

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**KÜKÜRT ENJEKSİYONU İLE ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

MURAT KARADENİZ

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KÜKÜRT ENJEKSİYONU İLE ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ

MURAT KARADENİZ

Prof. Dr. Mücahit OPAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Safa Bozkurt COŞKUN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Aydın KAVAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Erdinç KESKİN
Jüri Üyesi, Kırklareli Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.01.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Murat KARADENİZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Murat KARADENİZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde ve şekillendirilmesinde emeği geçen, benim için bir hocadan çok daha fazlası bir abi bir dost olan çalışmamın son aşaması sırasında vefat eden merhum Doç. Dr. Utkan MUTMAN hocama çok teşekkür ederim. Hocamın vefatından sonra bu süreçte beni yalnız bırakmayan, tecrübelerini ve bilgilerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Mücahit OPAN'a çok teşekkür ederim.

Özellikle tez konusunu seçerken esinlendiğim ve çalışmam boyunca nerede sıkışsam sabırla beni dinleyen kıymetli vaktini bana ayıran ve her zaman destek olan Dr. Onur ÖZTÜRK hocama çok teşekkür ederim. Çalışma sırasında iş arkadaşlarım merhum Dr. Cüneyt YILMAZ, Dr. Öğr. Üyesi Celal ÖZKALE, Dr. Öğr. Üyesi Serkan ENGİN, Dr. Aytuğ SEÇKİN, Servet MERT, Tansu ORHAN, Zuhale Elif KARA DİLEK, Ömer Faruk BEHÇET ve Hacer TÜLEN'e bu güzel ortamı sundukları için çok teşekkür ederim. Ayrıca tez izleme komitesinde bulunan Prof. Dr. Safa Bozkurt COŞKUN ve Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER hocama tezin oluşmasında sundukları katkıdan ve yönlendirmelerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca ne zaman başım sıkışsa yanımda olan maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim ve beni her koşulda destekleyen Annem ve babam başta olmak üzere kardeşlerim Nuran GÖREN, Canan KARADENİZ ve Merve KAR'a sonsuz minnetlerimi sunarım. Doktora tez sürecinde beni sabırla anlayışla karşılayan ve hep destek olan eşim İnci KARADENİZ'e ayrıca teşekkür ederim.

Ocak-2023

Murat KARADENİZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KÜKÜRT ÜRETİMİ VE KULLANIM ALANLARI	5
2.1. Kükürt Kaynakları	5
2.1.1. Doğal Kükürt Kaynakları	6
2.1.2. Yan Ürün Olarak Elde Edilen Kaynaklar	6
2.2 Kükürt Üretimi.....	8
2.2.1. Claus Yöntemi	9
2.2.2. Frasch.....	10
2.3. Kükürtün Özellikleri	11
2.3.1. Erime ve Donma Noktası.....	11
2.3.2. Viskozite	11
2.3.3. Yoğunluk	11
2.3.4. Mukavemet	12
2.4. Yapı Malzemesi Olarak Kükürt	12
2.4.1 Kükürt Betonlar	12
3. ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ	18
3.1. Zemin Enjeksiyonu	22
3.2. Enjeksiyon Uygulama Alanları.....	23
3.3. Enjeksiyon Çeşitleri	23
3.3.1.Emdirme (Permeasyon) Enjeksiyonu	23
3.3.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu	26
3.3.3. Jet Enejsiyonu	27
3.3.4. Çatlatma Enjeksiyonu	28
3.3.5. Perde Enjeksiyonu	29
3.2.6 Kaya Enjeksiyonu	30
3.4. Enjeksiyon Harçları	31
3.4.1. Çimento harçları	32
3.4.2. Kimyasal Harçlar	32
3.5. Enjeksiyon Basıncı	34
4. LİTERATÜR ÖZETLERİ	35
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
5.1. Kullanılan Malzemeler	40
5.1.1. Kükürt	40
5.1.2. Kum	40
5.1.3. Çakıl.....	42
5.2. Kullanılan Aletler	43
5.2.1. Etüv	43

5.2.2. Elek Seti.....	43
5.2.3. Terazî	45
5.2.4. Piknometre ve Vakum Pompası.....	45
5.2.5. Eritme Potası.....	45
5.2.6. Hidrolik Kriko	46
5.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	47
5.2.8. Mikroskop.....	48
5.2.9. Laboratuvar Enjeksiyon Deney Düzenegî	48
5.3. Yöntem.....	51
5.3.1. Deney Setinin Kurulması.....	52
5.3.2. Numunelerin Hazırlanması	54
5.3.3. Enjeksiyon Uygulaması	55
5.3.4. Serbest Basınç Deneyi	58
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	60
6.1. SP Zemin Sonuçları	61
6.1.1. Rölâtif Sıklılığın Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi	69
6.1.2. Kür süresinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi.....	70
6.1.3. Enjeksiyon Basıncının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerinde Etkisi	73
6.2. GP Zemin Sonuçları.....	74
6.2.1. Rölâtif Sıklılığın Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi	82
6.2.2. Kür süresinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi.....	82
6.2.3. Enjeksiyon Basıncının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerinde Etkisi	85
6.3. SP ve GP Numunelerin Karşılaştırılması.....	86
6.4. Kükürt Enjeksiyonu ile Çimento Enjeksiyonun Karşılaştırılması	88
6.4.1. Rölâtif Sıklılığın Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi	91
6.4.2. Kür süresinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi.....	93
6.4.3. Enjeksiyon Basıncının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerinde Etkisi	94
7. SONUÇLAR.....	96
KAYNAKLAR.....	98
EKLER	104
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....	116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Doğal kükürt kaynakları	6
Şekil 2.2.	2021 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları	7
Şekil 2.3.	Yıllara göre kükürt üretimi	9
Şekil 2.4.	Claus süreci kükürt üretimi.....	10
Şekil 2.5.	Kükürtün yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi.....	11
Şekil 2.6.	Kükürtün kullanm alanları.....	13
Şekil 2.7.	Geleneksel betonun (PÇB) ve kükürt betonun (KB) içeriği.....	13
Şekil 2.8.	Kükürt beton üretim süreci	14
Şekil 2.9.	Kükürt betonlarda kükürt içeriği ve gerilme ilişkisi.....	15
Şekil 2.10.	Geleneksel betonlar ve kükürt betonların tipik gerilme ve deformasyon eğrisi	16
Şekil 3.1.	Dane boyutuna göre zemin iyileştirme metodları.....	19
Şekil 3.2.	Tipik enjeksiyon uygulamaları	24
Şekil 3.3.	Emdirme enjeksiyonu	25
Şekil 3.4.	Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik olarak gösterimi	27
Şekil 3.5.	Jet Grout yönteminin şematik olarak gösterilmesi	28
Şekil 3.6.	Jet Grout kolon yapımı şematik olarak gösterimi.....	29
Şekil 3.7.	Çatlatma enjeksiyonunun şematik gösterimi	29
Şekil 3.8.	Perde enjeksiyonunu şematik gösterimi	30
Şekil 3.9.	Kaya enjeksiyonunun şematik olarak gösterimi	30
Şekil 3.10.	Zemin dane boyutlarına göre önerilen enjeksiyon malzemeleri.....	31
Şekil 5.1.	Çalışmada kullanılan saf kükürt	40
Şekil 5.2.	SP zeminin gradasyonu.....	42
Şekil 5.3.	GP zeminin gradasyonu.....	43
Şekil 5.4.	Çalışmada kullanılan etüv.....	44
Şekil 5.5.	Elekt setleri	44
Şekil 5.6.	Çalışmada kullanılan terazi.....	45
Şekil 5.7.	Piknometre ve vakum pompası.....	46
Şekil 5.8.	Çalışmada kullanılan eritme potası.....	46
Şekil 5.9.	Çalışmada kullanılan hidrolik kriko	47
Şekil 5.10.	Çalışmada kullanılan SEM cihazı.....	47
Şekil 5.11.	Çalışmada kullanılan mikroskop	48
Şekil 5.12.	Çalışmada kullanılan kompresör.....	49
Şekil 5.13.	Çalışmada kullanılan basınç tankı	49
Şekil 5.14.	Çalışmada kullanılan kalıplar	50
Şekil 5.15.	Çalışmada kullanılan regülatör	50
Şekil 5.16.	Laboratuvar çalışmasının akış şeması	51
Şekil 5.17.	Laboratuvarda kurulan deney setinin şeması.....	52
Şekil 5.18.	Laboratuvarda kurulan deney seti.....	53
Şekil 5.19.	Çalışmada kullanılan doğal zeminin yıkanması	54
Şekil 5.20.	Zeminin farklı dane boyutlarına ayrılması	54
Şekil 5.21.	Enjeksiyona hazır zemin numunesi	56
Şekil 5.22.	Başarısız olmuş enjeksiyon numuneleri	57
Şekil 5.23.	Kükürt enjekte edilmiş zemin numunesi	57
Şekil 5.24.	Enejsiyon uygulanmış numunelere kükürt başlık yapımı.....	58

Şekil 5.25. Serbest basınç deneyine hazır, farklı rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler	59
Şekil 5.26. Serbest basınç deneyine tabi tutulan numune	59
Şekil 6.1. Başarılı enjeksiyon olmuş numunenin 40x görüntüsü.....	60
Şekil 6.2. Enjeksiyonu yetersiz olmuş numunenin 40x görüntüsü	61
Şekil 6.3. SP %100 rölatif sıklıktaki numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	64
Şekil 6.4. %75 Rölatif sıklıktaki SP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	65
Şekil 6.5. %50 Rölatif sıklıktaki SP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	66
Şekil 6.6. %25 Rölatif sıklıktaki numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	68
Şekil 6.7. Serbest basınç deneyi zemin numunesi kırılma paterni.....	69
Şekil 6.8. SP numunelerin serbest basınç mukavemeti-rölatif sıklık ilişkisi.....	70
Şekil 6.9. Serbest basınç mukavemeti-kür süresi ilişkisi.....	71
Şekil 6.10. 28 günlük numunelerde oluşan çatlaklar 40x büyütülmüş	71
Şekil 6.11. %50 Rölatif sıklıkta hazırlanan SP numunelerin kür süresi ve serbest basınç mukavemeti	72
Şekil 6.12. Dr=%50 için serbest basınç mukavemeti-erken yaş kür süresi ilişkisi	73
Şekil 6.13. Dr=%50 için serbest basınç mukavemeti-enjeksiyon basıncı ilişkisi.....	74
Şekil 6.14. %100 rölatif sıklıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	77
Şekil 6.15. %75 rölatif sıklıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	78
Şekil 6.16. %50 rölatif sıklıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	79
Şekil 6.17. %25 rölatif sıklıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün	80
Şekil 6.18. Serbest basınç mukavemeti-rölatif sıklık ilişkisi.....	82
Şekil 6.19. Serbest basınç mukavemeti-kür süresi ilişkisi.....	83
Şekil 6.20. %50 Rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerin kür süresi ve serbest basınç mukavemeti	84
Şekil 6.21. Dr=%50 için serbest basınç mukavemeti-erken yaş kür süresi ilişkisi	85
Şekil 6.22. Dr=%50 için serbest basınç mukavemeti-enjeksiyon basıncı ilişkisi.....	86
Şekil 6.23. SP ve GP numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri	87
Şekil 6.24. GP ve SP 28 günlük numunelerin gerilme ve şekil değiştirme grafiği.....	87
Şekil 6.25. SP ve GP numunelerin enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemetlerinin değişimi	88
Şekil 6.26. Çimento ve kükürt enjekte edilmiş numunelerin şematik gösterimi	89
Şekil 6.27. Farklı rölatif sıklıktaki çimento ve kükürt enjekte edilmiş 28 günlük GP numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri.....	90
Şekil 6.28. Farklı rölatif sıklıktaki çimento ve kükürt enjekte edilmiş 28 günlük SP numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri.....	91
Şekil 6.29. SP zeminde çimento ve kükürt enjekte edilmiş numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri.....	92
Şekil 6.30. GP zeminde Çimento ve Kükürt enjekte edilmiş numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri.....	92

Şekil 6.31. Çimento ve kükürt enjekte edilmiş SP numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri.....	94
Şekil 6.32. Çimento ve kükürt enjekte edilmiş GP numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri.....	94
Şekil 6.33. Dr %50 için çimento enjekte edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti ve enjeksiyon basıncı ilişkisi	95



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Kükürt betonlarla geleneksel betonların özellikleri	14
Tablo 3.1. Yaygın olarak kullanılan kimyasal harçların avantajları ve dezavantajları	33
Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan kükürtün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	40
Tablo 5.2. SP zeminin dane doyutları	41
Tablo 5.3. SP zeminin özellikleri.....	41
Tablo 5.4. GP zeminin dane boyutları	42
Tablo 5.5. GP zeminin özellikleri	42
Tablo 6.1. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin ağırlıkça oran miktarı.....	62
Tablo 6.2. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin ortalama serbest basınç mukavemetleri	62
Tablo 6.3. Kükürt enjekte edilmiş SP numunelerin elastisite modülü değeri.....	69
Tablo 6.4. Kükürt enjekte edilmiş GP numunelerin ağırlıkça oran miktarı.....	75
Tablo 6.5. Kükürt enjekte edilmiş GP numunelerin ortalama serbest basınç mukavemetleri	75
Tablo 6.6. Kükürt enjekte edilmiş GP numunelerin elastisite modülü değeri	81
Tablo 6.7. GP zeminde çimento enjeksiyonu ile kükürt enjeksiyonunun serbest basınç mukavemetleri	89
Tablo 6.8. SP zeminde çimento enjeksiyonu ile kükürt enjeksiyonunun serbest basınç mukavemetleri	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a_{mak}	: Depremden dolayı zeminde oluşacak maksimum ivme
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
Cr	: Süreklilik katsayısı
Cc	: Eğrilik katsayısı
CO ₂	: Karbondioksit
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'lık bölümünün en büyük dane çapı
Dr	: Rölatif sıkılık
E	: Elastisite modülü
e	: Çatlak genişliği
e _{mak}	: Maksimum boşluk oranı
e _{min}	: Minimum boşluk oranı
FC	: Zeminin 0,06 mm'den küçük dane oranı
G	: Kesme modülü
GP	: Üniform çakıl
Gs	: Özgül kütle
k	: Permeabilite katsayısı
N	: Zeminin enjeksiyon edilebilirlik sayısı
P	: Enjeksiyon basıncı
PÇ	: Portland çimentosu
R ²	: Korelasyon katsayısı
s/ç	: su/çimento
SC	: Killi kum
SM	: Siltli kum
SO ₂	: Kükürtdioksit
SP	: Üniform kum
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
v	: Poisson oranı
σ_o	: Toplam düşey gerilme
σ'_o	: Efektif düşey gerilme

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerikan Test Materyalleri Topluluğu)
JSCE	: Japan Society of Civil Engineers (Japon İnşaat Mühendisleri Birliği)
KPB	: Kükürt Polimer Beton
KB	: Kükürt Beton
SBM	: Serbest Basınç Mukavemeti
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
SPT-N	: Standart Penetrasyon Deneyi Vuruş Sayısı
UK	: Uçucu Kül
USCS	: Unified Soil Classification System (Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi)
USGS	: United States Geological Survey (ABD Jeolojik Araştırması Enstitüsü)
YASS	: Yer Altı Su Seviyesi

KÜKÜRT ENJEKSİYONU İLE ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Dünyadaki hızlı nüfus artışı ve kentleşmeyle birlikte enerji ve barınma ihtiyacı da artmaktadır. Enerji ihtiyacının çoğunun karşılandığı fosil yakıtların kullanımındaki artış ile birlikte petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürt miktarları da dünya çapında artış göstermektedir. Bu çalışmada artan rezervler sonucu alternatif kullanım alanı olarak inşaat endüstrisinde kullanılmaya başlanan kükürtün, geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak zemin iyileştirme yöntemlerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi ve Portland çimento üretimi sırasında meydana çıkan CO₂ salınımını azaltmak amaçlanmıştır. Çalışmada zemin enjeksiyon yönteminde bağlayıcı olarak kullanılan geleneksel su-çimento karışımının yerine petrol endüstrisinden elde edilen kükürt kullanılmıştır. Oda sıcaklığında katı halde bulunan kükürt, rölatif sıklıkları %25, %50, %75 ve %100 olarak hazırlanmış üniform kum (SP) ve üniform çakıl (GP) sınıfı zemin numunelerine 130-135°C’de sıvı faza getirilerek düşük basınçlı kükürt enjeksiyonu yöntemi ile zemin iyileştirmesi gerçekleştirilmiştir. Numuneler bu çalışma için özel olarak tasarlanan deney düzeneği kullanılarak sıcaklık ve basınç kontrollü olarak hazırlanmıştır. Enjeksiyon uygulanmış numuneler 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemeti deneylerine tabi tutularak rölatif sıklık, kür süresi, enjeksiyon basıncı ve zemin sınıfı değişimlerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük SP numunelerde 20,16 MPa olarak elde edilmiş ve 1 saat sonunda bu değerin yaklaşık %85’ine ulaşabildiği belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca literatürde yer alan çimento enjeksiyonu yapılmış aynı zemin sınıflarına ait serbest basınç deneyi sonuçları ile çalışmadan elde edilen deney sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kükürt enjeksiyonunun hızlı priz alması ve 1 saatte nihai dayanımının yaklaşık %85’ini kazanması nedeniyle çimento enjeksiyonuna göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Hızlı priz alma, düşük viskozite ve yüksek dayanım değerleri ile saf kükürtün zemin enjeksiyonunda çimento harçlarına alternatif olarak kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon, Kükürt, Rölatif Sıklık, Serbest Basınç Mukavemeti, Zemin İyileştirme.

IMPROVEMENT OF SOIL PROPERTIES BY SULFUR GROUTS

ABSTRACT

The need for energy and housing is increasing worldwide due to the rapid population growth and urbanization. With the increase in the use of fossil fuels, which meet most of the energy needs, the amount of sulfur obtained as a by-product from the petroleum industry is also increasing on a global scale. In this study, it is aimed to examine the usability of sulfur, which has started to be used in the construction industry as an alternative usage area as a result of increasing reserves, in soil improvement methods as an alternative to traditional Portland cement and to reduce the CO₂ emission released during Portland cement production. In the study, sulfur obtained from the petroleum industry was used as a binder instead of the traditionally used water-cement mixture in the grouting. Sulfur, which is solid at room temperature, is brought to the liquid phase at 130-135°C and injected into uniform sand (SP) and uniform gravel (GP) class soil samples prepared with relative density of 25%, 50%, 75% and 100% by low pressure injection method to improve the ground properties. The samples were prepared in a temperature and pressure controlled environment with the experimental setup specially designed for this study. Injected samples were subjected to unconfined compressive strength tests at the end of 1, 7 and 28-day curing periods and the effects of relative tightness, curing time, injection pressure and soil class changes on unconfined compressive strength were investigated. The highest unconfined compressive strength was obtained in the 7-day-old SP samples as 20,16 MPa, and it was determined that approximately 85% of this value was reached in just 1 hour. In addition, the results of the unconfined compressive strength of the same soil classes with cement injection in the literature and the test results obtained from the study were examined comparatively. It has been determined that sulfur injection is more advantageous than cement injection as it sets fast and gains approximately 85% of its final strength in just 1 hour. Considering the fast setting, low viscosity and high strength values, it was concluded that pure sulfur could be used as an alternative to cement mortars in grouting.

Keywords: Grouting, Sulfur, Relative Density, Unconfined Compressive Strength, Soil Improvement.

1. GİRİŞ

Son yıllarda dünya nüfusunun hızla artmasıyla enerji ihtiyacı da artmaktadır. Petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlar dünyada tüketilen enerjinin %82,3'ünü karşılamaktadır (TPAO, 2022). Doğal kükürt madenleri ve ham petrol, doğalgaz, bakır ve kömür madenlerinin rafine edilmesiyle oldukça yüksek miktarda kükürt elde edilmektedir (Vlahovic ve diğ., 2011). Günümüzde çevre kanunlarının sınırlandırması ve teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, petrol işleminde yan ürün olarak açığa çıkan, kükürt miktarında hızlı artış olmaktadır (Wagenfeld ve diğ., 2019). 1990'lı yılların başlarında dünya kükürt üretiminin yaklaşık %24'ü fosil yakıtlardan elde edilirken günümüzde, fosil kaynaklardan üretilen kükürt miktarı dünyada üretilen toplam kükürt miktarının %97'sine ulaşmıştır. Fosil yakıtların en büyük enerji kaynağı olması ve enerji ihtiyacının artmasıyla yan ürün olarak meydana çıkan kükürt miktarının da artacağı tahmin edilmektedir (Harrison, 2012). Petrol ve doğal gaz sanayisinden yan ürün olarak ortaya çıkan kükürt miktarlarında büyük artışların olması neticesinde petrol şirketleri desteği ile kükürtün farklı kullanım alanlarının oluşturulması konusunda araştırmalar günden güne artmaktadır (Vlahovic ve diğ., 2011).

Dünyadaki hızlı nüfus artışıyla beraber yeni inşaat alanlarının açılması zorunlu hale gelmiştir. Bu yeni açılan inşaat alanlarının zeminleri güvenli yapı inşa etmek için gerekli mühendislik özelliklerini taşımayabilir. Bu alanlardaki zayıf taşıma gücüne sahip zeminlerin gerekli olan mühendislik özelliklerini iyileştirmek gerekmektedir. Bu zayıf zeminleri iyileştirmek için bir çok zemin iyileştirme metodu vardır. Bu metotlardan en yaygın olarak kullanılanı, enjeksiyon yöntemidir. Enjeksiyon yöntemi; zeminin geçirimsizliği düşürmek, kayma mukavemeti parametreleri arttırmak için zeminin içindeki boşlukların harç ile doldurulmasıdır. Enjeksiyon yöntemi zemin yapısını bozarak ya da koruyarak (sadece boşlukları doldurularak) uygulanabilir. Bu çalışmada uygulanacak yöntem olan emdirme enjeksiyonunda zemin iç yapısı bozulmadan zemindeki boşlukların harç ile doldurulmasıdır. Enjeksiyon harcı olarak kimyasal ve çimentolu harçlar kullanılır. En çok kullanılan enjeksiyon harcı Portland çimentodur. (Basha ve diğ., 2005; Hossain ve diğ., 2007). 1 ton çimento üretimi esnasında yaklaşık 1 ton CO₂ açığa çıkmaktadır. Dünyada her yıl 4 milyon tondan fazla çimento üretilmekte ve çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımı dünya geneli toplam CO₂ salınımının

yaklaşık %7'sini oluşturmaktadır (Mohammadi ve diğ., 2014). Çimento üretimi sırasında yüksek enerji tüketimi gerekliliği ve CO₂ salınımının yüksek olmasından dolayı araştırmacıları alternatif yan ürünler kullanmaya itmektedir (Hewlett, 2005).

Literatürde farklı zemin türlerinin iyileştirilmesi için uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. birçok yan ürün zemin iyileştirme de çimento yerine kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Edil ve diğ. (2006) , ince daneli zeminleri kendiliğinden çimentolaşan uçucu kül ile iyileştirmişler. Akbulut (1999) granüler zeminde kullanılan harçlarda çimento miktarını azaltmak için çimentoya uçucu kil, silis dumanı gibi yan ürünler ile enjeksiyon yapmıştır. Çokça (2001) uçucu killeri, şişen zeminlere katarak şişen killeri iyileştirmiştir. Maaitah (2012), zeminin fiziksel özelliklerini kireç ve sodyum silikat gibi katkı malzemeleri katarak iyileştirmiştir. Literatürdeki araştırmacıların yaptıkları bu çalışmalar Portland çimentonun ya tamamen ya da kısmen ikame edilmesinin önemini göstermektedir. Literatürde yapılan araştırmalarda çimento yerine alternatif ürünler kullanılmasının birçok çevresel ve ekonomik kazanımları olduklarını belirtmişler. Zemin iyileştirmede kullanılabilecek diğer bir yapı malzemesi kükürt olabilir. Kükürtün çevreci ve ekonomik olması gibi avantajları sebebiyle Amerika, Kanada, Polonya ve Rusya dahil olmak üzere birçok ülkede hala çok sayıda araştırma ve yenilik yapılmaktadır. Kükürt beton ve kükürt asfalt gibi yapı malzemeleri, çevre dostu ve uygun maliyetli olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir (Ciak ve diğ., 2013). İnşaat sektöründe kükürt, üstün mekanik özellikleri sayesinde 1921 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Araştırmacılar geleneksel çimento yerine bağlayıcı olarak %40 kükürt kullanarak kükürt beton elde etmişler.

Bağlayıcısı kükürt olan betonların Portland çimentoyla yapılan geleneksel betonlara göre yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci, su geçirimsizlikleri, hızlı dayanım kazanma ve hızlı priz alması gibi özellikleri araştırmacıların bu konuya olan ilgilerini arttırmıştır. Kükürt ay yüzeyinde serbest element olarak bulunması nedeniyle, ayda yapılacak olan inşaat uygulamalarında kullanılması düşünülen yapı malzemelerinin başında yer almaktadır (Grugel, 2012). 3D yazıcı teknolojilerinde kükürtün hızlı dayanım almasından ötürü kullanılmaya başlanmıştır. (Hager ve diğ., 2016)

İnşaat teknolojileri içerisinde kendisine birçok alternatif kullanım alanı bulan kükürtün, geoteknik uygulama alanları içerisinde neredeyse hiç yeri yoktur. Yapılan literatür

araştırmalarında Mohamed ve Gamal (2012) yaptıkları çalışmada zayıf zeminleri iyileştirmek için zeminin mikro yapısı, fiziksel, kimyasal ve termal özellikleri göz önüne alarak kükürt imento su geliştirmiştirler. Zemin iyileştirme teknikleri açısından Mohammadi ve diğ. 2014 yılında geekleştirilmiş olan deneysel çalışmada zemin stabilizasyonunda, kükürtün kullanılabilirliğinin araştırıldığı görülmüştür. Yaptıkları çalışmada kumlu zeminlerin stabilizasyonunu arttırmak için katkı malzemesi olarak modifiye kükürt kullanmışlardır. Zeminin geoteknik özelliklerini yapılan kesme kutusu deneyi ve serbest basınç deneyleri ile araştırmışlardır. Zemine katılan kükürt miktarı ve numunelerin kr süresine bağlı olarak zeminin mekanik özelliklerinin doğrusal olarak arttığını göstermişlerdir. Elde edilen bulgularda modifiye edilmiş kükürtün zemine katılarak zeminin fiziksel özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğunu belirlemişlerdir (Mohammadi ve diğ., 2014).

Enjeksiyon yönteminde imento yerine petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürtün kullanılmasının imento üretim miktarlarının ve çevresel etkilerinin azalmasına neden olacağı açıkça görülmektedir (Shin, 2011). Kükürtün priz süresinin imento harçlarına göre daha kısa olması, erimiş saf kükürtün viskozitesinin imento harcına göre daha düşük olması dolayısıyla enjeksiyon kolaylığı saplaması ve su muhtevası yüksek zeminlerde imento harçlarının dayanım kazanmalarının kükürte göre daha zor olması, yani kükürtün dayanım kazanma mekanizmasının sudan daha az etkilenmesinin sonucu olarak zemin enjeksiyonunda imento harı yerine kükürt kullanılması, saha uygulamalarında büyük avantaj sağlayacağı açıkça görülmektedir (Mohamed ve El Gamal, 2009; ztrk ve ner, 2022).

Bu çalışmanın amacı, artan rezerv miktarları göz önünde bulundurulduğunda kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılmasının yanında zemin iyileştirme uygulamalarında alternatif kullanım alanı oluşturulması ve bu uygulamalarda kullanılan çimentonun yerini alarak CO₂ emisyonu miktarının azaltılmasıdır. Çalışmada geleneksel enjeksiyon yönteminde bağlayıcı olan su-imento karışımının yerine saf kükürt kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak laboratuvar ortamında saf kükürtü numunelere enjekte etmek için deney düzeneği kurulmuştur. Daha sonra %25, %50, %75 ve %100 rölatif sıklıkta hazırlanmış SP ve GP zemin numunelerine kükürt enjekte edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyi sonucunda numunelerin

serbest basınç mukavemeti, birim deformasyonları ve elastisite modüllerindeki değişimler incelenerek, kükürtün enjeksiyon yönteminde kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise daha önceden enjeksiyon malzemesi olarak Portland çimento kullanılan aynı gradasyon, rölatif sıklık ve kür süresine sahip numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırma yapılmıştır.



2. KÜKÜRT ÜRETİMİ VE KULLANIM ALANLARI

Kükürt, doğal ham madde kaynaklarından ya da petrol ve gaz endüstriyel tesislerinden yan ürün olarak elde edilmektedir (Loov ve diğ., 1974). Kükürt, oda sıcaklığında katı, açık sarı renkte olan kimyasal bir ham maddedir (Chen ve diğ., 2014 ; Gao ve diğ., 2019). Amerikan Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma (USGS) verilerine göre dünyadaki kükürt üretimi hızla artmaktadır. Çok büyük miktarlarda üretilen bu kükürtü kullanmak için çeşitli alternatif kullanım alanları oluşturmak gerekmektedir. Bu konuda birçok akademisyen gerekli araştırmaların yapılması gerektiği konusunda hem fikirdir. Son yıllarda kükürtün yan ürün olarak elde edilmesinde en büyük katkıyı 17 milyon ton olarak Çin, petrol ve doğalgaz tesislerinde üreterek vermiştir. Çin'den sonra sırasıyla en büyük kükürt üreticileri; Amerika Birleşik Devletleri (9,7 milyon ton), Rusya (7,1 milyon ton), Suudi Arabistan (6 milyon ton), Kanada (5,5 milyon ton), Japonya ve Kazakistan'dır (3,5 milyon ton). Bu ülkelerde yıllık 80 milyon ton kükürt üretilmektedir. (Fediuk ve diğ., 2017). Türkiye'de Balıkesir, Muğla Milas, Ağrı Diyadin, Isparta Keçiborlu, Denizli Sarayköy ve Van'da doğal kükürt yatakları bulunmaktadır. Petrolden kükürt üretimi ise İzmir Aliğa, İzmit ve Kırıkkale'deki TÜPRAŞ rafinerilerinde yapılmaktadır. Kükürt; tarım, tıp, kauçuk üretimi gibi sanayi alanlarında kullanılmaktadır. Kükürtün inşaat mühendisliği alanında bağlayıcı olarak kullanılması 1921 yılında başlamıştır (ACI, 1988). Kükürtün geleneksel inşaat projeleri için daha uygun hale getirilmesi için kükürt ve diğer karışımlardan beton yapılabilceği öne sürülmüştür. Araştırmanın derinleşmesiyle birlikte, kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılmasının giderek yaygınlaştığı görülmektedir.

Günümüzde kükürt, inşaat mühendisliği alanında beton yapımında bağlayıcı olarak kullanılan çimentoya iyi bir alternatif olarak görülmektedir. Geleneksel olarak hazırlanan betonlarda çimento kullanılmaktadır. Kükürt betonlarda ise bağlayıcı olarak kullanılan çimento+su yerine kükürt kullanılmaktadır.

2.1. Kükürt Kaynakları

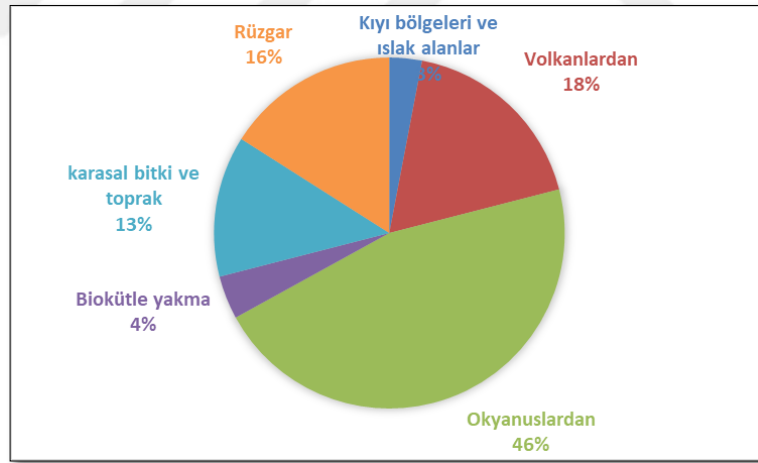
Kükürt doğal kaynaklardan ya da yan sanayi ürünü olarak, petrol, doğalgaz ve baca gazlarından elde edilmektedir. Dünya doğal kaynaklarının çok az kısmı işletmeye uygun

ve ekonomiktir. Doğal kükürt kaynaklarının işletilmesi, kükürdün yan ürün olarak petrol ve doğalgaz rafinesinden elde edilmesinden daha maliyetlidir.

2.1.1. Doğal Kükürt Kaynakları

Kükürtün üretildiği doğal kaynakların ölçülmesi çok zor ve karmaşıktır. Kükürtün yer kabuğundaki çeşitli minerallerde bulunması, onu yerkabuğunda elemental halde bulunan nadir elementlerden biri yapar. Kömür, petrol ve doğalgazda da çeşitli bileşenlerde ve bileşenler halinde farklı miktarda bulunmaktadır. Bunlara ek olarak kükürt, hayvanlar ve bitkilerde dahil olmak üzere tüm canlılarda az miktarda da olsa bulunmaktadır (Paparozzi ve diğ., 1994; Ober, 2022).

Volkanlar en çok bilinen doğal kaynaklardır. Ayrıca deniz suyunun her gramında 2,56 mL sülfat içerecek şekilde kükürt bulunur. Şekil 2.1’de kükürtün hangi doğal kaynaklardan elde edildiği gösterilmiştir. Doğal kükürt kaynakları köklerine göre; sedimanter, volkanik ve hidrotermal kükürt kaynakları olmak üzere 3’e ayrılır. Doğal kükürt kaynaklarından kükürt Frasch Yöntemi ile üretilmektedir.

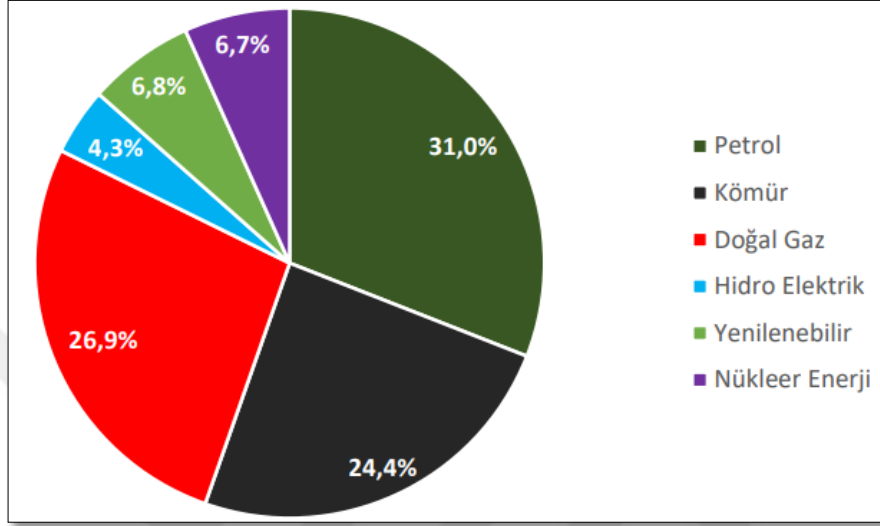


Şekil 2.1. Doğal kükürt kaynakları

2.1.2. Yan Ürün Olarak Elde Edilen Kaynaklar

Dünyada tüketilen enerjinin %82,3 gibi bir oranı fosil kaynaklardan elde edilmektedir (Şekil 2.2). Yan ürün olarak elde edilen kükürtün çoğu, fosil yakıtların işlenmesinden (doğalgaz, petrol, kömür vb.) ve cevherlerin eritilmesinden üretilmektedir (Howart ve diğ., 1992). Atmosfer üzerindeki yan ürün kükürt emisyonları 20. yüzyılda yoğun bir

şekilde artmaya başlamıştır. Artış eğilimi 1970'lere kadar devam etmiş, ardından Amerika ve Avrupa'da kükürt emisyonlarına ilişkin düzenlemeler getirilmiştir (Darnell, 1991). Çevresel düzenlemeler, kükürt emisyonlarını azaltarak fosil yakıtların rafine işlemlerinden sonra ortaya çıkan kükürt miktarını arttırmıştır.



Şekil 2.2. 2021 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları (TPAO, 2022)

Doğal gaz;

Doğal gazın içinde bulunan H_2S , kötü kokuya, insan sağlığı açısından risklere ve korozyona neden olur. Atmosfere sürekli emisyonu, hava kalitesinin düşmesine ve asit yağmurlarına sebep olarak yerel çevre üzerinde zararlı etkiye sahiptir (Frare ve diğ., 2010). Bu yüzden doğal gazdan ayrışması gerekmektedir. Doğal gazdan ayrılan H_2S , Claus yöntemi kullanılarak kükürte dönüştürülür (Zwicker, 1990).

Petrol;

Ham petrol içeriğinde genellikle, %1-3 arasında kükürt bulunur. (Speight ve Ozum, 2001). Petrol kullanımı arttıkça petrol içinde bulunan SO_2 emisyonları, hava kirliliği ve asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Bu yüzden çevresel kısıtlamalardan dolayı havaya salınan SO_2 miktarı azaltılmıştır. Son yıllarda çevresel kanunların getirdiği kısıtlamalardan dolayı havaya kükürt salınımı azalmıştır. Bunun sonucunda kükürt geri kazanım kapasitesi ve üretiminde muazzam bir artış gözlenmiştir.

Petrol ve Bitümlü Kumlar;

Petrol kumu rezervlerinin geliştirilmesi o bölgede kükürt ve azot birikiminin artması gibi bir takım sorunlara neden olmaktadır. Bitümlü kumlar, Kanada'da bulunan yaklaşık 300 milyar varil petrolün %3,5–5 kükürt içerdiği önemli bir kükürt kaynağıdır (Korea, 2007). Genel olarak petrol kumları, bitüm, kil, su ve kumun karışımı şeklindedir. Petrol kumlarının rafine edilmesi sırasında da, geleneksel petrol arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yüzden önemli miktarda kükürt açığa çıkmaktadır.

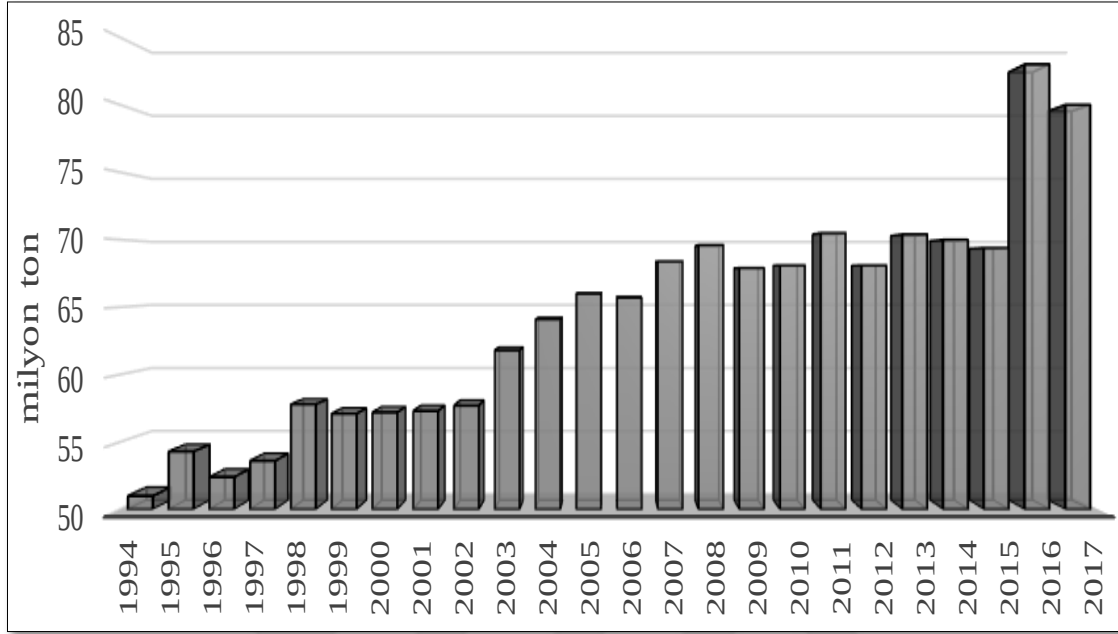
Sülfür Eritme;

Birleşik kükürt, demir olmayan metallerin eritilmesi yoluyla elde edilir. SO_2 içeren izabe gazları H_2SO_4 ve sıvı kükürte dönüştürülür. ABD'de (1990), demir dışı metallerin eritilmesinden dolayı elde edilen H_2SO_4 yoluyla yaklaşık %11 kükürt elde edilmiştir. (Taylor ve diğ, 2004).

2.2. Kükürt Üretimi

Doğal kükürt rezervleri (sedimanter ve magmatik oluşumun kükürt cevherleri dahil) 5 milyar tondan fazladır. Bunlardan, keşfedilen doğal kükürt yatakları yaklaşık 1,2 milyar ton kapasiteye sahiptir. Kükürt cevherleri Irak (yaklaşık 335 milyon ton), Amerika Birleşik Devletleri (200 milyon ton) Şili (100 milyon ton) ve Meksika'da (100 milyon ton) bulunmaktadır. Polonya, Ukrayna, Rusya, Türkmenistan ve Japon adalarında da büyük yataklar keşfedilmiştir (Fediuk ve diğ., 2020). Kükürt madenciliği endüstrisi özel ve kamu olmak üzere iki sektöre ayrılmıştır. Kükürt madenciliğinde geleneksel yer altı yöntemleri, geleneksel açık ocak yöntemleri ve Frasch madenciliği yöntemi olmak üzere üç yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemler içerisinde en çok Frasch yöntemi kullanılmaktadır. Kükürt hem yer altı hem de yer üstü doğal kaynaklarından çıkarılır. Ayrıca bazı endüstriyel işlemlerden yan ürün olarak elde edilir. İlgili sektörde, hidrojen sülfür işleme sürecinde yan ürün olarak kükürt üretilir; kükürt üretiminin seviyesi, yalnızca tüketim hacmine değil, aynı zamanda saflaştırılmış petrol ve doğal gaz miktarına da bağlıdır. Ticari kükürt üretiminin parça, granül ve sıvı olmak üzere üç türü vardır. Kükürt üretim teknolojileri, doğal elemental kükürtün ekstraksiyonu ve rafine edilmesini, piritlerden kükürt elde edilmesini, H_2S 'den kükürt üretimini ve SO_2 'den kükürt üretimini

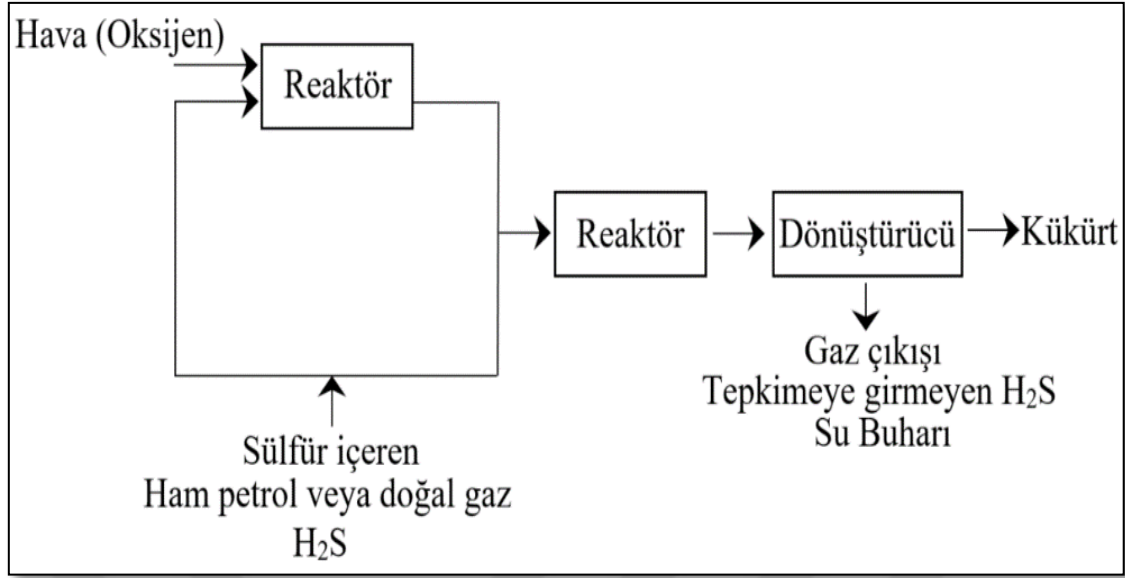
içerir (Feduik ve diğ 2020). Dünyadaki kükürt üretiminin artış eğilimi yıllara göre Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Dünyada yıllara göre kükürt üretimi (Öztürk, 2019)

2.2.1. Claus Yöntemi

Yan ürün olarak elde edilen kükürtün bütün süreçlerinde, dünya çapında çeşitli işlemlerle kükürte dönüştürülebilen H_2S üretilir. Bu yöntemlerden biri de ismini mucidi Carl Friedrich Claus'tan alan Claus yöntemidir. (Fisher, 1974). Claus sürecinin genel verimliliği %94-97 arasındadır. Havada bulunan H_2S ve oksijen (O_2) reaksiyona girerek SO_2 oluşturur. Yukarıdaki reaksiyon çok fazla ısı üretirken H_2S ve SO_2 birbirleriyle reaksiyona girerek $3/2 S_2$ oluşturur. Bu reaksiyon, denge dönüşümünü %75'e kadar azaltan yüksek geri dönüşümlü ekzotermik reaksiyondur. Reaksiyon fırınında üretilen çıkış gazı, tekrar ısı elde etmek ve buhar (yüksek basınç) oluşturmak için atık ısı kazanına aktarılır. Atık gazda bulunan S_2 , heksasülfür (S_6) ve oktasülfür (S_8) olarak değişir. Atık gaza sahip atık ısı kazanı, kükürtün yoğunlaştırılması için bir yoğunlaştırıcıya aktarılır. Yoğunlaştırılmış atık gaz ısıtılır ve 2-3 katalitik reaktöre aktarılır. Her katalitik reaksiyon aşaması, kondenserde dönüştürülmüş atık gazın soğutulması sonucu Claus yöntemiyle kükürt üretilir.



Şekil 2.4. Claus süreci kükürt üretimi (Mohamed ve Gamal, 2010)

2.2.2. Frasch

984 yılında Dr.Herman Frasch, kükürtün yeraltında eritilmesi ve ardından yukarıya doğru pompalanması yoluyla geri kazanılması için bir süreç icat etti (Ober, 2002). Bu işlemi ilk olarak 1903 yılında Sulphur Mine, Los Angeles'ta ticari olarak kullanılmıştır. Frasch madenciliği için genellikle aşağıdaki adımlar izlenir (Feduik, 2016),

- Frasch pompası, kükürt birikintileri içeren zemine yerleştirilir.
- Kükürt içeren mineral tabakalara 165 Co sıcak su verilir.
- Sıcak su ile eriyen kükürt, basınçlı hava ile yüzeye pompalanır.

Özellikle ABD, Irak ve Meksika gibi kükürt bakımından zengin ülkelerde, yan ürün kükürt kaynaklarının yaklaşık %90'ı Frasch madenciliğinden elde edilmiş olsa da, bu madencilik yöntemi aşağıdaki koşullar gerekmektedir,

- Büyük, gözenekli ve zengin kükürt yatakları.
- Kükürt yatağının üzerindeki geçirimsiz örtü kayası.
- Güvenilir ve yeterli su temini.
- Kükürt birikintisini eritmek için gereken büyük miktarda suyu ısıtmak ve prosesin enerji tüketen makinelerinin düzgün çalışması için gereken yeterli gücü sağlaması ve bunun için gerekli yakıt kaynağının maliyetini karşılamak.

2.3. Kükürtün Özellikleri

2.3.1. Erime ve Donma Noktası

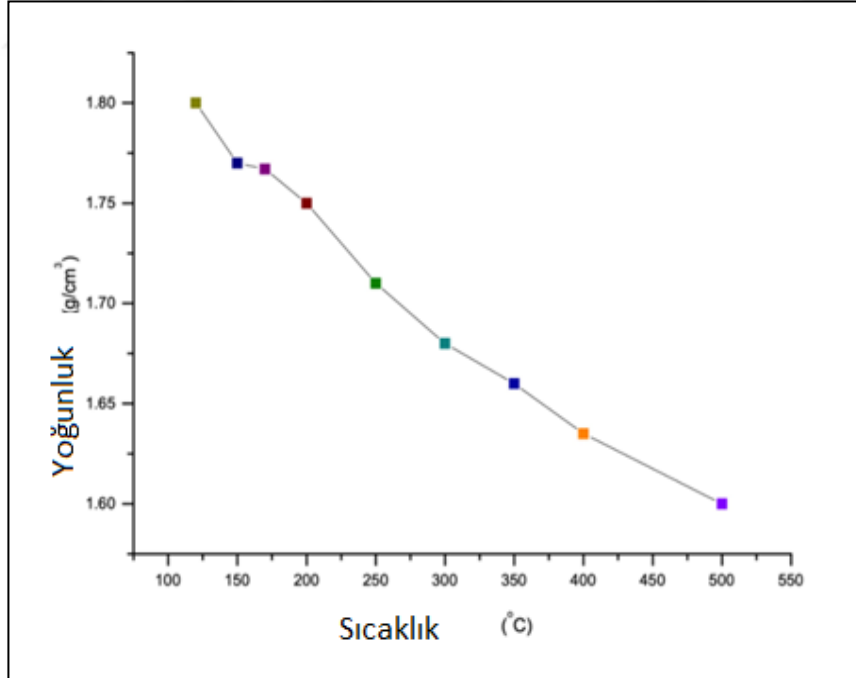
Kükürtün, allotrop yapısına bağlı olarak birkaç erime ve donma noktası vardır. Düşük donma noktasında kükürtün maksimum yoğunluğuna ulaşılır. Kükürtün donma noktası eriyiğin sıcaklığına ve basıncına bağlıdır. Kükürt yapı malzemesi olarak kullanıldığında ortamdaki sıcaklık ve basınç kontrol altında olması gerekmektedir (Meyer, 2013).

2.3.2. Viskozite

Kükürtün viskozitesi büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Viskozitedeki artış ve azalış sıvı haldeki kükürt zincirlerinin yoğunluğuna ve toplam uzunluğuna bağlıdır.

2.3.3. Yoğunluk

Kükürtün yoğunluğu da viskozite gibi sıcaklığa bağlıdır. Şekil 2.5'te görüleceği gibi sıcaklık arttıkça yoğunluk azalmaktadır.



Şekil 2.5. Kükürtün yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi (Mohamed ve El-Gamal 2010)

2.3.4. Mukavemet

Kükürtün mukavemeti termal geçmişine ve kükürtün saflık derecesine bağlıdır. Dale ve Ludwing (1965) yaptıkları araştırmada kükürtün basınç mukavemeti 12,41 MPa- 22,75 MPa aralığında değişmektedir. Kükürtün çekme ve basınç mukavemeti büyük ölçüde termal geçmişe, soğuma hızı ve sıcaklığa bağlıdır. Elementel kükürt modifiye edilerek ya da filler malzeme (dolgu) katılarak çekme ve basınç dayanımı ve durabilitesi geliştirilebilir.

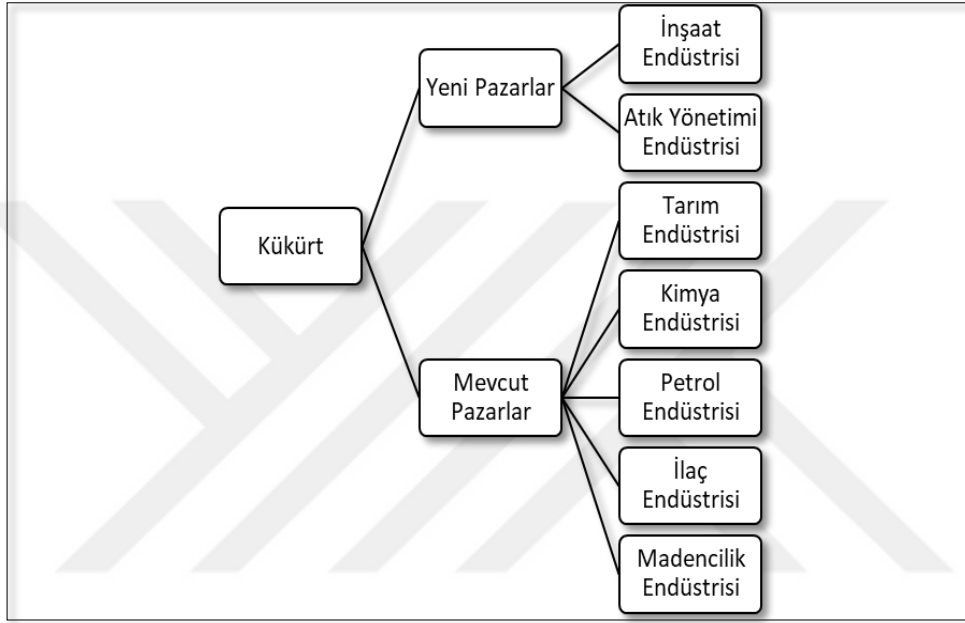
2.4. Yapı Malzemesi Olarak Kükürt

Kükürt, çeşitli endüstrilerde (tarım, petrol ve ilaç gibi) kullanılmıştır. Dünyadaki enerji ihtiyacının çoğu petrol endüstrisinden karşılandığı için petrol endüstrisinden elde edilen kükürt miktarı her geçen gün artmaktadır. Bu artış, araştırmacıları kükürte kullanım alanları açmaya itmektedir. Bacon ve Davis 1921 yılında atık kükürtü yapı malzemesi olarak kullanmak için çalışmalar yapmıştır. Şimdilerde kükürt, inşaat sektöründe kükürt betonlar, prefabrike yapılar gibi uygulamalar için alternatif olarak görülmektedir. Çimento yerine kükürt kullanılması çimento üretim sırasında meydana gelen CO₂ gazının çevreye vereceği zararları azaltacaktır. Bağlayıcı olarak kullanılan kükürt ısıtılarak sıvı faza getirilmekte ve böylece yapı malzemesi alanında bağlayıcı olarak kullanılan çimento+su yerine kullanılmaktadır. Kükürtün, hızlı mukavemet gelişimi, düşük geçirimsizlik, asitlere ve tuzlara karşı mükemmel direnç gibi bazı özellikleri pek çok alanda Portland çimentoya göre daha üstün inşaat malzemesi olmasını sağlıyor (Mohamed and El Gamal 2010). Şekil 2.6'da kükürtün kullanım alanları gösterilmektedir.

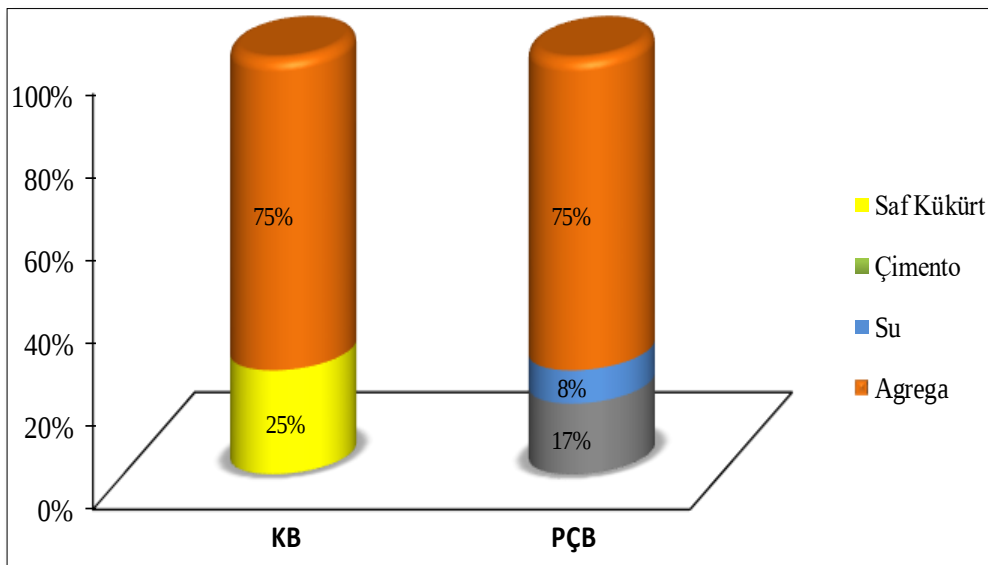
2.4.1 Kükürt Betonlar

Kükürt betonların geleneksel betonlara göre farkı, bağlayıcı malzeme olarak çimento ve su yerine kükürt kullanılması ve termal işlem görmesidir. Kükürt betonların üretiminde su kullanılmadığı için literatürde susuz betonlar olarak da geçmektedir (Demirtürk ve Tunç, 2016). Şekil 2.7'de şematik olarak geleneksel ve kükürt betonda kullanılan malzemeler gösterilmiştir. Kükürt bazlı betonların %70-%90 agregalardan, %10-%30 saf kükürtten oluşur. Betondaki optimum kükürt oranı agreganın özelliklerine ve

granülometresine bağlıdır. Kükürt betonlar; yol blokları, kaldırımlar, kanalizasyon boruları, demiryolu bağları, köprü tabliyeleri ve asit tankları yapmak için kullanılabilir. Betonda çimento yerine kükürt kullanılması, daha yüksek mukavemet, geçirimsizlik, hızlı mukavemet gelişimi, korozyon direnci ve geri dönüştürülebilirlik gibi özelliklerinden dolayı daha popüler hale gelmektedir. Tablo 2.1’de kükürt betonlar ile geleneksel betonun karşılaştırılması gösterilmektedir.



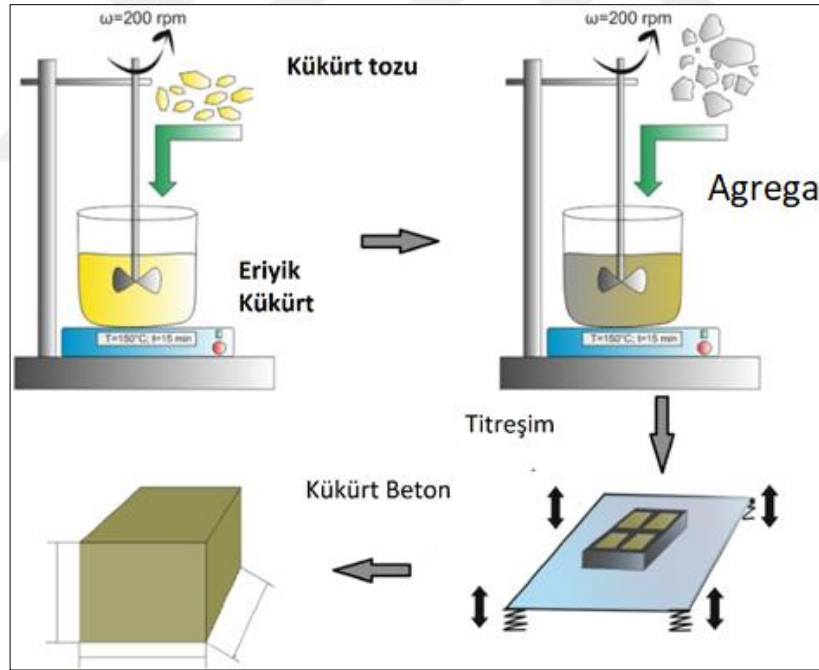
Şekil 2.6. Kükürtün kullanım alanları (Mohamed ve El-Gamal, 2010)



Şekil 2.7. Geleneksel betonun (PÇB) ve kükürt betonun (KB) içeriği (Öztürk, 2019)

Tablo 2.1. Kükürt ve geleneksel betonların özellikleri (Ciak ve Harasymiuk, 2013)

Özellikler	Birim	Geleneksel Beton	Kükürt Beton
Dayanım kazanma zamanı	Zaman	28 gün	3 saat
Basınç Dayanımı	MPa	15–25	55–65
Çekem Dayanımı	MPa	3–4	5–7
Taşıma kapasitesi	%	17	3
Bükülme Dayanımı	MPa	6–9	10–15
Donma Direnci	%	50	300
Su Direnci	%	0,8	1,0
Yoğunluk	kg/m ³	2200	2400



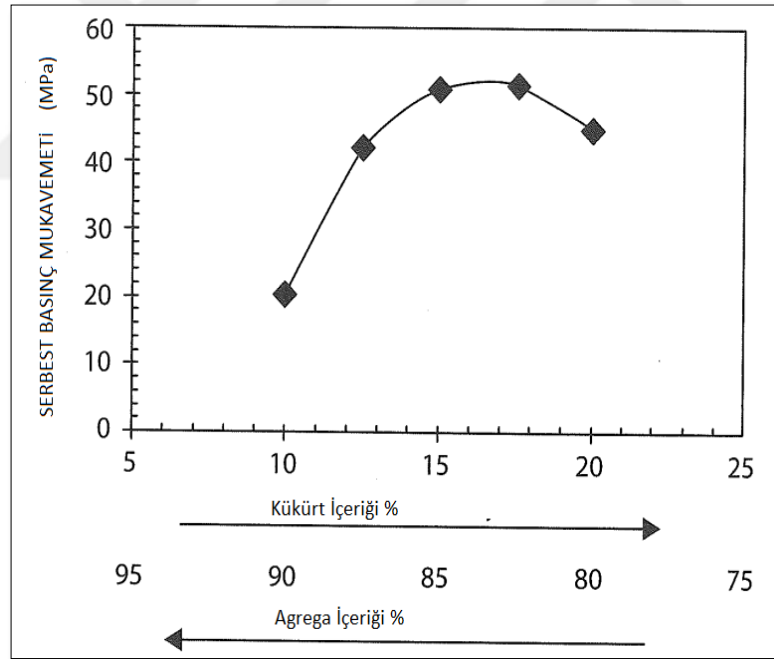
Şekil 2.8. Kükürt beton üretim süreci (Dobrosmyslov ve diğ., 2022)

Kükürt betonunun geleneksel betona göre avantajları olsa da bazı dezavantajlı olduğu durumlarda vardır. Dezavantajlarının en önemlisi kükürt betonun yapımında, kütürtün bağlayıcılık özelliğini kazanması için yüksek ısı kullanımına ihtiyaç vardır (ACI, 1998). Kükürt üretim aşamasında termoplastik malzeme olduğu için 119 °C ile 149 °C arasında

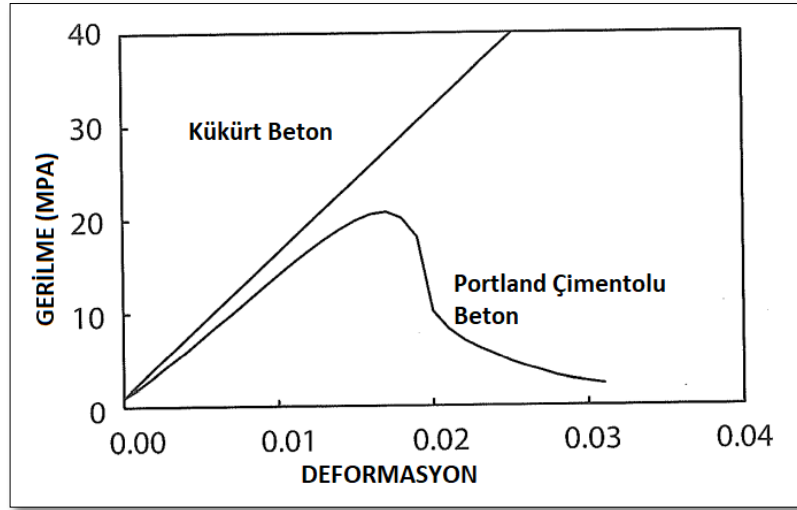
çalışılmalıdır (Mohamed ve El-Gamal 2010). Kükürt betonun diğer bir dezavantajı ise Türkiye’de ekonomik olarak daha maliyetli olmasıdır.

Kükürt betonların dayanımını belirlemekte agrega ve kükürt içeriği çok önemlidir. Kükürt betonlar için optimum kükürt miktarına kadar kükürt oranı arttıkça betonun dayanımı artmakta, kükürt miktarı optimum oranını geçtiği zaman ise dayanım azalmaktadır (Şekil 2.9).

Kükürt betonlarla geleneksel gerilme ve şekil değiştirme eğrilerini karşılaştırdığımızda kükürt betonlar geleneksel betona göre daha gevrek kırılmaktadır. Şekil 2.10’da görüleceği gibi maksimum dayanım sonrası kükürt betonlarda okuma alınamazken, geleneksel betonlarda şekil değiştirmeler sürmektedir (Mohammed ve El Gamal, 2010). Kükürt kullanılarak yüksek mukavemetli beton dayanımının yanında geçirgenliği düşük yapı elemanlarıda oluşturulur.

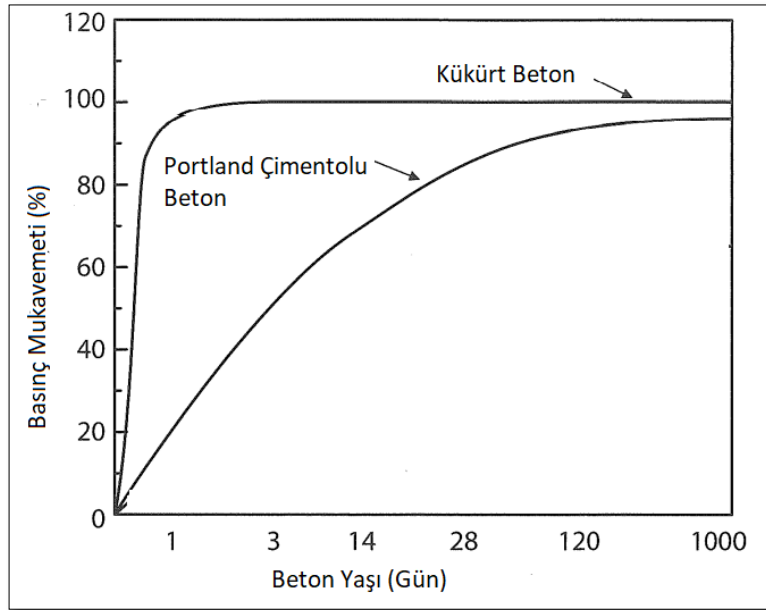


Şekil 2.9. Kükürt betonlarda kükürt içeriği ve gerilme ilişkisi (Mohamed ve El-Gamal, 2010)



Şekil 2.10. Geleneksel betonlar ve kükürt betonların tipik gerilme ve deformasyon eğrisi (Mohammed ve El Gamal, 2010)

Kükürt kullanılarak hazırlanmış betonların geleneksel betonlara göre en büyük avantajı priz süresini çok erken almaktadır. 1 saat gibi bir sürede prizini almaktadır. Bağlayıcı olarak saf kükürt kullanılan betonlar 3 günde dayanımını kazanmakta ve ilerleyen günlerde mukavemetinde sınırlı olarak azalma olmaktadır. Portland çimento ile hazırlanan betonlarda ise yeterli dayanımı 28 günde kazanmakta ve ilerleyen sürelerde mukavemeti artış göstermektedir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Kükürt beton ve geleneksel betonun kür süresi ile basınç mukavemeti ilişkisi (Mohamed ve El-Gamal, 2010)

Günümüzde modern inşaat endüstrisi için çimentosuz inşaat malzemelerinin geliştirilmesi çevresel etkiler ve atık yönetimi açısından oldukça önemli hale gelmiştir. Yan ürün olarak elde edilen kükürt inşaat mühendisliği alanında Portland çimentoya alternatif olarak kullanılabileceği araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir. Kükürt oranı işlenebilirlik, agrega tipi, modifiye edici katkı tipi ve sıcaklık kükürt betonlar üzerinde önemli parametrelerdir. Kükürtün çalışmada çimentoya alternatif olarak seçilmesi aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Petrol endüstrisinden yan ürünü olarak elde edilen İşletmelerin atık maddesi olan kükürtün inşaat malzemeleri üretiminde kullanımı, atık bertarafı ve çevrenin korunmasına sağladığı katkılar nedeniyle verimlidir,

- Kükürt bağlayıcı beton, özellikle oda sıcaklığında, herhangi bir özel sıcaklık ve nem gereksinimi olmadan birkaç saat içinde (3-6 saat) nihai dayanımına ulaşır.
- Kükürt esaslı beton, geleneksel Portland çimento ile hazırlanan betonlara göre güçlü asit etkilerine karşı daha dirençli olmasıdır.
- Kükürtün betonda kullanılmasıyla, çimento üretimini sırasında meydana çıkan CO₂ emisyonlarını azaltmak.

3. ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Günümüzde hızlı nüfus artışı ve kentleşme, taşıma gücü zayıf olan zeminlerin kullanılmasını da gerekli kılmıştır. İnşaat mühendisliğinde düşük dayanıma veya yüksek geçirimsizliğe sahip zeminler projede istenen özelliklere sahip olmayabilir. Düşük dayanıma ve yüksek geçirimsizliğe sahip zeminleri iyileştirmek gerekmektedir. Zemin iyileştirme yönteminde zeminin mukavemet parametrelerinin artırılması, permeabilitesinin düşürülmesi, iri daneli zeminlerde rölatif sıkılığın ve ince daneli zeminlerde kıvamın artırılmasını amaçlanır (Sağlam, 1985). Zemin stabilizasyonu inşaat mühendisliğinin gereksinimleri karşılamayı amaçlayan zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirme sürecidir. Zemin stabilizasyonu mekanik, termal ve kimyasal metotlarla yapılabilir. İyileştirme yöntemi, zemin sistemi, tasarım kullanım koşulları ve projenin tasarım ömrünü göz önüne alarak seçilmelidir. Zemin iyileştirme teknikleri amaç, taşıma gücünü arttırmak, zeminin rijitliğini artırarak sismik tehlikeleri azaltmak, sıvılaşmayı önlemek ve geçirimsizliği azaltmak olarak sayılabilir. Eğer projenin yapılacağı alanda zayıf ve taşıma gücü yetersiz zeminler varsa aşağıdaki alternatif yollar izlenebilir (Nicholson, 2015),

- Projeden vazgeçmek.
- Sahadaki zayıf zemini kazıyıp, istenilen özellikte zeminle yer değiştirmek
- Projeyi yeniden dizayn etmek.
- Sahadaki zemini, uygun zemin iyileştirme metodu ile iyileştirmek.

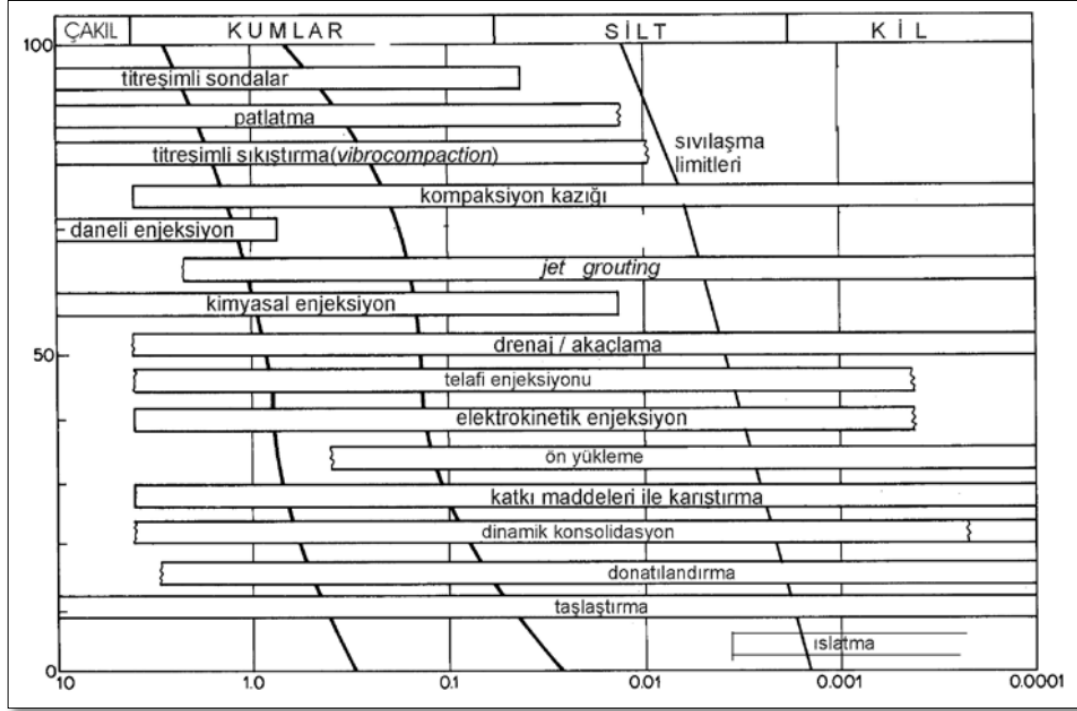
Zayıf zeminleri iyileştirmek için birçok iyileştirme metodu vardır. Zemin iyileştirme metodunu seçerken ekonomik ve çevresel etkilere dikkat etmek gerekmektedir.

Uygulanacak zemine iyileştirme metodunu seçerken zeminin dane boyutu önemli bir parametredir. Dane boyutuna göre hangi zemin iyileştirme metodu seçilebileceği Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Zemin iyileştirme yöntemini seçerken aşağıdaki durumlar göz önüne alınmalıdır (Sarsılmaz, 2017);

- Amacı
- Uygulanacağı zeminin cinsi

- Uygulanacağı derinlik
- Avantajları ve dezavantajları
- Maliyeti
- Sismik Performansı



Şekil 3.1 Dane boyutuna göre zemin iyileştirme metotları (Mitchell, 1988)

Zeminleri stabilize etmek için bir çok yöntem olmasına rağmen 4 ana kategoriye ayırırız. Bu yöntemler aşağıda listelenmiştir;

- Mekanik iyileştirme
- Hidrolik iyileştirme
- Mekanik ve kimyasal katkıların birlikte kullanıldığı iyileştirme
- Donatı kullanılarak iyileştirme

Mekanik İyileştirme: Mekanik iyileştirme, zeminin dışardan uygulanan yüklerle birlikte zeminin boşluklarının azalmasıyla beraber yoğunluğunu artırma tekniğidir. Mekanik iyileştirmede herhangi bir katkı malzemesi kullanılmaz. Zemine statik ve dinamik yükler etkiltilerek zeminin sıkışması amaçlanmaktadır. Mekanik iyileştirmede aşağıdaki yöntemler kullanılır;

- Dinamik kompaksiyon
- Vibro kompaksiyon
- Taş kolon
- Titreşimli, darbeli silindirler

Hidrolik İyileştirme: Hidrolik iyileştirmede temel amaç suyun zeminden uzaklaştırılmasıdır. Yeraltı su seviyesi yeryüzüne yakınsa zemin taşıma gücünü azaltmaktadır. Bu yüzden boşluk suyunu zeminden uzaklaştırmak gerekmektedir. Yeraltı su seviyesini çakıl ve kumlarda kuyular ve pompalar kullanılarak uzaklaştırabiliriz. Killi zemin gibi ince daneli zeminlerde ise dış yükler ve elektrik kuvvetlerin uzun süre uygulanmasıyla yer altı su seviyesini düşürebiliriz. Hidrolik iyileştirme için aşağıdaki yöntemler kullanılır;

- Kum dren
- Geosentetik dren
- Su kuyusu (Sumps)
- Wellpoint
- Drenajsız ön yükleme

Hidrolik iyileştirme (suyun uzaklaştırılması) aşağıdaki amaçlar için yapılır;

- Islak olmayan çalışma alanı sağlamak (bina temelleri, barajlar, tünellerde olduğu gibi)
- Şevlerin duraylılığını arttırmak.
- Deprem gibi hareketli yüklerden dolayı oluşacak sıvılaşma potansiyelini düşürmek.
- İstinat duvarlarında sudan kaynaklı oluşan gerilmeleri azaltmak.
- Daneli zeminlerin sıkıştırılabilirliğini arttırmak.
- Zeminlerdeki suyu bertaraf ederek, temellerin taşıma gücü kapasitesini arttırmak.
- Komşu malzemelerin çalışabilirlik karakteristiklerini iyileştirmek.
- Yukarı doğru boşluk suyu basıncı nedeni ile sıvılaşmanın önlenmesi.
- Yer altı suyunun sebep olduğu küçük parçacıkların hareketini kısıtlamak.

Fiziksel ve Kimyasal İyileştirme: Zeminlerin karıştırılmasıyla ya da katkı maddesi eklenerek iyileştirme amaçlanmaktadır. Katkı maddesi olarak; doğal zeminler, yan ürün olarak elde edilen endüstriyel malzemeler, çimento, kireç vb. bir çok karışım zeminle

reaksiyona girerek zemin özellikleri iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Zeminler ısıtılarak ya da dondurularak da iyileştirme yapılır. Zemine ısıtma işlemi uygulandığında zemindeki su buharlaşır ve taşıma gücü artar. Zemini dondurma işlemi uygulandığında zemin içindeki sular donar ve zemin daneleri ile bağ oluşturur. Fiziksel ve kimyasal iyileştirme için aşağıdaki yöntemler kullanılır;

- Enjeksiyon
- Stabilizasyon
- Derin Karıştırma

Karıştırma ya da katkı maddeleriyle zemin iyileştirilmesinde amaç aşağıda verildiği gibidir;

- Mukavemeti arttırmak
- Deforme olabilirliği azaltmak
- Hacim stabilitesini sağlamak
- Geçirimsizliği azaltmak
- Aşındırma (erodibility) özelliğini azaltmak
- Değişkenliği kontrol etmek

Donatı Kullanarak İyileştirme: Zeminde oluşan çekme gerilmelerine karşı koyabilen malzemeler kullanılarak zeminler iyileştirilir. Donatı olarak lif, şerit, çubuk ve ağ kullanılarak zeminin çekme dayanımı artırılır. Donatı kullanarak zemin iyileştirme hızlı, kolay, ekonomik ve efektiftir. Zemin iyileştirmesinde Donatı kullanarak aşağıdaki yöntemler kullanılır;

- Toprakarme İstinat Duvarı
- Donatılı Şevler
- Zemin Çivileri
- Geokompozit kullanımı
- Ankrajlar

3.1. Zemin Enjeksiyonu

Enjeksiyon, akışkan malzemelerin basınçlı ya da basınçsız olarak zeminlerin mühendislik özelliklerini veya davranışlarını iyileştirmek için zemine enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Zemindeki boşlukların ve çatlakların doldurulması 200 yılı aşkın bir süredir uygulanmakta olan eski bir yöntemdir. (ASCE, 2010; Karol, 2003; Weaver and Bruce, 2007).

Enjeksiyonun temel amacı, zemin içindeki boşlukları doldurmaktır. Enjeksiyon harcı doğal malzemedeki boşlukları, çatlakları ve yarıkları doldurmak için kullanılan herhangi bir malzemedir. Harç malzemesi düşük ve yüksek viskoziteye sahip olabilir (Karol,2003). Enjeksiyon uygulamaların hepsinde aynı enjeksiyon harcı ve parametreleri kullanılmaz. Kullanılan harç malzemesinin seçiminde; projenin gereklilikleri, zemin tipi, rölatif sıkılık, enjeksiyon basıncı, zaman gibi bir çok parametre göz önüne alınmalıdır (Tunçdemir, 2014).

Enjeksiyon hem kum hem de siltli zeminlerde etkilidir. Enjeksiyon harcının, zemini iyileştirmek için boşluklara nüfuz etmesi gerekmektedir. Kumlarda ve çakıllarda çoğu zaman su+çimento harcı kullanılır. Daha ince zeminlerde ise kimyasal harçlar kullanılır.

Geoteknik alanında enjeksiyon, farklı zemin iyileştirme yöntemlerini desteklemek amacı ile de kullanılabilir. Örneğin; derin kazılarda ve tünel kazılarında zemin hareketlerini sınırlandırmak gibi YASS hareketini denetlemek amacıyla da enjeksiyon uygulaması yapılabilir. Derin temel sistemlerinde ve zemin ankrajlarında taşıma gücünü artırmak, derin kazılarda zeminden gelen yanal yükleri güvenli bir şekilde karşılamak için uygulanır. Enjeksiyon yöntemi vibroflasyon, dinamik kompaksiyon gibi derin iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik ve uygulaması kolaydır (Warner, 2004).

Enjeksiyon uygulaması yapılmadan önce zemin etütlerinin yapıp zeminin özellikleri ve yapısı hakkında bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Enjeksiyon uygulayacak çalışanın tecrübeli olması enjeksiyonun başarılı olmasında önemli bir parametredir (Çinicioğlu, 1997).

Enjeksiyon harcının zemine enjekte edilmesi aşağıdaki amaçlar için yapılır (Yıldırım, 2004);

- a) Boşlukların doldurulması: Genelde enjeksiyon malzemesi olarak çimento kullanılır. Yüzeye yakın enjeksiyon işleminde düşük basınç ile uygulanır ve emdirme enjeksiyonu olarak adlandırılır. Yapı ile zemin arasındaki enjeksiyonu ise kontak enjeksiyonu denir.
- b) Suyun kesilmesi: Derin kazılar yapılırken sızıntı ve akıntının azaltılması ve baraj temellerinde sızdırmazlık perdesi oluşturması için yapılır. Çimento su ile tepkimeye gireceği için, enjeksiyon kimyasal malzeme ile yapılır.
- c) Oturmaların azaltılıp mukavemetin artırılması: Kimyasal veya çimento enjeksiyonu ile mukavemet artışı ve oturmaların azaltılması sağlanabilir.

3.2. Enjeksiyon Uygulama Alanları

Enjeksiyon zemin iyileştirmede en yaygın kullanılan yöntemlerde biri olduğu için uygulama alanı da oldukça geniştir. Enjeksiyon uygulama alanları aşağıda listelenmiştir;

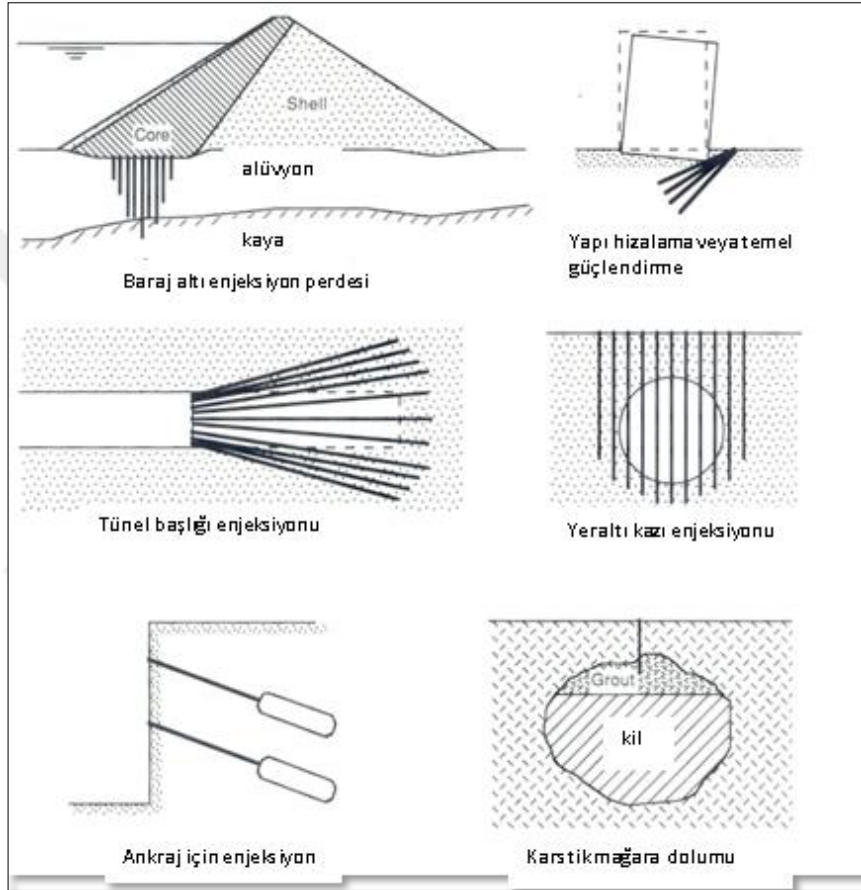
- Zeminlerin oturmasını kısıtlamak için zemin boşlukların doldurmak.
- Ön germeli ankrajları sabitlemek.
- Zararlı sıvı sızıntılarını önlemek
- Baraj temellerinde sızdırmazlık perdesi oluşturmak
- Tünel kazılarında, güvenlik için gevşek zeminlerin stabilizasyonunda kullanmak.
- Mevcut ya da yeni inşa edilecek yapıların zemin emniyet gerilmesini arttırmak.
- Deprem gibi titreşim oluşturacak hareketli yüklere maruz kalan sıvılaştırılabilir daneli zeminleri sıvılaştırma potansiyelini azaltmak.
- Derin kazılarda çevredeki yapıların güvenliğini sağlamak.

3.3. Enjeksiyon Çeşitleri

3.3.1. Emdirme (Permeasyon) Enjeksiyonu

Emdirme enjeksiyonu geoteknik mühendisliğinde en yaygın kullanılan enjeksiyon yöntemlerindendir. Emdirme enjeksiyonunun başarı olmasında gradasyon, zemin tipi, zemindeki ince dane oranı ve enjeksiyon basıncı önemli parametrelerdir. Zeminlerin geçirgenliği azaltmak ve mekanik özelliklerinin arttırmak için uygulanır. Emdirme enjeksiyonunda amaç zeminin formasyonunda herhangi bir değişiklik olmadan boşlukları

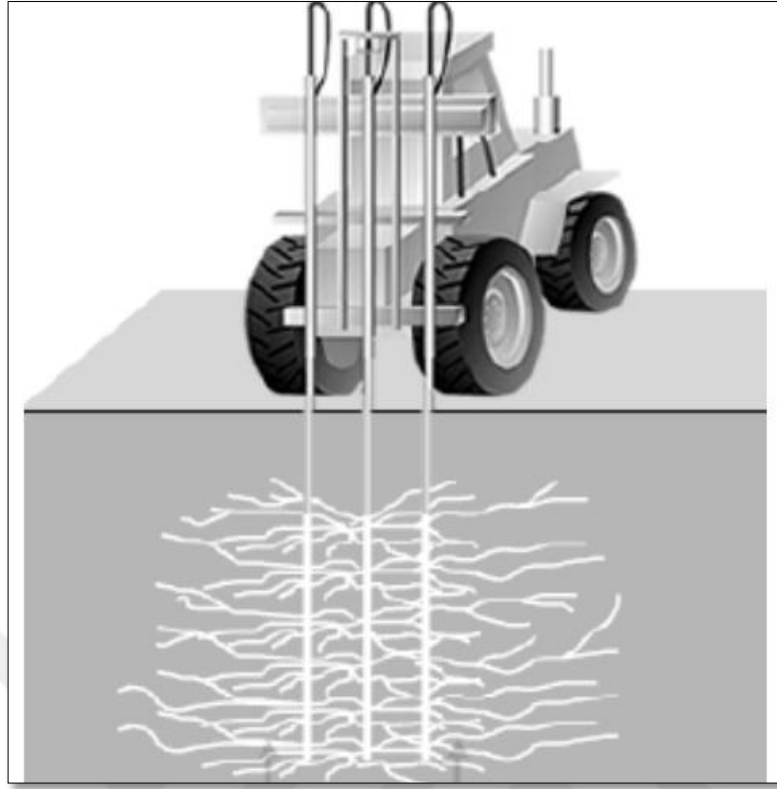
doldurmaktır. Enjeksiyonun matematik olarak modellenenebilir (Bozkurt ve Toktemir, 2020). Enjeksiyonda kullanılan harçlar daneli ya da süspansiyon şeklinde olabilir. Portland çimento veya diğer çimentolar, killeri, çimento-kil karışımları parçacıklı enjeksiyon malzemeleridir. Geçirgenliğin düşük olduğu zeminlerde kimyasal harçlar kullanılır. En yaygın kullanılan kimyasal harç sodyum silikattır. Emdirme enjeksiyonu şematik olarak Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tipik enjeksiyon uygulamaları, (U.S.Army,1984)

Emdirme enjeksiyonunda harcın boşluklara enjekte edilmesi aşağıdaki parametrelere bağlıdır;

- Zeminin boşluk oranı
- Zemin dane büyüklüğü
- Harcın viskozitesi
- Enjeksiyon basıncı
- Zeminin geçirimsizliği



Şekil 3.3. Emdirme enjeksiyonu (Gallavresi, 1992)

Parçacıklı harçlarla yapılan enjeksiyon, harcın dane boyutu ile zeminin dane boyutuna bağlıdır (Akbulut ve Sağlamer, 2002). Enjeksiyonda kullanılacak harçlar için literatürde araştırmacılar bir çok bağıntı önermiştir. Burwell (1958) yaptığı çalışmada zeminin enjekte edilebilirliği için Denklem (3.1)'i önermiştir. Bağıntıdaki N katsayısı 25'ten büyük ise enjeksiyon yapılabilir, eğer N sayısı 11'den daha küçük çıkıyorsa enjeksiyon uygulamasının olamayacağını belirtmiştir.

$$N = \frac{D_{15(\text{zemin})}}{d_{85(\text{harç})}} \quad (3.1)$$

İncecik ve Ceren (1995) zeminde kullanılabilecek harçlar için ve zeminin enjeksiyon edilebilirliği için Denklem (3.2) önermişlerdir. Bağıntıdan elde edilen N sayısı 10'dan büyük ise zemine enjeksiyon yapılabileceğini belirtmişlerdir.

$$N = \frac{D_{10(\text{zemin})}}{d_{90(\text{harç})}} \quad (3.2)$$

Akbulut ve Sağlamer (2002) yaptıkları çalışmada Denklem (3.3)'ü önermişlerdir. Araştırmacılar Denklem (3.3)'ü kullanarak N katsayısı bulmuşlardır. Eğer N katsayısı 28'den büyük ise zemine enjeksiyon harcı enjekte edilebilir, küçük olması durumunda ise yeterli enjeksiyon edilemez olarak belirtmişlerdir.

$$N = \frac{D_{10(zemin)}}{d_{90(harç)}} + 0,5 \cdot \frac{s/c}{FC} + 0,01 \cdot \frac{P}{D_r} \quad (3.3)$$

Burada;

$D_{10(zemin)}$ = Zemin gradasyonunda %10 geçene karşılık gelen dane çapı,

d_{90} = Enjeksiyon harcının gradasyonunda %90 geçene karşılık gelen dane çapı,

$s/ç$ = Enjeksiyon harcının su/çimento oranı,

FC = İnce dane oranı,

P = Enjeksiyon basıncı,

D_r = Zemin rölatif sıkılığı,

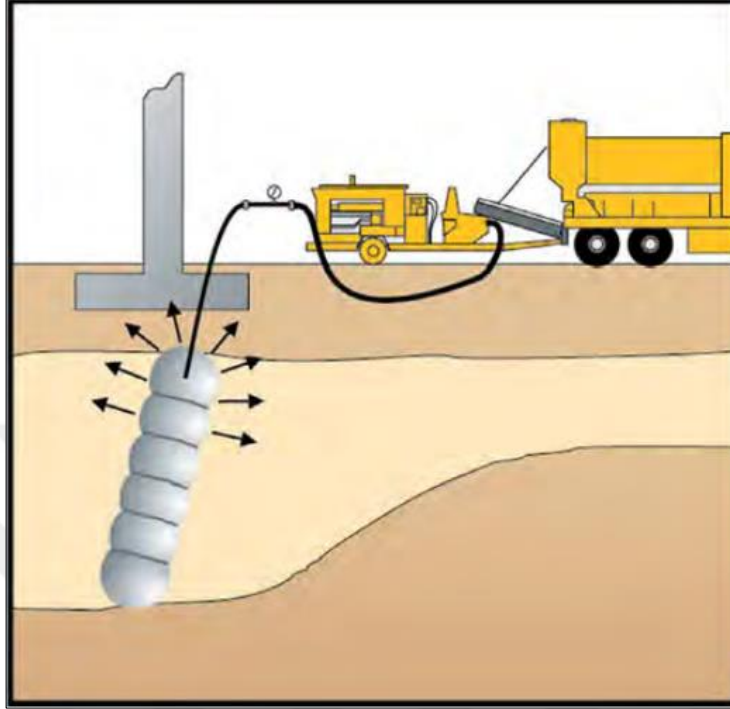
$k_1 = 0,5$,

$k_2 = 0,01$ sabit değerlerdir.

3.3.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu

Kompaksiyon enjeksiyonu, zemini sıkıştırmak için yüksek basınç altında zemine yüksek viskoziteli harç enjekte edilerek uygulanır. Enjeksiyon harcı yüksek viskozitesi nedeniyle zeminde homojen bir kütle olarak kalır ve zemin gözeneklerine nüfuz etmez (Şekil 3.4). Karışımın hacmi arttıkça çevresindeki zemini sıkıştırır (Andrus ve Chung, 1995). Sıkılaştırılmış zeminin boşluk oranı azalır, böylece permeabilitesi düşer ve zeminin kayma mukavemeti parametreleri artar. Granüler zeminlerde özellikle kompaksiyon enjeksiyonu sıvılaşma potansiyelini düşürür (Boulanger ve Hayden). Bu yöntem aşırı oturma problemi olan zeminin iyileştirilmesinde, farklı oturma problemi olan mevcut yapıların rehabilitasyonunda, gevşek zeminleri sıkıştırılarak geçirimsizliğinin azaltılmasında kullanılmaktadır. Kompaksiyon enjeksiyonu tüm zeminlere uygulanabilmektedir. Kompaksiyon enjeksiyonu, uygulama derinliği 2m ile 4m aralığında uygulanmaktadır. (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Bu yöntem tercihen sıvılaşan zeminlerde kullanılır. Kompaksiyon yöntemi % 40'a kadar silt içeriğine sahip kum içeren zeminlerde

kullanılır. Kompaksiyon yönteminde su/çimento oranı 1 veya daha az olan çimento karışımları kullanılır.

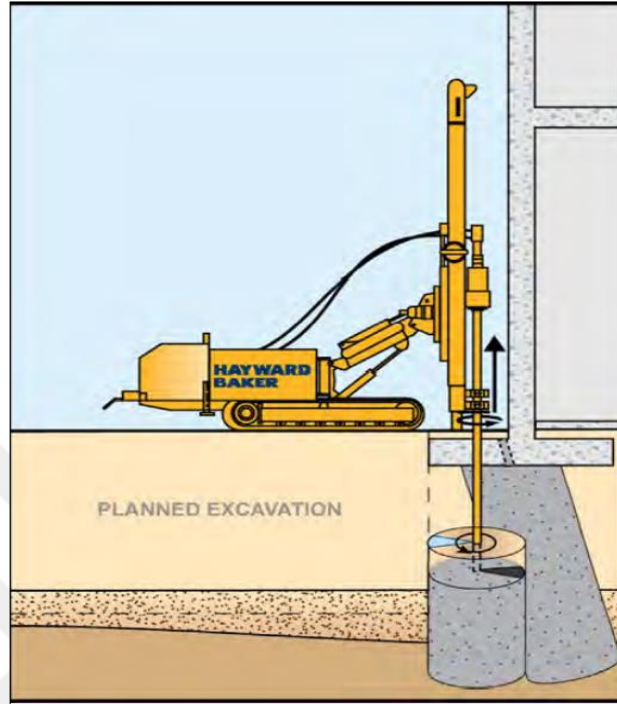


Şekil 3.4. Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik olarak gösterimi (URL-1)

3.3.3. Jet Enjeksiyonu

Jet enjeksiyon yöntemi, zemine bir veya birden fazla sıvının (çimento harcı, hava, su) yüksek basınç altında enjekte edilmesiyle uygulanır. Püskürtme sıvısı, yüzeyden uygulama derinliğine indirildiği çelik boru üzerindeki küçük çaplı nozul vasıtasıyla zemine enjekte edilir. En sık kullanılan enjeksiyon türüdür. Uygulaması zemini parçalayarak veya keserek yapılır (Erol ve Çekinmez, 2018). Jet enjeksiyonu, diğer enjeksiyon yöntemlerine nazaran farklı zeminlerde kolayca uygulanabilir. Jet enjeksiyonu proje aşamasında elde edilecek değerler tahmin edilebilir. Uygulamadan önce 1 ile 1,5 metre arasında enjeksiyon kuyusu açılır daha sonra yüksek basınçlarla Şekil 3.5’de görüldüğü gibi zemine uygulanır. Jet grout gerek kil, silt, kum, çakıl, alüvyon zemin gibi çok çeşitli zeminlere enjekte edilebilir olması, gerekse kullanım alanlarının fazlalığı bakımından son yıllarda öne çıkan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Derin temeller, istinat duvarları, batardolar, şev stabilitesi, zemin ankrajları, tüneller, geniş

sahalarda zemin iyileştirmesi ve yapıların temel güçlendirmesi olarak özetlenebilir (Melegari vd., 1997).

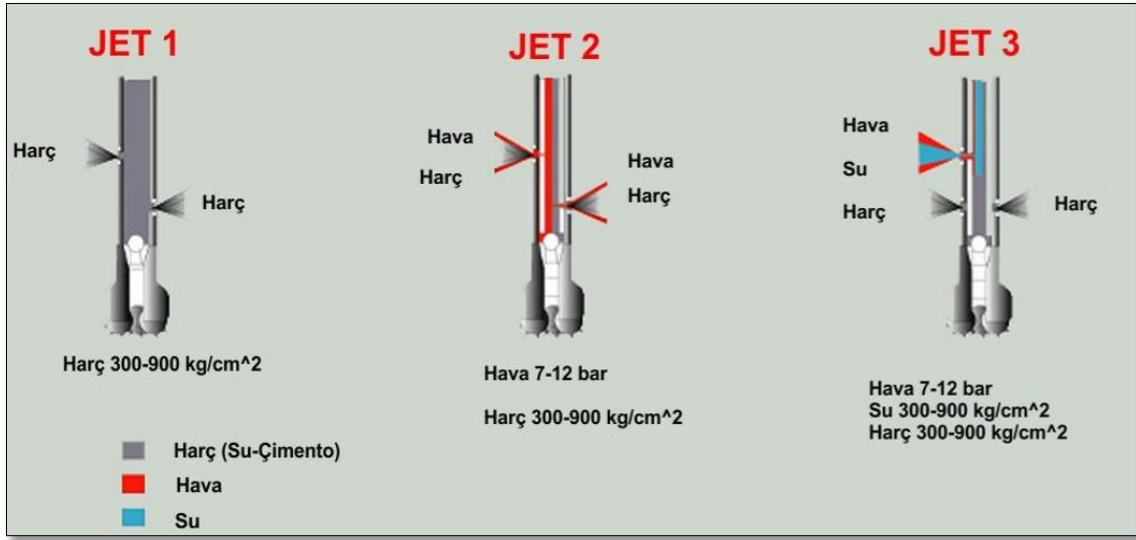


Şekil 3.5. Jet Grout yönteminin şematik olarak gösterilmesi (URL-1)

Jet enjeksiyonun uygulanması, zemin ile enjeksiyon şerbeti birleşerek, kolon oluşturularak yapılır. Jet enjeksiyonu kolonu 3 yöntem ile uygulanır. Jet 1 yönteminde su+çimento birlikte aynı nozulden zemine enjekte edilir. Jet 2 yönteminde su+çimento ve hava iki farklı nozulden zemine uygulanır. Jet 3 yönteminde ise hava ve su aynı nozulden, çimento+su ise farklı nozulden zemine enjekte edilir. En yaygın kullanılan yöntem Jet 1 yöntemidir. Aşağıdaki Şekil 3.6’da jet yöntemleri şematik olarak gösterilmiştir.

3.3.4. Çatlatma Enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonundaki amaç, düşük viskoziteli enjeksiyon harcının zemine yüksek basınç ile verilerek zeminin çatlatılması işlemidir. Genellikle geçirimsizliği düşük olan emdirme (permeasyon) enjeksiyonunun yeterli uygulanamadığı zeminlerde uygulanır. Çatlatma enjeksiyonunun gelişimi tünel ve kazılar esnasında meydana gelebilecek oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır. Çatlatma enjeksiyonun amaçları zeminin sıkıştırılması ve boşlukları enjeksiyon malzemesi ile doldurarak permeabiliteyi düşürmektir.



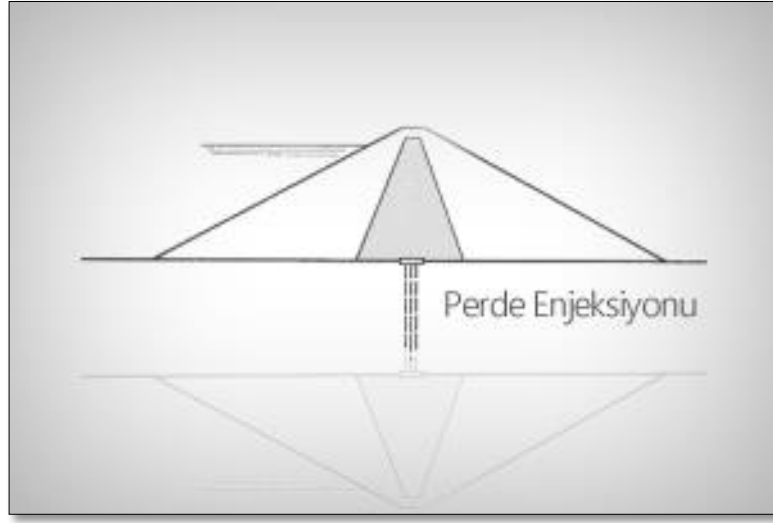
Şekil 3.6. Jet tiplerinin şematik olarak gösterimi (URL-2)



Şekil 3.7. Çatlatma enjeksiyonunun şematik gösterimi (Mutman, 2007)

3.3.5. Perde Enjeksiyonu

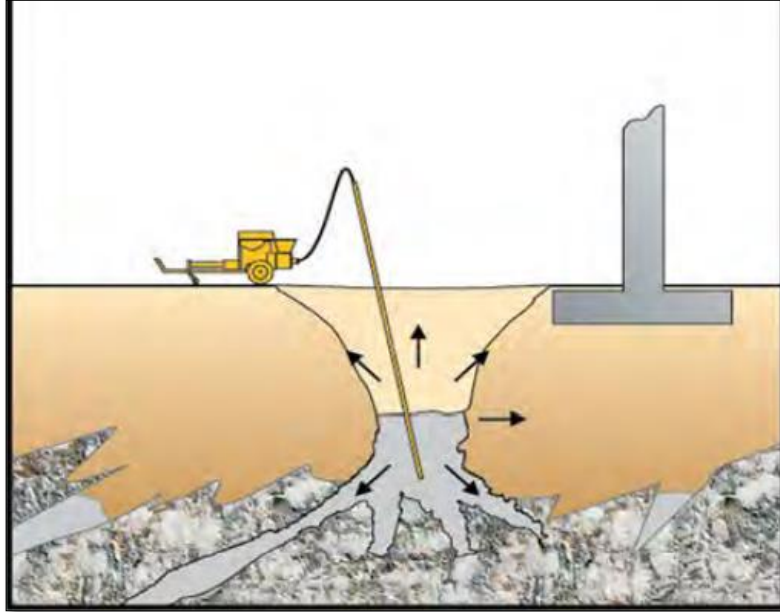
Perde enjeksiyonu yer altı suyu sızma yolunun uzatılması ve geçirimsizliği en aza indirmek için yapılır (Şekil 3.8). Barajlar, tüneller, su depoları vb. yapılarda kullanılır.



Şekil 3.8. Perde enjeksiyonunu şematik gösterimi (URL-3)

3.2.6 Kaya Enjeksiyonu

Kaya enjeksiyonunda uygulanırken ortamın geçirimsizliğini sağlamak ve rijitliğini arttırmak amaçlanmaktadır. Kaya enjeksiyonu, kaya içerisinde bulunan çatlakların, yeni çatlaklar oluşmasını engelleyecek bir şekilde enjeksiyon harcıyla doldurulma işlemidir (Şekil 3.9).

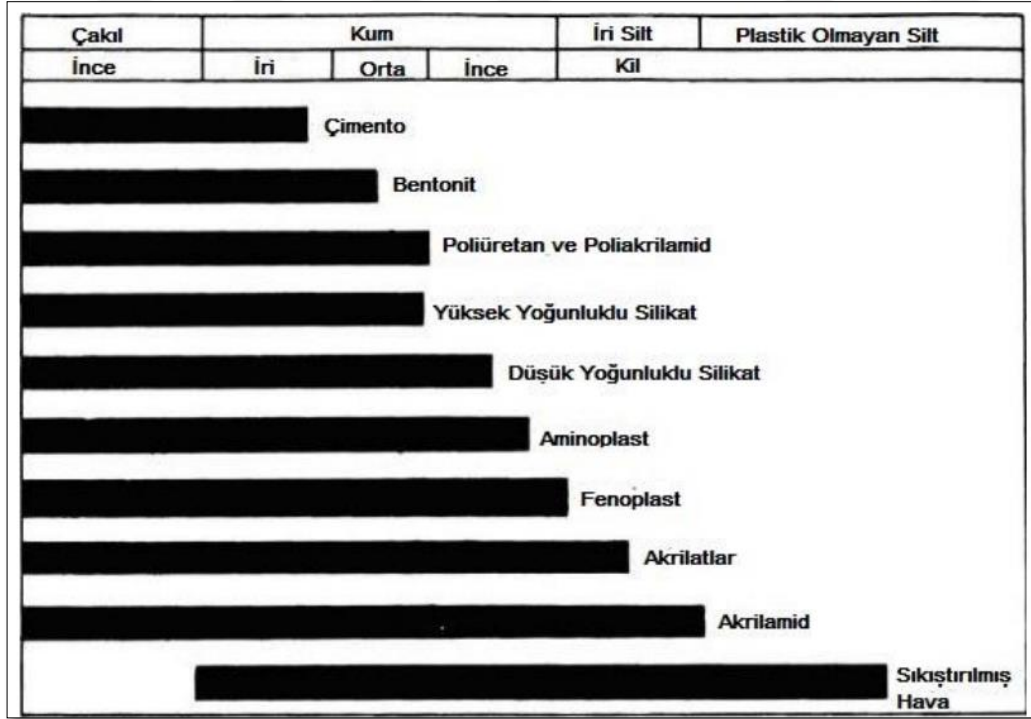


Şekil 3.9. Kaya enjeksiyonunun şematik olarak gösterimi (URL-1)

3.4. Enjeksiyon Harçları

Enjekte edilecek uygun harcı seçmek enjekte edilecek zeminin özelliklerine bağlıdır. Enjeksiyon harçları süspansiyon ve çözelti tipi olarak iki sınıfa ayrılır. (Kazemian vd., 2010). Süspansiyon tipi harçlar arasında toprak, çimento, kireç, asfalt, emülsiyon vb. bulunurken, çözelti tipi enjeksiyonlar arasında sodyum silikatlar, akrilamid, lignosülfonatlar, aminoplast, fenoplast, vb. gibi çok çeşitli kimyasallar bulunur. Enjeksiyon harcı seçiminde, zeminin dane boyutu oldukça önemli bir parametredir. Zeminin dane boyutuna göre farklı enjeksiyon harçları uygulanmaktadır (Shroff, 2009).

Zemin enjeksiyon işleminde enjeksiyon harcının seçilmesinde harcın; viskozitesi, dane boyutu ve mukavemeti önemli parametrelerdir. Enjeksiyon harcının seçilmesi enjeksiyon uygulamasının amacına yönelik olmalıdır. Örneğin; perde enjeksiyonunda mukavemet önemli değilken kullanılan enjeksiyon harcının geçirimsizliği çok önemlidir. Özellikle emdirmeye enjeksiyonlarında harcın dane boyutu, zemin içerisinde rahatça sızabilmesi için zeminin dane boyutundan küçük olmalıdır. Kompaksiyon enjeksiyonunda ise bu durum tam tersidir.



Şekil 3.10. Zemin dane boyutlarına göre önerilen enjeksiyon malzemeleri (Karol, 2003)

3.4.1. Çimento harçları

Dünyada en yaygın kullanılan enjeksiyon harcı çimento harcıdır. En çok tercih edilen çimento çeşidi ise Portland çimentodur. Çimento sızıntıyı orta düzeyde kontrol edebildiği için enjeksiyon uygulamaları sınırlıdır. Çimento ayrıca ince daneli zeminlerde düşük penetrasyona sahiptir (Saleh vd., 2019). Daha küçük dane boyutlu zeminler için ince daneli çimentolar enjeksiyon malzemesi olarak kullanılabilirler. Çimento ve su karıştırılarak süspansiyon haline getirilip zemine enjekte edilir. Yaygın olarak kullanılan su/çimento oranı 0,5-4 aralığıdır. Düşük w/ç oranında harç daha üniform olmakta fakat yüksek viskoziteden dolayı enjekte edilmesi zorlaşmaktadır. Su/çimento oranı arttıkça viskozite düşmekte fakat dayanım azalmaktadır. Bu yüzen araştırmacılar su/çimento oranını değiştirmeden vizkositeyi azaltmak için karışımlara akışkanlaştırıcılar katmaktadırlar (Mutman, 2007).

Çimento, kireç, uçucu kül ve bitüm bu tür enjeksiyonlarda kullanılan geleneksel maddelerdir. Sementasyon harcı su ile karıştırıldığında, kalsiyum hidroksit ile silisli veya alüvyonlu malzeme arasında, kalsiyum silika hidrat veya kalsiyum silika alüminat hidrattan oluşan bir çimentolama bileşiği oluşturmak üzere puzolanik reaksiyon adı verilen kimyasal bir reaksiyon meydana gelir.

Çimentonun ince taneli zeminlere nüfuz etme kabiliyeti düşüktür ve inşaat hızının hayati öneme sahip olduğu bir durumda istenmeyen bir kürlenme süresi gerektirir. Çimento aynı zamanda yüksek yoğunluğa sahiptir ve bu da harç malzemesi olarak kullanıldığında ekstra ağırlık katacaktır. Bu nedenle, çimento ile ilgili bu kusurlar nedeniyle, araştırmacılar başka alternatif derz dolgu malzemeleri aramaya devam etmektedir (Saleh vd., 2019).

3.4.2. Kimyasal Harçlar

Kimyasal enjeksiyon, zemin tanecikleri arasındaki 10 mm ile 15 mm arasındaki boşlukları doldurmak için çözelti halinde toprağa enjekte edilir. Kimyasal enjeksiyon işi, bir jel oluşturmak için sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile kalsiyum klorür, organik esterler, sodyum alüminat ve bikarbonat gibi reaktiflerin kombinasyonuna dayanır. Dozajın ve reaktif türlerinin değiştirilmesi enjeksiyon jelleşme sürecini, enjeksiyonun mukavemetini

ve viskoziteyi kontrol eder. Kimyasal harçlar, çimento harçlarına göre enjeksiyon kabiliyeti yüksek olmasına rağmen daha pahalıdırlar. Kimyasal harç örnekleri arasında Sodyum silikat, silikat klorit, akrilamid, N-Metilolakrilamid, poliüretanlar, epoksi reçine, aminoplast, fenoplast ve lignosülfonat yer alır. Tablo 3.1’de yaygın olarak kullanılan enjeksiyon harçların avantajları ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 3.1. Yaygın olarak kullanılan kimyasal harçların avantajları ve dezavantajları (Kazemian ve diğ, 2010)

Harçlar	Avantajları	Dezavantajları
Sodyum silikad	Çevre dostu	
Poliüretan	Düşük viskozite ve termal iletkenlik, hafif, mükemmel geçirgenlik ve mekanik performans	
Akrilamid	Yüksek mukavemet ve kısa sürede jelleşme, düşük viskozite	Çok toksit bir malzeme, içme suyu uygulaması için uygun değil, asidik koşullara karşı düşük direnç zehirli ve aşındırıcı, sıcak ve asidik koşullarda işlenmesi zor Yüksek derecede toksit, PH 6'dan büyük gerektirir
Aminoplast	Asidik koşullar altında iyi, iyi mukavemet	
Epoksi reçine	Yüksek çekme ve basınç dayanımı, düşük viskozite	
Lignosülfonatlar	Toksik değildir (sodyum dikromat katkısı hariç), düşük viskozite (3–8 cPs)	
Fenoplast	Düşük viskoziteli	Son derece zehirli

3.5. Enjeksiyon Basıncı

Zemin enjeksiyonunda önemli parametrelerden biride enjeksiyon basıncıdır. Enjeksiyon basıncı arttıkça genelde enjeksiyon malzemesinin zeminde ilerlemesi artmaktadır. Enjeksiyon uygulanacağı basıncı ayarlarken, enjeksiyon tipi, zemin tipi ve enjeksiyon malzemesi önemli parametrelerdir. Zeminin yapısı bozulmadan yapılacak enjeksiyon uygulamalarda düşük basınç, zeminin yapısı bozularak yapılacak enjeksiyonlarda yüksek basınç uygulanmalıdır.



4. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Enjeksiyon yöntemi zemin iyileştirme için kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Enjeksiyon yönteminde yapılan literatür çalışmalarında daha çok bağlayıcı olarak geleneksel Portland çimentosu kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak kükürtün zemin stabilizasyonunda kullanıldığı çalışmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Fakat zemin enjeksiyonu yönteminde kükürt kullanıldığı çalışmalar literatür araştırmasında görülmemiştir. Zemin enjeksiyonu ve kükürtün zemin stabilizasyonunda kullanılması ile alakalı literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

İncecik ve Ceren (1995), yaptıkları çalışmada hazırladıkları çimento şerbetlerine bentonit ve akışkanlaştırıcılar katarak deney numuneleri hazırlamışlardır. Deney numuneleri 15 cm çap ile 30 cm yüksekliğinde hazırlanan kalıplarda hazırlamışlardır. Rölatif sıklığı %50 olacak şekilde hazırlanan numunelere 100 kPa enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon işlemi yapmışlardır. Enjeksiyon uygulanmış numuneler 7 ve 28 gün kür ortamında bekletildikten sonra serbest basınç deneyi uygulamışlardır. Hazırlanan bu numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve değişen su/çimento oranının basınç dayanımına ve viskoziteye olan etkisi incelenmiştir. En yüksek basınç dayanımı akışkanlaştırıcı kattıkları enjeksiyonlarda en düşük basınç dayanımını ise %4 bentonit kattıkları numunelerde elde etmişlerdir. Su çimento oranı düştükçe numunelerin serbest basınç dayanımlarının arttığını belirtmişlerdir.

Mutman (2007), kötü derecelendirilmiş kum (SP) ve kötü derecelendirilmiş çakıl (GP) zeminlere laboratuvar ortamında düşük basınçlı çimento enjeksiyonu uygulamıştır. GP ve SP numuneler %25, %50, %75 ve %100 rölatif sıklıkta hazırlayıp çimento enjekte etmiştir. Daha sonra çimento enjekte edilen numuneler 7 ve 28 gün kür süresi sonunda serbest basınç deneyi yapmıştır. 1,5, 1 ve 0,7 su-çimento oranı ile hazırlanan enjeksiyon harçları zemin numunelerine enjekte etmiştir ve serbest basınç mukavemetine etkilerini incelemiştir. En yüksek serbest basınç mukavemetini su-çimento oranı 0,7 olan karışımın enjekte edildiği numunelerde elde etmiştir. Numunelere 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa farklı enjeksiyon basınçları uygulamıştır. Enjeksiyon basıncının serbest basınç mukavemetini etki eden önemli bir parametre olmadığını belirtmiştir.

Akbulut (1999), granüler zeminlere çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento-kil harçları enjekte etmiştir. %30 ve %80 rölatif sıklıkta numuneler hazırlayıp enjeksiyon işlemini gerçekleştirmiştir. Rölatif sıklık, zaman ve harç katkı oranları ile geçirgenlik ve serbest basınç dayanımına olan etkilerini incelemiştir. Silika dumanı ile hazırlanan numunelerde basınç dayanımının arttığını ancak geçirgenliğin azaldığını belirtmiştir. Uçucu kül ile yapılan enjeksiyonda basınç dayanımının bir miktar azaldığını, kil eklenen numunelerde geçirgenliğin arttığını ve basınç dayanımının azaldığını göstermiştir.

Öztürk (2009) da yaptığı çalışmada, petrol endüstrisinden elde edilen atık kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt polimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerini incelenmiştir. Portland çimento ve kükürtle hazırlanan beton numunelerde karşılaştırma yapmıştır. Kükürtle hazırlanan beton numunelerin erken dayanımı ve donma çözölmeye karşı direncini daha yüksek bulmuştur.

Yıldız ve Soğancı (2015) yaptıkları çalışmada granüler pomza zeminlerin mukavemetini arttırmak için çimento enjeksiyonu uygulamışlardır. %35, 65 ve %85 rölatif sıklıkta hazırlanan pomza numuneler hazırlamışlardır. Bu hazırlanan numunelere 100 kPa enjeksiyon basıncı ve su/çimento oranı 1 olacak şekilde harç enjekte edilmiştir. Çimento enjekte edilen numuneler 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiştir. Pomza zeminler en yüksek maksimum dayanımı %35 rölatif sıklıkla hazırlanan zeminlerde en düşük dayanımı ise %85 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerde elde etmişlerdir. 28 günlük kür süresi sonunda %85 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerin C8 beton sınıfına eşdeğer dayanıma sahip olup, %35 rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler ise C12 beton sınıfı dayanıma eş değer olduğunu belirtmişlerdir.

Maatiah (2012) şişme potansiyeli olan yol altında kalan zeminlerin iyileştirilmesi için kireç ve sodyum silikat gibi kimyasal malzemeler kullanmıştır. Kireç ve sodyum silikat birlikte zemine katılmıştır. Sodyum silikat ve kireci farklı oranlarda zemine katarak zemin mukavemet parametreleri arasındaki ilişki incelemiştir. Sodyum silikat için başlangıçtaki kireç tüketimi %2 ve %4 olması gerektiğini belirtmiş ve reaksiyon süresinin mukavemet üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermiştir. Reaksiyon süresi arttıkça zeminin mukavemetinin arttığını göstermiştir.

Consoli ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada zemine çimento katarak zeminin çimento miktarındaki artışla doğrusal olarak serbest basınç dayanımının arttığını gözlemlemişler. Zeminlere çimento kattıkça zeminin sıkışabilirliğinin arttığını ve bu yüzden kuru birim hacim ağırlığının arttığını gözlemlemişler. Zeminin sıkışabilirliği arttığı için zemindeki boşluk oranının azaldığı bundan dolayı serbest basınç dayanımının arttığını gözlemlemişler.

Mollamahmutoğlu ve Yılmaz 2011'de yaptıkları çalışmada emdirme enjeksiyonunda, farklı enjeksiyon harcı kullanmış olup, Portland çimentosunun ince ve orta kumlar için uygun olmadığını belirtmişler. Bu yüzden orta ve ince kumlarda granülometrisi dar olan ve dane çapı daha küçük olan malzemeye ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir.

Şişman (2021) yaptığı çalışmada sade jips, kumla karıştırılmış jips ve çakılla karıştırılmış jipslere enjeksiyon uygulaması yapmıştır. Enjeksiyon uygulamasında CEM-I 42.5 R Normal Portland Çimentosu ve MasterRoc MP650 Mikro Çimento iki farklı çimento kullanmıştır. %30 ve % 70 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelere 2 farklı su/çimento oranında hazırlanan şerbet enjekte etmişler. Hazırlanan numuneler üzerine permeabilite deneyleri ve serbest basınç deneyleri yapmıştır. Serbest basınç deneyleri sonunda Mp650 çimento ile hazırlanmış numunelerin dayanımları Portland çimentoya ile hazırlanmış numunelere göre daha fazla bulmuştur. Geçirimlilik deneylerinde ise Portland Çimentosu ve Mikro Çimento ile yapılan enjeksiyonlarda, enjeksiyon yapılmayan numunelere göre sırasıyla 27 kat ve 363 kat daha az su geçirimliliğine sahip olduğunu belirtmiştir.

Huang (2001)'de lif ve süper akışkanlaştırıcı kullanarak çimento ve uçucu kül harçlarının özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, düşük oranda olan radyoaktif atıkların izolasyonu için çimento ve uçucu kül harçlarına lif ve süper akışkanlaştırıcı katmıştır. Daha sonra hazırlanan numunelere viskozite, kür süresi, basınç deneyi gibi laboratuvar deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda, liflerin çatlamaya daha dayanıklı ve daha yüksek viskozite ve geçirgenlik gösterdiğini gözlemlemiştir.

İnal (2015), kötü derecelendirilmiş çakıl (GP) sınıfına ait kırmataş ve dere kumuna laboratuvar ortamında düşük basınçlı çimento enjeksiyonu uygulamıştır. GP numuneler %40, %60, ve %80 rölatif sıklıkta hazırlayıp çimento enjekte etmiştir. Daha sonra çimento enjekte edilen numuneler 7 ve 28 gün kür süresi sonunda serbest basınç deneyi

yapmıştır. 1,5, 1 ve 0,8 su-çimento oranı ile hazırlanan enjeksiyon harçları zemin numunelerine enjekte etmiştir ve serbest basınç mukavemetine etkilerini incelemiştir. Ayrıca kayma ve basınç dalga hızları kullanılarak elastisite modülleri hesaplanmıştır. Dere kumu olan numunelerde en yüksek serbest basınç mukavemetini rölatif sıkılığı %80 ve su/çimento oranı 0,8 olan enjekte edildiği numunelerde elde etmiştir. Kırmataş kullanılarak elde edilen numunelerde ise maksimum serbest basınç mukavemeti değerini rölatif sıkılığı %60 ve su/çimento oranı 0,8 olan numunelerde elde etmiştir. Kırmataş numunelerin serbest basınç mukavemetini dere kumu numunelerden daha fazla bulmuştur. Enjeksiyon numunelerinde, rölatif sıkılığın artması ve su/çimento oranının azalması ile hesaplanan elastisite modül değerleri artmıştır. Her iki zemin türünden üretilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımları ve elastisite modülleri arasında lineer bir ilişki olduğu belirlemiştir.

Sheng-Lung ve diğ. (1995) yaptıkları çalışmada kirlenmiş zeminleri stabilize etmek için bağlayıcı olarak kükürt polimer çimento (KPÇ) kullanmışlardır. Asit ve tuzlu ortamlara karşı mükemmel dayanımı ve Portland çimentoya kıyasla üstün su geçirimsizliği olan KPÇ kullanmışlardır. KPÇ tek başına yeterli geçirimsizliği sağlamadığı için sodyum sülfür ve sodyum sülfid gibi katkı malzemeleri ekleyerek zeminin geçirimsizliğini 77,8 mg Pb/l'den 1,28 mg Pb/l'ye düşürmüşlerdir.

Mohammadi ve diğ, (2014) yaptıkları çalışmada kumlu zeminlerin stabilizasyonunu arttırmak için katkı malzemesi olarak modifiye kükürt kullanmışlardır. Zeminin geoteknik özelliklerini yapılan kesme kutusu deneyi ve serbest basınç deneyleri ile araştırmışlardır. Zemine katılan kükürt miktarı ve numunelerin kür süresine bağlı olarak zeminin mekanik özelliklerinin doğrusal olarak arttığını göstermişlerdir. Elde edilen bulgularda modifiye edilmiş kükürtün zemine katılarak zeminin fiziksel özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Mohamed ve Gamal (2012) yaptıkları çalışmada zayıf zeminleri iyileştirmek için zeminin mikro yapısı, fiziksel, kimyasal ve termal özellikleri göz önüne alarak kükürt çimentosu geliştirmişlerdir. Modifiye kükürt kullanılarak hazırlanan numuneler oda sıcaklığından 60 °C'ye kadar farklı sıcaklıklarda kür etmişlerdir. 28 günden 1 yıla kadar kür edilen numuneler üzerinde serbest basınç testi yapıp dayanımlarını belirlemişlerdir. Deney

sonuçlarında kükürt ile yapılan iyileştirme Portland çimento ile yapılan iyileştirmeden 3 kat daha fazla arttırdığı ve numunelerin permeabilitesini de azalttığını bulmuşlardır.

Son yıllarda araştırmacılar; hem üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ miktarının azaltılması hem de petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürte alternatif kullanım alanlarının oluşturulması amacıyla inşaat sektöründe Portland çimentosu yerine kükürt kullanımı ile ilgili yoğun olarak çalışmalar gerçekleştirmektedirler. Literatürde yapılmış olan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, zemin iyileştirme yöntemlerinde bağlayıcı olarak çoğunlukla Portland çimentosunun kullanıldığı görülmektedir. Geoteknik alanında, kükürtün çimentoya alternatif yapı malzemesi olarak kullanıldığı çalışmaların yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada zemin iyileştirme yöntemlerinden yaygın olarak kullanılan enjeksiyon yönteminde bağlayıcı madde olarak çimento yerine kükürt kullanılması amaçlanmıştır. Bu deneysel çalışmayla kükürtün çimentodan üstün olan bazı özelliklerinin enjeksiyon yöntemi üzerindeki etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Kullanılan Malzemeler

5.1.1. Kükürt

Bu çalışmada Tüpraş - İzmit rafinerisinden elde edilmiş, petrol işleme sonucunda açığa çıkan saf kükürt kullanılmıştır. Rafineriden temin edilen kükürtün saflık oranı %99,8'dir. Üretici firmadan alınan kükürtün kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan kükürtün fiziksel ve kimyasal özellikleri

	Birim	Değer	Test Yöntemi
Görünüm	-	Katı Parçacıklı	Gözle Muayene
Saflık	Wt%	99,8	TS2839
Koku	-	Kokusuz	-
Erime Noktası/ Donma Noktası	°C	119	ASTM D 97
Kaynama Noktası	°C	445	ASTM D 86
Bağıl Yoğunluk (15 C°)	kg/L	2,1	ASTM D 1298
Alev Alma Sıcaklığı	°C	206	ASTM D 93

5.1.2. Kum

Deneylerde kullanılan doğal zemin Kocaeli'nin Arslanbey bölgesinden alınmıştır. Laboratuvarda yapılacak olan enjeksiyon uygulamaları için numuneler hazırlanırken Japonya İnşaat Mühendisleri Odası (JSCE) (1977) ve Ishihara ve diğ. (1989) tarafından önerilen sıvılaşma riski bulunan ve literatürde kabul görmüş dane dağılım sınırlarında kalan ve Şekil 5.2'de verilmiş olan zemin kullanılmıştır. Şekilde verilmiş olan sınırların kullanılmasının amacı, sıvılaşma riskinin azaltılmasından ziyade karşılaştırma

yapabilmek için daha önce çimento enjeksiyonu yapılmış dane dağılımı bilinen zemin seçilmiştir. Doğal zemin etüvde kurutulup ASTM D422–63 standardına uygun olarak 8 mm, 4,76 mm, 2 mm, 1 mm, 0,6 mm 0,425 mm eleklerde elenmiştir. Bu eleklerin üzerinde kalan numuneler ağırlıkça Tablo 5.2’deki gibi hazırlanıp UCSC’ye göre kötü derecelendirilmiş kum olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan zeminin ASTM C127-12 standardına göre fiziksel özellikleri Tablo 5.3’te verilmiştir.



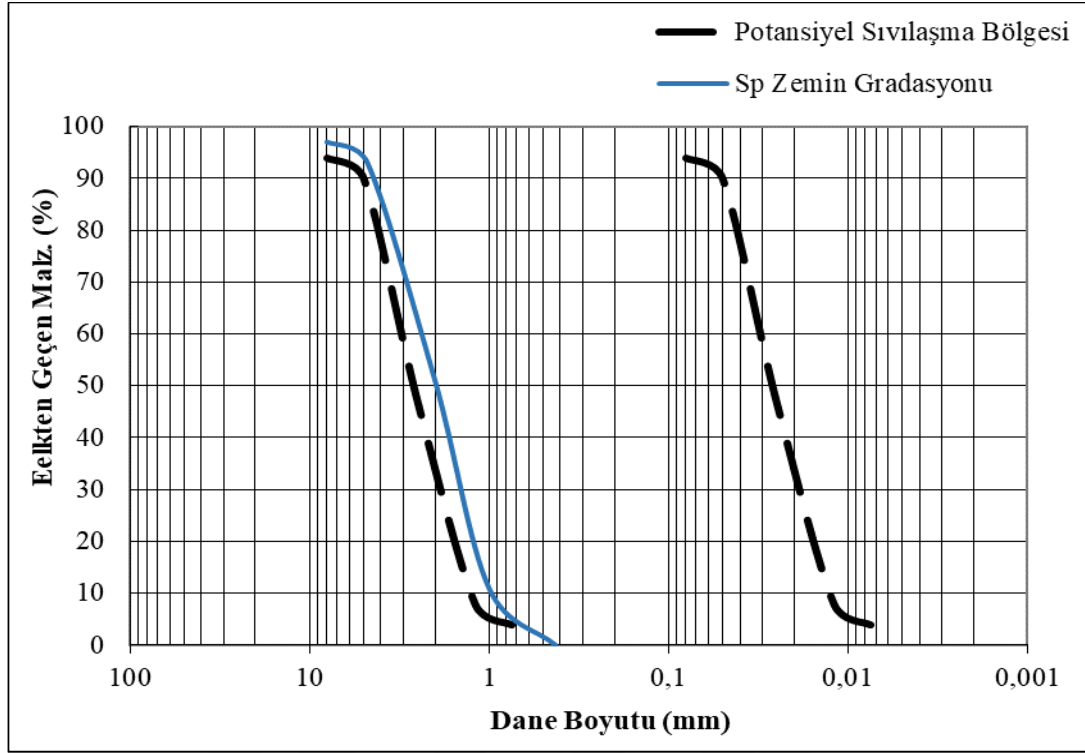
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan saf kükürt

Tablo 5.2. SP Zeminin dane boyutları

Elek Açıklığı(mm)	8	4,75	2	1	0,6	0,425
SP(%)	3	4	42	42	7	4

Tablo 5.3 SP Zeminin özellikleri

Numune	γ_{mak} (kN/m ³)	γ_{min} (kN/m ³)	e_{max}	e_{min}	G_s	c_u	c_c	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)
SP	17,3	15,5	0,69	0,53	2,63	2,33	1,02	1,11	1,87	3,0



Şekil 5.2. SP zeminin gradasyonu

5.1.3. Çakıl

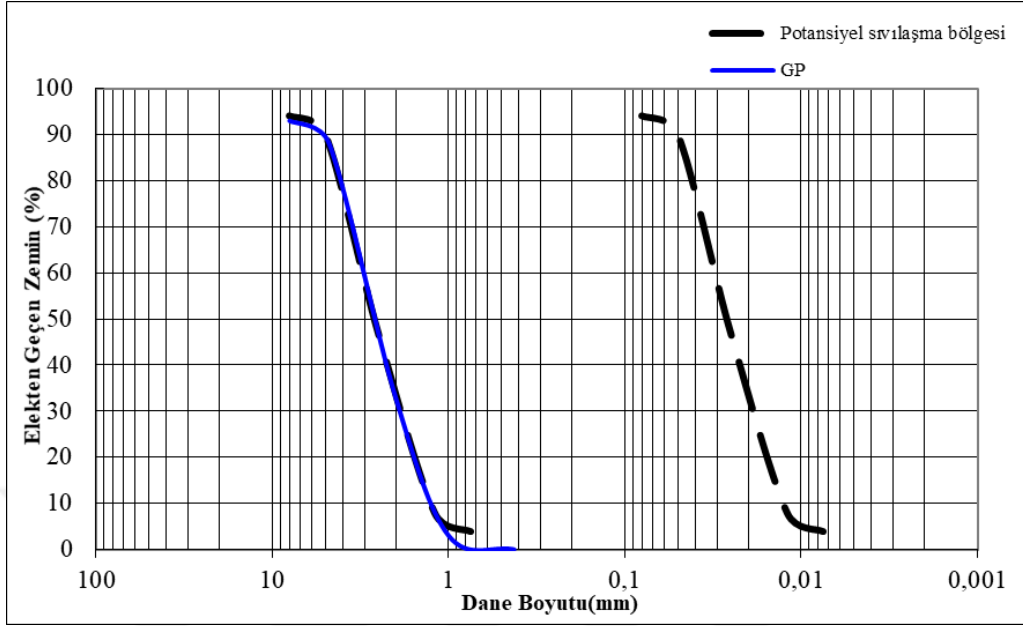
Çalışmada kullanılan doğal zemin etüvde kurutulup 8 mm, 4,76 mm, 2 mm, 1 mm, 0,6 mm, 0,425 mm eleklerde elenmiştir. Bu eleklerin üzerinde kalan numuneler ağırlıkça Tablo 5.4'deki gibi hazırlanıp UCSC'ye göre kötü derecelendirilmiş çakıl olarak hazırlanmıştır. GP zeminin gradasyonu Şekil 5.3'de verilmiştir. GP zeminin özellikleri ASTM C127-12 standartına göre Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.4. GP zeminin dane boyutları

Elek Açıklığı(mm)	8	4,75	2	1	0,6	0,425
GP (%)	3	4	42	42	7	4

Tablo 5.5. GP zeminin özellikleri

Numune	γ_{mak} (kN/m ³)	γ_{min} (kN/m ³)	e_{max}	e_{min}	G_s	c_u	c_c	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)
GP	17,5	15,8	0,71	0,54	2,62	2,69	1,02	1,11	1,86	3,1



Şekil 5.3. GP zeminin gradasyonu

5.2. Kullanılan Aletler

5.2.1. Etüv

Araziden alınan zeminin belirli gradasyona göre hazırlanması ve elek analizi yapmadan önce kuru hale getirmek için Şekil 5.4’de gösterilen etüv kullanılmıştır. Araziden getirilen doğal zemin etüvde 105 °C de, 24 saatte kuru hale getirilmiştir. Ayrıca etüv deneyde kullanılacak aletlerin, kükürt termoplastik malzeme olması nedeniyle ısıtılması içinde kullanılmıştır.

5.2.2. Elek Seti

Zeminlerde dane boyutlarının saptanması, zeminin danelerinin (çakıl, kum, silt, kil) yüzde miktarlarının belirlenmesi, zeminlerin sınıflandırılmasında oldukça önemlidir. Zeminler doğada zeminde ince ve iri daneli zeminler karışık olarak bulunabilirler. Tane çapları 76,2 mm ile 0,075 mm arasında olan zeminler, elek analizine tabi tutulurlar. Çapları 0,075 mm den ince olan zeminler hidrometre ve pipet analizi adı verilen yöntemler kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada istenen zemini oluşturmak için

laboratuvarında Şekil 5.5.'teki elek takımı kullanılarak zemindeki daneler boyutlarına göre ayrılmıştır (Yılmaz ve diğ., 2014).



Şekil 5.4. Çalışmada kullanılan etüv



Şekil 5.5. Elek setleri

5.2.3. Terazi

Çalışmada malzeme ağırlıklarının ölçülmesinde, birim ağırlık, özgül ağırlık ve su emme deneylerinin yapılmasında ve numunelerin deneyler için istenilen rölatif sıklıkta hazırlanması için, Şekil 5.6.'da görülmekte olan 1g hassasiyetinde terazi kullanılmıştır.



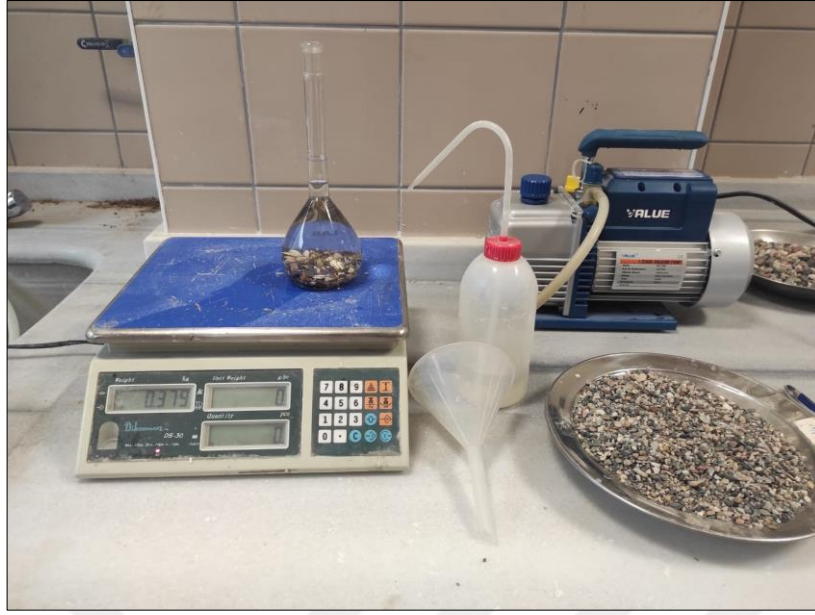
Şekil 5.6. Çalışmada kullanılan terazi

5.2.4. Piknometre ve Vakum Pompası

Zeminin özgül ağırlığını (G_s) bulmak için piknometre adı verilen cam şişeler kullanılmıştır (Şekil 5.7). Özgül ağırlık, dane birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Piknometreye zemin koyulduktan sonra üzerine hacim olarak belli olan çizgiye kadar su doldurulur, daha sonra vakum pompası uygulanarak karışımın içerisinde hava olmaması sağlanıp özgül ağırlık hesaplanır.

5.2.5. Eritme Potası

Cihaz, oda sıcaklığında katı halde bulunan kükürtü laboratuvarında sıvı hale getirmek ve kükürt başlıklama yapılması için kullanılmıştır. Şekil 5.8'de görülen cihaz 3 litre kapasiteye sahip ve 250 °C sıcaklığa kadar ayarlanabilmektedir. Cihaz çalışırken ısıyı sabit tutmak için termostat kontrollü olarak yapılmıştır.



Şekil 5.7. Piknometre ve vakum pompası



Şekil 5.8. Çalışmada kullanılan eritme potası

5.2.6. Hidrolik Kriko

Enjeksiyon uygulanmış numuneleri kalıplardan çıkarmak için Şekil 5.9'daki hidrolik kriko kullanılmıştır. Çalışmada numunelere gelen yükün düzgün dağıtılması için başlıklama yapılırken kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Çalışmada kullanılan hidrolik krik

5.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Enjeksiyon işleminden sonra numunelerin büyütülmüş görüntülerini üretmek ve mikro düzeyde analiz edebilmek için Şekil 5.10'da gösterilen Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Laboratuvarı bünyesindeki TESCAN VEGA marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. SEM görüntüleri alınan yüzeyler üzerinde enerji dağıtıcı x-ışını spektroskopisi (EDX) kullanılarak numunenin element analizi yapılmış ve böylece yüzey malzemesinin nicel bir biçimde ölçülmesine olanak sağlanmıştır. SEM ve EDX analizi ile mikro yapı incelenmiştir.



Şekil 5.10. Çalışmada kullanılan SEM cihazı

5.2.8. Mikroskop

Deneylerde enjeksiyon uygulanmış numunelerin içine kükürtün işleyip işlemediği ve serbest basınç dayanımı sonunda serbest basınç mukavemetleri düşük numunelerin iç yapısını incelemek için Şekil 5.11’de gösterilen Nikon SMZ800 Marka mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 5.11. Çalışmada kullanılan mikroskop

5.2.9. Laboratuvar Enjeksiyon Deney Düzeneği

Laboratuvarda yapılacak enjeksiyon için deney düzeneğinin tasarımı yapılmış ve çeşitli firmalarla görüşülmüştür. Deney düzeneği aşağıdaki parçalardan oluşmaktadır.

Kompresör: Uygulanacak olan enjeksiyon için gerekli basıncı sağlaması gerekmektedir. Bunun için Şekil 5.12’de gösterilen 1000 kPa basınç sağlayacak kompresör seçilmiştir.

Basınç tankı: 2 lt hacminde 4 mm kalınlığında olup 10 MPa sabit basınçla test edilmiştir. Uygulanacak basınca dayanıklı olması için cidar kalınlığı 4 mm olarak yapılmıştır (Şekil 5.13). Kapağında içerideki basıncı görmek amacıyla basınç saati bulunmaktadır. Kapak ile gövde arasında havanın kaçmaması için kapak içinde yuva açılmış ve o-ring yerleştirilmiştir. Gövdenin üst kısmında kompresöre bağlantı vanası konulmuştur.

Vananın yanına basınç saati konularak tanka verilen basıncın giriş değeri okunması sağlanmıştır. Tankın en alt seviyesine çıkış vanası konulmuştur.



Şekil 5.12. Çalışmada kullanılan kompresör



Şekil 5.13 Çalışmada kullanılan basınç tankı

Enjeksiyon Kalıpları: Çalışmada kullanılan kalıplar sıcaklığa ve basınca dayanıklı çelikten yapılmıştır. Boyutları 5 cm çapında 10 cm yüksekliğinde, silindir şeklindedir (Şekil 5.14.). Kalıplar 15 cm çapında 5 cm çapında kanal açılmış tabana oturmaktadır. Kalıpların başlık kısmına enjeksiyon harcının girmesi ve enjeksiyon bittikten sonra

basınç farkından dolayı enjeksiyon harcının tekrar kalıplardan çıkmaması için hidrolik vana konulmuştur. Kalıplar ve başlıkların arasında sızdırmazlığı sağlamak ve sabit basınç altında enjeksiyon uygulamak için teflon (ısıya dayanıklı) conta kullanılmıştır.



Şekil 5.14. Çalışmada kullanılan kalıplar

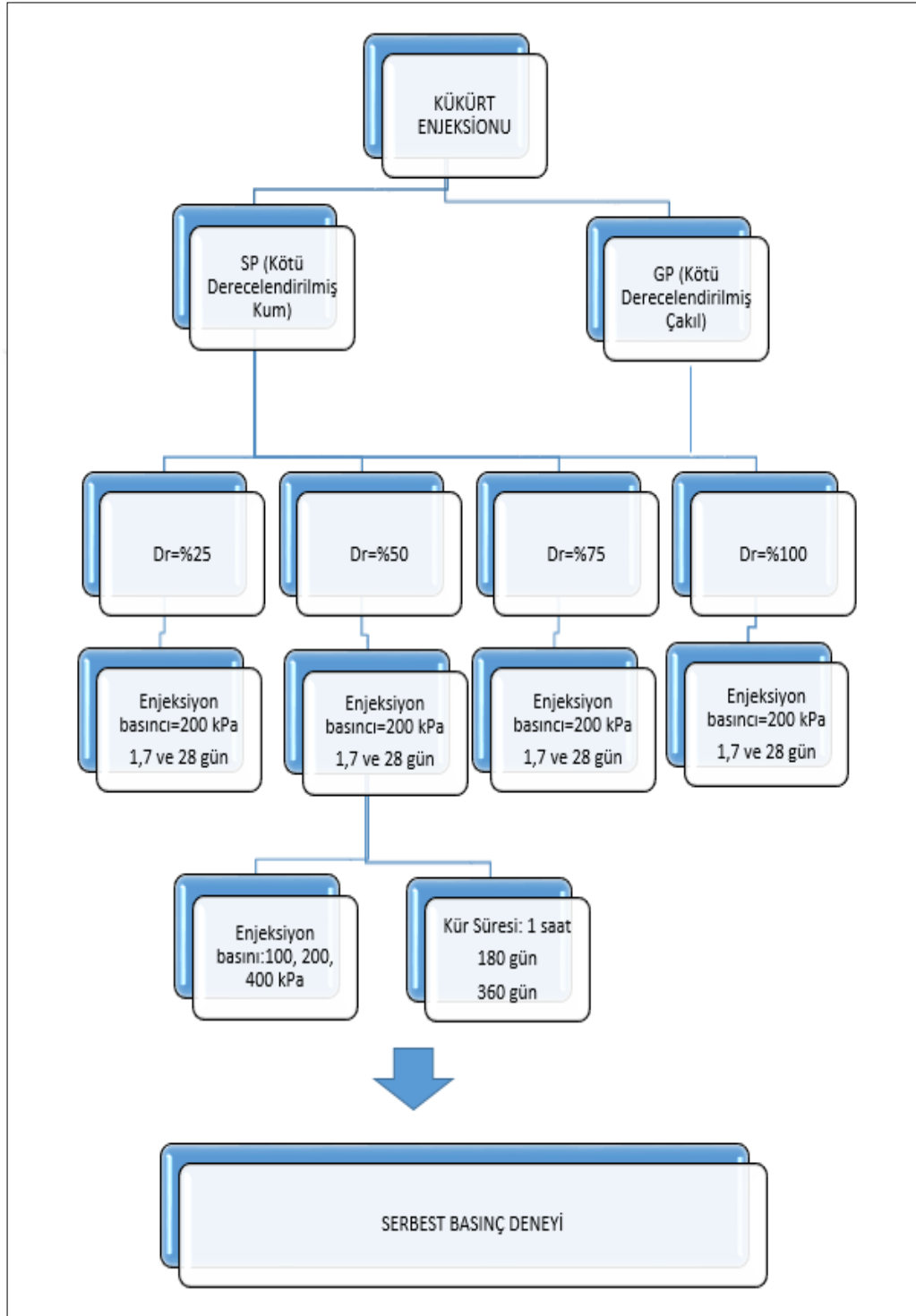
Regülatör: Enjeksiyon sırasında basınç tankına uygulanacak basıncı ayarlamak için Şekil 5.15'te gösterilen regülatör kullanılmıştır.



Şekil 5.15. Çalışmada kullanılan regülatör

5.3. Yöntem

Çalışmanın akış şeması Şekil 5.16'da gösterilmiştir.

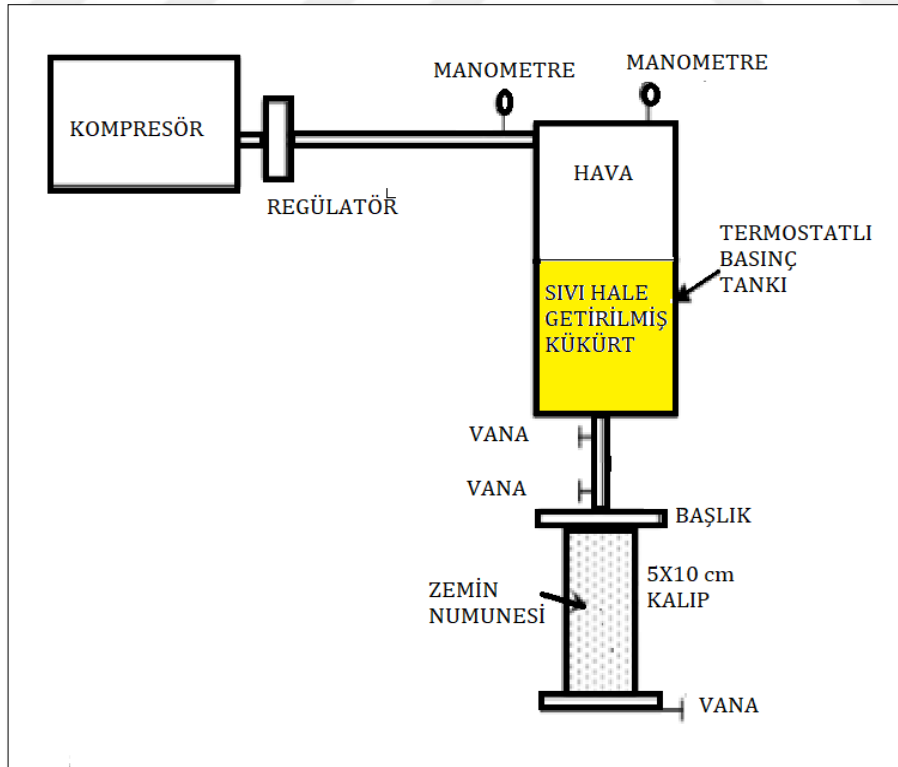


Şekil 5.16. Laboratuvar çalışmasının akış şeması

Laboratuvar çalışmasında, geleneksel yöntemlerde bağlayıcı olarak kullanılan su-çimento karışımının yerine petrol endüstrisinden elde edilen kükürt, zemin enjeksiyonu yöntemi ile uygulanmıştır. Oda sıcaklığında katı halde olan kükürt, rölatif sıklıkları %25, %50, %75 ve %100 olarak hazırlanmış üniform kum (SP) ve üniform çakıl (GP) sınıfı zemin numunelerine 130-135°C’de sıvı faza getirilerek düşük basınçlı kükürt enjeksiyonu şeklinde uygulanmıştır. Numuneler bu çalışma için özel olarak tasarlanan deney düzeneği kullanılarak sıcaklık ve basınç kontrollü olarak hazırlanmıştır. Enjeksiyon uygulanmış numuneler 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuş ve rölatif sıklık, kür süresi ile enjeksiyon basıncı değişimlerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Serbest basınç testinden elde edilen gerilme ve şekil değiştirme grafikleri kullanılarak elastisite modülleri incelenmiştir.

5.3.1. Deney Setinin Kurulması

Kükürtün zemine enjekte edilebilmesi için Şekil 5.17’de gösterilen deney düzeneği tasarlanmıştır.



Şekil 5.17. Laboratuvarda kurulan deney setinin şeması

Düzenekte sabit basınç uygulanması için kompresör kullanılmıştır. Düzenekte görülen basınç tankı 2 lt hacminde ve 10 MPa basınca dayanıklı olarak test edilmiş 4 mm cidar kalınlığına sahiptir. Zemin numunelerine istenilen enjeksiyon basıncını uygulamak ve basıncı sabit tutmak için kompresör ile tankın arasında regülatör takılmıştır. Kükürtün sıvı halde daneli yapıda olmadığı için enjeksiyon düzeneğinde karıştırıcı kullanılmamıştır. Basınç tankının üst kısmında bulunan kapağın içinde ısıya dayanıklı teflon conta kullanılmıştır. Enjeksiyon sırasında tankın içindeki basıncı ölçmek için tankın kapağına manometre yerleştirilmiştir. Tankı ısıtmak ve içine konulan kükürtün sıvı hale gelmesi için tankın etrafına kelepçe rezistans takılmıştır. Kükürt termoplastik bir malzeme olduğundan sıcaklığın sabit kalması için termostat takılmıştır. Basınç tankının alt kısmında ısıya ve basınca dayanıklı çıkış vanası takılmıştır. Basınç tankı ile enjeksiyon uygulanacak zeminin bulunduğu kalıp arasında basınca ve sıcaklığa dayanıklı boru kullanılmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Laboratuvarda kurulan deney seti

5.3.2. Numunelerin Hazırlanması

Laboratuvarda deney numuneleri hazırlanırken ilk önce doğal zeminin ince danelerden ayrılması için yıkamalı elek analizi yapılmıştır (Şekil 5.19). Daha sonra yıkanmış olan doğal zemin etüve atılarak 105 °C de 24 saat kuruması sağlanmıştır. Kuruyan zemin elek analizi yapılarak farklı boyutlarda ayrılmıştır (Şekil 5.20). Farklı boyutlara ayrılan zemin daha önce çimento enjeksiyon edilmiş olan SP ve GP zemin gradasyonunda olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 5.19. Çalışmada kullanılan doğal zeminin yıkanması



Şekil 5.20. Zeminin farklı dane boyutlarına ayrılması

Numuneleri hazırlarken çapı 5 cm yüksekliği 10 cm olan çelik kalıplar kullanılmıştır. Zemin kalıplara %25, %50, %75 ve %100 gibi farklı rölatif sıklıkta yerleştirilmiştir. İstenilen rölatif sıklıkları hesaplamak için malzeme kalıplara doldurulup maksimum ve minimum sıklık oranları belirlenmiştir. Sıkı hal için kalıp 3 seferde doldurulmuş ve her seferinde 25 defa şişlenip, kalıbın yüzeyi düzeltilip tartılmıştır. Böylelikle minimum boşluk oranı hesaplanmıştır. Maksimum boşluk oranını belirlemek için zemin, kalıba huni yardımıyla dökülüp maksimum boşluk oranı hesaplanmıştır. Rölatif sıklığın hesaplanmasında Denklem (5.1) kullanılmıştır. Denklem (5.1), numunenin maksimum ve minimum birim hacim ağırlıkları, kalıbın hacmi ve istenilen rölatif sıklıklar bilindiği için Denklem (5.2) şeklinde düzenlenmiştir. Zeminin ağırlığı Denklem (5.2) kullanılarak belirlenmiş olup kalıplara uygun şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5.21).

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

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

Burada; D_r rölatif sıklık, $\gamma_{d max}$ maksimum kuru birim ağırlık, $\gamma_{d min}$ minimum kuru birim ağırlık, V kalıbın hacmi ve W ise kalıba koyulacak zeminin ağırlığıdır. Enjeksiyon uygulamasının sonunda numunelerin düzgün ve zarar görmeden çıkması için zemin koyulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Kükürt enjeksiyonuna hazır zemin numunesi Şekil 5.21’de görülmektedir.

5.3.3. Enjeksiyon Uygulaması

Enjeksiyon uygulamasında rölatif sıklık ve zemin gradasyonu önemli parametreler olduğu için daha önce çimento enjeksiyonunda da kullanılan SP ve GP gradasyonlarına sahip zeminlere deneme enjeksiyonları yapılmıştır. SP ve GP gradasyona sahip zemin numunelerine kükürt başarılı bir şekilde enjekte edilmiştir. Enjeksiyon uygulamadan önce kükürt oda sıcaklığında katı fazda olduğundan dolayı, bağlayıcılık özelliği kazanması ve işlenebilir hale gelmesi için 130 ± 5 °C kadar ısıtılıp sıvı hale getirilmiştir. Kükürtün kristalize olmasında ani sıcaklık değişimlerinin önemli bir etken olması sebebiyle deneylerde kullanılan kalıplar ve ekipmanlar deneyden 2 saat önce, 130 ± 5 °C’deki etüv içinde, 2 saat süre ile ön ısıtmaya tabi tutulmuşlardır. Deneme enjeksiyonlarında kalıplar ve ekipmanlar ısıtılmadığından dolayı Şekil 5.22’de

gösterildiği gibi numunelere enjeksiyon işlemi tam gerçekleşmemiştir. Oda sıcaklığında kalıp kullanılması sonucunda kükürtün ani soğuması ile numunelerde soğuk derz olmasının engellenmesi amacıyla bu işlem her numune hazırlığında tekrarlanmıştır (Oztürk, 2019).



Şekil 5.21. Enjeksiyona hazır zemin numunesi

Zemin, ısıtılmış olan kalıpların içine seçilmiş olan farklı rölatif sıklıklarda yerleştirilerek, kükürt enjeksiyonun yapılması için hazırlanmış olan deney düzeneğine sabitlenmiştir. Sıvı faza getirilen kükürt numunelere enjekte edilmek için basınç tankına konulmuştur. Daha sonra basınç tankının içinde bulunan sıvı kükürt kompresör yardımıyla 100 kPa - 600 kPa aralığındaki farklı basınçlarla, numunelere enjekte edilmiştir. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin, kalıplardan hasar görmeden çıkarılması için hidrolik kriko kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere ait görüntü Şekil 5.23'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.22. Başarısız olmuş enjeksiyon numuneleri



Şekil 5.23. Kükürt enjekte edilmiş zemin numunesi

Serbest basınç deneyinden önce tüm numunelere, yerel gerilme yığılmalarının önlenmesi amacıyla başlık yapılmıştır. Numunelere yapılan başlık malzemesi olarak, bütünlük

sağlanması ve hızlı donması amacıyla yine kükürt kullanılmıştır. Kükürt başlık yapılırken kükürt eritilip numunenin çıkarıldığı Şekil 5.24'teki krik o sistemi kullanılmıştır.



Şekil 5.24. Enjeksiyon uygulanmış numunelere kükürt başlık yapımı

5.3.4. Serbest Basınç Deneyi

Enjeksiyon uygulaması olan numuneler 1 saat, 24 saat, 7 ve 28 gün sonunda standartlara uygun olarak serbest basınç deneyi yapılmaya hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.25.). Numunelere ASTM D2166-16 standardına uygun olarak 0,5 mm/dk. hızla yapılan tek eksenli basınç deneyi süresinde uygulanan yük ve bu süre boyunca oluşan deformasyonlar incelenmiştir (Şekil 5.26). Deney sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve deformasyonları bulunup gerilme ve şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Gerilme ve şekil değiştirme grafikleri sayesinde numunelerin elastisite modülleri bulunmuştur. Daha sonra enjeksiyon için önemli parametre olan serbest basınç mukavemeti ile enjeksiyon basıncı, kür süresi, zemin tipi ve rölatif sıkılık gibi parametrelerin ilişkisi incelenmiştir.



Şekil 5.25. Serbest basınç deneyine hazır, farklı rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler



Şekil 5.26. Serbest basınç deneyine tabi tutulan numune

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde birinci aşamada, kükürt enjekte edilmiş SP ve GP numunelerine ait deney sonuçları verilecek ve enjeksiyonda önemli parametre olan kür süresi, enjeksiyon basıncı ve rölatif sıklık gibi parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri araştırılacaktır. Her rölatif sıklık değeri için 3 adet numune dökülmüştür. Serbest basınç mukavemetleri bu 3 numunenin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise çıkan sonuçlar daha önce aynı gradasyon ve zemin de yapılan çimento enjeksiyonundan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapılacaktır. Deneylerde enjeksiyon uygulaması başarılı olmuş numuneler kullanılmıştır. Enjeksiyonu başarısız ve yetersiz olan numuneler yerine tekrar numune dökülmüştür. Yetersiz enjeksiyon olmuş numunelerin serbest basınç dayanımları oldukça düşük çıkmıştır. Numunelerin enjeksiyon basıncı değişiminden etkilenip etkilenmediği ve iç yapısında değişiklik olup olmadığını kırılan numuneler üzerinde mikroskop kullanılarak incelenmiştir. İncelemeler detaylı olarak EK-B’de verilmiştir. Başarılı olmuş enjeksiyon ile başarısız olmuş enjeksiyonun mikroskop kullanılarak iç yapısı Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.1. Başarılı enjeksiyon olmuş numunenin 40x görüntüsü



Şekil 6.2. Enjeksiyonu yetersiz olmuş numunenin 40x görüntüsü

6.1. SP Zemin Sonuçları

Deneysel çalışmada SP zeminlerde %25, %50, %75, %100 sıklık durumları için 200 kPa sabit basınç altında 9'ar adet numune olmak üzere toplam 36 adet zemin numunesi hazırlanmıştır. Çalışmada kalıplardan hidrolik kriko yardımıyla çıkarılan numuneler 1, 7 ve 28 gün oda sıcaklığında kürlendikten sonra tartılmıştır. Numunelere enjekte edilen kükürt miktarı ve numunelerin özgül ağırlığı hesaplanmıştır (Tablo 6.1). Daha sonra numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç mukavemeti olarak 3 numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 6.2'de verilmiştir.

SP numunelerde kükürt/zemin oranı %34-%46 arasında değişmektedir. Rölatif sıklık arttıkça numunelerin içindeki boşluk oranı azaldığından dolayı enjekte edilmiş olan kükürt miktarı azalmaktadır. Numunelerin yoğunluğu ise $2,30-2,37 \text{ kg/cm}^3$ arasında değişmektedir. Enjeksiyon işleminden sonra aynı rölatif sıklığa sahip numunelerden yoğunluğu fazla olanın, serbest basınç mukavemetinin de daha yüksek çıktığı belirlenmiştir.

Tablo 6.1. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin ağırlıkça oran miktarı

Dr %	Kükürt/Kuru Zemin
100	%35±1
75	%39±1
50	%42±1
25	%45±1

Tablo 6.2. Kükürt enjekte edilmiş SP numunelerin ortalama serbest basınç mukavemetleri

Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)			
Dr (%)	1 Gün	7 Gün	28 Gün
100	19,12	19,46	18,94
75	19,91	20,16	19,72
50	19,04	19,31	18,57
25	19,43	19,61	19,37

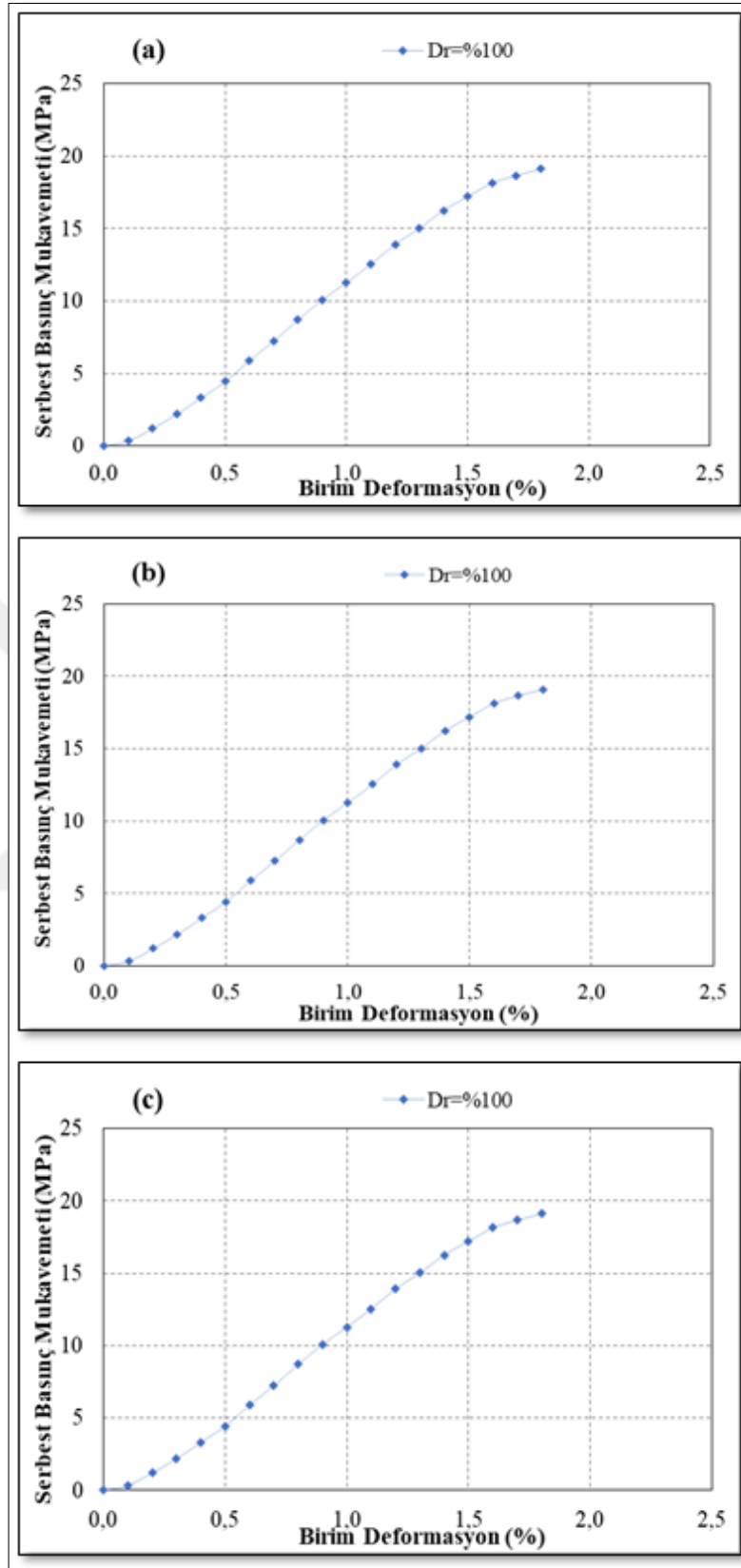
Çimento harcı kullanılarak yapılan enjeksiyon uygulamalarının yer aldığı deneysel çalışmalar incelendiğinde, çimento priz süresi göz önünde bulundurularak en erken 7 günlük deney sonuçları verilebilmiştir. Kükürt kullanılarak yapılan enjeksiyonda ise kükürtün ilk 1 gün içinde yaklaşık 28 günlük basınç değerine ulaşmasından dolayı, bu çalışmada 1 günlük deneysel sonuçlara da yer verilmiştir. Farklı rölatif sıklık değerlerine sahip numunelerin 1, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda gerçekleştirilen serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 6.3, 6.4, 6.5 ve 6.6'da verilmiştir.

Şekil 6.3'teki %100 rölatif sıklıktaki numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde tüm numunelerin gevrek kırıldığı görülmektedir. Numunelerin %0,1-0,15 birim deformasyon aralığında, başlıklarda ezilme olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek serbest basınç mukavemeti, 7 günlük numunelerde 19,46 MPa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti 28 günlük numunelerde 18,94 MPa olarak

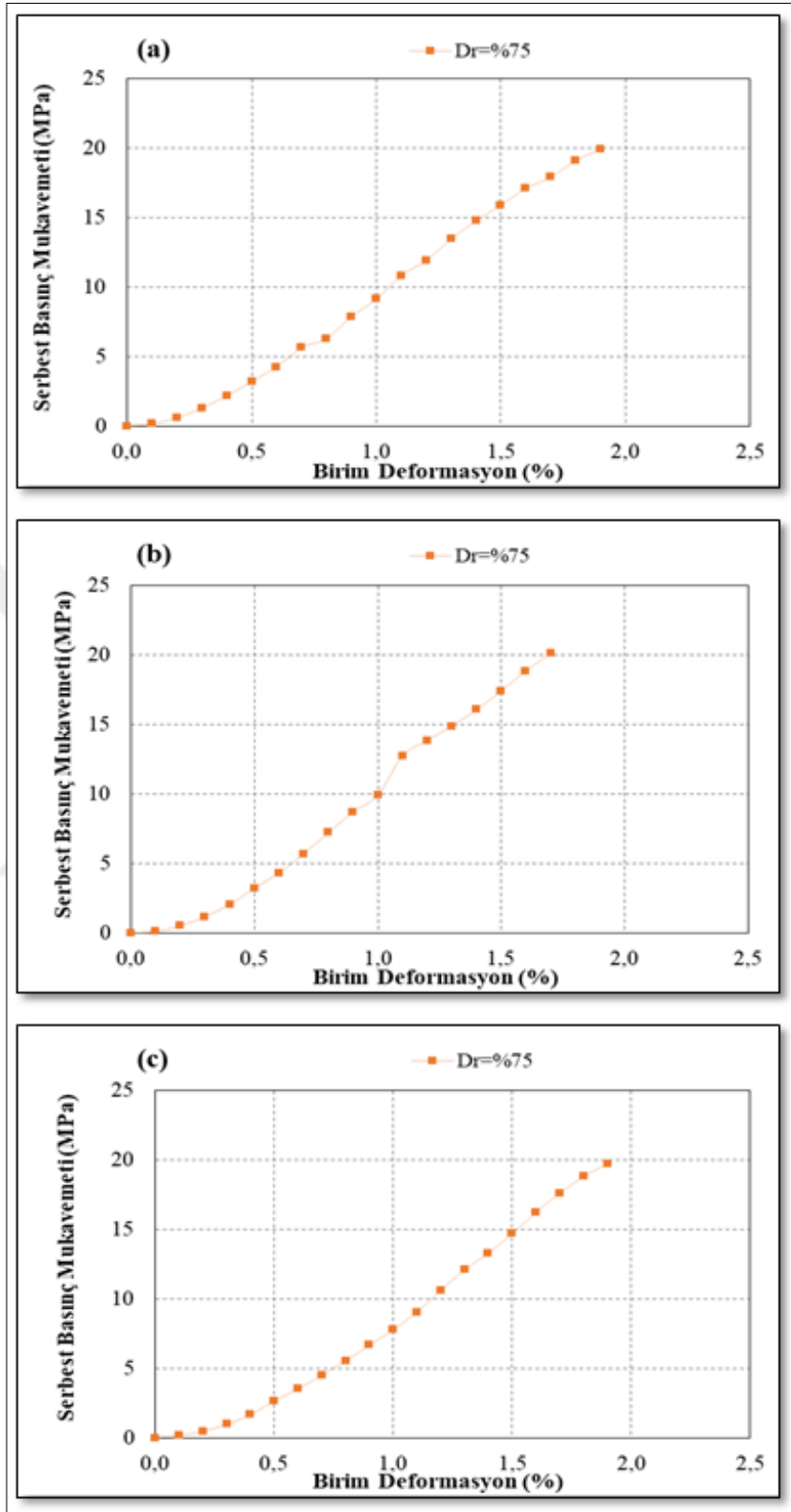
bulunmuştur. En çok birim şekil değiştirme %1,9 olarak 1 günlük numunelerde, en düşük şekil değiştirme ise 28 günlük numunelerde %1,7 olarak bulunmuştur. Kükürt priz alma süresi çok erken olduğu için gerilme ve şekil değiştirme eğrileri 1, 7 ve 28 günlük numuneler için birbirine teğet ve benzer çıkmıştır. %100 rölatif sıklıktaki zeminlerin yoğunluğu 2,35-2,37 g/cm³ aralığında çıkmıştır. Numunelere enjekte edilen kükürt miktarı yaklaşık zemin ağırlığının %35' i kadar olmuştur.

Şekil 6.4'teki grafikteki %75 rölatif sıklıktaki numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde tüm numunelerin gevrek kırıldığı görülmektedir. Numunelerim %0,1-0,15 birim deformasyona aralığında başlıklarda ezilme olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunelerde 20,16 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.4.b). En düşük serbest basınç dayanımı ise 28 günlük numunelerde 19,72 MPa olarak bulunmuştur. En çok birim şekil değiştirme %1,9 olarak 1 günlük numunelerde en düşük şekil değiştirme ise 7 günlük numunelerde %1,7 olarak bulunmuştur. Kükürt priz alma süresi çok erken olduğu için gerilme ve şekil değiştirme eğrileri 1, 7 ve 28 günlük numuneler için eğriler benzer çıkmıştır.

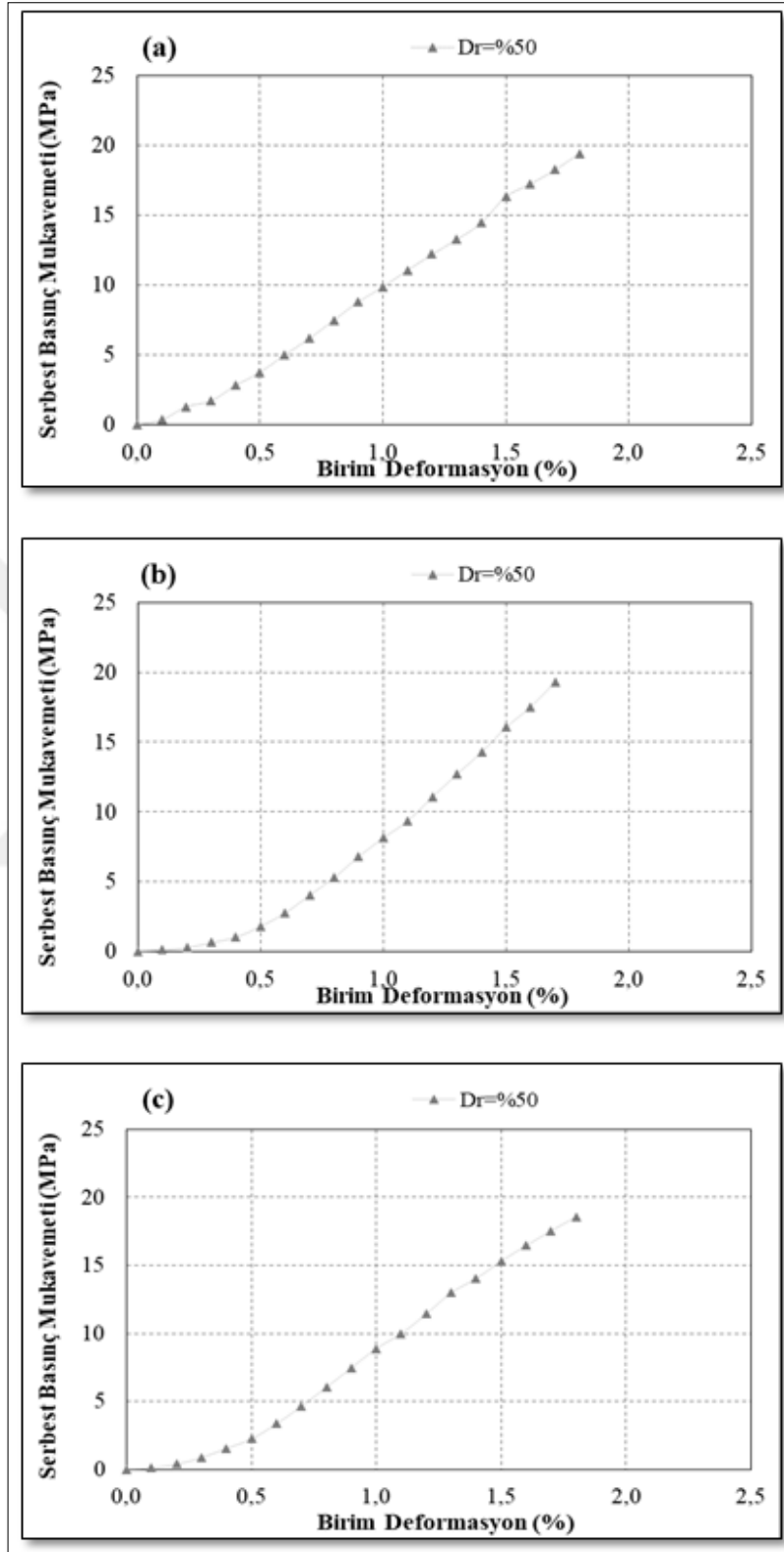
Şekil 6.5'teki %50 rölatif sıklıktaki numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde tüm numunelerin gevrek kırıldığı görülmektedir. Numunelerim %0,1-0,15 birim deformasyona aralığında başlıklarda ezilme olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunelerde 19,31 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.5.b). En düşük serbest basınç dayanımı ise 28 günlük numunelerde 18,57 MPa olarak bulunmuştur. En çok birim şekil değiştirme %1,8 olarak 1 günlük numunelerde en düşük şekil değiştirme ise 7 günlük numunelerde %1,7 olarak bulunmuştur. Kükürt priz alma süresi çok erken olduğu için gerilme ve şekil değiştirme eğrileri 1, 7 ve 28 günlük numunelerde birbirine benzer çıkmıştır.



Şekil 6.3. SP %100 rölatif sıkılıktaki numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün



Şekil 6.4. %75 rölatif sıkılıktaki SP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün



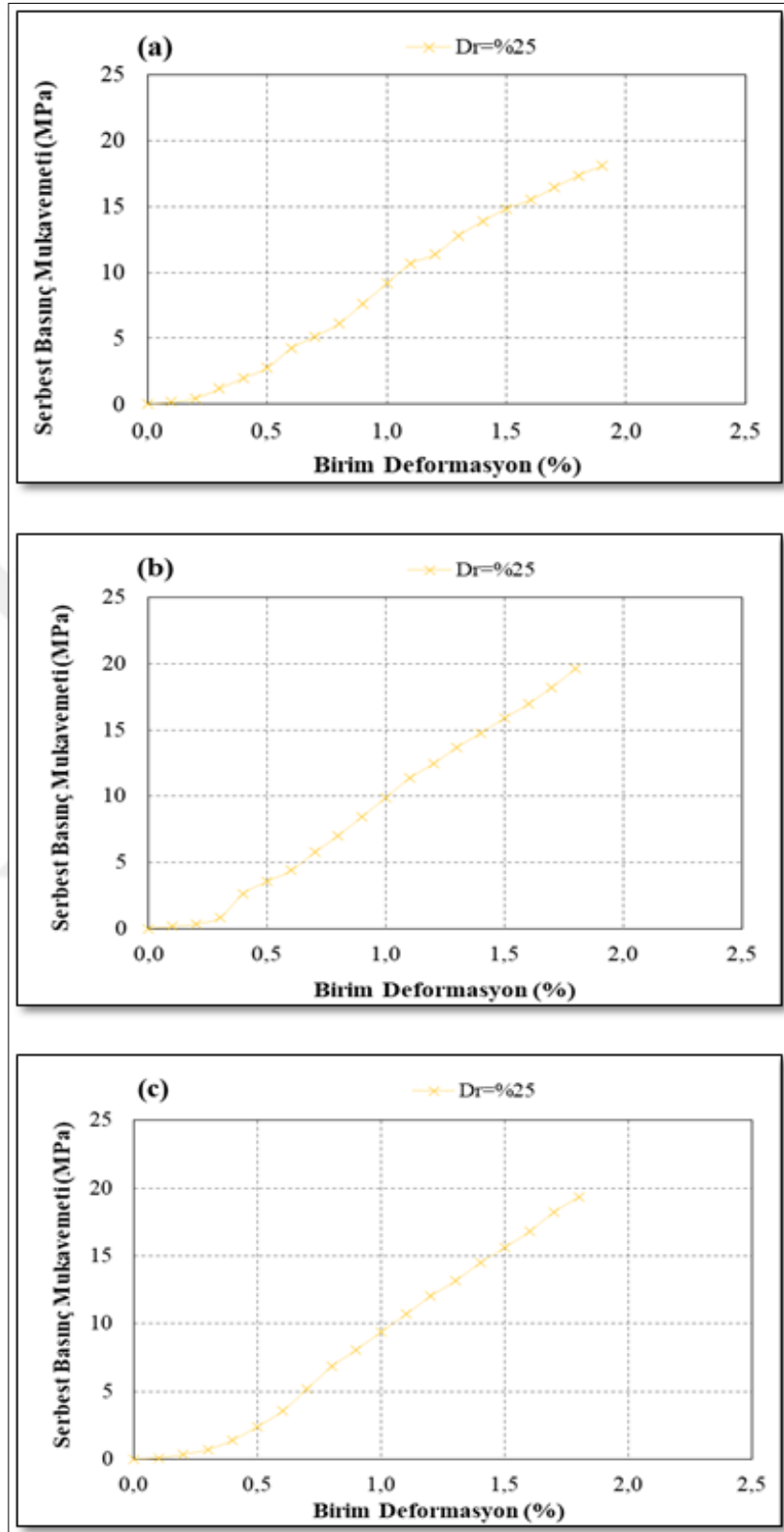
Şekil 6.5. %50 Rölatif sıkılıktaki SP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün

Şekil 6.6'daki %25 rölatif sıklıktaki numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde tüm numunelerin gevrek kırıldığı görülmektedir. Numunelerim %0,1-0,20 birim deformasyona aralığında başlıklarda ezilme olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunelerde 19,61 MPa olarak bulunmuştur (6.6.b). En düşük serbest basınç dayanımı ise 28 günlük numunelerde 19,37 MPa olarak bulunmuştur. En çok birim şekil değiştirme %1,9 olarak 1 günlük numunelerde en düşük şekil değiştirme ise 7 günlük numunelerde %1,7 olarak bulunmuştur. Kükürt priz alma süresi çok erken olduğu için gerilme ve şekil değiştirme eğrileri 1, 7 ve 28 günlük numunelerde birbirine teğet ve benzer çıkmıştır.

Yapılan SP deneyleri sonucunda tüm numunelere ait serbest basınç mukavemetlerinin 18,57 ile 20,16 MPa aralığında, oldukça yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı %75 rölatif sıklıkta hazırlanan 7 günlük numunede 20,16 MPa olarak elde edilmiştir. Göçmenin gevrek olması nedeniyle, kırılma maksimum gerilme değerinde ani gerçekleşmiş ve daha sonra okuma alınamamıştır. Tüm numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri birbirine benzer ve teğet çıkmıştır.

Deneyler sırasında 1, 7 ve 28 günlük numunelerde göçmenin, gevrek kırılma sonucunda olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin hepsinde gözlenen genel kırılma paternine ait görüntü Şekil 6.7'de verilmiştir. Enjeksiyon uygulanan numunelerde birim deformasyon %1,7-1,9 aralığında gerçekleşmiştir. Numuneler gevrekleştikçe birim deformasyon azalmıştır. En yüksek deformasyon 1 günlük numunelerde, en düşük deformasyon 28 günlük numunelerde görülmüştür.

Numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve gerilme şekil değiştirme eğrileri kullanılarak elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Numunelerin elastisite modülü (E) hesaplanırken serbest basınç mukavemetinin %50 değerine kadar olan gerilme-şekil değiştirme grafiği kullanılmıştır. Kükürt enjekte edilerek hazırlanmış numunelerde elastisite modülü değerleri 853-1193 MPa aralığında hesaplanmıştır. En yüksek değer %100 rölatif sıklıkta hazırlanan ve 7 gün kür edilen numunede 1193 MPa olduğu belirlenmiştir. En düşük değer ise %50 rölatif sıklıkta hazırlanan ve 7 gün bekletilen numunede 853 MPa olduğu görülmüştür. Tablo 6.3'te hesaplanmış olan tüm elastisite modülü değerleri özetlenmiştir.



Şekil 6.6. %25 Rölatif sıklıktaki numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün



Şekil 6.7. Serbest basınç deneyi zemin numunesi kırılma paterni

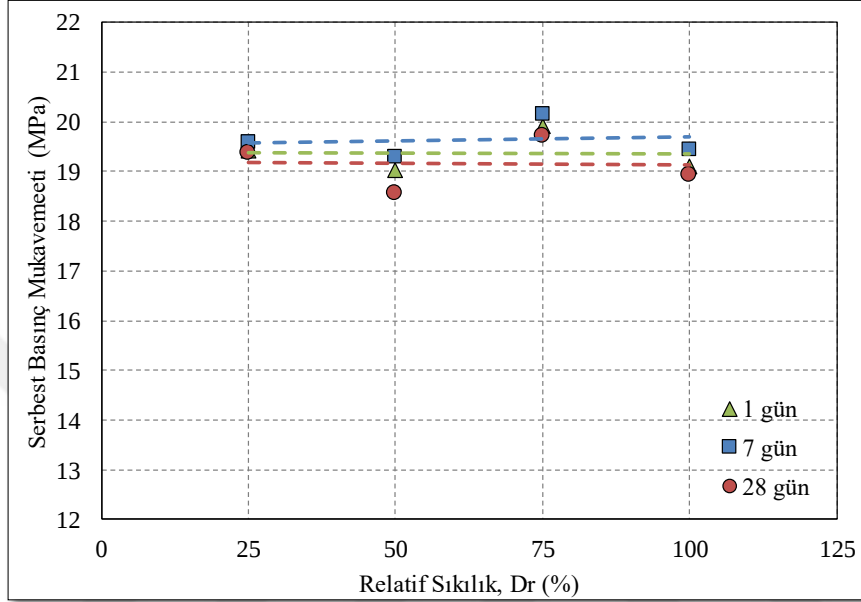
Tablo 6.3. Kükürt Enjekte Edilmiş SP Numunelerin Elastisite Modülü Değeri

Elastisite Modülü (MPa)			
Dr (%)	1 Gün	7 Gün	28 Gün
100	1075	1193	967
75	995	996	885
50	987	886	853
25	917	989	939

6.1.1. Rölatif Sıklığın Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

Farklı kür sürelerinde rölatif sıklık-serbest basınç mukavemeti değişimine ait grafik Şekil 6.8’de verilmiştir. En düşük serbest basınç mukavemetleri %50 rölatif sıklık değerinde elde edilirken, en yüksek mukavemet değerlerine %75 rölatif sıklık değerinde ulaşıldığı belirlenmiştir. Farklı yaşlardaki zemin numunelerinde gerilme-rölatif sıklık ilişkisinin çok farklılık göstermeden birbirine yakın bir davranış sergilediği görülmektedir. Çimentonun daneli yapıda olması nedeniyle enjeksiyon yapılacak zemin yapısının sıklığından oldukça etkilenmektedir ancak kükürt eritilerek kullanıldığı için

daha düşük viskoziteli olması nedeniyle zeminin sıkılığından daha bağımsız bir işlenebilirlik sergilemektedir. Bu nedenle kükürt enjekte edilen üniform kumlu zemin numunelerinde serbest basınç mukavemetinin, rölatif sıkılık değerinin değişimden önemli ölçüde etkilenmediği belirlenmiştir.

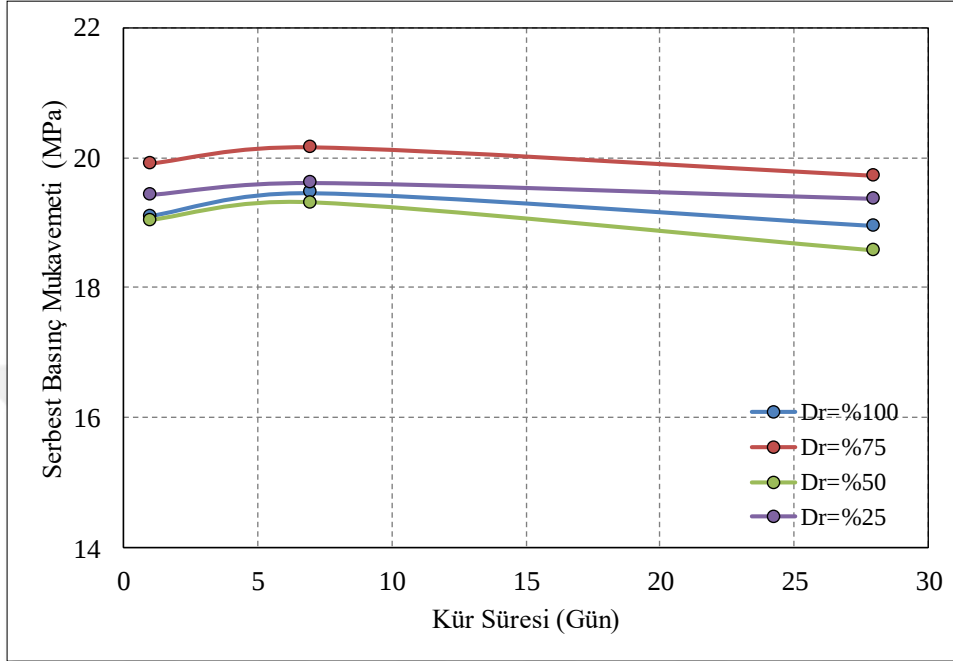


Şekil 6.8. SP numunelerin serbest basınç mukavemeti-rölatif sıkılık ilişkisi

6.1.2. Kür süresinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

Farklı rölatif sıkılık değerlerine sahip numunelerin-kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemeti değişimine ait grafik Şekil 6.9'da verilmiştir. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin nihai dayanıma 1 günde ulaştıkları görülmüştür. Numuneler 7 günde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaşmıştır. 28 gün bekletilen numunelerinde ise 7 günlük mukavemet değerlerinden yaklaşık olarak %1-4 gibi dayanım kaybı olduğu görülmektedir. Saf kükürt soğumaya ile birlikte, sıvı fazdan ilk olarak 114°C'de %7 hacim azalması göstererek monoklinik kristali formunu almaktadır. Soğuma devam ettiğinde sıcaklık 95,4°C'nin altına indiğinde monoklinik kristaller ortorombik kristal formuna dönüşür ve bu form kükürtün oda sıcaklığında sabit formda bulunduğu kristal yapısıdır. Ortorombik kristal yapısı monoklinik kristal yapısına göre daha yoğundur. Bu nedenle sertleşmiş kükürt içerisinde iç gerilmeler oluşmakta ve bunlar bağlayıcı içerisinde ciddi çatlakların oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 6.10). İçyapıda oluşan gerilmeler ve bu gerilmelerin neden olduğu çatlaklar basınç dayanımında

azalmalara neden olmaktadır. Bu deneysel çalışmada görülen 28 günlük serbest basınç mukavemeti değerlerindeki azalma literatürde yer alan çalışmalar ile paralellik göstermektedir (Öztürk ve Öner, 2022, Mohamed ve El Gamal, 2009).

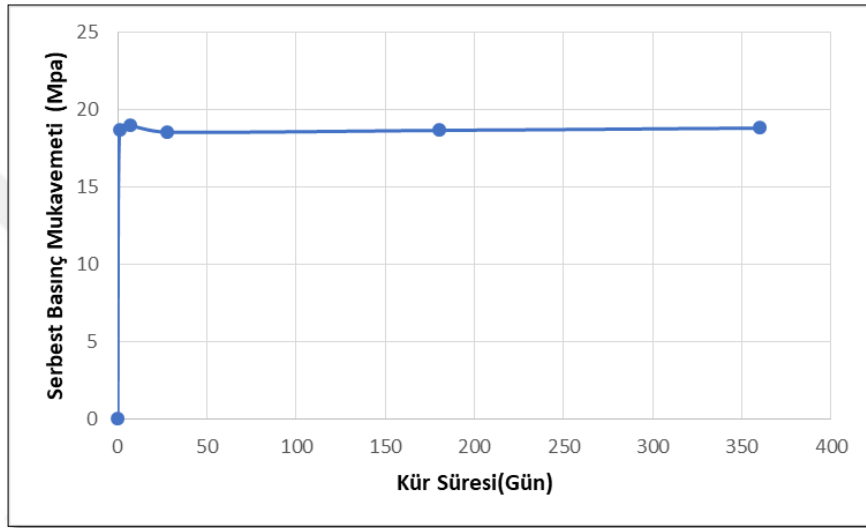


Şekil 6.9. Serbest Basınç Mukavemeti-Kür Süresi İlişkisi



Şekil 6.10. 28 günlük numunelerde oluşan çatlaklar 40x büyütülmüş

Uzun süreli kür edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerini belirlemek için 180 ve 360 gün sonra deneyler yapılmıştır. Rölatif sıkılığın serbest basınç mukavemetine etkisi olmadığı için sadece %50 rölatif sıkılıkta hazırlanan numunelerde inceleme yapılmıştır. Şekil 6.11’ de görüldüğü gibi 1 günde istenilen dayanıma ulaşan numuneler 7 günde en yüksek mukavemet değerlerine ulaşmış, 28 günlük değerlerde ise %5-10 aralığında dayanım kaybına uğramıştır. 180 ve 360 gün kür edilen numunelerde ise dayanım kaybının 28 günlük numunelerdeki dayanım kaybı ile aynı olduğu saptanmıştır.



Şekil 6.11. %50 Rölatif sıkılıkta hazırlanan SP numunelerin kür süresi ve SBM

Kükürtün inşaat teknolojilerinde kullanımının getirdiği en önemli avantajlardan bir tanesi soğuma ile birlikte çimentoya göre çok daha hızlı priz alabilmesidir. Bu nedenle erken yaş davranışının da değerlendirilebilmesi için kükürt enjekte edilmiş zemin numunesine 1 saat sonunda serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Bu zemin numuneleri, en düşük mukavemet değerinin %50 rölatif sıkılık değerinde elde edilmesi göz önünde bulundurularak bu sıkılık değerinde hazırlanmıştır. 1 saatlik deney sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı aynı sıkılıktaki 1, 7 ve 28 günlük numunelere ait sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

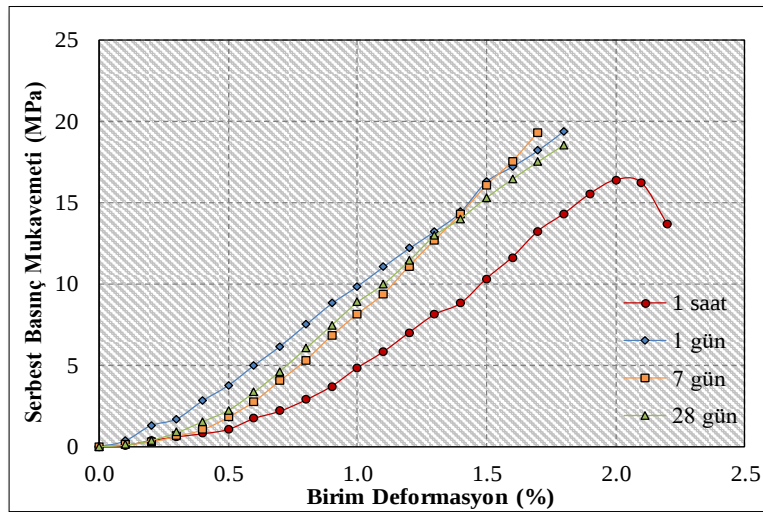
Deney sonucunda 1 saatlik serbest basınç mukavemeti 16,45 MPa olarak bulunmuştur. 1 saatlik numunelerde şekil değiştirme miktarlarının daha fazla olduğu görülmüştür. 1 saatlik numunelerde, 1, 7, 28 günlük numunelerin aksine daha sünek kırılma meydana

gelmiştir ve maksimum değerden sonra da okuma alınabilmektedir. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin kür süresi arttıkça daha gevrek kırılmaların meydana geldiği belirlenmiştir.

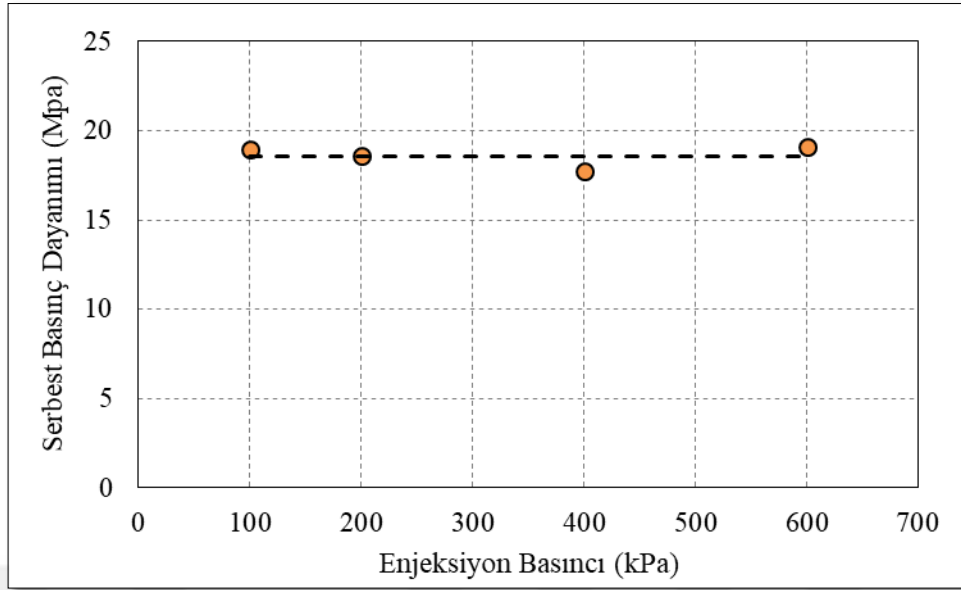
Kükürt enjekte edilmiş zemin numunesinin 1 saat sonunda 7 günlük maksimum dayanım değerinin yaklaşık %85'ine ulaşabildiği belirlenmiştir. Bu deney sonucu, özellikle acil önlem alınması gereken zeminlerde ve hızlı kullanıma açılması gereken iyileştirme sahalarında, kükürt enjeksiyonu uygulamasının daha kullanılabilir olduğunu gösteren önemli bir parametredir. Çimentonun priz süresi ve dayanım kazanma hızı göz önünde bulundurulduğunda, hızlı kullanıma açılması gereken sahalarda kükürt enjeksiyonun çimento enjeksiyonu uygulamasına göre önemli üstünlüklerinden birini ortaya koymaktadır.

6.1.3. Enjeksiyon Basıncının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerinde Etkisi

Kükürtün enjeksiyon sırasında uygulanan enjeksiyon basıncı değerinin, serbest basınç mukavemeti ile ilişkisinin belirlenmesi amacıyla 9 adet zemin numunesi daha hazırlanmıştır. Bu zemin numuneleri, en düşük mukavemet değerinin %50 rölatif sıkılık değerinde elde edilmesi göz önünde bulundurularak bu sıkılık değerinde hazırlanmıştır. 28 günlük numunelerin 3 tanesi 100 kPa, 3 tanesi 400 kPa ve diğer 3 tanesine ise 600 kPa basınç altında sıvı saf kükürt enjekte edilmiştir. Farklı enjeksiyon değerleri için deneylerden elde edilen serbest basınç değişimini gösteren grafik Şekil 6.13'de verilmiştir.



Şekil 6.12. $D_r=\%50$ için serbest basınç mukavemeti-erken yaş kür süresi ilişkisi



Şekil 6.13. $D_r=50$ için serbest basınç mukavemeti-enjeksiyon basıncı ilişkisi

Yapılan incelemelerde farklı basınçlarda enjeksiyon uygulanmış numunelerin iç yapısı incelendiğinde zemin boşlukları aynı oranda dolmuştur (EK-1). Enjeksiyon basıncının artmasına rağmen serbest basınç mukavemeti değerlerinin değişmediği belirlenmiştir. Daneli yapıya sahip çimento kullanılarak yapılan enjeksiyon uygulamalarında da artan enjeksiyon basıncı değerlerinin mukavemet değerleri üzerinde etkin olmadığı bilinmektedir. Daha düşük viskoziteli sıvı kükürtün enjeksiyonunun çimentoya göre daha kolay olması beklendiğinden deneylerden elde edilen sonuçların literatür ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Enjeksiyon için yeterli basınç değerinden daha yüksek basınç değerlerinde uygulama yapıldığında serbest basınç mukavemetlerinde önemli ölçüde değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

6.2. GP Zemin Sonuçları

Deneysel çalışmada GP zeminlerde %25, %50, %75, %100 rölatif sıklık durumları için 200 kPa sabit basınç altında 9'ar adet numune olmak üzere toplam 36 adet zemin numunesi hazırlanmıştır. Çalışmada kalıplardan hidrolik krikoyla çıkarılan numuneler 1, 7 ve 28 gün oda sıcaklığında kürlendikten sonra tartılmıştır. Numunelere ne kadar kükürt enjekte edildiği ve numunelerin özgül ağırlığı hesaplanmıştır (Tablo 6.4). Daha sonra numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç mukavemeti olarak 3 numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 6.5.'de verilmiştir.

Tablo 6.4. Kükürt enjekte edilmiş GP numunelerin ağırlıkça oran miktarı

Dr %	Kükürt/Kuru Zemin
100	%37±1
75	%41±1
50	%44±1
25	%47±1

GP numunelerde kükürt/zemin oranı %36-%48 arasında değişmektedir. Rölatif sıklık arttıkça kükürt oranı azalmaktadır. Numunelerin yoğunluğu ise 2,29-2,35 kg/m³ arasında değişmektedir. Enjeksiyon işleminden sonra aynı rölatif sıklıktaki numunelerin yoğunluğu fazla olanın serbest basınç mukavemeti de daha yüksek çıkmaktadır. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin yoğunluğu arttıkça serbest basınç mukavemeti de artmaktadır. GP numunelerde kükürt miktarı arttıkça serbest basınç mukavemeti azalmaktadır.

Tablo 6.5. Kükürt Enjekte Edilmiş GP Numunelerin Ortalama Serbest Basınç Mukavemetleri

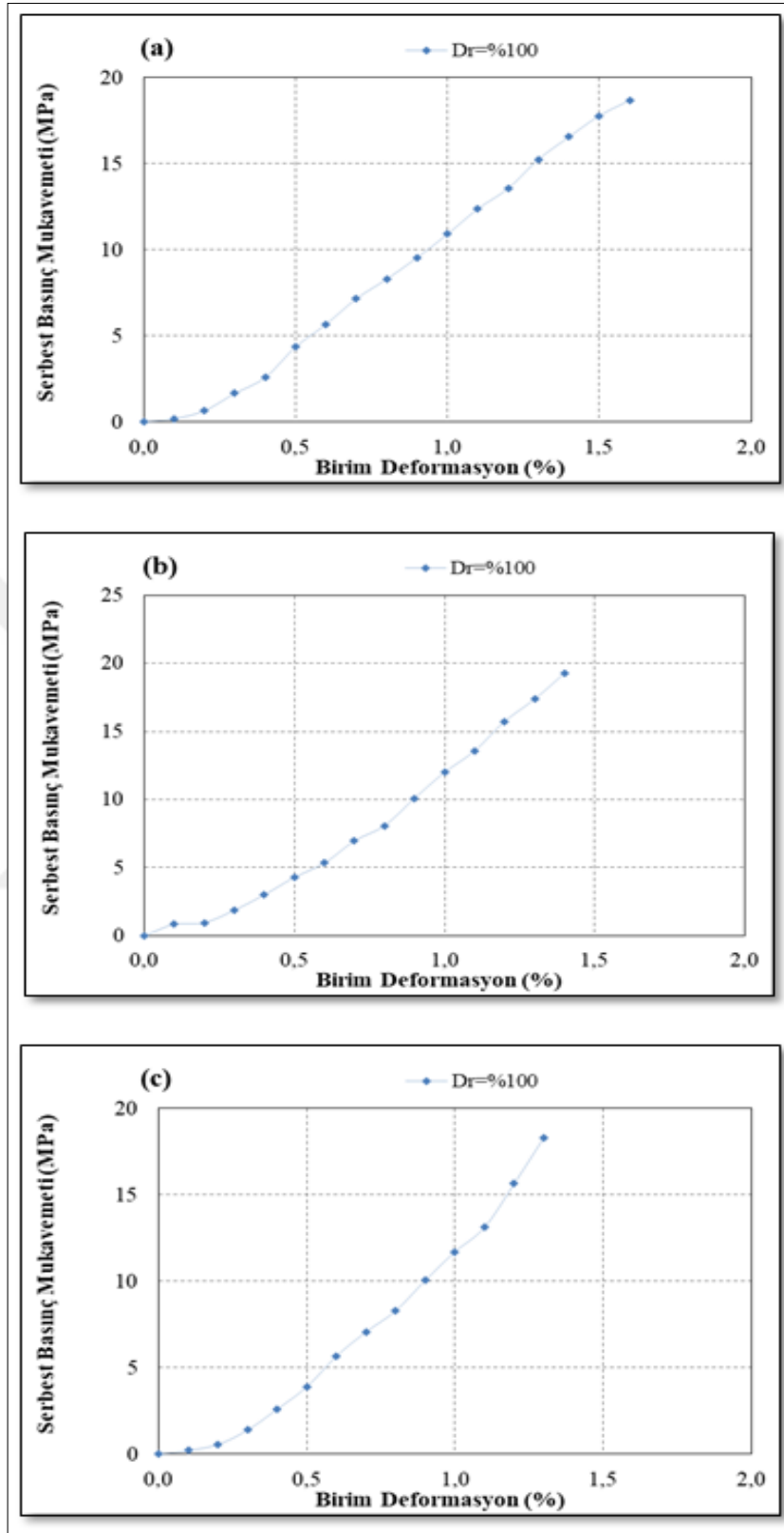
Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)			
Dr (%)	1 Gün	7 Gün	28 Gün
100	18,68	19,29	18,31
75	17,98	18,52	17,20
50	17,22	17,72	16,93
25	16,15	16,86	16,13

Farklı rölatif sıklık değerlerine sahip GP numunelerin 1, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda gerçekleştirilen serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 6.14, 6.15, 6.16 ve 6.18'de verilmiştir.

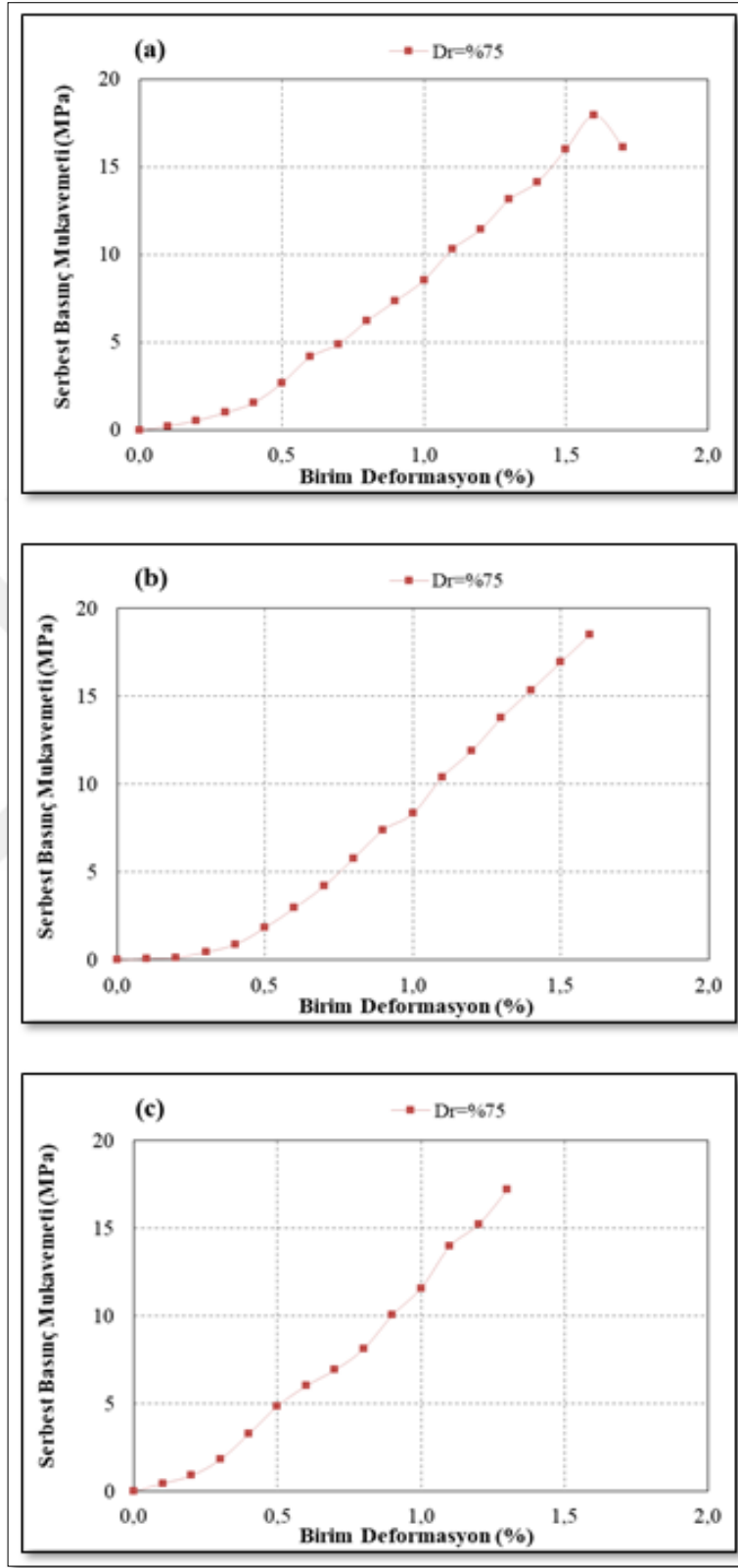
%100 rölâtif sıklıktaki GP numunelerin gerilme ve şekil değıştirme eğrileri incelendiğinde tüm numunelerin gevrek kırıldığı görölmektedir. Numunelerim % 0,10 birim deformasyon aralığında başlıklarda ezilme olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunelerde 19,29 MPa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti 28 günlük numunelerde 18,31 olarak hesaplanmıştır. En çok birim şekil değıştirme %1,7 olarak 1 günlük numunelerde en düşük şekil değıştirme ise 28 günlük numunelerde %1,3 olarak bulunmuştur. Kükürt priz alma süresi çok erken olduğu için gerilme ve şekil değıştirme eğrileri 1, 7 ve 28 günlük numuneler için birbirine teğet ve benzer çıkmıştır. En yüksek serbest basınç mukavemeti GP zeminlerde bu rölâtif sıklıkta elde edilmiştir.

%75 rölâtif sıklıktaki GP numunelerin gerilme ve şekil değıştirme eğrileri incelendiğinde 1 günlük numunelerde maksimum serbest basınç mukavemeti noktasından sonra okuma alınabilmiştir. 7 gün ve 28 günlük numuneler gevrek kırılmıştır. Numunelerin % 0,1-0,15 birim deformasyon aralığında başlıklarda ezilme olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunelerde 18,52 MPa olarak bulunmuştur. En düşük serbest basınç mukavemeti ise 28 günlük numunelerde 17,20 MPa olarak bulunmuştur. En çok birim şekil değıştirme %1,7 olarak 1 günlük numunelerde en düşük şekil değıştirme ise 28 günlük numunelerde %1,3 olarak bulunmuştur.

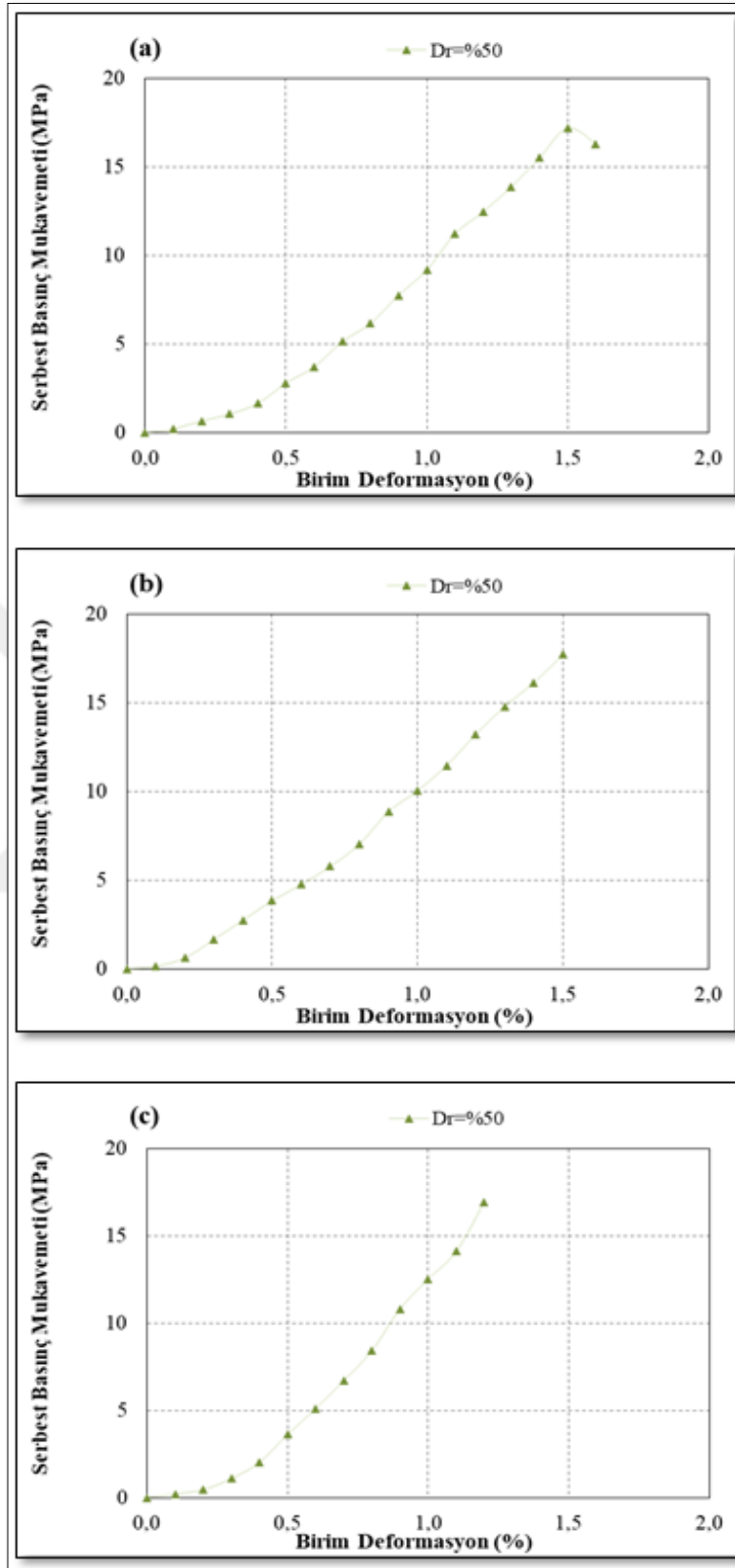
%50 rölâtif sıklıktaki GP numunelerin gerilme ve şekil değıştirme eğrileri incelendiğinde tüm numunelerin 1 günlük numuneler hariç gevrek kırılma olmuştur. Sadece 1 günlük numunelerde maksimum dayanım sonrası okuma alınabilmiştir. Numunelerin % 0,12-0,15 birim deformasyon aralığındaki başlıklarda ezilme olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunelerde 17,72 MPa olarak bulunmuştur. En çok birim şekil değıştirme %1,5 olarak 1 ve 7 günlük numunelerde en düşük şekil değıştirme ise 28 günlük numunelerde %1,2 olarak bulunmuştur. Kükürt priz alma süresi çok erken olduğu için gerilme ve şekil değıştirme eğrileri 1, 7 ve 28 günlük numuneler için birbirine teğet ve benzer çıkmıştır.



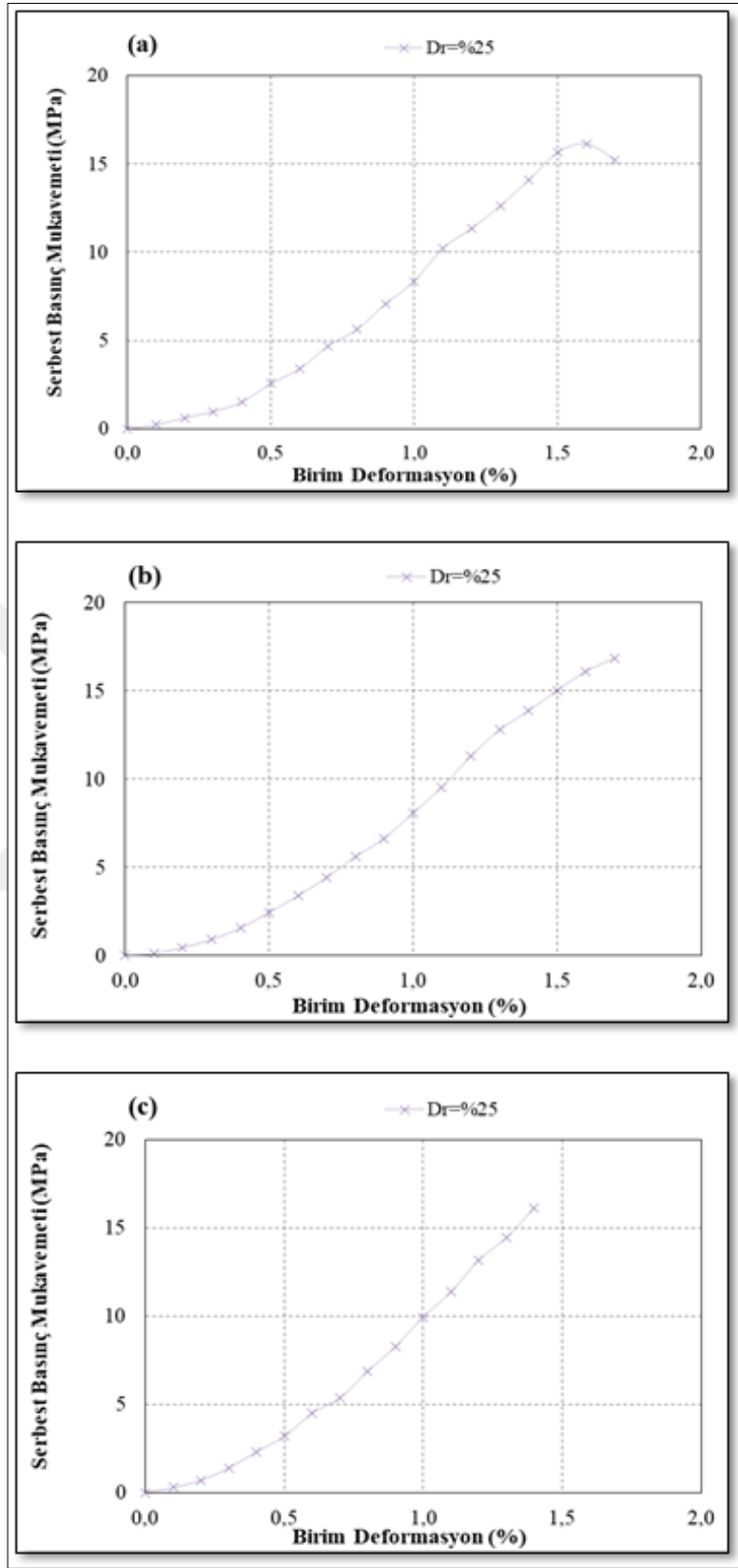
Şekil 6.14. %100 rölatif sıkılıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün



Şekil 6.15. %75 Rölatif sıkılıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün



Şekil 6.16. %50 Rölatif sıkılıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme Eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün



Şekil 6.17. %25 rölatif sıkılıktaki GP numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün

%25 rölâtif sıkılıktaki GP numunelerin gerilme ve şekil değıştirme eğrileri incelendiğinde 1 günlük numuneler hariç tüm numunelerin gevrek kırıldığı görülmektedir. Numunelerin % 0,12-0,15 birim deformasyon aralığındaki başlıklarda ezilme olmuştur. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunelerde 16,86 MPa olarak bulunmuştur. En çok birim şekil değıştirme %1,7 olarak 7 günlük numunelerde en düşük şekil değıştirme ise 28 günlük numunelerde %1,5 olarak bulunmuştur. Kükürt priz alma süresi çok erken olduğu için gerilme ve şekil değıştirme eğrileri 1, 7 ve 28 günlük numuneler için birbirine teğet ve benzer çıkmıştır.

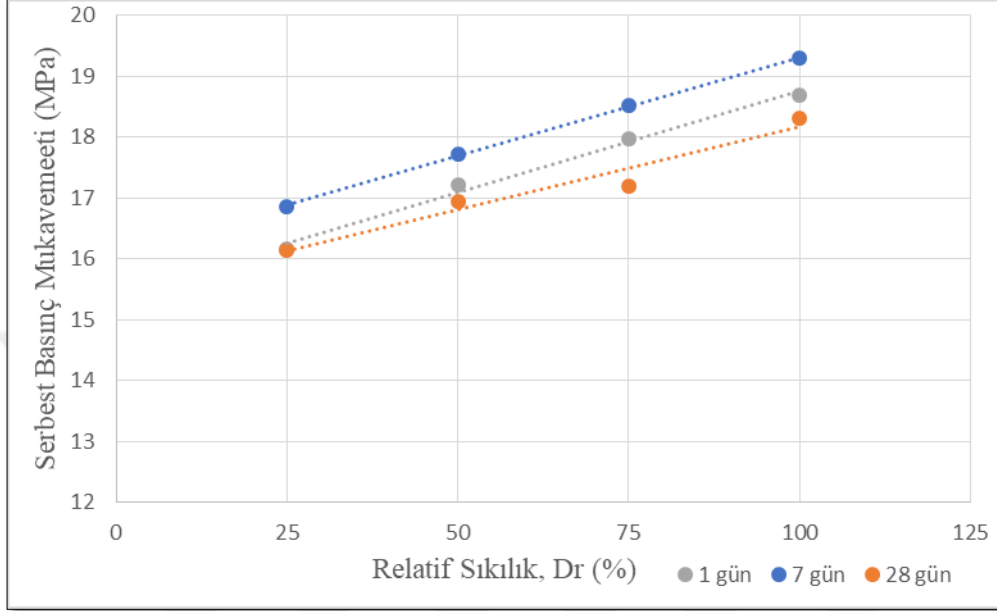
Numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve gerilme şekil değıştirme eğrileri kullanılarak elastisite modülü değeri hesaplanmıştır. Numunelerin elastisite modülü (E) hesaplanırken serbest basınç mukavemetinin %50 değerine kadar olan gerilme-şekil değıştirme grafiğı kullanılmıştır. Kükürt enjekte edilerek hazırlanmış GP numunelerde elastisite modülü değeri 914-1214 MPa aralığında hesaplanmıştır. En yüksek değer %100 rölâtif sıkılıkta hazırlanan ve 7 gün kür edilen numunede 1214 MPa olduğu belirlenmiştir. En düşük değer ise %25 rölâtif sıkılıkta hazırlanan ve 7 gün bekletilen numunede 914 MPa olduğu görülmüştür. Tablo 6.6'da hesaplanmış olan tüm elastisite modülü değeri özetlenmiştir. GP numunelerin SP numunelere göre 28 günlük numunelerin serbest basınç dayanımları düşük olmasına rağmen elastisite modülleri, birim şekil değıştirme daha az olduğu için yüksek çıkmıştır.

Tablo 6.6. Kükürt enjekte edilmiş GP numunelerin elastisite modülü değeri

Elastisite Modülü (MPa)			
Dr (%)	1 Gün	7 Gün	28 Gün
100	1122	1214	1176
75	970	975	1174
50	988	1057	1154
25	917	914	998

6.2.1. Rölatif Sıkılığın Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

GP zeminlerde farklı kür sürelerinde rölatif sıkılık-serbest basınç mukavemeti değişimine ait grafik şekil 6.18’de verilmiştir.

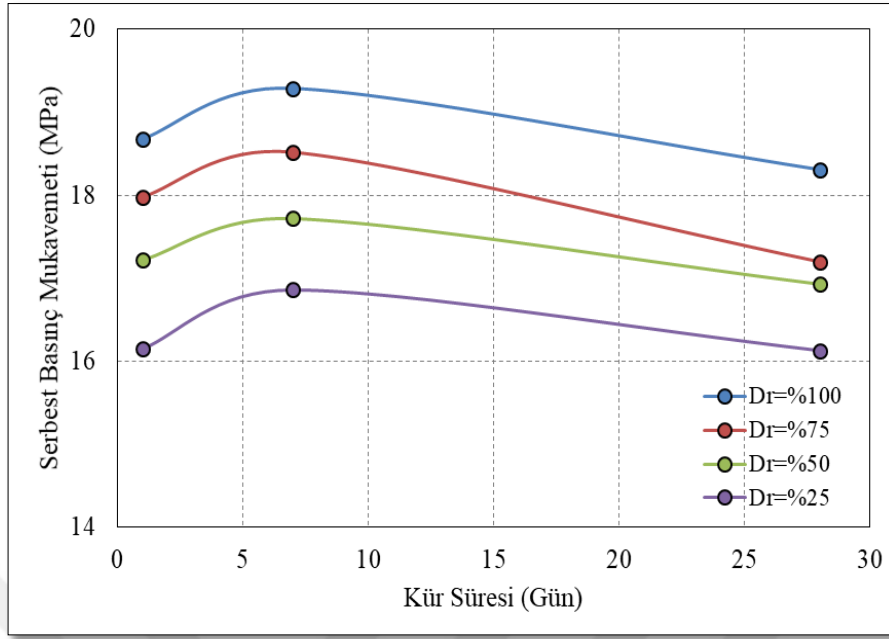


şekil 6.18. Serbest Basınç Mukavemeti-Rölatif Sıkılık İlişkisi

GP numunelerde yapılan serbest basınç testinde En düşük serbest basınç mukavemetleri %25 rölatif sıkılık değerinde elde edilirken, en yüksek mukavemet değerlerine %100 rölatif sıkılık değerinde ulaşıldığı belirlenmiştir. Farklı yaşlardaki zemin numunelerinde gerilme-rölatif sıkılık ilişkisinin çok farklılık göstermeden birbirine yakın bir davranış sergilediğini göstermekle birlikte GP zeminlerde rölatif sıkılık arttı a serbest basınç dayanımında arttığı görülmektedir (şekil 6.18). Kükürt enjekte edilen üniform çakıllı zemin numunelerinde serbest basınç mukavemetinin, rölatif sıkılık değerinin değişimden etkilenmesi %10-15 değerleri arasında sınırlı kalmaktadır.

6.2.2. K r süresinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

Farklı rölatif sıkılık değerlerine sahip numunelerin k r süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemeti değişimine ait grafik şekil 6.19’da verilmiştir.

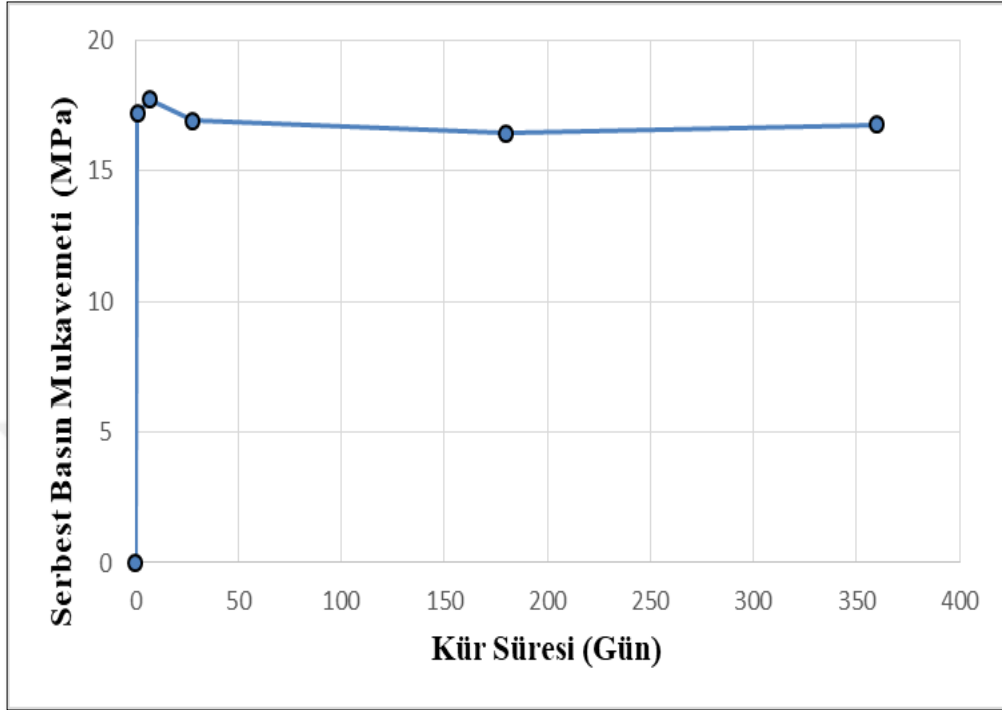


Şekil 6.19. Serbest basınç mukavemeti-kür süresi ilişkisi

Kükürt enjekte edilmiş numunelerin nihai dayanıma 1 günde ulaştıkları görülmüştür. Numuneler 7 günde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaşmıştır. 28 gün bekletilen numunelerde ise 7 günlük mukavemet değerlerinden yaklaşık olarak %3-7 gibi dayanım kaybı olduğu görülmektedir. GP numunelerde zemine enjekte edilen saf kükürt miktarı arttığı için 28 günlük numunelerdeki dayanım kaybı SP numunelere göre daha fazla olmuştur. Numunelerdeki saf kükürt miktarı arttıkça durabilite azalmakta, serbest basınç deneyinden elde edilen serbest basınç mukavemetleri arasındaki fark artmaktadır.

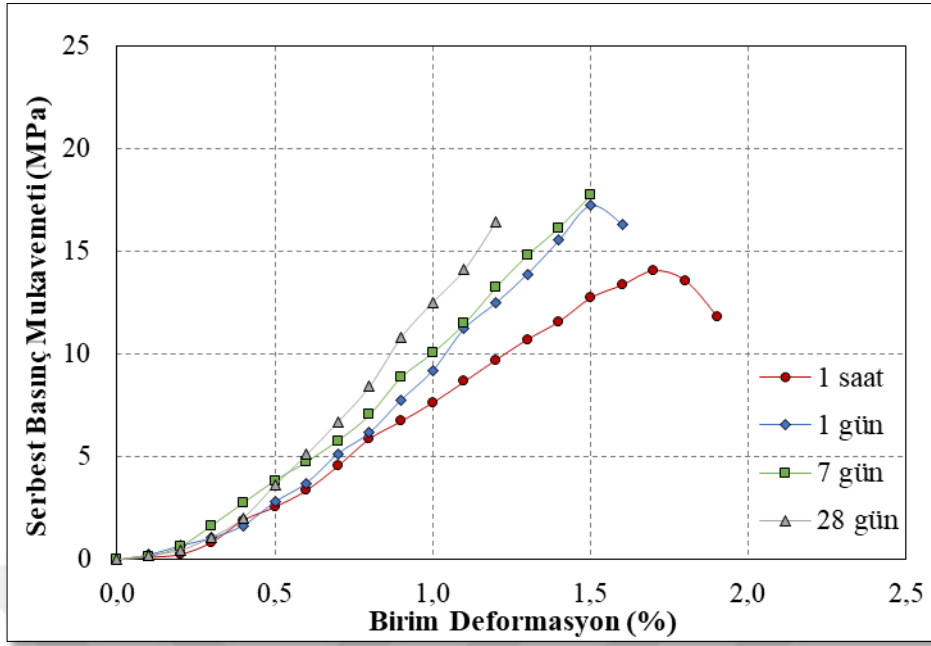
SP numunelere benzer olarak uzun süreli kür edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerini belirlemek için 180 ve 360 gün sonra deneyler yapılmıştır. SP numunelerle %50 rölatif sıkılık seçildiği için bu GP numunelerde de aynı sıkılıkta hazırlanan numunelerde inceleme yapılmıştır. Şekil 6.20’de görüldüğü gibi 1 günde istenilen dayanıma ulaşan numuneler 7 günde en yüksek mukavemet değerlerine ulaşmış, 28 günlük değerlerde ise %3-7 aralığında dayanım kaybı uğramıştır. 180 ve 360 gün kür edilen numunelerde ise dayanım kaybı 28 günlük dayanıma sabitlenmiştir. GP numunelerde erken yaş davranışının da değerlendirilebilmesi için kükürt enjekte edilmiş zemin numunesine 1 saat sonunda serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Daha önce referans olarak seçilen %50 rölatif sıkılık değeri göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır. 1 saatlik deney sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı

aynı sıklıktaki 1, 7 ve 28 günlük numunelere ait sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.20. %50 Rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerin kür süresi ve serbest basınç mukavemeti

Deney sonucunda 1 saatlik serbest basınç mukavemeti 13,39 MPa olarak bulunmuştur. 1 saatlik numunelerde şekil değiştirme miktarlarının daha fazla olduğu görülmüştür. 7 ve 28 günlük numunelerin aksine daha 1 günlük numuneler gibi sünek kırılma meydana gelmiştir ve maksimum değerden sonra da okuma alınabilmektedir. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin kür süresi arttıkça daha gevrek kırılmalar meydana geldiği belirlenmiştir. Kükürt enjekte edilmiş GP numunesinin de SP numunelere benzer olarak 1 saat sonunda 7 günlük maksimum dayanım değerinin yaklaşık %85’ine ulaşabildiği belirlenmiştir.

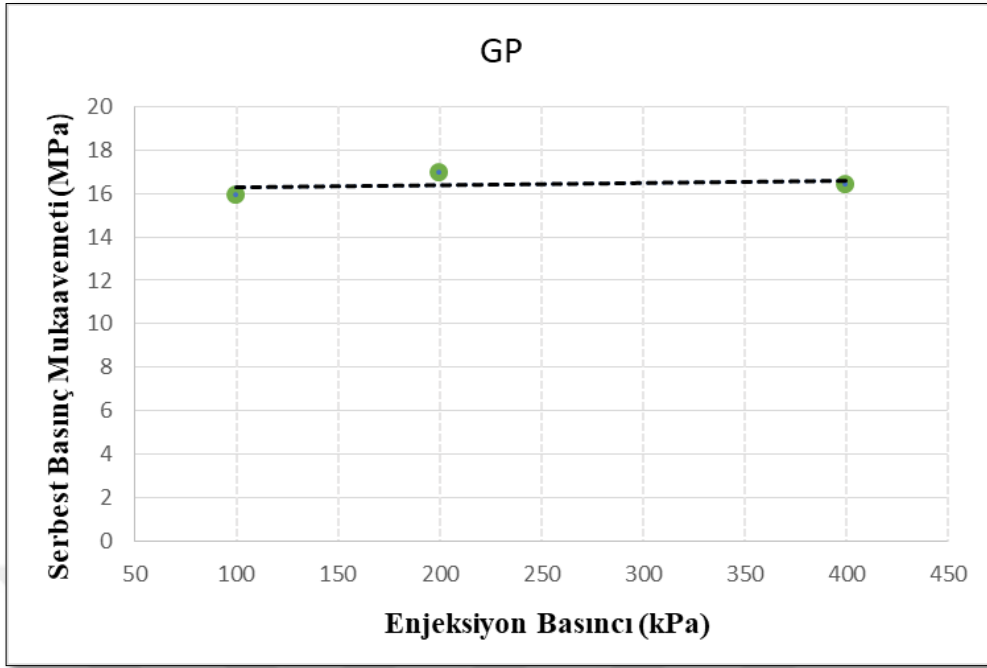


Şekil 6.21. D_r =%50 için serbest basınç mukavemeti-erken yaş kür süresi ilişkisi

6.2.3. Enjeksiyon Basıncının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerinde Etkisi

Kükürtün enjeksiyon sırasında uygulanan enjeksiyon basıncı değerinin serbest basınç mukavemeti ile ilişkisinin belirlenmesi amacıyla 6 adet zemin numunesi daha hazırlanmıştır. Bu zemin numuneleri, GP zeminde hazırlanan numunelerle karşılaştırma yapabilmek için %50 rölatif sıkılıkta hazırlanmıştır. Numunelerin 3 tanesi 100 kPa, diğer 3 tanesine ise 400 kPa basınç altında saf kükürt enjekte edilmiştir. Farklı enjeksiyon değerleri için deneylerden elde edilen serbest basınç değişimini gösteren grafik Şekil 6.22'de verilmiştir.

Enjeksiyon basıncının artmasına rağmen GP numunelerde serbest basınç mukavemeti değerlerinin değişmediği belirlenmiştir. Daneli yapıya sahip çimento kullanılarak yapılan enjeksiyon uygulamalarında da artan enjeksiyon basıncı değerlerinin mukavemet değerleri üzerinde etkin olmadığı bilinmektedir (Mutman, 2007). Daha düşük viskoziteli sıvı kükürtün enjeksiyonunun çimentoya göre daha kolay olması beklendiğinden deneylerden elde edilen sonuçların literatür ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. GP zeminlerde kükürt enjeksiyonu için yeterli basınç değerinden daha yüksek basınç değerlerinde uygulama yapıldığında serbest basınç mukavemetlerinde önemli ölçüde değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

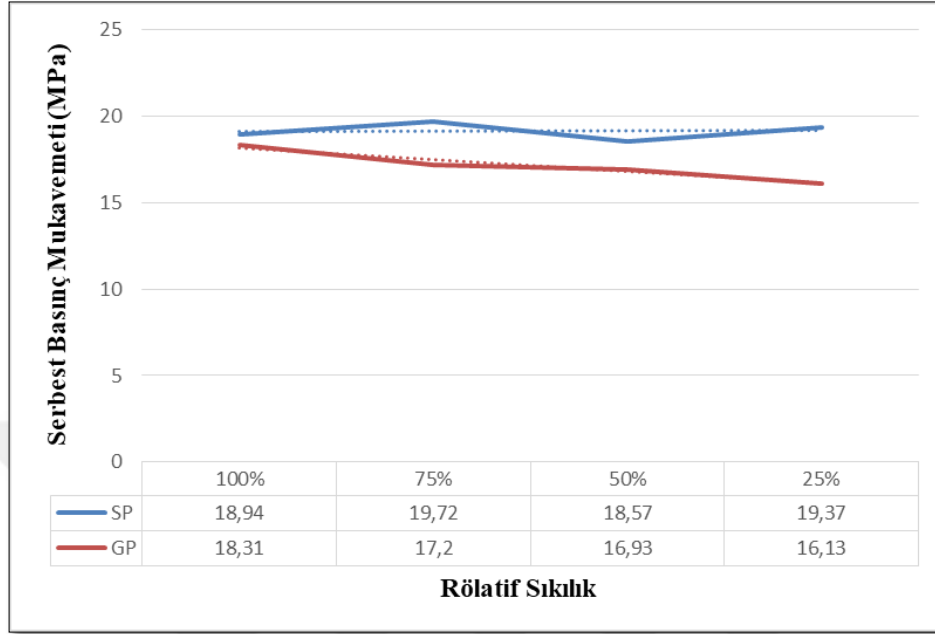


Şekil 6.22. $D_r=\%50$ için serbest basınç mukavemeti-enjeksiyon basıncı ilişkisi

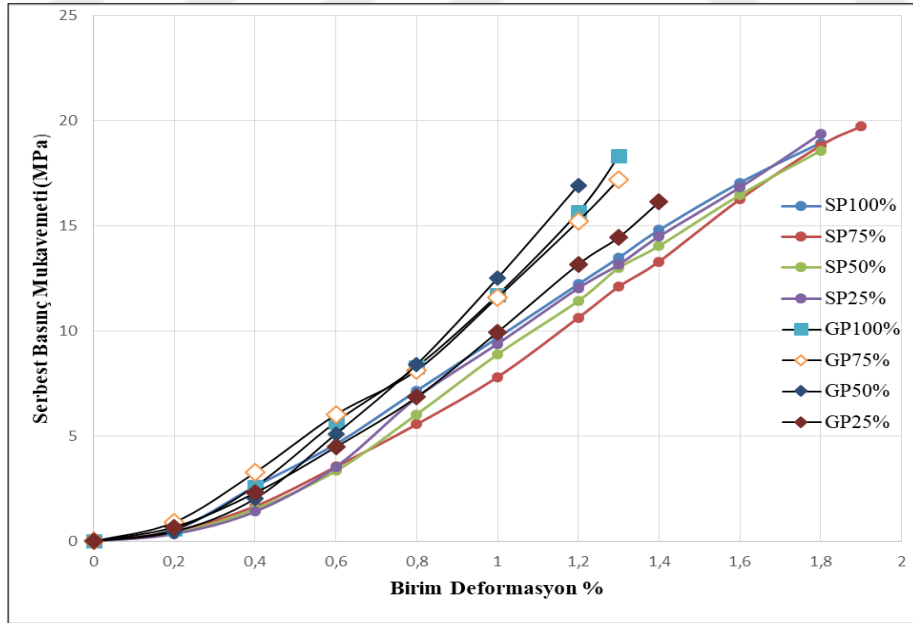
6.3. SP ve GP Numunelerin Karşılaştırılması

Bu bölümde farklı zeminlerde kükürt enjekte edilmiş SP ve GP numuneler kür süresi boyunca serbest basınç değişimleri aynı olmuştur. Bu yüzden karşılaştırma için nihai sonuç olan 28 günlük serbest basınç dayanımları seçilmiştir. SP ve GP zeminlerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri rölatif sıklığa bağlı olarak Şekil 6.23’de verilmiştir. SP numunelerin serbest basınç dayanımları GP numunelerden %2 ile %20 aralığında daha yüksek çıktığı grafikte görülmektedir. Kükürt enjekte edilen SP ve GP numunelerin farklı rölatif sıklıktaki serbest basınç mukavemeti değişimi grafik 6.24’te sunulmuştur. Şekil 6.24 incelendiğinde GP numunelerin şekil değiştirmeleri SP numunelere göre daha az olduğu görülmüştür. GP numunelerin elastisite modülü SP numunelerden daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi elastisite modülü değeri birim şekil değiştirmeye ters orantılı olduğu için GP numunelerde deformasyon SP numunelere göre daha az olmuştur (Şekil 6.24). SP numunelerde rölatif sıklık ile serbest basınç mukavemeti arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. GP numunelerde ise rölatif sıklık arttıkça sınırlı da olsa serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmüştür. SP numunelerin serbest basınç mukavemetinin GP numunelere göre fazla çıkmasının sebebi kükürtün temas ettiği zemin

alanının daha fazla olmasıdır. Enjeksiyon uygulanan zeminde ince dane oranı arttıkça serbest basınç mukavemeti de artmaktadır.



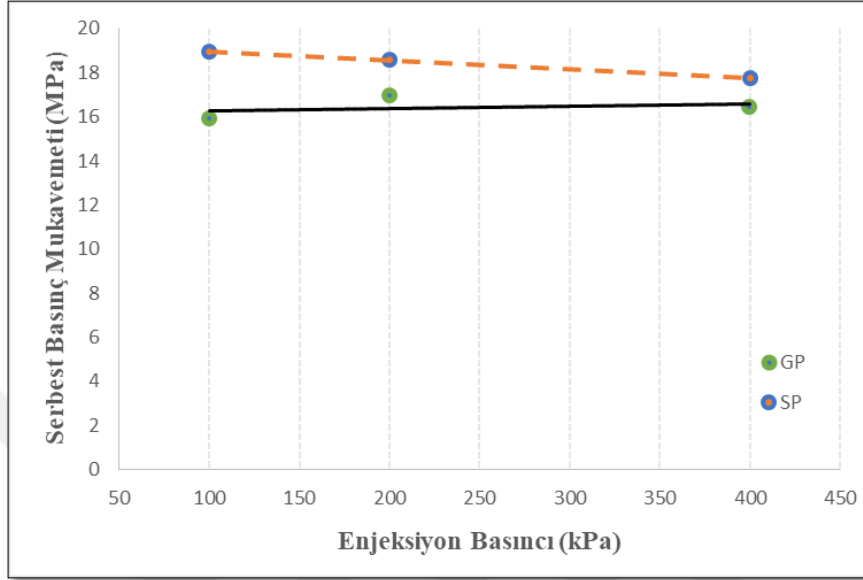
Şekil 6.23. SP ve GP numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri



Şekil 6.24. GP ve SP 28 günlük numunelerin gerilme ve şekil değiştirme grafiği

GP ve SP zeminle hazırlanan numunelerin enjeksiyon basıncı ile serbest basınç dayanımlarının değişimleri Şekil 6.25'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi

enjeksiyon basıncı arttıkça serbest basınç mukavemetinin önemli ölçüde değişmediği görülmektedir. Hem GP zeminler hem de SP zeminlerde enjeksiyon basıncı serbest basınç mukavemeti üzerinde etkin bir parametre değildir.



Şekil 6.25. SP ve GP numunelerin enjeksiyon basıncı ile serbest basınç mukavemeti değişimi

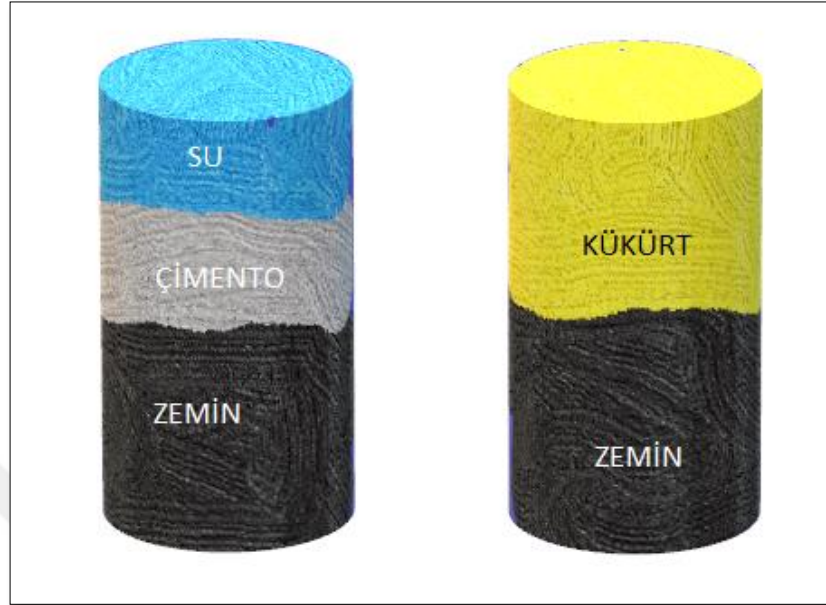
6.4. Kükürt Enjeksiyonu ile Çimento Enjeksiyonun Karşılaştırılması

Bu bölümde, literatürde 2007 yılında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Mutman'a ait olan doktora tezinde bulunan veriler ile bu çalışmada elde edilen veriler hem SP hem de GP karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Enjeksiyonda önemli parametre olması nedeniyle zemin tipi, enjeksiyon basıncı, rölatif sıkılık ve kür süresi parametreleri her iki çalışmada da aynı değerler seçilerek karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Çimento enjeksiyonunda en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaşılan su/çimento oranı 0,7 olan numuneler karşılaştırma için seçilmiştir (Mutman, 2007).

Karşılaştırma yaparken çimento enjeksiyonlarında 1 günlük numunelere serbest basınç deneyi yapılamadığı için sadece 7 günlük ve 28 günlük numuneler arasında karşılaştırma yapılabilmektedir. Kükürt enjeksiyonunda sadece kükürt kullanılırken, çimento enjeksiyonunda su+çimento kullanılmıştır. Çimento ve kükürt enjekte edilmiş numuneler Şekil 6.26'da şematik olarak verilmiştir. Çimento enjeksiyonu ve kükürt enjeksiyonundan

elde edilen serbest basınç mukavemetleri GP ve SP zeminler için aşağıda Tablo 6.7 ve Tablo 6.8’de sırasıyla verilmiştir.



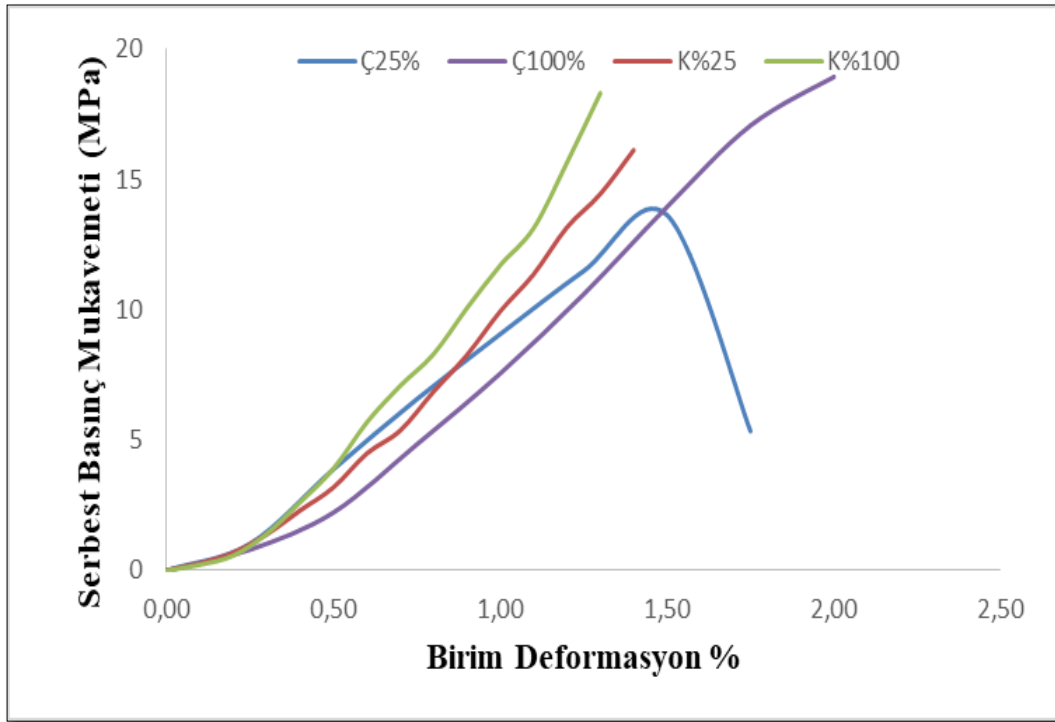
Şekil 6.26. Çimento ve kükürt enjekte edilmiş numunelerin şematik gösterimi

Tablo 6.7. GP zeminde çimento enjeksiyonu ile kükürt enjeksiyonunun serbest basınç mukavemetleri

Dr	Kür Süresi	Çimento SBM (MPa)	Kükürt SBM (MPa)
25%	7 Gün	8,77	16,8
	28 Gün	13,64	16,13
50%	7 Gün	8,08	17,72
	28 Gün	12,36	16,93
75%	7 Gün	7,37	18,52
	28 Gün	15,9	17,20
100%	7 Gün	8,43	19,29
	28 Gün	18,95	18,31

Farklı rölatif sıkılıktaki çimento ve kükürt enjekte edilmiş 28 günlük GP numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.27’de verilmiştir. Şekil 6.27’de verilen

gerilme-şekil değiştirme grafiğinden de görüleceği gibi kükürt enjeksiyonunda serbest basınç deneyi yapıldığında numuneler gevrek kırılıp parçalandığı için okuma alınamamıştır. Çimento enjekte edilmiş numunelerde ise maksimum gerilme değerinden sonra da şekil değiştirme devam edip numuneler daha sonra kırılmıştır. Kükürt enjeksiyonunda maksimum serbest basınç dayanımına kadar olan şekil değiştirmeler çimento enjeksiyonuna göre daha fazla olmaktadır. Kükürt enjeksiyonu edilmiş numuneler çimento enjekte edilmiş numunelerden daha gevrek kırılma olmuştur.

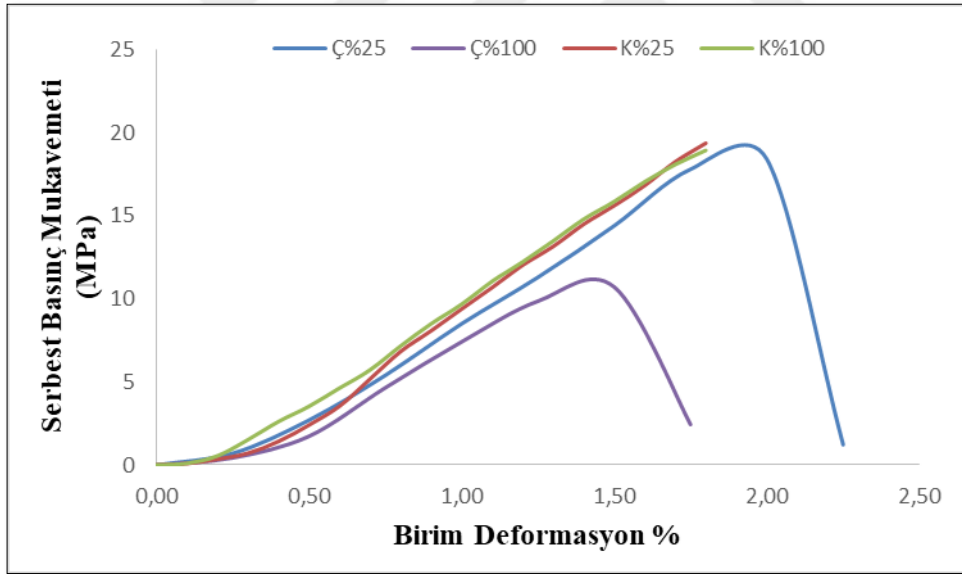


Şekil 6.27. Farklı rölatif sıklıktaki çimento ve kükürt enjekte edilmiş 28 günlük GP numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri

GP zeminlerde 28 günlük çimento enjekte edilmiş numunelerde en yüksek serbest basınç mukavemeti %100 rölatif sıklıkta 18,95 MPa çıkmıştır. Kükürt enjekte edilmiş numunelerde de %100 rölatif sıklıkta 18,31 MPa olarak bulunmuştur. GP zeminlerde %100 rölatif sıklık hariç bütün rölatif sıklık durumları için kükürt enjeksiyon edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri çimento enjekte edilmiş numunelerden daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 6.8. SP zeminde çimento enjeksiyonu ile kükürt enjeksiyonunun serbest basınç mukavemetleri

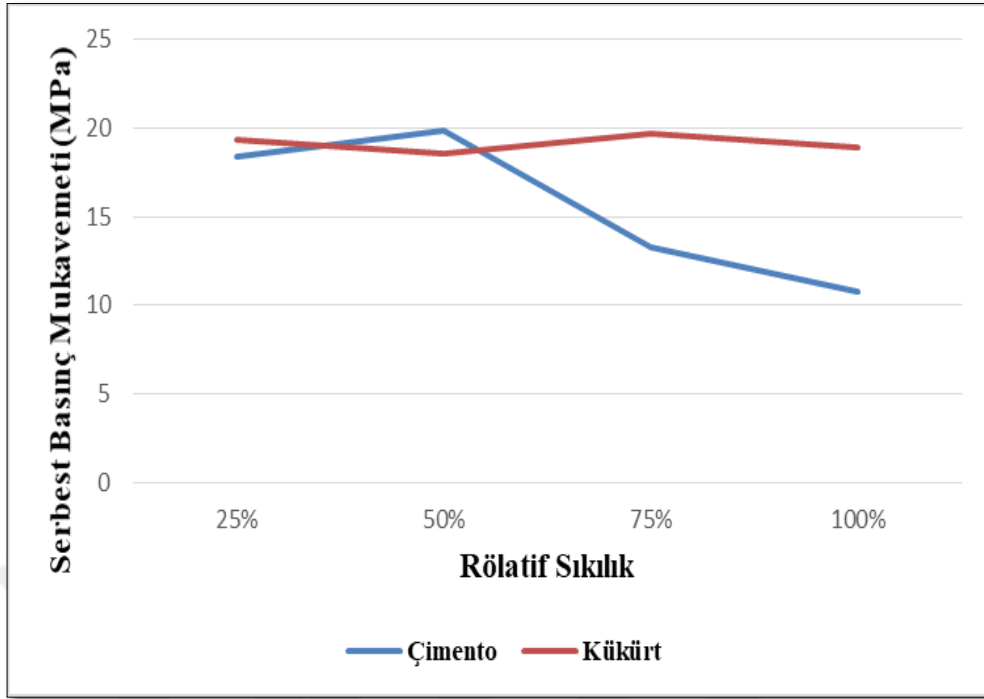
Dr	Gün	Çimento	Kükürt
25%	7 Gün	11,52	19,61
	28 Gün	18,4	19,37
50%	7 Gün	10,69	19,31
	28 Gün	19,83	18,57
75%	7 Gün	7,77	20,16
	28 Gün	13,26	19,72
100%	7 Gün	6,38	19,46
	28 Gün	10,73	18,94



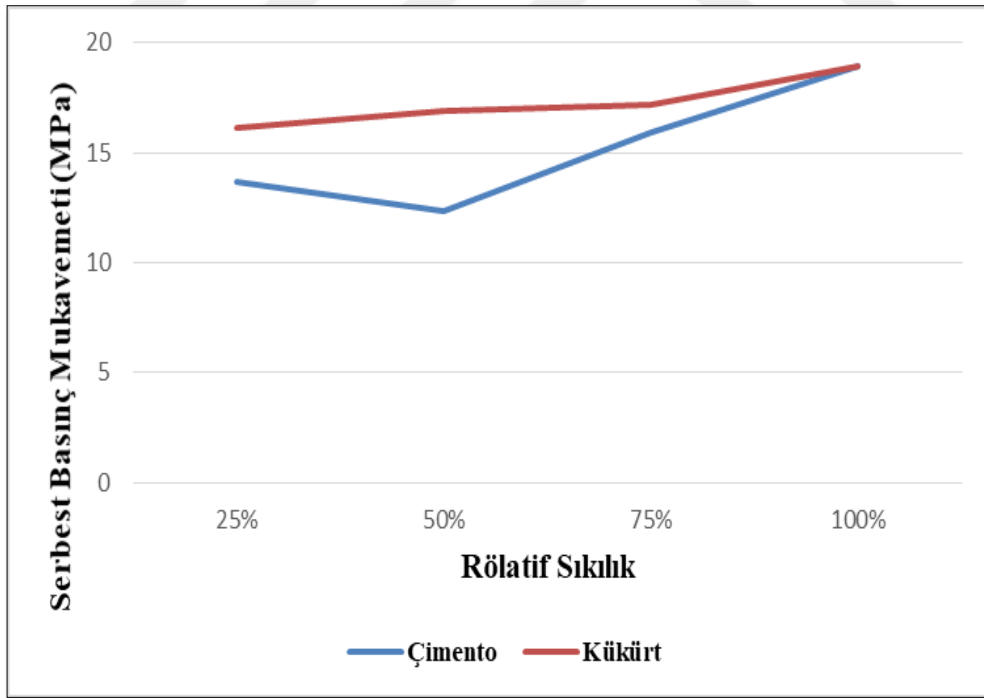
Şekil 6.28. Farklı rölatif sıklıktaki çimento ve kükürt enjekte edilmiş 28 günlük SP numunelerin gerilme ve şekil değiştirme eğrileri

6.4.1. Rölatif Sıklığın Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

Çimento enjekte edilmiş numunelerle kükürt enjekte edilmiş numuneler SP ve GP zemin tipinde rölatif sıklık ile serbest basınç mukavemetleri arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da gösterilmiştir.



Şekil 6.29 SP zeminde çimento ve kükürt enjekte edilmiş numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri



Şekil 6.30. GP zeminde çimento ve kükürt enjekte edilmiş numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri

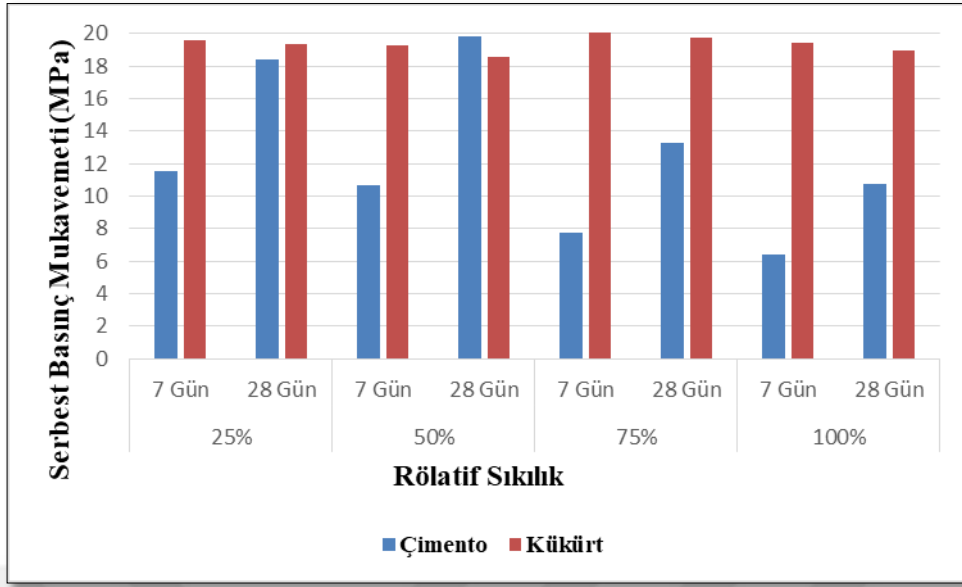
SP zeminde kükürt enjekte edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemetleri değerleri rölatif sıkılık değerinin değişiminden fazla etkilenmemiştir. Çimento enjeksiyonunda ise SP zeminlerde çimento daneli yapıda olduğu için %50 ve üzeri olan rölatif sıkılık değerlerinde yeterli enjeksiyon olmadığı için serbest basınç mukavemetleri oldukça düşük çıkmıştır. SP zeminler için rölatif sıkılık kükürt enjeksiyonunda serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir parametre değilken çimento enjeksiyonunda serbest basınç dayanımına etkiyen önemli bir parametre olduğu şekilde görülmektedir. SP zeminler için sıkı ve çok sıkı zeminlerde kükürt enjeksiyonu kullanılmalıdır.

GP zeminlerde ise rölatif sıkılık arttıkça kükürt enjeksiyonunda serbest basınç mukavemeti de artmaktadır. GP zeminlerde ince dane oranı az olduğu için çimento rahatlıkla numunelere işleyebiliyor. GP zeminlerde rölatif sıkılık arttıkça çimento ve kükürt enjeksiyonunda serbest basınç mukavemeti artış eğilimi göstermektedir.

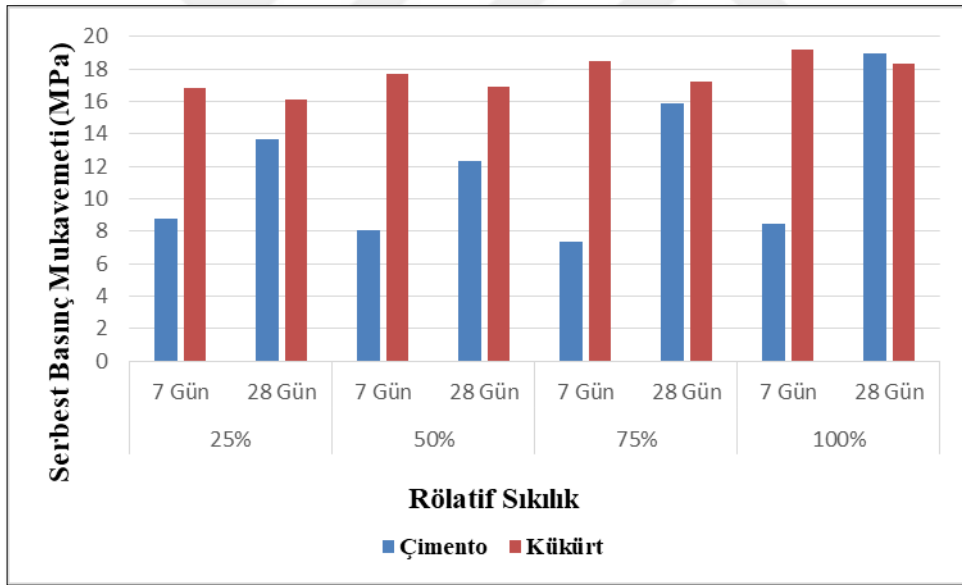
Zeminlerde ince dane oranı ve rölatif sıkılık arttıkça çimento daneli yapıda olduğu için enjekte edilebilirliği azalmaktadır. Fakat kükürt daneli yapıda olmadığı için ince daneli zeminlere başarılı bir şekilde enjekte olabilmektedir. Hatta yapılan çalışmada kükürt enjeksiyonunun ince dane oranı fazla olan zeminlerde daha iyi sonuç verdiği saptanmıştır.

6.4.2. Kür süresinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

Kükürt enjeksiyonunun çimento enjeksiyonuna göre en avantajlı olduğu durum hızlı priz alması ve 1 saatte nihai dayanımının yaklaşık %85 ini kazanması olarak gösterilebilir. (Şekil 6.12, 6.21). Çimento enjeksiyonunda 1 günlük numuneler yeterli dayanım kazanamadığı için sadece 7 günlük ve 28 günlük kür süresince elde edilen serbest basınç mukavemetleri değerlendirilmiştir. Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’de çimento ve kükürt enjekte edilmiş SP ve GP numunelerin 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri gösterilmiştir. Çimento enjeksiyonunda 7 gün ve 28 günde kırılan numuneler arasında yaklaşık %45-50 dayanım farkı varken kükürt enjeksiyonunda ise 7 günlük ve 28 günlük numunelerin dayanımları oldukça yakın çıkmıştır. Hızın önemli olduğu projelerde zemin enjeksiyon yönteminde çimento yerine kükürt kullanmak zamandan tasarruf sağlayacaktır.



Şekil 6.31 Çimento ve kükürt enjekte edilmiş SP numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri

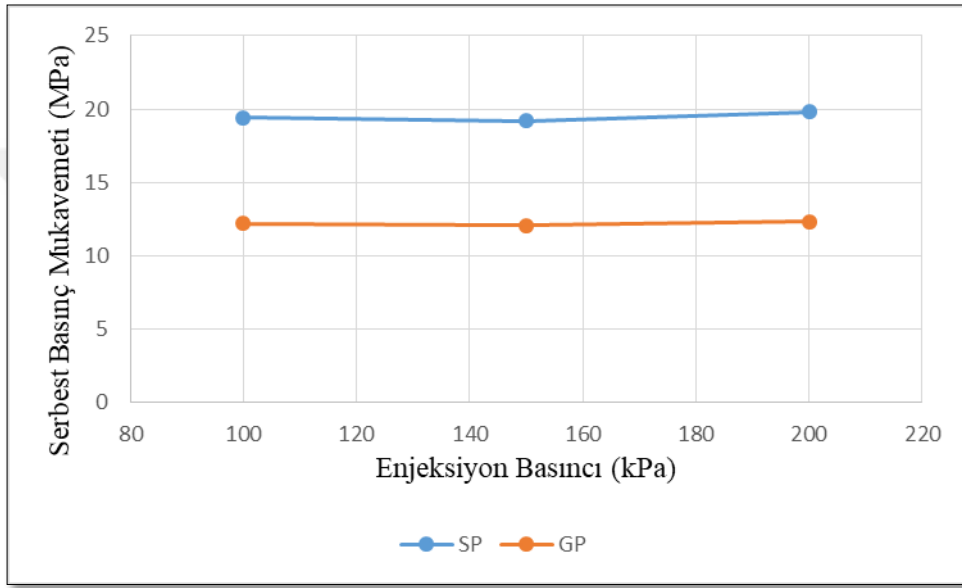


Şekil 6.32. Çimento ve kükürt enjekte edilmiş GP numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri

6.4.3. Enjeksiyon Basıncının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerinde Etkisi

Kükürt enjeksiyonunda enjeksiyon basıncı değişiminin incelendiği %50 rölatif sıklıktaki zemin seçildiği için çimento enjeksiyonunda da aynı rölatif sıklık seçilmiştir. Kükürt enjekte edilmiş numunelerde enjeksiyon basıncının serbest basınç mukavemeti için

önemli bir parametre olmadığı Şekil 6.13 ve Şekil 6.22’de sunulmuştur. Çimento enjeksiyonunda da benzer olarak enjeksiyon basıncının değişimiyle serbest basınç mukavemetini hem SP zeminler hem de GP zeminler için değiştirmedığı Şekil 6.33’te gösterilmektedir. Enjeksiyon için yeterli basınç sağlandıktan sonra enjeksiyon basıncının değişimi hem kükürt hem de çimento enjeksiyonunda önemli bir parametre olmadığı görülmektedir. Kükürt çimento gibi daneli yapıda olmadığı için zemin boşluklarına daha kolay sızabildiği için daha düşük enjeksiyon basınçlarında zemine enjekte edilebilir.



Şekil 6.33. Dr %50 için çimento enjekte edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti ve enjeksiyon basıncı ilişkisi (Mutman, 2007)

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürtün zemin enjeksiyonu uygulamalarında çimento harcı yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Oda sıcaklığında katı formda olan ve petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen saf kükürt 130 ± 5 °C’de eritilerek rölatif sıklığı %25, %50, %75 ve %100 olan üniform kum (SP) ve üniform çakıl (GP) zemin numunelerine düşük basınçlı enjeksiyon şeklinde uygulanmıştır. Numuneler serbest basınç deneyine tabi tutularak rölatif sıklık, kür süresi ve enjeksiyon basıncı değişimlerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Daha sonra literatürde yer alan mevcut çalışmadan elde edilen aynı rölatif sıklık, gradasyon ve enjeksiyon basıncıyla hazırlanmış çimento enjeksiyonu deneyi sonuçları ile kükürt enjeksiyonundan elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir,

- Kükürt enjeksiyonunda en yüksek serbest basınç mukavemeti % 75 rölatif sıklıkta hazırlanan SP numunelerde 21,06 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük serbest basınç mukavemeti ise GP zeminlerde %25 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerde 16,13 MPa olarak elde edilmiştir.
- SP ve GP gradasyonunda hazırlanan 1, 7 ve 28 günlük tüm numunelerde çoğunlukla göçmenin gevrek kırılma sonucunda oluştuğu ve bundan dolayı ani göçmelerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Kükürt enjeksiyonunda SP numunelerde rölatif sıklık parametresi serbest basınç dayanımında çok etkin bir parametre olmadığı görülmüştür. GP zeminlerde ise bu etki oldukça sınırlı kalmakla beraber, rölatif sıklık arttıkça serbest basınç mukavemeti %6 - %11 aralığında artış göstermiştir.
- Kükürt enjekte edilmiş numunelerin 28 günlük nihai dayanıma yaklaşık olarak 1 gün sonunda ulaştıkları görülmüştür. SP ve GP numuneler 7 günde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaşmıştır. Kükürtün katılma sürecinde kristal yapısında meydana gelen hacim değişiklikleri sonucunda oluşan iç gerilmeler ve bu gerilmelerin neden olduğu çatlaklar basınç dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Bundan dolayı 28 gün bekletilen numunelerin mukavemetlerinde 7 günlük değerlere oranla yaklaşık olarak %3-7 gibi dayanım kaybı olduğu görülmektedir.

- Uzun süreli basınç dayanımı değişimlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan 180 ve 360 günlük serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda kükürt enjekte edilen numunelerin basınç dayanımı değerlerinde 28 günlük değerlere göre herhangi bir azalma olmadığı belirlenmiştir.
- SP numunelerde çimento ve kükürt enjekte edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında %25 ve %50 rölatif sıklıktaki numuneler birbirine yakın çıkmasına rağmen %75 ve %100 rölatif sıklıktaki zeminlerde kükürt enjekte edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemetleri sırasıyla %48 ve %73 daha fazla çıkmıştır. GP numunelerde ise kükürt enjeksiyonu %100 rölatif sıklık durumu hariç diğer rölatif sıklık değerlerinde %17-%36 daha fazla çıkmıştır.
- Kükürt veya çimento harcı enjekte edilmiş GP ve SP numunelerde uygulanan enjeksiyon basıncının değişmesiyle serbest basınç mukavemeti değerlerinin değişmediği belirlenmiştir. Çimento harcı enjeksiyon uygulamalarında olduğu gibi kükürt enjeksiyonunda da enjeksiyon için yeterli basınç değerinden daha yüksek basınç değerlerinde uygulama yapıldığında serbest basınç mukavemetlerinde önemli ölçüde değişiklik olmadığı görülmüştür.

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirildiğinde petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen saf kükürt, hızlı priz alma, düşük viskozite ve yüksek dayanım değerleri ile öne çıkmaktadır. İnşaat hızının önemli olduğu durumlarda 28 günde istenilen dayanıma ulaşan çimentonun kür süresi çok uzun ve ince taneli zeminlere nüfuz etme kabiliyeti düşük olduğundan ince daneli zeminlerde kükürt enjeksiyonun çimento harçlarına alternatif olarak kullanabileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 548. (1988). Guide for Mixing and Placing Sulfur Concrete in Construction. *ACI Materials Journal*, 85, 314-325.
- Akbulut, S. (1999). Enjeksiyon ile Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 100709.
- Andrus, R. D., Chung R. M., (1995). Ground Improvements Techniques for Liquefaction Redemination Near Existing Lifeliness. *National Institute of Standarts and Technology Report NISTIR 5714*, Gaithersburg, MD, 74 pp.
- ASCE. (2010). *Compaction Grouting Consensus Guide (G-I 53-10)*. New York.
- ASTM. (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (D422-63)*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2012). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (C127-12)*. West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (D2166 -16)*. West Conshohocken, PA.
- Bacon, R.F., Davis, H.S. (1921). Recent Advances in the American Sulfur Industry. *Chemical and Metallurgical Engineering*, 1921 (24), 65-72.
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H.B., Muntohar, A.S. (2005). Stabilization of Residual Soil With Rice Husk Ash and Cement. *Constr. Build. Mater.*, 19(6), 448–453.
- Boulanger, R.W., Hayden, R.F. (1995). Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121 (12).
- Burke, G.K. (2007). Vertical and Horizontal Groundwater Barriers Using Jet Grout Panels and Columns. In: Grouting For Ground Improvement. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 168, 1–10. New York.
- Burwell Jr, E. B., (1958). Cement and Clay Grouting of Foundations: Practice of The Corps of Engineers. *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(1), 1551-1.
- Ciak, N., Harasymiuk, J. (2013). Sulphur Concretes Technology and Its Application to the Building Industry. *Technical Sciences*, 16(4). 323-331.
- Chen, J. J., Kwan, A. K. H., Jiang, Y. (2014). Adding Limestone Fines as Cement Paste Replacement to Reduce Water Permeability and Sorptivity of Concrete. *Construction and Building Materials*, 56, 87-93.

- Çokça, E. (2001). Use of Class C Fly Ashes for The Stabilization of an Expansive Soil. *J. Geotech, Geoenviron. Eng.*, 127:7(568), 568–573. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)
- Consoli, C. N., Foppa, D., Festugato, L., Heineck, K. S. (2007). Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *J. Geotech. And Geoenvir. Engrg.*, 133(2), 197-205.
- Coskun, S. B., & Tokdemir, T. (2020). Modelling of Permeation Grouting Through Soils. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 10(1), 11-16.
- Costa, A. R. D., Gonçalves, J. P. (2021). Accelerated Carbonation of Ternary Cements Containing Waste Materials. *Construction and Building Materials*, 302, 124159.
- Çinicioglu, F. (1997). Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu. Birsen Yayınları, İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Darnell, G. (1991) Sulfur Polymer Cement, a New Stabilization Agent for Mixed and Low-Level Radioactive Waste, *EG and G Idaho, Inc*, EGG-M-91419; CONF-910840-11 ON: DE92017889.
- Demirtürk, D., Tunç, G. (2016). Susuz Beton ve Türkiye Gerçeği, *Hazır Beton*. 69-82.
- Dobrosmyslov, S. S., Zadov, V. E., Nazirov, R. A., Nagibin, G. E., Voronin, A. S., Simunin, M. M., Khartov, S. V. (2022). High Strength Construction Material Based on Sulfur Binder Obtained by Physical Modification. *Buildings*, 12(7), 1012.
- Erol, A. O., Çekinmez, Z. (2018). *Jet Enjeksiyonu Yöntemi*, Yüksel Proje Yayınları, Ankara, Yüksel Proje.
- Edil, T., Acosta, H., Benson, C. (2006). Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash. *J. Mater. Civ. Eng.*, 8(2), 283–294.
- Fediuk, R.S. (2016), Mechanical Activation of Construction Binder Materials by Various Mills, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Russia, 26–28 November 2015.
- Fediuk, R., Yevdokimova, Y.G., Smoliakov, A., Stoyushko, N.Y., Lesovik, V., (2017). Use of Geonics Scientific Positions for Designing of Building Composites for Protective (Fortification) Structures, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Russia, 18–20 May 2017.
- Fediuk, R., Mugahed Amran, Y. H., Mosaberpanah, M. A., Danish, A., El-Zeadani, M., Klyuev, S. V., Vatin, N. (2020). A Critical Review on the Properties and Applications of Sulfur-Based Concrete. *Materials*, 13(21), 4712.
- Frare, L. M., Vieira, M. G. A., Silva, M. G. C., Pereira, N. C., Gimenes, M. L. (2010). Hydrogen Sulfide Removal From Biogas using Fe/EDTA Solution: Gas/Liquid Contacting and Sulfur Formation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 29(1), 34-41.

- Fischer, H. (1974). Burner/Fire Box Design Improves Sulfur Recovery. *Hydrocarb. Process.* 53, 125–130.
- Gallavresi, F. (1992), Grouting Improvement of Foundation Soils. *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication, ASCE, 1*, 1-39.
- Gao, X.L., Li, G.X., Dong, X.M., Et Al. (2019). Effects of Sulfur on the Growth of Replanted Young Peach Trees. *Deciduous Fruits*, 41, 88-95.
- Grugel, R.N. (2012). Integrity of Sulfur Concrete Subjected to Simulated Lunar Temperature Cycles, *Advances in Space Research*, 50, 1294-1299.
- Hager, I., Golonka, A., Putanowicz, R. (2016). 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction, *Procedia Engineering*, 151, 292-299.
- Harrison, P. (2012). *Global Sulphur Market Outlook*, CRU Group.
- Hewlett, P. C. (2005). *Lea's Chemistry of Cement And Concrete* (4th Ed). Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Hossain, K. M. A., Lachemi, M., Easa, S. (2007). Stabilized Soils for Construction Applications Incorporating Natural Resources of Papua New Guinea. *Resour. Conserv. Recycl.*, 51(4), 711–731.
- Howarth, R.W., Stewart, J., Ivanov, M.V. (1992). *Sulphur Cycling on the Continents: Wetlands, Terrestrial Ecosystems and Associated Water Bodies*. John Wiley & Sons, Ltd. Hoboken, NJ, USA.
- Huang, W. H. (2001). Improving the Properties of Cement–Fly Ash Grout Using Fiber and Superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 31(7), 1033-1041.
- Ishihara, K., Kokusho, T., Silver, M., L. (1989). Recent Developments in Evaluating Liquefaction Characteristics of Local Soils, *12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janeiro, 13-18 August 1989.
- İnal, E. (2015). Zeminlerin Taşıma Gücünün Çimento Enjeksiyonu ile İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 392369.
- İncecik, M., Ceren, İ. (1995). Cement Grouting Model Tests, *İstanbul Teknik Üniversitesi Bülteni*, 48, 305-317.
- JSCE, (1977). Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structure. Earth Structure and Foundation in Japan, Japan Society of Civil Engineers.
- Karol, R.H. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization* (3rd ed.). Marcel Dekker, New York.

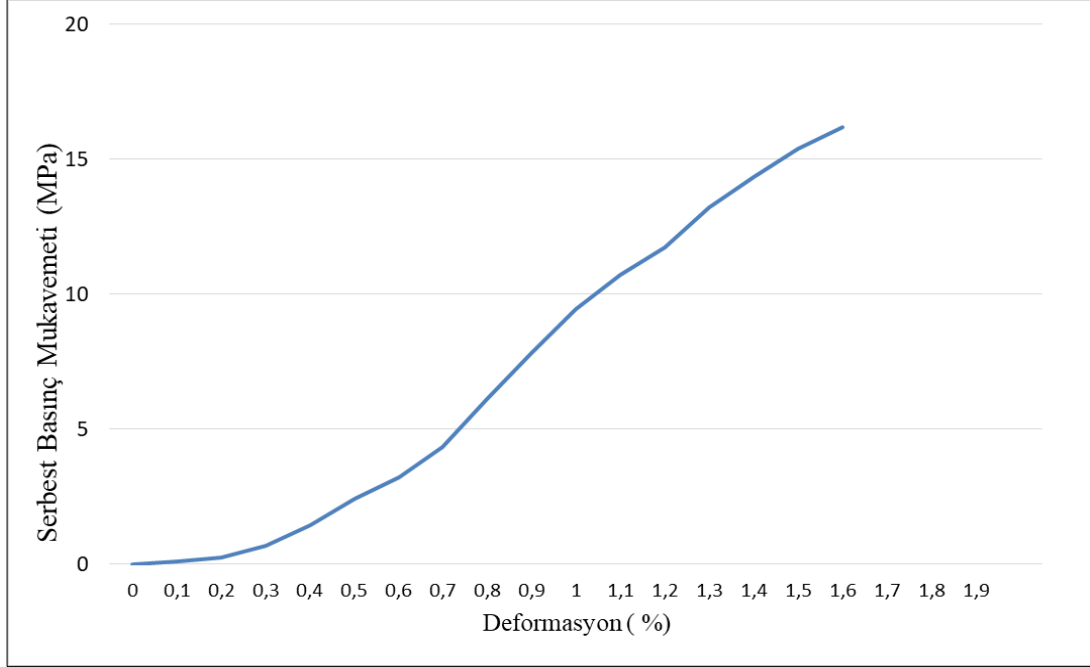
- Kazemian, S., Huat, B. B., Arun, P., Barghchi, M. (2010). A Review of Stabilization of Soft Soils by Injection of Chemical Grouting. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(12), 5862-5868.
- Korea, N. (2007). *2006 Minerals Yearbook*. US Geological Survey, Reston, VA, USA.
- Lin, S. L., Lai, J. S., Chian, E. S. (1995). Modifications of Sulfur Polymer Cement (SPC) Stabilization and Solidification (S/S) Process. *Waste Management*, 15(5-6), 441-447.
- Loov, R. E., Vroom, A. H., Ward, M. A. (1974). Sulfur Concrete-A New Construction Material. *PCI Journal*, 5(1), 86-95.
- Maaitah, O. N. (2012). Soil Stabilization by Chemical Agent. *Geotech. Geol. Eng.*, 30(6), 1345–1356.
- Meyer, B. (2013). *Sulfur, Energy, and Environment* (1st ed.). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Mitchell, J.K. (1981). Soil Improvement: State-of-the-Art, Session 12, *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, 15-19 June 1981.
- Mohamed, A.M.O., Gamal, M.E. (2017). Sulfur Based Hazardous Waste Solidification, *Environmental Geology*, 53(1), 159-175.
- Mohamed, A.M.O., El Gamal, M.M. (2009). Hydro-Mechanical Behavior of a Newly Developed Sulfur Polymer Concrete, *Cement & Concrete Composites*, 31, 186-194.
- Mohamed, A.M., El Gamal, M.M. (2010), *Sulfur Concrete for the Construction Industry*, J. Ross Publishing, USA.
- Mohamed, A. M., El Gamal, M. (2012). Treatment Of Collapsible Soils Using Sulfur Cement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(1), 65-77. DOI: 10.3328/IJGE.2012.06.01.65-77
- Mutman, U. (2007). Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 282689.
- Mohammadi, A., Dehestani, M., Aff. M., Shooshpasha I., Asadollahi S. (2014). Mechanical Properties of Sandy Soil Stabilized with Modified Sulfur, *American Society of Civil Engineers*, 27(4), DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533 .0001059
- Nicholson, P. G. (2014). *Soil Improvement and Ground Modification Methods*, Butterworth-Heinemann. Elsevier.

- Paparozzi, E.T., Darrow, P.O., Mccallister, D.E., Stroup, W.W. (1994). Effect of Varying The Nitrogen and Sulfur Supply on the Flowering of Poinsettia, *J. Plant Nutr*, 17, 593–606.
- Ober, J.A. (2002). *Materials Flow of Sulfur*, U.S. Geological Surevey: Reston, VA, USA.
- Öztürk O. (2019). Kükürt ve Kükürt Polimer Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 618931.
- Öztürk, O., Öner, A. (2022). Long-term Durability of Bitumen Modified Sulfur Polymer Concrete Under Freeze–Thaw Cycles, *Int. J. Civ. Eng.*, 20, 529–543. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00672-2>.
- Saleh, S., Yunus, N. Z. M., Ahmad, K., Ali, N. (2019). Improving the Strength of Weak Soil Using Polyurethane Grouts: A Review. *Construction and Building Materials*, 202, 738-752.
- Sarsılmaz, O.M. (2017). Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sınıflandırılması, İncelenmesi, Değerlendirilmesi ve Anılan Yöntemlerin Seçilme Kriterleri Üzerine Kapsamlı bir Araştırma.Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir, 498028.
- Shin, M., Kim, K., Gwon, S.W., Cha, S. (2014). Durability of Sustainable Sulfur Concrete with Fly Ash and Recycled Aggregate Against Chemical and Weathering Environments, *Construction and Building Materials*, 69, 167-176.
- Shroff, A.V. (2009). *Development in Design and Executive in Grouting Practice*, 31st IGS Annual Lecture At IGC-2009, Guntur.
- Speight, J.G., Ozum, B. (2001). *Petroleum Refining Processes*. CRC Press, FL, USA: Boca Raton.
- Sogancı, A.S. (2011). Determination of the Geotechnical Properties of the Pumice Type Soils in Nevşehir Region in Terms of Load-Bearing Capacity and Settlement and Their Stabilization. Ph.D. Thesis, Selcuk University. Institute of Science, Konya, 291218.
- Şişman, A.E. (2021). Sıkıştırılmış Dolgularda Enjeksiyon Yöntemiyle Zemin İyileştirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 675843.
- Taylor, L., Brown, T., Lusty, P., Hitchen, K., Colman, T., Highley, D. (2006). *United Kingdom Minerals Yearbook 2005: Statistical Data to 2004*. British Geological Survey: Keyworth, UK.
- Tunçdemir, F. (2004). Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniği ile İyileştirilmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 59-64.

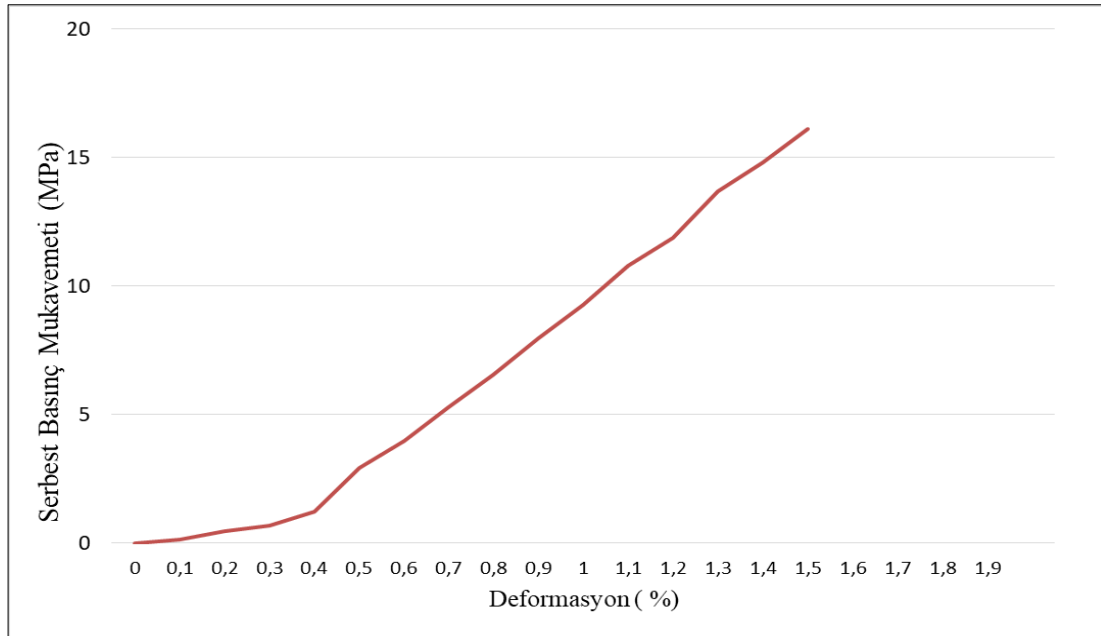
- Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı. (2022). 2021 Yılı Ham Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu, *Türkiye Petrolleri Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı*, 8-9.
- U.S.Army. (1984). U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design: Grouting Technology. *CECW-EG Engineer Manual*.
- URL-1: <https://silo.tips/download/jetgrout-kolon-yntem-le-zemn-yletrmes-y/>, (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL-2: <https://haywardbeker.com/>, (Ziyaret tarihi: 22 Ekim 2020).
- URL-3 : <https://www.cozumenjeksiyon.com.tr/perde-enjeksiyonu/>, (Ziyaret tarihi: 23 Kasım 2022).
- Vlahovic, M.M., Martinovic, S.P., Boljanac, T.D., Jovanic, P.B., Volkov-Husovic, T.D. (2011). Durability of Sulfur Concrete in Various Aggressive Environments, *Construction and Building Materials*, 25, 3926-3934.
- Wagenfeld, J.G., Khalid, A.A., Almheiri, S., Slavens, A.F., Calvet, N. (2019). Sustainable Applications Utilizing Sulfur, A By-Product from Oil and Gas Industry. A State of the Art Review, *Waste Management*, 95, 78-89.
- Warner, J. (2004). *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures*. John Wiley and Sons.
- Yıldırım, S. (2002). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, Birsen Yayınları, İstanbul: Birsen Yayınları.
- Yıldız, M., Sogancı, A.S. (2015). Improvement of the Strength of Soils Which Comprises Granular Pumice By Injection of Cement Under Low Pressure. *Scientia Iranica* 22(1), 81-91.
- Yılmaz, I.,Yıldırım, M., Keskin, İ. (2014). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler* (2. baskı). Seçkin, Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Zwicker, D.A. (1990). *Bright Future for Brimstone*, The Lamp, Exxon, Fall, 10-15.

EKLER

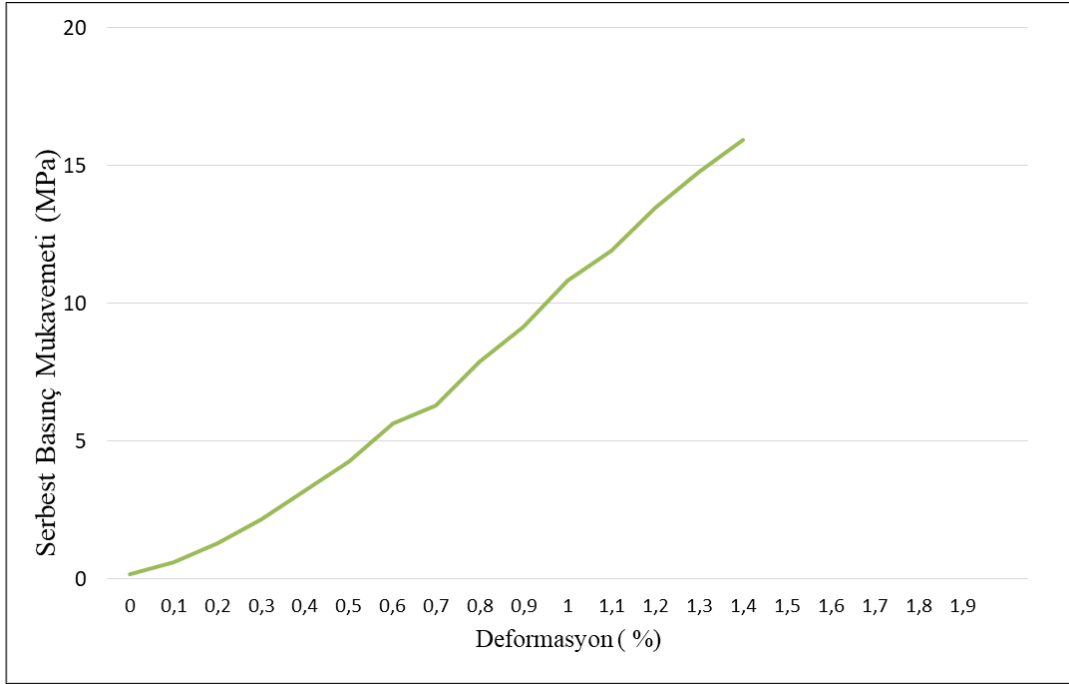
EK-A



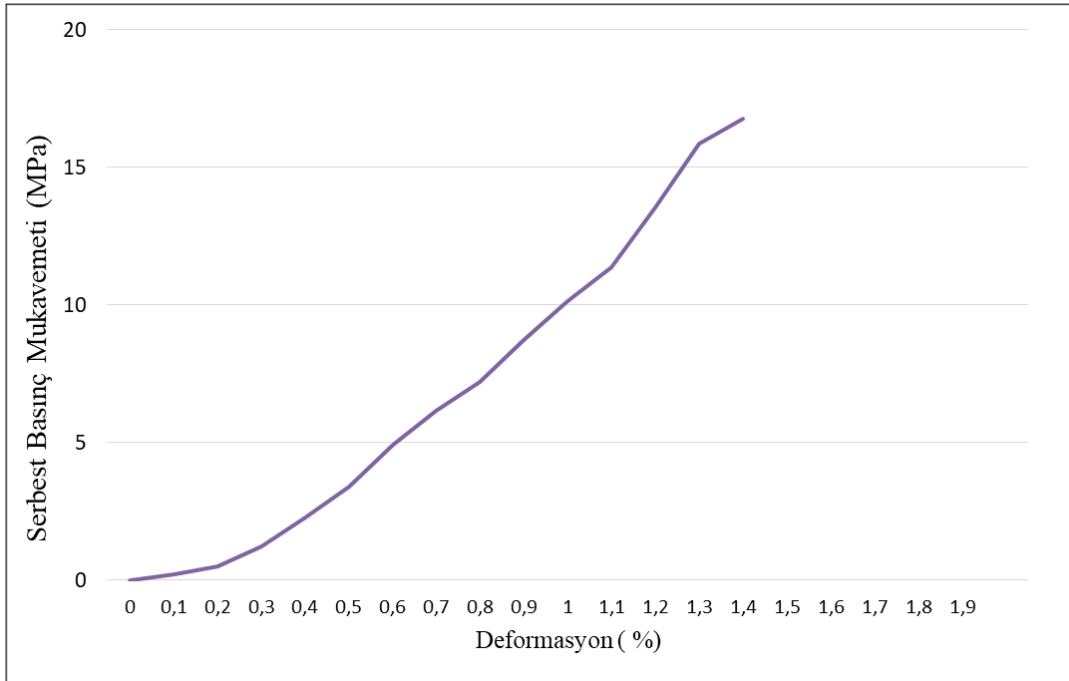
Şekil A.1. 100 kPa enjeksiyon basıncı ile 28 Günlük GP numunelerin gerilme – şekil değiştirme eğrisi



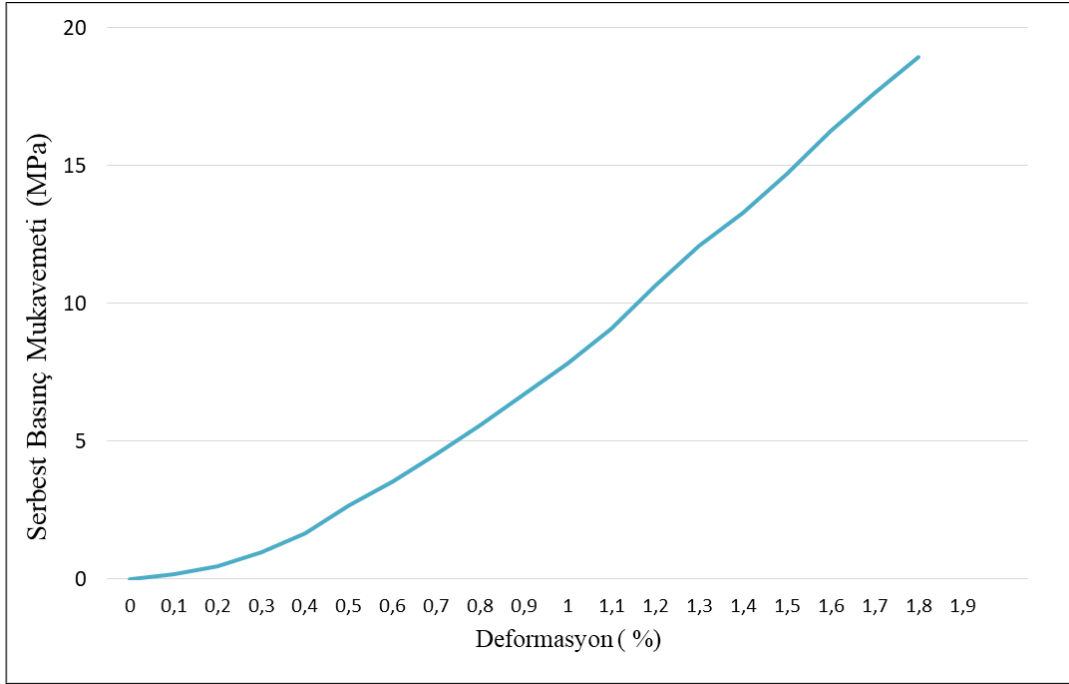
Şekil A.2. 400 kPa enjeksiyon basıncı ile 28 Günlük GP numunelerin gerilme – şekil değiştirme eğrisi



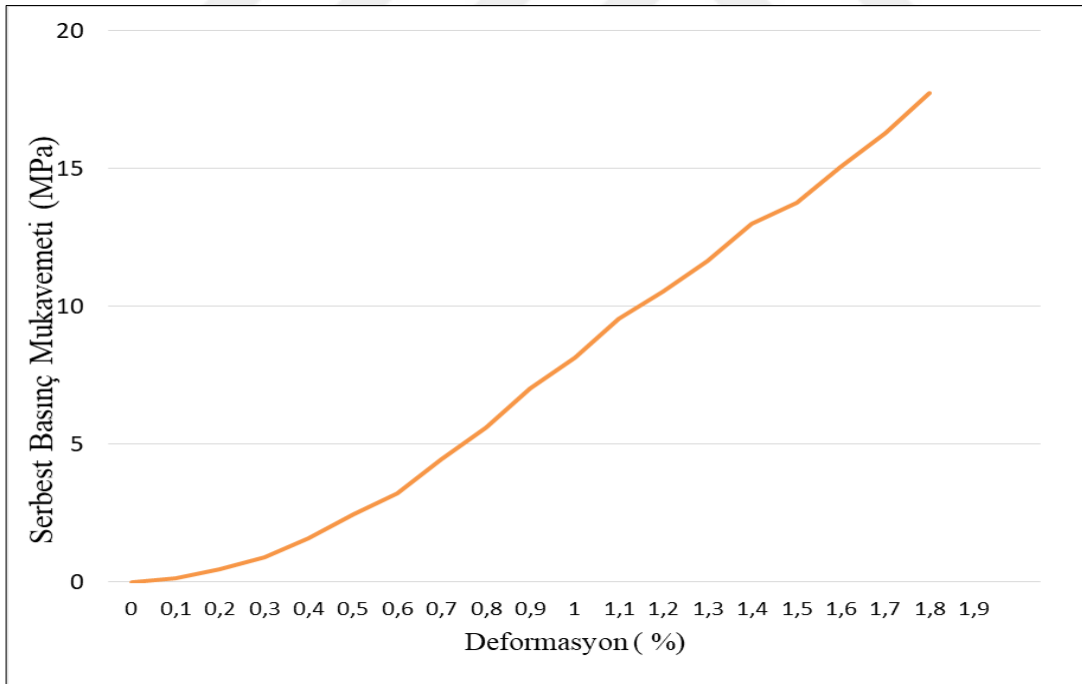
Şekil A.3. Dr %50 180 Günlük GP numunelerin gerilme – şekil değiştirme eğrisi



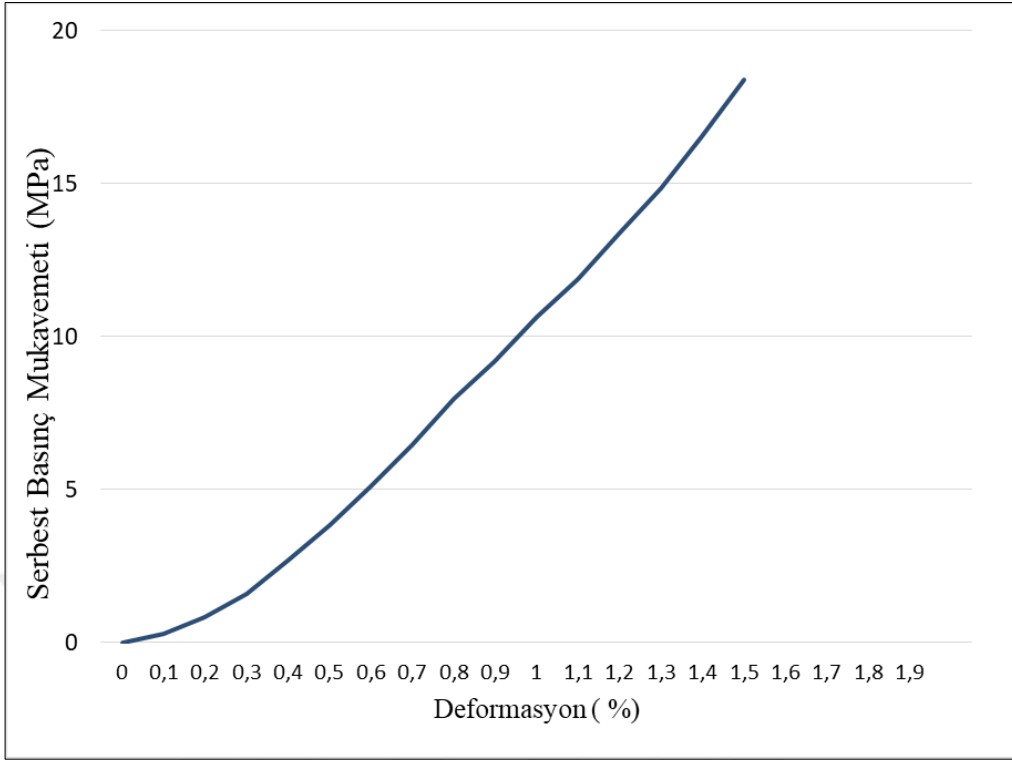
Şekil A.4. 360 Günlük GP numunelerin gerilme – şekil değiştirme eğrisi



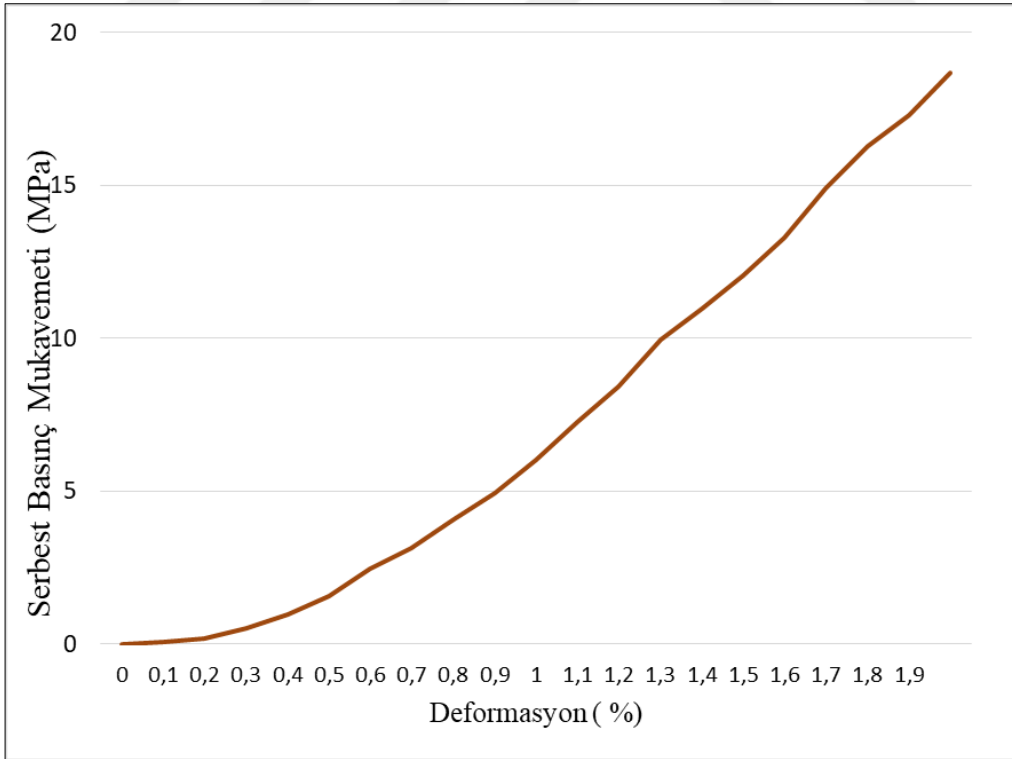
Şekil A.5. 100 kPa enjeksiyon basıncı ile 28 Günlük SP numunelerin gerilme – şekil değiştirme eğrisi



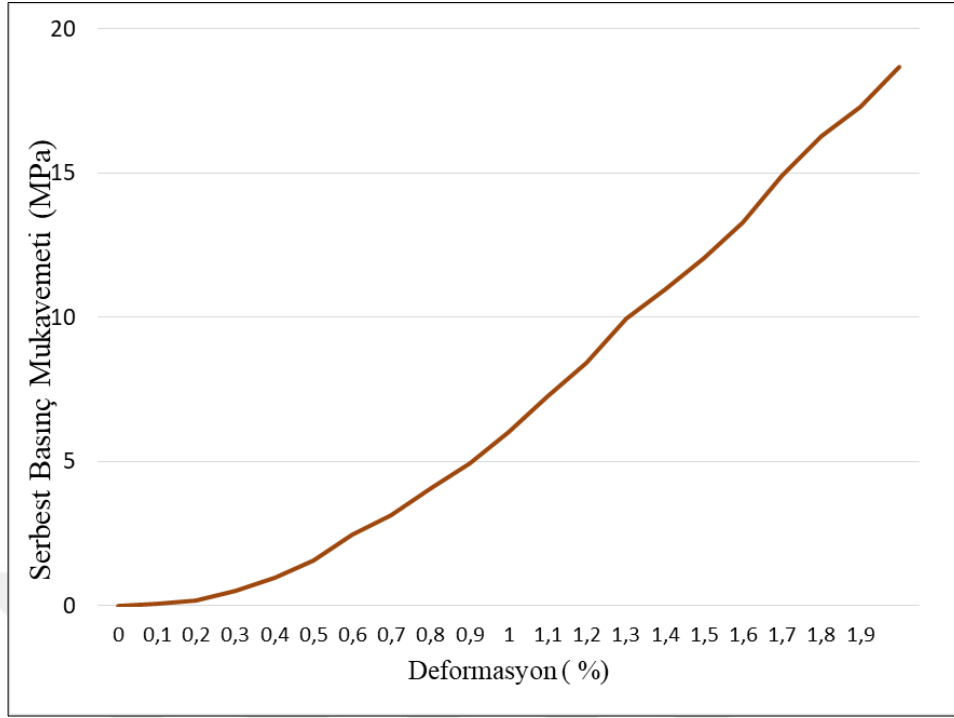
Şekil A.6. 400 kPa enjeksiyon basıncı ile 28 günlük SP numunelerin gerilme – şekil değiştirme eğrisi



Şekil A.7. 600 kPa enjeksiyon basıncı ile 28 günlük SP numunelerin gerilme- şekil değiştirme eğrisi



Şekil A.8. Dr %50 180 Günlük SP numunelerin gerilme - şekil değiştirme eğrisi



Şekil A.9. Dr %50 360 Günlük SP numunelerin gerilme – şekil değiştirme eğrisi

EK B



Şekil B.1. Başarılı enjekte olmuş GP numune örneğinin 40x fotoğrafı



Şekil B.2. 28 günlük saf kükürt numunelerinde oluşan gerilme çatlaklarının 40x fotoğrafı



Şekil B.3. İçinde hava boşluğu kalmasından dolayı başarısız olmuş GP enjeksiyon numunesinin 40x fotoğrafı



Şekil.B.4. Yetersiz enjeksiyon olmuş GP numunesi 40x fotoğrafı



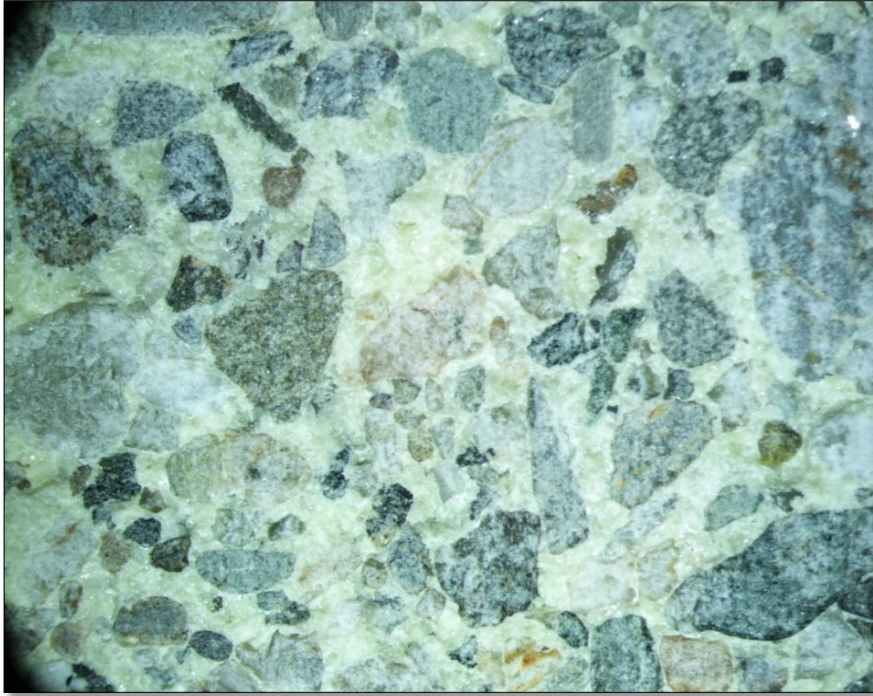
Şekil B.5. Yetersiz enjeksiyon olmuş SP numunesinin 40x fotoğrafı



Şekil B.6. Başarısız enjeksiyon olmuş SP numunenin 40x fotoğrafı



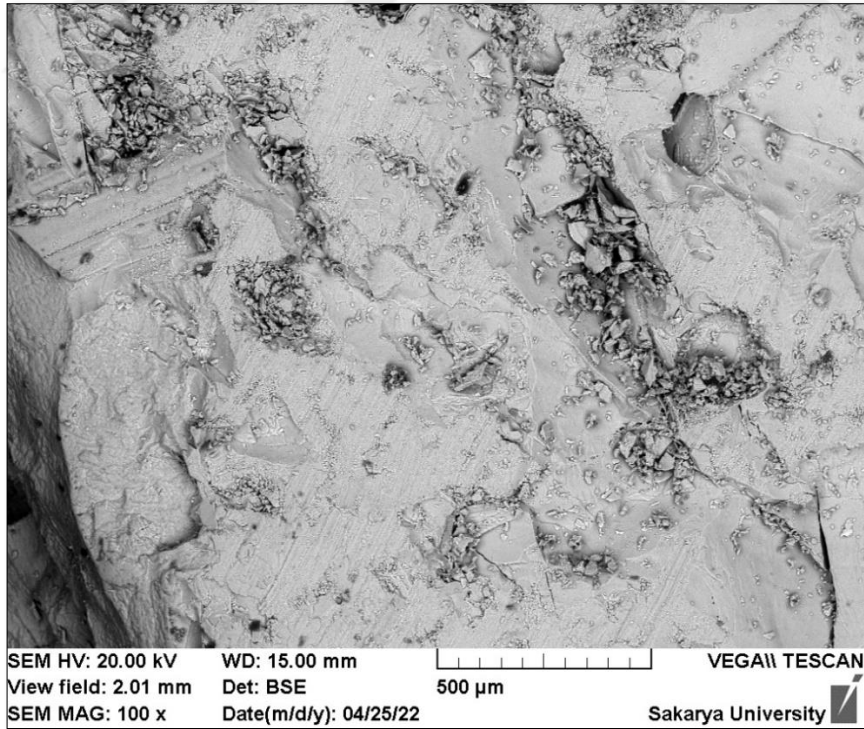
Şekil B.7. 100 kPa enjeksiyon basıncı uygulanmış SP numunenin 40x fotoğrafı



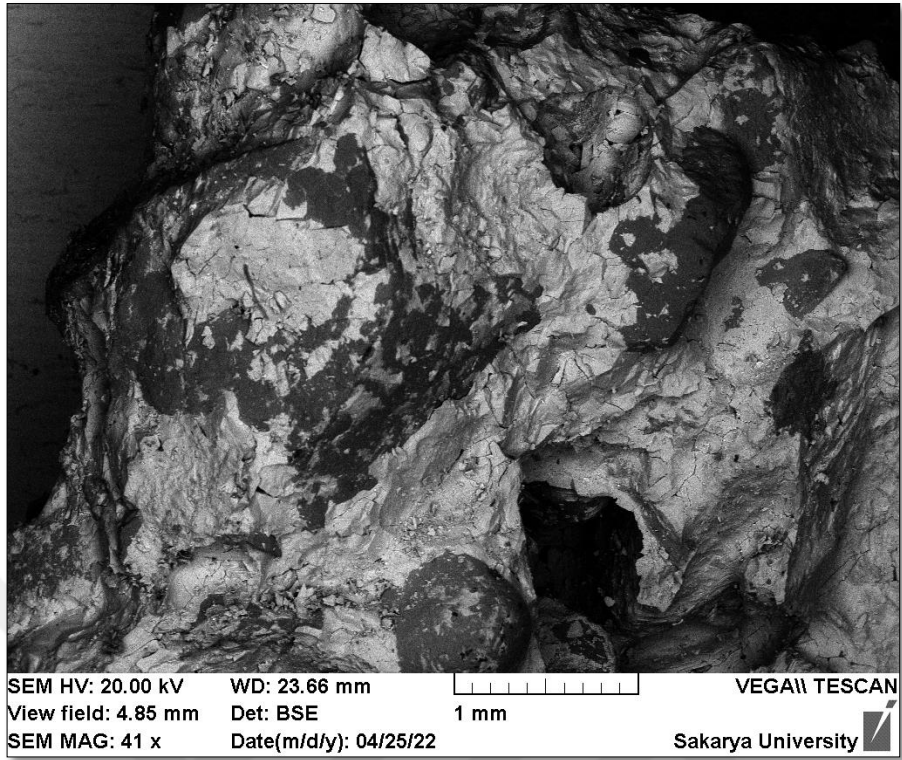
Şekil B.8. 400 kPa enjeksiyon basıncı uygulanmış SP numunenin 40x fotoğrafı



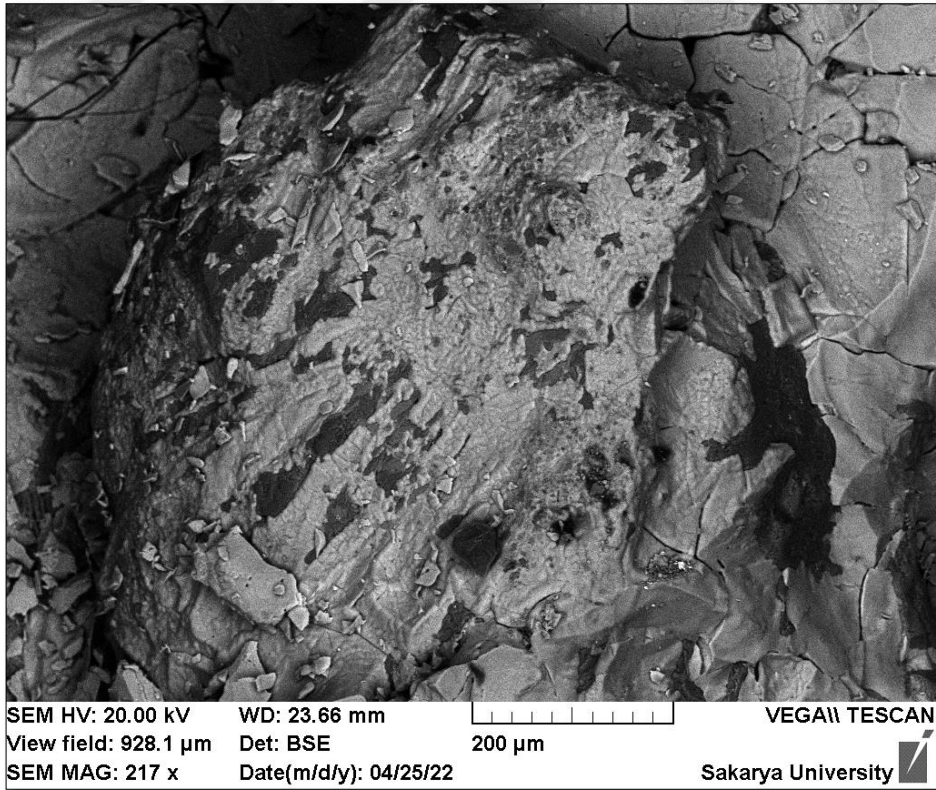
Şekil B.9. 600 kPa enjeksiyon basıncı uygulanmış SP numunenin 40x fotoğrafı



Şekil B.10. Saf kükürtün SEM görüntüsü



Şekil B.11. Kükürt enjekte edilmiş 7 günlük SP numunenin SEM görüntüsü



Şekil B.12. Kükürt enjekte edilmiş 28 günlük SP numunenin SEM görüntüsü

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Karadeniz, M., Mutman, U. (2016). Standart Penetration Test Correlation for Kocaeli, *ICENS International Conference on Engineering and Natural Science*, Sarajevo, 24-28 May 2016.

Karadeniz, M., Mutman, U. (2019). İri Daneli Zeminlerde Kükürt Enjeksiyonu ile Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi, *8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, 13-15 Kasım 2019.

Karadeniz M., Öztürk, O., Kara, Z., Opan, M. (2022). Düşük Basıncılı Kükürt Enjeksiyonunun Serbest Basıncı Mukavemetine Etkisi, *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 322-342. DOI: 10.34186/klujes.1172577



ÖZGEÇMİŞ

Murat KARADENİZ, lise öğrenimini Kocaeli’de Oruç Reis Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun olmuştur. 2015 yılında Kocaeli üniversitesinde İnşaat Mühendisliği Anabilim dalından yüksek lisansını bitirmiştir. 2011-2012 yıllarında Bayburt Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 12. Dönem İMO Kocaeli Şubesi Yönetim Kurulu Üyesi olarak görev yapmıştır. 2013 yılı itibari ile Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

