

**KOLLOİDAL SİLİKA ENJEKSİYONLU İNCE-ORTA
BOYUT DAĞILIMINA SAHİP KUMUN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER
ALTINDA DAVRANIŞI**

Serkan YILDIZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006
ANKARA**

Serkan YILDIZ tarafından hazırlanan KOLLOİDAL SİLİKA ENJEKSİYONLU İNCE-ORTA BOYUT DAĞILIMINA SAHİP KUMUN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr.Murat MOLLAMAHMUTOĞLU
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ufuk ERGUN

Üye : Prof.Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

Üye : Prof.Dr. Erdal ÇOKÇA

Üye : Prof.Dr. Tekin GÜLTOP

Üye : Yrd.Doç.Dr. Kurtuluş SOYLUK

Tarih : 12/06/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Serkan YILDIZ

**KOLLOİDAL SİLİKA ENJEKSİYONLU İNCE-ORTA
BOYUT DAĞILIMINA SAHİP KUMUN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER
ALTINDA DAVRANIŞI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Serkan YILDIZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2006**

ÖZET

Doymuş silisik asit çözeltilerinden üretilen kolloidal silika süspansiyonu, çok küçük partikül boyutu ile öne çıkan bir kimyasal enjeksiyon türüdür. Bu çalışmada kolloidal silika ile enjekte edilmiş ince-orta boyut dağılımına sahip kumların statik ve dinamik yükler altında davranışı araştırılmıştır. Araştırmaya, kullanılan kolloidal silikanın jelleşme süresi ve viskozitesinin zamanla değişimi incelenerek başlanmıştır. Sonuçlar doğrultusunda kullanılması gereken kolloidal silika- hızlandırıcı (tuz su çözeltisi) oranları belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlarla ilk aşamada tek eksenli basınç deneyi için ince-orta boyut dağılımındaki kuma enjeksiyon yapılmıştır. Elde edilen numuneler basınç deneylerine tabi tutularak dayanımları belirlenmiş, jelleşme ve kür süresinin etkisi de incelenmiştir. İkinci aşamada belirlenen kolloidal silika-çözelti oranlarındaki karışımlarla kum numuneler enjekte edilmiş ve hazırlanan bu numuneler optimum kür süresi sonunda belirli DGO (Devinimli Gerilme Oranı)'larına karşılık gelen yüklerle yüklenerek, devinimli üçeksenli deneyine tabi tutulmuşlardır. Devinimli üçeksenli deneyi sırasında bozulmayan numunelere tekrar tek eksenli basınç deneyi yapılarak, devinimli yüklerin dayanım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmalar, kolloidal silika enjeksiyonu yapılmış

ince orta boyutdaki kumun, devinimli yüklere karşı büyük deformasyon direnci kazandığını ve devinimli yüklerin tek eksenli basınç dayanımını etkilemediğini göstermiştir.

Bilim Kodu : 911
Anahtar Kelimeler : Statik ve dinamik üç eksenli, devirsel gerilme oranı, koloidal silika, enjeksiyon
Sayfa Adedi : 112
Tez Yöneticisi : Prof.Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

**THE BEHAVIOUR OF
COLLOIDAL SILICA GROUTED FINE-MEDIUM GRAINED SAND
UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING
(M.Sc. Thesis)**

Serkan YILDIZ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2006**

ABSTRACT

Colloidal silica suspension produced from saturated solutions of silicic acid is an outstanding kind of chemical grouting with its microscopic particle size. In this study strength property of colloidal silica grouted fine medium grained sand is researched. At the outset, the gel time and viscosity of colloidal silica is observed. Depending on the results, the appropriate accelerator (water-salt solution) colloidal silica ratio is determined. After that fine-medium grained sand is grouted with the mixture of colloidal silica and accelerator. Unconfined compression tests are performed on the samples obtained in this way. The effect of the gel time and cure period on the strength of grouted samples are also investigated. Eventually, the specimens are grouted again to perform cyclic triaxial tests. At the end of optimum curing period cyclic triaxial tests are performed at different cyclic stress ratios and the strength properties of the samples under cyclic loading are investigated. None of the samples are failed during the cyclic triaxial tests. To see the effect of cyclic loading, unconfined compression tests are conducted on unfailed grouted samples. The study showed that colloidal silica grout increase the cyclic deformation resistance of fine-medium grained sands significantly and unconfined compression

strength of colloidal silica grouted sand is not affected by cyclic loading.

Science Code	:911
Key Words	:Static and dynamic triaxial, cyclic stress ratio, colloidal silica, grouting
Page Number	:112
Adviser	:Prof.Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU'na, İnşaat Yüksek Mühendisi Yüksel YILMAZ'a, manevi desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan eşime ve beni yetiştiren anne ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1.GİRİŞ	1
2. KİMYASAL ENJEKSİYONLAR	3
2.1. Enjeksiyon İşlemi.....	3
2.2. Permeasyon Enjeksiyonu	4
2.3. Kimyasal Enjeksiyonun Tarihçesi	7
2.4. Kimyasal Enjeksiyon Çeşitleri.....	8
2.4.1. Sodyum silikatlar	8
2.4.2. Akrilamitler	9
2.4.3. Lignosulfonatlar	11
2.4.4. Fenoplastlar	11
2.4.5. Aminoplastlar	12
2.4.6. Diğer maddeler	13
3. KİMYASAL ENJEKSİYONLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ.....	15
3.1. Dayanıklılık- Kalıcılık	15

	Sayfa
3.2. Penetrasyon Kabiliyeti	17
3.3. Mukavemet.....	21
3.4. Jelleşme Süresi	26
3.5. Hassaslık	27
3.6. Toksisite	28
3.7. Ekonomi	29
3.8. Syneresis.....	29
3.9. İdeal Kimyasal Enjeksiyon.....	30
4. KOLLOİDAL SİLİKA ENJEKSİYONU.....	33
4.1 Kolloidal Silika Enjeksiyonunun Reolojik Özellikleri.....	35
4.1.1. Jelleşme süresinin kontrolü	35
4.1.2. Dayanım, hidrolik geçirgenlik ve dayanıklılık.....	36
4.2. Kolloidal Silika ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	37
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULARIN YORUMU.....	40
5.1. Giriş.....	40
5.2. Kolloidal Silika ile Viskozite ve Jelleşme Süresi Çalışmaları	40
5.2.1. Malzemeler.....	41
5.2.2. Numune hazırlama	42
5.2.3. Jelleşme süresi testleri	43
5.2.4. Viskozite deneyleri	47
5.2.5. Viskozite ve jelleşme süresi çalışmaları sonuçları.....	49
5.3. Enjekte Edilmiş Kumların Mukavemet Deneyleri	50
5.3.1. Mukavemet deneylerinin amacı.....	50

Sayfa

5.3.2. Deneylerde kullanılan malzemeler	51
5.3.3. Enjeksiyon düzeneğinin hazırlanması	58
5.3.4. Tek eksenli basınç deneyleri	62
5.3.5. Devinimli üçeksenli deneyleri	75
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Permeabilite katsayısı enjekte edilebilirlik ilişkisi	6
Çizelge 3.1. Silika enjeksiyonlu kumların mukavemet değerleri	23
Çizelge 3.2. Reçine enjeksiyonlu kumların mukavemet değerleri.	24
Çizelge 3.3. Temel kimyasal enjeksiyonların özellikleri.....	31
Çizelge 3.4. Kimyasal enjeksiyonların uygulama alanları	31
Çizelge 3.5. Çeşitli kimyasal enjeksiyonların karşılaştırılması	32
Çizelge 5.1. MEYCO MP 320 teknik özellikleri	41
Çizelge 5.2. Kolloidal silika jel durumları	43
Çizelge 5.3. Kullanılan kumun indeks özellikleri.....	57
Çizelge 5.4. 1/9'luk çözelti numuneleri tek eksenli basınç dayanımları.....	68
Çizelge 5.5. 1/12'lik çözelti numuneleri tek eksenli basınç dayanımları	71
Çizelge 5.6. Dinamik yükleme sonrası tek eksenli basınç dayanımları	85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enjeksiyon tipleri	4
Şekil 3.1. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon kabiliyetleri	19
Şekil 3.2. Enjeksiyon sınırları	20
Şekil 3.3. Enjekte edilmiş ve edilmemiş granüler zeminler için kırılma zarfı	25
Şekil 3.4. Viskozite-jelleşme süresi ilişkisi	26
Şekil 4.1. Siloxane bağlarının oluşumu	1
Şekil 4.2. Değişik pH derecelerinde koloidal silika partiküllerinin hareketi	34
Şekil 5.1. Su-tuz çözeltisi / silika oranı jelleşme süresi ilişkileri	44
Şekil 5.2. Değişik miktardaki silikalar için ç/s oranı jelleşme süresi ilişkileri	45
Şekil 5.3. Tuz/silika oranı jelleşme süresi ilişkileri	46
Şekil 5.4. Çözelti / silika oranı jelleşme süresi ilişkisi	47
Şekil 5.5. 1/9 luk çözelti için %10 çözelti/silika oranında viskozite değişimi.....	48
Şekil 5.6. 1/12 lik çözelti için %20 çözelti/silika oranında viskozite değişimi.....	49
Şekil 5.7. Kum Gradasyonu	59
Şekil 5.8. Enjeksiyon Deney Düzeneği	59
Şekil 5.9. 1/9'luk tuz-su çözeltisi ile hazırlanan numuneler için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	70
Şekil 5.10. 1/12'lik tuz-su çözeltisi ile hazırlanan numuneler için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.....	71
Şekil 5.11. 1/9 ve 1/12'lik tuz-su çözeltisi ile hazırlanan numuneler için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	72

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. 1/9 luk çözelti için değişik Ç/S oranlarında 28.gün gerilme birim deformasyon grafikleri.....	73
Şekil 5.13. 1/9 luk çözelti için değişik Ç/S oranlarında 28.gün gerilme birim deformasyon grafikleri.....	74
Şekil 5.14. Çeşitli yükler için yük formları	81
Şekil 5.15. 1/9 luk çözelti için % 20 Ç/S oranında değişik DGO'da devinimli yüklemeler sonrası gerilme birim deformasyon grafikleri	86
Şekil 5.16. 1/12 lik çözelti için % 25 Ç/S oranında devinimli yüklemesiz ve devinimli yükleme sonrası gerilme birim deformasyon grafikleri	87

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Jelleşme süresi tespiti.....	42
Resim 5.2. Viskozite tespiti için kullanılan viskozimetre	47
Resim 5.3. Enjeksiyon deney düzeneği	60
Resim 5.4. Serbest basınç deneyi numunesi moldu	61
Resim 5.5. Devinimli üçeksenli enjeksiyon deney düzeneği	62
Resim 5.6. Tek eksenli basınç deneyi.....	66
Resim 5.7. Kırılma şekilleri	67
Resim 5.8. Devinimli üç eksenli deneyi moldu ve tokmak.....	75
Resim 5.9. Numunelerin moldlardan çıkarılması ve deney için hazırlama.....	76
Resim 5.10. Devinimli üç eksenli deney aleti	77
Resim 5.11. Numunenin yerleştirilmesi	77
Resim 5.12. Üç eksenli hücrenin suyla doldurulması	78
Resim 5.13. Devinimli üç eksenli deneyinin bilgisayar tarafından kontrolü	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
G_s	Özgül ağırlık
ρ	Yoğunluk
D_r	Relatif sıklık
e	Boşluk oranı
C_u	Üniformluk sayısı
C_c	Eğrilik katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
DSİ	Devlet Su İşleri
ASTM	American Society for Testing Materials Standarts
DGO	Devinimli Gerilme Oranı
Ç/S	Çözelti – silika oranı

1.GİRİŞ

Zeminler her zaman üzerine bir yapı inşa etmek veya kazı yapmak için uygun nitelikler taşımazlar. Kayma direnci düşük veya geçirimsizliği yüksek zeminlerde kazı sırasında oluşacak bir şevin kayması, temel çukurunun su ile dolarak çalışmanın imkansız hale gelmesi, deprem gibi dinamik etkilerden zeminin olumsuz etkilenebilecek olması yada baştan itibaren zeminin planlanan yapıyı taşıyabilecek kapasitesinin olmaması olası bir durumdur. Böyle bir durumda ilk olarak mekanik yollarla zeminin iyileştirilmesi yoluna gidilirse de maliyet, çevre şartları yada süre gibi çeşitli kısıtlar, problemin bir çok değişik şekli ve sınıfı bulunan enjeksiyon yöntemlerinden birisi ile çözülmesini zorunlu kılabilir.

Temel işlevi kayma direncini artırmak ve geçirimsizliği azaltmak olan enjeksiyonlar, bu sayede bir çok özel işlevde gerçekleştirmiş olurlar. Bu özel işlevler içerisinde yapı temelini desteklemek, aşırı oturmaları önlemek, suyun akışını engelleyecek perde oluşturmak, yanal toprak basıncını azaltmak, deprem sırasında sıvılaşmayı engellemek gibi bir çok değişik biçimde sıralanabilir. Enjeksiyonun işlevi ve uygulandığı zemin tipi enjeksiyonun uygulama şeklini de değiştirmektedir. Enjeksiyon materyalinin zemine enjekte edilmesi şekline göre yapılan sınıflandırmada enjeksiyonlar permeasyon, kompaksiyon ve kaplama gruplarına ayrılır. Permeasyon grubunda şırınga edilen malzeme ortamın hacmini değiştirmeden boşluk ve kayaç çatlaklarını doldurur. Süspansiyonlar ve çözeltiler olmak üzere ikiye ayrılan permeasyon enjeksiyonlarında, süspansiyonları çimento gibi taneli malzemelerin su içerisinde dağıldığı enjeksiyonlar, çözeltileri ise tanesiz kimyasal enjeksiyonlar meydana getirir.

Enjekte edilen malzemenin zemin içerisine girebilmesi malzeme tane boyutunun zemin boşluklarından girebilecek kadar küçük olması ile mümkündür. Bu açıdan süspansiyonlar kaba taneli kum ve çakıllarda uygulanabilirken, ince taneli kumların enjeksiyonu çözeltilerle (kimyasal

enjeksiyon) yapılabilir. Kimyasal enjeksiyon ince taneli kum ortamlarda deprem sırasında devinimli yükler etkisiyle meydana gelebilecek olumsuz etkilerin (sıvılaşma gibi) azaltılması için uygun bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada ince orta boyut dağılımına sahip kumun koloidal silika ile enjekte edilmesi sonrasında devinimli yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu doğrultuda tez çalışmasında öncelikle kimyasal enjeksiyonlar, kimyasal enjeksiyonların reolojik özellikleri ve koloidal silika enjeksiyonu hakkında bilgi verilmiş, son bölümde laboratuvarda yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Laboratuvar çalışmalarına kullanılan koloidal silikanın jelleşme süresi ve viskozitesinin tespit edilmesi ile başlanmıştır. Bu tespitlerden yola çıkılarak belirlenen çözelti-koloidal silika oranları esas alınarak hazırlanan karışımlarla ince-orta boyut dağılımındaki kuma enjeksiyon yapılmıştır. Enjekte edilmiş numunler tek eksenli basınç ve devinimli (dinamik) üç eksenli testlerine tabi tutularak dayanım özellikleri ortaya konmuştur.

2. KİMYASAL ENJEKSİYONLAR

2.1. Enjeksiyon İşlemi

Enjeksiyon, kayma direncini artırmak ve geçirimsizliği azaltmak için kaya ya da zemin kitlesine basınç altında bir sıvıyı yollama işlemidir [Bowen, 1975]. Enjeksiyonu, benzer bir şekilde zemin boşlukları veya kaya çatlaklarını uygun bir karışımla doldurarak zeminin taşıma gücünün artırılması ve geçirgenliğinin azaltılması şeklinde tanımlamakta mümkündür [Shroff ve Shah, 1993].

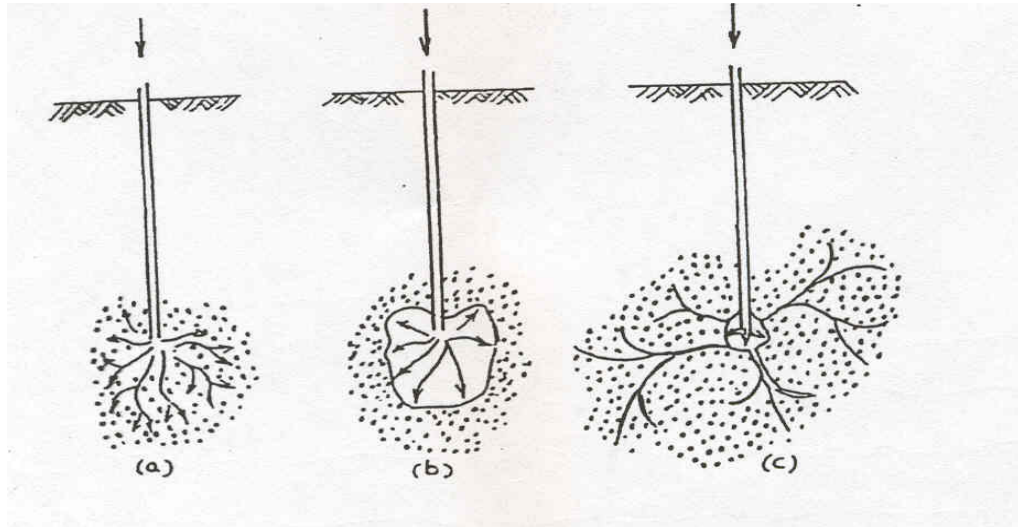
Ayrıntılı olarak incelendiğinde inşaat mühendisliğinde enjeksiyon uygulamalarının kullanım alanlarını şu şekilde sıralamak mümkündür: [Önalp, 1985]

1. Suyun akışını durduracak ya da azaltacak perde çekilmesi,
2. Aşırı oturmaların önlenmesi için boşlukların doldurulması,
3. Yer altı suyu düzeyi altındaki temel inşaatında kurutma ve destek işlerinden kaçınma,
4. Zeminin kuvvetlendirilerek komşu kazı, kazık çakma gibi çalışmalar sonucu oluşabilecek hareketlerin önlenmesi ,
5. Tünel kazısında kazı duvarları ve üstteki tabakaların hareketinin kontrolü
6. Yanal toprak basıncını kısıtlama,
7. Kazıkların yanıl yük kapasitesini arttırma,
8. Yamaç stabilitesini arttırma,
9. Eski temellerin onarımı sırasında destek sağlama,
10. Hacim değişimleri gösteren zeminlerde büzölme-şişmenin azaltılması,
11. Gevşek kumlarda titreşimden dolayı sıvılaşmanın önlenmesi.

Yukarıda sıralanan amaçlarla kullanılabilen enjeksiyonların sınıflandırmasını amaçlarına göre, uygulama yerine göre, uygulanan basınca göre yapmak mümkündür. Bu sınıflandırmalardan en önemlilerinden birisi enjeksiyon

materyalinin zemine enjekte edilmesi işlemine göre yapılanıdır. Böyle bir sınıflandırmada enjeksiyon nüfuz (permeasyon), kompaksiyon ve çatlatma sınıflarına ayrılır. Bu tür bir sınıflandırmayı nüfuz, kompaksiyon, hidroçatlak, jetgrouting ve yerinde mekanik karıştırma şeklinde yapmakta mümkündür. [Bruce,1994].

Kompaksiyon enjeksiyonunda koyu bir sıvı kullanılır ve zeminde oluşan ampuller boşlukları doldurduğu gibi çevrede sıkıştırma görevi yapar. Çatlatma türü doğal olarak parçalanmış ya da topaklı ortama yüksek basınçta sıvı yollayarak gerçekleştirilir. Burada amaç boşluklara kadar girme yerine ayrı parçalar arasında oluşturulan mercceklerle çatlakların doldurulması işlemidir. Permeasyon grubunda şırınga edilen malzeme orta, iri kum boşlukları ve kayaç çatlaklarını doldurur. Ortamın hacminde değişiklik olmaz [Önalp,1985].



Şekil 2.1. Enjeksiyon tipleri a) Permeasyon b) Kompaksiyon c) Çatlatma [Koerner, 1985]

2.2. Permeasyon Enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonları süspansiyonlar ve çözeltiler olmak üzere iki sınıfta değerlendirilir. Süspansiyonlar çimento tanelerinin su içerisinde

dağıldığı enjeksiyon çeşitleridir. Bu çalışmanın konusu olan kimyasal enjeksiyonlar ise çözeltileri meydana getirir.

Permeasyon enjeksiyonu açılan sondaj deliklerinden enjeksiyon malzemesinin basınç altında zemine enjekte edilmesi ile gerçekleştirilir. Temel amacı su kontrolü ile zemin yapısının iyileştirilmesi olan permeasyon enjeksiyonu en eski ve en yaygın uygulanan enjeksiyon sınıfıdır [Henn, 1996]. Enjeksiyona eklenen katkı maddesi priz süresini veya akışkanlığı ayarlamak için kullanılır. Zemin taneleri ile enjeksiyonun oluşturduğu bağlar daha yüksek kesme ve basınç dayanımı olan kompozit bir formasyonun oluşmasını sağlarken, aynı zamanda boşlukları doldurulması ile zeminin geçirimsizliğini de azaltır. Permeasyon enjeksiyonu zemini yeniden yapılandırırken, mekanik bir yöntem kullanmaz ve bu sayede zemin göreceli olarak örselenmemiş olarak kalır [Hausmann,1990].

Permeasyon enjeksiyonunun çözüm metodu olarak seçilmesi, dizayn kriterlerine bağlıdır ve seçim sırasında ilk aşama olarak aşağıda sorulan sorulara cevap aranır [Berkeley, 1996].

1. Amaç su geçirimsizliği mi?
2. Zemin iyileştirmesi gerekli mi?
3. Çözüm sürekli mi olacak?
4. Proje için çalışma alanı limiti var mı?
5. Diğer tekniklerle kıyaslandığında permeasyon enjeksiyonu uygun mu?

Bu soruların cevaplanması ile enjeksiyon uygulamasının yapılıp yapılmayacağına yada ne tür bir sistem kullanılacağına karar verilir. Enjekte edilebilir zemin, kimyasal veya çimento enjeksiyonunun belli basınç limitleri içerisinde ve projenin ekonomik olarak uygulanabilir olmasını sağlayacak belli bir akış hızında enjekte edilmesine izin veren zemindir [Karol, 2003]. Bir zeminin enjekte edilebilirliği temel olarak enjeksiyonun, enjeksiyon yapılacak zemin özelliklerinin ve enjeksiyon tekniğinin bir fonksiyonudur. Burada zemin

özelliklerinden enjekte edilebilirlikle ilgili olanlar zeminin tane dağılımı ve zemin geçirimliliğidir [USACE, 1995]. İdeal şartlarda kum bir zeminin yüksek kayma dayanımı olması beklenirken, zemin içerisinde su ve hava ile dolu boşlukların bulunması kayma dayanımını düşürür. Enjeksiyon bu boşlukları doldurarak dayanımı artırırken, geçirimliliğide azaltır. Zemin tane dağılımı boşlukların durumunu çok etkiler. Enjeksiyon seçiminde, enjeksiyon malzemesi tane boyutunun boşluk boyutunun en fazla üç ile onda biri kadar olması gerektiğine dikkat edilmelidir [Karol, 2003]. Öte yandan zeminlerin çoğu için üniform bir tane dağılımı söz konusu değildir ve siltli kum yada siltli killere rastlamak çok doğaldır. Buna rağmen bazı durumlar dışında her tür zemin için uygun bir enjeksiyon tipi bulunabilir. Karol'a göre silt yüzdesi yüzde 20 den fazla olan zeminlerin ve sıkı siltlerin enjeksiyonu oldukça zordur. Siltli kilerin enjekte edilmesi ise imkansızdır [Karol, 2003].

Permeabilite zeminin enjeksiyon için uygun olup olmadığını belirleyen bir diğer faktördür. Karola göre bir zeminin permeabilitesine göre enjekte edilebilirliği aşağıdaki gibi değerlendirilebilir [Karol, 2003].

Çizelge 2.1. Permeabilite katsayısı enjekte edilebilirlik ilişkisi

K (cm/san)	Durum
10^{-6} yada daha az	Enjekte edilemez.
10^{-5} - 10^{-6}	5 cP altındaki viskoziteli enjeksiyonlarla zorlukla edilebilir üzerinde edilemez.
10^{-3} - 10^{-5}	10 cP 'in üzerinde viskoziteli malzemeler ile zorlukla daha düşük viskoziteli malzemelerle daha kolay enjeksiyon yapılır.
10^{-1} - 10^{-3}	Genel olarak bütün kimyasal enjeksiyonlarla enjekte edilebilir.
10^{-1} yada daha fazla	Katı bir süspansiyon enjeksiyonu veya katı dolgusu bulunan kimyasal enjeksiyon kullanılır.

2.3. Kimyasal Enjeksiyonun Tarihçesi

1802 yılında Fransız Mühendis Charles Berigny'nin su ve pozalan çimentosundan oluşan süspansiyonu çökmelerden zarar görmüş bir savak temelinde ki boşlukları doldurmak için kullanması ile başlayan enjeksiyon uygulamalarında, kimyasal malzemelerin kullanılmaya başlanması daha sonraki yıllarda gerçekleşmiştir. Kimyasal enjeksiyonun yaygın kullanımının 1950 lerde başladığı söylenebilir. İnşaat sektöründe kullanılan tekniklerin ve malzemelerin uluslararası kabul görmesi ancak son birkaç on yıl içerisinde gerçekleşmiştir [Karol, 2003].

İlk kimyasal enjeksiyon kullanımı bir Avrupalı olan, Jeziorsky 1886 yılında konsantre sodyum silikatı bir deliğe yanındaki bir başka deliğede katılaştırıcıyı enjekte ederek patent almasıyla gerçekleşmiştir. 1909 yılında Lemarre ve Dupont seyreltik silikat ve asit çözeltisinden oluşan tek atışlı işlem ile patent almışlardır. Hemen bunun ardından A. Francois sodyum silikat enjeksiyonunun çimento enjeksiyonunu kolaylaştırdığı ve sodyum silikatın yağlayıcı etki gösterdiğini bulmuştur [Internet, 1996]. 1926'da Almanya'da Dutchman H.Joosten tarafından kimyasal esaslı karışımlar geliştirilmiştir. 1930'dan sonra Joosten sistemi geniş olarak Berlin'de yer altı demiryolları inşasında kullanılmış, 1930-1940 yılları arasında sodyum bikarbonat, sodyum alüminat, hidroklorik asit ve bakır sülfatın kullanıldığı bir çok başarılı arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. II. Dünya Savaşından sonra Almanya'da kimyasal enjeksiyon ön plana çıkmış, savaşta hasar gören büyük şehirlerin onarımı amacıyla ve yerleşim yerlerinin altyapısının güçlendirilmesi için kullanılmıştır [Kutzner, 1996]. Yüzyılın ortalarında Amerikada akrilamit kökenli AM9 un bulunması ile başlayan gelişmeler lignosülfanatlar, aminoplastlar ve silika kökenli SİROC' un bulunmasıyla devam etmiştir. 1974 yılında Japonya'da kanalizasyon projelerinde görülen akrilamit enjeksiyonu kullanılmasına bağlı su zehirlenmeleri akrilamitlerin yasaklanmasına neden olmuştur. Bir süre sonra zehirli olmayan silika kökenli enjeksiyonlar dışındaki bütün kimyasal enjeksiyonlar için bu yasak genişletilmiştir. Halihazırda

enjeksiyonların büyük kısmı silikat kökenli enjeksiyonlar ile yapılmaktadır. Öte yandan Amerikada kanalizasyonların sızdırmazlığını sağlamak için büyük çoğunluğu akrilamitler olmak üzere akrilamit ve akrilit enjeksiyonları kullanılmaktadır [Karol, 2003].

2.4. Kimyasal Enjeksiyon Çeşitleri

Son yarım yüzyılda silikatlarda yaşanan gelişmeler ve yeni geliştirilen malzemeler kimyasal enjeksiyonlar için yeni bir devir başlatmıştır. En eski iki ürün olan silikat ve akrilamit bazlı enjeksiyonlar piyasaya hakimdir. Halen ABD’de piyasanın % 85-%90 ı bu iki ürün tarafından paylaşılmaktadır [Karol, 2003]. Bununla birlikte dünya çapında kullanılan, kimyasal yapıları ve bileşenleri itibariyle birbirinden farklı çok değişik özelliklere sahip bir çok kimyasal enjeksiyon çeşidi bulunmaktadır.

2.4.1. Sodyum silikatlar

Enjeksiyon malzemelerinde en büyük tekli grubu silikat türevleri oluşturur ve bunlar florosilikatlar, silikon esterler, metil silikatlar ve sodyum silikatlardır. Sadece sodyum silikatlar kimyasal enjeksiyon için geniş bir şekilde kullanılırlar [Karol, 2003]. Su camı olarak bilinen sodyum silikatlar, silikat kumu yada herhangi bir formdaki silikanın Na_2CO_3 ile 900°C civarında ısıtılması ile hazırlanır. Rafine işleminden sonra sodyum silikat akışkan bir çözelti haline gelir. Bu çözelti su ile seyreltilerek ihtiyacı karşılayan konsantrasyon elde edilebilir [Clifton, 1986]. Enjeksiyon bir asit veya tuz asidinin reaktant olarak kullanılması suretiyle nötürleşerek jelleşir. Hem enjeksiyon hemde reaktant su ile seyreltilerek karışım enjeksiyon için daha uygun hale getirilebilir. Seyreltme işlemi reaksiyonu yavaşlatacaktır. Aksi takdirde yüksek konsantrasyon pratik amaçlar için uygun olmayan çok hızlı reaksiyona sebep olacaktır.

Jelleşme süresi asit oluşum hızı tarafından kontrol edilir ki bu enjeksiyonun

seyreltilmesine değil asıl olarak eklenen organik malzemenin miktarına bağlıdır. Başlıca katalizörler gloksal, ester karışımları, etil asetat ve formamid gibi organik bileşiklerdir [Naudts 1996, Whang 1995]. Sodyum silikatlar için silika/alkali oranı ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) enjeksiyonun uygunluğunu belirler. Priz sonrası zemine iyi bağlanan bir çözeltide silika alkali oranı 3 ile 4 arasındadır ve 4'ün üzerinde kararsız haldedir [Karol, 2003]. Kararsız bir çözeltide kusma olayı, yani katı ve sıvının birbirinden ayrılması gerçekleşecektir [Hausmann, 1990]. 1960 yılında bulunmasından itibaren Siroc ticari adlı ürün Amerika'da en geniş kullanılan sodyum silikat enjeksiyonu olmuştur. Siroc sisteminde bir hızlandırıcı veya çimento genel olarak silika ve reaktant birlikte kullanılır [Karol, 2003]. Diğer ticari sodyum silikatlar Geloc-4, Terraset ve Hardener 600 şeklinde sıralanabilir. Bu üç enjeksiyon halen organik esteri reaktant kullanan zehirsiz sodyum silikatlar olarak geniş bir şekilde kullanılmaktadır [Baker, 1982].

Sodyum silikatlar genel olarak sağlığa ve çevreye zararsız olarak değerlendirilir [Caron, 1967]. Reaktant olarak kullanılan organik zehirli, aşındırıcı yada çevreye zararlı nitelikte olabilir [Karol, 2003]. Japon literatüründe silika çözeltisi, kolloidal silika ve aktive silikaların kirletici ve zararlı olmadığı ifade edilmektedir [Yonekura ve Kaga, 1992].

2.4.2. Akrilamitler

Akrilamit enjeksiyonların ortaya çıkışı 1953 yılında Amerika'da AM-9 ile başlamıştır. AM-9 belli bir sıcaklıkta uzun molekül zincirlere polimerleşen iki organik monomerin karışımından oluşmakta ve beyaz bir toz halinde bulunmaktadır. Ağırlık olarak su miktarı % 87-97 mertebesindedir. AM-9 un viskozitesi 2 cP den düşük olabilir. AM-9 katalizör olarak amonyum persülfatı kullanırken, trietonlamini aktivatör ve potasyum periyasianidi de inhibitör olarak kullanır [Nonveiller, 1989]. 1979 yılında üretimi yüksek nörotoksik bir malzeme olduğu için durdurulmuş ve yerini büyük oranda zehirsiz ve viskozitesi 2 cP civarında olan AC400 almıştır. AC-400 kontrol edilebilir jel

süresi ile öne çıksa da maliyeti sodyum silikatlardan daha yüksektir [Nonveiller, 1989]. Halen Amerikada AV100 olarak bilinen japon üretimi Nitto SS ve Fransızların ürettiği Rocagil BT en çok bilinen akrilamitlerdir.

Akrilamitlerin bir çok avantajı vardır. Bunlar suya yakın bir viskozite ve yoğunluk, kolay kontrol edilebilir jelleşme süresi, geciktiricilerle jelleşme süresinin uzatılabilmesi şeklinde sıralanabilir. Ayrıca akrilamitler sürekli kabul edilirler [Naudts,1996]. Bu avantajları yanısıra benzer şekilde kolay penetre olmaları, ilk viskozitelerini hızlı bir şekilde prizlendiklerinde jelleşmenin en son aşamalarına kadar muhafaza etmeleri ve bir çok uygulama için yeterli dayanım sergilemeleri ile akrilamitler ideal bir kimyasal enjeksiyon özelliği sergilerler [Karol, 2003].

Akrilamit enjeksiyonlar nörotoksik malzemelerdir. Labaratuvar deneyleri akrilamitlerin hayvanlarda kanserojen olduğunu göstermektedir. Deri ile teması deri arasından absorbe edildiği için çok tehlikelidir. Kronik mesleki maruziyet kimyasal bir afettir çünkü kümülatif zehirlilik oranı yüksektir. Arazi deneyleri zararlı olmaması için yerine uygun bir yerleştirme ile % 10 luk bir akrilamit çözeltisinin en fazla % 0.02 oranında serbest akrilamit konsantrasyonunda olması gerektiğini göstermiştir [Karol, 2003]. Zehirlenme belirtileri görülmesi üzerine akrilamite maruz kalmaya son verilirse iyileşme kısa bir süre içerisinde gerçekleşir. Ancak zehirlenme ciddi ise veya zehirlenme belirtilerine rağmen maruz kalmaya devam edilirse, iyileşme çok uzun bir zaman alabilir [Shroff ve Shah, 1993].

Akrilamitler özellikle sızdıran pissu kanallarını kaplamak için kullanılırlar. Boruların 40-50 yıllık olduğu şehirlerde kanalizasyon akıntısının yarıdan fazlasını yeraltısuyu infiltrasyonu oluşturabilir. Borular eskidikçe bu infiltrasyonun artmasıyla birlikte atıksu temizleme ünitelerinde iş miktarı artar ve ünitenin büyütülmesi yada kanalların yenilenmesi gerekir. Maliyeti çok yüksek olan bu işlemler yerine daha hızlı ve daha ucuz olan boruların etrafının kimyasal enjeksiyonla enjekte edilmesi tercih edilebilir. Metod

yaklaşık 10 cm ile 100 cm arasındaki çapa sahip borularda verimli olmaktadır [Karol, 2003].

2.4.3. Lignosulfonatlar

Lignosulfanatlar, odun hamurundan bisülfite prosesi ile selüloz üretimi esnasında oluşan atık ürünlerdir. Atık konsantre bir durumdadır ve şurup kıvamında bir sıvı veya toz halinde üretilir [Shroff ve Shah, 1993]. Enjeksiyonun kendisi orjinal sıvı halde ve kurutulmuş formda zehirsiz olmasına rağmen sodyum dikromat katkısı yüksek oranda zehirlidir [Nonveiller,1989]. Eğer lignosülfanat asidik ise ($\text{pH} < 6$) katkı gerekmez. Asit ve asit tuzları $\text{pH} > 6$ durumunda sadece kontrol için kullanılırlar [Karol, 2003].

Enjeksiyonun viskozitesi 3 cP ile 8 cP arasında değişir ve viskozite katalizörün katılmasından sonra yükselen bir oranda artar [Karol, 2003]. Jelleşme süresinin azalması veya artması asidik veya alkaline tuzlarla ayarlanan düşük veya yüksek pH değeri ile kontrol edilir. Dayanımları akrilamitlerle karşılaştırılabilir ve ince-orta taneli zeminlere uygulanabilirler [Bell, 1993]. Lignosulfanatlar bir yan ürün olduğu için nispeten ucuzdurlar ve maliyet açısından diğer enjeksiyon malzemeleri ile mukayese edilebilecek seviyededirler. Lignosulfanatlardaki sodyum dikromat tuzu ve benzeri tipi moleküller, yüksek oranda zehirlidir ve lignosulfanatlar halihazırda yerel olarak kullanılmamaktadır [Karol, 2003].

2.4.4. Fenoplastlar

Bir fenolün bir aldehid üzerinde reaksiyonu ile oluşan bileşiklerdir ve geniş bir pH aralığında yüksek sıcaklık altında katılaşırlar [Karol, 2003]. Bir fenol yakıcı, zehirli, beyaz kristalin bileşeni $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, benzenden türeyen ve çeşitli reçinelerde, plastikte, eczacılıkta ve dezenfektanlarda kullanılan, aldehid ise primer alkollerin oksidasyonu ile elde edilen yüksek reaktiviteli organik kimyasal bileşenlerin herhangi bir sınıfıdır. Resorsinol formaldehid jeli bir

parça elastik ve bir parça plastiktir ve AM-9 kadar yüksek bir elastisite modülüne sahiptir [Shroff ve Shah, 1993]. Fenoplastın jelleşme süresini kontrol eden bir çok faktör vardır. pH jelleşme süresini etkiler. Herhangi bir çözelti konsantrasyonu için 9'un üzerindeki pH en kısa jel süresine ulaşır. Her şartta pH'ı kontrol etmek için sodyum dikromat gereklidir. Jel süresini etkileyen diğer bir faktör seyreltilmiş enjeksiyon konsantrasyonudur. Başlangıç viskozitesi saha çalışması için 1.5 cP ile 3 cP arasında değişir. Akriliklerde olduğu gibi fenoplast sürekli sabit bir viskoziteye sahip olur ve sonunda hızlı şekilde jelleşir. Fenoplast yüksek sıcaklıktaki çevrede katılaşır ve çevre sıcaklığındaki artışlar jelleşme süresini düşürür [Shroff ve Shah, 1993]. Orta sıcaklıkta katılaşma için asit ortam gereklidir. Ancak bazı enjeksiyonlar asit ortam olmaksızın katılaşabilir. Bunlardan birisi formaldehidle birlikte kullanılan resorsinoldür. Mukavemetleri yüksek konsantrasyonlu silikatlarla karşılaştırılabilir. Yaş kuru çevrimlerine karşı dayanıklılıkları çok azdır ve tamamen dağılabilirler [Karol, 2003].

Fenoplastlar her zaman bir fenol, formaldehid ve alkalın taban içerirler. Bu üç bileşenin tamamı sağlık açısından zararlı ve potansiyel çevre kirleticidir. Resorsinol diğer fenoller kadar tehlikeli olmasa da halen zehirli ve yakıcıdır. Formaldehid tehlikeli bir madde olarak değerlendirilir ve düşük atmosferik koşullarda kronik solunum rahatsızlıklarına sebep olabilir. Sodyum hidroksit iyi bilinen bir yakıcı maddedir. Jeller genel olarak inerttir ancak uygun olmayan karışım oranları reaksiyona girmemiş malzemelerin çevreye sızmasına sebep olabilir. Fenoplastlar yıllarca petrol kuyularının delinmesinde kullanılmıştır. Derin delikler içerisinde jeotermal eğimle ortaya çıkan yüksek sıcaklık enjeksiyonun katılaşmasını sağlar [Karol, 2003].

2.4.5. Aminoplastlar

Aminoplastlar üre ve formaldehidlerden oluşurlar. Üre ve formaldehidin asit bulunan sulu ortamda etkililiği, küçük moleküllerin makromoleküllere dönüşümü şeklinde gerçekleşen yoğunlaşma polimerleşmesini doğurur

[Shroff ve Shah,1993]. Üre çözeltilerinin akrilikler ve fenoplastlar gibi çok düşük bir viskozitesi vardır. Formaldehidle reaksiyon yüksek sıcaklık gerektirdiği gibi çok hızlıdır ve kontrolü çok zordur [Karol, 2003]. Saf sıvı faz yerine sıvı ile katı arasında ortalama bir basamakta üre-formaldehid kullanılır. Bu ortalama basamakta enjeksiyon üre çözeltisinden daha yüksek bir başlangıç viskozitesine sahiptir ancak iyi jelleşme süresi kullanımı kolay hale getirir. Ağ elemanları arasında kovalent bağın meydana getirildiği geçirimsiz ve güçlü bir jel üretebilmek için en az % 20-30 oranında bir konsantrasyon gereklidir [Shroff ve Shah , 1993]. Aminoplast formaldehid ve bir asid katalizör içerir ki ikiside zehirli ve aşındırıcı özelliktedir. Jelleşmiş durumda aminoplast, sızabilen reaksiyona girmemiş formaldehid içerebilir. Göreceli olarak ucuz oldukları için bazı firmalar tarafından pH problemi halledilmek kaydı ile özel enjeksiyon işleri için kullanılırlar [Karol, 2003]. Katılaşmak için fenoplast gibi yüksek sıcaklık isteyen aminoplastlarda petrol kuyusu delinmesi işleminde kullanılır. Orta sıcaklıklarda jelleşme ancak asidik ortamda meydana gelir. Örneğin pH oranı 7 den düşük olan yeraltısuyu ve zemin içeren kömür madenlerinde bu durum geçerlidir [Karol, 2003].

2.4.6. Diğer maddeler

Su ile temas edince jelleşen veya polimerleşen malzemeler ile birlikte köpük halindeki malzemelerde enjeksiyon için kullanılabilirler. 1960 ların sonunda bir çok köpük enjeksiyon malzemesi olarak geliştirilmiştir. Dört ana köpük tipi (silikon, fenolik, epoksi ve poliüretan) içinde bir poliosianat ile polyolün reaksiyonu sonucu oluşan poliüretanlar en iyi mekanik özelliklere sahiptir ve geniş bir formasyon şartı aralığı vardır [Karol, 2003]. Epoksiler epoksi ve katılaştırıcı olmak üzere iki bileşenlidirler ve çok değişik çeşitleri ile sınırsız fiziksel özellikler elde edilebilecek şekilde formüle edilebilirler [Warner, 2004]. Alkol tabanlı iki bileşenli yeni bir tip epoksi orijinal olarak radyoaktif atıkları çevrelemek için kullanılmaktadır [Whang, 1995].

Bunların dışında bir fenoplast ve bir aminoplast yada bir silikatla bir akrilamid

gibi farklı özelliklerdeki kimyasal malzemelerin özel bir enjeksiyon işi için gerekli optimum özellikleri elde etmek üzere bir araya getirildiği kimyasal enjeksiyon türleride bulunmaktadır.

3. KİMYASAL ENJEKSİYONLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Enjeksiyon, uygulamanın özelliklerine göre birbirinden farklı malzemelerin çok farklı miktarlarda birleştirilmesi ile elde edilebilir [Kosmatka,1990]. Halihazırda dünyada çok sayıda kimyasal enjeksiyon malzemesi kullanılmakta, bu malzemelerin her birinin de çok geniş bir aralık içerisinde değişen farklı akıcılık ve mukavemet özellikleri bulunmaktadır. Herhangi bir enjeksiyon uygulamasında başarının ilk basamağı ise doğru enjeksiyon malzemesinin seçimi ve doğru karışımın belirlenmesidir. Bu açıdan enjeksiyonun özelliklerinin hassas olarak belirlenmesi ve uygulamada bunlara dikkat edilmesi, uygulamada öngörülmeleyen hususlarla karşılaşıldığı takdirde gerekli değişikliklerin yapılması son derece önemli bir konudur.

En basit tanımıyla reoloji malzemelerin deformasyon ve akış özelliklerinin çalışılmasıdır [Warner, 2004]. Bir bilim alanı olarak reoloji, yiyecekler, polimerler ve yağlarda dahil olmak üzere çok geniş ve değişik türde maddenin özelliklerinin tanımlanması için kullanılır. Kimyasal bir enjeksiyonun reolojik özellikleri mekanik ve kimyasal olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Dayanıklılık, penetrasyon ve mukavemet mekanik, jelleşme süresi, hassaslık, toksisite, ekonomi ve synerisis ise kimyasal özellikler kapsamında değerlendirilebilir [Karol ,2003].

3.1. Dayanıklılık- Kalıcılık

Dayanıklılık, sertleşmiş enjeksiyonun hizmet verdiği çevre şartlarına uyum kabiliyetini ifade etmektedir [Kosmatka,1990]. ASTM standardı D4219' da kimyasal enjeksiyon yapılmış zeminlerin serbest basınç dayanımı indeksi sadece kısa dönemli mukavemeti esas almaktadır. Süreklilik gerektiren uygulamalarda bu durumun dikkate alınması son derece önemli bir konudur. [Warner, 2004]. Örneğin silikat kökenli enjeksiyonlar birkaç ay için mükemmel su geçirimsizliği ve geçici işler için küçük mukavemet iyileştirmeleri gösterebilir. Ancak bu durumun beklenen şartlar altında kalıcı ve daimi

olduğu ispatlanmadıkça yapı ömrü süresince geçerli olacağı düşünülmemelidir [Clifton, 1986]. İklim ve çevre şartları ile oluşacak ıslanma kuruma veya donma çözünme çevrimleri ile zeminde veya yer altı suyunda bulunabilecek kimyasalların normal şartlar altında dayanıklı olan enjeksiyonları olumsuz yönde etkileyebileceğı ve enjeksiyonu bozabilceğı bir gerçektir [USACE, 1995].

Enjeksiyonun kullanıldığı yapım faaliyetlerinde enjeksiyona olan ihtiyaç sadece yapım sırasında olabileceğı gibi bütün yapı ömrü boyunca da olabilir. Ortalama olarak 50 yıl olarak kabul edilen yapı ömrü enjeksiyonların sürekliliğı açısından da geçerlidir. Bu durum dayanıklılık gerektiren durumlarda yeni malzemelerin kullanımında sorun yaratabilir. Enjeksiyonlar hizmet vermeye devam ettikçe konuyla ilgili yeni bilgiler toplamak ve bu bilgiler ışığında yeni gelişmeler ve iyileştirmeler yapmak mümkündür.

Enjeksiyonların dayanıklılığının çok öne çıktığı problemlerden birisi, radyoaktif atıkların yok edilmesi problemidir. Yeraltına gömülen bu tür atıkların yeraltısuyunu kirletmemesi için alınan tedbirlerden birisi kimyasal enjeksiyonla etrafının çevrilmesidir. Öte yandan radyoaktif atıkların yokolması yarı ömür sürelerine bağılı olarak yüzyılları bulabilmektedir. Bu açıdan enjeksiyonun hem radyoaktiviteden etkilenmemesi hemde uzun yıllar dayanıklılığını muhafaza etmesi gerekir [Karol, 2003]. Kimyasal enjeksiyonların geçmişı pek eski olmadığı için bu tür enjeksiyon malzemelerinin hızlandırılmış deneylerle test edilmeleri sözkonusudur.

Enjeksiyon moleküllerine kimyasal olarak bağlanmamış su içeren bütün enjeksiyonlar, donma-çözünme veya yaş-kuru devirlerine maruz kaldıklarında mekanik olarak bozulmaya uğrayacaklardır. Böyle bir bozunmanın hangi hızda meydana geleceğı serbest su miktarına ve donma yada kurumanın derecesine bağılıdır. BİR jelle enjekte edilmiş çok miktarda serbest su içeren küçük kum numuneleri üzerinde yapılan testler böyle bir bozunmanın 4-6 devirin tamamlanması ile başladığını göstermiştir [Karol, 2003].

Zeminde veya yer altı suyunda bulunabilecek kimyasallar enjeksiyon ile reaksiyona girerek bozunmaya sebep olabilir. Bu tür malzemeler genel olarak kullanılsa da bazı durumlarda yer altı suyu veya zeminde tahminlerden çok daha fazla miktarda bulunabilecek kimyasal, bozunmaya sebep olabilir. Bikarbonat ile jelleşmiş sodyum silikat dışındaki bütün diğer enjeksiyon malzemeleri genel olarak dayanıklı kabul edilmektedir [Karol, 2003]. Çeşitli kimyasal enjeksiyonların dayanıklılığı labaratuvar deneyleri ile araştırılmıştır.

10 yılın üzerinde bir zaman için doygun durumda bekletilen akrilamit örnekleri üzerinde yapılan labaratuvar testleri mukavemet kaybı olmadığını göstermiş ve arazide tamamlanmış çalışmaların 20 yıl sonra istenen performansı sergilemekte olduğu görülmüştür [Karol, 2003]. Japonyada silika çözeltisi, sodyum silikat ve kolloidal silka ile enjekte edilmiş zemin örnekleri üzerinde dayanıklılık testleri yapılmıştır. Örnekler sabit sıcaklıkta (20°) ve nemli çevrede (%98) tutulmuştur. Sodyum silikat giloxal kumlarının mukavemetleri 3 yılı aşkın test süresince sızıntıdan dolayı düşmüştür. Silika çözeltisi ilk mukavemetinin iki katında bir mukavemete ulaşmış ancak synerisis dolayısıyla tekrar ilk mukavemetinin 2/3 üne inmiştir. Ancak kolloidal silika kademeli bir mukavemet kazanımı göstermiştir [Yonekura ve Kaga, 1992].

Silikat enjeksiyonu yapılmış örneklerle yapılan başka bir deneyde kuru ortamda kür edilen örneklerin en az 11 yıla kadar sabiti bir dayanım gösterdikleri, yaş ortamda muhafaza edilenlerin ise mukavemet kaybına uğradıkları görülmüştür [Graf ve ark.,1982].

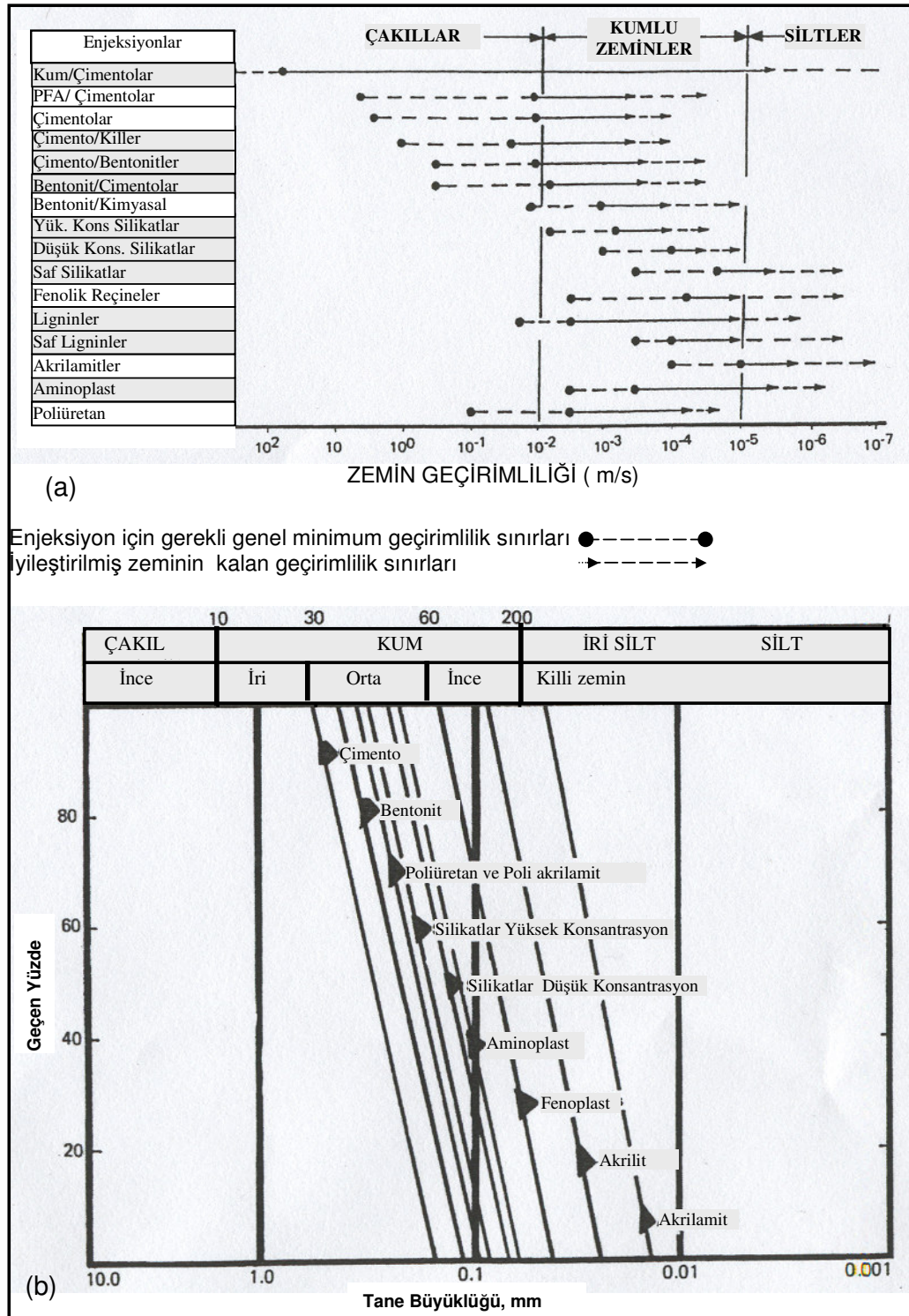
3.2. Penetrasyon Kabiliyeti

Belirli bir basınç altında zemine yapılacak enjeksiyonun penetrasyon oranını büyük oranda viskozite kontrol eder [Verfel, 1989]. Viskozite bir sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç yada iç kesme kuvvetlerine karşı gösterilen iç direnç şeklinde tanımlanabilir [USACE, 1995]. Viskozitenin bir başka tanımı

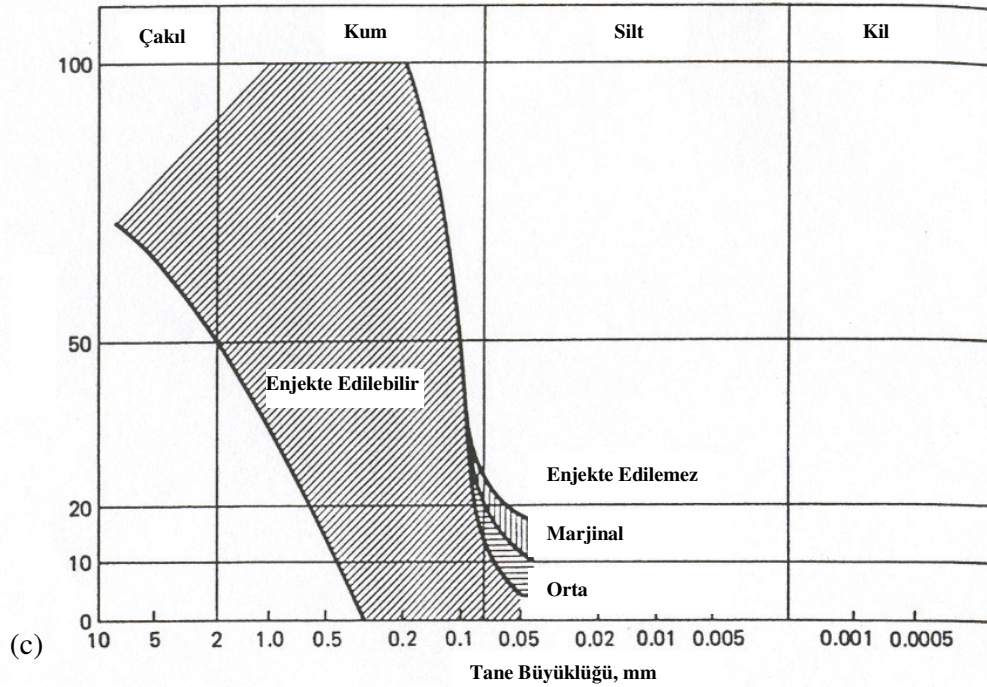
birisi sabitlenmiş diğeri ise sabit hızla hareket eden birbirinden birim uzaklıkta bulunan ve aralarındaki boşluk madde ile doldurulmuş iki yatay düzlemde herhangi birindeki birim alana etki eden teğetsel kuvvet şeklinde yapılabilir [Karol, 2003]. Viskozite cm^2 de dyne second veya poisses birimleri ile ifade edilir.

İdeal bir malzemenin viskozitesi 20°C de suda olduğu gibi 1 cP civarındadır ve bu düşük viskozitede enjeksiyon rahatlıkla penetre olarak boşlukları doldurabilir [Hausmann, 1990]. Bir katı, kayma kuvvetine maruz kaldığında deforme olur ve statik dengeye ulaşılan kadar iç gerilmeler oluşur. Malzemenin elastik limitleri içerisinde bu iç gerilmeler kayma deformasyonlarıyla orantılıdır. Bir malzemenin sürekli deforme olmak yerine statik dengeye ulaşabilme kabiliyeti kayma dayanımı özelliğinden kaynaklanır. Sıvılar böyle bir kayma dayanımına sahip değildir. İç moleküler sürtünmeden dolayı sıvılar deformasyona karşı direnç gösterirler. Buna rağmen kayma kuvveti etkisi altında deformasyon süresiz (sonsuz) olarak devam eder. Viskozite olarak adlandırılan özellik kayma kuvvetlerine karşı mobilize olan iç sürtünmenin bir ölçüsüdür. Genel olarak sıvıların viskozitesi doğrudan doğruya ölçülmez. Viskoziteye bağlı bir parametrenin ölçümünden sonra gerçek değere ulaşmak için belirli bir ilişki kullanılır.

Çeşitli kimyasal enjeksiyonların penetrasyon kabiliyeti şekil 3.1.'de verilmiştir. Kolloidal silikanın hem viskozitesi düşük hem de tane boyutu çok küçüktür. Deneysel çalışmalarda kullanılan MP 320 kolloidal silikası, karışım halinde sahip olduğu 5 cP civarındaki viskozite ve 0.015 micron boyut ile 0.02 mm genişliğindeki boşluklara nüfuz edebilmektedir [Degussa, 2006]. Bu şartlarda şekil 3.1' e yerleştirilmek istendiğinde iri siltlerin sonuna kadar kapsayacak şekilde en alt satıra geleceği görülmektedir.



Şekil 3.2. Enjeksiyon sınırları (a) İyileştirme sınırları, (b) Penetrasyon kabiliyeti, (c) Değişik çözeltilerle enjekte edilebilirlik [Karol, 2003]



Şekil 3.2. (Devam) Enjeksiyon sınırları (a)İyileştirme sınırları, (b)Penetrasyon kabiliyeti, (c) Değişik çözültülerle enjekte edilebilirlik [Karol, 2003]

3.3.Mukavemet

Epoksi ve polyester dışındaki kimyasal enjeksiyonların mukavemetleri çimento bazlı enjeksiyonlara göre çok düşüktür ve enjeksiyon malzemelerinin kendi dayanımları ancak akademik ilgi alanına girebilir [Karol, 2003]. Öte yandan enjeksiyon yapılmış bir zemin kütlesinin mukavemeti pratik anlamda önemlidir. Çünkü enjeksiyonların öncelikli amaçlarından birisi zemin boşluklarındaki sıvının yerini tamamen doldurarak ve taneleri birbirine bağlayarak sürekli ama açık ve üniform olmayan bir yapı meydana getirmek, bu sayede tanelerin göreceli olarak hareketlerini kısıtlayarak zemine bir kayma dayanımı kazandırmak ve böylece zemin yapısını güçlendirmektir [Karol, 2003]. Bu açıdan serbest basınç deneyi sonuçları malzemenin mukavemeti ve enjeksiyonun etkinliği açısından çok önemlidir [USACE, 1995]. Kimyasal enjeksiyonlar amaçları ne olursa olsun genel olarak yer altı su seviyesinin altında gerçekleştirilir. Bu açıdan enjekte edilmiş zeminlerin kuru

mukavemetleri değil yaş haldeki mukavemetleri önemlidir [Nonveiller ,1989]. Enjekte edilmiş zeminin mukavemet değeri enjeksiyonun özellikleri yanısıra yoğunluk, ortalama tane boyutu ve tane dağılımına bağlıdır. Genel olarak mukavemet, artan yoğunluk ve düşen efektif tane büyüklüğü ile artar. İyi derecelenmiş zeminler kötü derecelenmiş zeminlere göre daha yüksek mukavemete sahiptirler. Bu açılarından enjeksiyonların mukavemetlerini tek bir sayı ile ifade etmek yerine bir aralık kullanmak daha doğru olacaktır [Karol, 2003].

Enjeksiyon yapılmış zeminlerin mukavemetleri labaratuvarında silindirik numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri ile belirlenir. Yüzeyde uygulanan yükler üç eksenli gerilme durumu yaratacağı için numuneleri üç eksenli deneye tabi tutmak daha uygun olacaktır [Nonveiller, 1989]. Öte yandan farklı katkı maddelerinin enjeksiyonun mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak yada farklı enjeksiyonların mukavemetlerini karşılaştırmak için serbest basınç deneyleri çok yararlıdır [Karol, 2003]. Silikat enjeksiyonları 70 ile 3500 kPa arasında değişen serbest basınç dayanımı gösterebilirler. Dayanım silikat miktarıyla birlikte, jelleşme süresi, reaktant, tane büyüklüğü ve diğer faktörler bağlıdır [Henn, 1996]. Çizelge 3.1 ve çizelge 3.2 de silikat ve reçine enjeksiyonu yapılmış çeşitli kumların mukavemet bilgileri verilmiştir.

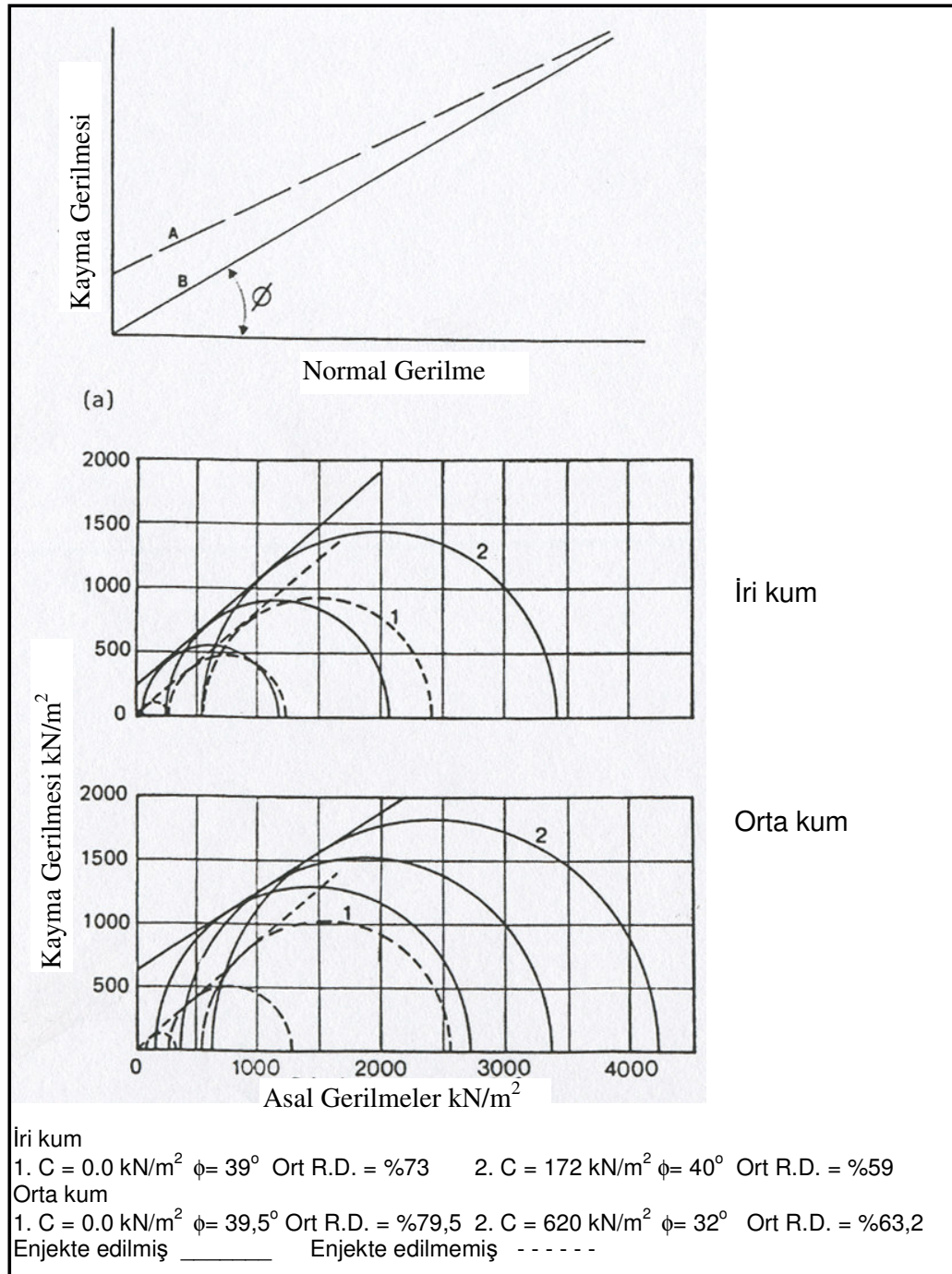
Akrilamit, silikat ve lignin tabanlı enjeksiyonlar üzerinde yapılan gerilme kontrollü serbest basınç deneyleri serbest basınç dayanım altındaki sürekli sabit yüklerin sünmeye sebep olduğu ve bununda uygulanan yükün serbest basınç dayanımına oranına bağlı olarak saatler, günler hatta aylar içinde yıkımla sonuçlanabildiği bilinmektedir. Konu hakkındaki sınırlı veriler bir tünel veya açık yarma gibi bir yüzü açık enjeksiyonlanmış zeminlerde serbest dayanımının %25 i kadar olan yüklerin sünme oluşturmayaacağını ifade etmektedir. Yine yanal basınç altında üç eksenli gerilme durumunda sünme limiti serbest basınç dayanımının yarısına kadar yaklaşmaktadır.

Çizelge 3.1. Silika enjeksiyonlu kumların mukavemet değerleri [Shroff ve Shah , 1993]

Çöktürücü	Enjekte edilen kum	Mukavemet Bilgisi	Araştırmacı
Klorit	İri kum RD % 58-97	$C = 103 - 310 \text{ kPa}$ $\phi = 35^\circ - 51^\circ$	Skipp (1963) Cooling (1968)
	Orta kum RD % 63,2	$C = 620 \text{ kPa}$ $\phi = 32^\circ$ $q_u = 896-2000 \text{ kPa}$	
Bikarbonat	Orta-sıkı kum	$q_u = 206 \text{ kPa}$	Neeland ve James (1963)
Formamid veya Formik asit + etil asetat	Sıkı Kum	$q_u = 5171 \text{ kPa}$ $\sigma_1 - \sigma_3 = 4757 \text{ kPa}$	Graf (1982)
	Orta-sıkı kum	$q_u = 2068 \text{ kPa}$	Neeland ve James (1963)
	Orta kum batırılmış kür	$C = 1078 \text{ kPa}$ $q_u = 3334 \text{ kPa}$	Alam Singh (1983)
	Kum (kuru) $r_d = 15,9 \text{ kN/m}^3$ $n = \% 0,4$	$C = 170-360 \text{ kPa}$ $\phi = 36,5^\circ - 42,1^\circ$	Stezler (1982) Kriezeck (1982)
	Kum $r_d = 15,5-16,8 \text{ kN/m}^3$ $D_{50} = 1-0,2 \text{ mm}$	$q_u = 250 \text{ kPa}$ $\sigma_1 - \sigma_3 = 3200 \text{ kPa}$ (10 gün kür)	Clough (1979)
	Kuru Kum	$q_u = 1961 \text{ kPa}$	Verfel (1979)
Alüminat+ Amide	Yaş Kum Su altında kür	$q_u = 1930 \text{ kPa}$	Karol (1958)
	İnce-Orta Sıkı kum $\phi = 36^\circ$	$C = 3692 \text{ kPa}$ $\phi = 35^\circ$ $q_u = 3375 \text{ kPa}$	Davidson (1982)
	Kuru Kum	$q_u = 1647 \text{ kPa}$ $\sigma_1 - \sigma_3 = 1220 \text{ kPa}$	Graf (1982)

Çizelge 3.2. Reçine enjeksiyonlu kumların mukavemet değerleri [Shroff ve Shah, 1993]

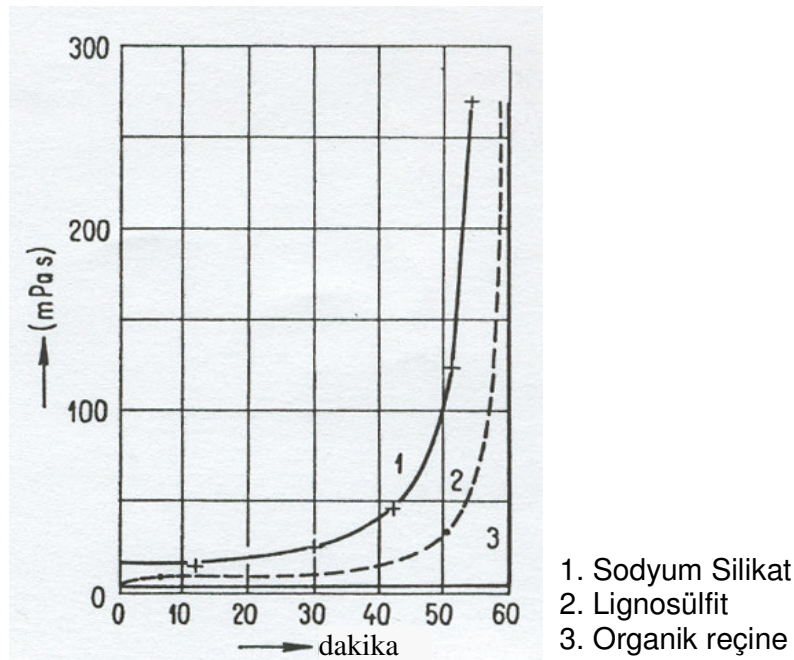
Reçine	Enjekte edilen kum	Mukavemet Bilgisi	Araştırmacı
Krom Lignin	Kum $d_{10} = 130$ $d_{90} = 400$	$C = 69 \text{ kPa}$ $\phi = 35^\circ - 51^\circ$ $q_u = 2068 \text{ kPa}$	Scott (1963) Neeland ve James (1963)
	Kuru kum ($Dr = \% 63,2$)	$C = 0,8 \text{ N/mm}^2$ $\phi = 36^\circ$	Schiffman ve Wilson (1958)
Üreformaldehid (Aminoplast)	İri kum	$C = 96-345 \text{ kPa}$ $\phi = 22^\circ - 40^\circ$ $q_u = 48-186 \text{ kPa}$	Skipp (1963)
Resorsinol formaldehid	Kum 0,1-0,4 mm	$q_u = 411 - 1176 \text{ kPa}$	Caron (1963)
AM-9	Siltli Kum	$q_u = 304 \text{ kPa}$	Caron (1963)
	Kumlu Çakıl	$q_u = 2068 \text{ kPa}$	Neeland ve James (1963)
	Kuru Kum	$q_u = 8650 \text{ kPa}$ $\sigma_1 - \sigma_3 = 8478 \text{ kPa}$	Graf (1982)
Akrilamit	İri Kum	$q_u = 365 \text{ kPa}$ $\sigma_1 - \sigma_3 = 365 \text{ kPa}$	Clarke (1961)
Üretan	Orta Nemli Kum ($Dr = \% 63$)	$q_u = 24125 \text{ kPa}$ (7 gün) $q_u = 27523 \text{ kPa}$ (28 gün)	Vinson (1972)
	İnce kum kaya 0,01-0,03 mm fisürlü	$q_u = 13729 \text{ kPa}$	Jiaci (1982)
Epoksi	İri taneli granit birleşimler	$q_u = 20675 \text{ kPa}$	Erickson (1968)
	Basalt	$q_u = 69823 \text{ kPa}$	Shroff ve Shah (1985)



Şekil 3.3. (a) Enjekte edilmiş ve edilmemiş granüler zeminler için kırılma zarfı
 (b) Silika enjeksiyonu yapılmış iri ve orta taneli kumların üç eksenli test sonuçları [Karol, 2003]

3.4. Jelleşme Süresi

Jelleşme süresi dakika olarak ölçülen ve enjeksiyonun pompalamadan itibaren akışkanlık özelliğini yitirerek katılaştığı ana kadar geçen süreyi ifade eder. İdeal olarak bu sürenin enjeksiyonun istenen noktaya ulaşmadan katılaşmasını engelleyecek kadar uzun olması istenir. [Hausmann, 1990]. Rhone Progil Şirketi jelleşme süresini karışımın hazırlandığı an ile viskozitesinin 100 mPas olduğu an arasındaki zaman olarak tanımlamıştır. Bundan birkaç dakika sonra karışım jelleşir ve yatay pozisyona getirilmiş bir potanın içerisinde akmaz. Enjeksiyonun mümkün olduğu süre ise jelleşme süresinin dörtte üçü kadar kabul edilir [Verfel , 1989]. Newtonian tipinde bütün kimyasal karışımlar az yada çok viskozdur ve bu karışımlardan bir kısmı, silikat ve lignosülfite olduğu gibi, bir süre için sabit viskozitesini korurken sonra viskozite artmaya başlar, bir kısmında ise, organik reçinelerde olduğu gibi, sabit viskozite bir süre değişmez ve aniden katılaşma gerçekleşir. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4. Viskozite-jelleşme süresi ilişkisi [Verfel, 1989]

Açık olarak jelleşme süresinin kontrolü kimyasal enjeksiyonlar için kritik bir öneme sahiptir ve hangi malzeme seçilirse seçilsin bu süresinin uygun katalizörler, hızlandırıcılar vs seçilerek net bir şekilde ayarlanması gerekir [Bowen, 1975]. Jelleşme süresi başta aktivatör, inhibitör ve katalizör olmak üzere enjeksiyon elemanlarının bir fonksiyonudur ve bu elemanların oranlarına bağlıdır [USACE, 1995]. Geniş bir bant içerisinde ve doğru bir şekilde tekrarlanabilen jelleşme sürelerinin elde edilebildiği enjeksiyonlar jelleşme süresinin kontrolü açısından iyi veya mükemmel, dar bir aralıkta ve zor tekrarlanabilen jelleşme sürelerinin geçerli olduğu enjeksiyonlar ise orta yada zayıf enjeksiyonlar olarak nitelenirler [Karol, 2003]. Jelleşme süresini etkileyen diğer faktörler çözelti ve zemin arasındaki sıcaklık farkı ve enjeksiyon sırasında meydana gelen seyreltilme olarak sıralanabilir [Nonveiller,1989]. Jelleşme sonrasında enjeksiyon mukavemet kazanmaya başlar ve jelleşme ile istenen özelliklerin elde edildiği an arasında kalan süre kür dönemi olarak adlandırılır [USACE, 1995].

3.5. Hassaslık

Bir enjeksiyon malzemesinin çevre şartlarına karşı duyarlılığı o malzemenin arazide kullanılma kolaylığı açısından son derece önemlidir. Sıcaklık enjeksiyonu etkileyen çevre şartlarının başında gelirken düşen sıcaklık jelleşme süresinin önemli oranda artmasına sebep olabilir. Sıcaklığın yanı sıra enjeksiyonun yer altı suyu tarafından seyreltilmeside jelleşme süresinin etkiler. Fazla miktarda seyreltme, enjeksiyonun jelleşme için gerekli konsantrasyonun altına düşmesine neden olabilir [Karol, 2003] Bu durum türbülans varsa yada yaratılırsa veya az enjeksiyon çok miktarda akış halindeki suya enjekte edilirse gerçekleşebilir [USACE,1995]. Öte yandan yer altı suyu içerisinde bulunabilecek çözeltmiş tuz kimyasal reaksiyona girmek yada pH derecesini etkilemek suretiyle jelleşme süresini önemli ölçüde etkileyebilir [Karol, 2003]. Sodyum silikat enjeksiyonları için yüksek pH dereceli yer altı suyu varlığı ilk jelleşmeyi engelleyerek zamanla enjeksiyonun bozulmasına, düşük pH ise sodyum silikatlarda jelleşmeyi hızlandırırken

akrilamit ve akrilitlerde kısılmasına neden olur [Baker, 1982]. Jelleşme süresi pompa, valf yada borular içerisinde bulunabilecek çözülmemiş katılarla temas sonucunda da değişebilir [Karol,2003].

3.6 Toksisite

Kimyasal enjeksiyonların zehirliliği çalışan ekibin sağlığı için oluşacak tehlike ve çevre için oluşabilecek tehditler şeklinde iki açıdan ele alınmalıdır [Nonveiller,1989]. İnsan sağlığı açısından geçmişte kullanılmış ve halen kullanılmakta olan çeşitli malzemelerin nörotoksik, kanserojen, toksik, korozif ve tahriş edici olma gibi özellikleri vardır [Karol, 2003]. Çevre açısından değerlendirildiğinde yer altı suyuna yavaş yavaş sızıntı meydana gelmesi zehirli maddelerin suya kirletmesine neden olur [Nonveiller, 1989]. Günümüzde zehirli enjeksiyonların büyük kısmı piyasadan çekilmiş olmakla birlikte, enjeksiyon işinde çalışanlar düzgün bir şekilde kullanılmadıkları takdirde çeşitli maddelerin zehirli olabilme veya zehirli hale gelebilme potansiyellerinin olduğunu farkında olmalıdırlar [USACE, 1995]. Tehlikeli kimyasal malzemeler üreticiler tarafından belli prosedürlere göre test edilir ve LD 50 olarak bilinen bir büyüklükle tanımlanır. Bu değer 5 ile 50 arasında olduğu malzemeler çok zehirli, 50 ile 5000 arasında olduğu malzemeler orta zehirli ve 500 ile 5000 arasında olduğu malzemeler çok az zehirli olarak bilinirler [Karol, 2003]. Enjeksiyonlar içerisinde silikatlar ve akrilitler en az zehirli olarak bilinirler. Bugüne kadar meydana gelen kazaların büyük kısmının dikkatsizlik ve imalatçı tavsiyelerine uyulmamaktan kaynaklandığı söylenebilir. Rapor edilen kazalarda enjeksiyonla ilgili sağlık problemlerinin genel halk sağlığı ile ilgili değil, direkt olarak enjeksiyonla temas eden kişilerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu açıdan tecrübeli personel ve uygun ekipman kullanımı son derece önemlidir. Reaktif bir çevreye yapılacak enjeksiyonun yer altı suyu ile temas sonucunda suyu kirleterek halk sağlığını tehdit edebileceği unutulmamalıdır. Öte yandan enjeksiyon güvenli ve uygun bir şekilde kullanıldığı takdirde insanları ve çevreyi tehdit etmeyen verimli sonuçlar ortaya koyar [Clifton, 1986].

3.7. Ekonomi

Bütün inşaat işlerinde olduğu gibi enjeksiyon işlerinde de maliyet son derece önemli bir husustur. Enjeksiyonu diğer iyileştirme yöntemleri ile maliyet açısından kıyaslamak mümkündür. Çeşitli durumlarda yer altı suyu kaynaklı problemler enjeksiyona alternatif yöntemlerle daha az maliyetle çözülebilir [Nonveiller, 1989]. Öte yandan farklı enjeksiyonları maliyet açısından kıyaslamak çoğu zaman yanıltıcı olabilir. Çünkü genelde böyle bir kıyaslama malzemenin fiyatının kıyaslanması şeklinde yapılmakta, maliyetin önemli bir parçası olan enjeksiyon işleminin kendisi ve enjeksiyonun etkinliği gözönüne alınmamaktadır. Çimento enjeksiyonlarının işçilik maliyeti kimyasal enjeksiyonlardan daha yüksek iken, kimyasal enjeksiyonlar malzeme itibarıyla çok daha pahalıdır. Öte yandan çok daha az miktarda kimyasal enjeksiyon daha efektif bir çözüm sunabilir [Bowen, 1975]. Malzemelerin maliyetleri arasında 1 e 80 oranına kadar varan farklar olabilsede yerinde enjeksiyonların maliyeti en fazla bire beşe kadar değişmektedir. Bu açıdan maliyet kıyaslaması enjeksiyonun gerçekleştirilmesinin maliyeti ve yapılan enjeksiyonun etkinliği göz önünde bulundurularak yapılmalıdır [Karol, 2003]. Kimyasal enjeksiyon işlemi yapılan ve enjeksiyon sonrasında kalan açık delikler portland çimentosu enjeksiyonu ile doldurularak maliyet düşürülebilir. [USACE, 1995].

3.8. Syneresis

Syneresis kür edilmiş jelin büzülerek ve suyunu kaybederek kimyasal enjeksiyon yapılmış örneğin özelliklerini kaybetmesine sebep olduğu durumdur. Syneresis jelleşmenin akışkan ve plastik aşamasını takip eden en katı durumunda meydana gelir ve ayrılan su hacminin jelin ilk hacmine oranı olarak ifade edilebilir [Verfel, 1989]. Düşük silikat ihtiva eden ve uzun katılaşma süresi olan jellerde syneresis çok daha etkili olurken ortadan inceye kadar kumlar için etkisi ihmal edilebilir düzeydedir [Karol, 2003]. Japonya'da koloidal silika üzerinde yapılan çalışmalar syneresis etkisinin ihmal

edilebileceğini göstermiştir. [Yonekura ve Kaga, 1992].

3.9. İdeal Kimyasal Enjeksiyon

Bütün bu bilgiler ışığında ideal kimyasal bir enjeksiyonun malzeme veya çözelti olarak ve en son hali ile aşağıdaki özelliklere sahip olması gerektiği söylenebilir [Karol, 2003]:

1. Malzemenin çözücünün kendi maliyeti ve taşınması maliyetinden kaçınabilmek açısından suda çözülebilen bir toz halinde olması,
2. Ucuz ve kaynağı bol bir kimyasaldan elde edilebilmesi,
3. Değişik depolama şartlarına karşı hassas olmaması,
4. Zehirsiz olması, aşındırıcılık özelliği ve patlayıcılığı olmaması,
5. Tercihen suya yakın düşük viskoziteli olması,
6. Genel olarak genişlemeyen ve üstteki özellikleri taşıyan bir kimyasalın katalizör olarak kullanılması,
7. Yer altı suyu içerisinde ki tuzlara karşı hassas olmaması,
8. Değişen jelleşme süreleri ile kontrol edilebilmesi,
9. Yer altı suyu ile kabul edilebilir seviyede seyreltilmesi,
10. Yer altı suyundaki kimyasallardan etkilenmemesi,
11. Yüksek dayanımlı olması.

Gerçekte yukarda sıralanan bütün özelliklere sahip bir malzeme tabiki yoktur. Burada önemli olan proje için gerekli önceliklerin belirlenmesi ve bunları karşılayacak kimyasal malzemenin seçiminde doğru karar verilmesidir. Herhangi bir enjeksiyon için enjekte edilmiş zemin kütlesinin ekonomik ve fiziksel özellikleri çok geniş bir aralıkta değişebilir. Bu açıdan enjeksiyon türleri arasında sayısal bir karşılaştırma yapmak hem zordur hemde genel anlamda doğru değildir. Öte yandan geniş bir bant içerisinde yapılacak bir karşılaştırma güveli ve yararlı olabilir. Temel enjeksiyon özellikleri ve uygulama açısından kimyasal enjeksiyonların karşılaştırılması ile ilgili Amerika Askeri Mühendisler Birliğinin hazırladığı çizelgeler [USACE, 1995]

ve Karol'un kullanılmakta olan ticari enjeksiyonları karşılaştırdığı çizelge aşağıda sunulmuştur [Karol,2003].

Çizelge 3.3. Temel kimyasal enjeksiyonların özellikleri [USACE, 1995]

Tip	Özellikler					
	Penetrasyon	Dayanıklılık	Uygulamanın kolaylığı	Potansiyel Toksikite	Malzemenin Yanıcılığı	Relatif maliyet
Portland çimentosu enjeksiyonu	D	Y	O	D	YOK	D
Silikatlar	Y	O	Y	D	YOK	D
Akrilitler	Y	O	Y	O	D	Y
Ligninler	Y	O	Y	Y	D	Y
Üretanlar	O	Y	O	Y	Y	Y
Reçineler	D	Y	O	Y	O	Y

D: Düşük Y:Yüksek O:Orta

Çizelge 3.4. Kimyasal enjeksiyonların uygulama alanları [USACE, 1995]

Uygulama	Tip				
	Sodyum Silikat	Akrilit	Lignin	Üretan	Reçine
Mukavemet Kazandırma	Y	Y	Y	N	N
Su akışını engelleme	Y	Y	Y	K	N
Beton tamiri	K	K	K	Y	Y
Kanalizasyon tamiri	K	K	K	Y	Y
Yük transferi ve taşıma	K	K	K	Y	K
Ankraj yerleştirme	N	N	N	K	Y

Y: Yaygın kullanılır K :Kullanılır N:Nadiren Kullanılır

Çizelge 3.5. Çeşitli kimyasal enjeksiyonların karşılaştırılması [Karol, 2003]

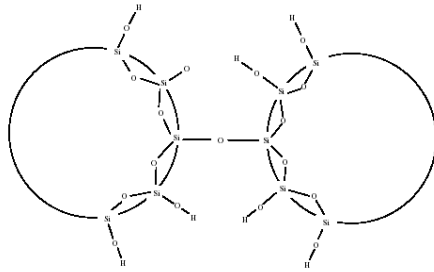
Enjeksiyon	Ticari Ürünler	Zehirlilik- Aşındırıcılık	Viskozite	Mukavemet
Silikatlar	Joosten Prosesi	Düşük	Yüksek	Yüksek
	Siroc	Orta	Orta	Orta
	Silikat- bikarbonat	Düşük	Orta	Düşük
Lignosülfanatlar	Terra Firma	Yüksek	Orta	Düşük
	Blox-all	Yüksek	Orta	Düşük
Fenoplastlar	Terrainer	Orta	Orta	Düşük
	Geoseal	Orta	Orta	Düşük
Aminoplastlar	Herculox	Orta	Orta	Yüksek
	Cyanalog	Orta	Orta	Yüksek
Akrilamitler	AV-100	Yüksek	Düşük	Düşük
	Rocagel BT	Yüksek	Düşük	Düşük
	Nitto-SS	Yüksek	Düşük	Düşük
Poliakrilamit	Injectite 80	Düşük	Yüksek	Düşük
Akrilit	AC-400	Düşük	Düşük	Düşük
	Terrajel			
	Flexijel			
Poliüretan	CR-250	Yüksek	Yüksek	Yüksek
	TACSS			
	CG5610			
	AV202			

4. KOLLOİDAL SİLİKA ENJEKSİYONU

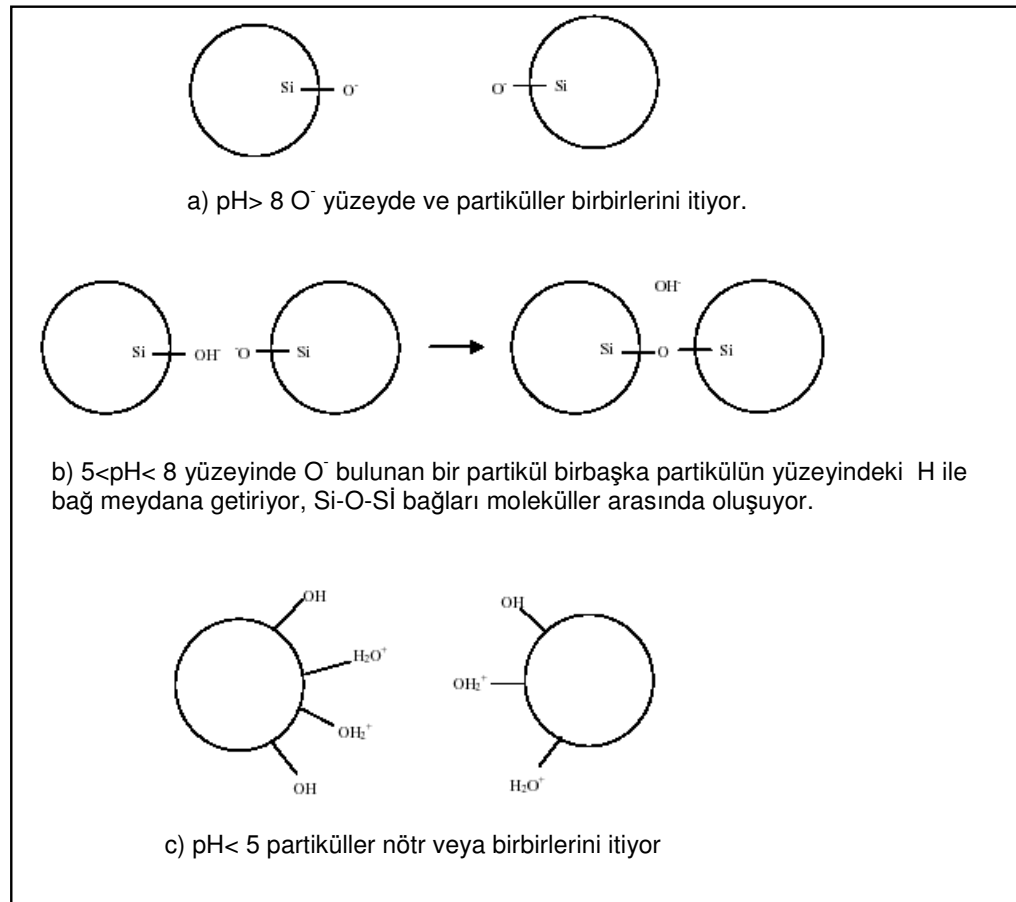
Kolloidal silika doymuş silisik asit çözeltisinden üretilen mikroskopik silica partiküllerinin oluşturduğu sulu bir süspansiyondur. [İller, 1979] Verilen bir çözeltide partikül büyüklüğü yaklaşık olarak sabit olmasına rağmen partikül boyutları 2 ile 100 nanometre arasında değişebilir. Seyreltik çözeltilerde kolloidal silikanın yoğunluğu ve viskozitesi su ile benzerdir. Noll tarafından jelleşme süresi 49 güne kadar rapor edilmiştir [Noll ve ark., 1992]. Potansiyel bir enjeksiyon malzemesi olarak kolloidal silika kontrol edilebilir jelleşme süresi ve mükemmel dayanıklılığı sayesinde dikkate değer bir malzemedir. Ayrıca kolloidal silika kimyasal ve biyolojik olarak inert ve zehirsizdir. Kolloidal silika partikülleri H_4SiO_4 moleküllerinin diğer moleküllerle siloxane (Si-O-Si) bağları meydana getirmek üzere etkileşimleri ile meydana gelir. Partiküllerin yüzeyleri birleşmemiş silanol (SiOH) grupları ihtiva eder [İller, 1979]. Partiküller diğer partiküller ile temas edince siloxane bağları meydana getirirler. (Şekil 4-1) Partiküller istenen boyutlara büyüdüğünde çözelti stabilize olur. Çözeltinin stabilizasyonu pH derecesinin artırılması ile gerçekleşir, bu partiküllerin iyonlaşmasına ve birbirlerini itmelerine neden olur. Jelleşme itici kuvvetlerin kontrollü bir şekilde azaltılması ile gerçekleştirilir. Bu kolloidal partiküllerin pıhtılaşmasına sebep olur. Jelleşme süresi partikül etkileşiminin derecesine bağlıdır.

Kolloidal silikanın jelleşmesi çoğu zaman sodyumhidroksit gibi bir alkalın çözelti kullanılarak engellenir. Alkali partiküllerin yüzeyleri ile reaksiyona girerek partiküllerde negatif bir yük meydana getirirki bu onların birbirlerini itmesine neden olur (Şekil 4-2 a). Gerçekte alkalın çözelti tarafından katılan hidroksil iyonları jel oluşumunu katalize eder, ancak yüksek pH değerlerinde stabildir çünkü yüksek partikül yüküne sahiptir. Düşük pH değerlerinde partikül yükü çözeltideki hidroksil iyon konsantrasyonuna bağlı olarak azalır. Bu sebeple Şekil 4.2.b de görüldüğü gibi partiküller etkileşime başlarlar ve siloxane bağları meydana getirirler. Sonuç olarak en kısa jelleşme süresi pH derecesinin 5 ve 6 olduğu durumlarda gerçekleşir. PH derecesi 5 in altına

düşmeye devam ettikçe hidroksil iyonları kaybolur ve partiküller yüksüz hale gelir. Dolayısıyla siloksan bağlarının meydana gelme hızı düşer ve jelleşme süresinde artış meydana gelir (Şekil 4.2. c).



Şekil 4.1. Siloxane bağlarının oluşumu [Moridis ve ark., 1995]



Şekil 4.2. Değişik pH derecelerinde koloidal silika partiküllerinin hareketi [Moridis ve ark., 1995]

4.1 Kolloidal Silika Enjeksiyonunun Reolojik Özellikleri

4.1.1. Jelleşme süresinin kontrolü

Koloidal silikanın jelleşme süresi bir çok değişkene bağlıdır. Bunlar silika katısının miktarı, silika partiküllerinin boyutları veya yüzey alanları, pH derecesi, partiküllerin yükleri ve tuz konsantrasyonudur. Silika katısının miktarı azaldığında ve silika partiküllerinin boyutları arttığında jelleşme süresi uzar. Minimum jelleşme süresi pH derecesinin 5 ve 6 olduğu durumlarda gerçekleşir. Daha uzun jelleşme süreleri bu sınırın alt yada üstündeki pH dereceleri için gerçekleşebilir. Jelleşme süresi sıcaklık ile de etkilenebilir. Tuz ilavesi jelleşme süresini kısaltır ve tipik olarak sodyum klorid veya amonyum klorid bu amaçla kullanılır [Gallagher, 2000].

Noll ve ark. (1992) Du Pont's Ludox koloidal silikanın jelleşme süresini etkileyen faktörleri tespit edebilmek için bir çok test gerçekleştirmiştir [Noll ve ark., 1992]. Bu testler su tuz çözeltisi ile seyreltilerek istenen silika ve tuz konsantrasyonuna getirilmiş konsantre koloidal silika çözeltisi kullanılarak yapılmıştır. PH derecesini ayarlamak için hidroklorik asit kullanılmış ve koloidal silika konsantrasyonu, pH, tuzluluk ve değişik tuzların etkisi dikkate alınmıştır. Noll ve ark. (1992) ağırlıkça % 5 Ludox çözeltisinin 5 ile 9.5 arasındaki pH derecelerinde kullanılmaları ile 20 dakikadan 49 güne kadar jelleşme süresinin elde edilebileceğini rapor etmiştir. Daha uzun jelleşme sürelerinin daha düşük çözelti konsantrasyonu, tuz konsantrasyonu ve yüksek pH derecelerinde elde etmek mümkündür. Testlerin büyük kısmı sodyumklorid kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yer altı suyunda bulunabilecek aliminyum ve kalsiyumun jelleşme süresi üzerindeki etkileri araştırıldığında aliminyumun jelleşmeyi hızlandırdığı, kalsiyumun ise büyük bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Diğer düşük seviyedeki çözülmüş organik kimyasalların jelleşme süresi üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır [Noll ve ark., 1992].

Persoff ve ark. (1994) önemli miktarda kalsiyum iyonu konsantrasyonu bulunan zeminlerde deneyler yapmıştır. Kalsiyum katyonları ile kolloidal silika arasındaki etkileşim hızlı ve kontrol edilemeyen bir jelleşmeye sebep olmuş, Persoff erken jelleşmeyi engellemek için üç yöntem önermiştir. Bunlar tuzlu su ile yıkama, enjeksiyona seyreltik bir enjeksiyon ile başlama ve enjeksiyonda NaCl yerine NaF kullanmaktır [Persoff ve ark., 1994]

4.1.2. Dayanım, hidrolik geçirgenlik ve dayanıklılık

Yonekura ve Miwa (1993) kolloidal silika ile stabilize edilmiş kumlar üzerinde mukavemet, synerisis, sızdırma ve hidrolik geçirgenlik testleri yapmışlardır. Kumlar % 32 lik kolloidal silika çözeltisi ile enjekte edilmiştir. Enjekte edilmiş kumların serbest basınç dayanımları deney başlangıcında 335 kPa ile başlamış 1000 gün içerisinde sürekli artarak 1196 kPa ye ulaşmıştır. Kolloidal silika jel örnekleri doymuş olarak 1000 günden fazla süre bekletilmiş ve syneresis ve sızdırma için test edilmiştir. Synerisis, sıvının sızması ile jelin büzülmesi ve hacminin azalması olayıdır. Silika sızma oranı suya sızan silika miktarının ilk baştaki jel miktarına bölümü olarak tanımlanmaktadır. Testlerde gerçek anlamda sızma veya synerisis olmadığı tespit edilmiştir. Enjeksiyon yapılmış numunelerde permiabilitenin 5 yıla uzanan periyod boyunca düştüğünü rapor etmişlerdir [Yonekura ve Miwa, 1993].

Noll ve ark. (1992) hidrolik geçirgenlik testleri yapmış ve ağırlıkça % 5 Ludox çözeltisi ile geçirgenliğin 10^{-7} ile 10^{-8} cm/s. mertebelerine düşecek şekilde 3-4 kat oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kolloidal silika enjeksiyonunun uzun süre stabilitesini muhafaza etmesi için doymun ve pH derecesi 3 ile 9 arasında olacak şekilde tutulması gerektiğini belirtmişlerdir [Noll ve ark., 1992].

Persoff ve ark. (1997) seyreltme ve kirleticilerin kolloidal silika ile enjekte edilmiş zeminlerin mukavemetleri ve hidrolik geçirgenlikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında enjeksiyonda artan kolloidal silika miktarının

serbest basınç direncinin artmasına ve hidrolik geçirgenliğin azalmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. % 20 silika konsantrasyonu ve 430 kPa maksimum dayanıma kadar, silika konsantrasyonu ile serbest basınç dayanımı arasında lineer bir ilişki tespit edilmiştir. Dayanım bir yıl süresince artmaya devam etmiştir [Persoff ve ark., 1997].

Whang' a göre (1995) yaş-kuru çevrimi sırasında kolloidal silikanın hızlı kurutulması ufalanmasına sebep olmaktadır. Öte yandan kolloidal silika doymuş olarak muhafaza edildiğinde 25 yıla kadar stabil kalabilmektedir. Kolloidal silikanın maliyeti seyreltme miktarına bağlıdır ve % 35 lik bir poroziteye sahip 1 m³ zeminin iyileştirilmesi için yüzde 5,10 ve 15'lik kolloidal silika çözeltilerinin maliyetleri sırası ile 60, 120 ve 180 dolardır [Whang, 1995].

4.2. Kolloidal Silika ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Kolloidal silikanın jelleşme süresi, mukavemeti, dayanıklılığı, viskozitesi ve permeabilitesi üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Kolloidal silika konsantrasyonunun artırılması jelleşme süresini azaltırken jeli meydana getiren partiküllerin sayılarının artması daha kuvvetli bir jel meydana gelmesine sebep olur. En kısa jelleşme süresi için 5 ile 6 arasında pH seviyesi gerekmektedir [Dupont, 1997]. Bunun üzerindeki ve altındaki pH seviyeleri için daha uzun jelleşme süreleri elde edilmektedir. Gallagher (2000) ve Noll ve ark. (1992) tarafından yapılan çalışmalarda ortalama tane boyutu 7 nm ve yüzey alanı 342 m²/g olan LUDOX SM kolloidal silikası kullanılmış ve jelleşme süresinin 49 ve 100 güne kadar uzadığı bildirilmiştir. Noll ve ark. bu silikanın jelleşme süresinin tespiti için testler yapmıştır. pH derecesi ve tuz ile silika konsantrasyonuna bağlı olmak kaydı ile jelleşme süresinin birkaç dakikadan birkaç bin saate kadar uzanabileceği görülmüştür. Sodyum klorid, kalsiyum ve aliminyum katalizör olarak kullanılmıştır. Sodyum monovalent kalsiyum ve aliminyum ise bi ve tri valenttirler. Jelleşme süresinin

belirlenmesinde monovalent bir katyon olduğu ve en uzun jelleşme süresine sahip olduğu için sodyum klorit tuz katalizörü olarak tercih edilmiştir. Asit bölgesinde jel oluşumunda kalsiyumun çok az yada hiç etkisinin olmadığı bulunmuştur. Temel bölgede hızlı bir jelleşme meydana gelmiştir. Tuz eklenmesi ile pH düştükçe aliminyumun jel oluşumunu olumsuz olarak etkilediğı ve jelleşme süresini hızlandırdığı görülmüştür [Gallagher, 2000; Nollve ark., 1992].

Jurinak ve ark. (1989) koloidal silikayı petrol alanlarında sıvı akışını kontrol için kullanmışlardır. Onlar kolay taşınabilir ve kullanılabilir, 250 F kadar kontrol edilebilir güvenli jelleşme süresine sahip ve yüksek saha performansı gösteren bir malzeme istemişlerdir. Koloidal silika bu kriterlerin büyük kısmını karşıladığı için rezervuardan su kullanılarak beherler içerisinde jelleşme süresi testleri yapılmıştır. Rezervuar mineralleri ve sıvısı ile meydana gelen etkileşim sebebiyle uyumlu jelleşme süreleri tespit edilememiştir. Arazi deneylerinde tuza duyarlı çözeltiyi saha şartlarındaki tuzlu sudan izole edebilmek için fışkırtma içme suyu ve yemeklik sodyum klorid kullanılmıştır. Tazyikli çözelti silika çözeltisine yakın bir tuz konsantrasyonundadır ve jelleşme süresini etkileyen mineralleri yıkamıştır. Koloidal silika bu testlerde yüksek performans göstermiştir [Jurinak ve ark., 1989].

Durmuşoğlu ve Çorapçioğlu (2000) koloidal silika jel oluşumu ve bariyer oluşumunu araştırmak üzere çeşitli deneyler yapmışlardır. Viskozite testleri ağırlıkça % 40 oranında koloidal silikanın zeminin varlığında veya yokluğunda değişik tuz oranlarında nasıl jelleşme meydana getirdiğini tespit etmek için yapılmıştır. Yüksek tuz konsantrasyonunda koloidal silikanın zeminin varlığı ile daha hızlı bir şekilde jelleştiğı bulunmuştur. Zemin olmaksızın %4 lük NaCl çözeltisinin jelleşmesi 30 dakika alırken, zemin varlığında bu süre 15 dakikaya düşmüştür. NaCl konsantrasyonuna bağlı olarak jelleşme süresinin testi için ağırlıkça %1 den % 6 ya ve %10 luk NaCl çözeltileri yine aynı hacimde ağırlıkça % 40 lık koloidal silika ile

kariştırılmıştır. Jelleşme örneklerde meydana gelen bir renk değişimi ile meydana gelmiştir. Jelleşme meydana geldikçe örnekler aıktan opak beyaza dönüşmüşlerdir. %1 ve % 2 lik NaCl konsantrasyonları uzun bir süre sonunda da jelleşmemişlerdir [Durmuşoğlu ve Çorapçioğlu, 2000].

Persoff ve ark., (1999) bir kolloidal silikanın jelleşme süresinin pH derecesinin ayarlanması ve /veya stabilize edicinin iyonik mukavemetine bağlı olduğunu söylemektedir. Yazarlar daha seyreltik kolloidlerin jelleşmeleri çok uzun zaman almasına ve diğer örneklerle göre daha zayıf olmalarına karşın yapılabileceklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, tuzlu su jelleşmeyi teşvik etmekte ve nötr Ph jelleşmenin daha hızlı meydana gelmesine sebep olmaktadır. Sürekli alkalamanın enjeksiyonun jelleşmesini geciktirdiği ve jeli zayıflattığı bulunmuştur [Persoff ve ark., 1999].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULARIN YORUMU

5.1. Giriş

Bu çalışmada kolloidal silika ile enjekte edilmiş ince-orta boyut dağılımına sahip kumların statik ve dinamik yükler altında davranışı araştırılmıştır. Permeasyon enjeksiyonlarında enjekte edilebilirliğin temel değişkeni malzemenin viskozitesidir. Bu sebeple deney çalışmalarının ilk kısmında kullanılacak kolloidal silikanın viskozitesi ve jelleşme süresi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak kullanılacak çözelti/silika oranları belirlenmiştir. Deney çalışmalarının ikinci aşamasında ise enjekte edilmiş zemin numunelerinin önce tek eksenli basınç deneyleri yapılarak statik, daha sonra ise devinimli üç eksenli deneyleri yapılarak dinamik yükler altında davranışı incelenmiştir.

5.2. Kolloidal Silika ile Viskozite ve Jelleşme Süresi Çalışmaları

Test programının ilk aşamasında kolloidal silika çözeltisinin jelleşme süresi araştırılarak ilgili grafikler çizilmiştir. Jelleşme süresinin tespitinde öznel gözlemler yapılmış, bununla birlikte çeşitli konsantrasyondaki çözeltiler için nesnel olarakta viskozite değişimi izlenmiştir. Kolloidal silika çözeltilerinin jelleşmesi pH seviyesinin ayarlanması ile gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça tuz su oranı 1/6, 1/9 ve 1/12 olan çözeltilerinden çeşitli miktarlarda alınarak belli miktardaki (80 gr) kolloidal silika çözeltisi ile karıştırılmıştır. Daha sonra ağırlıkça tuz su oranı 1/9 olan çözeltiden çeşitli miktarlarda alınarak 60 ve 100 gr lık kolloidal silika çözeltisi ile karıştırılmıştır. Her bir karışımın jelleşmesi izlenmiş ve jelleşme süreleri kayıt edilmiştir. Bu bilgiler tuz ve su miktarları ile kolloidal silika çözeltisi miktarının jelleşme süresini nasıl etkilediğini görebilmek için kullanılmıştır.

5.2.1. Malzemeler

Kolloidal silika çözeltisi olarak Degussa firması tarafından üretilen Meyco MP 320 ürünü kullanılmıştır. Ürünün çeşitli özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir [Degussa, 2006]. Su tuz çözeltisi sofr tuzu ve şebeke suyu kullanılarak hazırlanmıştır. Verilen teknik bilgiler 20°C de geçerlidir.

Çizelge 5.1. MEYCO MP 320 teknik özellikleri [Degussa, 2006]

MEYCO MP 320	
Renk	Beyaz/açık
Yoğunluk	1,3 kg/l
Viskosite	~ 10 cP
PH	9.5 –10.5
Hızlandırıcı bilgileri (tuz-su çözeltisi)	
Renk	Açık
Yoğunluk	1,07 kg/dm ³
Viskozite	~ 1 cP
PH	7
Karışım bilgileri (karışım oranlarına bağlıdır)	
Yoğunluk	~1,25 kg/dm ³
Viskozite	~ 5 cP
PH	~9

Üretici firma MEYCO MP 320 malzemesinin kullanım alanları ve avantajlı yanları ile ilgili şu bilgileri vermektedir [Degussa, 2006]. MEYCO MP320 tünel projelerinin ilk enjeksiyonunda, mevcut tünellerde su geçirimsizliği için, madencilik uygulamalarında, kayalarda şev stabilitesi için ve zemin iyileştirme tekniklerinin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Çok düşük viskozite, hızlandırıcı kullanılarak kontrol edilebilir jelleşme süresi, çimento enjeksiyonunda kullanılan basit karıştırma ve pompalama ekipmanı ile enjekte edilebilme, ıslak yüzeylere iyi yapışma, 5°C ile 40°C arasında

alışılabilirlik, evre ve iş güvenliği sağlama ve düşük işleme maliyeti ile avantajlı bir malzemedir.

5.2.2. Numune hazırlama

Jelleşme süresinin tespiti için kaplar içerisine belirli miktarlarda MEYCO MP320 kolloidal silika çözeltisi konmuştur. Halihazırda firma tarafından kullanılan tuz su çözeltisinde tuz su oranı 1/9 dur. Bu çalışmada ise sofratuzu ve şebeke suyu kullanılarak 1/6, 1/9 ve 1/12 lik çözeltiler hazırlanmıştır. Numuneler öncelikle sabit miktardaki kolloidal silika çözeltisi ile değişen miktarlarda 1/6, 1/9 ve 1/12 lik tuz su çözeltileri karıştırılarak hazırlanmış, daha sonra ise 1/9 luk su tuz çözeltisinden değişik miktarlarda alınarak farklı miktarlardaki kolloidal silika içerisine karıştırmak suretiyle hazırlanmıştır (Resim 5.1).



Resim 5.1. Jelleşme süresi tespiti

5.2.3. Jelleşme süresi testleri

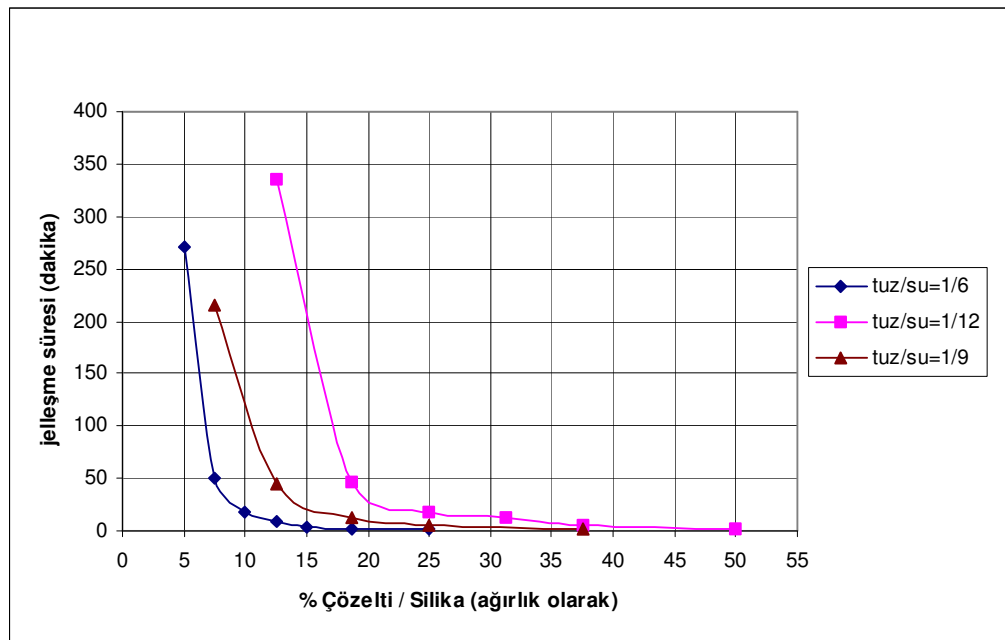
Çalışmada sıvı bir malzemenin jelleşmesi incelendiğinden jelleşme süresi tespitinde öncelikle öznel gözlemlerden yararlanılmıştır. Bu gözlemlerde jelleşme durumlarına ilişkin açıklamaların verildiği aşağıdaki tablo esas alınmıştır.

Çizelge 5.2. Kolloidal silika jel durumları [Sysdank, 1990]

Jel Durumu	Açıklama
1	Saptanabilir bir jelleşme sözkonusu değil. Jel orijinal çözelti ile aynı akışkanlığa sahip olarak görünmektedir.
2	Yüksek oranda akışkan jel. Jel çok az miktarda orijinal çözeltiden daha viskoz görünmektedir.
3	Akışkan jel. Kabın ters çevrilmesinde jel akımı daha belirgin bir şekilde görülmektedir.
4	Orta akışkan jel. Kabın ters çevrilmesi ile jelin az bir kısmı (% 5-15) tabana akmamaktadır.
5	Çok az akışkan jel. Kabın ters çevrilmesi ile jel tabana çok yavaş akmakta ve/veya önemli bir miktarı (>%15) akmamaktadır.
6	Yüksek oranda deforme olabilir akışkan olmayan jel. Kabın ters çevrilmesi ile jel tabana kadar ulaşmamakta ancak yaklaşmaktadır.
7	Orta deforme olabilir akışkan olmayan jel. Jel ancak yolun yarısı kadar bir kısmına kadar akmaktadır.
8	Az deforme olabilir jel. Ters çevrilme sırasında sadece jelin yüzeyinde deformasyon meydana gelmektedir.
9	Rijit jel. Ters çevrilme jel yüzeyinde deformasyona sebep olmamaktadır.
10	Rijit çınlayan jel. Şişeye hafifçe vurulduğunda diyapazon benzeri mekanik sarsıntı hissedilir ve duyulur.
11	Rijit çınlamayan jel. Jelin doğal frekansı yükseldiği için sarsıntı hissedilmez ve duyulmaz.

Jelleşme süresi karışımın kabın içerisinde ters çevrilmesi ile kontrol edilmiş ve tabloda belirtilen aşamalar gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bu aşamalardan jelin akışkanlığını yitirdiği 6 ncı aşama ve rijit hale geldiği 9 ncu aşamanın meydana geliş süreleri ile ilgili kayıtlar tutulmuştur. Akışkanlığın kaybolduğu aşama süreleri esas alınarak çeşitli durumlar için grafikler çizilmiştir.

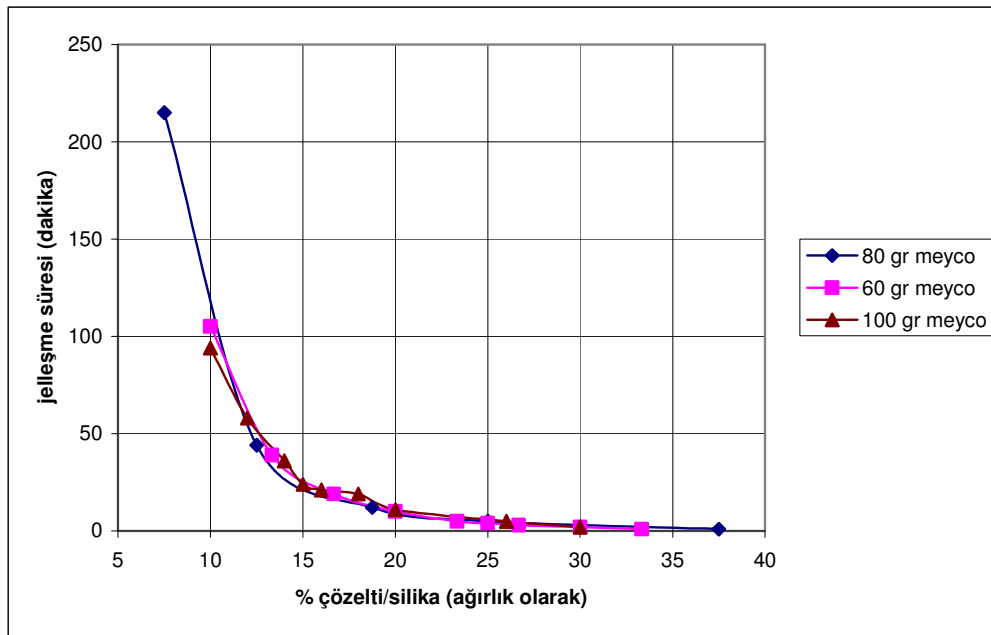
Aşağıda verilen ilk grafik tuz/su oranları 1/6, 1/9 ve 1/12 olan çözeltilerden çeşitli miktarlarda alınarak sabit miktardaki (80 gr) koloidal silika içerisine katılması sonucu meydana gelen karışımların jelleşme sürelerini göstermektedir.



Şekil 5.1. Su-tuz çözeltisi / silika oranı jelleşme süresi ilişkileri

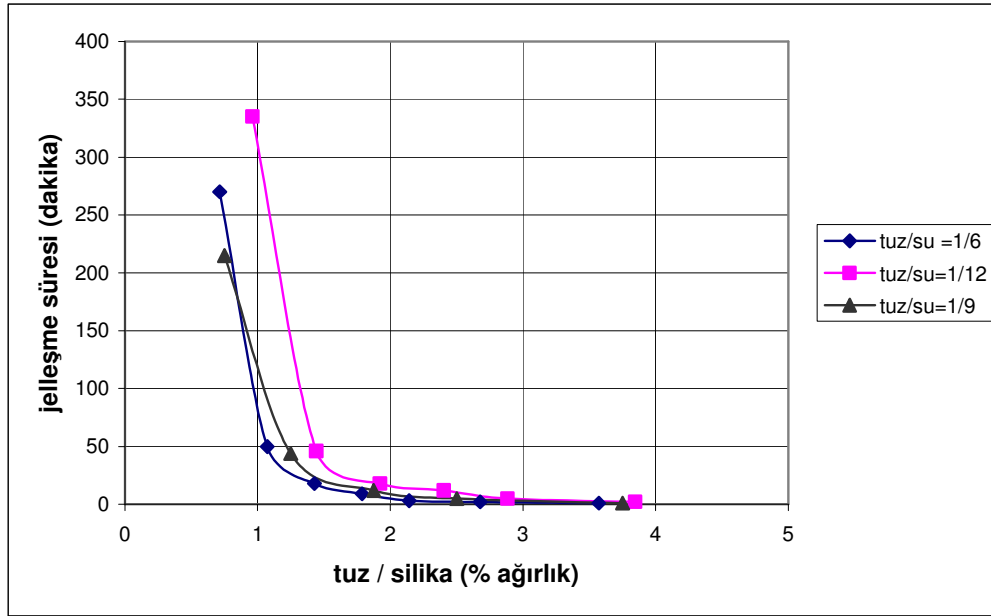
Şekil 5.1'de ç/s oranı aynı olan karışımlardan tuz/su oranı düşük olanların (1/12) tuz / su oranı yüksek olanlardan (1/6) daha uzun bir sürede jelleştiği görülmektedir. Yada bir başka ifade ile farklı karışımların aynı sürede jelleşebilmesi için tuz su oranı az olan çözeltilerden daha fazla miktarda karıştırmak gerekmektedir. Burada değerlendirilmesi gereken durumlardan birisi ç/s oranının çok yüksek olduğu karışımlarda fazla tuz sebebiyle

karişımın jelleşmeye hemen başlaması ancak su miktarı da fazla olduğu için rijitleşmemesidir. Bu durumda karişım tablodaki 9 ve özellikle 10ncu aşamalara ulaşmamakta, böylece jelleşme için kısa sürenin yeterli olduğu koşullarda çözelti miktarını arttırarak ekonomi sağlama imkanı ortadan kalkmaktadır. Değerlendirilen ikinci bir durum ise tuz/su oranının yüksek olduğu zeltielerde (1/6 oranında olduğu gibi) zelti/silika oranı çok düşük olsa bile çözelti ile silika ilk kariştırıldığında karişım yer yer topaklaşmaya başlamakta, bu erken jelleşmeye rağmen sonuçta toplam tuz miktarı az olduğu için karişım yine rijitleşmemektedir.



şekil 5.2 Değişik miktardaki silikalar için /s oranı jelleşme süresi ilişkileri

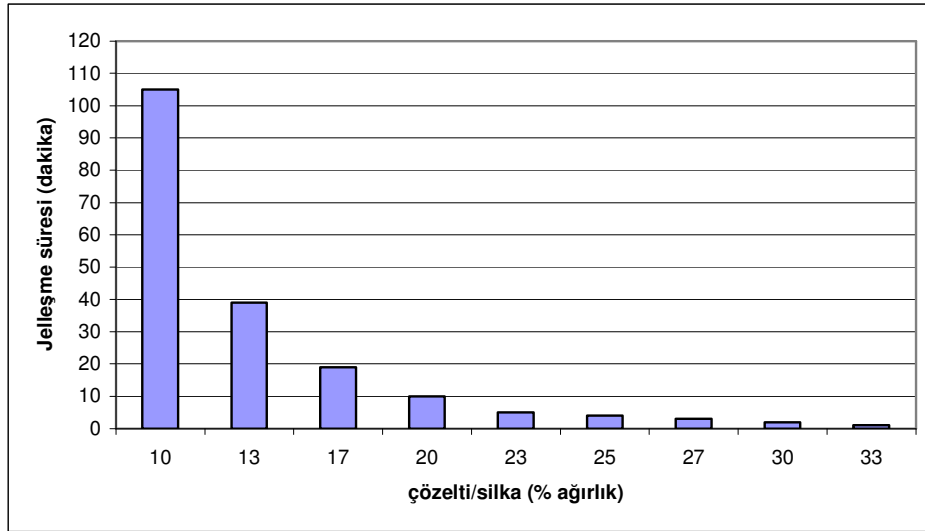
Yukarıda verilen şekil 5.2'de 1/9 luk tuz su çözeltisinin 60 , 80 ve 100 gr lık koloidal silika çözeltisi ile kariştırılması ile elde edilen karişımların jelleşme süreleri gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi çözelti/silika oranı aynı olduğu müddetçe, koloidal silika miktarı jelleşme süresini etkilememektedir. Her üç durumda grafikler birbiri ile büyük oranda çakışmaktadır.



Şekil 5.3 Tuz/silika oranı jelleşme süresi ilişkileri

Yukarıda verilen Şekil 5.3'de tuz/silika oranı ile jelleşme süresi arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Burada 1/6, 1/9 ve 1/12 lik tuz su çözeltileri ile hazırlanan karışımların jelleşme süreleri arasında, çözelti/silika oranı jelleşme süresi ilişkisinde olduğu kadar belirgin bir fark görülmemektedir. Ancak, aynı tuz miktarı için 1/6 lık çözeltilde su miktarı 1/12 lik çözeltiliden daha az olduğu için jelleşme süresi daha kısadır. Bu durum jelleşme süresini tuz miktarıyla birlikte su miktarının da etkilediğini göstermektedir. Sabit tuz içeriğinde karışıma giren su miktarı arttıkça jelleşme süresi büyük oranda olmamak kaydı ile uzamaktadır.

Aşağıda verilen çubuk grafikte (Şekil 5.4) ise 1/9 luk tuz su çözeltisi koloidal silika karışımında jelleşme süresinin çözelti/silika miktarı artışına bağlı olarak kısılması açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.4. Çözelti / silika oranı jelleşme süresi ilişkisi

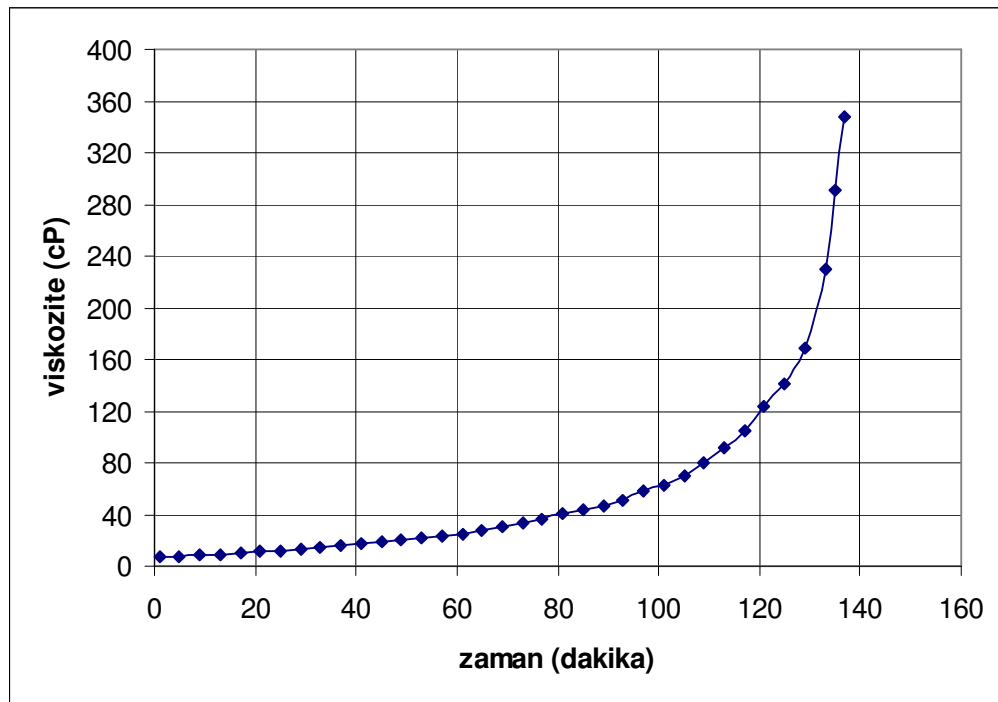
5.2.4. Viskozite Deneyleri

Kolloidal silikanın jelleşmesi ile ilgili olarak nitel gözlemlerle birlikte nicel gözlemlerde yapılmış, Brookfield DV-III Ultra rheometer kullanılarak hazırlanan iki ayrı karışım için viskozite zaman grafikleri elde edilmiştir. Viskozite ilk başta yaklaşık dakikada 200 dönüşe göre ayarlanmış, viskozite arttıkça aletin sınırları arasında kalabilmek için dönüş sayısı düşürülmüştür.



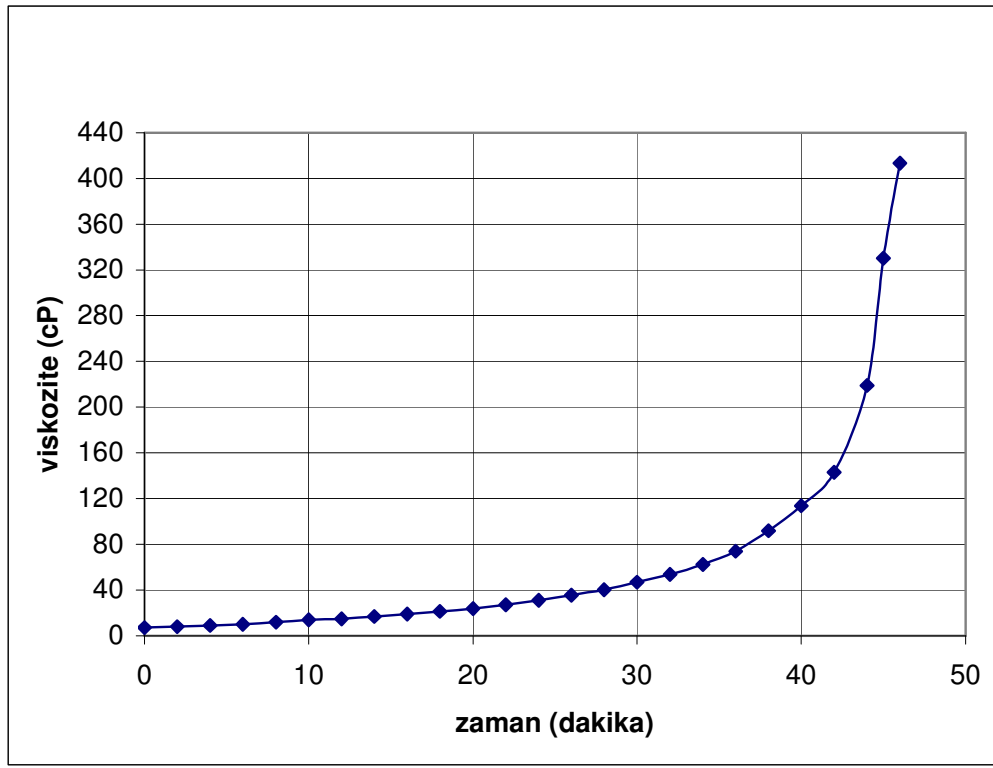
Resim 5.2 Viskozite tespiti için kullanılan viskozimetre

İlk viskozite deneyi 600 gr silika içerisine 1/9 luk 60 gr tuz su çözeltisi karıştırılarak elde edilen örnek için yapılmıştır. Öznel gözlemlerle 1/9 luk bir çözeltide % 10 luk çözelti/silika oranı için jelleşme süresi 120 dakika olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.5'de ise karışımın viskozitesinin 120 dakika civarında 100 cP yi geçerek hızlı bir şekilde artmaya başladığı görülmektedir.



Şekil 5.5. 1/9 luk çözelti için %10 çözelti/silika oranında viskozite değişimi

İkinci viskozite deneyi 600 gr silika içerisine 125 gr 1/12 lik çözelti karıştırılarak yapılmıştır. Öznel gözlemlerle 1/12 lik bir çözeltide % 20 lik çözelti/silika oranı için jelleşme süresi 40 dakika olduğu tespit edilmişti. Şekil 5.6'da karışımın viskozitesinin 40 dakika civarında 100 cP yi geçerek hızlı bir şekilde artmaya başladığı görülmektedir. Her iki örnekte de viskozitenin artmaya başlaması ile jelleşme süresi arasındaki ilişki açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.6. 1/12 lik çözelti için %20 çözelti/silika oranında viskozite değişimi

Yukarda verilen iki grafik birlikte değerlendirildiğinde çözelti/silika oranı daha fazla olan (%20) 1/12 lik çözeltide, çözelti/silika miktarı daha az olan (%10) 1/9 luk çözeltiden daha kısa sürede viskozite artışı meydana gelmiştir. Her iki durumda da bölüm 3 şekil 3.4.'te sodyum silikatların viskozite değişim grafiğine benzer grafikler elde edilmiştir. Viskozite çözeltinin karıştırılmasından sonra küçük miktarlarda artmaya başlamış belli bir noktadan sonra ise çok hızlı bir şekile artarak karışım akışkanlığını yitirmiştir.

5.2.5. Viskozite ve jelleşme süresi çalışmaları sonuçları

Aynı miktarda fakat tuz içerikleri farklı olan çözelti-lerden (1/6,1/9 ve 1/12) tuz içeriği fazla olanlar jelleşme süresinin kısılmasına neden olmaktadır. Tuz içerikleri aynı çözelti-lerden aynı miktardaki koloidal silika ile farklı miktarlarda karışım yapıldığında çözelti miktarı fazla olan karışımların erken jelleştiği

görülmüştür. Farklı miktardaki koloidal silika çözeltilerine (60,80 ve 100 gr) aynı su tuz çözeltisi (1/9) karıştırıldığında aynı çözelti / koloidal silika oranına karşılık gelen jelleşme sürelerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Jelleşme süreleri çözelti içerisinde bulunan tuz/silika oranı açısından incelendiğinde aynı tuz/silika oranı için su miktarı az olan karışımların biraz daha erken jelleştiği görülmüştür.

Ç/S oranının çok yüksek olduğu karışımlarda tuz miktarı sebebiyle jelleşme hemen başlamakta ancak su miktarının fazla olması sebebiyle de karışım tam anlamıyla rijitleşmemektedir. Dolayısıyla aynı jelleşme süresi için daha seyreltik bir tuz su çözeltisi ve daha fazla çözelti/silika oranı ile daha ekonomik bir karışım elde etmek mümkün gözükmemektedir. Tuz/su oranının yüksek olduğu çözeltilerde (1/6 oranında olduğu gibi) çözelti/silika oranı çok düşük olsa bile, çözelti ile silika ilk karıştırıldığında karışım yer yer topaklaşmaya başlamaktadır. Bu durum enjeksiyon işlemini zorlaştıracığı için, daha derişik tuz su çözeltileri ile karışım yapmak olası gözükmemektedir. Bu bilgiler ışığında kullanılan Meyco MP320 koloidal silikası için 5 dakika ile 3 saat arasında değişebilir bir jelleşme süresinin mümkün olduğu belirtilebilir.

1/9 ve 1/12 lik çözeltilerden alınan belirli bir çözelti/silika oranı için viskozitenin zamanla nasıl değiştiğini görmek üzere yapılan viskozite ölçümleri elde edilen sonuçların jelleşme süresi deney sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Koloidal silikanın Newtonian tipi kimyasal karışımlardaki gibi tipik bir viskozite değişim grafiği ortaya çıkmış, önce sabit viskozitesini korumuş sonra artmaya başlamıştır.

5.3. Enjekte Edilmiş Kumların Mukavemet Deneyleri

5.3.1. Mukavemet deneylerinin amacı

Enjekte edilmiş kumların mukavemet deneylerine tabi tutulmasının amacı

enjekte edilmiş kumun statik ve dinamik yükler (deprem, trafik vs.) altında nasıl davranış göstereceğinin ortaya konmasıdır. Devinimli labaratuvar deneylerinin deprem yükü ile aynı etkiyi yaratamayacağı kesin olmakla birlikte, bu deney bize enjeksiyon yapılmış formasyonun deprem sırasında göstereceği davranış hakkında bir fikir verecektir. Mukavemet deneylerinde enjeksiyonla devinimli yükleme sırasında mukavemetin ne kadar artırılabilirdiğinin veya deformasyonun ne kadar azaltılabildiğinin bulunmasına çalışılmıştır. Burada devinimli yükleme testi öncesinde bulunan enjekte edilmiş kumların statik mukavemet değerleri devinimli yüklemeler için ön fikir vermiştir. Jelleşme süresinin statik mukavemet ve devinimli yükleme mukavemeti değerlerini nasıl etkilediği ve kür periyodunun etkisi de çalışma kapsamında araştırılmıştır.

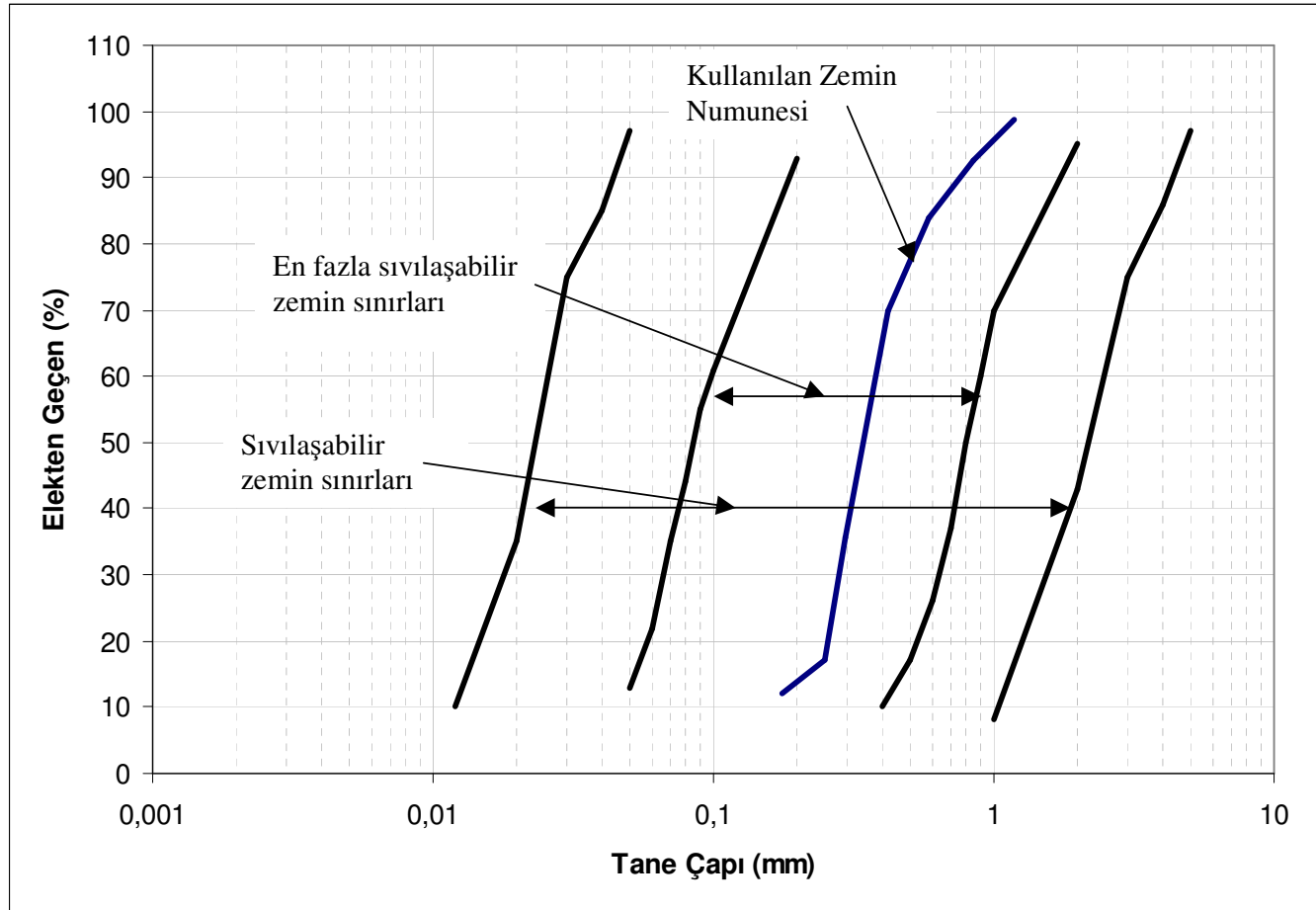
5.3.2. Deneylerde kullanılan malzemeler

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan koloidal silika enjeksiyonu Meyco MP 320'nin özellikleri daha önceki bölümde verilmiştir.

Enjeksiyon deneylerinde yıkanmış inşaat kumu kullanılmıştır. Kum gradasyonu sınırlanabilir zemin sınırları içerisinde olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 5.7.). Bu durumda kullanılan kumun büyük kısmı ince kum sınırları içerisinde kalmış, kullanılan kumun tamamı içerisinde silt ve kil bulunması ihtimaline karşın yıkanmış ve etüvde kurutulmuştur. Kullanılan kumun çeşitli özellikleri ve bunların tespit edilmesi aşağıda anlatılmıştır.

Özgül Ağırlık

Deneylerde kullanılan kumun özgül ağırlığı $G_s=2.62$ olarak bulunmuştur. Özgül ağırlık ASTM D 854-00 "Su Piknometresi ile Zemin Katılarının Özgül Ağırlığı Tespiti için Standart Test" standartı referans alınarak şu şekilde bulunmuştur.



Şekil 5.7. Kullanılan kum numunesi gradasyonu

1. Temiz ve kuru piknometrenin ağırlığı ölçülerek kaydedilmiştir. (W_p)
2. 10 numaralı elekten geçmiş kuru zemin örneği piknometreye konmuş, içerisinde zemin bulunan piknometrenin ağırlığı ölçülerek kaydedilmiştir. (W_{ps})
3. Piknometrenin dörtte üçüne kadar saf su doldurulmuş ve numune 10 dakika iyice ıslatılmıştır
4. İçerik 10 dakika kadar vakuma tabi tutularak tutulan hava alınmıştır.
5. Vakum durdurularak piknometre işarete kadar saf su ile doldurulmuş, dış yüzey temiz ve kuru bir bezle silinmiştir.
6. Piknometre ve içeriğinin ağırlığı belirlenmiştir. (W_B)
7. Piknometre boşaltılmış, temizlenmiş ve işarete kadar saf su ile doldurulmuştur.
8. Dış yüzey temiz ve kuru bir bezle silinerek piknometre ve saf su ağırlığı tartılmıştır. (W_A)

Bundan sonra özgül ağırlık hesabı Eş. 5.1 e göre yapılmıştır.

$$G_s = W_o / (W_o + (W_A - W_B)) \quad (5.1)$$

W_o : Kuru zemin ağırlığı $W_{ps} - W_p$

W_A : Su ile dolu piknometre ağırlığı

W_B : Su ile zemin dolu piknometre ağırlığı

Relatif sıkılık

Enjeksiyon yapılacak kum numunelerinin relatif sıkılığının % 30 olması istenmiştir. Bunun nedeni özellikle gevşek kumlarda sıvılaşmaya yatkın sıkılıklar bu civarda olmasıdır. Relatif sıkılık maksimum boşluk oranı ile boşluk oranı arasındaki farkın, maksimum ve minimum boşluk oranları arasındaki farka oranı olarak ifade edildiği için maksimum ve minimum boşluk oranlarının bulunması gerekmektedir. Eldeki zemin numunesinin maksimum ve minimum boşluk oranları ASTM D 4254 “Zeminlerin birim ağırlığı ve minimum indeks yoğunluğu hesabı için Standart Test Yöntemi ve Relatif

Sıklığın Hesaplanması ve ASTM D 4253 “Sarsma Tablası Kullanarak Zeminlerin Birim ağırlığı ve maksimum indeks yoğunluğu hesabı için standart test yöntemi standartları referans alınarak bulunmuştur. Deneyler için sarsma tablası, mold, çelik cetvel, metal disk, koruyucu metal, sürşarj yükü ve kumpas kullanılmış ve şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

1. Moldun tamamı üzerinden 1 cm civarında aşana kadar olabildiğince gevşek bir şekilde doldurulmuş, doldurma işlemi mold içerisindeki metal borunun içerisine kumun doldurulması ve metal borunun yavaşça çekilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

2. Üstteki fazla zemin çelik cetvel yardımı ile traşlanmıştır.

3. Moldun ve zeminin ağırlığı tespit edilmiş (M_1) ve mold boşaltılmıştır.

4. Mold bir önceki zeminin aynısı olmamak kaydı ile tekrar doldurulmuş ve üzeri düzeltilmiştir. Mold üzerine 1 cm kalınlığında metal disk ve koruyucu metal yerleştirilmiştir.

5. Sürşarj yükü koruyucu metal üzerine yerleştirilerek düzenek sarsma tablasında 8 dakika titreştirilmiştir.

6. Sürşarj yükü ve koruyucu metal alınarak diskin sıkıştığı mesafe belirlenmiştir. Bu mesafe kumpas ile moldun çeşitli yerlerinde okumalar yapılarak bunların ortalamasının alınması şeklinde gerçekleştirilir.

7. Moldun ve zeminin ağırlığı tespit edilmiştir. (M_2)

8. Mold boşaltılarak boş ağırlığı belirlenmiştir.

9. Moldun boyutları, mold hacmini (V_c) hesaplamak için tespit edilmiştir.

Minimum ve maksimum yoğunluk hesapları Eş. 5.2 ve 5.3 kullanılarak yapılmıştır.

$$\rho_{dmin} = M_{s1}/V_c \quad (5.2)$$

ρ_{dmin} = minimum yoğunluk

M_{s1} = Kuru zemin ağırlığı

= Gevşek yerleştirilmiş zemin ve mold ağırlığı- mold ağırlığı

V_c = Mold hacmi

$$\rho_{dmax} = M_{s2}/V_{c'} \quad (5.3)$$

ρ_{dmax} = Maksimum yoğunluk

M_{s2} = Kuru zemin ağırlığı

= Sarsma sonrası zemin ve mold ağırlığı- mold ağırlığı

$V_{c'}$ = Kuru zemin hacmi

$$= V_c - (A_c \cdot H) \quad (5.4)$$

A_c = Mold kesit alanı

H = Mold yüksekliği – (disk sıkışma mesafesi + disk kalınlığı)

Minimum ve maksimum boşluk oranları Eş. 5.5 ve 5.6 ile hesaplanır.

$$e_{min} = \rho_w G_s / \rho_{dmax} - 1 \quad (5.5)$$

$$e_{max} = \rho_w G_s / \rho_{dmin} - 1 \quad (5.6)$$

$$\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

G_s = Daha önce hesaplanmış özgül ağırlık değeri

Relatif yoğunluk hesabı Eş. 5.7 kullanılarak yapılmıştır

$$D_r = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) \quad (5.7)$$

Deney çalışmasında relatif sıkılık değeri % 30 alındığı için burada yukarıda verilen formül gereği 0.3 D_d değeri için gerekli boşluk oranı e bulunmuştur. Buradan Eş. 5.8 kullanılarak ρ_d değeri bulunmuş, dolayısıyla belirli bir sıkılık için belirli bir hacimdeki kab içerisine konması gereken kum miktarı bulunmuştur.

$$e = \rho_s / \rho_d - 1 \quad (5.8)$$

ρ_s = Tane birim hacim ağırlık

ρ_d = Doygun birim hacim ağırlık

Tane Dağılımı

Deney çalışmasında zemin numunesi tane dağılımının sınırlanabilir zemin sınırlarında olması istenmiştir. Bu amaçla öncelikle kullanılmak üzere laboratuvara getirilen karışık durumdaki kumun iri boyutunun tamamı, orta boyutunun ise önemli bir kısmı elenerek uzaklaştırılmıştır. Geriye kalan kumun boyut itibarıyla sınırlanabilir zemin sınırları içerisinde değerlendirilmiş, içerisinde bulunabilecek kil ve siltler yıkanmak ve etüvde kurutulmak suretiyle temizlenmiştir. Kullanılmaya hazır hale gelen kumdan alınan örneklerinin birkaç kez elek analizi yapılmış ve kullanılan kumun tane dağılımı tespit edilmiştir. Bu analiz “ASTM D 422 Zeminlerin Tane Boyutu Analizi İçin Standart Test Yöntemi” standartı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Analizde elek takımı, temizleme fırçası, elek sarsma makinası ve terazi kullanılmıştır. Elek analizi şu şekilde gerçekleştirilmiştir.

1. Zemin numunesinin ağırlığı ölçülmüş ve not edilmiştir.
2. Bütün elekler temiz bir şekilde yukardan aşağıya 4 numaradan 200 numaraya doğru yerleştirilmiş, en alta ise tava konmuştur. Zemin numunesi dikkatli bir şekilde en üstteki eleğe boşaltılmıştır.
3. Elek takımı sarsma makinasına yerleştirilerek 10 dakika boyunca sarsılmıştır.
4. Elek takımı sarsma makinasından alınarak her bir elekteki zeminin ağırlığı ölçülmüş ve not edilmiştir. Tava üzerinde kalan zemin numunesi ağırlığı da ölçülmüş ve not edilmiştir.

Bütün elekler ve tava üzerinde kalan zeminlerin toplam ağırlığının ilk başta ölçülen zemin ağırlığına yaklaşık olarak eşit olmasına dikkat edilmiştir. Burada % 2den fazla bir kayıp yetersizlik işaretidir. Elde edilen bu ağırlıkların kullanılması ile tane dağılımın ortaya çıkarılması ise şu şekilde gerçekleştirilmiştir.

1. Her bir elek üzerinde kalan zemin numunesi yüzdesi elek üzerinde kalan zeminin ağırlığının toplam ağırlığa bölünmesi ile bulunmuştur.

2. Her bir elek için geçen yüzdesi her seferinde kalan yüzdelерinin kümülatif toplamını % 100 den çıkartmak sureti ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem toplam zemin ağırlığı ile kalan ağırlıklarının kümülatif toplamı arasındaki farkın toplam zemin ağırlığına oranı alınarak da hesaplanabilir.

3. Tane büyüklüğü geçen yüzdesi grafiğı semilogaritmik olarak çizilmiştir.

4. Çizilen bu grafik üzerinden C_c ve C_u değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3. Kullanılan kumun indeks özellikleri

D_{60} (mm)	0,33
D_{50} (mm)	0,31
D_{30} (mm)	0,27
D_{10} (mm)	0,18
Üniformluk katsayısı C_u	1,83
Eğrilik katsayısı C_c	1,23
Özgöl ağırlık G_s	2,62
Maksimum Boşluk Oranı e_{max}	0,985
Minimum Boşluk Oranı e_{min}	0,610

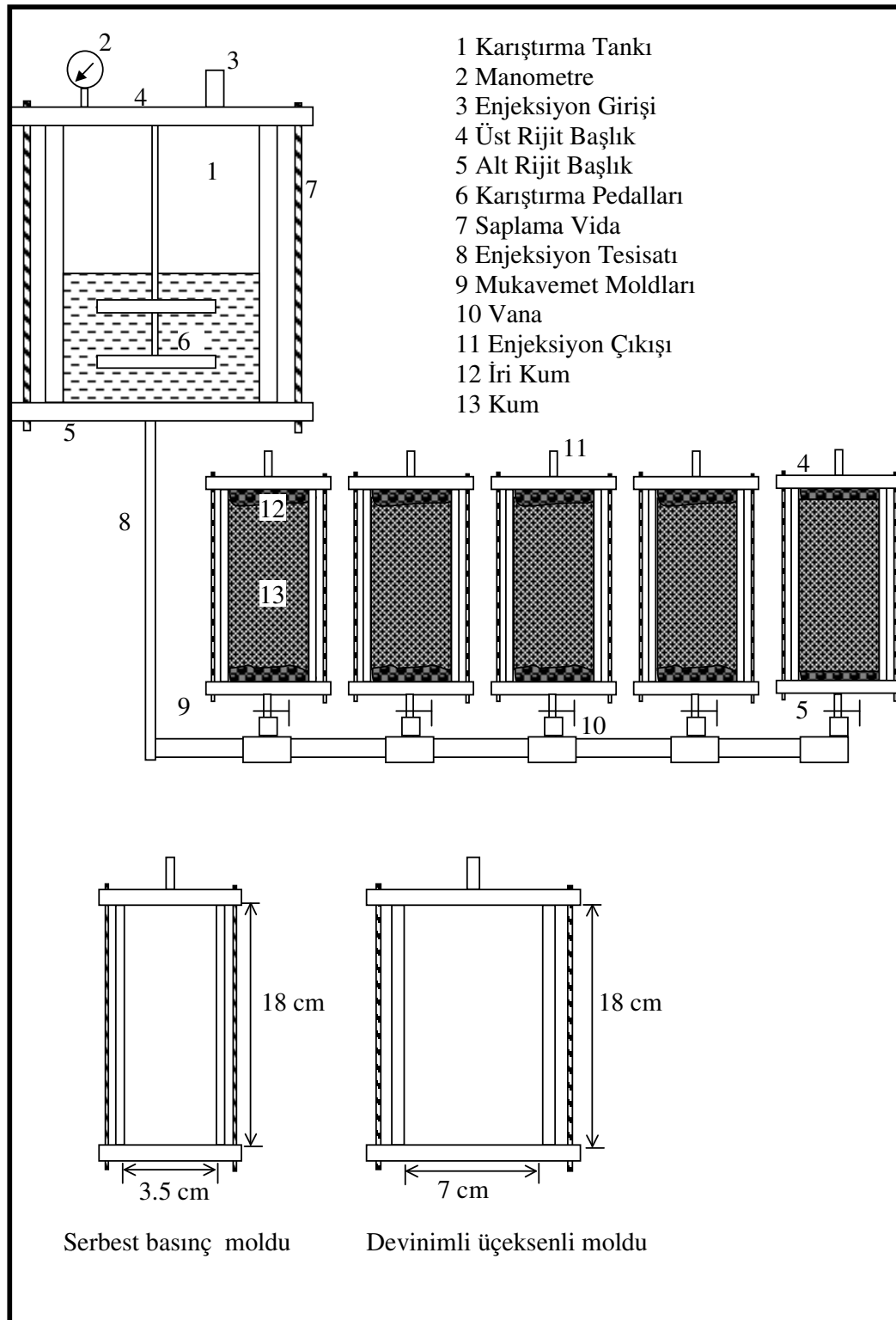
5.3.3 Enjeksiyon düzeneğinin hazırlanması

Deney düzeneği olarak, Y.Müh. Erhan TEKİN'in [Tekin, 2004] Mollamahmutoğlu M. ve Bakar İ.H. tarafından doktora çalışmaları kapsamında geliştirilen enjeksiyon aparatlarını referans alarak yaptığı düzenek çeşitli modifikasyonlar yapılarak kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan düzenek hakkında aşağıda sıralanan bilgiler verilebilir.

Enjeksiyon deney düzeneği mikserli enjeksiyon tankı, enjeksiyon düzeneği bağlantıları, mukavemet moldları, devinimli üç eksenli deneyi moldları ve pompadan oluşmaktadır (Şekil 5.8. ve Resim 5.3 - 5.4. - 5.5.).

Enjeksiyon materyalinin moldlara iletimini sağlamak için kullanılan enjeksiyon tankı R=200 mm çapında ve H= 400 mm boyundadır. Tank içerisinde 150 dev/dakika hızla dönen redüktörlü motora bağlı pedallar bulunmaktadır. Tank basınçlı ortamda sızdırmazlık sağlayacak özelliktedir. Tankın altında ve üstünde bulunan rijit başlıklardan alt başlıktan bir vana yardımıyla enjeksiyon çıkışı, üst başlıktan ise enjeksiyon, su ve basınçlı hava girişi sağlanmaktadır. Karıştırıcı tank üzerine yerleştirilen manometrenin ölçüm kapasitesi 1.2 MPa'dır.

Enjeksiyon tankı ile moldlar arasında enjeksiyon materyali iletimini sağlamak üzere 19 mm'lik metal bir boru bulunmaktadır. Bu boruya takılan T'ler ve vanalar bükülebilir çelik borular vasıtası ile moldlara bağlanmış durumdadır.





Resim 5.3 Enjeksiyon deney düzeneği

Enjeksiyon yapılan numunelerin mukavemet deneyleri için 5 adet $R=35$ mm çapında ve $H = 180$ mm yüksekliğinde alüminyum mold kullanılmıştır. Mukavemet moldları serbest basınç deneyi için boyu 70 mm ve çapı 35 mm olan numunelerden her bir molddan iki tane elde edilebilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Mold yüksekliği iki numunenin boyu ve moldun alt ve üstünde enjeksiyon yapılacak zeminin akmasını engellemek üzere konulacak 1.5 cm'lik iri kum ve/veya ince çakıl malzemesinin yüksekliği dikkate alınarak belirlenmiştir. Paslanmaz malzemeden yapılmış olan moldlar, enjeksiyonun giriş ve çıkışını kolaylaştırabilecek ve enjeksiyon sonrasında numunenin çıkarılabilmesini kolaylaştırmak üzere 4 adet vida ile birleştirilebilen iki parça olacak şekilde imal edilmiştir. Mukavemet moldları ile ilgili diğer parçalar içerlerine numune yerleştirildikten sonra enjeksiyonun sızdırmazlığını sağlamak üzere alttan ve üstten sıkıştırmaya yarayan iki rijit başlık, bu başlıklarla moldlar arasında sızdırmazlığı sağlamak amacıyla konulan lastik

contalar, numunelerin suya soyurulması işleminde fazla suyu enjeksiyon işleminde ise fazla enjeksiyon malzemesini molddan tahliye etmek üzere plastik hortum, moldların ve rijit başlıkların birbirlerine bağlanmasını sağlayan 4 adet saplama ve diğer cıvata, conta gibi malzemelerdir.



Resim 5.4. Serbest basınç deneyi numunesi moldu

Devinimli yükleme deneylerinde kullanılan numunelerin boyutları serbest basınç deneyi numuneleri ile aynı değildir. Devinimli yükleme deneylerinde numune boyutları $R = 70 \text{ mm}$ ve $H = 140 \text{ mm}$ olduğu için aynı mukavemet moldları kullanmak mümkün olmamıştır. Bu sebeple bu deneyler için 70 mm çapında ve 180 mm yüksekliğinde PVC borudan moldlar hazırlanmıştır. Yeni bir enjeksiyon işlemi için daha önceden enjeksiyon yapılmış numunelerin moldlardan çıkarılmasını beklemek zorunda kalmamak amacıyla mold sayısı fazla tutulmuş, makine imalat atölyesinde 20 adet PVC mold kesilerek hazırlanmıştır. Mukavemet moldlarının iç çapı 35 mm , dış çapı 70 mm olduğu

için, devinimli yükleme deneyleri için hazırlanan PVC moldlara ayrı yeni rijit başlıklar üretmeye gerek olmamış, aynı başlıklar her iki enjeksiyon içinde kullanılmıştır (Resim 5.5.).



Resim 5.5. Devinimli üç eksenli enjeksiyon deney düzeneği

5.3.4. Tek eksenli basınç deneyleri

Numunenin hazırlanması ve enjeksiyonun yapılması

Zemin numunesi bölüm 5.3.2. de anlatıldığı gibi sıvılaştırılabilir zemin boyutları içerisinde yer alacak şekilde hazırlanmıştır. Kullanılan kumun relatif sıkılık tespiti bölüm 5.3.2.'de anlatıldığı gibi 7 cm çapında ve 15 cm yüksekliğinde bir hacmi kaplayacak ve relatif sıkılığı %30 olacak kum miktarı belirlenmiştir. Her bir mold için bu miktarda kum tartılarak belirlenmiştir. Bu kumun molda

yerleştirilmesi 3'er cm yüksekliğinde 5 tabaka halinde yapılacağı için tartılan kum tekrar tartılmak suretiyle 5 eşit parçaya ayrılmıştır. Alt ve üst rijit başlıkların temiz olmasına, enjeksiyon giriş ve çıkışını sağlayan bölümlerinde giriş ve çıkışı engelleyecek bir durum olmamasına dikkat edilerek , alt rijit başlıklar saplamalar üzerindeki yerlerine yerleştirilmiştir. Bu rijit başlık üzerine molddan sızdırma meydana gelmemesi için başlık iç çapı boyutunda ve içi boş olarak kesilen lastik ve enjeksiyon malzemesinin dökülmemesi için elek konmuştur. Moldlar alt rijit başlıklara yerleştirilmeden önce iki parça halinde iken temizlenmiş, enjeksiyon sonrası numunenin kolay çıkarılabilmesi için iç yüzeyleri yağlanmıştır. Mold gövdesini meydana getiren parçaların vidalarla birleştirilmesiyle birbirine temas edecek yüzeyleri sızdırmazlık amacıyla silikon benzeri bir malzeme ile kaplı durumdadır. Bu silikon kontrol edilerek mold parçaları vidalarla birleştirilmiş, vidalar sıkılmış ve moldlar yerlerine yerleştirilmiştir. Moldların alt kısmına 1.5 cm kalınlığında iri kum konmuştur. Daha sonra her bir mold içerisine 3'er cm lik beş tabaka halinde eşit ağırlıktaki kumlar yerleştirilmiş, her bir kum tabakasının yerleştirilmesinden sonra mold iç çapından biraz daha küçük olan tokmak eşit sayılarda olmak üzere belirli bir yükseklikten düşürülmüştür. Son tabakanın yerleştirilmesinin ardından numune boyunun toplam 15 cm olup olmadığına bakılarak sıkıştırma işleminin kontrolü yapılmıştır. Ardından tekrar iri kum yerleştirilmiş, alt rijit başlıkta olduğu gibi moldun sızdırmazlığını sağlamak üzere lastik ve kumun basınçlı hava ve su ile birlikte akmasını engellemek için elek yerleştirilmiştir. Üst rijit başlık saplamaya yerleştirilmiş ve vidalar sıkılmıştır.

Enjeksiyon tankından gelen ana boruya T'ler ve vana yardımıyla bağlanmış bükülebilir çelik borular, içerlerinin tıkalı olup olmadığı enjeksiyon tankına doldurulan suyun akıtılması suretiyle kontrol edildikten sonra moldlara bağlanmıştır. Enjeksiyon tankına konan su vanaların teker teker açılması suretiyle moldlara gönderilmiş ve suyun moldun üst başlığına takılan plastik hortumdan dışarı çıkması sağlanmıştır. Her molddan belirli miktarda su akıtılması ile numuneler doygun hale getirilmiştir.

Mukavemet deneyleri farklı jelleşme sürelerindeki numuneler üzerinde yapılacağı için 1/9 ve 1/12 lik tuz su çözeltileri hazırlanmış belirli çözelti/silika oranı sağlayacak şekilde çözelti ve silika ayrı ayrı tartılmış ve bu iki malzeme enjeksiyon tankına aktarılmadan hemen önce karıştırılmıştır. Enjeksiyon için gerekli hava basıncı çok yüksek olmadığı için gerekli hava tanka bağlanan bir ayak pompası ile sağlanmıştır.

Enjeksiyon deneylerinin en önemli aşamalarından biriside tesisatın temizlenmesi olmuştur. Her enjeksiyon işleminden sonra sistemde kalan silika çözelti karışımı borular içerisinde jelleşmeden seri bir şekilde temizlenmiştir. Temizleme işlemi tankın içerisine konan suyun basınçlı bir şekilde ana borudan ve bükülebilir çelik borulardan akıtılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Zaman zaman çıkan aksaklıklar sebebiyle borularda meydana gelen tıkanmalar boruların sökülmesi içerlerinin demir çubuklarla temizlenmesi suretiyle giderilmiştir.

Tez çalışmasının asıl amacı koloidal silika enjeksiyonunun zeminlerin devinimli yükler altında davranışını araştırmak olduğu için, ince-orta boyut dağılımında ve deprem etkisi ile sıvılaşabilir zemin sınırları içerisinde tek bir gradasyon oluşturmanın amaca hizmet edeceği düşünülmüştür. Öte yandan karışım içerisindeki su-tuz çözeltisi miktarı değiştirildiğinde hem jelleşme süresi hem de enjeksiyonun toplam maliyeti değişmektedir. Bu sebeple enjeksiyon deneyleri tek bir gradasyona sahip zemin üzerinde farklı çözelti-silika oranları için yapılmıştır. Tuz-su çözeltisi tuz/su oranı ağırlıkça 1/9 ve 1/12 olacak şekilde alınmıştır. Jelleşme sürelerinin tespiti bölümünde anlatıldığı gibi aynı jelleşme süresi için 1/12 lik çözelti 1/9 luk bir çözeltiden daha ekonomik olacaktır. Burada farklı tuz/su oranları ve farklı çözelti/silika oranları için enjekte edilmiş numunelerin mukavemet değerlerinde ne tür değişiklikler olduğu görülmek istenmiştir. 1/9 luk tuz su çözeltisi için çözelti/silika oranları ağırlıkça %5, %10, %15, %20 olacak şekilde seçilmiştir. Bu değerlerin alt limiti jelleşme süresi testlerinde çözelti miktarı azaldıkça jelin yeterince rijitleşmemesi dikkate alınarak %5 alınmıştır ki deney sonuçları

da bu tespiti doğrulamıştır. Üst limit ise jelleşmenin enjeksiyona izin verecek uzunlukta olabilmesi için % 20 olarak alınmıştır. 1/12 lik tuz su çözeltisi içinse çözelti/silika oranı aynı yaklaşımla %10,15, 20 ve 25 olarak belirlenmiştir.

Enjeksiyon basıncı 0.05 MPa olarak seçilmiştir. Enjeksiyon deneyleri öncesi yapılan denemeler bu basıncın yeterli olduğunu göstermiştir. Bu basınç düzeyinde enjeksiyon yapılan moldların üstünden yeterli miktarda enjeksiyon çıkışı sağlanmıştır. Yukarda belirtilen çözelti/silika oranlarında her bir oran için 10 ile 15 arasında numune elde edecek şekilde enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyonlarda çözelti-silika karışımı miktarı yaklaşık mold hacmine eşit miktarda alınmış, her bir molddan yeterli miktarda enjeksiyon karışımı çıkışı gözlemlenmiştir. 1/9'luk çözeltide %5lik çözelti/silika oranı için ve 1/12 lik çözeltide % 10'luk çözelti /silika oranı için numuneler yeterince rijitleşmemiş, bir kısmı moldlardan çıkarırken parçalanmıştır. Bu durum jelleşme süresinin yaklaşık 2.5 , 3 saat civarında bir üst limiti olabileceğini, daha uzun jelleşme sürelerinde enjeksiyon malzemesi rijitleşemediği için enjeksiyonun işlevi kalmayacağını göstermiştir.

Tek eksenli basınç deneylerinin yapılması

Enjekte edilmiş numunelerin moldlardan çıkarılması için bir gün beklenmiştir. Moldlardan çıkarılan numuneler ise tek eksenli basınç deneyleri için plastik torbalar içerisinde ve kür ortamında bekletilmiştir. Daha sonra 3.,7.,14. ve 28. günlerde basınç deneyleri yapılmıştır (Resim 5.6.). Tek eksenli basınç deneyleri ASTM D 2116 "Kohezif zeminlerin Tek eksenli basınç mukavemeti tespiti için standart test metodu" standartı referans alınarak şu şekilde gerçekleştirilmiştir.

1. Kür ortamından alınan numuneler dikkatli bir şekilde uzunluk / çap oranı 2 ile 2.5 arasında olacak şekilde kesilmiştir.
2. Numunenin çapı birbirinden 120° uzaklıkta üç farklı noktadan ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması numune çapı olarak kaydedilmiştir.

3. Numunenin uzunluğu 120° uzaklıkta üç farklı noktadan ölçölmüş, ortalama değeri numune uzunluğu olarak kaydedilmiştir.

4. Numune dikkatli bir şekilde basma aletine yerleştirilmiş ve tablanın üzerinde ortalanmıştır. Alet ayarlanarak üst tabla numune ile temas eder hale getirilmiş , yük ve deformasyon saatleri sıfırlanmıştır.

5. Yük uygulanmaya başlanmış, belirli deformasyon oranlarına karşılık gelen yükler okunarak kaydedilmiştir.

6.Yük birkaç sabit okumadan sonra azalmaya başlamaktadır. Bu ana kadar yük uygulanmaya devam etmiştir.

7. Numune basma aletinden alınarak kırılma şekli incelenmiştir (Resim 5.7.).



Resim 5.6 Tek eksenli basınç deneyi



Resim 5.7 Kırılma şekilleri

Serbest basınç deneyinde kaydedilen okumalar şu şekilde analiz edilmiştir.

1. Saatlerden yapılan deformasyon ve yük okumaları uygun değerlere dönüştürülmüştür. Kullanılan serbest basınç aletinin yük katsayısı 0.001496 kN deformasyonlar ise okunan değerin %1'i kadardır.
2. Numunenin kesit alanı hesaplanmıştır. ($A_0 = \pi d^2/4$)
3. Birim deformasyon hesaplanmıştır. ($\epsilon = L/L_0$)
4. Düzeltilmiş alan hesaplanmıştır ($A' = A_0/(1-\epsilon)$)
5. A' kullanılarak numune gerilmesi hesaplanmıştır. ($\sigma = P/A'$)

Tek eksenli basınç deneyi sonuçları

Enjekte edilmiş bütün numunelerin tek eksenli basınç deneyleri yapılarak sonuçlar analiz edilmiş ve çizelgelerde verilen değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. 1/9'lük çözelti numuneleri tek eksenli basınç dayanımları (kPa)

Çözelti-silika oranı (%) Gün	10	15	20
1	101	-	145
3	144	173	193
7	215	257	226
14	239	271	249
28	253	277	259
75	-	-	265

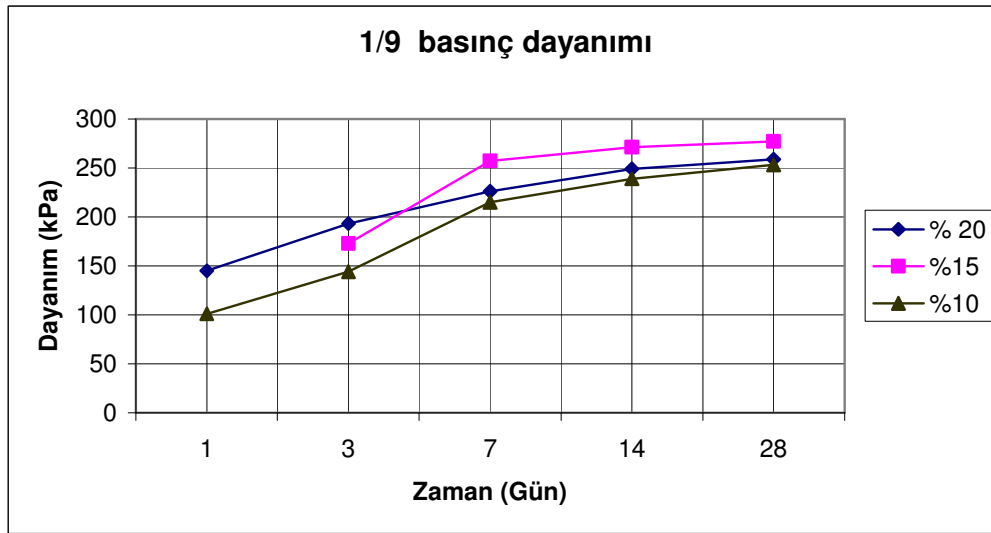
Yukarda verilen tablo çözelti/silika oranı %10, %15 ve % 20 olan enjeksiyon karışımları ile enjekte edilmiş zemin numunelerinin 1, 3, 7, 14 ve 28. günlerdeki serbest basınç dayanımlarını göstermektedir.

% 5 çözelti/silika oranındaki karışımla enjekte edilen zeminler yeterince dayanım kazanamadığı için moldlardan çıkarmak zorlaşmıştır. Serbest basınç deneyi için hazırlanabilen bu tür numunelerden birisinin 7 günlük serbest basınç dayanımı ancak 104 kPa'ya ulaşmıştır. Bu nedenlerle çözelti silika oranı için alt limit % 10, üst limit ise enjeksiyonun yapılması ve ardından sistemin temizlenmesi için yeterli zamanı sağlayabilmek amacıyla % 20 olarak belirlenmiştir.

Serbest basınç dayanımları 28. güne kadar tespit edilmiştir. Yonekura ve Miwa (1993) koloidal silika ile enjekte edilmiş numunelerin mukavemetlerinin

1000 güne kadar artmaya devam ettiğini belirtmiştir. Ancak Persoff ve arkadaşları (1997) tarafından koloidal silika enjeksiyonu yapılmış zeminlerin mukavemetleri üzerinde yapılan araştırmada 30 ve 90. günler sonunda yapılan test sonuçları arasında önemli bir fark gözükmemektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda dayanım kazanımının 28. güne doğru yavaşladığını göstermektedir. Buna rağmen bazı numuneler ilerleyen günlerde test edilmek için saklanmıştır. 1/9 luk su tuz çözeltisi ile hazırlanan % 20 lik karışımın 75. gün sonunda dayanımı 265 kPa olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde 1/12 lik su tuz çözeltisi ile hazırlanan % 15 lik karışımın 75. gün sonunda dayanımı 229 kPa olarak tespit edilmiştir. Bu değerler sırası ile 28. gün sonunda oluşan 259 kPa ve 219 kPa değerlerine yakın değerlerdir. Bu açıdan 28. günün mukavemet deneyleri için optimum süre olduğu değerlendirilmiştir.

Tabloda verilen değerler hazırlanan üç numunenin serbest basınç dayanımlarının ortalaması olarak alınmıştır. Bu değerlerin standart sapması 30 ile 15 arasında değişmektedir. Böyle bir sapmanın numunelerin relatif sıkılıklarının farklı olması, enjeksiyonun her numuneye tamamen birbirinin aynı şekilde enjekte edilmesinin mümkün olmaması ve numunelerin bir kısmının moldun altından bir kısmının moldun üstünden alınmış olması gibi bir çok etkenden dolayı oluşmuş olması mümkündür. Persoff ve arkadaşları (1997) tarafından koloidal silika enjeksiyonu yapılmış zeminlerin mukavemetleri üzerinde yapılan araştırmada zemin ve kullanılan koloidal silika türü farklı olmakla birlikte farklı oranlarda silika ile enjekte edilmiş numunelerin serbest basınç dayanımı 93 ile 532 kPa arasında değişirken bu değerlerin de 10,5 ile 41,5 arasında standart sapması oluşmuştur.



Şekil 5.9. 1/9'luk tuz-su çözeltisi ile hazırlanan numuneler için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

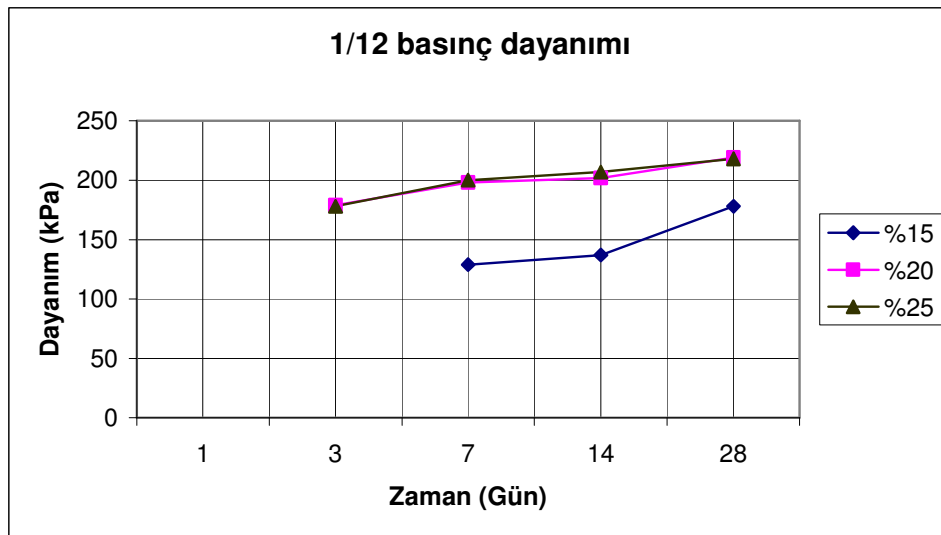
Yukarda verilen grafik (Şekil 5.9.) incelendiğinde %15 ç/s oranı için dayanımın diğerlerine göre daha yüksek olduğu, %20 ve % 10 luk karışımlar için dayanımların daha çok birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu sonucun çözelti oranı az karışımların yeterince jelleşmemesi, fazla olan karışımlarda ise su miktarının fazlalığı sebebiyle jelin rijitleşmesinin daha az olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bütün bunlarla birlikte bu aralıkta tespit edilen jelleşme süresi için Meyco MP320 koloidal silikası ile enjekte edilen zeminlerin dayanımları arasında çok belirgin bir fark oluşmayacağını söylemek mümkündür.

1/9 tuz su oranındaki çözeltilerle hazırlanan enjeksiyon karışımlarında olduğu gibi 1/12 lik çözeltilerle de karışımlar hazırlanmış ve zemin numunelerine enjeksiyon yapılmıştır. Ç/S oranı %15, %20 ve % 25 olan enjeksiyon karışımları ile enjekte edilmiş zemin numunelerinin 3, 7, 14 ve 28. günlerdeki serbest basınç dayanımları aşağıdaki Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. 1/12'lik çözelti numuneleri tek eksenli basınç dayanımları (kPa)

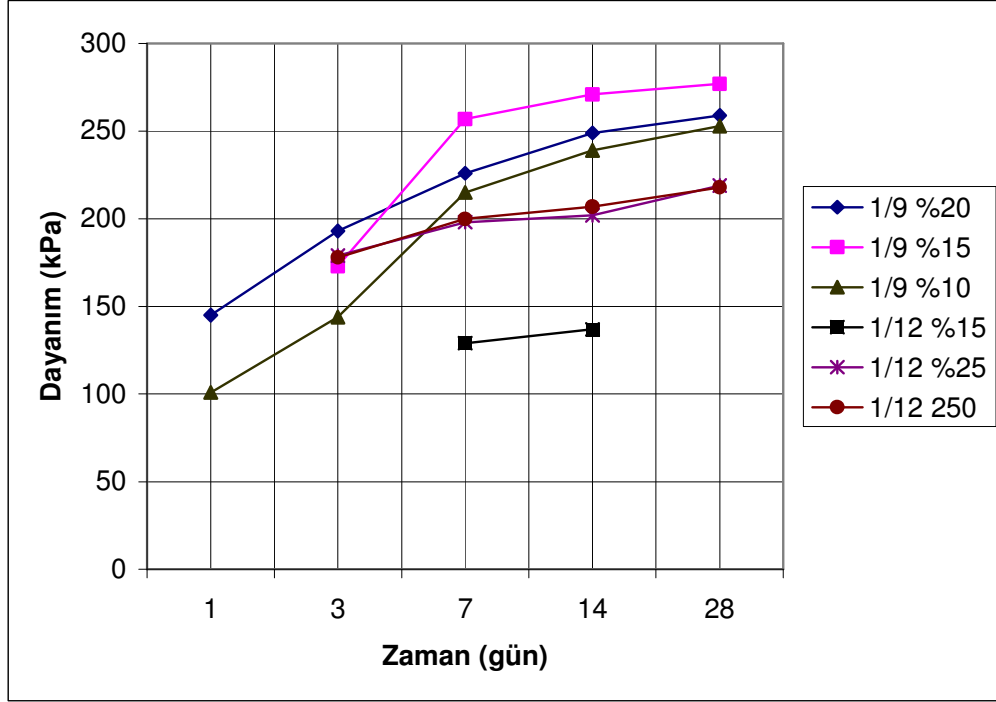
Çözelti-silika oranı (%)	15	20	25
Gün			
3	-	179	178
7	129	198	200
14	137	202	207
28	178	219	218
75	-	229	-

% 10 çözelti/silika oranındaki karışımla enjekte edilen zeminler yeterince dayanım kazanamadığı için moldlardan çıkarırken kırılmış, % 15 çözelti/silika oranında ise 7 ve 14. günlerde iki kez serbest basınç deneyi yapılabilmektedir. 1/9 luk tuz su çözeltileri ile hazırlanan enjeksiyonlardakine benzer gerekçelerle çözelti silika oranı için alt limit % 15, üst limit ise % 25 olarak belirlenmiştir. Yine aynı şekilde serbest basınç dayanımları 28. güne kadar tespit edilmiş, üç numunenin ortalaması olarak alınan değerlerin 8 ile 30 arasında değişen standart sapmaları oluşmuştur.



Şekil 5.10. 1/12'lik tuz-su çözeltisi ile hazırlanan numuneler için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

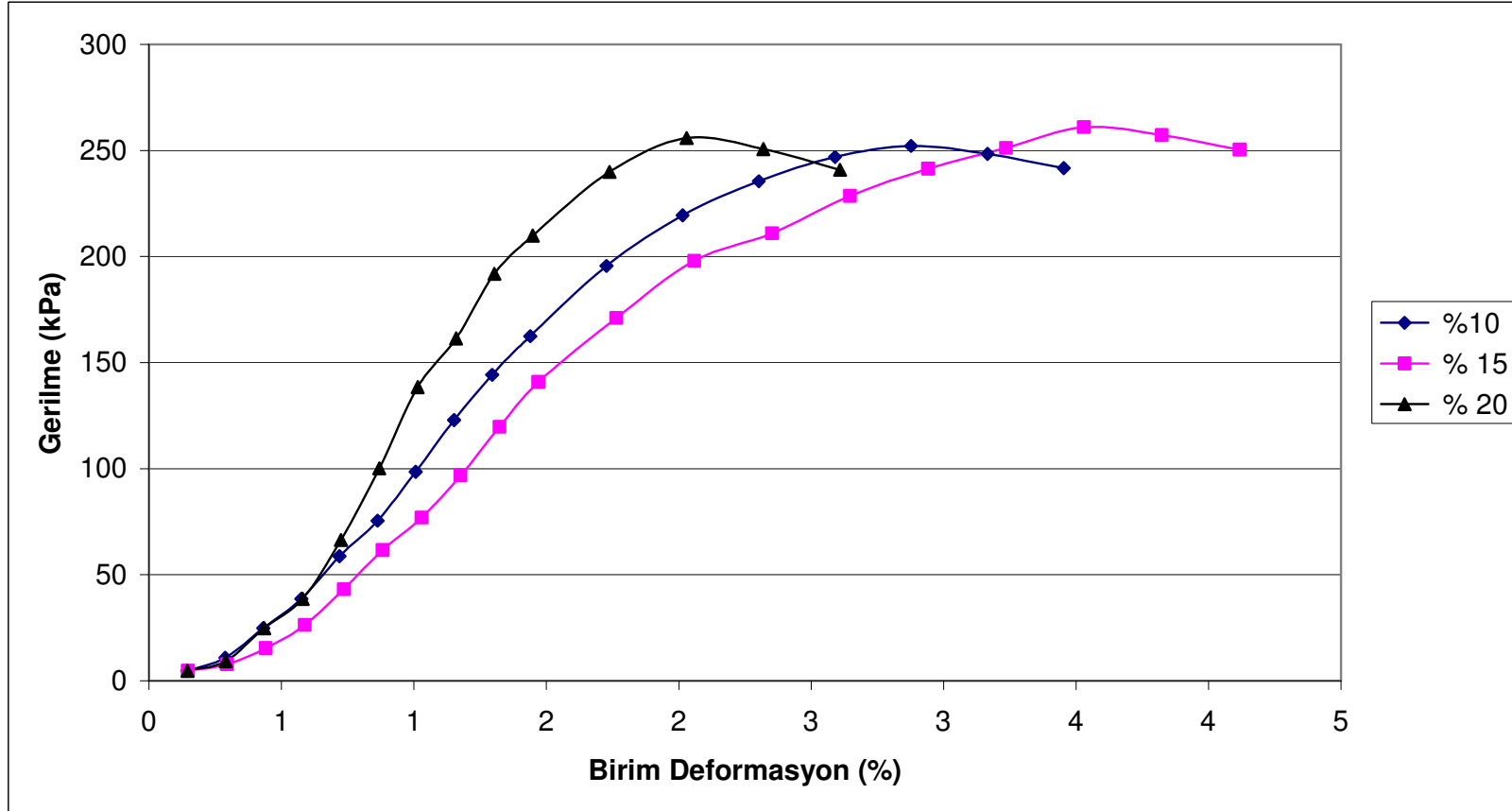
Şekil 5.10 incelendiğinde %20 ve % 25 lik ç/s oranı için dayanımın birbirine çok yakın olduğu, % 15 ç/s oranı içinse çok ciddi bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonucun, çözelti oranı az karışımda enjeksiyonun yeterince jelleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



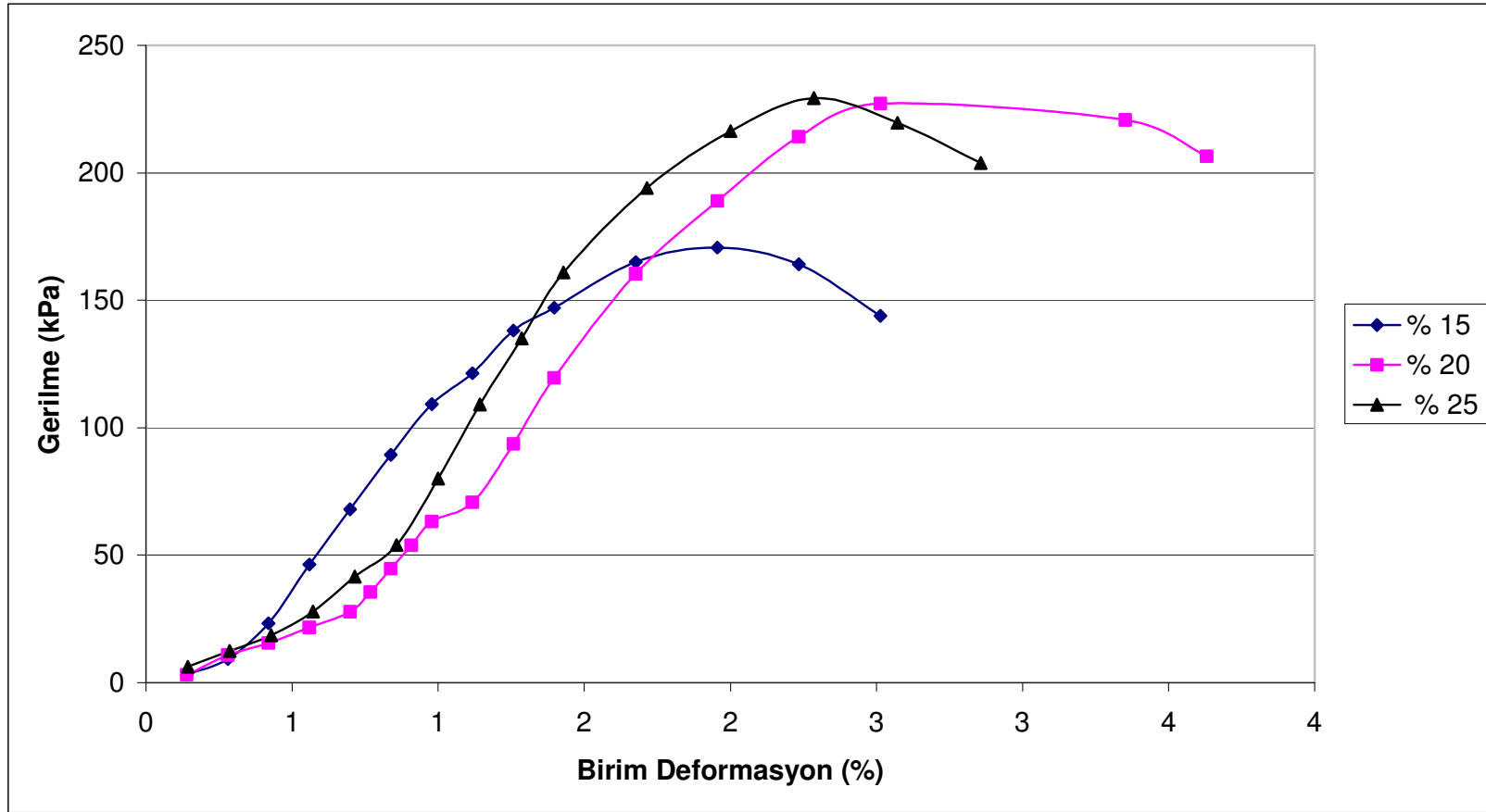
Şekil 5.11.1/9 ve 1/12'lik tuz-su çözeltisi ile hazırlanan numuneler için serbest basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 5.11'de de görülebileceği gibi 1/9'luk çözeltilerle hazırlanan enjeksiyon karışımları ile enjekte edilmiş zeminlerin tek eksenli basınç dayanımları, 1/12 lik çözeltilerle enjekte edilmiş zeminlerinkinden belirgin bir şekilde fazladır.

1/9 luk ve 1/12 lik çözeltilerle hazırlanan çeşitli ç/s oranındaki enjeksiyonlarla enjekte edilmiş numunelerin 28. günde gerçekleştirilen tek eksenli basınç deneyleri sonrasında elde edilen gerilme birim deformasyon grafikleri Şekil 5.11. ve Şekil 5.12 de sunulmuştur.



Şekil 5.12. 1/9 luk çözelti için değişik Ç/S oranlarında 28.gün gerilme birim deformasyon grafikleri



Şekil 5.13. 1/9 luk çözelti için değişik Ç/S oranlarında 28.gün gerilme birim deformasyon grafikleri

5.3.5. Devinimli üç eksenli deneyleri

Numunenin hazırlanması ve enjeksiyonun yapılması

Devinimli üç eksenli deneyleri için numune tek eksenli basınç deneyinde olduğu gibi hazırlanmıştır. Bu deney için gerekli mold boyutları değiştiği için kum miktarı 7 cm çapında ve 18 cm yüksekliğinde molda % 30 relatif sıklıkta yerleştirilecek şekilde belirlenmiştir (Resim 5.8). Moldun alt ve üstüne 1.5 cm yüksekliğinde iri kum konulduğu için kum numunesi 3 er cm yüksekliğinde 5 tabaka halinde yerleştirilmiş, her bir kum tabakasının yerleştirilmesinden sonra, tokmak eşit sayılarda olmak üzere belirli bir yükseklikten düşürülmüş, tokmak üzerinde işaretlenmiş yükseklikler vasıtası ile sıkışma miktarı kontrol edilmiş ve son tabakanın yerleştirilmesinin ardından numune boyunun toplam 15 cm olup olmadığına bakılarak sıkıştırma işleminin kontrolü yapılmıştır. Diğer işlemler serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelerde olduğu gibi gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.8. Devinimli üç eksenli deneyi moldu ve tokmak

Enjekte edilmiş numuneler serbest basınç deneyi numunelerinden farklı olarak PVC borular içerisinde yer aldığı ve boruları ikiye ayırmak mümkün olmadığı için, enjeksiyon yapılmış moldlar bir gün bekletildikten sonra numuneler hidrolik krika vasıtası ile çıkarılmıştır (Resim 5.9). Çıkarma işlemi, sırasında numunelere çok küçük bir basınç uygulanmış ve yapının zarar görmemesine dikkat edilmiştir.



Resim 5.9. Numunelerin moldlardan çıkarılması ve deney için hazırlama

Devinimli üç eksenli deneyleri için 1/9 luk tuz su çözeltisi ile kolloidal silika çözelti oranı %10 ve % 20 olacak şekilde 1/12 lik tuz su çözeltisi ile kolloidal silika çözelti oranı %25 olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Bu oranlar seçilirken serbest basınç deneyi sonuçları gözönünde tutulmuştur.

Devinimli üç eksenli deneylerinin yapılması

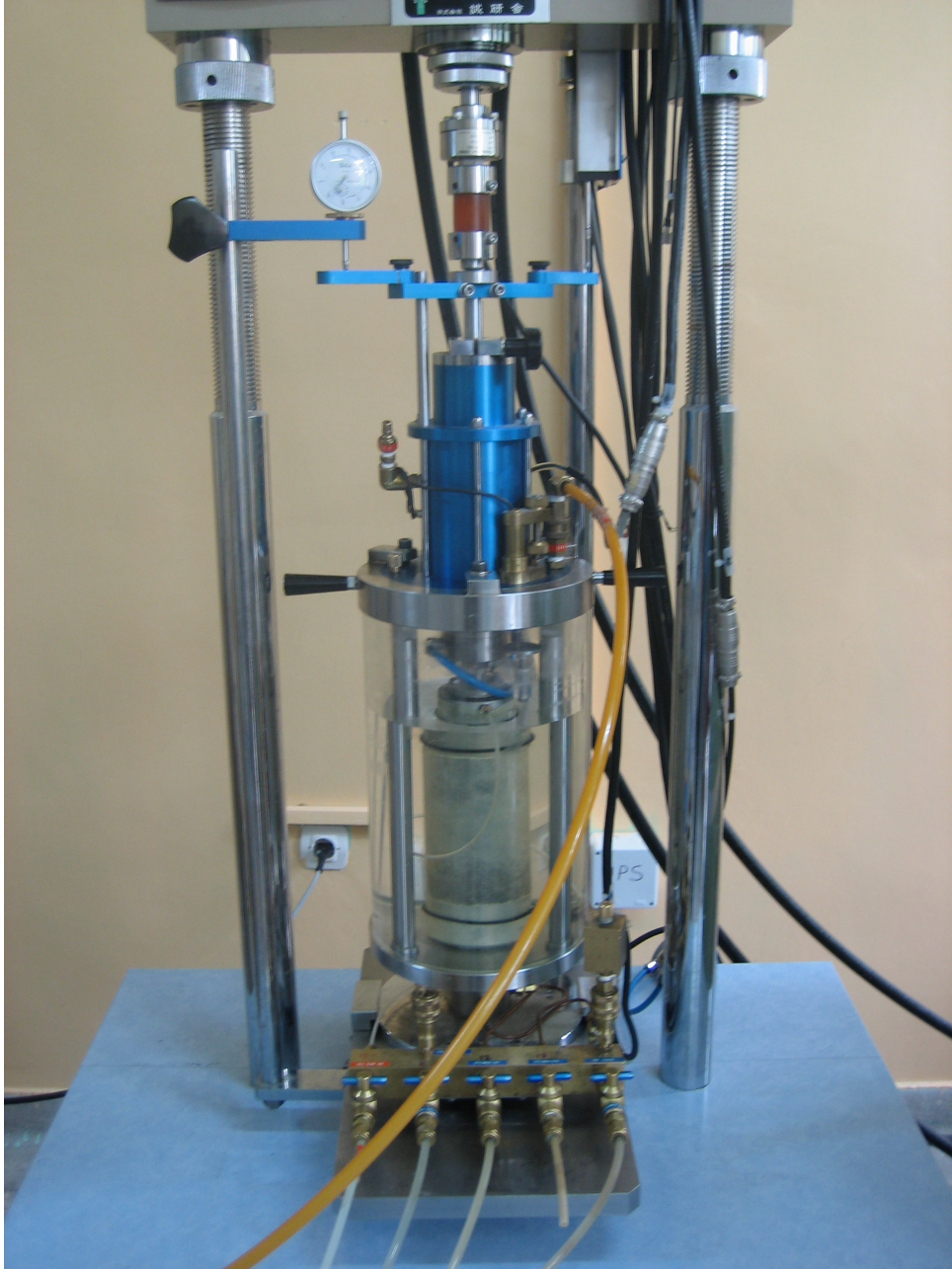
Devinimli üç eksenli deneyleri için, DSİ Esenboğa laboratuvarında bulunan üç eksenli deney aleti kullanılmıştır (Resim 5.10). Devinimli üç eksenli deney düzeneği 70 mm çapında 140 mm yüksekliğinde zemin numunelerinin dinamik kayma mukavemetini ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Hidrolik pompa, hava-su basınç yönlendirme ünitesi, üç eksenli hücresi, düşey yükleme ünitesi, elektriksel ölçme ve kontrol ünitesi ve veri kayıt sistemi birimlerinden oluşmaktadır. Deney aletinin resmi ve deneyin yapılış ile ilgili aşamalar Resim 5.10, Resim 5.11 ve Resim 5.12 de verilmiştir.



Resim 5.10. Devrimli üç eksenli deney aleti

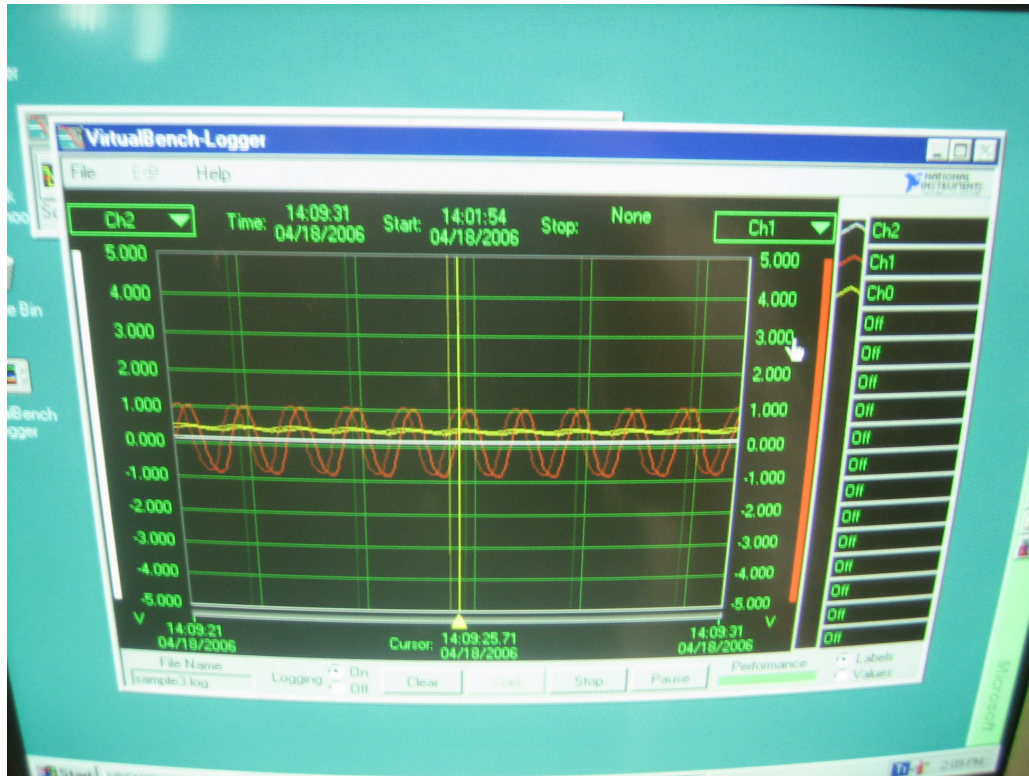


Resim 5.11. Numunenin yerleştirilmesi



Resim 5.12. Üç eksenli hücrenin suyla doldurulması

Aleti kontrol eden yazılım bir bilgisayar tarafından yürütülmüştür. Her deney sırasında eksenel yük ve eksenel deformasyon sistem tarafından ölçülerek bilgisayar tarafından kaydedilmiştir (Resim 5.13).



Resim 5.13. Devinimli üç eksenli deneyinin bilgisayar tarafından kontrolü

Üç eksenli deneyleri öncesinde numuneler doyurulmaya çalışılmıştır. Doyurma için geri besleme basıncı yöntemi kullanılmıştır. Karbondioksit kullanılarak numune içerisindeki havanın boşaltılması suretiyle doyurma işleminin kolaylaştırılmasına çalışılmıştır. Ancak doyurma işlemi 400 kPa' a kadar çıkan basınçlara rağmen başarılı olmamıştır. Daha yüksek basınçları uygulamak hem aletin izin vermemesi sebebi ile hemde pratik amaçlara uygun olmadığı için denenmemiştir. Yapılacak devinimli üç eksenli deneyleri için doygunluk kriteri aranmamasına, 400 kPa bir basıncın 40 m derinliğe tekabül etmesi ve bu derinlikte zeminin relatif sıkılığının numunelerin % 30 luk relatif sıkılığından çok daha fazla olacağı dikkate alınarak karar verilmiştir. Literatürde benzer gerekçelerle doyurma işleminin uygulanmadığı çalışmalar [Gallagher, 2000] mevcut iken, doyurma işleminin gerçekleştirildiğinin belirtildiği ancak bunun nasıl yapıldığının açıklanmadığı [Liao ve ark., 2003] çalışmalarda mevcuttur.

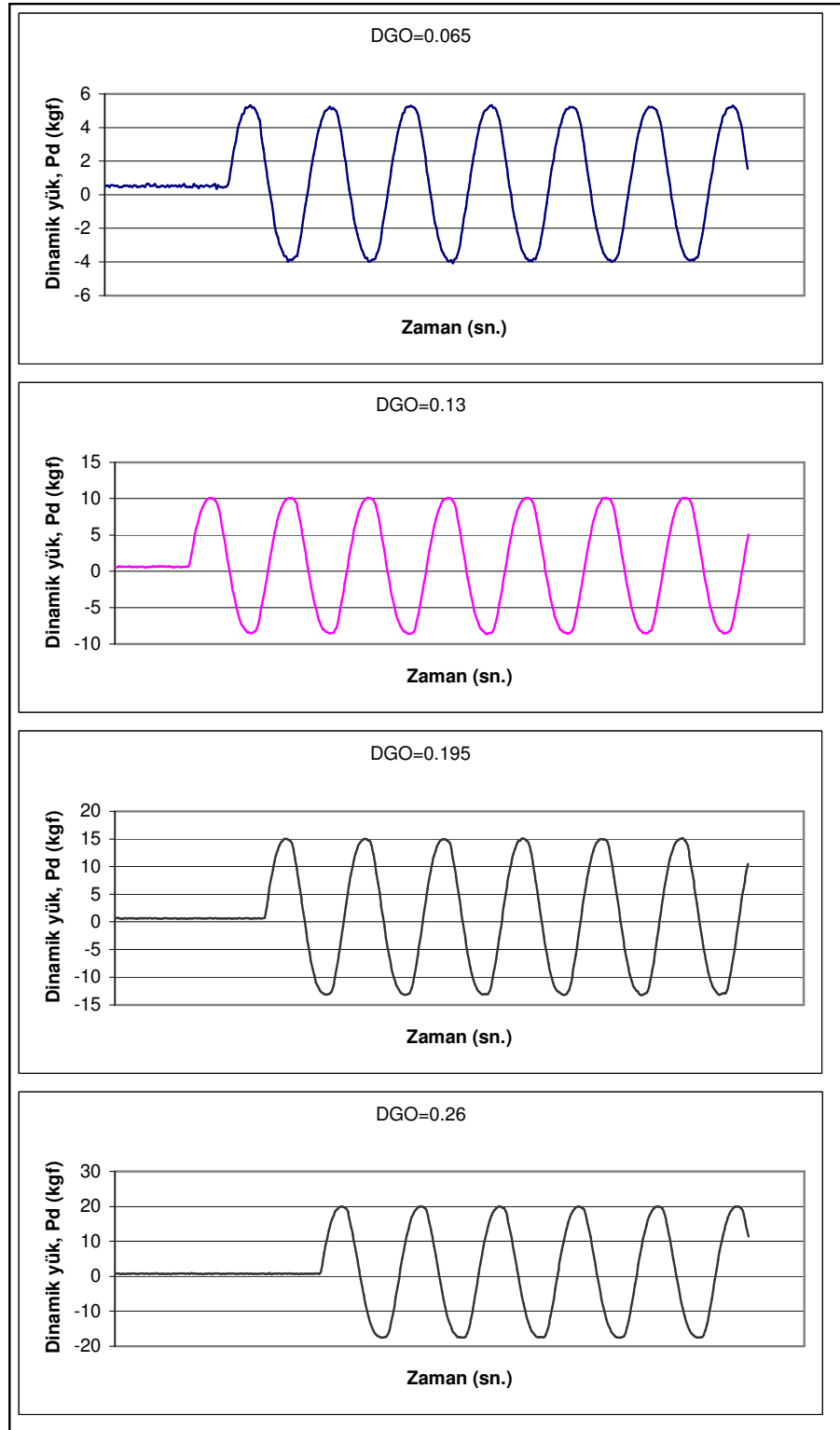
Devinimli olarak yüklenen numunelerde istenen DGO değerine efektif basınca karşılık gelen zirve-zirve deviatör gerilmesinin tanımlanması ile ulaşılmıştır. Burada Eş. 5.9 kullanılmış ve σ_c' değeri numuneyi doyurmak mümkün olmadığı için toplam çevre basıncı olarak alınmıştır.

$$DGO = P_d / (2A\sigma_c') \quad (5.9)$$

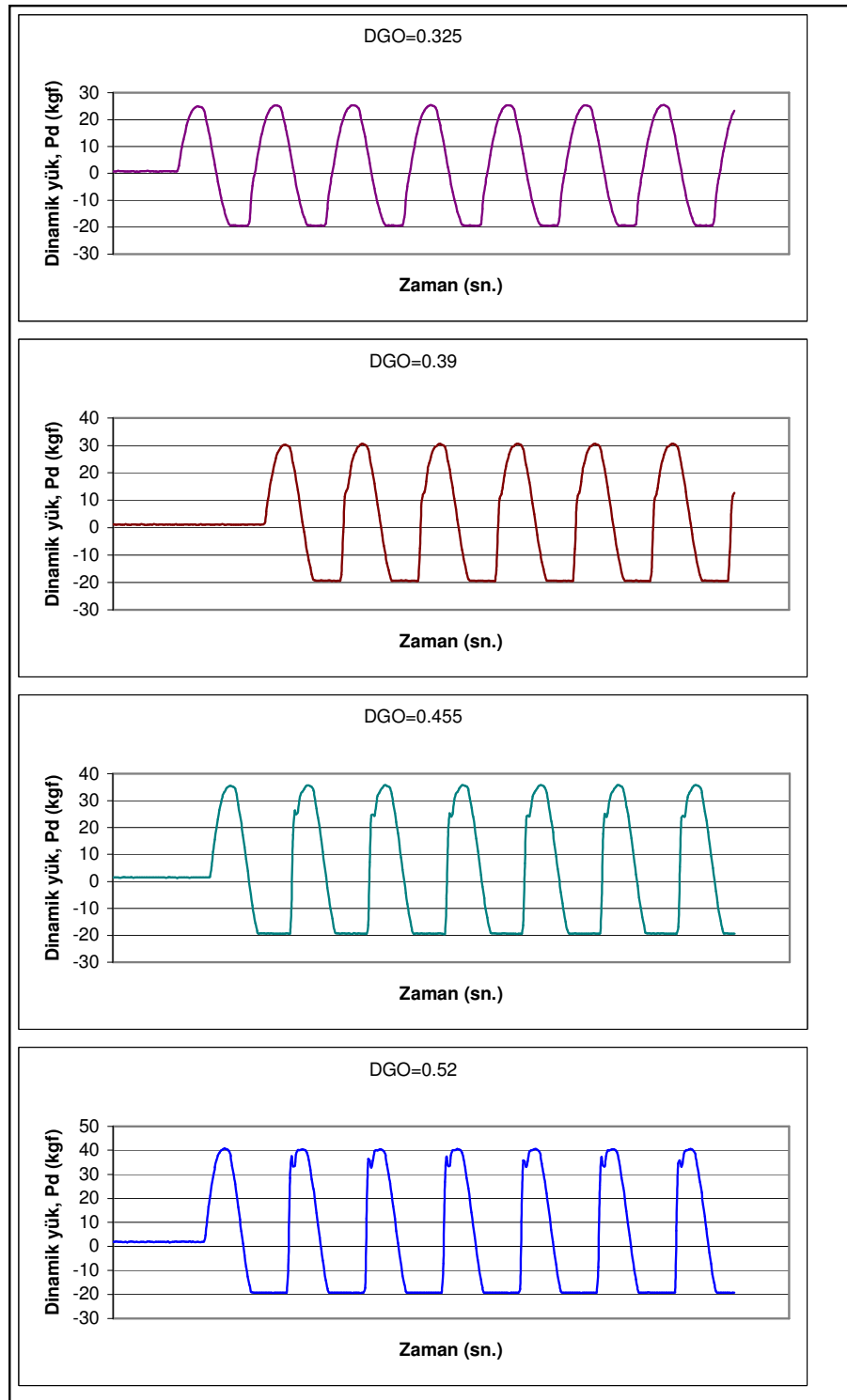
Bütün deneylerde 1 saniyelik periyodu olan sinüzoidal yük fonksiyonu uygulanmaya çalışılmıştır. Devinimli yükleme sırasında numuneler kırılmadıkları ve bir bütün olarak kaldıkları için deneyler sonrasında aynı numunelere statik yükleme yapmak mümkün olmuştur.

Devinimli üç eksenli deneyi sonuçları

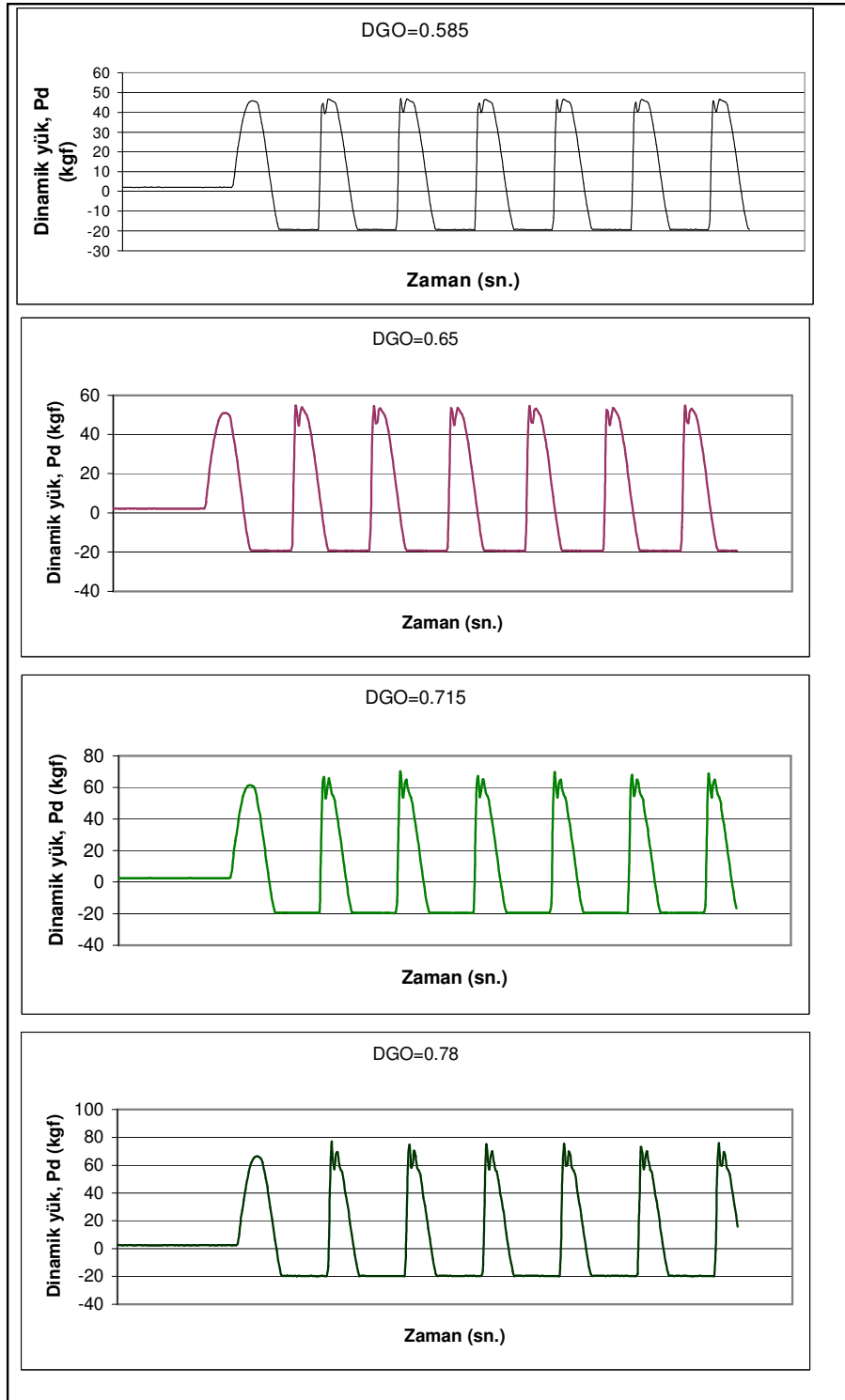
Enjekte edilmiş numunelerin test edilmesinin amacı kolloidal silika enjeksiyonunun kumların devinimli yükler altında büyük deformasyonlar yapmasını engeleyip engelleyemediğini görebilmektir. Devinimli üçeksenli deneyleri değişik dinamik yüklerle yaratılan farklı DGO değerleri için gerçekleştirilmiştir. Çeşitli numunelerin değişik dinamik yüklerle bir saniye periyotlu yüklemelere maruz bırakıldıklarında oluşan yük formları şekil 5.11' de verilmiştir. Şekilde dinamik yükün yaklaşık olarak 19,6 kN dan büyük olduğu durumlarda yani DGO değeri 0.26 yı geçtiğinde, sinüzoidal yük formunun bozulduğu görülmektedir. Yük formunun bozulmasının enjeksiyon yapılmış numunelerde elastikiyet özelliğinin kaybolmasından dolayı belirli değerler üzerindeki yüklerde geriye dönüş olmaması sebebi ile yükleme ile numune arasında kopukluk meydana gelmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



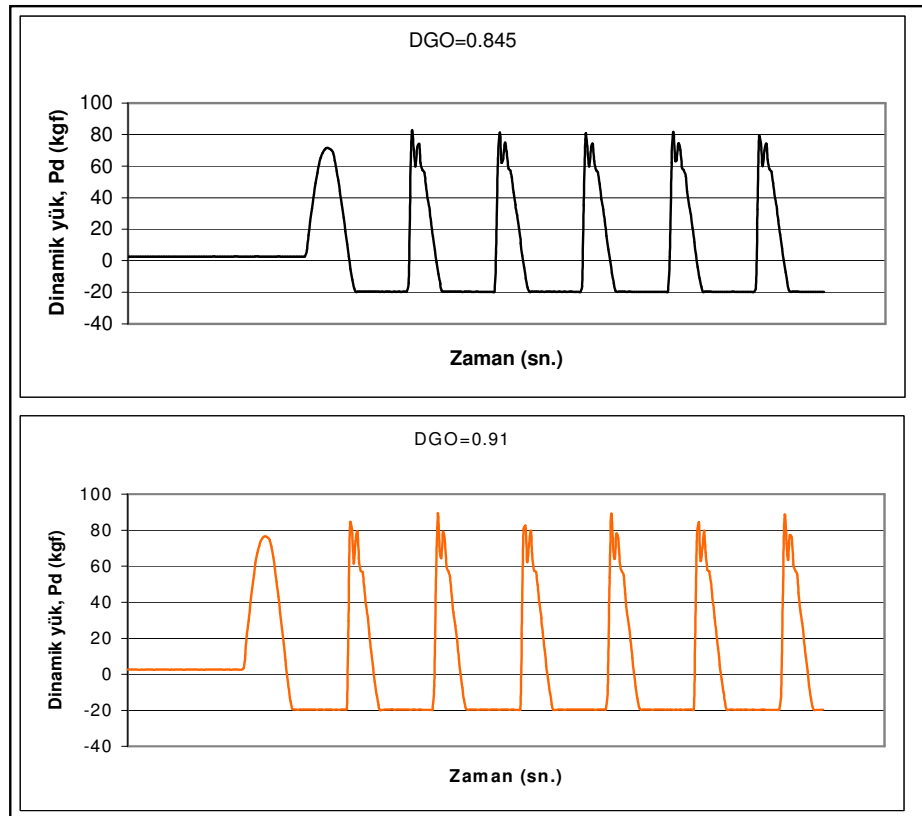
Şekil 5.14. Çeşitli yükler için yük formları



Şekil 5.14. (Devam) Çeşitli yükler için yük formları



Şekil 5.14. (Devam) Çeşitli yükler için yük formları



Şekil 5.14. (Devam) Çeşitli yükler için yük formları

Devinimli yüke maruz bırakılan numunelerin üzerinde 1000 devir yük uygulanmasına rağmen hiçbir numune kırılmamıştır. Burada 7.5 büyüklüğünde bir depremin ancak 15 önemli uniform gerilme devri meydana getireceği de unutulmamalıdır [Seed ve İdriss ,1998]. Enjekte edilmemiş kum ise 0.27 DGO'da 13 devirde bozulmuştur [Gallagher, 2000].

Çeşitli DGO oranlarında devinimli yüklemeye maruz bırakılan numunelere tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Bu deneylerde öncelikle 1/9 luk tuz su çözeltisi ile ağırlıkça % 20 lik çözelti koloidal silika karışımı ile yapılmış bir numune devinimli yükleme uygulanmadan direkt olarak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bulunan 238 kPa değeri daha küçük boyutlu numuneler üzerinde aynı karışımla yapılan numunelerin 28 günlük 259 kPa değerine yakın bir değerdir. Enjekte edilmiş numunelerin tek eksenli basınç değerlerinin belirli bir standart sapması olduğu gözönüne alındığında ve

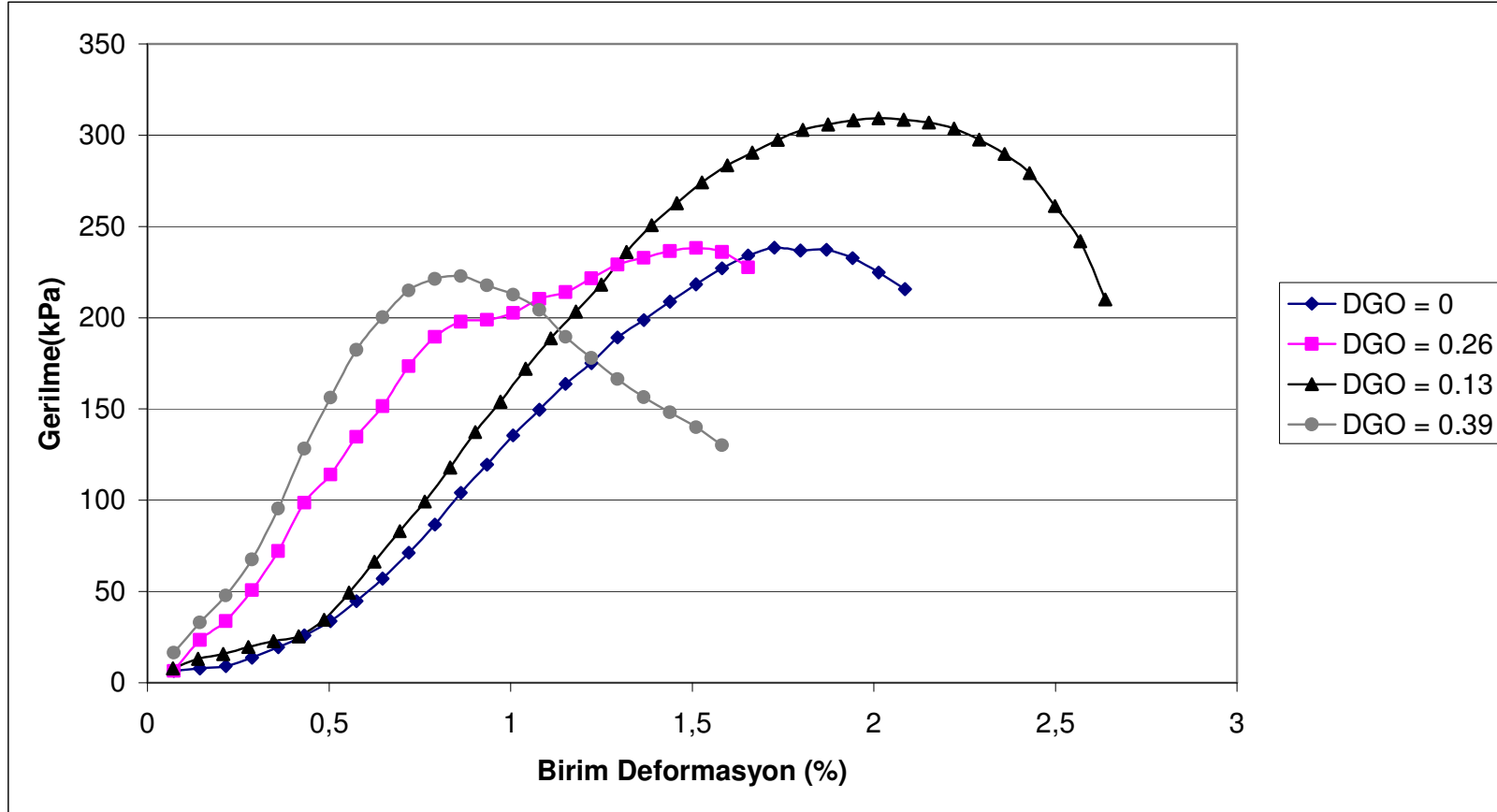
numunelerin boyut farkı dikkate alındığında bu tür bir farkın normal olduğu değerlendirilmektedir. 0,26 DGO değeri ile devinimli yüklemeye maruz bırakılan numunelerin tek eksenli basınç dayanımı 234 kPa; 0,39 DGO oranı ile devinimli yüklemeye maruz bırakılan numunenin ki ise 231 kPa ve 0,52 DGO ile devinimli yüklemeye maruz bırakılan numunenin ki ise 222 kPa olmuştur. 0,13 DGO 'na karşılık gelen 308 kPa değerinin çok yüksek olmasının enjeksiyon işleminden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir. Sonuçlar aşağıda verilen Çizelge 5.6.'da tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 5.6. Dinamik yüklemeler sonrası tek eksenli basınç dayanımları

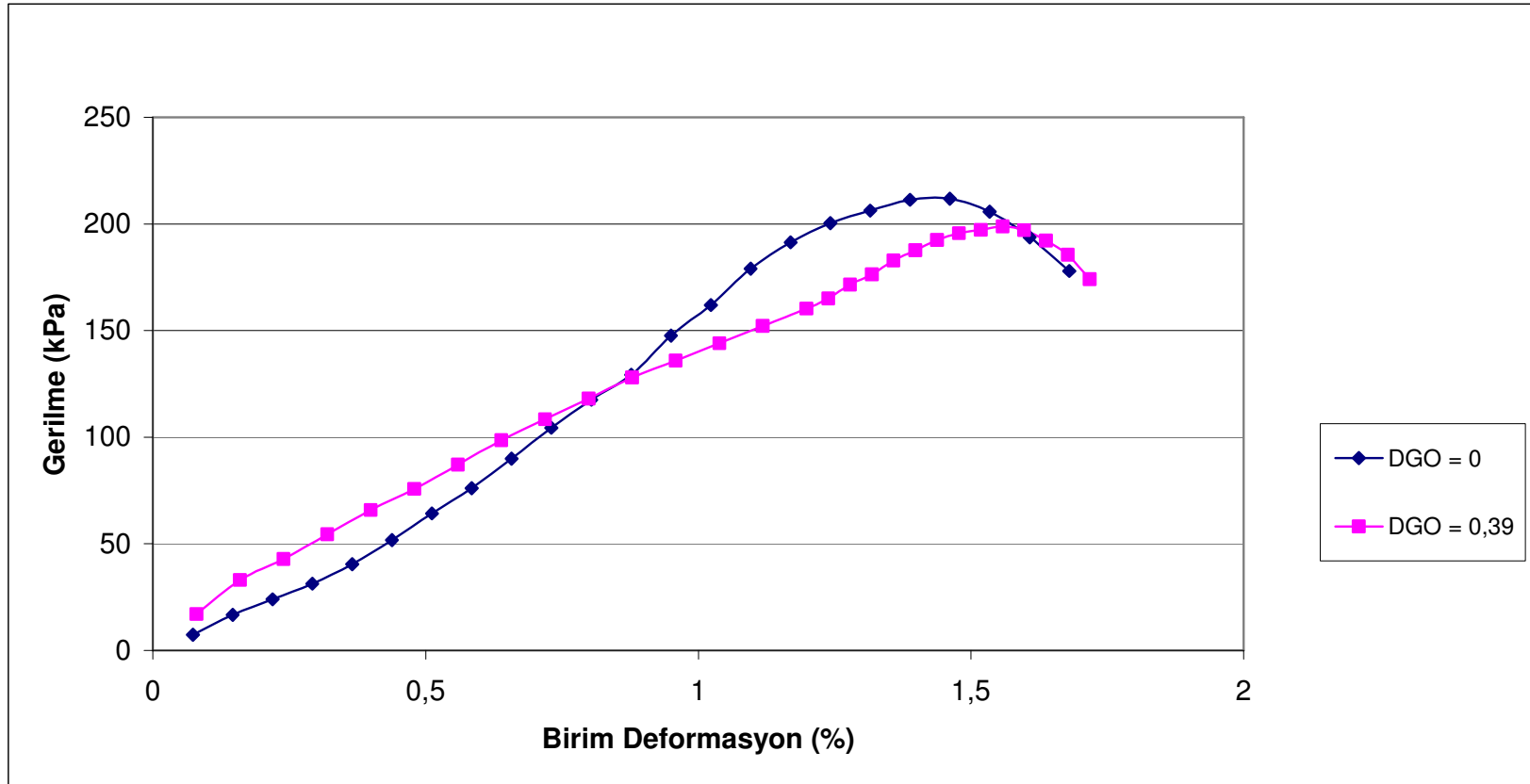
DGO	Basınç Mukavemeti (kPa)
0	238
0,13	308
0,26	234
0,39	222

1/12 lik tuz su çözeltisi ile ağırlıkça % 25 lik çözelti koloidal silika karışımı kullanılarak yapılmış numunelerden birisi devinimli yükleme yapılmaksızın bir diğeri ise farklı devir aralıklarında farklı DGO'ları ile devinimli yüklemeye maruz bırakıldıktan sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. İlk numune 211 kPa ikinci numune ise 198 kPa serbest basınç dayanımı göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde basınç dayanımlarında küçük değişimler olduğu, ancak numunelerin başlangıçtaki tek eksenli basınç dayanımları arasında belirli bir standart sapma olduğuda göz önüne alındığında, devinimli yüklemenin basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir. 28. günde gerçekleştirilen devinimli yüklemeler sonrası tek eksenli basınç deneyleri ile elde edilen gerilme birim deformasyon grafikleri Şekil 5.14 ve Şekil 5.15' de sunulmuştur.



Şekil 5.15. 1/9 luk çözelti için % 20 Ç/S oranında değişik DGO'da devinimli yüklemeler sonrası gerilme birim deformasyon grafikleri



Şekil 5.16. 1/12 lik çözelti için % 25 Ç/S oranında devinimli yükleme olmaksızın ve devinimli yükleme sonrası gerilme birim deformasyon grafikleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kolloidal silikanın jelleşme süresi ile ilgili çalışmalar çözeltide bulunan tuz içeriğinin artması ile jelleşme süresinin kısaldığını, sabit tuz içeriğinde artan çözelti/kolloidal silika oranının yine jelleşme süresini kısalttığını, ancak karışıma giren su miktarının artması veya belirli bir tuz içeriğinde çözelti / silika oranının çok azalması durumunda jelleşmenin gerçekleşmediği yada gerçekleşmesi durumunda jelin rijitleşmediği tespit edilmiştir. Viskozite testleri ile jelleşme süresi testleri birlikte değerlendirildiğinde viskozitenin hızlı bir şekilde artış göstermeye başlaması ile jelleşmenin başlaması arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Bu testler kullanılan kolloidal silika için 5 dakika ile 3 saat arasında bir jelleşme süresinin uygun olduğunu göstermiştir.

Jelleşme süresi testleri sonuçlarından yola çıkılarak enjeksiyonlar için karışım oranları belirlenmiş ve tek eksenli basınç deneyi için enjekte edilmiş numuneler hazırlanmıştır. Tek eksenli basınç numuneleri 1/9 ve 1/12 lik çözeltilerle elde edilen karışımlarla yapılmıştır. Ç/S oranı 1/9 luk tuz/su oranındaki çözeltiler için %5, %10, %15 ve %20 olarak, 1/12 lik tuz/su oranındaki çözeltiler için ise %10, %15, %20 ve %25 olarak seçilmiştir. 1/9 luk çözeltide %5 ve 1/12 lik çözeltide %10 oranı ile yapılan enjeksiyonlar başarısız olmuş, enjeksiyon yeterince rijitleşmediği için numuneler moldlardan çıkarılırken parçalanmıştır. Ç/S oranının üst limiti olan %20 ve %25 oranları jelleşmenin enjeksiyonu ve temizleme işlemini engelleyecek kadar kısa bir sürede gerçekleşmemesi dikkate alınarak belirlenmiştir.

Tek eksenli basınç deneyleri 3, 7, 14 ve 28. günlerde ortalama üç numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımları bulunan değerlerin ortalaması olarak alınmış, bu değerlerin 30 kPa' yı bulan standart sapmaları olduğu görülmüştür. Böyle bir sapmanın numunelerin relatif sıkılıklarının farklılığı, enjeksiyonun numunelere farklı şekillerde enjekte olması ve numunelerin moldun alt yada üstünden alınması gibi çeşitli faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

1/9 luk çözeltilerle hazırlanan karışımla enjekte edilen zeminlerde maksimum basınç dayanımı % 15 Ç/S oranı için 28. günde 277 kPa olarak gerçekleşmiştir. Aynı çözelti için % 10, %15 ve % 20 Ç/S oranlarında 28.gün dayanımları arasında büyük bir fark oluşmamıştır. 1/12 lik çözeltilerle hazırlanan karışımlarla enjekte edilen kumlarda maksimum basınç dayanımı Ç/S oranı % 20 için 28.günde 219 kPa olarak gerçekleşmiştir. Aynı çözelti için % 10 Ç/S oranındaki karışımın 28 günlük dayanımı 178 kPa olarak diğerlerinden biraz daha düşük çıkmıştır.

Genel olarak basınç dayanımının büyük rakamlara ulaşmadığı, ancak literatürde koloidal silika ile yapılmış enjeksiyonlarla elde edilen basınç dayanımlarında bu seviyelerde olduğu, basınç dayanımının kür süresince azalan bir hızda arttığı, 75. gün sonunda yapılan testlerle elde edilen sonuçlarla 28. gün sonuçları arasında ciddi bir fark olmadığı dikkate alındığında, 28 günün optimum kür süresi olarak alınabileceği, Ç/S oranı yüksek karışımların daha erken dayanım kazanmaya başladığı ancak karışıma giren su miktarının fazlalığı sebebi ile dayanım artış miktarının sınırlı olduğu, Ç/S oranı düşük olan karışımlarla yapılan enjeksiyonlarda ise ilk başta küçük olan dayanım değerlerinin hızlı bir şekilde artarak diğerlerine yaklaştığı belirlenmiştir. 1/9 luk çözeltilerle hazırlanan karışımlarla enjekte edilmiş kumların dayanımı 1/12 lik çözeltilerden daha yüksek olmuştur.

Jelleşme süresi çalışmaları ve tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre devinimli üç eksenli deneyi yapılacak numunelerin, 1/9 luk çözelti ile Ç/S oranı % 10 ve 20, 1/12 lik çözelti ile ise % 25 olacak şekilde enjekte edilmesine karar verilmiştir.

Testler öncesinde numuneler doyurulmaya çalışılmış ancak 400 kPa ' ı bulan geri besleme basıncına rağmen ancak % 80 civarında doygunluğa ulaşılabilmektedir. 400 kPa basınç 40 m su yüksekliğine tekabül etmektedir. Bu derinlikte kumun çalışmalarda % 30 olarak alınan relatif sıkılık değerinden daha fazla sıkılığa sahip olacağı, dolayısıyla % 80 lik bir doygunluk için bile

daha fazla basınç gerekeceği açıktır. Öte yandan böyle bir derinlikte dinamik yük etkisi de sınırlı olacaktır. Bütün bu değerlendirmeler ışığında kalan numunelere doyurma işlemi uygulanmamıştır.

Kolloidal silika enjeksiyonu sıvılaştırılabilir zemin sınırları içerisinde ve ince orta boyut dağılımına sahip kuma enjekte edilebilirken, elde edilen numuneler suya doymun hale getirilememiştir. Bu durum sıvılaştırılabilir nitelikte bir zemine yapılacak enjeksiyonun sıvılaştırma riskini ortadan kaldıracağını göstermiştir.

Seçilen değişik numunelere 28. gün sonunda çeşitli DGO değerlerinde 1 saniye periyotlu sinüsoidal formda yükleme yapılmıştır. Dinamik yükün 19,8 kN dan büyük olduğu yani DGO değerinin 0.26 yı aştığı durumlarda yük formu bozulmaya başlamış, artan yük miktarı bozulmasında artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte DGO = 0,91 değerine kadar yükselen değişik DGO değerlerinde dinamik yükleme yapılmış ancak numunelerin hiçbirisi kırılmamıştır. 1/9 luk çözelti ile % 20 Ç/S oranında karışımla enjekte edilen kumlar DGO = 0.13, 0.26, 0.39 ve 0.52 değerlerinde 1000 devirden fazla yüklenmiş ancak kırılma meydana gelmemiştir.

Devinimli yükler etkisi ile kırılmayan numuneler tek eksenli basınç deneyine tabi tutularak kırılmış ve basınç dayanımları belirlenmiştir. İlk başta numunelerden birisi devinimli yükleme yapılmaksızın direk olarak tek eksenli basınç deneyi ile kırılmış ve dayanım 238 kPa olarak bulunmuştur. 1000 devirin üzerinde dinamik yük uygulanan numunelerden DGO = 0.13 olan için basınç dayanımı 308 kPa, DGO=0.26 için 234 kPa, DGO=0.39 için 231 kPa ve DGO = 0.52 için 222 kPa olarak bulunmuştur. Burada enjeksiyondan kaynaklanması muhtemel bir hata ile bulunan 308 kPa değeri dışındaki değerler az miktarda azalmış olmakla birlikte devinimli yüklemenin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. 1/12 lik çözeltilerle hazırlanan %25 Ç/S oranındaki karışımla enjekte edilmiş numunelerden birisi devinimli yükleme yapılmaksızın kırılmış ve basınç dayanımı 211 kPa olarak bulunmuş, diğer bir numunenin basınç dayanımı ise

50-100 arasında değişen devir sayılarında farklı DGO'larında devinimli yüklemeye maruz bırakıldıktan sonra 198 kPa olarak bulunmuştur. Sonuçlar kolloidal silika ile enjekte edilmiş ince-orta boyut dağılımındaki kumların devinimli yüklere karşı direncinin önemli ölçüde arttığı, devinimli yüklemenin enjekte edilmiş kumun basınç dayanımını etkilemediğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

Akbulut, S., "Enjeksiyon ile granüler zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi", Doktora Tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, 1-5 (1999).

Baker, W. H., "Planning and performing structural chemical grouting", Grouting in Geotechnical Engineering, ***ASCE***, New York, 515-539 (1982).

Bell, F.G., "Engineering Treatment of Soils", ***EFN Spon***, London, 10-20 (1993).

Bowen, R., "Grouting in Engineering Practice", ***J.Wiley***, New York, 37-59 (1975).

Bruce, A., "Trends and developments in american grouting practice (grouting in the ground)", ***Institution of Civil Engineers*** (edited by Dr.A.L.Bell), London, 573-589 (1994).

Caron, P., "Synthetic resins laboratory tests and applications of grouting", ***Rilem Colleague***, 183-186 (1967).

Clifton, W., "Chemical grouts for potential use in bureau of reclamation projects", GR-86-13, ***U.S.Dept. of the Interior-Bureau of Reclamation***, Denver, 7-12 (1986).

Degussa, "Meyco mp 320: Properties, uses, storage and handling", Product Information, ***Degussa***, Düsseldorf, 1-6 (2006).

Durmuşoğlu, E., ve Corapcıoğlu, M.Y., "Experimental study of horizontal barrier formation by colloidal silica", ***Journal of Environmental Engineering***, 126: 833-841 (2000).

Dupont, "Ludox colloidal silica: Properties, uses, storage and handling" Product Information, ***DuPont***, Wilmington DE, 1-19 (1997).

Gallagher, P.M., "Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk", Philosophy of doctor dissertation, ***Virginia Polytechnic Institute and State University***, Blacksburg, VA., 23-33, 96-117 (2000).

Graf, T. E., Clough, G. W., and Warner, J., "Long term aging effects on chemically stabilized soil", Grouting in Geotechnical Engineering, ***ASCE***, New York, 470-481 (1982).

Hausmann, M.R., "Engineering Principles of Ground Modification", ***McGraw-Hill Inc.***, New York, 382-400 (1990).

Henn, R., "Practical Guide to Grouting of Underground Structures", **Thomas Telford**, London, 169-181(1996).

Iler, R.K., "The chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry", **JohnWiley & Sons**, New York, 98-99 (1979)

Internet, Description of and applications for grouts used in the civil engineering field by J.G.T. <http://www.ocf.berkeley.edu/~tamjo/grout/Grout-rep.html> (1996).

Jurinak, J.J., Summers, L.E. and Bennett, K.E. "Oilfield application of colloidal silica gel", **Society of Petroleum Engineers International Symposium on Oil Field Chemistry**, Houston, 8-10 (1989).

Karol, R., "Chemical Grouting and Soil Stabilization", **Marcel Decker Inc**, New York, 135-140,145-163,166-239 (2003).

Koerner, R.M., "Construction and Geotechnical Methods in Foundation Engineering", **Mc-Graw-Hill**, New York, 149-155 (1985).

Kosmatka, S., "Cementitious Grouts and Grouting", **Portland Cement Association**, Washington, D.C , 6-9 (1990).

Kutzner, C., "Grouting of Rock and Soil", **Balkema**, Netherland, 147-151 (1996).

Liao, H. J., Huang, C. C., and Chao, B. S. "Liquefaction resistance of a colloid silica grouted sand", **Proc. of 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment**, New Orleans, 1305 – 1313 (2003).

Moridis, G.J., Pruess K., Persoff, P., and Apps, J.A. "Performance and properties of colloidal silica and polysiloxane grouts" **Note presented at the International Containment Technology Workshop**, Baltimore, Maryland, (1995).

Naudts, A.M.C. "Grouting to improve foundation soil", Practical Foundation Engineering Handbook, R.W. Brown, ed., **McGraw-Hill**, New York, 5.277-5.290 (1996).

Noll, M.R., Bartlett, C. and Dochat, T.M., "In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica", **Proceedings of the 6th National Outdoor Action Conference, National Ground Water Association**, Las Vegas, NV, 443-457 (1992).

Nonveiller, E., "Grouting Theory and Practice", **Elsevier Science Publishers**, NewYork, 61-67 (1989).

Önalp, A., "Geoteknik Bilgisi", **Karadeniz Üniversitesi**, Trabzon, 23-29 (1985).

Persoff, P., Moridis, G.J., Apps, J., Pruess, K., and Muller, S.J. "Designing injectable colloidal silica barriers for waste isolation at the Hanford site", In Situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies, **Proceedings of the 33rd Hanford Symposium on Health and the Environment**, Pasco, 1: 87-101 (1994).

Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., and Whang, J.M. "Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel", **International Containment Technology Proceedings**, 578-584 (1997).

Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., and Whang, J.M. "Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 125 (6), 461-469 (1999).

Sydansk, R.D. "A newly developed chromium (III) technology", **SPE Reservoir Engineering**, Ağustos, 346-352 (1990).

Seed, H.B. and Idriss, I.M. "ground motions and soil liquefaction during earthquakes", **Earthquake Engineering Research Institute**, 134,(1982).

Shroff, A.V., Shah, D.L., "grouting technology in tunnelling and dam construction", **Balkema**, Brookfield, 73-113, 123-125 (1993).

Tekin, E., "İnce taneli çimento enjeksiyonu ile değişik gradasyonlu kumların enjekte edilebilirliği üzerine deneysel çalışmalar", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 23-26 (2004).

Verfel, J., "Rock Grouting and Diaphragm Wall Construction", **Elsevier**, Prague, 261-262 (1989).

Warner,J., "Practical Handbook of Grouting Soil Rock and Structures", **John Wiley Sons**, New Jersey, 51-61, 115-143 (2004).

Whang, J.M. "Section 9 – Chemical-based barrier materials", Assessment of Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications, R. R. Rumer and J.K.Mitchell, eds., **NTIS**, Springfield, VA, 211-247. (1995).

Weaver, K.D., "Dam Foundation Grouting", **American Society of Civil Engineers**, New York, 178 (1991).

US Army Corps of Engineers, "Engineer Manual 1110-1-3500", **USACE**, Washington D.C.,1-6(1995).

Yonekura, R. And Miwa, M. "Fundamental properties of sodium silicate based grout", ***Eleventh Southeast Asia Geotechnical Conference***, May 4-8, Singapore, 439-444 (1993).

Yonekura, R., and Kaga, M., "Current chemical grout engineering in Japan", Grouting, ***ASCE***, New York, NY, 1:725-736 (1992).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : YILDIZ , Serkan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 02.09.1975 Sivas
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 417 51 90/ 4331
 Faks : 0 (312) 417 51 90
 e-mail : seyildiz@kho.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği	2006
Yüksek lisans	Başkent Üniversitesi /İşletme	2001
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi/ İnşaat Müh.	1998
Lise	Sivas Selçuk Anadolu Lisesi	1993

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999-2006	Kara Harp Okulu	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Futbol, Basketbol