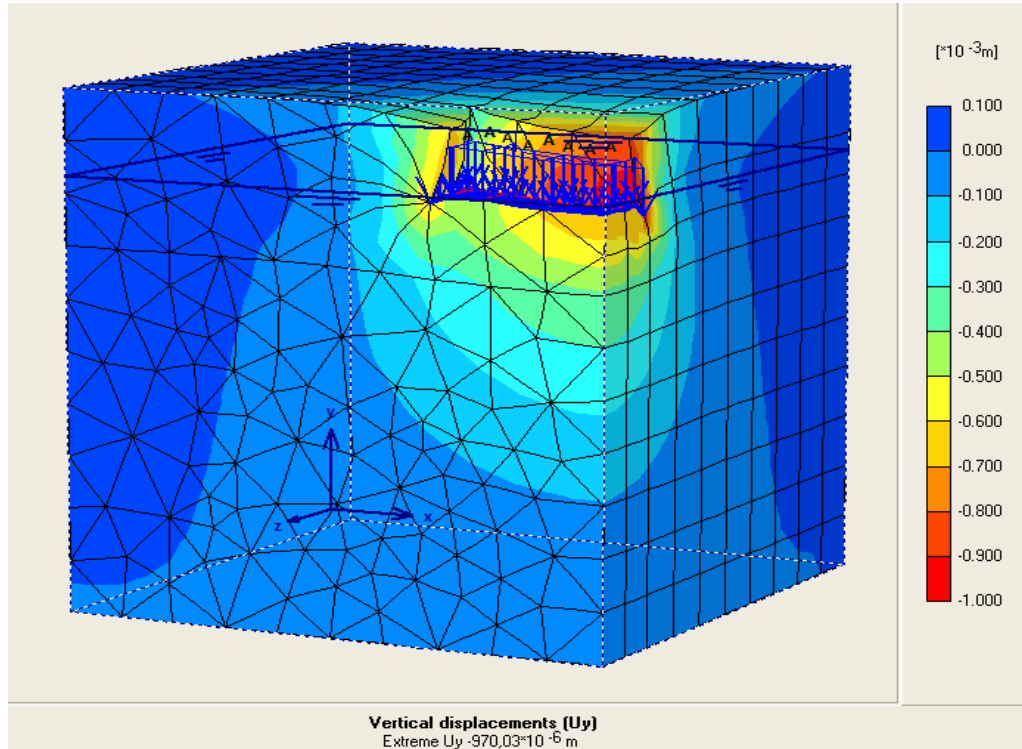


Şekil D.36: 1,5 s/ç oranındaki harcın 200 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilmiş relatif sıklığı %100 olan SP numunesinin 28 günlük gerilme-birim deformasyon grafiği

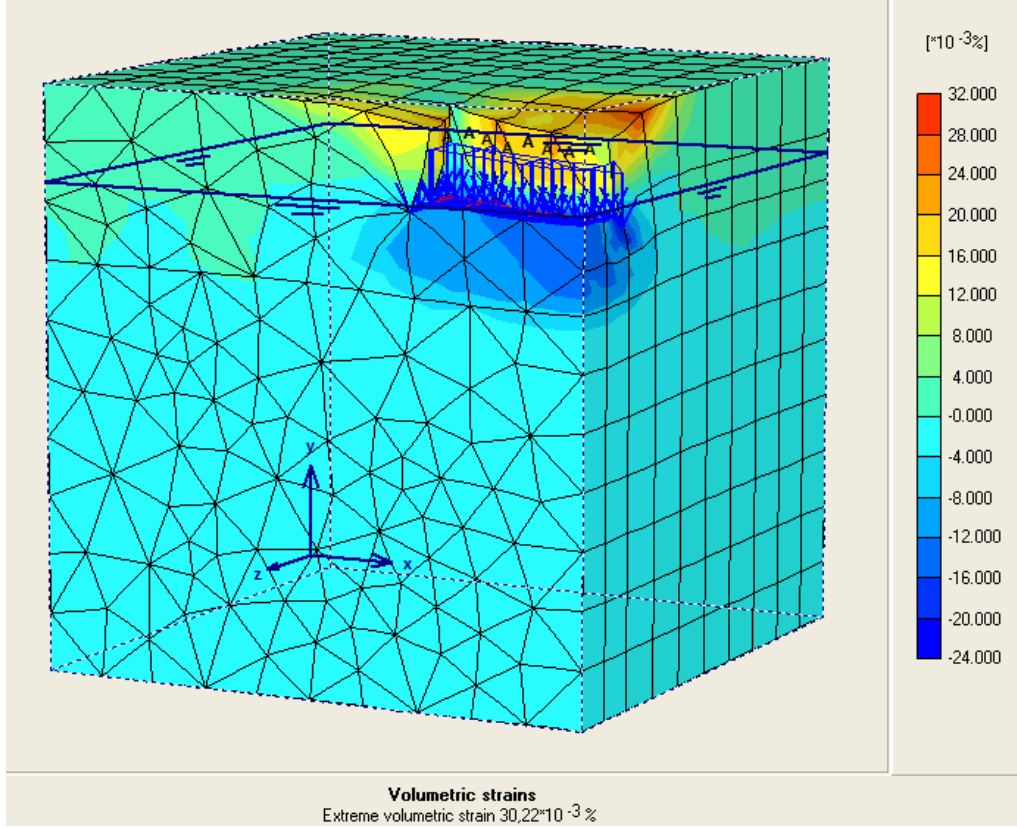
EK-E



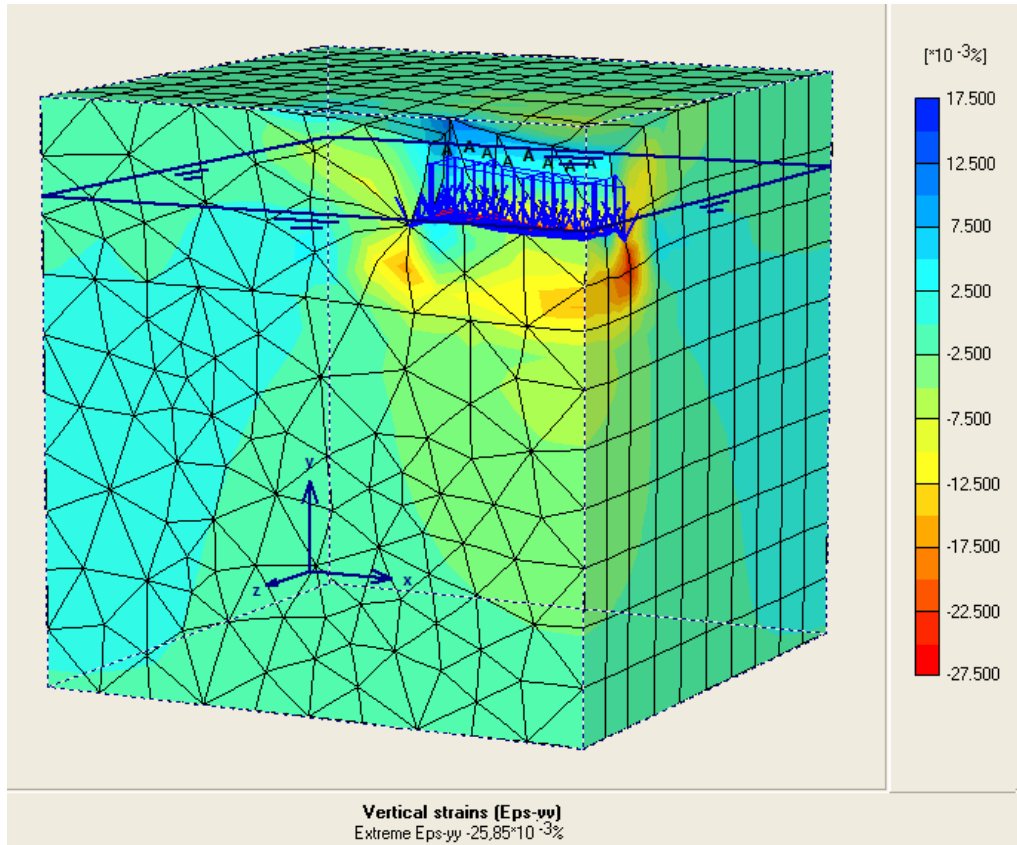
Şekil E.1: Enjeksiyon öncesi ES-1 sahası toplam deplasmanı



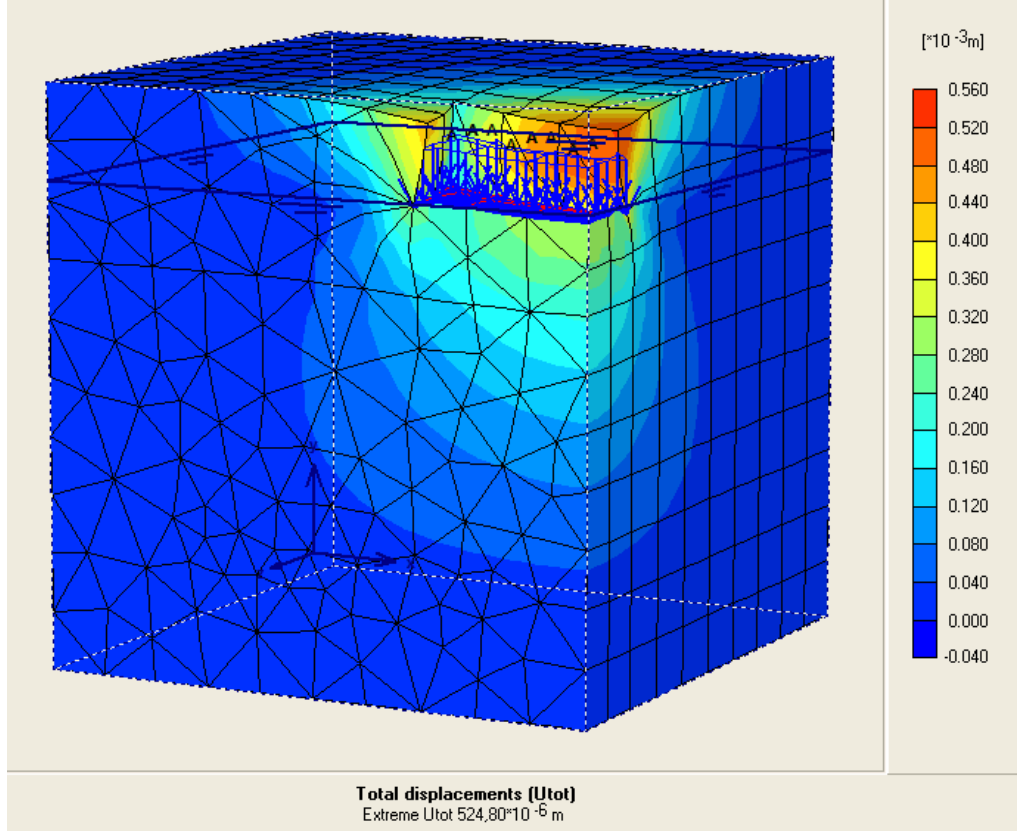
Şekil E.2: Enjeksiyon öncesi ES-1 sahası düşey deplasmanı



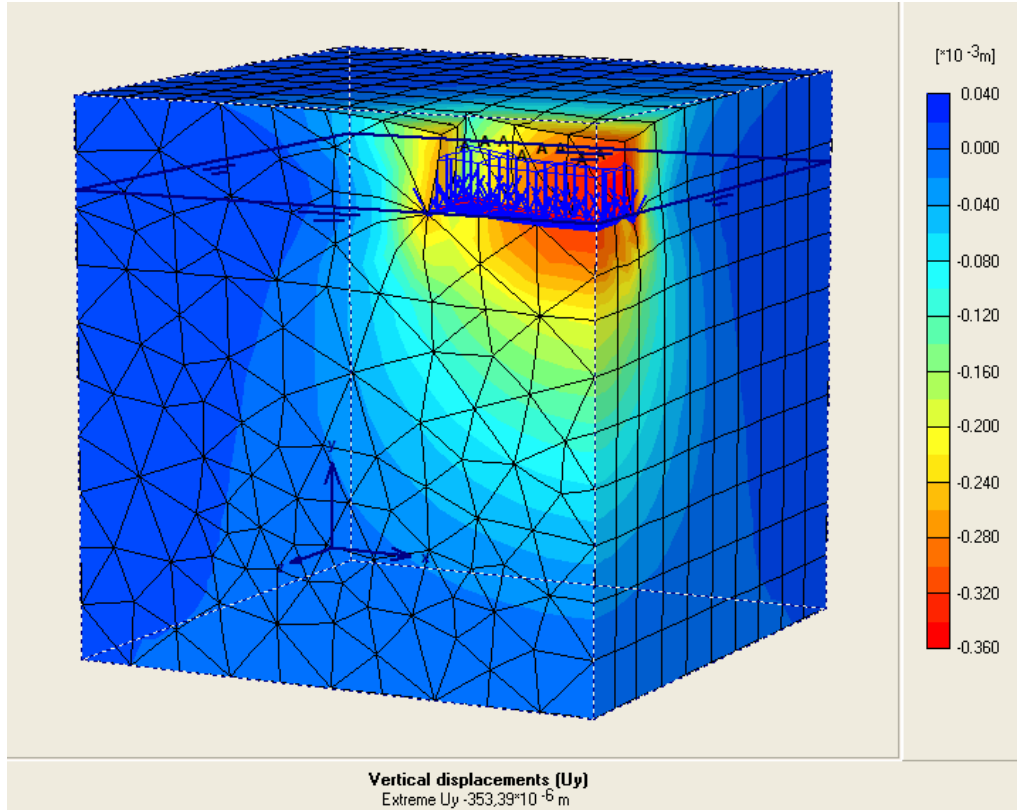
Şekil E.3: Enjeksiyon öncesi ES-1 sahası toplam birim deformasyonu



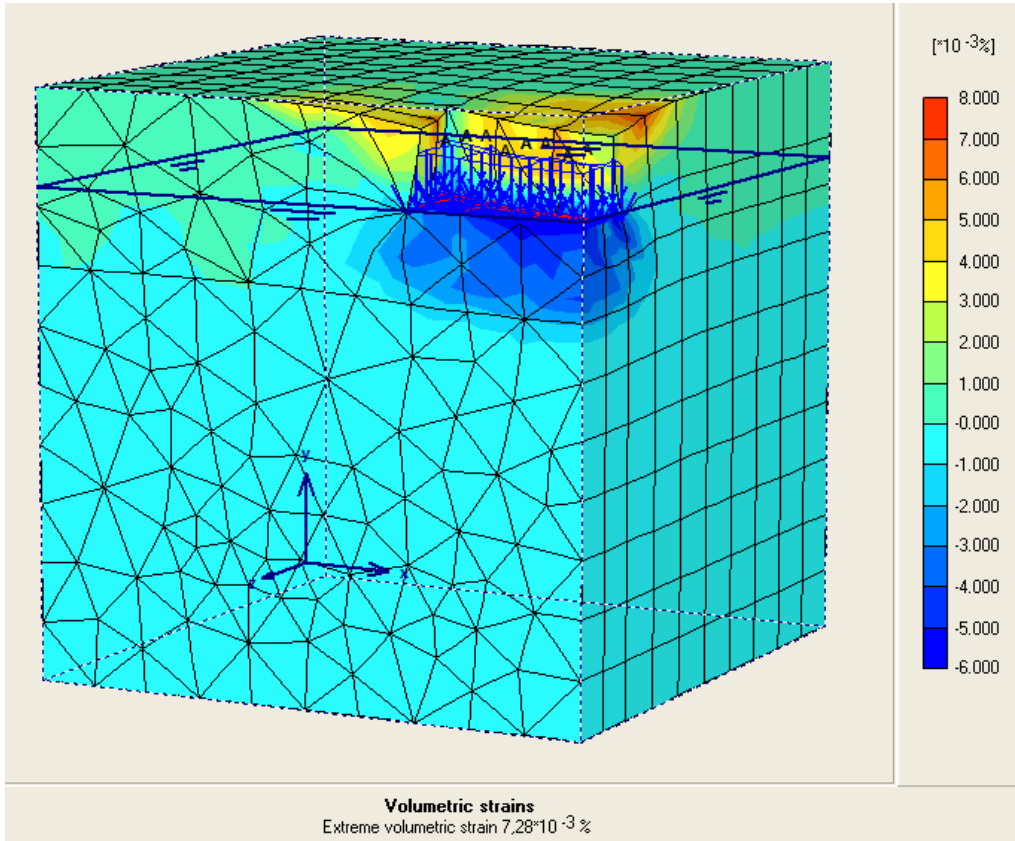
Şekil E.4: Enjeksiyon öncesi ES-1 sahası düşey birim deformasyonu



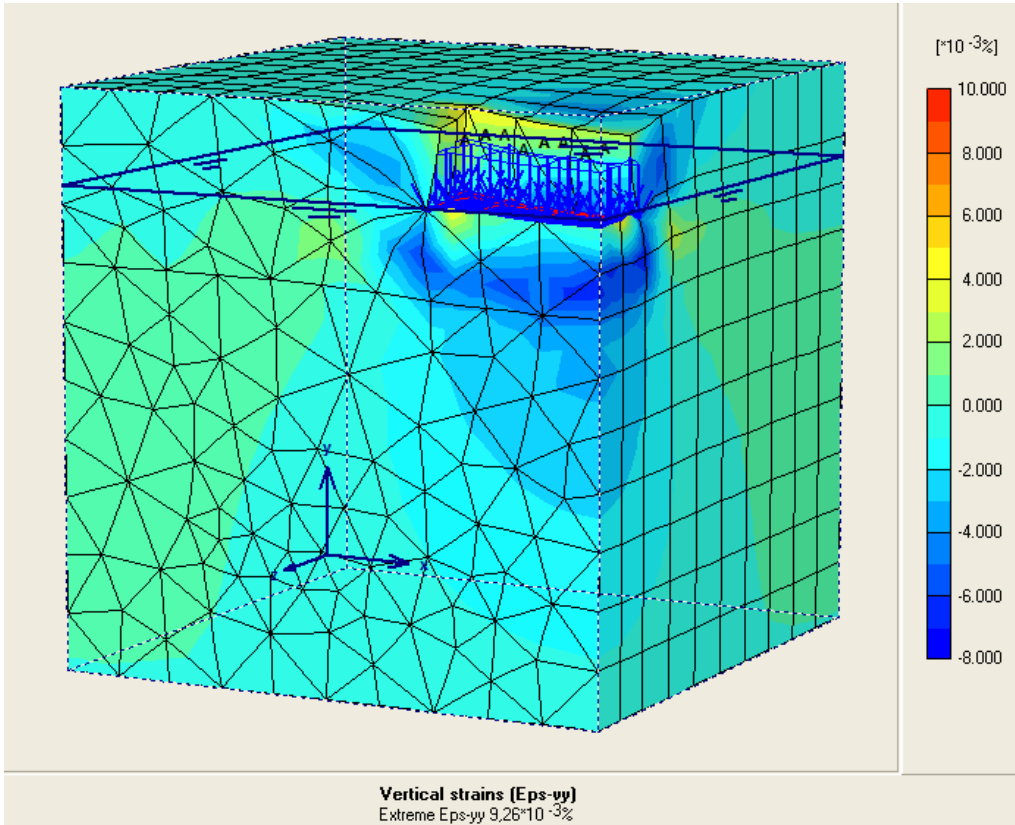
Şekil E.5: Enjeksiyon sonrası ES-1 sahası toplam deplasmanı



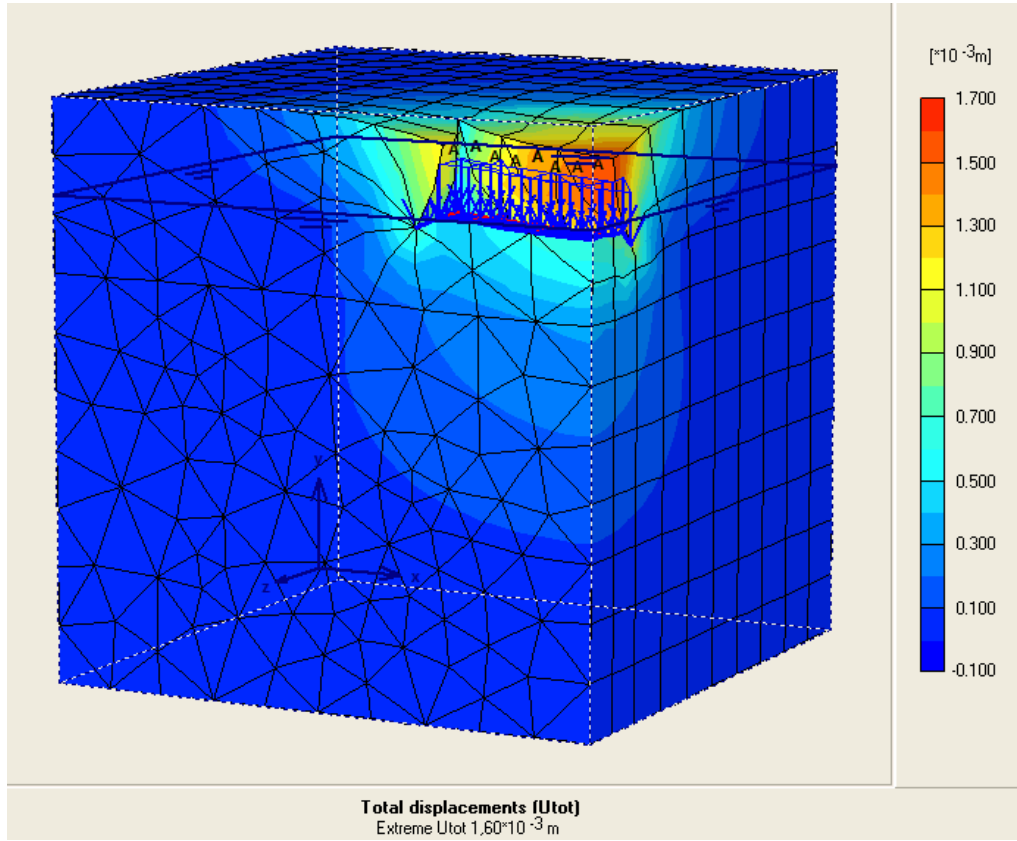
Şekil E.6: Enjeksiyon sonrası ES-1 sahası düşey deplasmanı



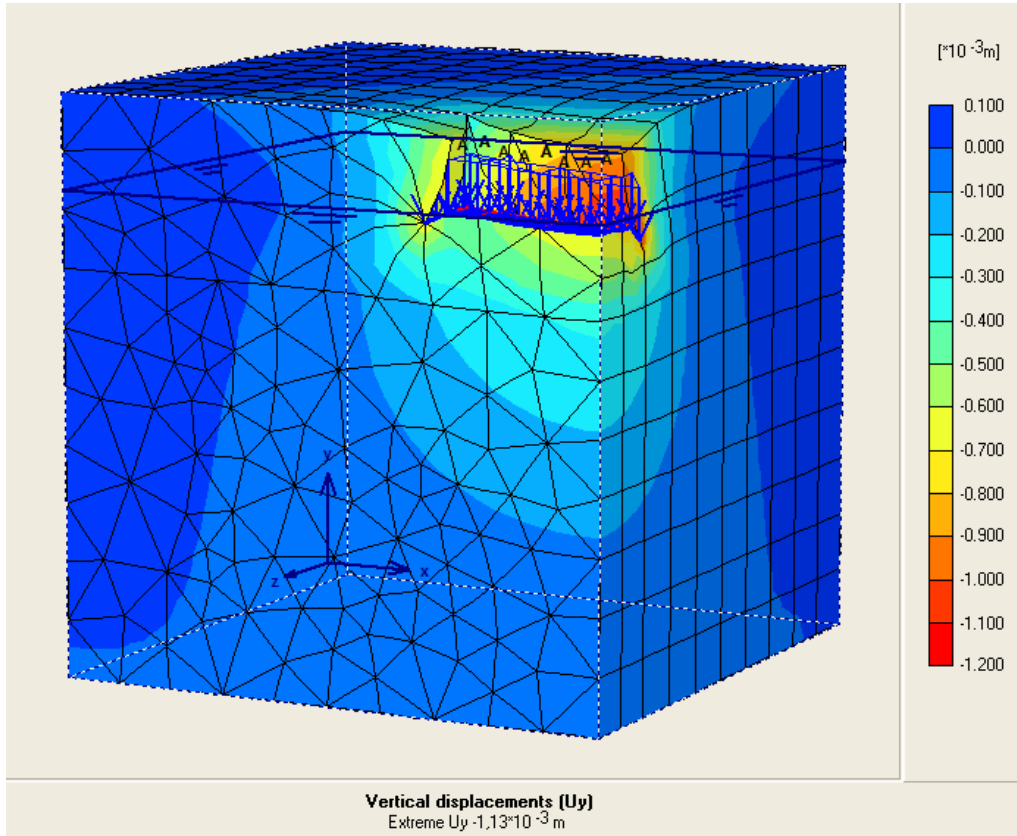
Şekil E.7: Enjeksiyon sonrası ES-1 sahası toplam birim deformasyonu



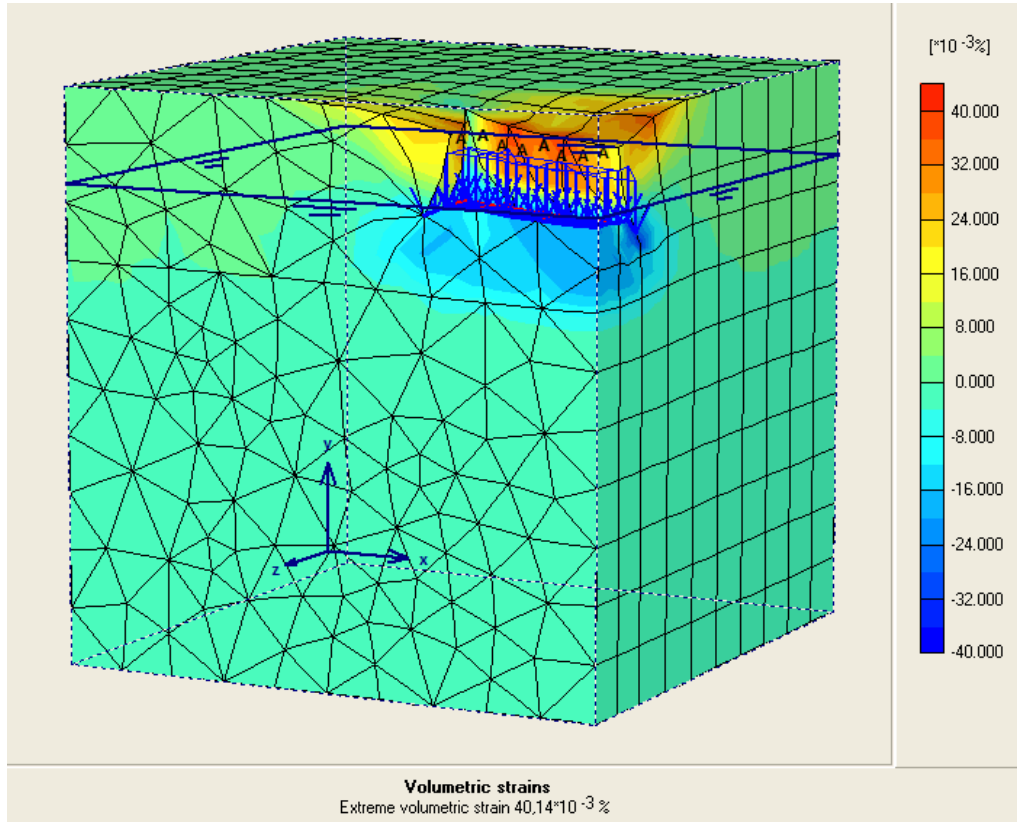
Şekil E.8: Enjeksiyon sonrası ES-1 sahası düşey birim deformasyonu



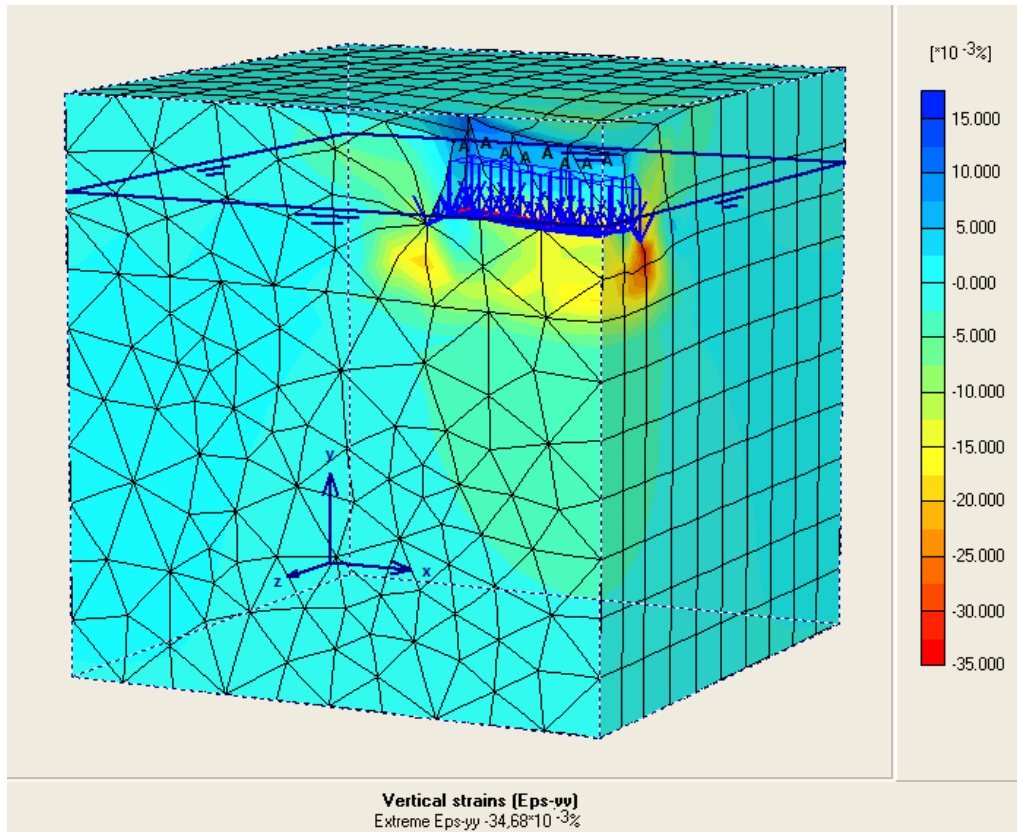
Şekil E.9: Enjeksiyon öncesi ES-2 sahası toplam deplasmanı



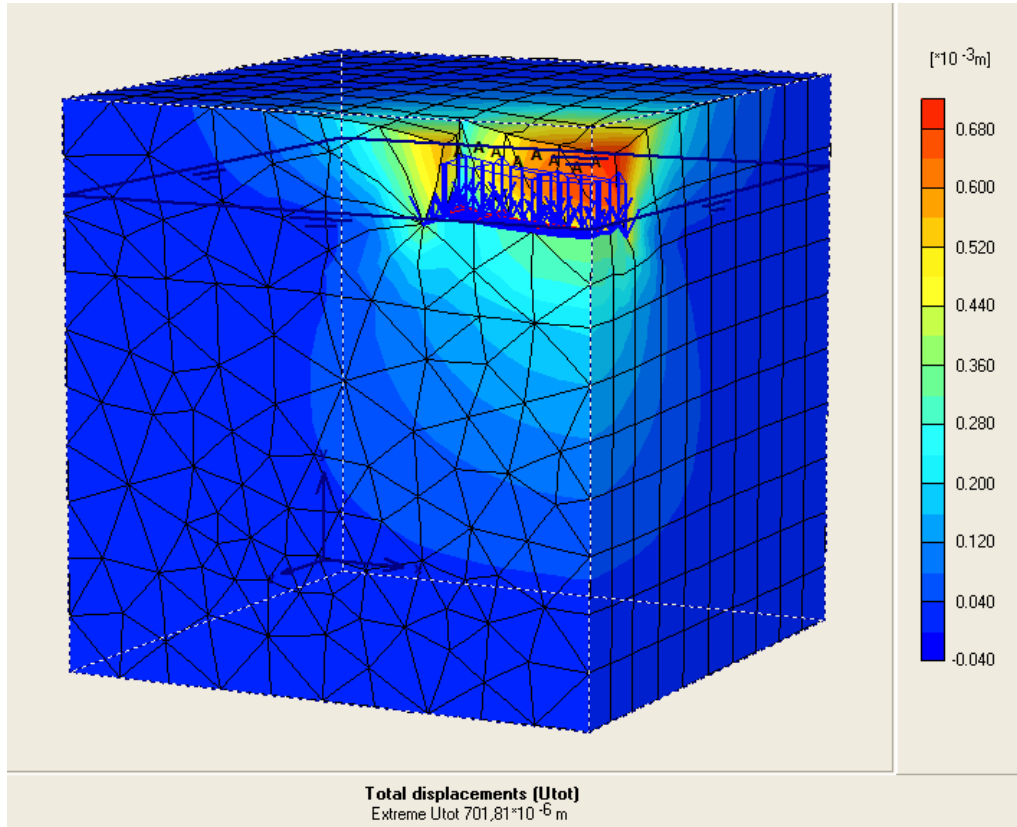
Şekil E.10: Enjeksiyon öncesi ES-2 sahası düşey deplasmanı



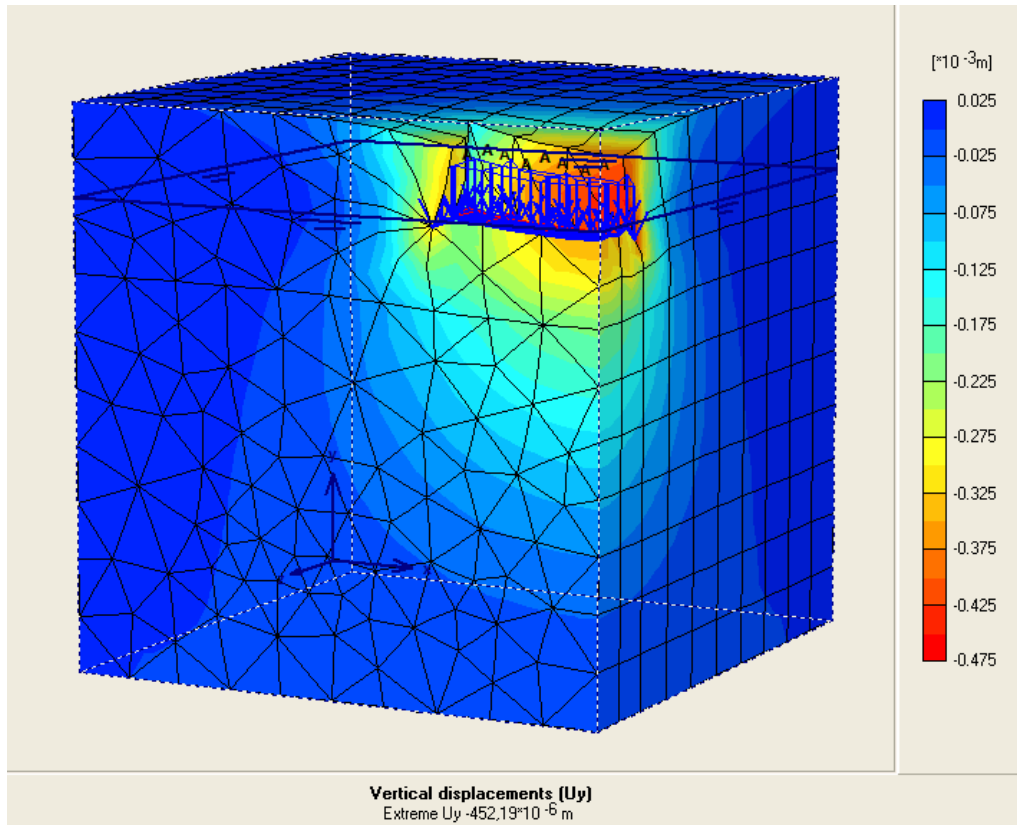
Şekil E.11: Enjeksiyon öncesi ES-2 sahası toplam birim deformasyonu



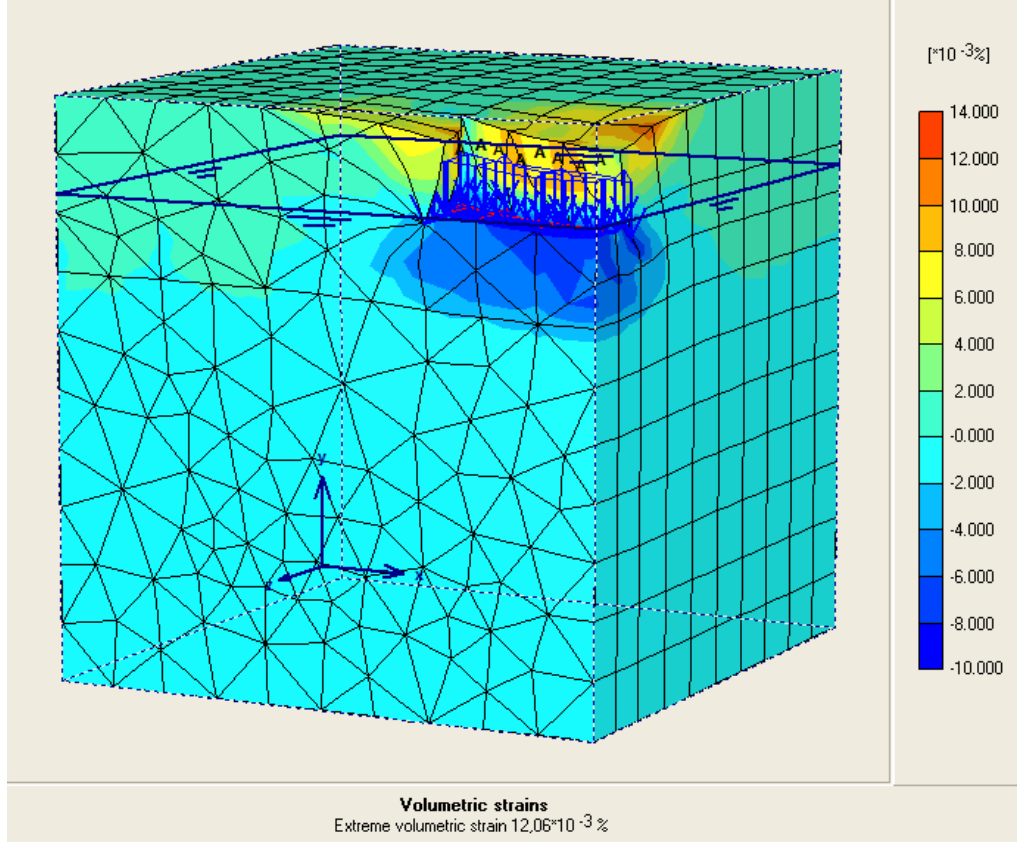
Şekil E.12: Enjeksiyon öncesi ES-2 sahası düşey birim deformasyonu



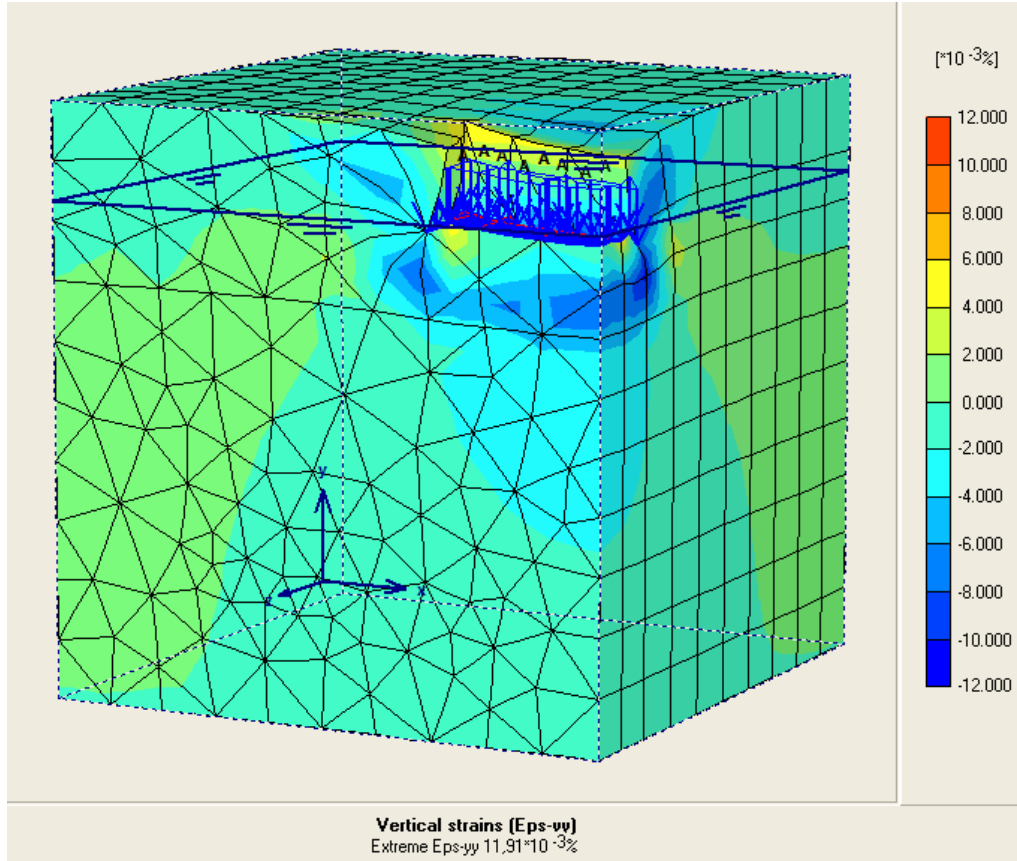
Şekil E.13: Enjeksiyon sonrası ES-2 sahası toplam deplasmanı



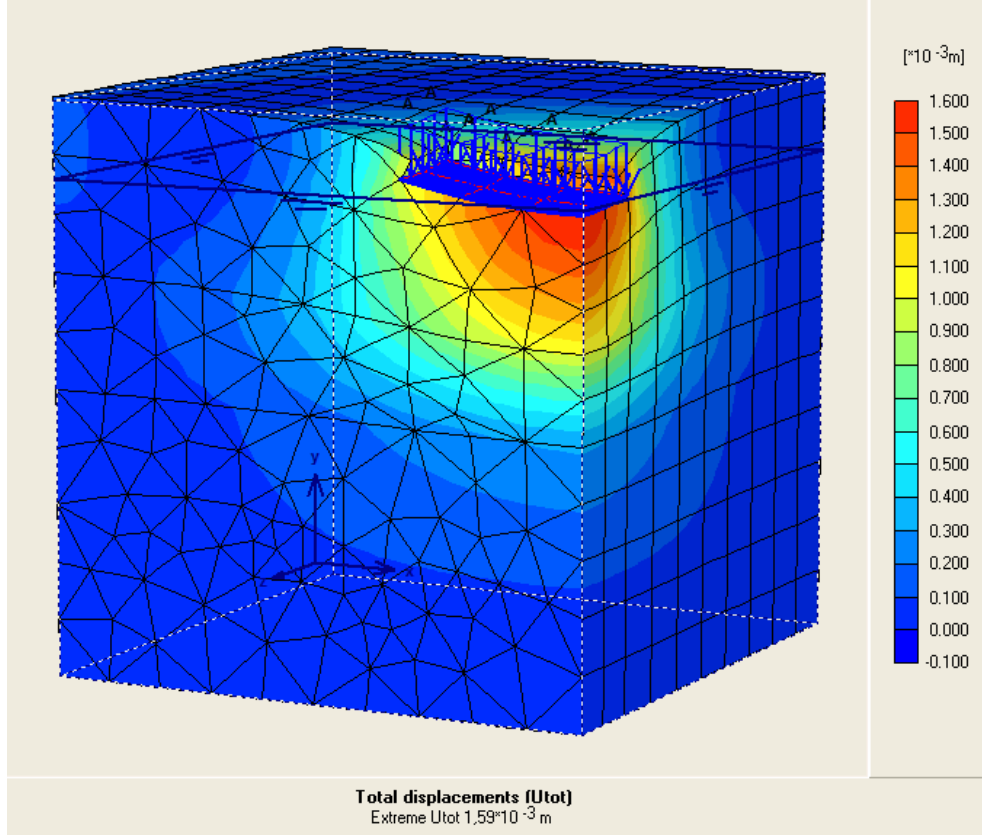
Şekil E.14: Enjeksiyon sonrası ES-2 sahası düşey deplasmanı



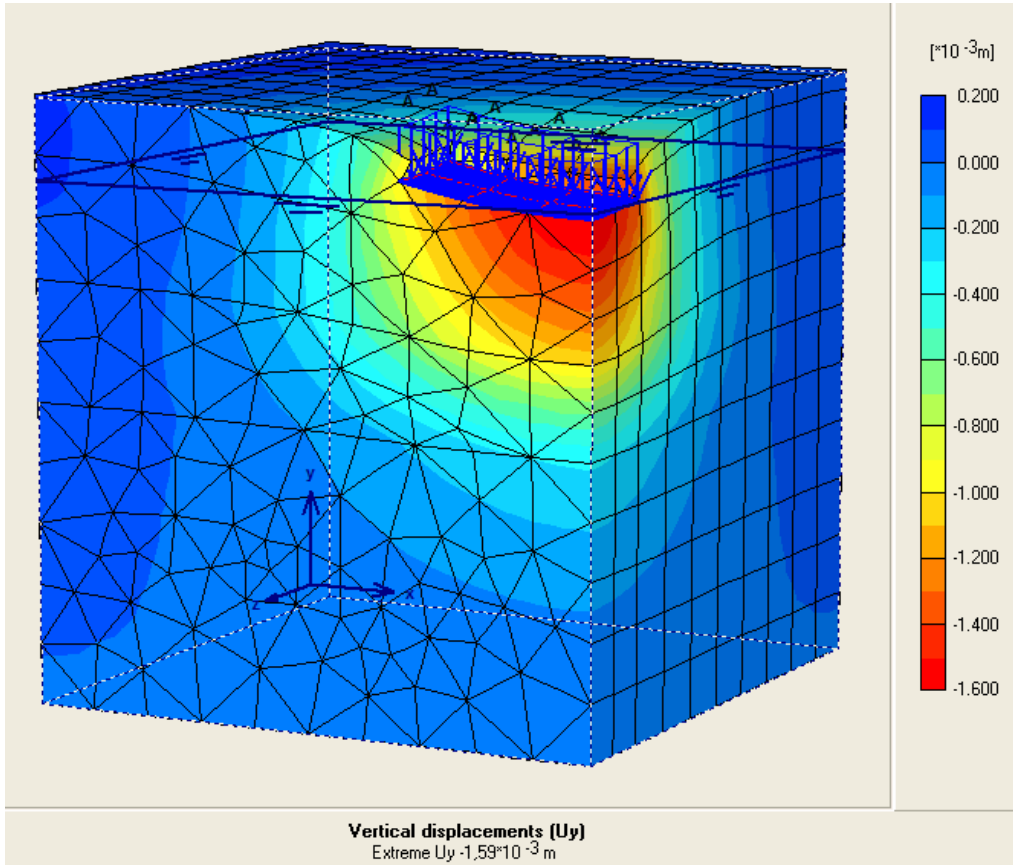
Şekil E.15: Enjeksiyon sonrası ES-2 sahası toplam birim deformasyonu



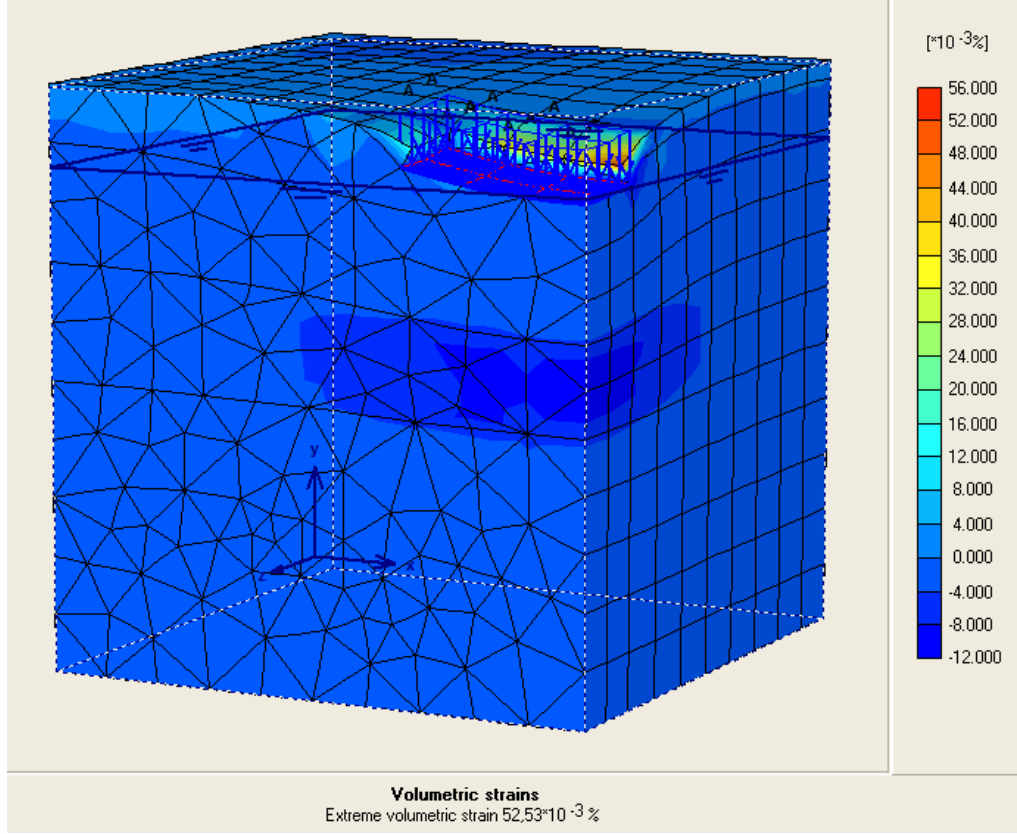
Şekil E.16: Enjeksiyon sonrası ES-2 sahası düşey birim deformasyonu



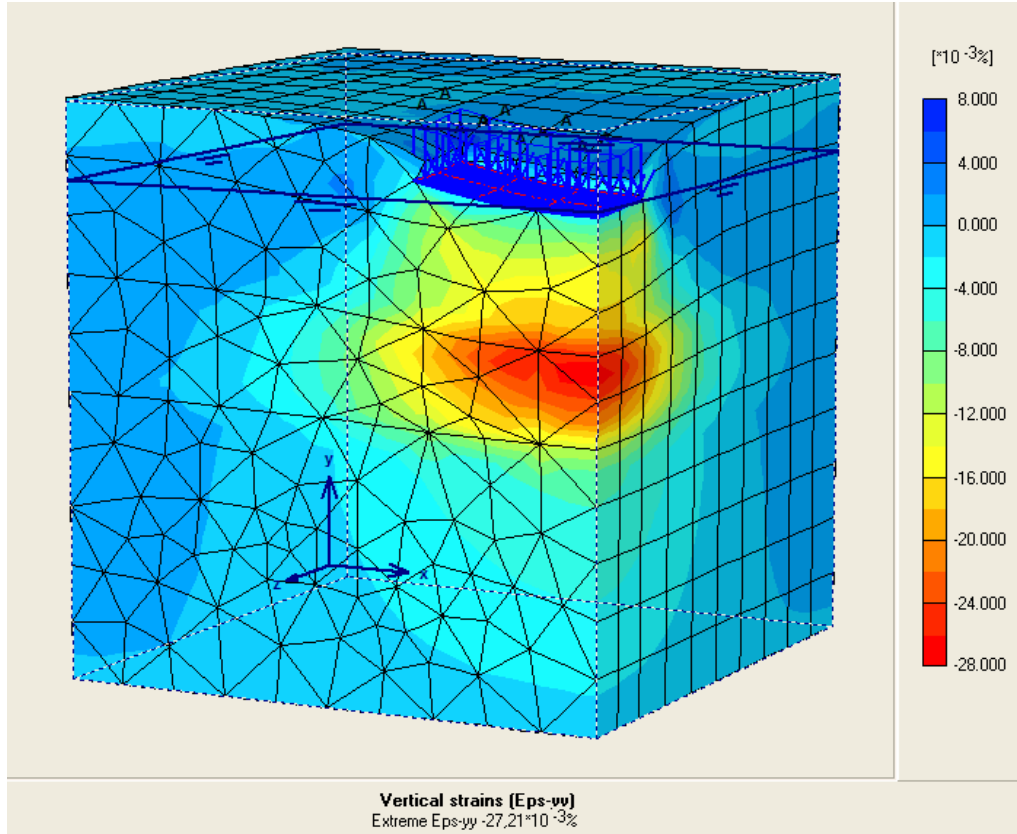
Şekil E.17: Enjeksiyon öncesi ES-3 sahası toplam deplasmanı



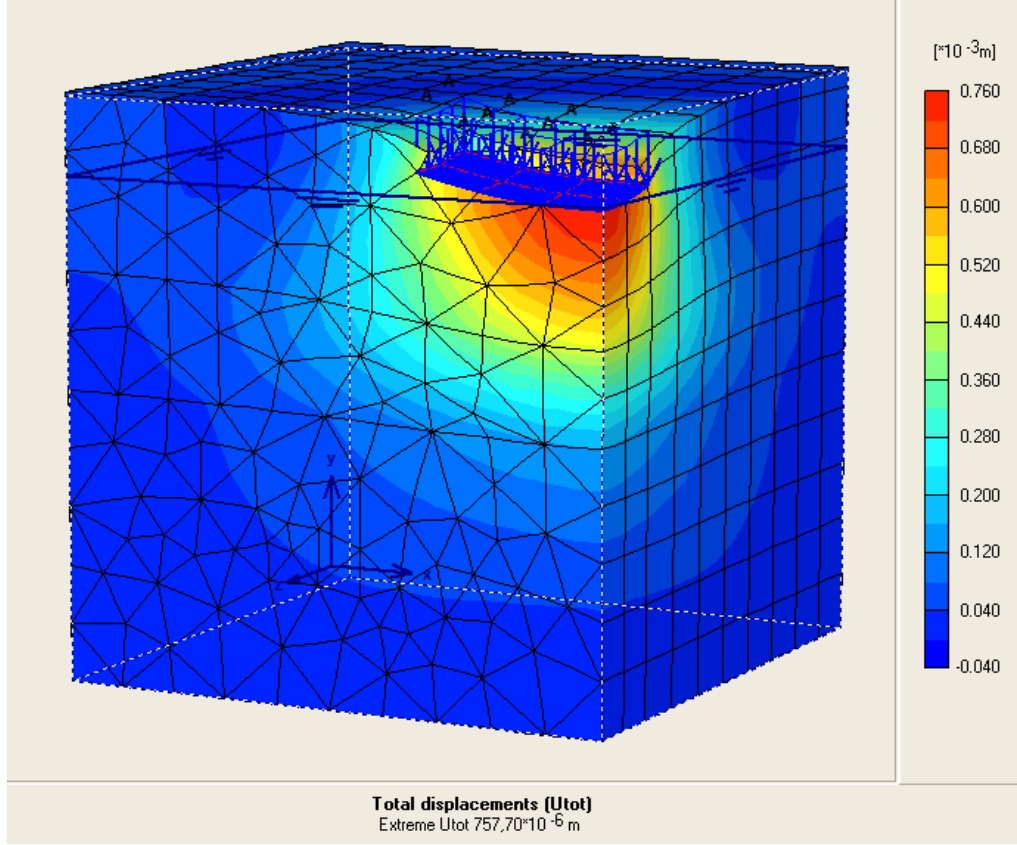
Şekil E.18: Enjeksiyon öncesi ES-3 sahası düşey deplasmanı



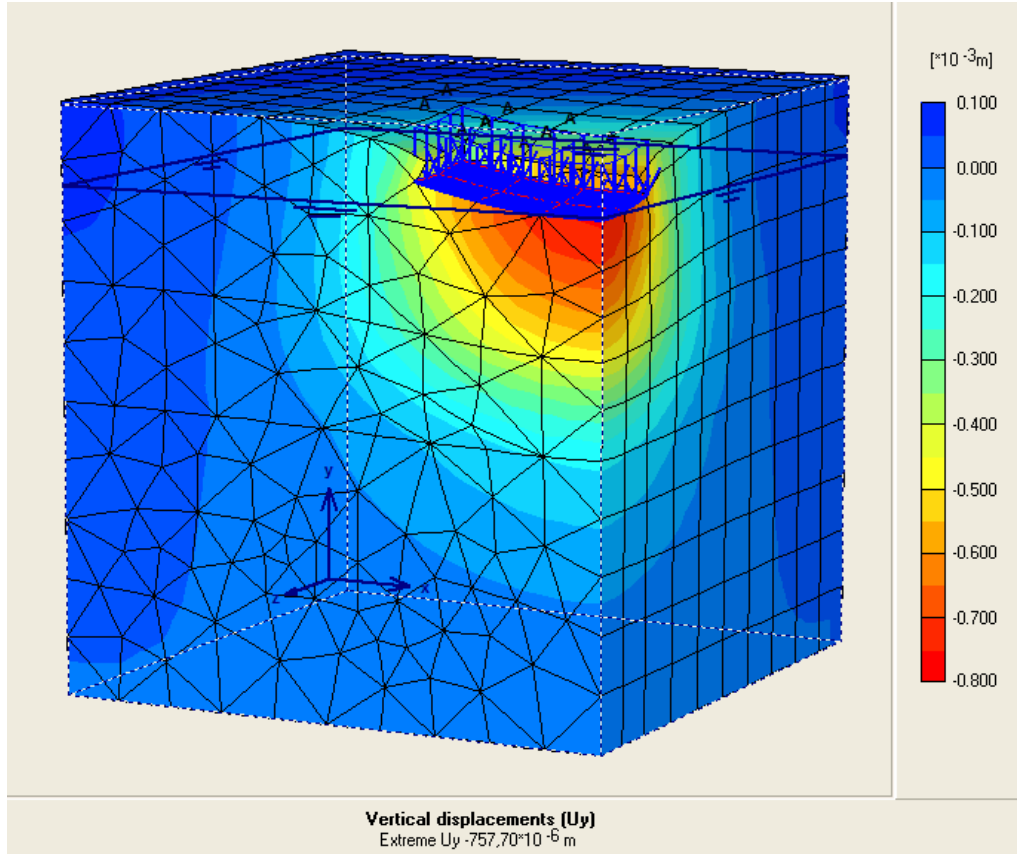
Şekil E.19: Enjeksiyon öncesi ES-3 sahası toplam birim deformasyonu



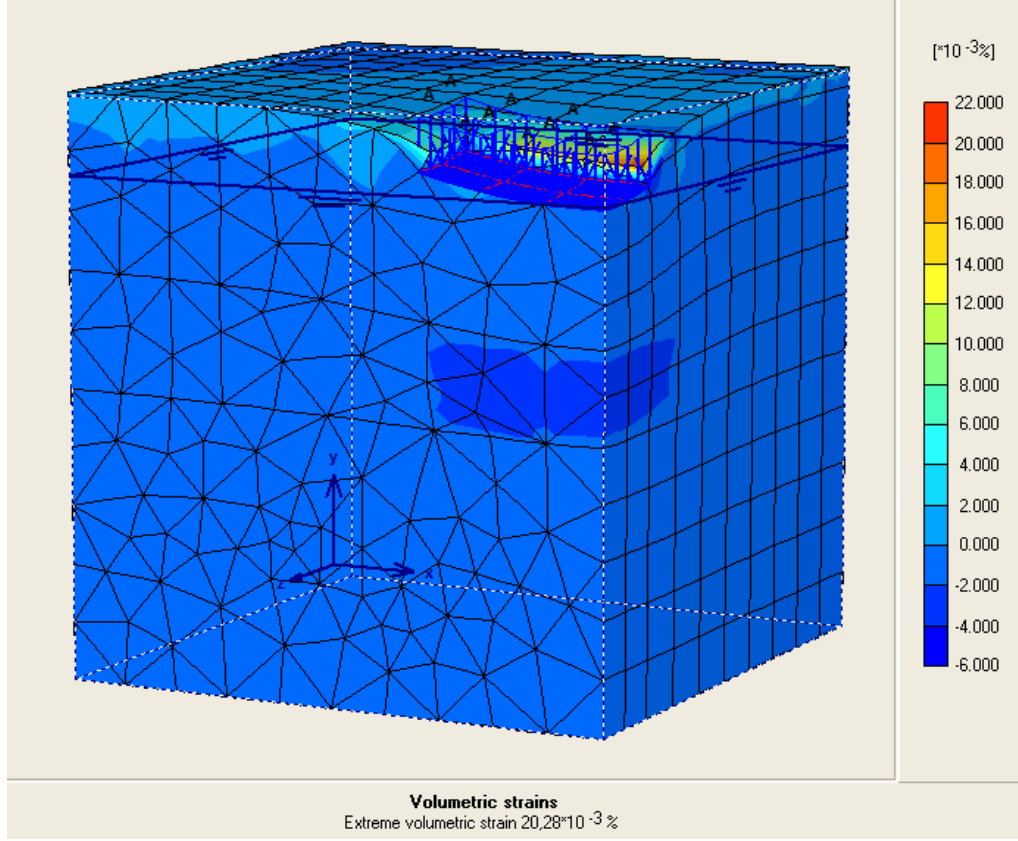
Şekil E.20: Enjeksiyon öncesi ES-3 sahası düşey birim deformasyonu



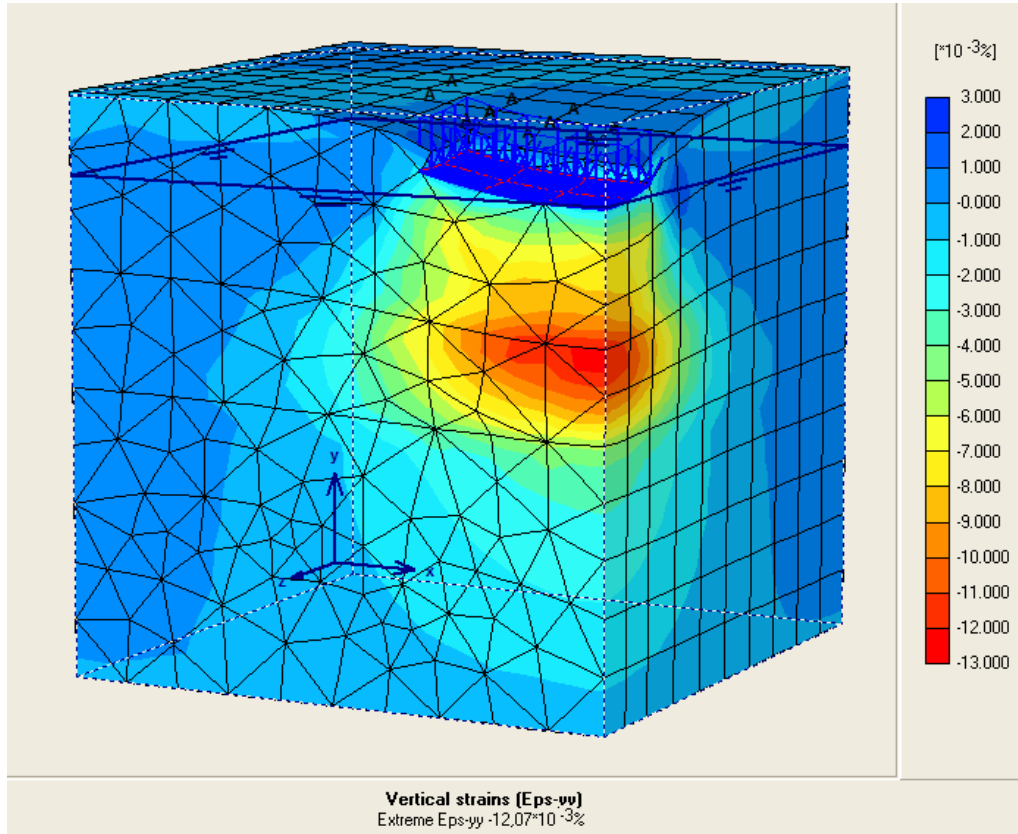
Şekil E.21: Enjeksiyon sonrası ES-3 sahası toplam deplasmanı



Şekil E.22: Enjeksiyon sonrası ES-3 sahası düşey deplasmanı



Şekil E.23: Enjeksiyon sonrası ES-3 sahası toplam birim deformasyonu



Şekil E.24: Enjeksiyon sonrası ES-3 sahası düşey birim deformasyonu

EK-F



Şekil F.1: 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin 50x fotoğrafı



Şekil F.2: 100 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin 50x fotoğrafı



Şekil F.3: 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin 50x fotoğrafı



Şekil F.4: 150 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin 50x fotoğrafı



Şekil F.5: 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin 50x fotoğrafı



Şekil F.6: 200 kPa basınç ile enjeksiyon edilmiş numunenin 50x fotoğrafı

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Bursa’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Gemlik’te tamamladı. 1994 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 1998 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programından 2001 yılında İnşaat Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. 2000 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.