

**FARKLI RÖLATİF SIKILIK VE TANE DAĞILIMINA
SAHİP KUM ZEMİNLERDE ULTRAFİN 12
ENJEKSİYONU PERMEASYON YETİSİ**

Eyübhhan AVCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2009
ANKARA**

Eyübbhan AVCI tarafından hazırlanan FARKLI RÖLATİF SIKILIK VE TANE DAĞILIMINA SAHİP KUM ZEMİNLERDE ULTRAFİN 12 ENJEKSİYONU PERMEASYON YETİŞİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

Tez Danışmanı, İnşaat Müh. Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Erdal ÇOKCA

İnşaat Müh. Anabilim Dalı, O.D.T.Ü.

Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Gazi Ü.

Yrd. Doç. Dr. Yüksel YILMAZ

İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Kırıkkale Ü.

Tarih: 17/09/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Eyübhan AVCI

**FARKLI RÖLATİF SIKILIK VE TANE DAĞILIMINA SAHİP KUM
ZEMİNLERDE ULTRAFİN 12 ENJEKSİYONU PERMEASYON YETİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Eyübhhan AVCI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2009

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, sabit Su/Çimento oranlı katkısız ince taneli çimento (Ultrafin 12) enjeksiyonunun farklı rölatif sıklıklardaki ve gradasyondaki kumlara enjekte edilebilirlikleri ile farklı Su/Çimento oranlı katkısız ince taneli çimento (Ultrafin 12) enjeksiyonunun sabit rölatif sıklıktaki ve farklı gradasyondaki kumlara enjekte edilebilirlikleri araştırılmıştır. Enjeksiyon yapılan numunelerin, permeabilite ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Su/Çimento oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan süspansiyonların reolojik özelliklerinin belirlenmesi için, sedimantasyon, vicat iğnesi ve marsh hunisi deneyleri yapılarak enjeksiyon için en uygun Su/Çimento oranları seçilmiştir. Bu deneylerin yapılması aşamasında karışımlarda herhangi bir dispersif sıvı kullanılmamıştır. Reolojik özelliklerin belirlenmesinden sonra değişik gradasyonda hazırlanan ince ve orta kum karışımlarına farklı rölatif sıklıklarda ve farklı Su/Çimento oranlarında sabit basınç altında enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde özellikle ince kum içeren numunelere yapılan enjeksiyonlarda oldukça başarı sağlanmıştır. Rölatif sıklığın artması enjekte edilebilirliği düşürmüştür. Rölatif sıklık % 30 da İKY 70 ile maksimum penetrasyon gözlenmiştir. Su/Çimento oranının artması ile enjekte edilebilirlik oldukça artmıştır. Su/Çimento oranı 1,5 da ince kum oranı % 100 de dâhil olmak üzere tüm ince kum karışımlarında enjeksiyonlarda başarı sağlanmıştır. Enjeksiyonda başarılı olan numuneler kür ortamında bekletilerek 1, 3, 7, 14, 28

ve 56. günlerde mukavemet deneylerine tabi tutulmuştur. Rölatif sıkılık ve S/Ç oranlarının artışı basınç mukavemet değerlerini düşürmüştür. Kum karışımlarında ince kum yüzdesinin artmasıyla basınç mukavemeti değerleri düşmüştür. Enjekte edilebilirlik ve mukavemet değerleri açısından en uygun S/Ç oranının 1,0 olduğu kanaatine varılmıştır. Enjeksiyonda başarılı olan numuneler kür ortamında bekletilerek 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerde düşen seviyeli permeabilite deneyine tabi tutulmuştur. Deney düzeneğine bağlı numunelerden 1 aylık süre zarfında herhangi bir su çıkışı gözlenmemiş ve düzenekteki su seviyesinde herhangi bir düşüş olmamıştır. Permeabilite deney sonuçlarına göre tüm numuneler geçirimsizdir.

Bilim Kodu : 911.1.050

Anahtar Kelimeler : İnce taneli çimento, reoloji, enjeksiyon edilebilirlik, kum, mukavemet, permeabilite

Sayfa Adedi : 105

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

**GRAUTABILITY OF ULTRAFIN 12 CEMENT GROUT INTO SANDS AT
VARIOUS RELATIVE DENSITY AND GRADATION**

(M.Sc. Thesis)

Eyubhan AVCI

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
September 2009**

ABSTRACT

In this experimental study, it is aimed to investigate the groutability of pure microfine cement (Ultrafin 12) injection, which is composed of constant water/cement (W/C) ratios, for different relative densities and the groutability of pure microfine cement (Ultrafin 12) injection, which is composed of different water/cement (W/C) ratios, for constant relative density. Permeability and strength properties of the grouted specimens were determined. In order to determine the rheological properties of suspensions having water/cement ratio of 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, sedimentation, vicat needle and marsh funnel tests were carried out and optimum water/cement (W/C) content is determined. During these experiments, no dispersive liquid was used. After determination of the rheological properties, constant pressure injection tests were applied to the different gradation fine sand and medium sand specimens under different relative density and different water/cement (W/C) content conditions. Very good results were obtained from the injection experiments done on fine sands. It was seen that groutability decreases with increasing relative density. Maximum penetration was observed with 70% fine sands at 30% relative density. As the proportion of water/cement ratio increases, groutability also increases. Successful results were obtained from the injection experiments that is carried out for the specimens having the 1,5 water/cement ratio and composed of only fine sand. Specimens, in which successful results

were obtained, were waited under cure conditions and then, strength experiments were done in the days of 1, 3, 7, 14, 28 and 56. From these measurements, it was observed that as the relative density and S/C ratio increases, measured strength values were decreased. Also, strength pressure values were decreased as the fine sand proportion of the specimens was increasing. It was deducted that appropriate proportion of water/cement is 1.0 for the optimum groutability and strength values. Specimens, in which successful results were obtained, also were tested for falling head permeability in the days of 1, 3, 7, 14, 28 and 56. No water flow and also no decreasing of water level were observed in the experiments during the first month of the measurements. As a result, all the specimens are impermeable according to the permeability experiments.

Science Code : 911.1.050

Key Words : Microfine cement, rheology, groutability, sand, strength, permeability

Page Number : 105

Adviser : Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren, desteğini esirgemeyen, azmi ve sabrı öğreten değerli hocam Sayın Prof Dr Murat MOLLAMAHMUTOĞLU' na sevgi, saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım boyunca beni yalnız bırakmayan Uzman İnş. Yük. Müh. Aydın GÖKÇE' ye, çalışmalardaki yardımlarından dolayı Yusuf MURATOĞLU' na ve beni her zaman destekleyen aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENJEKSİYON.....	4
2.1. Enjeksiyonun tarihi gelişimi	4
2.2. Enjeksiyonun kullanın alanları	6
2.3. Enjeksiyon türleri	6
2.3.1. Süspansiyon enjeksiyonları	6
2.4. İnce taneli çimento enjeksiyonu	10
2.5.1. Temel reolojik özellikler	11
2.5.1. Stabilitate	13
2.5.2. Katılaşma (priz) süresi	15
2.5.3. Viskozite	17
2.6. Çimento enjeksiyonlarının penetre olabilirliği	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	24

Sayfa

3.1. Giriş	24
3.2. Enjeksiyon deney düzeneği	24
3.3. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kumun özellikleri	27
3.3.1. Özgöl ağırlık	28
3.3.2. Minimum ve maksimum boşluk oranlarının belirlenmesi	29
3.3.3. Tane dağılımı	33
3.3.4. Kum numunelerinin permeabiliteleri	34
3.4. Deneyde kullanılan ince taneli çimentonun özellikleri	38
3.4.1. İnce çimento tane dağılımı	38
3.5. Deneyde kullanılan süspansiyonların özellikleri	39
3.5.1. Stabilite	41
3.5.2. Katılaşma süresi	43
3.5.3. Viskozite	48
3.6. Deneylerin yapılışı	55
3.6.1. Enjeksiyonda kullanılacak olan kum numunelerin hazırlanması	55
3.6.2. Numunelerin moldlara yerleştirilmesi	57
3.6.3. Moldların enjeksiyon düzeneğine yerleştirilerek enjeksiyona hazır hale getirilmesi	59
3.6.4. Enjeksiyonların yapılması	59
3.7. Enjeksiyon deneyleri	61
3.7.1. Sabit S/Ç oranlı katkısız süspansiyonların farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri	61

Sayfa

3.7.2. Farklı S/Ç oranlarıyla hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı gradasyonda ve sabit rölatif sıklıktaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri.....	67
3.7.3. Burwell kriterlerine göre enjekte edilebilirlik	71
3.8. Enjeksiyonda başarılı olan numunelerin mukavemet deneyleri	72
3.8.1. Sabit S/Ç oranı ve fakat değişken rölatif sıklıkta mukavemet değerleri	75
3.8.2. Sabit rölatif sıklıkta ve fakat farklı S/Ç oranlarında mukavemet değerlerinin değişimi	82
3.9. Enjeksiyonda başarılı olan numunelerin permeabilite deneyleri.....	86
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	87
EKLER	91
EK-1 Enjeksiyon deneyinde kullanılan aparatlar	92
EK-2 S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 olan süspansiyonların Vicat deney sonuçları	97
KAYNAKLAR.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. İnce ve orta kumlar için maksimum ve minimum boşluk oranlarının hesaplanması	31
Çizelge 3.2. Farklı granülometride hazırlanan kum numunelerin maksimum ve minimum boşluk oranları	32
Çizelge 3.3. Farklı zemin sınıfları için permeabilite katsayıları sınır değerleri.....	35
Çizelge 3.4. % 30 rölatif sıkılıkta hazırlanan ince-orta kum karışımlarının hidrolik iletkenlikleri	36
Çizelge 3.5. Farklı S/Ç oranlarındaki süspansiyonların sedimantasyon deney sonuçları	41
Çizelge 3.6. S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların Vicat deney sonuçları	45
Çizelge 3.7. S/Ç oranları 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan süspansiyonların Vicat deney sonuçları	46
Çizelge 3.8. S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan süspansiyonların priz başlama ve bitiş süreleri	48
Çizelge 3.9. S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan karışımlara ait Marsh hunisi ve Kohezyon ölçer plaka deney sonuçları	50
Çizelge 3.10. S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan katkısız süspansiyonlara ait birim hacim ağırlıklar	53
Çizelge 3.11. Viskozite deneylerine göre dinamik vizkozitenin bulunması	55
Çizelge 3.12. Kum karışımlarının istenen rölatif sıkılık değerlerine göre numune ağırlıklarının hesaplanması.....	57
Çizelge 3.13. S/Ç oranı 1,0 olan katkısız süspansiyonun farklı rölatif sıkılıkta ve gradasyonda kum numunelerde enjeksiyon başarı durumu.....	63

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.14. Farklı S/Ç oranlı süspansiyonların, %30 rölatif sıklıkta ve değişik gradasyonlu kumlara penetrasyon başarı durumları	68
Çizelge 3.15. Burwell kriterlerine göre enjekte edilebilirlik.....	71
Çizelge 3.16. Enjeksiyon yapılmış farklı rölatif sıklıktaki numunelerin basınç mukavemetleri değerleri.....	76
Çizelge 3.17. Enjeksiyon yapılmış farklı S/Ç oranlı numunelerin basınç mukavemet değerleri	82

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enjeksiyon tipleri	7
Şekil 2.2. Jet Enjeksiyonu Uygulaması	10
Şekil 2.3. Bingham modeli ve reolojik diagram.....	12
Şekil 2.4. Sedimentasyon deneyi.....	14
Şekil 2.5. Vicat iğnesi düzeneğinin şematik gösterimi	16
Şekil 2.6. Marsh hunisinin şematik gösterimi	18
Şekil 2.7. Kohezyon ölçer plaka.....	20
Şekil 2.8. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon yetisi.....	23
Şekil 3.1. Enjeksiyon deney düzeneği.....	25
Şekil 3.2. %100 ince ve %100 orta kum numuneleri tane boyutu dağılım eğrileri	33
Şekil 3.3. Enjeksiyon deneyinde kullanılan ince ve orta kum numune karışımlarının tane boyutu dağılım eğrileri	34
Şekil 3.4. Ultrafin 12 tane boyu dağılım eğrisi	38
Şekil 3.5. Ultrafin 12, Reocem 900 ve NPC ‘nun tane boyu dağılımı	39
Şekil 3.6. Farklı S/Ç oranlarında hazırlanan süspansiyonların 2 saat sonundaki sedimentasyon yüzdeleri.....	42
Şekil 3.7. S/Ç oranları 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 olan süspansiyonların Vicat deneyi sonucu (penetrasyon-zaman ilişkisi).....	47
Şekil 3.8. Marsh hunisi deneyinde Akma süresi ile S/Ç oranının değişim	51
Şekil 3.9. Kohezyon ölçer plaka deneyinde plaka üzerindeki süspansiyon ağırlığının S/Ç oranı ile değişimi	52
Şekil 3.10. B.H.A’ ların S/Ç oranlarına göre değişimi.....	54

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. Lombardinin önerdiği abak (τ_0/γ -akış zamanı-kinematik viskozite (μ/γ)).....	54
Şekil 3.12. %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	79
Şekil 3.13. %40 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	80
Şekil 3.14. %50 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	80
Şekil 3.15. %60 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	81
Şekil 3.16. %70 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	81
Şekil 3.17. %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 0.8 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	83
Şekil 3.18. %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	84
Şekil 3.19. %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.2 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	85
Şekil 3.20. %30 rölatif sıkılıka, S/Ç oranı 1.5 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.....	85

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Vicat deneyi düzeneği ve aparatları	17
Resim 3.1. Enjeksiyon deney düzeneği.....	26
Resim 3.2. Yıkanmış, elenmiş ince ve orta kum numuneler	28
Resim 3.3. Sürşarj yüklü numunenin sarsma tablasında sıkıştırılması	32
Resim 3.4. Permeabilite molduna malzemenin yerleştirilmesi	36
Resim 3.5. Permeabilite moldunun sabit seviyeli permeabilite düzeneğine yerleştirilmesi	37
Resim 3.6. Sabit seviyede akışın sağlanması	37
Resim 3.7. Sabit hacimli silindir kap (mezür) yardımıyla birim zamandaki akışın ölçülmesi.	37
Resim 3.8. Enjeksiyon malzemesinin hazırlanmasında kullanılan mikser	40
Resim 3.9. Sedimentasyona uğramamış, uğramış ve aşırı sedimante stabil süspansiyon.....	43
Resim 3.10. Vicat deneyinin yapılması.....	44
Resim 3.11. Marsh hunisinden süspansiyonun akması	49
Resim 3.12. Kohezyon ölçer plaka deneyinin yapılışı	49
Resim 3.13. Süspansiyonların birim hacim ağırlıklarının (γ) belirlenmesi.....	53
Resim 3.14. Numunelerin mold'a yerleştirilmesi.....	58
Resim 3.15. Mold'a üst başlığın sabitlenmesi.....	58
Resim 3.16. Moldların düzeneğe yerleştirilmesi.....	59

Resim	Sayfa
Resim 3.17. Moldların bağlı olduğu şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışının gözlenmesi	60
Resim 3.18. Enjeksiyonda başarılı olmuş ve mold dan çıkarılmış numune	60
Resim 3.19. Enjeksiyonda başarılı olmuş ve permeabilite deneyi için mold da bekletilen numune	61
Resim 3.20. % 30 rölatif sıkılıktaki % 100 orta kum numunede tam penetrasyon.....	64
Resim 3.21. % 30 rölatif sıkılıktaki % 100 ince kum numunede filtrasyon (2/3 penetrasyon)	64
Resim 3.22. % 40 rölatif sıkılıkta, İKY 60 olan numunede tam penetrasyon	65
Resim 3.23. % 50 rölatif sıkılık için İKY 60 da filtrasyon olmuş ve 2/3 penetrasyon sağlanmış numune.....	66
Resim 3.24. S/Ç oranı 1,2 için enjeksiyon başarı sınırı (İKY 80).....	70
Resim 3.25. % 30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1,5 değeri için İKY 100’de enjeksiyon başarısı.....	70
Resim 3.26. Numunelerin moldlardan çıkarılması.....	72
Resim 3.27. Numunelerin kür ortamında bekletilmesi.....	73
Resim 3.28. Beton kesicide boyu çapın 2 katı olacak şekilde kesilmiş numune	74
Resim 3.29. Mukavemet deney numunelerine alçı başlık yapılması	74
Resim 3.30. Numunelerin serbest basınç cihazında mukavemetlerinin ölçülmesi	75
Resim 3.31. İnce kum yüzdesi fazla olan numunenin (rölatif sıkılık % 30, İKY % 70) tipik kırılma biçimi.....	77
Resim 3.32. İnce kum yüzdesi düşük olan numunenin (rölatif sıkılık % 30, İKY % 30) tipik kırılma biçimi.....	78
Resim 3.33. Düşen seviyeli permeabilite deneyinin yapılması	86

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Zemin numunesi enkesit alanı, mm^2
D_r	Rölatif sıkılık, %
D_{10}	%10 geçen zemine karşılık gelen tane çapı, mm
D_{15}	%15 geçen zemine karşılık gelen tane çapı, mm
D_{85}	%85 geçen enjeksiyon materyaline karşılık gelen tane çapı, mm
D_{95}	%95 geçen enjeksiyon materyaline karşılık gelen tane çapı, mm
dv/dz	Hız eğimi
$e_{\max}$	Maksimum boşluk oranı
$e_{\min}$	Minimum boşluk oranı
e_0	İstenilen sıkılıktaki kum karışımının boşluk oranı
G_s	Zemin özgül ağırlığı
h	Suyun yüksekliği, mm
γ	Yoğunluk, g/cm^3
γ_L	Deneyde kullanılan sıvının yoğunluğu, g/cm^3
γ_{su}	Saf suyun yoğunluğu, g/cm^3
μ	Dinamik viskozite, cP
μ/γ	Kinematik viskozite, m^2/s
τ	Kayma gerilmesi, g/cm^2
ρ	Özgül ağırlık
τ_0	Başlangıç akma gerilmesi, g/cm^2
$\rho_{\max}$	Maksimum yoğunluk, g/cm^3
$\rho_{\min}$	Minimum yoğunluk, g/cm^3
ΔW	15x15 cm boyundaki metal levhaya yapışan enjeksiyon ağırlığı, g
ρ_w	Suyun özgül ağırlığı

Simgeler	Açıklama
H	Yükseklik, mm
L	Karakteristik uzunluk, mm
i	Hidrolik eğim, mm/mm
k	Permeabilite katsayısı, cm/s
M	Moldun kütlesi, g
M₁	Mold ve gevşek kuru zemin kütlesi, g
M₂	Mold ve sıkıştırıldıktan sonraki kuru zemin kütlesi, g
M_{S1}	Deneye tabi tutulan kuru zemin kütlesi, g
M_{S2}	Deneye tabi tutulan, sıkıştırıldıktan sonraki kuru zemin kütlesi, g
t	Su toplama zamanı, s
Q	Toplanan su hacmi, mm ³
V_m	Deneye tabi tutulan zeminin hacmi, mm ³

Kısaltmalar	Açıklama
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
B.H.A	Birim Hacim Ağırlık
G.U.M.M.F	Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi
İKY	İnce Kum Yüzdesi
NPÇ	Normal Portland Çimentosu
S/Ç	Su/Çimento

1. GİRİŞ

Enjeksiyon, zemin veya kayaçların mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla, zemin veya kaya bünyesindeki boşluklara basınç altında solüsyon ve süspansiyon malzemelerin enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir [1].

Enjekte edilecek karışımlar zemin içindeki boşluklara nüfuz ederek, formasyonun mukavemetini artırır, geçirimsizliğini azaltır [1].

Enjeksiyonlar, taşıma gücünün artırılmasında, gevşek zeminlerin iyileştirilmesinde, oturmaların kontrol altına alınmasında, çatlakların doldurulmasında, sıvılaşabilecek granüler zeminlerin iyileştirilmesinde, baraj temellerinin geçirimsizliğinin sağlanmasında, yeraltında geçirimsiz perdeler oluşturulmasında, yer altı suyunun akışının kontrolünde, şevlerin stabilitesinin artırılmasında vb. yerlerde kullanılmaktadır [2].

Enjeksiyon teknikleri teknolojinin gelişmesiyle birlikte geoteknik mühendislerine birçok seçenek sunmaktadır. Bunlardan en çok bilinen ve en yaygın kullanılan enjeksiyon tekniği permeasyon (emdirme) enjeksiyonudur. Bu enjeksiyon tekniğinde amaç; prizlendiğinde dayanımı yüksek ve geçirimsiz zemin elde etmektir. Bu teknikle düşük enjeksiyon basıncından dolayı zeminde herhangi bir ötelenme veya sıkışma oluşmaz [3].

Permeasyon enjeksiyonunda enjeksiyon malzemesi olarak birçok malzeme kullanılmaktadır. Portland çimentosu, bunlardan biridir fakat tane çapı dağılımının büyük olmasından dolayı orta ve ince kumlara nüfuz etmesi zordur. Bu yüzden ince ve orta kumlara penetre olabilecek daha küçük çaplı malzemelere ihtiyaç duyulmuştur.

Kimyasal enjeksiyonların, sergiledikleri düşük dayanımlar, yüksek maliyetler ve çevreye verdikleri olumsuz etkilerden dolayı uygulama alanları sınırlıdır. Bu yüzden geoteknik mühendisleri enjeksiyon malzemesi olarak daha çok çimentoya

yönelmiştir. Çimentonun partikül boyutunun küçültülmesiyle ortaya ince taneli çimentolar çıkmıştır. Böylelikle ince taneli çimentolarla ince ve orta kumlara enjeksiyon işlemlerinde başarı sağlanmaya başlanmıştır.

Tezin Amacı

Bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda, ince taneli çimento enjeksiyon malzemelerinden biri olan Ultrafin12' nin, katkı malzemesi kullanılmadan, S/Ç oranı sabit tutularak farklı rölatif sıklıktaki ince ve orta karışımlı kum numunelere ve S/Ç oranı değiştirilerek sabit rölatif sıklıktaki ince ve orta kum karışımı numunelere enjekte edilebilirlikleri, ayrıca enjekte edilen numunelerin mukavemet ve permeabilite özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Planlanan ve gerçekleştirilen çalışmalar şöyle sıralanabilir;

- 1-) İlk olarak çalışmada kullanılacak ince taneli çimento (Ultrafin 12) temin edilmiştir.
- 2-) Enjekte edilecek olan kum numuneleri ASTM standartlarına göre ince ve orta kum olmak üzere iki yığın oluşturulmuştur. Kum numunelerinin özgül ağırlıkları tespit edilmiştir.
- 3-) Enjekte edilecek olan farklı karışımlardaki ince ve orta kum numunelerinin, enjeksiyondan önce tane boyu dağılımı, minimum ve maksimum boşluk oranları tespit edilmiştir.
- 4-) Her enjeksiyon işleminden önce, enjekte edilecek olan kum numunelerinin permeabilitelerini belirlemek amacıyla sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılarak hidrolik iletkenlikleri bulunmuştur.
- 5-) İnce taneli çimento süspansiyonlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi için Sedimentasyon, Vicat iğnesi ve Marsh hunisi deneyleri yapılmıştır.
- 6-) Enjeksiyon deneyleri için G.Ü.M.M.F İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı laboratuvarında mevcut bulunan enjeksiyon düzeneği, arazi şartlarını olabildiğince temsil edecek ve oluşabilecek hataları en aza indirecek şekilde modifiye edilmiştir.

- 7-) Belirlenen ince ve orta kum karışımları istenilen rölatif sıkılıkta enjeksiyon moldlarına yerleştirildikten sonra Ultrafin 12 süspansiyonları ile enjeksiyon deneyleri yapılmıştır.
- 8-) Enjeksiyonda başarılı olmuş numuneler kür ortamında bekletilmiş, 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki mukavemet değerlerinin tespiti amacıyla tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.
- 9-) Enjeksiyonda başarılı olmuş numuneler kür ortamında bekletilmiş, 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki permeabilitelerinin belirlenmesi amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır.

2. ENJEKSİYON

Enjeksiyon, akışkan malzemelerin basınç altında sondaj delikleri yardımıyla zemin içindeki boşluklara veya kaya çatlaklarına enjekte edilmesidir. Amaç zeminin ya da kaya kütesinin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir [2]. Enjeksiyon materyalleri, enjeksiyon sonrası ya hemen ya da belirli bir zaman aralığında katılaşacak veya jelleşecek şekilde tasarlanırlar. Enjeksiyonun iki önemli amacı vardır [4]. Bunlar;

1- Daha mukavim, daha sıkı ve/veya daha düşük permeabiliteli zemin veya kaya kütlesi oluşturmak

2- Zemin veya kaya içindeki boşlukları veya yapı ile yer arasındaki boşlukları doldurarak gerilme aktarımını sağlamaktır,

Enjeksiyon, çimento enjeksiyonu ve kimyasal enjeksiyon olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışma, ince taneli çimentoların enjeksiyonunu içerdiği için sadece çimento enjeksiyonları konusuna değinilmiştir.

a. Enjeksiyonun tarihi gelişimi

Enjeksiyon yöntemiyle zemin iyileştirmesi 18. yüzyıldan beri bilinmesine rağmen ilk ciddi gelişmeler 19. yüzyılın sonlarında ortaya çıkmıştır [5].

Enjeksiyon tarihinde, enjeksiyon tekniği ilk olarak Fransız inşaat mühendisi Charles Berigny tarafından uygulanmıştır. 1802 yılında Dieppe limanında yönetici olarak çalışırken, çakıl zeminin üzerine kurulan ahşap kazıkların erozyon nedeniyle yapılarda güvenlik sorunu oluşturduğunu görerek problemi çözebilmek için, 1 m aralıklarla kuyular açıp kil ve puzolan harcını zemine enjekte etmiştir. Bu çalışma enjeksiyon tarihinin ilk uygulamasıdır [6]. Kendiliğinden sertleşen puzolanlı çimento enjeksiyonu 1800' ler boyunca Fransa ve İngiltere' de gelişmeye devam etmiş ve kanallar, havuzlar, limanlar, köprüler gibi mühendislik yapılarına

uygulanmıştır. W.R. Kinniple 1856 yılında Berigny' nin geliştirdiği akış pompasına benzer bir alet geliştirmiştir. Uygulamasını, Damietta ve Rosetta barajlarındaki kil ve çimento enjeksiyonları ile su akımını engellemek için yapmıştır. 1902 yılında Ecole De Liege' den mezun olan mühendisler, ilk enjeksiyon kongresini düzenlemişlerdir. Enjeksiyonun dev adımlarla ilerlemesi ise madencilik tünellerinin yapımı sırasında ortaya çıkmıştır. Büyük derinliklerde, yer altı su seviyesinin ve akımlarının verdiği olumsuzluklardan kazıları korumak için kullanılmıştır [6]. Çimento enjeksiyonlarının kumlara enjekte edilememesi, 1926 yılında Almanya' da Dutchman H. Joosten'ın, iki bileşenli kimyasal esaslı karışımları geliştirmesiyle sonuçlanmıştır. Joosten sistemi ile yüksek konsantreli sodyum silikat ve kalsiyum klorit başarılı bir şekilde çakıl, kaba ve orta büyüklükte kum boyutuna uygulanmıştır. 1932 ve 1936 yılları arasında Amerika' nın Colorado Nehri üzerinde yapılan Hoover barajı ile birlikte enjeksiyon tekniklerinin sistematik gelişimi başlamıştır [6]. 1934 yılında ise Fransa' da ilk baraj enjeksiyonu Chavanon Barajı' nda uygulanmıştır. Çalışmalar, kullanılan enjeksiyon basıncı ile hidrolik iletkenlik arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Bu zamana kadar çimento enjeksiyonunun porozitesi yüksek, çakıl gibi formasyonlara enjekte edildiği gözlenmiştir. 1950' de iki bileşenli Joosten sisteminden, tek bileşenli kimyasal enjeksiyon geliştirilmiştir. Kimyasal enjeksiyonların gelişimi Witte, Sheits, Clarke, Shroff gibi bilim adamları tarafından lignosülfat, polimer ve yeşil reçineler olarak gruplandırılan çeşitli silikat sistemlerin, dayanımların araştırılmasıyla devam etmiştir. 1980' lerden sonra çevre bilincinin gelişmesiyle ve zemin suyunu korumak için artan resmi talepler doğrultusunda, kimyasal enjeksiyon uygulamaları geniş oranda kısıtlanmıştır [2]. Buna paralel olarak, çimento enjeksiyon teknikleri 1930' lardaki seviyede kalmamıştır. Skempton ve Glossop, katkı maddeli ve katkı maddesiz çimento ve çimento-bentonit-kil enjeksiyonları ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Portland çimentosunun tane büyüklüğünün kum formasyonlara penetre olacak kadar küçük olmaması, daha küçük tane boyutuna sahip çimentolar geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Bogue, Shimoda ve Shah 1980' de, ince taneli çimento enjeksiyonlarının kimyasal ve fiziko-kimyasal özelliklerini çalışmışlardır [2].

2.2. Enjeksiyonun kullanım alanları

Enjeksiyon yöntemi, başlangıçta su sızıntılarını önlemek ve dayanımı arttırmak için maden endüstrisinde ve baraj temellerinde uygulanmaya başlamış, daha sonra tünel kazımı esnasında gevşek zeminlerin ve parçalı kayaların stabilizasyonunda, sondaj ve numune alma esnasında su probleminin çözümünde, zemin içerisindeki boşlukların doldurularak aşırı oturmaların engellenmesinde, zeminlerin taşıma gücünün artırılmasında, deformasyonların önlenmesinde, deprem esnasında sıvılaşabilecek gevşek, suya doygun granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin azaltılmasında kullanım alanları bulmuştur [7].

2.3. Enjeksiyon türleri

Enjeksiyon türleri kullanılan malzeme çeşitlerine göre 3 gruba ayrılır [8].

- Süspansiyon enjeksiyonları
- Solüsyon enjeksiyonları
- Emülsiyon enjeksiyonları

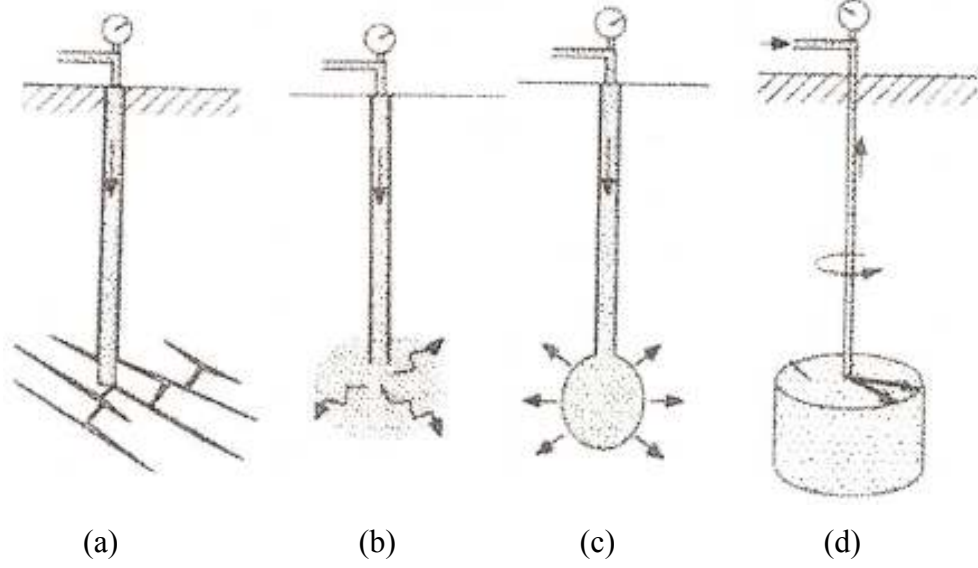
İnce taneli çimento enjeksiyonları, süspansiyon enjeksiyonu grubunda yer aldığından sadece süspansiyon enjeksiyonlarına değinilmiştir.

2.3.1. Süspansiyon enjeksiyonları

Süspansiyon enjeksiyonları, katı malzemenin sıvı içerisinde çözülmeden dağılmasıyla oluşan heterojen görünümlü karışımlardır. Basınç altında zemin ortamındaki boşluklara viskoz akışkan olarak enjekte edilirler. Zemin bünyesine enjekte edilebilme şekillerine göre 5 gruba ayrılır (Şekil 2.1) [2].

- Permeasyon (Emdirme) enjeksiyonu
- Kompaksiyon enjeksiyonu
- Çatlatma enjeksiyonu

- Jet enjeksiyonu
- Temas enjeksiyonu



Şekil 2.1 Enjeksiyon tipleri: a)Çatlatma b)Permeasyon c)Kompaksiyon d)Jet Enjeksiyonu [7]

Permeasyon (Emdirme) enjeksiyonu

Bu enjeksiyon tekniği düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesinin, zemin içindeki boşluklara, düşük basınçlarda formasyonun orijinal yapısını bozmadan (örselemeden) enjekte edilebilmesi işlemidir [7]. Zemin bünyesine enjekte edilen malzeme zamanla sertleşmekte ve böylece zeminin mekanik ve hidrojeolojik özellikleri değişmektedir [9]. Bu enjeksiyon tekniği Geoteknik mühendisliğinde en çok kullanılan enjeksiyon türüdür.

Permeasyon enjeksiyonunda iki ana mekanizma ile zemin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Birincisi, süspansiyonun mevcut zemin taneleri arasındaki teması güçlendirme eğiliminde olması ve bu şekilde enjeksiyonlanamayan zemine göre iskelet yapısı daha kuvvetli ve daha rijit olan bir zemin oluşturulmasıdır. Diğeri ise, enjeksiyon malzemesinin zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurması ve bu şekilde tekrarlı yükleme sırasında sıkışma eğiliminin azaltılmasıdır .

Kompaksiyon enjeksiyonu

1850 yılında toplanan ASCE Enjeksiyon Komitesi, kompaksiyon enjeksiyonunu 25 mm' den daha az çökme değeri olan, yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar da kum içeren katı enjeksiyon malzemesinin, zemin boşlukları içerisine girmeksizin enjeksiyon noktası etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştıracak şekilde yüksek basınçlarda enjekte edilmesi olarak tanımlamıştır [10].

50 yıl kadar önce ABD'de uygulamaya başlayan bu yöntem, çoğunlukla zayıf veya yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında, temel ve döşemelerin alttan desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrol altına alınmasında, farklı oturmalar gösteren yapı temellerinin rehabilitasyonunda, tekrar eski seviyesine yükseltilmesinde , yumuşak ve gevşek zeminlerde açılan tünel kazılarında dolayı meydana gelen yüzeysel oturmaların karşılanmasında, yer altı boru hatları veya menfez temellerinin güçlendirilmesinde ve baraj temellerinde yer altı boşluklarının (sinkhole) oluşumunun önlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [11, 12].

Kompaksiyon enjeksiyonu ile permeasyon enjeksiyonu arasında hem enjeksiyon parametreleri hem de uygulanabilecek zeminler arasında büyük farklar vardır. Kompaksiyon enjeksiyonunda çok katı bir enjeksiyon malzemesi ve çok yüksek basınçlar (3,5 MPa' a kadar) kullanılmaktadır. Dolayısıyla zeminin orijinal yapısı bozulmakta ve bu sayede radyal olarak sıkıştırılabilmektedir. Ancak kompaksiyon enjeksiyonu tüm zeminlere uygulanabilirken permeasyon enjeksiyonunun uygulanabilirliği, burada zemin içine nüfuz etme söz konusu olduğundan, hem zeminin dane çapı dağılımı hem de enjeksiyon malzemesinin dane çapı dağılımı tarafından belirlenmektedir [13].

Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu ilk olarak Avrupa' da denenmiştir. Diğer enjeksiyon tekniklerine göre yeni uygulanmaya başlayan bir tekniktir. Zemin kontrollü bir şekilde yüksek basınçlarda (≤ 4 MPa) düşük viskoziteli çimento şerbetiyle

çatlatılmaktadır. Burada amaç, enjeksiyon maddesinin zemin partikülleri arasındaki küçük boşluklarda akmasını sağlamak olmadığından, nispeten viskoz çimento şerbeti kullanılabilir. Bu yöntem permeasyon enjeksiyonu yapılamayan geçirimsizliği düşük ince taneli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Çatlatma enjeksiyonu tünel ve kazı aktiviteleri esnasında meydana gelen oturmaları önleme çalışmaları esnasında gelişmiştir [7].

Çatlama enjeksiyonuyla ağaç köklerine benzer şekiller oluşmakta ve bu sayede zemin istenilen şekilde bölgesel sıkışmaktadır, fakat iyileşmenin ana mekanizması, zemin kütlesinde enjeksiyon maddesinin katılmış merceklerinden ileri gelen rijitlik ve dayanım artışıdır [7].

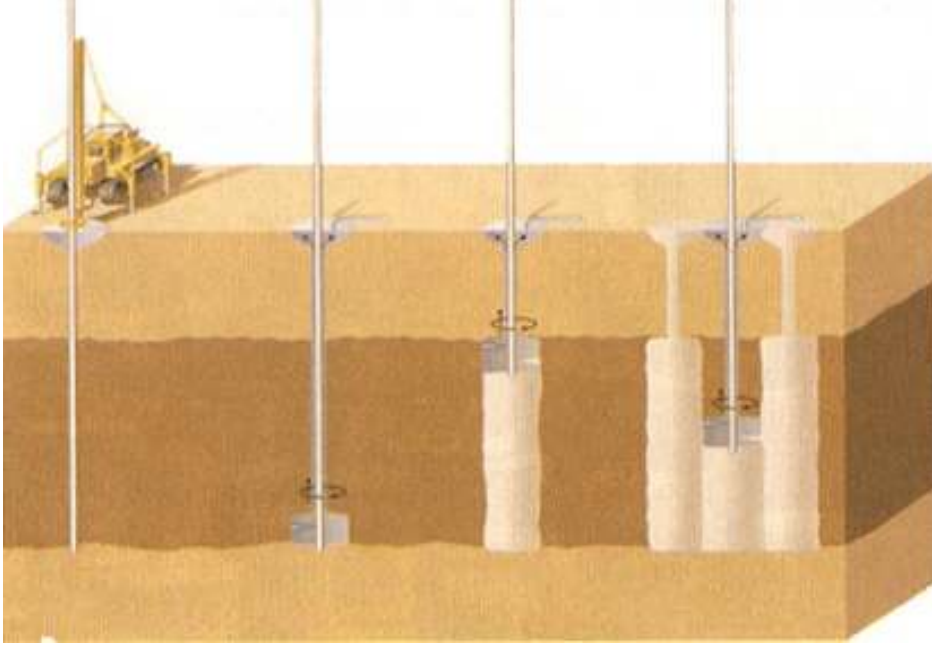
Çatlatma enjeksiyonunda kullanılan çimento şerbetinin su/çimento oranları diğer enjeksiyon türlerindeki oranlara göre daha yüksektir. Karışıma mobilite vermek için çimento şerbetine başta bentonit olmak üzere değişik katkı malzemeleri katılmaktadır. Bu açıdan çatlatma enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonundan ayrılmaktadır [14].

Jet enjeksiyonu (Jet grouting)

Zeminin yerinde enjeksiyon malzemesi ile karıştırma işlemidir. Kontrollü bir şekilde hızla dönen enjeksiyon borusundan yatay olarak yüksek basınçlı hava veya su jeti etkisinde çukur açılarak yüksek basınç altında (15-70 MPa) enjekte edilen çimento şerbetiyle zemin karıştırılır. Şerbetin değişik yönlerde yerleştirilmesi için enjeksiyon ağızlığı (nozzle) döndürülür. Karıştırma işlemine yardımcı olsun diye hava ve su karışımı enjekte edilebilir. Kuyunun tabanından yukarıya doğru üniform bir zemin-çimento karışımı oluşur. Şerbet prizlenmeden önce kolonlar örtüştürülerek yeraltında duvarlar veya diyaframlar elde edilebilir (Şekil 2.2) [4].

Jet enjeksiyonu ile oluşturulan kolonun çapı, zemin şartlarına ve Jet enjeksiyonunun uygulanış şekline bağlıdır. İri taneli zeminlerde kolon çapı, ince taneli zeminlere göre genellikle daha büyüktür. Jet enjeksiyon operatörü hava, su ve şerbet basınçları

ile enjeksiyon tüplerini döndürme ve çekilme hızlarını değiştirmek suretiyle kolonun etkili boylarını kontrol edebilir. Jet enjeksiyonu her türlü inorganik zemine uygulanabilir. Enjeksiyon derinliği sistemin kapasitesi ile sınırlıdır [4].



Şekil 2. 2 Jet Enjeksiyonu Uygulaması [4]

Temas (Dolgu) enjeksiyonu

Zemindeki mevcut olan boşlukların enjeksiyon malzemesi ile doldurulmasına temas (dolgu) enjeksiyonu denir. Genellikle tüneller ve su yapılarının etrafındaki boşluklar vb. çatlakların doldurulmasında kullanılır [8].

2.4. İnce taneli çimento enjeksiyonu

Normal Portland çimento (NPC) ile hazırlanan enjeksiyon şerbetlerinin ince ve orta kumlara enjekte edilememesi ve kimyasal enjeksiyonların çevreye zarar vermesinden dolayı alternatif olarak daha ince partikül boyutlu ve büyük özgül yüzey alanlı ince taneli çimentolar geliştirilmiştir [8].

Normal Portland çimentosunun (NPÇ) maksimum partikül boyutu 100 μm ve özgül yüzey alanı 225 ile 320 m^2/kg arasındadır. İnce taneli çimentonun ise partikül boyutu daha küçük, özgül yüzey alanı ise daha büyüktür. ACI (American Concrete Institute) ince taneli çimento partiküllerinin dane çapının %100' ünün 15 μm ' den küçük olduğunu tanımlamıştır. Avrupa ise ince taneli çimentoyu dane çapı 20 μm ' den küçük tane çapı ve 800 m^2/kg ' dan büyük özgül yüzey alanlı çimento olarak tanımlamıştır [15].

İnce taneli çimentoların olumlu özellikleri şöyle sıralanabilir [16].

- 1- Çevreye karşı zararsızdır,
- 2- NPÇ' sına göre daha küçük boşluklara girer ve daha iyi geçirimsizlik sağlar,
- 3- Yüksek dayanım sağlar,
- 4- Kimyasal enjeksiyonlara göre daha ekonomiktir.

2.5. Temel reolojik özellikler

Malzemenin akış ve deformasyon özelliklerine reoloji denir. Malzemenin mekanik özellikleri ve davranışları birçok reolojik model ile elde edilebilir. Eğer malzeme bir akışkansa akışkanın durumunu ve davranışını önceden bilmek için reolojik özelliklerini belirlememiz gerekir [17]. Reolojik özelliklerin bilinmesi yapılacak hesapları kolaylaştıracaktır. Fakat reolojik özellikler belirlenirken, tüm hesaplamalarda malzemenin geometrisi belirlenmelidir. Reolojik malzemelerde malzemenin geometrisini belirlemek zordur, kaya ve zemin numunelerinde geometriyi belirlemek için bir takım basitleştirmeler yapılmıştır [18].

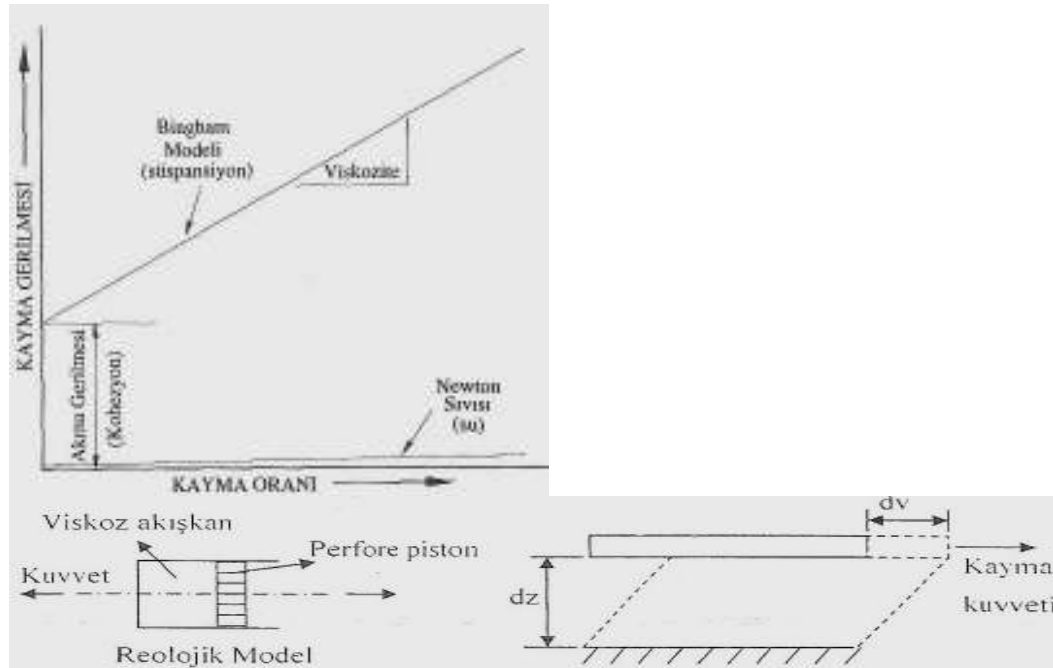
Genelde süspansiyonun reolojisi katı ve sıvı durumlarda fiziksel ve kimyasal etkilerden dolayı kompleks bir yapıya sahiptir. Katı malzemelerin aralarındaki içsel kuvvetler akma gerilmesini oluşturur. Akışın başlayabilmesi için akma gerilmelerinin yenilmesi gerekir. Eğer akma gerilmeleri aşılamazsa, süspansiyon katı özellikler gösterir. Bu yüzden akma gerilmesi katı davranıştan sıvı davranışa geçişi sağlayan özellik olarak görülebilir. Çimento enjeksiyonları akma gerilmesi

gösterdiğinden sadece süspansiyon değildir, hidrasyon süresinde kimyasal reaksiyona girmelerinden dolayı zamana göre reolojik davranışları değişkendir [18].

Enjeksiyon materyallerinin temel reolojik özellikleri;

- 1- Stabilité
- 2- Katılaşma süresi
- 3- Viskozitedir.

Süspansiyon malzemelerin reolojilerini karakterize edebilmek için birçok model kullanılmaktadır. Fakat enjeksiyon uygulamalarında geometrik modeli belirlemek zor olduğu için, karışık bir reolojik model olarak düşünülmelidir. Bingham modeli (Şekil 2. 3) akma gerilmesini ele alan en basit reolojik modelidir [18].



Şekil 2.3 Bingham modeli ve reolojik diagram [18]

Çimento reolojisini etkileyen faktörler [18];

- Su/Çimento (S/Ç) oranı
- Özgül yüzey (partikül boyutu)
- Çimento tipi (mineral içeriği)

- Çimento hidratasyonu
- Karıştırma süresi ve yoğunluğu
- Sıcaklık

2.5.1. Stabilite

Süspansiyon partikülleri serbest durumda çökelme eğilimi gösterirler. Bu eğilim sonucunda partiküller dibe çöker, berrak su çöken malzemenin üzerinde kalır. Bu olaya sedimantasyon (bleeding) denir (Şekil 2.4) [13].

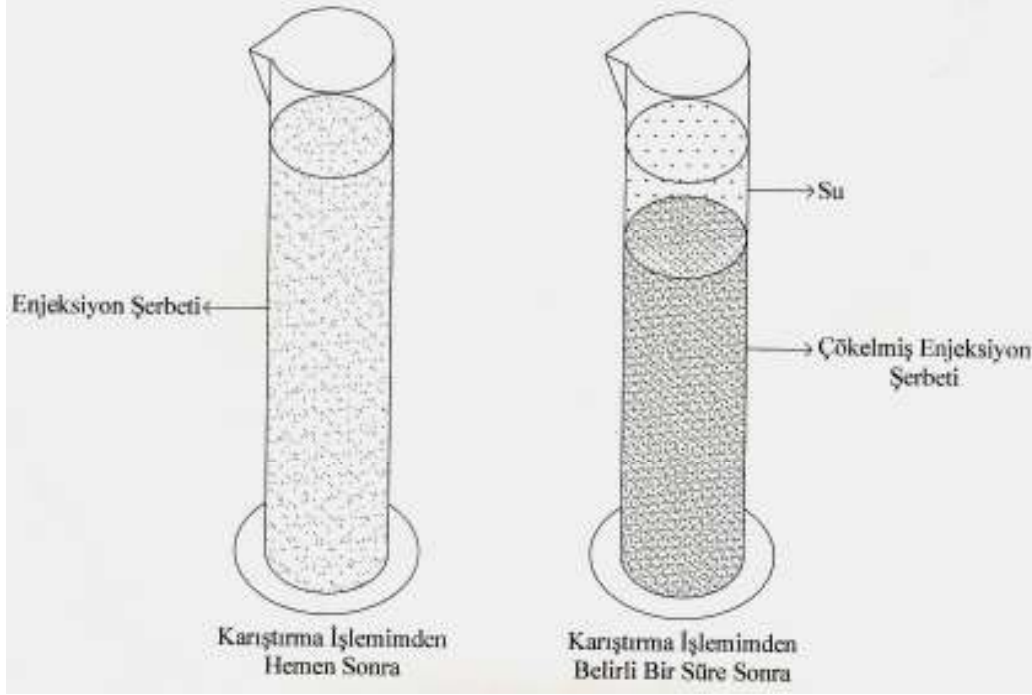
Sedimantasyon tekniği olarak bilinen bu yöntem Stokes yasası prensibine göre uygulanan bir yöntemdir. Su ile karıştırılan malzemelerin 45 cm yüksekliğindeki bir cam silindirde çökelmeye bırakılması ve farklı büyüklüklere sahip tanelerin farklı hızlarda çökecekleri esastan hareket edilerek, büyüklüklerinin bilinmesi prensibini içerir [19].

Çimento partikülleri süspansiyon içinde kalıyorsa (çökelme olmuyorsa) süspansiyon stabildir. Eğer, çimento partikülleri türbülansdan dolayı çökeliyorsa süspansiyon stabil değildir [1].

Sedimantasyonda büyük çaplı tanelerin çok kısa sürede, küçük çaplı tanelerin ise daha uzun sürede dibe çökeceği bilinen bir gerçektir. Başka bir deyişle büyük çaplı tanelerin çökme hızları, küçük çaplı tanelere göre daha yüksektir. Sedimantasyon analizinin temelini oluşturan bu düşünce Stokes (1981) tarafından ortaya atılarak incelenmiş ve tane çapları ile çökme hızları arasında bir ilişki olduğu matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bazı kabullerin yapılması ile ortaya çıkan bu ifadeye ‘Stokes Kanunu’ adı verilmektedir [20].

Stabilite, sedimantasyon malzemesinin özgül yüzeyine, tane çapına ve malzeme partikülü ile sıvı arasındaki yüzey hareketinin yoğunluğuna bağlıdır [21].

Enjeksiyon stabilitesi şu şekilde tanımlanır; 1000 ml cam silindir içindeki enjeksiyon karışımı üzerinde 2 saat sonunda üst bölgede kalan su hacmi toplam süspansiyon hacminin % 5' inden az ise süspansiyon stabildir [18].



Şekil 2. 4 Sedimentasyon deneyi

ASTM C940' a göre sedimentasyon tekniği ile stabilitenin belirlenmesi aşağıdaki işlemlerden oluşur [22];

- 1- Deney yapılacak ortamın sıcaklığının belli bir değerde olması sağlanır (23.0 ± 2 °C),
- 2- Karıştırılan enjeksiyon malzemesi 1000 ml ölçü silindirlerine aktarılır.
- 3- Ölçü silindirinin içinde bulunan karışımda buharlaşma olmaması için ölçü silindirinin ağzı kapatılır.
- 4- İlk 60 dakika için, her 15 dakikalık sürelerde üstte kalan su miktarları ile ilgili okumalar alınır. Daha sonra her 10 dakikada okuma alınır, ne zaman okuma değeri sabitlenirse (şayet iki okuma aynı değerde olursa) o zaman deney durdurulur.

5- Sedimentasyon yüzdesi (Sedimente olan su hacmi / Deney başlangıcındaki süspansiyon hacmi) x 100 formülüyle elde edilir.

6- Sedimentasyon yüzdesi % 5' ten küçükse süspansiyon stabildir.

2.5.2. Katılaşma (priz) süresi

Priz, bağlayıcı maddelerin katılaşması veya plastik şekil değişimi yapma yeteneğini kaybetmesidir. Priz başlama süresi, çimento ve suyun birleştirildiği zaman ile, çimento hamurunun fiziksel değişiklik göstererek katılaşmaya (plastikliğini kaybetmeye) başladığı zaman arasında geçen süredir [13].

Prizin sona erme süresi, çimentonun ve suyun birleştirildiği zaman ile çimento hamurunun katılaştığı (sertleşmenin bittiği) zaman arasındaki süredir [13].

Katılaşma süresi kontrollü bir şekilde enjeksiyon yapılabilmesi için önemlidir. Eğer mevcut zeminde yer altı suyu bulunuyorsa ve akış halinde ise enjeksiyon materyalinin hızlı priz alması istenir. Diğer açıdan enjeksiyon materyalinin tüm boşluklara ulaşabilmesi için uygun bir zamana ihtiyaç vardır. Bu açıdan optimum katılaşma süresini yakalamak önemlidir [13].

Çimentonun priz sürelerine etki eden faktörler [13];

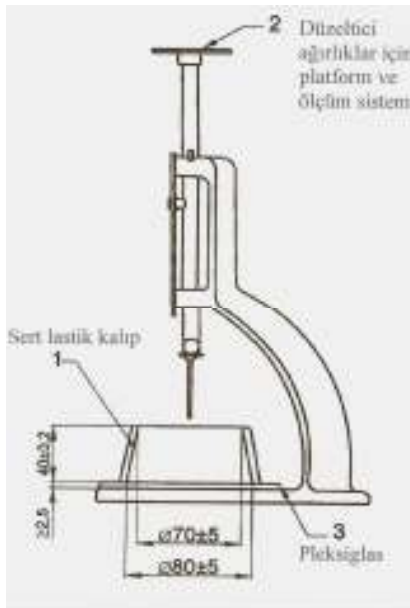
- 1- Sıcaklık; Sıcak ortamlarda hidrasyon arttığından priz süresi kısalmır. Sıcaklığın düşmesi ile priz süresi uzar.
- 2- Karıştırma suyu miktarı; Çimentonun fazla su ile yoğrulması, priz süresini uzatır. Çimentonun mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler.
- 3- Rutubet; Prizin başlamasını geciktirir ve priz süresini uzatır.

Çimentoların priz süreleri 'Vicat İğnesi' yöntemiyle belirlenir. ASTM C191' e göre Vicat iğnesi deneyi aşağıdaki adımları içerir [23];

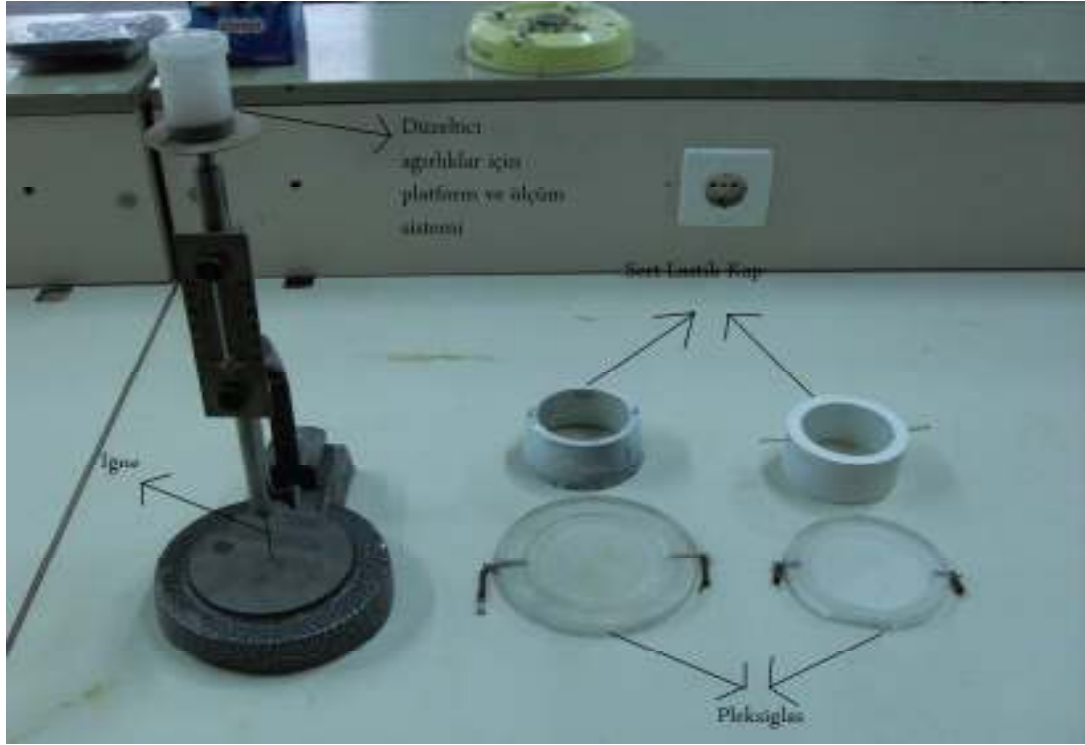
— Enjeksiyon karışımı 20°C ile 27.5°C arasında bir sıcaklığa sahip olmalıdır.

- Vicat düzeneği, çimento süspansiyonunun yüzeyine temas edecek şekilde hazırlanır. Ölçme sistemi bu noktaya göre ayarlanır.
- İlk 30 dakika boyunca hazırlanan süspansiyon öylece bırakılır.
- Sonraki her 15 dakika boyunca düzeneğe serbest bırakılarak 1 mm çapındaki Vicat iğnesinin, süspansiyon içerisine penetre olması sağlanır. Penetrasyon değeri olarak 25 mm okunduğunda, ilk prizlenme zamanı bulunmuş olur. Eğer 25 mm' den az bir değer okunduysa, zaman aralığında enterpolasyon yapılır ve 25 mm' ye karşılık gelen değer bulunur.
- Son prizlenme zamanı, Vicat iğnesi düşürüldüğünde, 1 mm' den daha az penetre olduğu değere karşılık gelen zamandan bulunur.
- Dikkat edilmesi gereken husus, moldun kenarlarından 10 mm ve daha önce deney yapılan noktanın 5 mm' lik yarı çapının dışındaki alanlarda penetrasyon gerçekleştirilir.

Vicat iğnesi Şekil 2.5' de ve Resim 2.1' de gösterilmiştir. Vicat aparatları, tek eksen boyunca hareket edebilen çerçevenin ucuna takılı iğne, çerçeveye bağlı bulunan düzeltici ağırlıklar için platform, okumaların alınabildiği ölçüm sistemi ile çimento süspansiyonunun koyulduğu sert lastik kap ve pleksiglastan oluşmaktadır.



Şekil 2.5 Vicat iğnesi düzeneğinin şematik gösterimi.



Resim 2.1 Vicat deneyi düzeneği ve aparatları

2.5.3. Viskozite

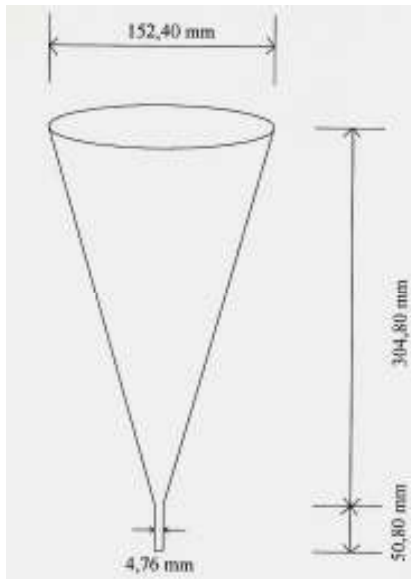
Viskozite, moleküller arası sürtünmeden dolayı akışkan malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir [13]. Newton kanununa göre sıvının kayma direniminin (τ), hız eğimine (dv/dz) oranı olarak tanımlanır [1]. Akışın başlayabilmesi için aşılması gerekir. Başlangıç kayma gerilmesi, süspansiyonun ulaşabileceği maksimum mesafeyi; viskozite ise, akımın hızını ve enjeksiyon işleminin tanımlanabilmesi için gerekli süreyi belirler. Süspansiyonlar genelde Newton akışkanı olarak davranmazlar. Bingham sıvısı olarak davranırlar. Newton sıvısının viskozite değeri kayma oranının değişmesine rağmen sabitken, Bingham sıvısının viskozite değeri kayma oranı ve kayma gerilmesi değerine göre şekillenir. Bingham modelinin eğimi viskoziteyi verir [13].

Sıcaklık, su/çimento oranı ve akışkanlaştırıcı gibi etkenler viskozite değerini etkiler. Sıcaklık ve su/çimento oranı arttıkça viskozite düşer. Akışkanlaştırıcı olarak tabir edilen kimyasal katkı maddeleri de viskozite değerini düşürür [13].

SI birim sistemine göre viskozitenin ölçü birimi $\text{g.s}^{-1}\text{cm}^{-1}$ dir. Geleneksel olarak centipoise (cP) kullanılır ($1 \text{ cP} = 0,01 \text{ g.s}^{-1}\text{cm}^{-1}$). Viskozite, dinamik (μ) yada mutlak viskozite olarak adlandırılır. Dinamik viskozitenin (μ), birim ağırlığa (γ) bölünmesiyle kinematik viskozite (μ/γ) bulunur [1]

Enjeksiyon malzemesinin akış özelliklerinin belirlenmesinde değişik özellikli huniler kullanılmaktadır [24]. Şantiyede enjeksiyon malzemesinin viskozitesi, standart bir huniden belirli bir miktarda sıvının akması için gereken zamandan bulunur. Genellikle akış süresinin belirlenmesinde iki tip huni kullanılır. Bunlardan birisi akış hunisi diğeri Marsh hunisidir. Her iki huninin de geometrik yapıları farklıdır. Ama pratik kullanımda en çok Marsh hunisi tercih edilir. Huni içine doldurulan 1000 ml' lik enjeksiyonun akması için geçen süre ölçülür. Lombardi, Marsh hunisini İzafi viskozite olarak isimlendirmiştir [1].

Marsh hunisinin üst kısmı 152,4 mm ve 4,76 mm çaplarında 304,8 mm yüksekliğinde olan bir kesik koniden oluşur. Alt kısmı 4,76 mm çaplı ve 50,8 mm çaplı bir orifistir (Şekil 2.6) [13].

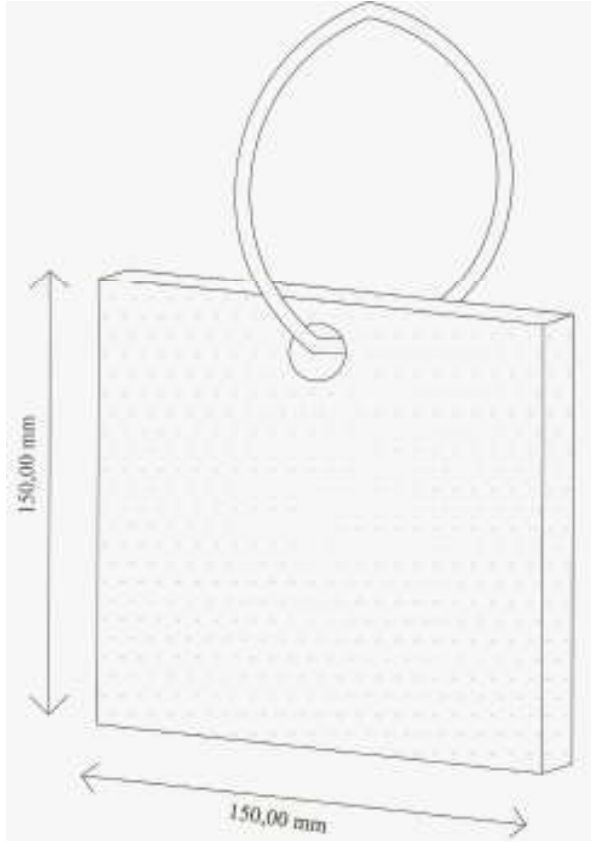


Şekil 2.6 Marsh hunisinin şematik gösterimi

ASTM C939' a göre Marsh hunisi deneyi aşağıdaki adımları içermektedir [24];

- 1-) Deney yapılacak ortamın sıcaklığı $23.0 \pm 2^\circ\text{C}$ olmalıdır.
- 2-) Enjeksiyon materyali karıştırılır. Sonra sıcaklığı ölçülür ve 1000 ml'lik mezüre aktarılır.
- 3-) Marsh hunisinin deliği kapatılarak, süspansiyon ölçü silindirinden huniye aktarılır.
- 4-) Süspansiyonun huniden akması için gereken zaman, kronometre ile belirlenir.

Viskozitenin belirlenmesinde Marsh hunisinin yanında Lombardinin önerdiği basit kohezyon ölçer plaka deneyi uygulanmaktadır. Pürüzlü yüzeye sahip çelik bir levha (15 x 15 cm) (Şekil 2.7) enjeksiyon materyaline batırılır. Bu işlemten sonra levha çıkarılır, levhaya yapışan enjeksiyon malzemesinin damlaması bitene kadar beklenir ve levhanın her iki yüzüne yapışan ağırlık (ΔW) belirlenir ve buradan başlangıç akma gerilmesi (kohezyon) τ_0 bulunur (Eş. 2.1) [25].



Şekil 2.7 Kohezyon ölçer plaka

$$\tau_o = \Delta W / 2A \quad (2.1)$$

τ_o =Başlangıç akma gerilmesi (kN/m²)

ΔW =Levhayanın her iki yüzüne yapışan enjeksiyon materyalinin ağırlığı (kN)

A =15x15 cm boyundaki çelik levhanın alanı (m²)

Akma gerilmesinin bulunmasından sonra enjeksiyon malzemesinin birim hacim ağırlığı hesaplanır (γ). τ_o / γ değeri ile Marsh hunisinden elde edilen değerler, Lombardinin önerdiği grafiğe (daha sonra grafiğin kendi ve kullanımı verilecektir) işaretlenerek enjeksiyon malzemesinin dinamik viskozitesi (μ) bulunur [25].

2.6. Çimento enjeksiyonlarının penetre olabilirliği

Enjeksiyonun fiziksel olarak zemine penetre olmasına ya da olamamasına enjekte edilebilirlik denir [17]. Taneli karışım enjeksiyonlarının enjekte edilebilirliği zeminin tane çapı büyüklüğü, maksimum çimento tane çapı, su/çimento oranı, zemindeki ince tane yüzdesi, rölatif sıklık ve enjeksiyon basınçlarına bağlıdır [25].

Enjekte edilebilirlik, çimento süspansiyonların zemin formasyonuna başarılı bir şekilde enjekte olabildiğine göre belirlenir. Zemine zerk olan enjeksiyonlarda iki durum söz konusudur: permeasyon ve filtrasyon. Permeasyon, enjeksiyon malzemesinin partiküllerinin geçici ortamdan mevcut sıvı ile taşınmasıdır. Filtrasyon ise inter-granüler boşluk ortamına akan süspansiyon içindeki parçacıkların depolanması işlemidir [17].

Enjeksiyon basıncı zemin enjeksiyonuna etki eden önemli bir parametredir. Enjeksiyon bölgesinin etkin yarıçapı uygulanan basınçla artmakta, yalnız bunun gerçekleşmesi için enjeksiyon basıncının, karışımın akma direncinden büyük olması gerekmektedir [26]. Enjeksiyon basıncı, enjeksiyonun türüne ve süspansiyonun viskozitesine bağlı olarak belirlenmelidir. Gözenekli ortamlarda yüksek basınç zemin tanelerinin yer değiştirmesine, zemin içinde dağılmadan enjeksiyon yapılacak bölgedeki suni boşluklarda karışımın toplanmasına ve zemin içinde filtrasyona sebep olmaktadır [27].

Enjeksiyona etki eden önemli parametrelerden biri de, süspansiyon karışımların S/Ç oranlarıdır. Karışımın S/Ç oranının artması enjeksiyonu kolaylaştırırken, mukavemeti düşürmekte ve geçirgenliği arttırmaktadır [28].

Bell (1993) tarafından yapılan çalışmaların sonucunda tane büyüklüğü 2 mm' den küçük olan üniform kum içine çimento enjeksiyonu yapıldığında filtre formasyonu oluşacağını belirtmiştir. Bu yüzden taneli karışımların bir formasyona girme kabiliyeti askı malzemesinin tane büyüklüğüne, yani karışım tanelerinin dolgu

yapılacak boşluklardan daha küçük olmasına bağlıdır [27]. Burwell bu durumu enjekte edilebilirlik (N) olarak tanımlamış ve formülize etmiştir (Eş. 2.2) [29].

$$N = D_{15} (\text{zemin}) / D_{85} (\text{enjeksiyon}) \quad (2.2)$$

Burada,

D_{15} =% 15 geçen zemine karşılık dane çapı

D_{85} =% 85 geçen enjeksiyon materyaline karşılık gelen tane çapıdır.

Eğer $N > 25$ ise karışım, formasyona başarılı bir şekilde enjeksiyon yapılabilir, eğer $N < 11$ ise enjeksiyon başarısız denilmektedir. Burwell, karışımın D_{85} değerine tek başına güvenilmemesi gerektiğini, enjeksiyon edilebilirlikte limit değerlere yaklaşıldığı zaman, karışımın uygun olduğundan emin olmak için enjeksiyon edilebilirliğin Eşitlik 2.3' e göre yeniden kontrol edilmesi gerektiği söylenmiştir [29].

$$N_c = D_{10} (\text{zemin}) / D_{95} (\text{enjeksiyon}) \quad (2.3)$$

Burada,

D_{10} =% 10 geçen zemine karşılık dane çapı

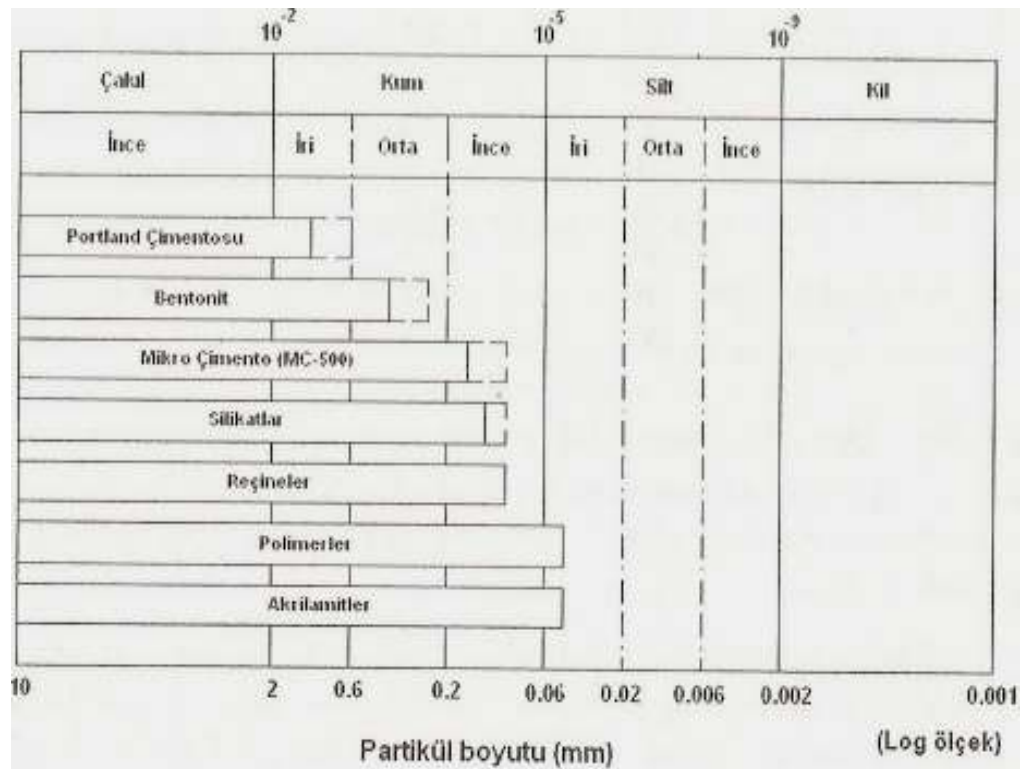
D_{95} =% 95 geçen enjeksiyon materyaline karşılık gelen tane çapıdır.

İkinci durumda $N_c > 11$ ise enjeksiyon mümkün, $N_c < 5$ ise enjeksiyon mümkün değildir. Ayrıca, taneli karışımlar için bu limitlerin S/Ç oranı ve ince tanesi yüzdesine göre de kontrol edilmesi gerekmektedir [13]. N değerini tayin etmek için geçirimsizlikten de faydalanabilir. Littlejohn (1983), geçirgenliği $k < 5 \times 10^{-3}$ cm/sn den küçük olan zeminlerin iyileştirilmesinde, çimento karışımlarının kullanılamayacağını belirtmiştir [30].

Mori ve arkadaşları (1982) tarafından yapılan çalışmada, farklı renklerde karışımlar kullanılarak, farklı tane çapı dağılımına sahip zeminlere farklı enjeksiyon basınçlarında enjeksiyon yapılmış ve enjeksiyonlu numunelerin şekillerinden

hareketle zeminlerin enjeksiyon edilebilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda, enjeksiyon basıncı, zeminlerin permeabilitesi, karışımın priz süresi ve çevre basıncının zemin enjeksiyonuna etki ettiği gösterilmiştir [31]. İnce taneli çimento karışımlarının enjeksiyonunu değerlendirmek için Mnif (1997) farklı su/çimento oranlarında karışımları kuru kuma enjeksiyon yapmış ve kumdaki filtrasyon nedeni ile su miktarının önemli olduğunu ortaya koymuştur [32]. Benzer şekilde ince taneli çimento karışımları kullanılarak kuru ve yaş kuma yapılan enjeksiyonlar sonucunda, kısmen suya doymun kumların kuru kumlara göre daha iyi enjeksiyon olduğu belirlenmiştir [33]. Akışkanlaştırıcı kullanılarak yapılan çimento enjeksiyonlarında, bu katkıların çimento karışımının akış özelliklerini iyileştirdiği ve enjeksiyon üzerinde olumlu sonuçlar verdiği daha önce yapılan tez çalışmalarında görülmüştür [3].

Enjekte olabilirlik, zemin iyileştirme yöntemleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilirse, Şekil 2.8’ de ince taneli çimentonun penetre olabilirliğinin ince kumlara kadar olduğu görülmektedir.



Şekil 2.8 Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon yetisi [6].

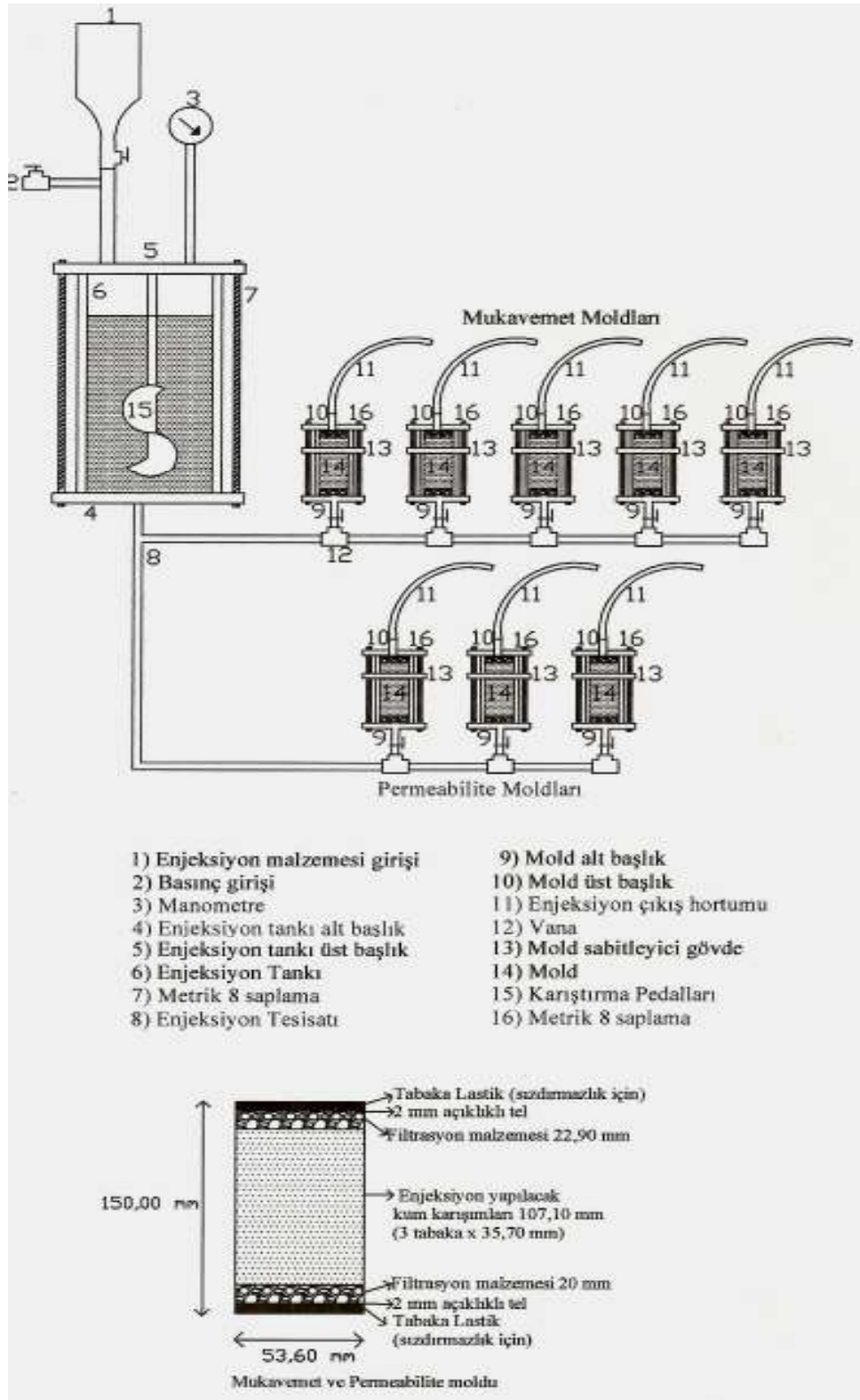
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu deneysel çalışmanın amacı, farklı S/Ç oranlarında hazırlanan katkısız Ultrafin 12 süspansiyonlarının farklı rölatif sıklıklarda hazırlanan değişik gradasyonlu ince ve orta kum karışımlarına enjekte edilebilirliğinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda, ilk olarak deneyde kullanılacak mevcut aparatlar modifiye edilmiş ve gerekli olan malzemeler temin edilmiştir. Deney düzeneği hazırlandıktan sonra, deneyde kullanılacak kumlar elenerek istenilen şartlara getirilmiş, fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Değişik S/Ç oranlarında hazırlanan Ultrafin 12 süspansiyonun reolojik özellikleri (stabilite, viskozite ve katılaşma süresi) araştırılmıştır. Hazırlanan kum numunelere enjeksiyon deneyleri yapılmış, başarılı olan enjeksiyonlar kür ortamında bekletilerek mukavemet ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur.

3.2. Enjeksiyon deney düzeneği

Deney düzeneği, G.Ü.M.M.F İnşaat Müh. Bölümü Geoteknik Anabilim Dalında, Prof Dr Murat MOLLAMAHMUTOĞLU tarafından yönetilen mevcut tez ve doktora çalışmalarında kullanılan deney düzeneğinin yeniden düzenlenmesiyle, enjeksiyona başlanmıştır. Deney düzeneğine enjeksiyonun daha kolay ve seri yapılabilmesi için birçok ilave parçalar eklenmiştir. Deney düzeneği 5 adet Mukavemet moldu, 3 adet Permeabilite moldu, 1 adet mikserli enjeksiyon tankı, 1 adet 0,70 Mpa kapasiteli kompresör ve enjeksiyon ara bağlantı elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 3.1). Resim 3.1’ de enjeksiyon deney düzeneği ve ilgili laboratuvar görülmektedir.



Şekil 3.1 Enjeksiyon deney düzeneği.



Resim 3.1 Enjeksiyon deney düzeneği.

Enjeksiyon yapılacak numuneler için 12 adet 53,60 mm çapında, 150 mm yüksekliğinde plastik moldlar imal edilmiştir (Ek1). Yapılan moldlar hem mukavemet, hem de permeabilite moldu olarak kullanılabilir. Plastik moldlar numunelerin düzgün bir şekilde dağılmadan moldan alınmasını kolaylaştırmış ve pratik olarak seri enjeksiyona olanak sağlamıştır. Moldlara yerleştirilen kum karışımların rölatif sıkılıklarının ayarlanmasında 832,10 gr ağırlığında 53,50 mm çapında çelik tokmak kullanılmıştır (Ek1). Numunelere istenen rölatif sıkılığın rahatça verilebilmesi amacıyla 5 adet moldu sabitleyici, gövde için ilave çelik plakalar yaptırılmıştır (Ek1). Bu plakalar sayesinde malzemeye istenen sıkılık verilebilmiş ve hazırlanan numuneler rahatlıkla taşınmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra, moldların alt ve üst kısımlarında enjeksiyon sızdırmazlığını sağlayacak rijit başlıklar kullanılmıştır. Rijit başlıklar her iki tarafından da enjeksiyon yapmaya uygun olarak geliştirilmiştir. Başlıkların moldlarla olan sızdırmazlığı ise lastik contalar yardımıyla sağlanmıştır (Ek1). Moldlara enjeksiyon süspansiyonu girişi bükülebilir çelik hortumlar ve rijit başlıktan vana yardımıyla sağlanmaktadır (Ek1). Enjeksiyon yapılması esnasında moldlardan su ve şerbetin çıkışını gözlemleyebilmek için plastik şeffaf hortumlar kullanılmıştır (Ek1).

Hazırlanan enjeksiyon malzemesinin moldlara iletimini sağlamak amacıyla, 200 mm çapında ve 400 mm boyunda karıştırıcı enjeksiyon tankı kullanılmıştır (Ek1). Karıştırıcı tankta 40 devir/dakika hızla dönen redüktörlü motor ve iç kısımda motora bağlı pedallar bulunmaktadır, bu sayede enjeksiyon malzemesinin enjeksiyon süresince sedimantasyona uğraması engellenmektedir. Tankta alt ve üst başlık olmak üzere toplam 2 başlık bulunmaktadır. Üst başlıkta enjeksiyon malzemesinin tank'a geçişi ve basıncın ölçümü için 2 adet giriş bulunmaktadır. Alt başlıkta ise enjeksiyon malzemesini moldlara iletimi için 1 adet çıkış bulunmaktadır. Karıştırıcı tankta üst başlığa bağlı 1 adet 1,2 Mpa ölçüm kapasiteli manometre bulunmaktadır .

Enjeksiyon malzemesinin enjeksiyon tankı ve moldlar arasındaki ana bağlantısını sağlamak için 3/4" lik metal borular kullanılmıştır. Her bir moldun ana boruya bağlantısı 8 adet T ve vanalarla sağlanmaktadır. Vanalardan çıkan enjeksiyon bükülebilir çelik borular sayesinde moldlara geçiş yapmaktadır. Enjeksiyon tankına enjeksiyon malzemesinin kolay geçişini sağlayabilmek için 3/4" lik metal boru ve vana kullanılmıştır .

3.3. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kumun özellikleri

Enjeksiyon deneylerinde inşaat kumu kullanılmıştır. Elde edilen inşaat kumu USCS sınıflama sistemine göre uygun elekler kullanılarak elenmiştir. Kumlar, elekler yardımıyla tane çaplarına göre iki gruba ayrılmıştır. #10-#40 (2,0 mm-0,43 mm) elek aralığında kalan malzeme, orta kum; #40-#200 (0,43 mm-0,075 mm) elek aralığında kalan malzeme ise ince kum olarak gruplandırılmıştır (Resim 3.2). Malzemelerdeki silt ve kilin varlığını yok edebilmek için malzemeler eleme işlemi esnasında su ile iyice yıkanmıştır. Enjeksiyon deneylerinde sadece ince ve orta kum karışımlarından oluşan zemin numuneleri kullanılmıştır.



Resim 3.2 Yıkanmış, elenmiş ince ve orta kum numuneler.

3.3.1 Özgöl ağırlık

Deneylerde kullanılacak kumların özgül ağırlıkları ASTM C128-07a ve TS 1900-1’ de belirtilen prosedürlere göre yapılmıştır [34, 35].

İlk olarak piknometre tartılır (m_1) daha sonra piknometre içine kuru kum numunesi yaklaşık 100 gr civarında koyulup tartılır (m_2). Piknometredeki numunenin üzerini kapatacak kadar saf su konularak 1 gün beklenir. Daha sonra vakum pompası ile numune ve saf suyun havası alınır. Bu işlem sırasında soğuyan numune ve piknometrenin ortam sıcaklığına gelmesi beklendikten sonra piknometre içinin boş olan kısmı havası alınmış saf su ile kapağa kadar doldurularak piknometre boyun kısmındaki bulanık kısmın çökelerek berraklaşması beklenir. Berraklaşmadan sonra kapak kısmı da havası alınmış saf su ile tamamlanarak kapak kapatılır. Piknometre kurularak tartılır (m_3). Son olarak piknometre havası alınmış saf su ile doldurulup tartılır (m_4) ve aşağıdaki formül yardımıyla özgül ağırlıklar hesaplanır (Eş. 3.1).

$$G_s = \frac{m_2 - m_1}{[(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)]} \frac{\gamma_L}{\gamma_{su}} \quad (3.1)$$

Burada;

m_1 = piknometre zati ağırlık, g

m_2 = piknometre+kuru zemin ağırlığı, g

m_3 = piknometre+kuru zemin ağırlığı+su, g

m_4 = piknometre+su ağırlığı, g

γ_L = deneyde kullanılan sıvının yoğunluğu, g/cm³

γ_{su} = saf suyun yoğunluğu, g/cm³

Deneyler sonucunda ince kum için $G_s = 2,70$, orta kum için $G_s = 2,69$ bulunmuştur.

3.3.2. Minimum ve maksimum boşluk oranlarının belirlenmesi

Enjeksiyon deneyleri yapılacak olan ince ve orta kum numuneleri ile karışımları üzerinde maksimum ve minimum boşluk oranlarını belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneyler ASTM D 4253 (Standart Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table) ve ASTM D 4254 (Standart Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density)' de belirtilen standartlarına göre yapılmıştır [36, 37]. Maksimum ve minimum boşluk oranlarının hesaplanmasında 9,10 cm çapında, 10,58 cm yüksekliğinde, 4184 gr ağırlığında (M) ve 688,09 cm³ hacminde (V) mold kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan aparatlar Ek-1 de gösterilmiştir.

Maksimum boşluk oranının tayini

Zemin numunesi, malzemeyi sıkıştırmadan özel huni yardımıyla, huni ucunu yukarıya kaldırılmadan moldun üst yüzeyini 1 cm aşacak şekilde yerleştirilir. Üstteki fazla malzeme çelik cetvel yardımıyla düzgün bir şekilde tek seferde traşlanarak alınır ve mold ve zemin numunesi tartılır (M_1). Eşitlik 3.2-3.3-3.4 kullanılarak maksimum boşluk oranı (e_{max}) bulunur.

$$M_{S1} = M_1 - M \quad (3.2)$$

$$\rho_{\min} = \frac{M_{S1}}{V_m} \quad (3.3)$$

$$e_{\max} = \frac{\rho_w \times G_s}{\rho_{\min}} - 1 \quad (3.4)$$

Burada,

$\rho_{\min}$ = Minimum yoğunluk, g/cm³

$e_{\max}$ = Maksimum boşluk oranı

M = Moldun kütlesi, g

M_1 = Mold ve gevşek kuru zemin kütlesi, g

M_{S1} = Mold içindeki gevşek kuru zemin kütlesi, g

ρ_w = Suyun özgül ağırlığı, 1gr/cm³

G_s = Zemin özgül ağırlığı

V_m = Deneye tabi tutulan zeminin hacmi (= mold hacmi)

Minimum boşluk oranının tayini

Sıkıştırılacak kum numunesi, yakası takılmış moldun içine sıkışma sonrasında mold üst kenarından 1 cm taşacak kadar koyulur. Mold sarsma tablasına yerleştirilir. Mold üzerine maksimum sıkışmayı sağlamak için sürşarj ağırlığı (9412 gr) konularak, düzenek sarsma tablasında titreştirilir (Resim 3.3). 4 dakika sonunda sarsma tablası durdurulur. Sürşarj yükü ve koruyucu yaka alınarak üstteki fazla malzeme çelik cetvel yardımıyla düzgün bir şekilde traşlanarak mold ve zemin numunesi tartılıp (M_{S2}) ve hesaplamalara geçilmiştir. Aşağıda gösterilen formüllere göre minimum boşluk oranı ($e_{\min}$) bulunmuştur (Eş. 3.5-3.6-3.7).

$$M_{S2} = M_2 - M \quad (3.5)$$

$$\rho_{\max} = \frac{M_{S2}}{V_m} \quad (3.6)$$

$$e_{\min} = \frac{\rho_w \times G_s}{\rho_{\max}} - 1 \quad (3.7)$$

Burada,

$\rho_{\max}$ = Maksimum yoğunluk, g/cm³

$e_{\min}$ = Minimum boşluk oranı

M = Moldun kütlesi, g

M₂ = Mold ve sıkıştırıldıktan sonraki kuru zemin kütlesi, g

M_{S2} = Deneye tabi tutulan, sıkıştırıldıktan sonraki kuru zemin kütlesi, g

ρ_w = Suyun özgül ağırlığı, 1gr/cm³

G_s = Zemin özgül ağırlığı

V_m = Deneye tabi tutulan zeminin hacmi (= mold hacmi)

Deneyler sonucunda bulunan maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 İnce ve orta kumlar için maksimum ve minimum boşluk oranlarının hesaplanması.

Kalıp	Çap	9,1	cm
	Yükseklik	10,58	cm
	Ağırlık	4184	gr
	Hacim	688,09	cm ³
Titreşimli sıkıştırma için kullanılan üst yük		9412	gr

İnce kum için G _s =2,70							
Gevşek ağırlık	866,54	gr	$\rho_{\min}$	1,26	gr/cm ³	$e_{\min}$	1,14
Sıkı ağırlık	1085,85	gr	$\rho_{\max}$	1,58	gr/cm ³	$e_{\max}$	0,71
Orta kum için G _s =2,69							
Gevşek ağırlık	891,36	gr	$\rho_{\min}$	1,30	gr/cm ³	$e_{\min}$	1,08
Sıkı ağırlık	1061,31	gr	$\rho_{\max}$	1,54	gr/cm ³	$e_{\max}$	0,75

Çizelge 3.2 Farklı granülometride hazırlanan kum numunelerin max. ve min. boşluk oranları.

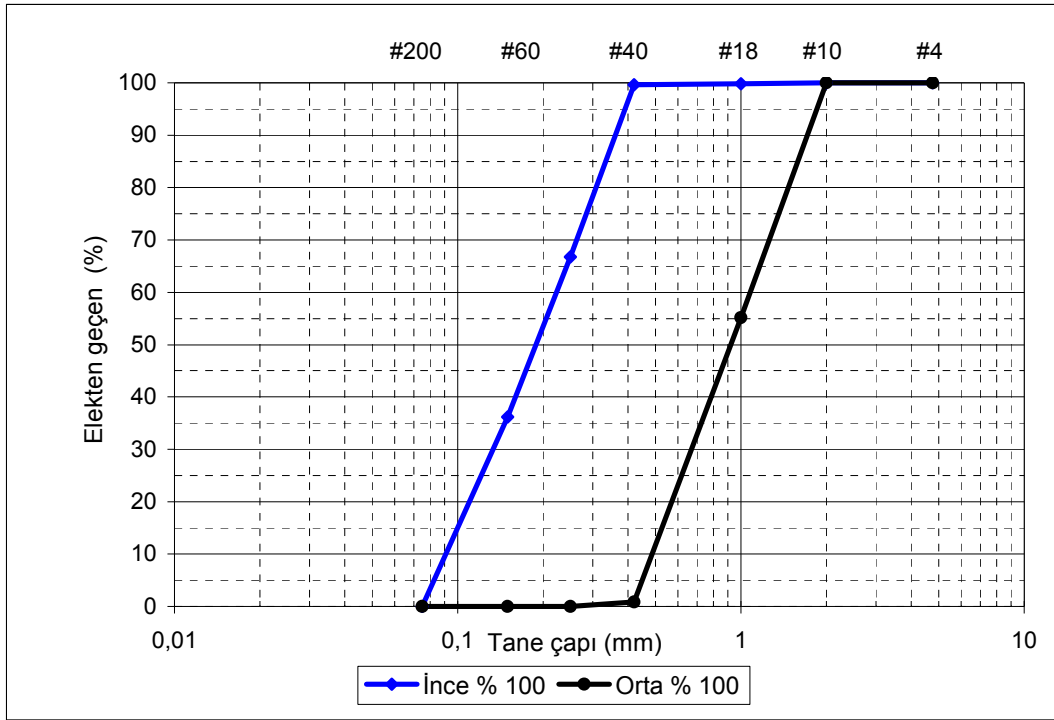
Numune no	Kum Oranı %		Karışım e_{max}	Karışım e_{min}
	İnce	Orta		
1	100	0	1,14	0,71
2	90	10	1,14	0,71
3	80	20	1,13	0,72
4	75	25	1,13	0,72
5	70	30	1,13	0,72
6	60	40	1,12	0,73
7	55	45	1,12	0,73
8	50	50	1,11	0,73
9	45	55	1,11	0,73
10	40	60	1,11	0,73
11	35	65	1,11	0,73
12	30	70	1,10	0,74
13	20	80	1,10	0,74
14	10	90	1,09	0,74
15	0	100	1,08	0,75



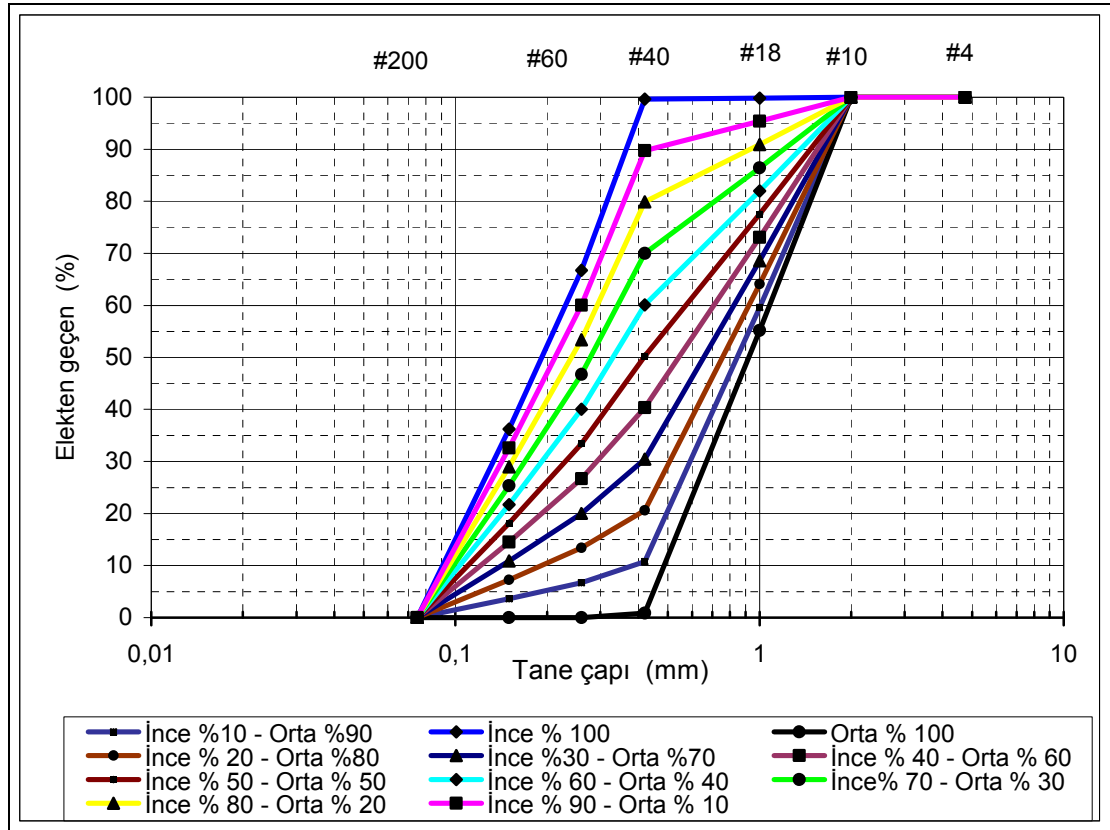
Resim 3.3 Sürşarj yüklü numunenin sarsma tablasında sıkıştırılması.

3.3.3. Tane dağılımı

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak kumların tane dağılım eğrileri TS 1900 de belirtilen standartlara göre bulunmuştur [34]. Şekil 3.2’ de ince ve orta kum’a ait tane boyutu dağılım eğrileri gösterilmiştir. Şekil 3.3’ de ise enjeksiyon deneyinde kullanılacak ince ve orta kum karışımlarına ait tane boyutu dağılım eğrileri verilmiştir. Enjeksiyon deneyleri, ince kum yüzdesi (İKY) % 0, % 10, % 20, % 30, % 40, % 50, % 60, % 70, % 80, % 90, % 100 olan numunelere yapılmıştır.



Şekil 3.2 %100 ince ve %100 orta kum numuneleri tane boyutu dağılım eğrileri.



Şekil 3.3 Enjeksiyon deneylerinde kullanılan ince ve orta kum numune karışımlarının tane boyutu dağılım eğrileri.

3.3.4. Kum numunelerinin permeabiliteleri

Enjeksiyon deneyi yapılacak olan ince ve orta kum numune karışımlarına sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılarak, numunelerin hidrolik iletkenlikleri bulunmuştur.

Zeminlerde hidrolik iletkenliği etkileyen birkaç sebep vardır; akışkanın viskozitesi, boşluk boyu dağılımı, dane boyu dağılımı, boşluk oranı, mineral danelerinin pürüzlülükleri ve doygunluk derecesidir. Geçirimsizlik katsayısı farklı zemin sınıfları için geniş bir aralıkta değişmektedir. Tipik permeabilite katsayıları Çizelge 3.3' de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Farklı zemin sınıfları için permeabilite katsayıları sınır değerleri.

Zemin tipi	k
	cm/s
Temiz çakıl	1-100
Kaba kum	1-0,01
İnce kum	0,01-0,001
Siltli kil	0,001-0,0001
Kil	< 0,000001

Sabit seviyeli permeabilite deneyinin tipik düzeneği Resim 3.4-3.5-3.6-3.7' de verilmiştir. Bu laboratuvar düzeneğinde, girişteki su haznesi, hidrolik yük, deneyin başında ve sonunda aynı kalacak şekilde düzenlenmiştir. Sabit bir debi elde edildiğinde, bilinen bir sürede zeminden geçen su dereceli bir silindirde toplanmıştır. Aşağıda verilen formüllere göre permeabilite katsayısı hesaplanmıştır (Eş. 3.8-3.9).

Burada;

$$i = \frac{h}{L} \text{ (hidrolik eğim)} \quad (3.8)$$

$$k = \frac{Q.L}{A.h.t} \quad (3.9)$$

Q = Toplanan su hacmi, cm³

A = Zemin numunesi enkesit alanı, cm²

t = Su toplama zamanı, s

i = Hidrolik eğim, mm/mm

h = Su yüksekliği, mm

L = Karakteristik numune yüksekliği, mm

Çizelge 3.4' de enjeksiyon deneyinde kullanılan % 30 rölatif sıkılığa ait kum karışım oranlarına ait permeabilite katsayıları verilmiştir. Çizelge 3.4' e bakıldığında ise k katsayısı değerinin orta kum yüzdesi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Orta kum yüzdesi arttıkça k değeri büyümekte ve malzeme daha geçirimli hale gelmektedir.

Çizelge 3.4 % 30 rölatif sıkılıkta hazırlanan ince-orta kum karışımlarının hidrolik iletkenlikleri.

Kum %		D _r %	k (cm/s)
İnce	Orta		
100	0	30	$4,99 \times 10^{-3}$
90	10	30	$1,92 \times 10^{-3}$
80	20	30	$3,36 \times 10^{-2}$
70	30	30	$4,79 \times 10^{-2}$
60	40	30	$6,22 \times 10^{-2}$
50	50	30	$7,65 \times 10^{-2}$
40	60	30	$9,08 \times 10^{-2}$
30	70	30	$1,05 \times 10^{-1}$
20	80	30	$1,19 \times 10^{-1}$
10	90	30	$1,34 \times 10^{-1}$
0	100	30	$1,48 \times 10^{-1}$



Resim 3.4 Permeabilite molduna malzemenin yerleştirilmesi.



Resim 3.5 Permeabilite moldunun sabit seviyeli permeabilite düzeneğine yerleştirilmesi



Resim 3.6 Sabit seviyede akışın sağlanması.



Resim 3.7 Sabit hacimli silindir kap (mezür) yardımıyla birim zamandaki akışın ölçülmesi.

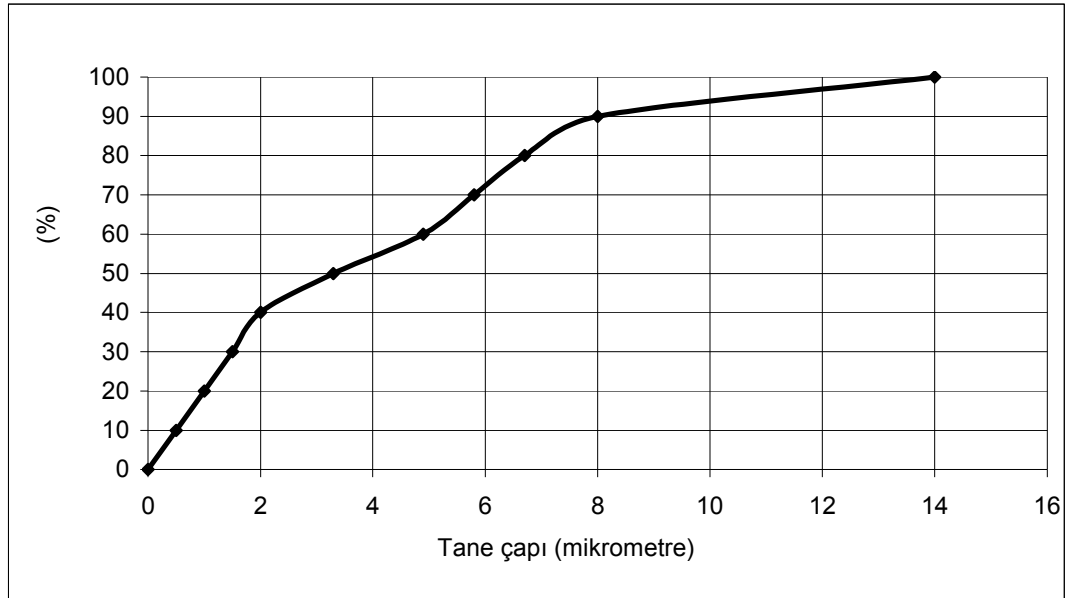
3.4. Deneyde kullanılan ince taneli çimentonun (Ultrafin 12) özellikleri

Deneyssel çalışmada ince taneli çimento olarak Cementa AB isimli Alman şirketi tarafından üretilen Ultrafin 12 enjeksiyon çimentosu kullanılmıştır. Genellikle bu malzeme kaya ve kum zeminlerde enjeksiyon işlemlerinde kullanılmaktadır [38].

Ultrafin 12 çimentosunun yüzey alanı $2200 \text{ m}^2/\text{kg}$ ' dır. Ultrafin 12 düşük C_3A ($< \% 3,5$ toplam ağırlığın) içeriğinden dolayı sülfata dayanıklıdır. Ultrafin 12 de düşük alkali içeriğinden ($< \% 0,6$ toplam ağırlığın) dolayı alkali-silika reaksiyonu görülmez [38].

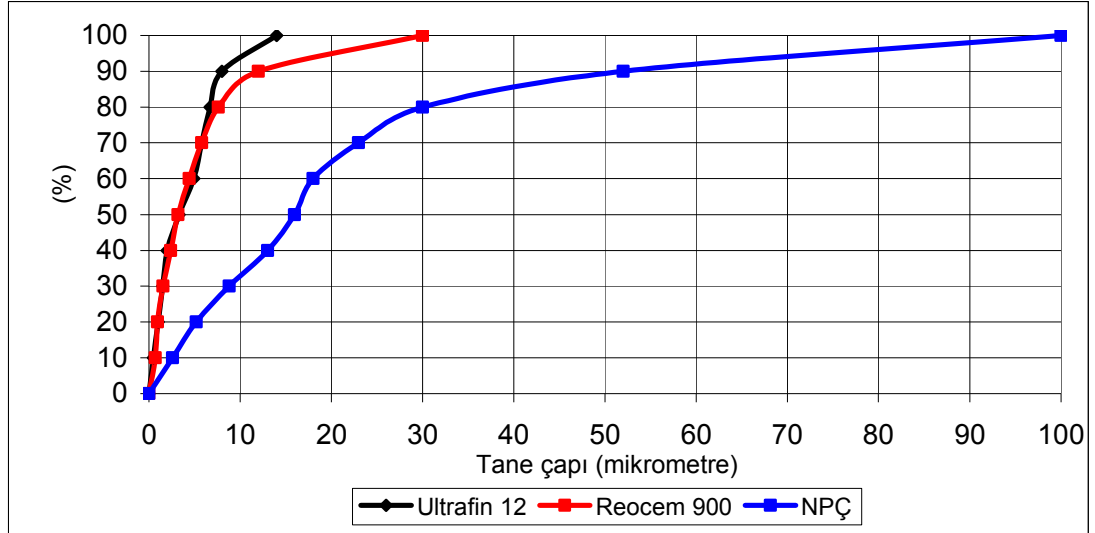
3.4.1. İnce çimento tane dağılımı

Deneylerde kullanılan Ultrafin 12 çimentosuna ait tane dağılım analizi, üretici firma Cementa AB tarafından hazırlanan ürün kataloğundan elde edilmiştir (Şekil 3.4) [38].



Şekil 3.4 Ultrafin 12 tane boyu dağılım eğrisi [38].

Şekil 3.5 de G.Ü.M.M.F İnşaat Müh. Bölümünde Prof Dr Murat MOLLAMAHMUTOĞLU danışmanlığında yürütülen tezlerde kullanılan Reocem 900 malzemesi ile Normal Portland çimentosu ve Ultrafin 12 malzemesinin tane çapı dağılımları kıyaslanmıştır [8, 38].



Şekil 3.5 Ultrafin 12, Reocem 900 ve NPÇ' nin tane boyu dağılımı.

3.5. Deneyde kullanılan süspansiyonların özellikleri

Enjeksiyonda kullanılan Ultrafin 12 ince taneli çimentosuna ait enjeksiyona uygun su/çimento (S/Ç) oranlarının belirlenmesi için, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 su/çimento (S/Ç) oranlı katkısız karışımlara sedimantasyon, viskozite ve marsh hunisi deneyleri yapılmıştır.

Bu karışımlardan enjeksiyon deneylerinde, kullanılmak üzere 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 su/çimento (S/Ç) oranlı karışımlarda karar kılınmıştır. Karışımların bu oranlarda seçilme nedeni; enjekte edilebilirlik, minimum sedimantasyon yüzdesi, düşük viskozite, yüksek mukavemet ve minimum geçirgenlik elde etmektir.

Enjeksiyon karıştırma işlemlerinde karıştırıcının devir sayısı ve karıştırma süresi oldukça önemlidir. Partiküllerin topaklaşmasının ve erken hidrasyonunun önüne geçmek için karıştırma işlemi özenle yürütülmelidir. Karıştırma süresi çok uzun

tutulursa süspansiyon ısısı çok yükselip erken hidratasyon görülebilir. Karıştırıcının hızı da topaklaşmanın önüne geçilmesi açısından önemlidir. Karıştırma süresinin ve karıştırıcının seçiminde ince taneli çimento üretici firmanın belirlediği özellikler göz önünde bulundurulmuştur. İnce taneli çimentonun üreticisi tarafından öngörülen karıştırma sistemi, minimum 1500 devir/dakika özelliğe sahip koloidal karıştırıcıdır. Karıştırma süresi katkı maddesi kullanımı olması halinde 2 dakikadır. Katkı maddesinin kullanılmaması sebebiyle karıştırma süresi 3 dakika olarak belirlenmiştir [38]. Karıştırma işlemleri için G.Ü.M.M.F. İnşaat Müh. Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarında bulunan mevcut 3000 devir/dakikalık mikser modifiye edilerek kullanılmıştır. Karıştırma milinin ucuna alt ve üst tarafa uçları olan 6' lı bacaklar eklenmiştir. Mikser kabı değiştirilerek 1,5 lt hacminde plastikten yapılmış bir karıştırma kabı monte edilmiştir (Resim 3.8).

Karıştırma kabına su doldurulup mikser çalıştırılmış ve çalışır durumdayken ince taneli çimento (Ultrafin 12) eklenmiştir. Çimento ekleme işlemi tamamlandıktan sonra yaklaşık 3 dakika boyunca malzemenin karışması beklenip süspansiyon enjeksiyon tankına boşaltılmıştır.



Resim 3.8 Enjeksiyon malzemesinin hazırlanmasında kullanılan mikser.

3.5.1. Stabilite

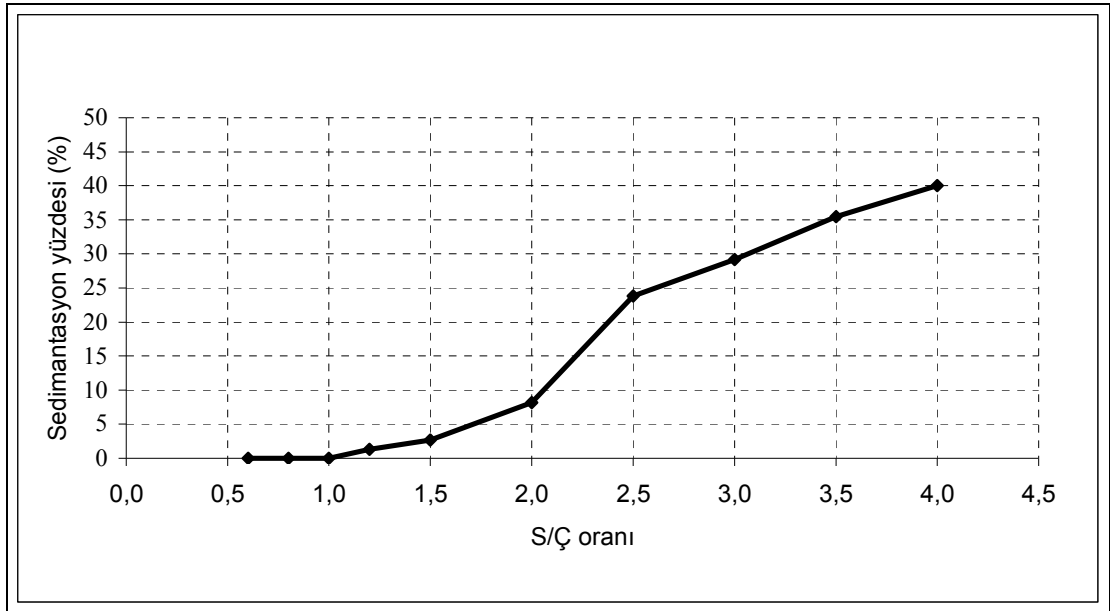
Deney prosedürü, hazırlanan süspansiyonda, su ile çimento danelerinin birbirinden ayrılması, partiküllerin sedimentasyonunu tamamlaması, tüm partiküller çökdikten sonraki yüzdeye dayanmaktadır. 2 saat sonunda berraklaşan su miktarı süspansiyonun başlangıç hacmine göre % 5' ten küçük ise süspansiyon stabildir. Ancak berraklaşan su hacmi süspansiyonun başlangıç hacmine göre % 5' ten büyükse süspansiyon stabil değildir. Stabilite deneyi ASTM C 940 standardına göre yürütülmüştür [22].

Su/çimento (S/Ç) oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan katkı maddesi kullanılmadan hazırlanan karışımlara sedimentasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylere ait sonuçlar Çizelge 3.5' te verilmiştir.

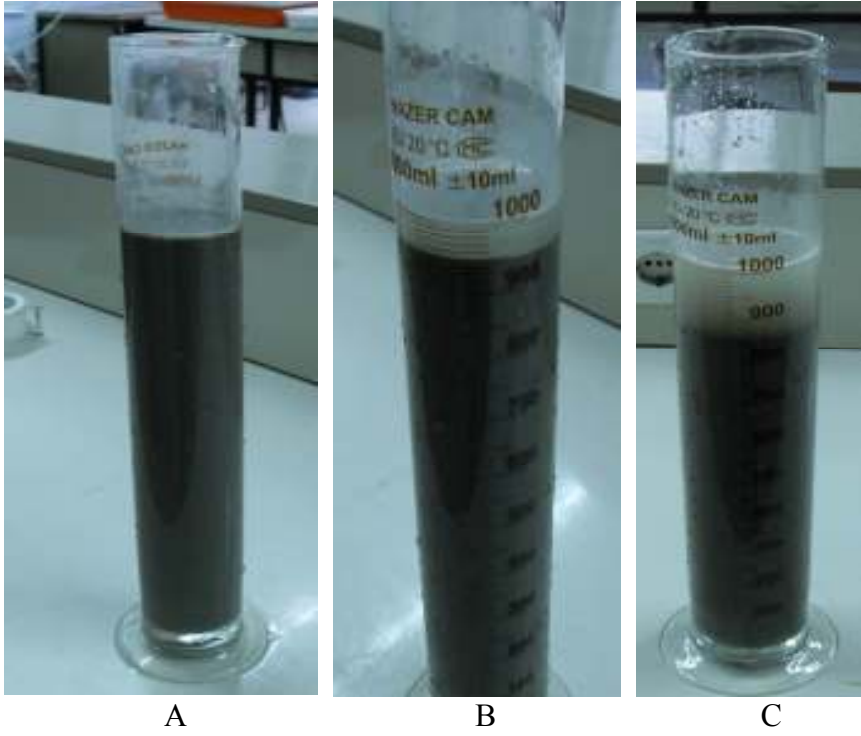
Çizelge 3.5 Farklı S/Ç oranlarındaki süspansiyonların sedimentasyon deney sonuçları.

Deney Bilgileri	Ultrafin 12									
Su/Çimento Oranı	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Süspansiyon Hacmi	1600	1500	1500	1500	1500	1350	1260	1200	1157	1125
Katkı Maddesi	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
SEDİMENTASYON ÖLÇÜMLERİ (ml)										
Ölçüm Zamanları	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
15. dk.	0	0	0	0	0	10	15	30	40	45
30. dk.	0	0	0	0	0	25	70	75	80	85
45. dk.	0	0	0	0	0	45	110	120	125	130
60. dk.	0	0	0	0	10	55	150	175	175	400
70. dk.	0	0	0	10	20	85	270	340	400	450
80. dk.	0	0	0	20	40	110	300	350	410	450
90. dk.	0	0	0	20	40	110	300	350	410	450
2 saat sonundaki berrak su hacmi ml (a)	0	0	0	20	40	110	300	350	410	450
Başlangıç Süspansiyon hacmi ml (b)	1600	1500	1500	1500	1500	1350	1260	1200	1157	1125
Sedimentasyon yüzdesi % ((a/b)x100)	0,00	0,00	0,00	1,33	2,67	8,15	23,81	29,17	35,44	40,00
Açıklama	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil değil	Stabil değil	Stabil değil	Stabil değil	Stabil değil

Şekil 3.6. incelendiğinde, süspansiyonların sedimantasyon yüzdeleri S/Ç oranlarına bağlı olarak değişmektedir. 2 saatin sonunda S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0 olan süspansiyonlarda sedimantasyon hemen hemen hiç görülmezken, S/Ç oranları 1.0'ın üzerinde olan karışımlarda, sedimantasyon kademeli olarak artmaktadır. S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 olan karışımların sedimantasyon yüzdeleri % 5 in altında olmasından dolayı bu karışımlar stabildir. S/Ç oranı 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5 olan karışımların ise Sedimantasyon yüzdeleri % 5' in üzerindedir ve bu karışımlar stabil değildir (Resim 3.9).



Şekil 3.6 Farklı S/Ç oranlarında hazırlanan süspansiyonların 2 saat sonundaki Sedimantasyon yüzdeleri.



Resim 3.9 (A) Sedimentasyona uğramamış stabil süspansiyon, (B) Sedimentasyona uğramış stabil süspansiyon, (C) Aşırı sedimante olmuş stabil olmayan süspansiyon

3.5.2. Katılaşma süresi

S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olarak katkı maddesi kullanılmadan hazırlanan süspansiyonların ilk ve son katılaşma sürelerini bulmak için vicat deneyinden yararlanılmıştır. Deneyler ASTM C191 standardına göre yapılmıştır [23].

Hazırlanan süspansiyonların vicat düzeneğine yerleştirilmesinden sonra, 327,5 gr ağırlığındaki Vicat iğnesi, süspansiyonun üst yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanmıştır. İlk 30 dakika boyunca süspansiyonda penetrasyon okuması alınmamıştır. Daha sonraki her 10 dakika boyunca penetrasyon değerlerini bulmak için Vicat deneyi sürdürülmüştür (Resim 3.10).

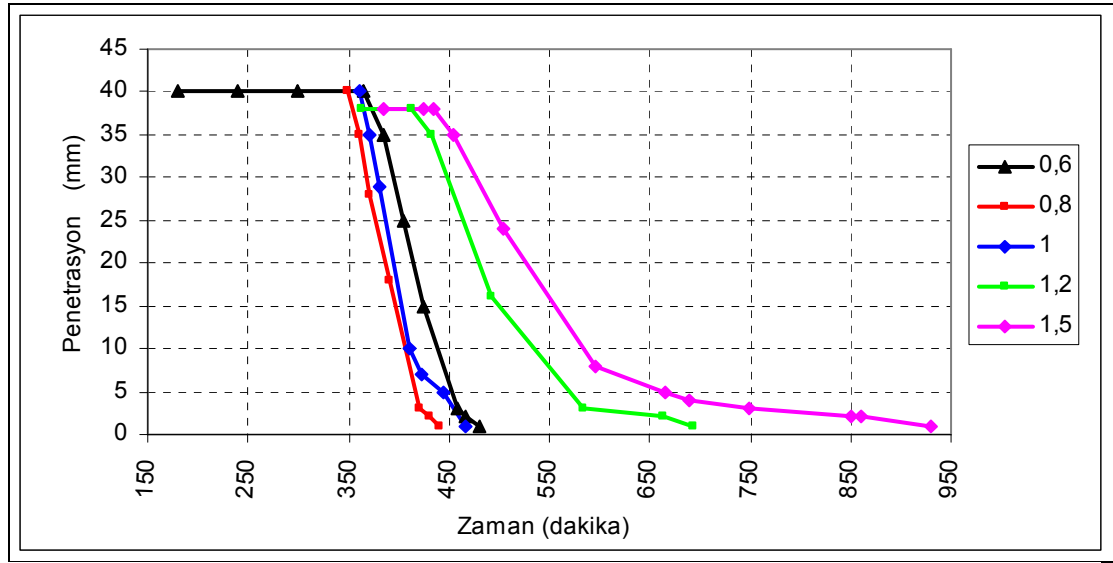


Resim 3.10 Vicat deneyinin yapılması.

Vicat deneyi yapılan süspansiyonların penetrasyon değerleri Çizelge 3.6-3.7' de verilmiştir. Çizelge 3.6' nın grafiksel gösterimi Şekil 3.7.' de, Çizelge 3.7' nin grafiksel gösterimi ise Ek 2' de verilmiştir. Çizelge 3.6-3.7 incelendiğinde S/Ç oranlarının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı görülmektedir. S/Ç oranı 3,0 ve 3,5' da yüksek su oranından dolayı süspansiyonda kofluk oluşmuş, malzeme prizini almasına rağmen iğne süspansiyona penetre olmaya devam etmiştir. Süspansiyonda kofluk oluşmasından dolayı deneye son verilmiştir. S/Ç oranı 4,0' de 1 aylık süre geçmesine rağmen iğne süspansiyona penetre olmaya devam ettiği için deneye son verilmiştir.

Çizelge 3.7 S/Ç oranları 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan süspansiyonların Vicat deney sonuçları (TZ: Toplam zaman, B: Batma).

S/Ç oranı		S/Ç oranı		S/Ç oranı		S/Ç oranı		S/Ç oranı	
2		2,5		3		3,5		4	
Katkı maddesi		Katkı maddesi		Katkı maddesi		Katkı maddesi		Katkı maddesi	
Yok		Yok		Yok		Yok		Yok	
TZ (dk)	B (mm)	TZ (dk)	B (mm)	TZ (dk)	B (mm)	TZ (dk)	B (mm)	TZ (dk)	B (mm)
420	38	1200	39	1680	39	1675	38	1800	38
490	38	1625	35	1985	37	1980	38	2100	38
585	38	1680	28	2080	36	2075	38	2300	38
660	37	1980	24	2845	32	2840	38	3000	38
690	33	2075	22	3170	31	3165	38	3400	38
750	30	2840	18	4520	29	4515	38	5300	38
840	26	3165	14	5770	28	5765	37	6200	37
860	22,5	4515	10	7420	26	7415	36	8500	36
930	20	5760	9	8510	24	8505	35	9700	35
1040	14	7415	8	10485	21	10480	34	11280	34
1355	9	8505	7	11845	19	11840	32	12580	32
1595	6	10490	6	13225	17	13220	30	14520	30
1910	3	11850	6	14805	16	14800	27	16500	27
2925	2	13230	5	16045	15	16040	26	17520	26
4058	1	14810	4	17305	14	17300	25	18500	25
		16050	3,5	18925	13	18920	24	20250	24
		17310	3	19885	13	19880	25	21780	25
		18930	2	20365	13	20360	24	22520	24
		19890	2	21635	13	21630	24	23750	24
		20370	2	22285	13	22280	24	24520	24
		21640	2	23395	13	23390	24	35820	24
		22290	1	25095	13	25090	24	39785	24
				27505	13	27500	24	40459	24
				29125	13	29120	24	44520	24
				36025	13	36020	24	49255	24
				deneye son verildi. Numunede kofluk var.		deneye son verildi. Numunede kofluk var.		1 Ay dolduğu için deneye son verildi	



Şekil 3.7 S/Ç oranları 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 olan süspansiyonların Vicat deneyi sonucu (Penetrasyon-Zaman ilişkisi).

Çizelge 3.8' de S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan süspansiyonların priz başlangıç ve bitiş zamanları verilmiştir. En kısa süreli priz başlangıç (385-360-370 dk.) ve priz bitiş (480-440-467 dk.) süreleri S/Ç oranı 0,6, 0,8 ve 1,0 da görülmekte iken, en uzun priz başlangıç (2080-8505-9700 dak) ve bitiş süresi (kofluk olduğu ve 1 ayı geçtiği için deneye son verildi) S/Ç oranı 3,0, 3,5 ve 4,0' de görülmektedir. Buradan daha çok miktarda ince taneli çimentoya sahip süspansiyonun, daha az miktarda çimentoya sahip süspansiyona göre daha kısa ilk ve son katılaşma sürelerine sahip olduğu söylenebilir. S/Ç oranı 1,5 den sonra priz başlangıç ve bitiş değerlerinde aşırı bir artış gözlenmiştir.

Çizelge 3.8 S/Ç oranları 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan süspansiyonların priz başlama ve bitiş süreleri.

S/Ç oranları	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Priz başlama zamanı (tabandan 3-5 mm yukarda kalma zamanı) dk. (a)	385	360	370	433	455	680	1625	2080	8505	9700
Priz bitiş zamanı (üstten 1 mm batma zamanı) dk. (b)	480	440	467	693	930	4058	22290	36025 de deneye son verildi, kofluk oluştu	36020 de deneye son verildi, kofluk oluştu	1 ayı geçtiği için deneye son verildi
Priz başlama ve bitiş zaman farkı dk. (c=b-a)	95	80	97	260	475	3378	14425	deneye son verildi	deneye son verildi	deneye son verildi

3.5.3. Viskozite

Enjeksiyon malzemesinin akış süresi ve akış özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla, S/Ç oranları 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan katkısız süspansiyonlara Marsh hunisi ve Kohezyon ölçer plaka deneyleri yapılmıştır.

Marsh hunisinden 1.000 ml' lik süspansiyonun akması için geçen süre göreceli viskoziteyi verir (Resim 3.11). Gerçek viskoziteyi bulmak için, Marsh hunisi deneyinin yanında kohezyon ölçer plaka deneyinden de yararlanılmıştır. Kohezyon ölçer plaka deneyinde, 15x15 cm lik hafif pürüzlü plaka, hazırlanan süspansiyona daldırılır ve çıkartılır, damlama durana kadar beklenir. Daha sonra plaka tartılarak plakanın her iki yüzüne yapışan süspansiyon miktarı belirlenir (Resim 3.12). Deney sonuçları Çizelge 3.9' da, grafiksel gösterimleri ise Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' da verilmiştir.



Resim 3.11 Marsh hunisinden süspansiyonun akması.

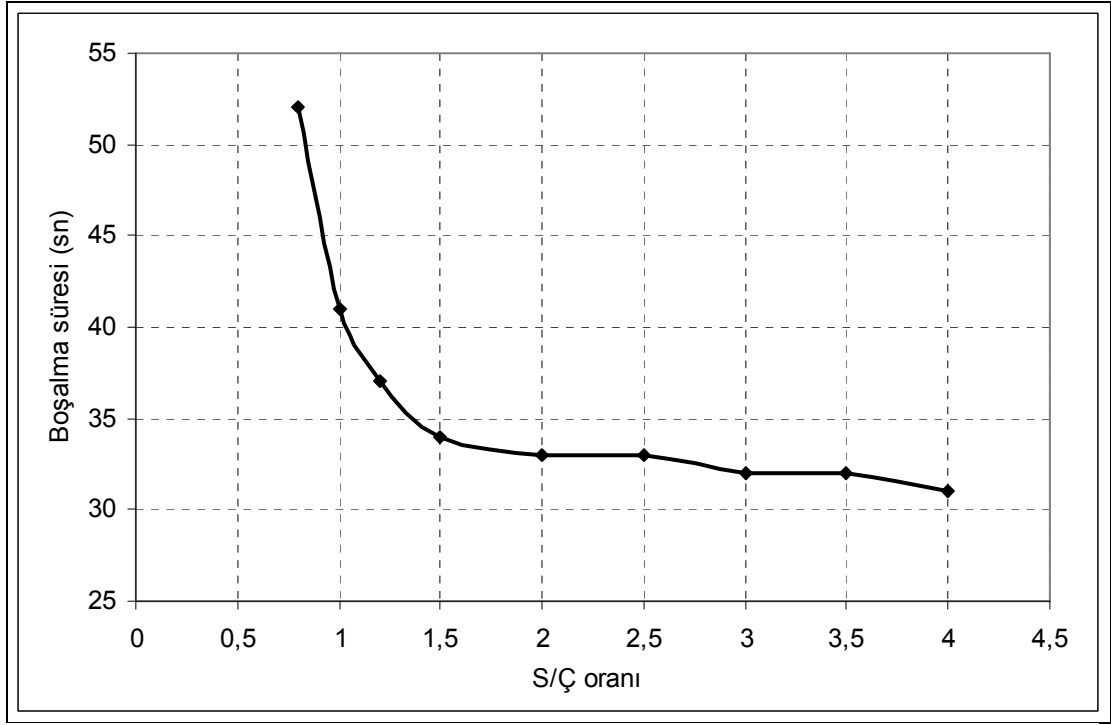


Resim 3.12. Kohezyon ölçer plaka deneyinin yapılışı.

Çizelge 3.9 S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan katkısız karışımlara ait Marsh hunisi ve Kohezyon ölçer plaka deney sonuçları.

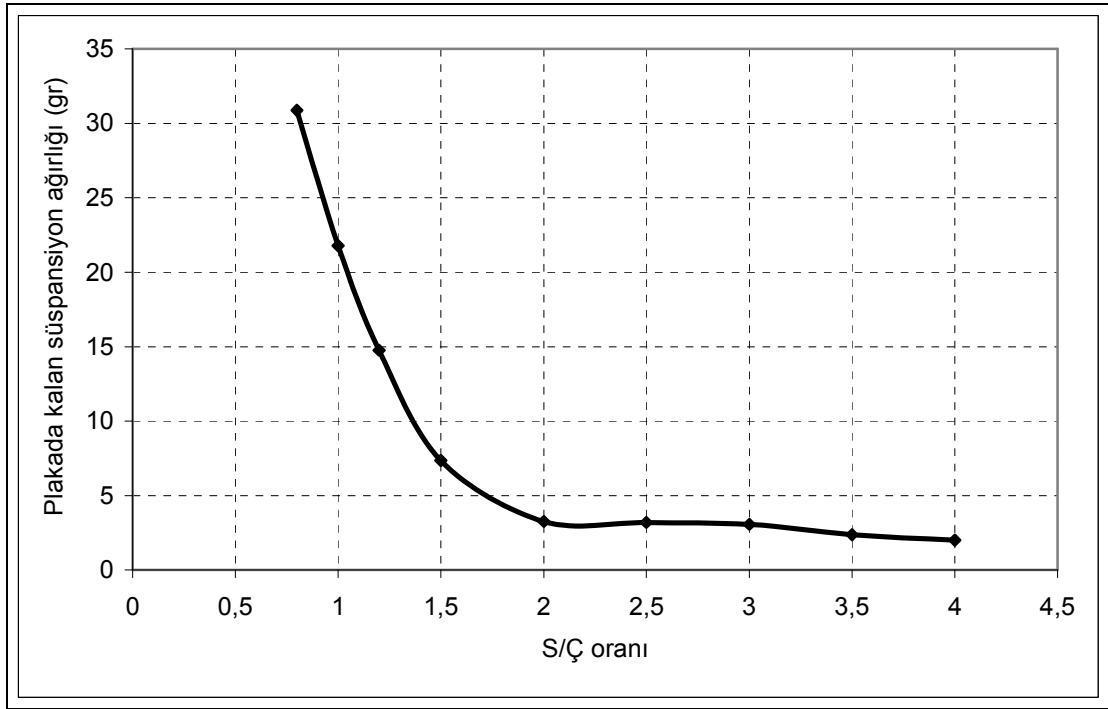
Numune Adı							
Ultrafin 12 (Katkısız)							
Marsh hunisi - Plaka - B.H.A. - Vicat deneyleri için kullanılacak malzeme listesi		Marsh Hunisi Deneyi		Plaka Deneyi			
Numune Adı S/Ç Oranı	Süspansiyon Miktarı	Marsh Hunisi Boşalma Süresi	Açıklama	Plaka Ağırlığı	Plaka + Süspansiyon ağırlığı	Plakada kalan Süspansiyon ağırlığı	Açıklama
	(ml)	(sn)		(gr)	(gr)	(gr)	
4	1000	31		130,86	132,86	2,00	
3,5	1000	32		130,86	133,21	2,35	
3	1000	32		130,86	133,92	3,06	
2,5	1000	33		130,86	134,06	3,20	
2	1000	33		130,86	134,12	3,26	
1,5	1000	34		130,86	138,21	7,35	
1,2	1000	37		130,86	145,62	14,76	
1	1000	41		130,86	152,64	21,78	
0,8	1000	52		130,86	161,73	30,87	
0,6	1000		50 sn sonra akış durdu huni içinde 4/5 litre süspansiyon kaldı	130,86		-130,86	deney yapılamadı

Şekil 3.8 incelendiğinde S/Ç oranının artması ile akış süresinin azaldığı görülmektedir. S/Ç oranı 4,0'da Marsh hunisinden 31 saniyede akış gerçekleşirken, S/Ç oranı 0,6 olan karışımda çimento yoğunluğundan dolayı süspansiyon akmaya karşı çok büyük direnç göstermiş, Marsh hunisinden süspansiyonun çok azı (1/5'i) akmıştır.



Şekil 3.8 Marsh hunisi deneyinde Akma süresi ile S/Ç oranının değişimi.

Şekil 3.9'a bakıldığında S/Ç oranının artışı ile plaka üzerinde kalan süspansiyon miktarının azaldığı görülmektedir. S/Ç oranı 0,6 olan karışımda malzemenin yoğunluğundan dolayı deney yapılamazken, S/Ç oranı 4,0 olan karışımda plaka üzerinde 2 g ağırlığında malzeme kalmıştır.



Şekil 3.9 Kohezyon ölçer plaka deneyinde plaka üzerindeki süspansiyon ağırlığının S/Ç oranı ile değişimi.

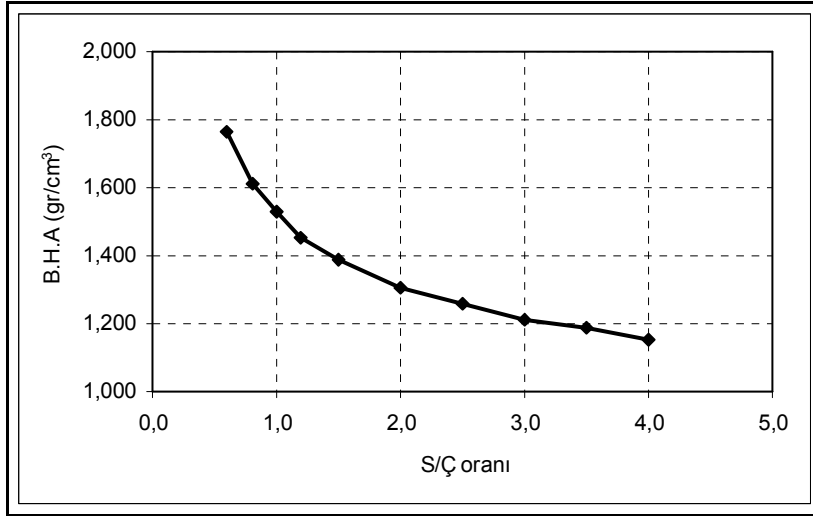
Marsh hunisi ve Kohezyon ölçer plaka deneyleri yapıldıktan sonra, süspansiyonların birim hacim ağırlıkları (γ) belirlenmiştir. Birim hacim ağırlıklar belirlenirken hacmi bilinen (Standart hacimsel büzülme kabı) kabın içine süspansiyon düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Traşlama camı kullanılarak süspansiyonun birim hacim kabı dışında kalan kısmı temizlenir ve birim hacim kabı tartılmıştır (Resim 3.13). Buradan kabın içindeki süspansiyonun ağırlığı bulunup ve hacme bölünerek karışımların birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Çizelge 3.10’ da süspansiyonlara ait birim hacim ağırlık değerleri, Şekil 3.10’ da ise grafik gösterimleri verilmiştir. Şekil 3.10 incelendiğinde S/Ç oranının artmasıyla birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmektedir. S/Ç oranı 0,6’ da süspansiyonun birim hacim ağırlığı $1,765 \text{ gr/cm}^3$ iken, S/Ç oranı 4,0’ da süspansiyonun birim hacim ağırlığı $1,150 \text{ gr/cm}^3$ ’ dür.



Resim 3.13 Süspansiyonların birim hacim ağırlıklarının (γ) belirlenmesi.

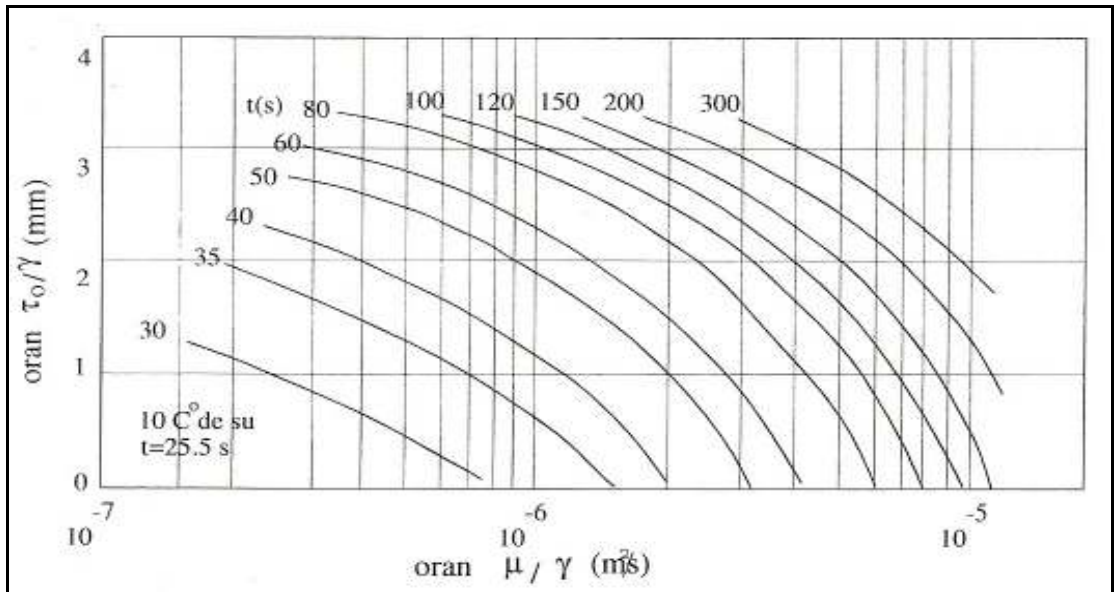
Çizelge 3.10. S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan katkısız süspansiyonlara ait birim hacim ağırlıklar

Numune Adı					
Ultrafin 12 (Katkısız)					
Numune Adı Su/Çim Oranı	B.H.A. Deneyi				
	B.H.A. Kabının Hacmi (a)	B.H.A. Kabının ağırlığı (b)	B.H.A. Kabı + solüsyon ağırlığı (c)	B.H.A. (c-b)/(a)	Açıklama
	(cm^3)	(gr)	(gr)	gr/cm^3	
4	92,57	68,53	175,01	1,150	
3,5	92,57	68,53	178,28	1,186	
3	92,57	68,53	180,55	1,210	
2,5	92,57	68,53	184,87	1,257	
2	92,57	68,53	189,34	1,305	
1,5	92,57	68,53	197,16	1,390	
1,2	92,57	68,53	203,15	1,454	
1	92,57	68,53	210,31	1,532	
0,8	92,57	68,53	217,55	1,610	
0,6	92,57	68,53	231,90	1,765	



Şekil 3.10 B.H.A ların S/Ç oranlarına göre değişimi.

Birim hacim ağırlıkların bulunmasıyla τ_0/γ değerleri elde edilir. Marsh hunisinden elde edilen değer ve τ_0/γ değeri Lombardinin önerdiği abağa girilerek kinematik viskozite (μ/γ) değeri abaktan okunur (Şekil 3.11.). Daha sonra kinematik viskozite (μ/γ) değeri ile birim hacim ağırlık (γ) çarpılarak dinamik viskoziteye (μ) geçilir. Süspansiyonlara ait bulunan dinamik viskozite (μ) değerleri Çizelge 3.11' de verilmiştir.



Şekil 3.11 Lombardinin önerdiği abak (τ_0/γ -akış zamanı-kinematik viskozite (μ/γ)) [25].

Çizelge 3.11 Viskozite deneylerine göre dinamik viskozitenin (μ) bulunması.

S/Ç oranı	Akış Zamanı (s)	ΔW (gr)	A (cm ²)	τ (gr/cm ²)	γ (gr/cm ³)	τ/γ (mm)	μ/γ (m ² /s)	μ (gr.s ⁻¹ cm ⁻¹)	μ *(cP)
0,6	Deney yapılamadı								
0,8	52	30,87	225	0,0686	1,609	0,426	2,90x10 ⁻⁶	0,0467	4,67
1,0	41	21,78	225	0,0484	1,531	0,316	1,95x10 ⁻⁶	0,0299	2,99
1,2	37	14,76	225	0,0328	1,454	0,226	1,65x10 ⁻⁶	0,0240	2,40
1,5	34	7,35	225	0,0163	1,389	0,118	1,45x10 ⁻⁶	0,0201	2,01
2,0	33	3,26	225	0,0072	1,305	0,056	1,15x10 ⁻⁶	0,0150	1,50
2,5	33	3,20	225	0,0071	1,256	0,057	1,10x10 ⁻⁶	0,0138	1,38
3,0	32	3,06	225	0,0068	1,210	0,056	9,60x10 ⁻⁷	0,0116	1,16
3,5	32	2,35	225	0,0052	1,185	0,044	9,50x10 ⁻⁷	0,0113	1,13
4,0	31	2,00	225	0,0044	1,150	0,039	9,00x10 ⁻⁷	0,0104	1,04

*cP: centipoise = 10⁻³ Pa.s = 0,01 gr.s⁻¹cm⁻¹

Çizelge 3.11 incelendiğinde karışımlardaki S/Ç oranı artması dinamik viskozite (μ) değerlerini düşürmüş ve karışımlar daha akışkan özellik göstermiştir. En büyük viskozite değeri S/Ç oranı 0,8 de (4,67 cP) gözlenmekte iken, en düşük viskozite değeri 4,0 da (1,04 cP) gözlenmiştir. S/Ç oranı 4,0 olan karışımın dinamik viskozitesinin (μ) suyun viskozitesine (1,00 cP 20°C de) çok yakın olduğu görülmektedir.

3.6. Deneylerin yapılışı

Enjeksiyon deneylerinin yapılışı aşağıdaki adımları içermektedir;

3.6.1. Enjeksiyonda kullanılacak olan kum numunelerin hazırlanması

Tüm kum karışımları için belirlenen $e_{\max}$ - $e_{\min}$ değerleri yardımı ile istenen rölatif sıkılıkta gerekli boşluk oranı (e_0) belirlenmiştir. Belirli olan mold hacmi ve boşluk oranı (e_0) için mold içine ne kadar kum numune (M) koyulacağı aşağıdaki eşitlikler

yardımı ile hesaplanmıştır (Eş. 3.10-3.11-3.12). Çizelge 3.12’de istenen rölatif sıkılık değerlerine göre hesaplanmış numune ağırlıkları gösterilmiştir.

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (3.10)$$

$$e_0 = \frac{Gs \times \rho_w}{\gamma} - 1 \quad (3.11)$$

$$M = \gamma \times V_m \quad (3.12)$$

e_0 = İstenilen sıkılıktaki kum karışımının boşluk oranı

$e_{\max}$ = Kum karışımının maksimum boşluk oranı

$e_{\min}$ = Kum karışımının minimum boşluk oranı

γ = İstenilen sıkılıktaki kum karışımının yoğunluğu, gr/cm³

ρ_w = Suyun özgül ağırlığı

Gs = Özgül ağırlık

M = Mold içine yerleştirilen kumun kütlesi, g

V_m = Mold hacmi, cm³

Çizelge 3.12 Kum karışımların istenen rölatif sıklık değerine göre numune ağırlıklarının hesaplanması.

Numune no	Kum Oranı %		Rölatif Sıklık	Mold		Hedef Numune Boyu (cm)	Filtre hariç hedef numune hacmi V (cm ³)	Num Boyunun 1/3 ü (cm)	Numune ağırlığı M (gr)	Tabaka ağırlığı M/3 (gr)
	İnce	Orta		Çapı cm	Boyuna cm					
1	0	100	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	329,05	109,68
2	30	70	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	327,56	109,19
3	35	65	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	327,31	109,10
4	40	60	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	327,07	109,02
5	45	55	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	326,82	108,94
6	50	50	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	326,57	108,86
7	55	45	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	326,33	108,78
8	60	40	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	326,08	108,69
9	70	30	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	325,60	108,53
10	75	25	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	325,35	108,45
11	80	20	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	325,11	108,37
12	100	0	0,3	5,36	15	10,72	241,88	3,57	324,14	108,05

3.6.2. Numunelerin moldlara yerleştirilmesi

Mold başlıklarına sızdırmazlığı sağlamak amacıyla lastik contalar yerleştirilmiştir. Enjeksiyon işleminden sonra numunenin mold'dan kolay çıkmasını sağlamak amacıyla mold, gövde sabitleyici plaka ve başlıklar vazelinlenmiştir. Numunenin mold'a yerleştirilebilmesi için, mold alt başlığa; gövde sabitleyici plaka, metrik 8 uzatmalar ve saplama somunlar sayesinde sabitlenmiştir. Moldun alt başlığa sabitlenmesinden sonra en alta 2 mm açıklıklı tel yerleştirilerek filtrasyon malzemesinin başlık deliğinden çıkışı engellenmiştir. Telin üzerine tabaka kalınlığı 20 mm olan iri kumdan oluşan filtrasyon malzemesi yerleştirilerek enjeksiyon esnasında numunenin mold dan çıkışı engellenmiştir. Filtrenin üzerine hesaplanan miktardaki numune (Çizelge 3.12), homojenliğin sağlanabilmesi için 3,57 cm'lik 3

tabaka halinde huni ile yerleştirilip (Resim 3.14), çelik tokmak yardımıyla kontrollü bir şekilde sıkıştırılmıştır. Sıkışma esnasında tabakaların istenilen (rölatif sıkılığa) gelip gelmediği tabaka yüksekliği üzerinden kontrol edilmiştir. Sıkışma tamamlandıktan sonra numune üzerine tekrar tabaka kalınlığı 22,90 mm olan iri kumdan oluşan filtrasyon malzemesi ve 2 mm açıklıklı tel yerleştirilerek, mold üst başlığı metrik 8 uzatma ve saplama somunlarla molda sabitlenmiştir (Resim 3.15).



Resim 3.14 Numunelerin mold' a yerleştirilmesi.



Resim 3.15 Mold' a üst başlığın sabitlenmesi

3.6.3. Moldların enjeksiyon düzeneğine yerleştirilerek enjeksiyona hazır hale getirilmesi

Moldlar enjeksiyon düzeneğine bükülebilir çelik hortumlar sayesinde monte edilmiştir (Resim 3.16). Düzeneğe 5 adet mukavemet moldu, 3 adet permeabilite moldu yerleştirilmiştir. Düzeneğe monte edilen moldlara enjeksiyon deneyinden önce su verilerek numuneler doyurulmuş, aynı zamanda enjeksiyon tesisatının yapısı gereği boru ve fittings malzemelerinin yüzey ıslağı sağlanmıştır.



Resim 3.16 Moldların düzeneğe yerleştirilmesi

3.6.4. Enjeksiyonların yapılması

Mikserde istenen S/Ç oranlı süspansiyonlar hazırlanmış, vakit geçirmeden enjeksiyon tankına dökülerek tank kanatları çalıştırılmıştır. Daha sonra kompresör çalıştırılarak sisteme istenen basıncın ulaşması sağlanmıştır. Kompresörün 0,7 MPa basınç verebilme kapasitesinde olmasından dolayı enjeksiyon basıncı 0,5 MPa olarak belirlenmiştir. Gereken basınç sağlandıktan sonra ana vana açılmış ve moldlara bağlı bükülebilir çelik hortum girişlerine süspansiyonun ulaşması sağlanmıştır. Sırayla moldların bağlı olduğu bükülebilir çelik hortumların vanaları açılarak moldlara bağlı şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir (Resim 3.17). Hortumlardan süspansiyon çıkışı görülmesi halinde enjeksiyon başarılı, sadece su çıkışı görülmesi durumunda enjeksiyonun başarısız olduğu ön kanaatine

varılmıştır. Enjeksiyonun başarı durumu, 1 gün beklendikten sonra numuneler molddan çıkarıldığında kesinleşmiştir. Enjeksiyon işleminden 30 dakika sonra vanalara bağlı bükülebilir çelik hortumlar sökülerek manşonlu kör tapalar moldlara takılmıştır. Bu sayede tesisat içerisinde kalan süspansiyon malzemesi suyla, prizlenme oluşmadan temizlenmiştir.



Resim 3.17 Moldların bağlı olduğu şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışının gözlenmesi.

Enjeksiyonda başarılı olmuş mukavemet deneyi yapılacak olan numuneler düzende 1 gün bekletildikten sonra molldardan çıkarılmış (Resim 3.18), etiketlenerek kür ortamına yerleştirilmiştir.



Resim 3.18 Enjeksiyonda başarılı olmuş ve mold dan çıkarılmış numune.

Enjeksiyonda başarılı olmuş permeabilite deneyi yapılacak olan numuneler ise 1 gün düzeneğe bekletildikten sonra alt, gövde ve üst başlıkları sökölerek mold'dan çıkarılmadan etiketlenerek kür ortamına yerleştirilmiştir (Resim 3. 19).



Resim 3.19 Enjeksiyonda başarılı olmuş ve permeabilite deneyi için mold da bekletilen numune.

3.7. Enjeksiyon deneyleri

Enjeksiyon deneyleri iki kısımda yürütölmüştür. İlk olarak sabit S/Ç oranıyla hazırlanmış katkısız süspansiyon enjeksiyonlarının farklı rölatif sıklıkta ve gradasyonda kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri, ikinci olarak ise, farklı S/Ç oranıyla hazırlanmış katkısız süspansiyon enjeksiyonlarının farklı gradasyonda ve sabit rölatif sıklıktaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri üzerinde deneyler yapılmıştır.

Enjeksiyon deneylerinin tümü 0,5 MPa enjeksiyon basıncında yürütölmüştür.

3.7.1.Sabit S/Ç oranlı katkısız süspansiyonların farklı rölatif sıklıkta ve gradasyonda kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri

Bu kısımdaki deneysel çalışmada, sabit S/Ç oranında hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı rölatif sıklıktaki ve gradasyondaki kumlara penetrasyon yetileri incelenmiştir.

Sabit S/Ç oranlı deneylerin yapılmasında Ultrafin12'nin reolojik özellikleri göz önünde bulundurulmuş ve en uygun S/Ç oranı 1,0 olarak belirlenmiştir. Bu oranın

belirlenmesinde Ultrafin12'nin sedimentasyon yüzdesi, priz süresi ve viskozitesi etkin rol oynamıştır.

Deneylere ilk olarak rölatif sıklık % 30' la başlanmış başarı sınır değerleri belirlendikten sonra, rölatif sıklık değerleri % 10 artırılarak % 70' e kadar enjeksiyonlar denenmiş, % 70 rölatif sıklıkta deneylere son verilmiştir. Rölatif sıklık değerlerinin bu aralarda seçilmesinin nedeni doğal arazi zemin sıklıklarının temsil edilebilmesidir. Numuneler istenen rölatif sıklık değerleri verilirken, çevresel nedenlerden dolayı (moldları düzeneğe yerleştirme, mold başlıklarını yerleştirme, taşıma v.b.) rölatif sıklık değerlerinde ± 2 'ye varan sapmalar görülebilir.

Çizelge 3.13' de enjeksiyon deneylerinin başarı durumları verilmiştir.

Çizelge 3.13 S/Ç oranı 1.0 olan katkısız süspansiyonun farklı rölatif sıklıkta ve gradasyonda kum numunelerde enjeksiyon başarı durumu.

D _r = % 30			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	0	100	Başarılı
2	30	70	Başarılı
3	35	65	Başarılı
4	40	60	Başarılı
5	45	55	Başarılı
6	50	50	Başarılı
7	55	45	Başarılı
8	60	40	Başarılı
9	70	30	Başarılı
10	75	25	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
11	80	20	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
12	100	0	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
D _r = % 60			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	20	80	Başarılı
2	30	70	Başarılı
3	40	60	Başarılı
4	50	50	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)

D _r = % 40			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	30	70	Başarılı
2	40	60	Başarılı
3	50	50	Başarılı
4	60	40	Başarılı
5	70	30	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
D _r = % 50			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	30	70	Başarılı
2	40	60	Başarılı
3	50	50	Başarılı
4	60	40	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
D _r = % 70			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	10	90	Başarılı
2	20	80	Başarılı
3	30	70	Başarılı
4	40	60	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
5	50	50	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)

%30 rölatif sıklıkta ilk olarak, % 100 ince, % 100 orta kuma enjeksiyon denenmiştir. % 100 orta kumda tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir (Resim 3.20). % 100 ince kumda ise 2/3 penetrasyon sağlanırken , şeffaf hortumdan su çıkışı gözlenmiş ve filtrasyon görülmüştür (Resim 3.21).



Resim 3.20 % 30 rölatif sıklıktaki % 100 orta kum numunede tam penetrasyon.



Resim 3.21 % 30 rölatif sıklıktaki % 100 ince kum numunede filtrasyon (2/3 penetrasyon).

Tamamen ince ve orta kumdan yapılan enjeksiyon denemeleri enjeksiyon planının ortaya çıkmasını sağlamıştır. % 100 ince kuma yapılan enjeksiyon çalışmalarında 2/3 oranında penetrasyonun sağlanması enjeksiyon denemelerini İKY büyük olan değerlere yönlendirmiştir.

Daha sonra İKY % 70, % 75 ve % 80 ile enjeksiyon denemeleri yapılmış, İKY % 75 ve % 80 de başarı sağlanamazken, İKY % 70 de başarılı olunmuştur. Enjeksiyon denemelerine İKY % 30, % 40, % 45, % 50, % 55, % 60'la devam edilmiş bu değerlerde de başarı sağlanmıştır. Başarı sınır değerinin (İKY % 70) bulunmasıyla % 30 rölatif sıklıktaki enjeksiyon denemelerine son verilmiştir. Enjeksiyonda başarılı olan tüm numunelere tam penetrasyon sağlanırken, başarısız numunelerde 2/3 oranında penetrasyon görülmüştür.

% 40 rölatif sıklıkta yapılan denemelere ilk olarak İKY % 70'le başlanmıştır. Bu oranın denenmesinin nedeni % 30 rölatif sıklıkta başarı sınır değeri olan İKY değerine % 40 rölatif sıklıkta da penetrasyonun sağlanıp sağlanamayacağının görülmesidir. Bu sayede rölatif sıklığın artması penetre olabilirliği nasıl etkileyeceği hakkında bilgi verecek ve yapılacak olan denemelere ışık tutacaktır. İKY % 70'e yapılan denemelerde başarı sağlanamamış ve İKY değerleri düşürülerek denemelere devam edilmiştir. Daha sonra İKY % 60, % 50, % 40, % 30 değerlerine enjeksiyon yapılmış ve bu değerlerde başarı sağlanmıştır. % 40 rölatif sıklıkta başarı sınır değerinin (İKY % 60) bulunmasıyla denemelere son verilmiştir (Resim 3.22). Enjeksiyonda başarılı olan numunelerde tam penetrasyon, başarısız olan numunelerde ise 2/3 penetrasyon görülmüştür.



Resim 3.22 % 40 rölatif sıklıkta, İKY % 60 olan numunede tam penetrasyon.

% 50 rölatif sıklıkta enjeksiyona, % 40 rölatif sıklık başarı sınır değeri olan İKY % 60 la başlanmış, İKY % 60 da başarı sağlanamaması (Resim 3.23)  zerine İKY % 50, % 40 ve % 30'la denemelere devam edilmiş, bu değerlerde başarı sağlanması ve sınır başarı değerinin bulunmasıyla (İKY % 50) denemelere son verilmiştir. Enjeksiyonda başarılı olmuş numunelerde tam penetrasyon görülürken başarısız olan numunelerde 2/3 oranında penetrasyon g r lm ştir.



Resim 3.23 % 50 rölatif sıklık için İKY % 60 da filtrasyon olmuş ve 2/3 penetrasyon sağlanmış numune.

% 60 rölatif sıklıkta enjeksiyona, % 50 rölatif sıklık başarı sınır değeri olan İKY % 50 ile başlanmış bu değerde filtrasyon görülmesi  zerine, İKY değerleri düşürülerek İKY % 40, % 30, % 20 üzerinde denemeler yapılmış ve bu değerlerde başarı sağlanmıştır. Başarı sınır değerinin (İKY % 40) bulunmasıyla % 60 rölatif sıklıktaki denemelere son verilmiştir. Enjeksiyonda başarılı olmuş numunelerde tam penetrasyon görülürken, başarısız olan numunelerde 2/3 oranında penetrasyon g r lm ştir.

Son olarak, % 70 rölatif sıklık değerinde enjeksiyon denemeleri yapılmıştır. Denemelere % 50 ve % 60 rölatif sıklık başarı sınır değerleri olan İKY % 50 ve % 40 ile başlanmış bu değerlerde filtrasyon görülmesi  zerine İKY si düşürülerek İKY

% 30, % 20, % 10 değerleri üzerlerinde enjeksiyonlar denenmiş ve bu değerlerde başarı sağlanmıştır. % 70 rölatif sıklıkta başarı sınır değerinin (İKY % 30) bulunmasıyla denemelere son verilmiştir. Enjeksiyonda başarılı olmuş numunelerde tam penetrasyon görülürken, başarısız olan numunelerde 2/3 oranında penetrasyon görülmüştür.

Enjeksiyonda başarılı olan numunelere 1, 3, 7, 14 ,28 ve 56. günlerdeki serbest basınç deneylerinin yapılabilmesi ve enjeksiyon başarısının teyidi amacıyla, enjeksiyon deneyleri 6 kez daha tekrarlanmıştır.

3.7.2.Farklı S/Ç oranıyla hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı gradasyonda ve sabit rölatif sıklıktaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri

Bu kısımdaki deneysel çalışmada farklı S/Ç oranıyla hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı gradasyonda ve sabit rölatif sıklıktaki ince ve orta kum karışımları üzerindeki penetrasyon yetileri incelenmiştir.

Deneylerde kullanılacak sabit rölatif sıklık değeri % 30 olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon yapılacak S/Ç oranlarının belirlenmesinde enjekte edilebilirliğin yanında Ultrafin12'nin reolojik özellikleri (stabilite, katılaşma süresi ve viskozite) etkin rol oynamıştır. Deneylerde kullanılmak üzere en uygun S/Ç oranları 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 olarak seçilmiştir.

Deneylere S/Ç oranı 1,0 ile başlanmış sırasıyla 1,2, 1,5 ve 0,8 ile devam edilmiştir. Çizelge 3.14 de enjeksiyonların başarı durumları verilmiştir.

Çizelge 3.14 Farklı S/Ç oranlı süspansiyonların, % 30 rölatif sıklıklı ve değişik gradasyonlu kumlara penetrasyon başarı durumları.

S/Ç = 0,8			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	30	70	Başarılı
2	40	60	Başarılı
3	50	50	Başarılı
4	60	40	Başarılı
5	70	30	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)

S/Ç = 1,0			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	0	100	Başarılı
2	30	70	Başarılı
3	35	65	Başarılı
4	40	60	Başarılı
5	45	55	Başarılı
6	50	50	Başarılı
7	55	45	Başarılı
8	60	40	Başarılı
9	70	30	Başarılı
10	75	25	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
11	80	20	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
12	100	0	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)

S/Ç = 1,2			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	60	40	Başarılı
2	70	30	Başarılı
3	80	20	Başarılı
4	90	10	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)
5	100	0	Kısmi Başarılı (Filtrasyon)

S/Ç = 1,5			
Numune No	Kum Oranı %		Başarı Durumu
	İnce	Orta	
1	60	40	Başarılı
2	70	30	Başarılı
3	80	20	Başarılı
4	90	10	Başarılı
5	100	0	Başarılı

S/Ç oranı 1,0'da yapılan enjeksiyon denemesine ilk olarak İKY % 100' le başlanmıştır. Deney sonucunda filtrasyon görülmüş ve süspansiyon numunenin 2/3'üne penetre olmuştur. Daha sonra İKY % 70, % 75, % 80 ile denemelere devam edilmiş, İKY % 70' de başarı sağlanırken, İKY % 75 ve % 80' de filtrasyon görülmüştür. İKY % 30, % 35, % 40, % 45, % 50, % 55, % 60' a yapılan çalışmalarda da başarı sağlanmış ve süspansiyonlar numunelerin tamamına penetre olmuştur. Enjeksiyon başarı sınır değerinin (İKY % 70) bulunmasıyla S/Ç oranı 1,0 ile yapılan enjeksiyon denemelerine son verilmiştir.

S/Ç oranı 1,2' de enjeksiyon denemesine ilk olarak, S/Ç oranı 1,0'ın enjeksiyon başarı sınır değeri olan İKY % 70 ile başlanmıştır. Bu numunenin denemesinin nedeni S/Ç oranı 1,0'da başarı sağlamış olan İKY' nin, S/Ç oranı 1,2' de de penetrasyon sağlanıp sağlanamayacağının görülmesidir. İKY % 70' e yapılan enjeksiyon çalışmasında başarı sağlanmış ve denemelere İKY artırılarak devam edilmiştir. Daha sonra İKY % 80, % 90 ve % 100'le denemeler yapılmış, İKY % 80' de başarı sağlanırken, İKY % 90 ve % 100' de filtrasyon görülmüştür. Denemelere İKY % 60 da dahil edilmiş, bu yüzdede başarı sağlanmıştır. Enjeksiyonda başarı sağlanan tüm numunelerde tam penetrasyon görülürken, başarısız olan numunelerde 2/3 oranında penetrasyon görülmüştür. S/Ç oranı 1,2'nin enjeksiyon başarı sınır değerinin (İKY % 80), S/Ç oranı 1,0' in enjeksiyon başarı sınır değerinden (İKY % 70) büyük olması, S/Ç oranının artmasının penetre olabilirliği nasıl etkileyebileceği hakkında bilgi vermiş ve yapılacak farklı S/Ç oranlı enjeksiyon çalışmalarına ışık tutmuştur (Resim 3.24).



Resim 3.24 S/Ç oranı 1,2 için enjeksiyon başarı sınırı (İKY % 80).

S/Ç oranı 1,5' de denemelere ilk olarak, S/Ç oranı 1,2' de başarı sağlanamayan İKY % 90 ve % 100 numuneleriyle başlanmıştır. Yapılan enjeksiyon denemelerinde iki karışımda da başarı sağlanırken, süspansiyonlar numunelere tam penetre olmuştur (Resim 3.25). Daha sonra denemelere İKY % 60, % 70 ve % 80' le devam edilmiş, bu numunelerde de başarı sağlanmıştır. S/Ç oranı 1,5 ile yapılan enjeksiyon denemelerinde, İKY % 100' de dahil olmak üzere tüm gradasyonlarda başarı sağlanmıştır.



Resim 3.25 % 30 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,5 değeri için İKY % 100' de enjeksiyon başarısı

Son olarak, S/Ç oranı 0,8 ile enjeksiyon denemeleri yapılmıştır. Bu süspansiyonun yoğunluğu ve viskozitesi oldukça yüksektir. Bu oranda denemelere ilk olarak, S/Ç

oranı 1,0' ın başarı sınır değeri olan İKY % 70 ile başlanmıştır. Yapılan enjeksiyonda filtrasyon görülmüş ve süspansiyon numunenin 2/3' üne penetre olmuştur. Daha sonra İKY % 60, % 50, % 40, % 30 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. Enjeksiyon başarı sınır değerinin (İKY % 60) bulunmasıyla S/Ç oranı 0,8' de enjeksiyon denemelerine son verilmiştir.

Enjeksiyonda başarılı olan numunelere 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki basınç mukavemeti deneylerinin yapılabilmesi ve enjeksiyon başarısının teyidi amacıyla enjeksiyon deneyleri 6 kez daha tekrarlanmıştır.

3.7.3. Burwell kriterlerine göre enjekte edilebilirlik

Enjeksiyon deney sonuçları Burwell kriterlerine göre de değerlendirilmiş ve sonuçlar Çizelge 3.15. de gösterilmiştir.

Çizelge 3.15. Burwell kriterlerine göre enjekte edilebilirlik.

(D85)enjeksiyon = 0,0072 mm			(D95)enjeksiyon = 0,0080 mm			Değerlendirme	Deney sonucuna göre değerlendirme	
Numune No	Kum Oranı (%)		(D10)zemi n (mm)	(D15)zemi n (mm)	N = (D15)zemi n/(D85)enjeksiyon N>25			Nc = (D10)zemi n/(D95)enjeksiyon N>11
	İnce	Orta						
1	0	100	0,50	0,52	72	63	Başarılı	Başarılı
2	10	90	0,46	0,48	66	57	Başarılı	Başarılı
3	20	80	0,42	0,44	61	52	Başarılı	Başarılı
4	30	70	0,38	0,39	55	47	Başarılı	Başarılı
5	35	65	0,36	0,37	52	45	Başarılı	Başarılı
6	40	60	0,34	0,35	49	42	Başarılı	Başarılı
7	45	55	0,32	0,33	46	39	Başarılı	Başarılı
8	50	50	0,30	0,31	43	37	Başarılı	Başarılı
9	55	45	0,27	0,29	40	34	Başarılı	Başarılı
10	60	40	0,25	0,27	37	32	Başarılı	Başarılı
11	70	30	0,21	0,23	31	27	Başarılı	Başarılı
12	75	25	0,19	0,21	28	24	Başarılı	Başarılı
13	80	20	0,17	0,18	26	22	Başarılı	Başarılı
14	90	10	0,13	0,14	20	16	Başarılı	Başarılı
15	100	0	0,09	0,10	14	11	Başarılı	Başarılı

Çizelge 3.15.' e bakıldığında İKY % 10, % 20, % 30, % 35, % 40, % 45, % 50, % 55, % 60, % 70, % 75, % 80 oranlarının N değerleri 25' in üstünde iken İKY % 90, % 100 oranlarının N değerleri $11 < N < 25$ arasındadır. N' ye göre İKY % 90 ve % 100 enjeksiyonun mümkün olup olmadığına deneylerle karar verilir. Nc değerlerine bakıldığında tüm değerlerin 11' in üstünde olmasından dolayı tüm numunelere enjeksiyon yapılabilir. Sonuçlar incelendiğinde; hem yapılan enjeksiyon deney sonuçları, hem de Burwell kriterleri enjekte edilebilirlik hesapları birbirini doğrulamakta ve her iki yöntemde de İKY % 100' e kadar enjeksiyon yapılabilir, bu da yapılan deneylerin tutarlılığını ortaya koymaktadır.

3.8. Enjeksiyonda başarılı olan numunelerin mukavemet deneyleri

Enjeksiyonda başarılı olan numunelere mukavemet değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Enjeksiyonda başarılı olan numuneler 1 gün moldlarda bekletildikten sonra, mold' lardan çıkartılmıştır (Resim 3.26). Çıkartma işlemi, molda yapılan özel başlık ve çelik tokmakla yapılmıştır.



Resim 3.26 Numunelerin moldlardan çıkarılması.

Mold’ dan çıkarılan numuneler deney gününe kadar sürekli nemlendirilen kum içerisinde gömülerek kür ortamında bekletilmiştir (Resim 3.27).



Resim 3.27 Numunelerin kür ortamında bekletilmesi.

Tek eksenli basınç deneyleri yapılacak olan numuneler kür ortamından çıkartıldıktan sonra boyu çapın iki katı olacak şekilde beton kesicide kesilmiştir (Resim 3.28). Daha sonra beton yüzeylere; hem düzgün beton başlık yüzeyleri oluşturmak, hem de basıncın tüm yüzeye üniform dağılmasını sağlayarak kırılma esnasında istenmeyen başlık çekme gerilmelerini engellemek amacıyla özel başlıklar yapılmıştır. Başlıkların oluşturulmasında kartonpiyer alçısı kullanılmıştır (Resim 3.29). Bu malzemenin seçiminde kolay priz ve şekil almasının yanında donduğunda yeterli mukavemete sahip olması etkili olmuştur. Malzemenin numune başlıklarında düzgün ve kotunda bir konum oluşturabilmesini sağlamak için özel başlık moldları imal edilmiştir. Bu moldlar numuneye kolay bir şekilde yerleşmekte, alçının prizini almasından sonra kolayca numuneden çıkartılabilmektedir.



Resim 3.28 Beton kesicide boyu ϕ ın 2 katı olacak şekilde kesilmiş numune.



Resim 3.29 Mukavemet deney numunelerine alçı başlık yapılması.

Mukavemet değerinin ölçülmesi için 4 ton yükleme kapasiteli yük halkasına sahip serbest basınç cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın kullanılmasının nedeni beton kırma deneyine göre daha hassas ve gerçekçi ölçümler vermesidir. Deneye başlamadan

önce serbest basınç cihazı kalibre edilmiştir. Numunelere yapılan alçı başlıklar prizini aldıktan sonra serbest basınç deney aletine yerleştirilerek, numunelere 1,27 mm/s sabit hızla yükleme yapılmış ve yük halkasından kırılma anındaki max. değer okunmuştur (Resim 3.30). Okunan değer yük halkası kalibrasyon katsayısıyla çarpılarak yük birimine dönüştürülmüştür. Kırılma yükünün numune alanına bölünmesiyle de maksimum kırılma gerilmesi bulunmuştur.



Resim 3.30 Numunelerin serbest basınç cihazında mukavemetlerinin ölçülmesi.

Mukavemet deneylerinde iki farklı durumdaki mukavemet değişimleri incelenmiştir. Birinci olarak, dayanımın, sabit S/Ç oranında değişken rölatif sıklık ile nasıl değiştiği, ikincisinde sabit rölatif sıklıkta S/Ç oranlarının değişiminin numunelerin dayanımlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

3.8.1. Sabit S/Ç oranı ve fakat değişken rölatif sıklıkta mukavemet değerleri

Bu kısımdaki çalışmada, daha önce enjeksiyonda başarılı olmuş S/Ç oranı 1,0, rölatif sıklık değerleri % 30-40-50-60-70 olan numunelere mukavemet deneyleri

yapılmıştır. Çizelge 3.16 da numunelerin 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki basınç dayanımları gösterilmiştir.

Çizelge 3.16 Enjeksiyon yapılmış farklı rölatif sıklıktaki numunelerin basınç mukavemeti değerleri.

Dr = % 30								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	0	100	0,58	1,16	2,90	5,08	10,26	11,80
2	30	70	0,52	1,12	2,79	4,98	10,02	11,60
3	35	65	0,49	1,00	2,51	4,29	8,72	10,20
4	40	60	0,47	0,95	2,38	4,21	8,55	9,80
5	45	55	0,45	0,91	2,27	4,02	8,22	9,50
6	50	50	0,43	0,86	2,16	3,85	7,89	9,20
7	55	45	0,41	0,81	2,03	3,61	7,35	8,60
8	60	40	0,37	0,77	1,92	3,48	7,02	8,20
9	70	30	0,33	0,69	1,73	3,22	6,68	7,80
Dr = % 40								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	30	70	0,31	0,61	1,54	2,76	5,52	6,40
2	40	60	0,29	0,59	1,47	2,58	5,21	6,10
3	50	50	0,28	0,54	1,33	2,45	4,88	5,50
4	60	40	0,22	0,46	1,13	2,32	4,21	4,70
Dr = % 50								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	30	70	0,25	0,49	1,15	1,95	3,91	4,91
2	40	60	0,19	0,45	0,87	1,56	3,18	4,30
3	50	50	0,16	0,33	0,81	1,51	2,99	3,70
Dr = % 60								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (Mpa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	20	80	0,24	0,48	1,19	2,13	4,25	4,94
2	30	70	0,22	0,43	1,05	1,88	3,80	4,34
3	40	60	0,18	0,39	0,75	1,35	2,61	3,10
Dr = % 70								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	10	90	0,25	0,51	1,28	2,24	4,49	5,21
2	20	80	0,22	0,46	1,13	2,05	4,01	4,65
3	30	70	0,21	0,41	1,02	1,76	3,63	4,21

Çizelge 3.16 incelendiğinde % 30 rölatif sıklıkta, en yüksek basınç değerinin % 100 orta kumda (11,80 MPa, 56 günlük basınç dayanımı), en düşük basınç değerinin (7,80 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY % 70’ de olduğu görülmüştür. İnce

kum yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımları düşmüştür. İnce kum yüzdesinin artmasıyla taneler arasındaki boşluklar azalmış ve süspansiyon numunelere daha az penetre olmuştur.

Resim 3.31’ de ince kum yüzdesi fazla olan numunenin (rölatif sıkılık % 30, İKY % 70), Resim 3.32’ de ince kum yüzdesi düşük olan numunenin (rölatif sıkılık % 30, İKY % 30) tipik kırılma biçimleri verilmiştir.



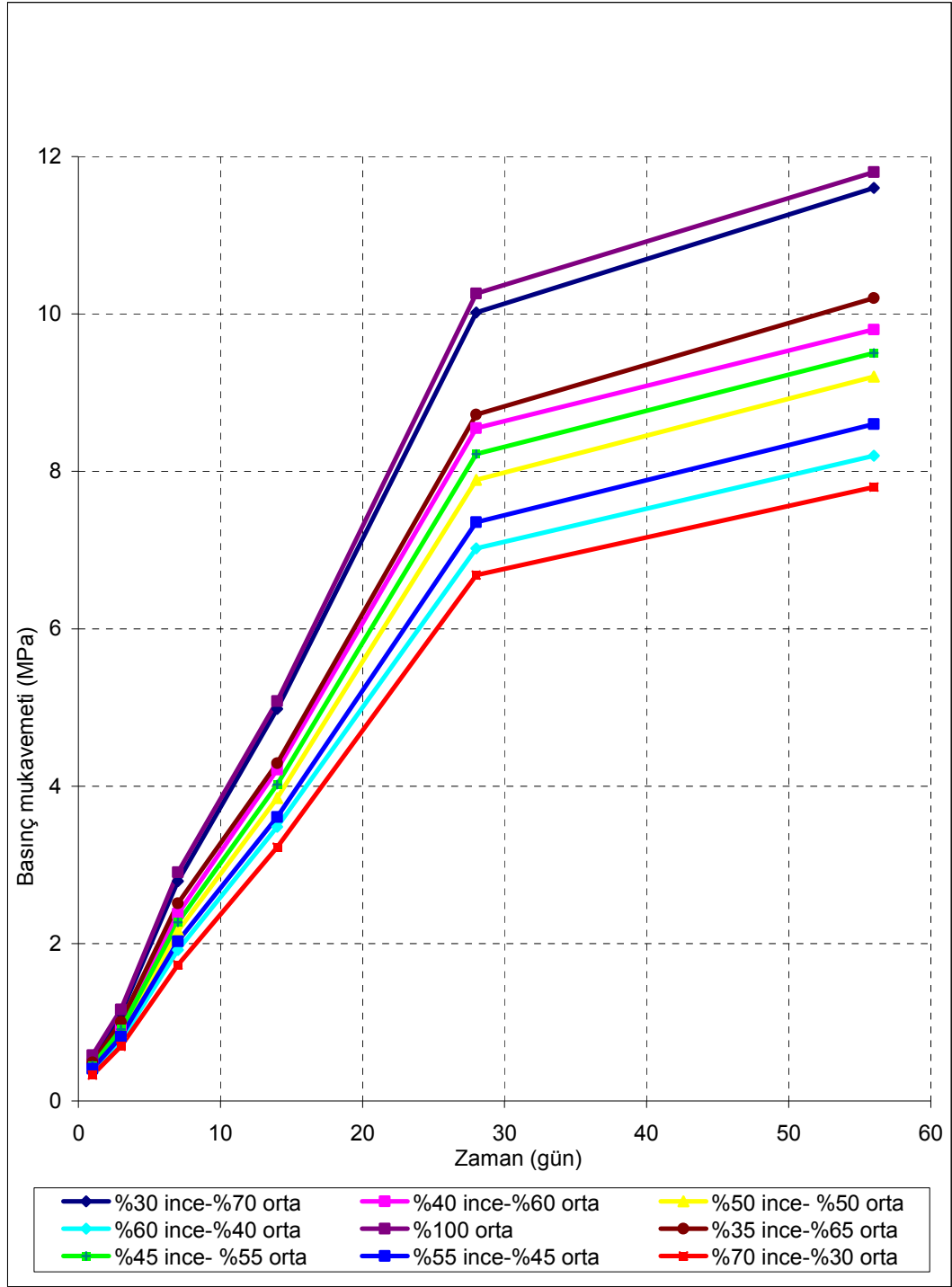
Resim 3.31 İnce kum yüzdesi fazla olan numunenin (rölatif sıkılık % 30, İKY % 70) tipik kırılma biçimi.



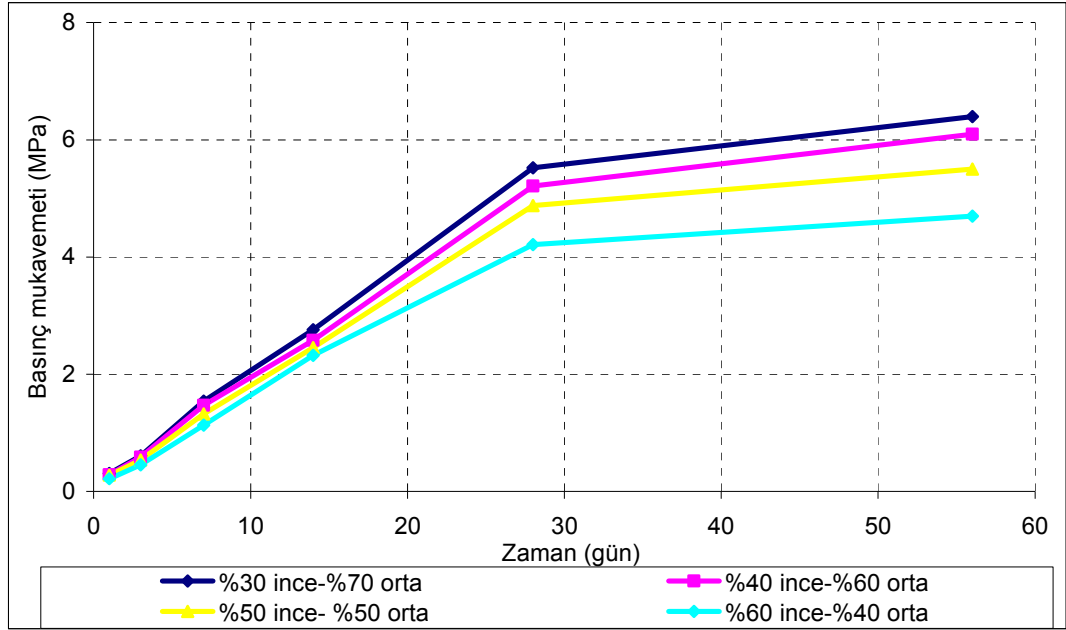
Resim 3.32 İnce kum yüzdesi düşük olan numunenin (rölatif sıkılık % 30, İKY % 30) tipik kırılma biçimi.

Farklı rölatif sıkılıkta aynı İKY' ye sahip numuneler incelendiğinde; en büyük basınç dayanımının rölatif sıkılık % 30'da, En düşük basınç dayanımının rölatif sıkılık % 70' de olduğu görülmüştür. Rölatif sıkılık değerlerinin artmasıyla basınç dayanımı değerleri düşmüştür. Bunun nedeni sıkılık oranının artışıyla tane aralarındaki boşluklar azalmış ve numuneye süspansiyonun penetrasyonu zorlaşmıştır.

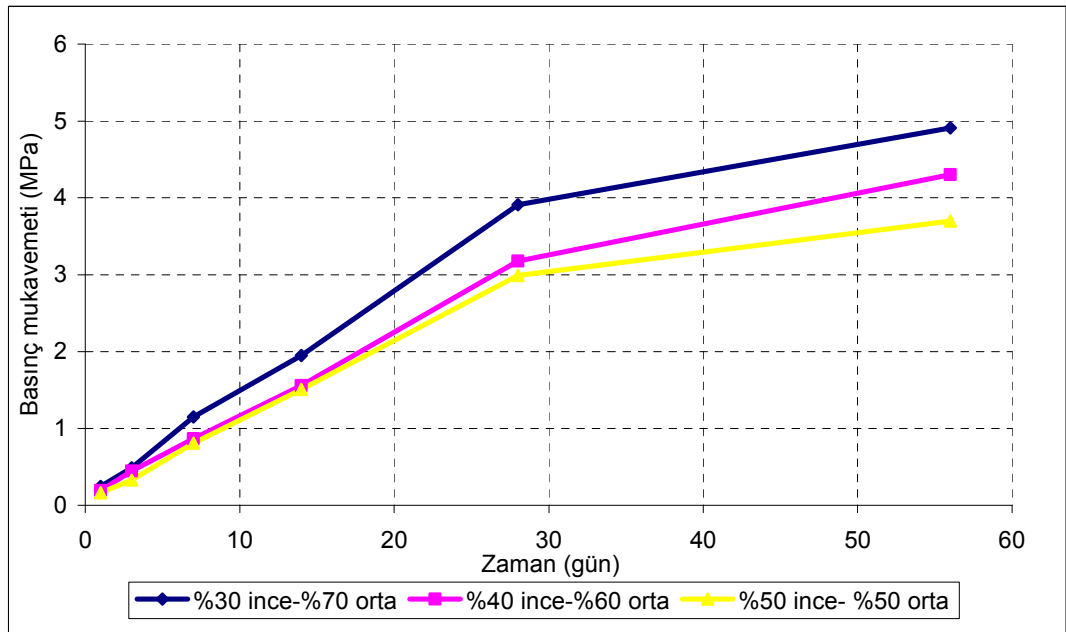
Sonuçların daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi amacıyla değerler grafiğe dökülmüştür. Şekil 3.12-3.13-3.14-3.15-3.16' da numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi verilmiştir. Şekil 3.12-3.13-3.14-3.15-3.16' da bakıldığında basınç mukavemetinin büyük bir kısmının 28. güne kadar kazanıldığı, 28. günden sonra dayanım değerlerinde çok büyük bir artış olmadığı gözlenmiştir. Basınç dayanımındaki en büyük artışlar 7, 14 ve 28. günlerde olmuştur. Ayrıca, numunelere 1. ve 3. günde yapılan basınç mukavemeti deney sonuçları birbirine oldukça yakinken, ince kum yüzdesi değerine bağlı olarak 56. güne kadar basınç mukavemeti değerlerindeki farklılaşma daha da belirgin hale gelmektedir.



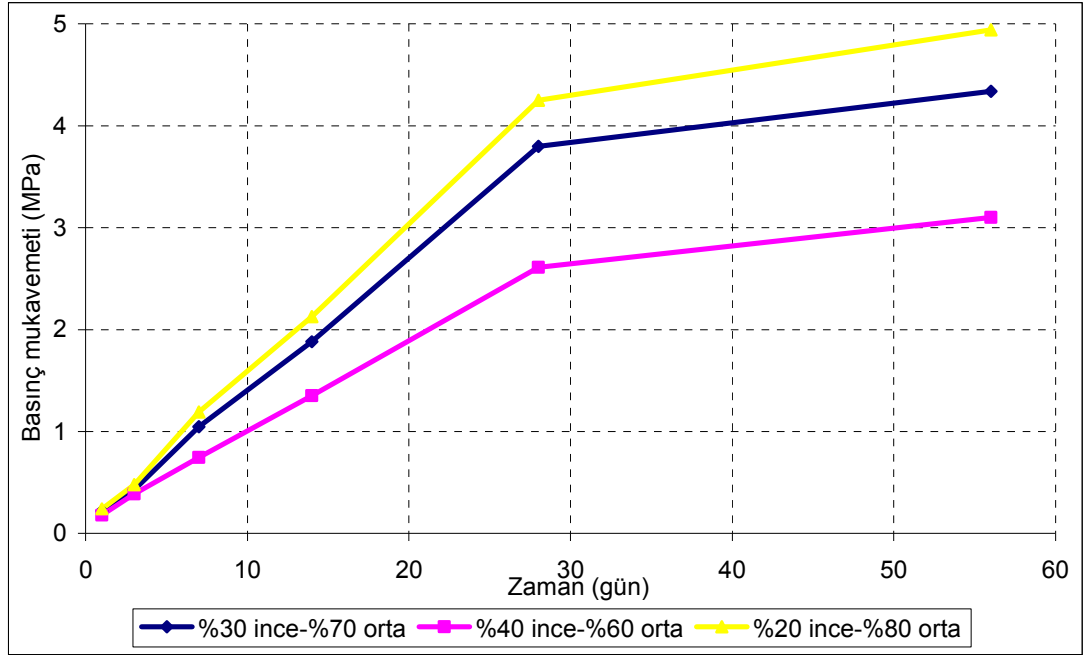
Şekil 3.12 % 30 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



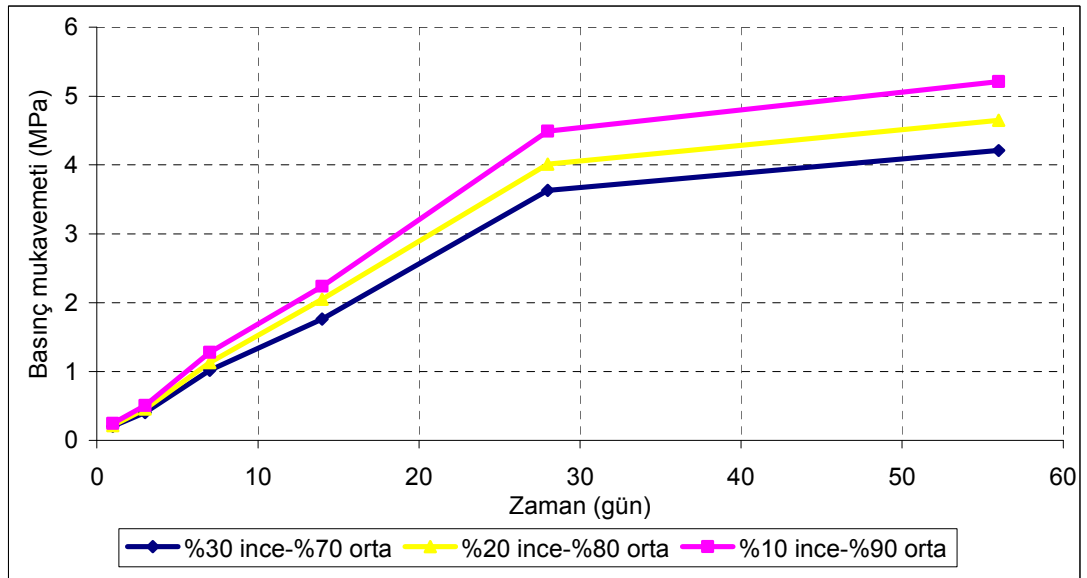
Şekil 3.13 % 40 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



Şekil 3.14 % 50 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



Şekil 3.15 % 60 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



Şekil 3.16 % 70 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

3.8.2.Sabit rölatif sıkılıkta ve fakat farklı S/Ç oranlarında mukavemet değerlerinin değişimi

Enjeksiyonda başarılı olmuş rölatif sıkılık değeri % 30, S/Ç değerleri 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 olan numunelere mukavemet deneyleri yapılmıştır. Çizelgede 3.17’ de numunelerin 1, 3, 5, 7, 14, 28, 56. günlerdeki basınç dayanımları gösterilmiştir.

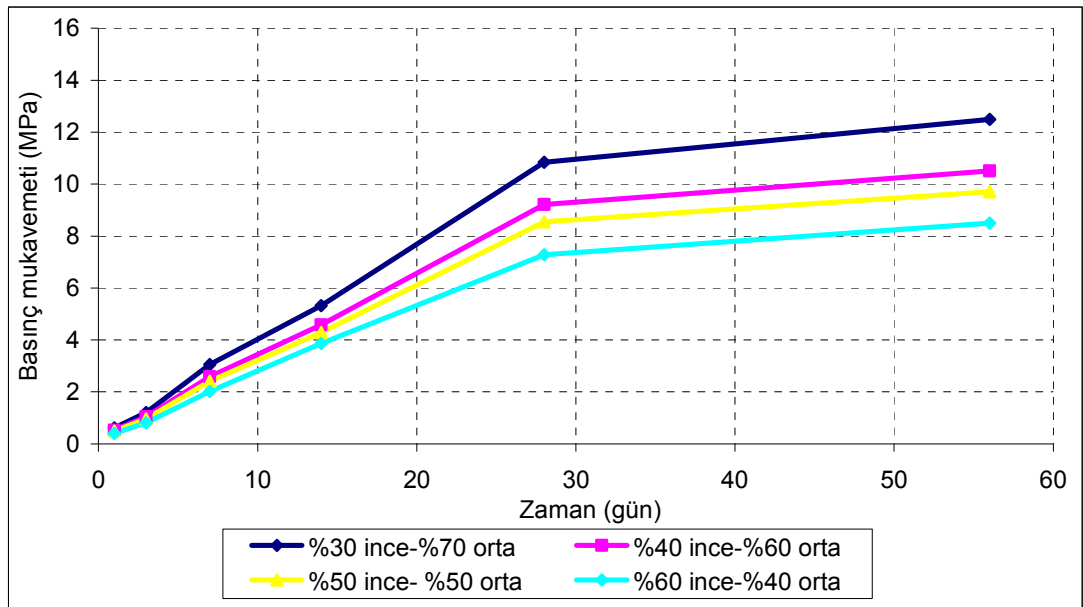
Çizelge 3.17 Enjeksiyon yapılmış farklı S/Ç oranlı numunelerin basınç mukavemet değerleri.

S/Ç = 0.8								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	30	70	0,61	1,21	3,05	5,32	10,83	12,50
2	40	60	0,53	1,04	2,58	4,58	9,21	10,50
3	50	50	0,49	0,96	2,41	4,28	8,55	9,70
4	60	40	0,41	0,81	2,02	3,86	7,28	8,50
S/Ç = 1.0								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	0	100	0,58	1,16	2,90	5,08	10,26	11,80
2	30	70	0,52	1,12	2,79	4,98	10,02	11,60
3	35	65	0,49	1,00	2,51	4,29	8,72	10,20
4	40	60	0,47	0,95	2,38	4,21	8,55	9,80
5	45	55	0,45	0,91	2,27	4,02	8,22	9,50
6	50	50	0,43	0,86	2,16	3,85	7,89	9,20
7	55	45	0,41	0,81	2,03	3,61	7,35	8,60
8	60	40	0,37	0,77	1,92	3,48	7,02	8,20
9	70	30	0,33	0,69	1,73	3,22	6,68	7,80
S/Ç = 1.2								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	60	40	0,23	0,45	1,16	2,05	4,13	4,75
2	70	30	0,18	0,34	0,84	1,49	3,00	3,45
3	80	20	0,15	0,27	0,70	1,23	2,48	2,85
S/Ç = 1.5								
Numune No	Kum Oranı %		Basınç Mukavemeti (MPa)					
	İnce	Orta	1.gün	3.gün	7. gün	14.gün	28.gün	56.gün
1	60	40	0,16	0,31	0,76	1,32	2,71	3,10
2	70	30	0,15	0,28	0,73	1,22	2,61	2,98
3	80	20	0,14	0,26	0,65	1,19	2,41	2,71
4	90	10	0,11	0,25	0,62	1,05	2,28	2,56
5	100	0	0,10	0,23	0,57	0,99	2,11	2,30

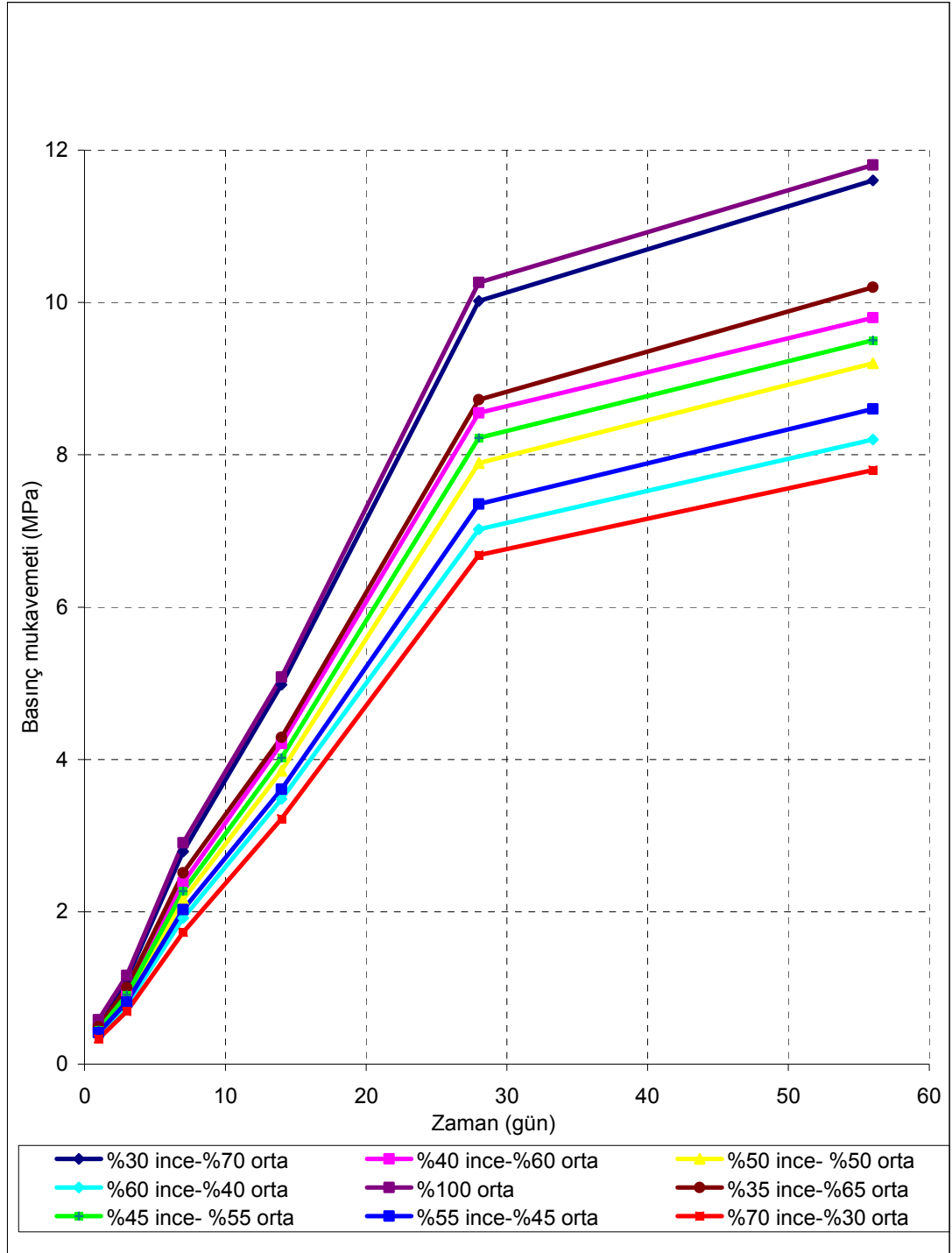
Çizelge 3.17 incelendiğinde, S/Ç oranları 0,8, 1,0, 1,2 ve 1,5 olan değerlerde de ince kum yüzdesinin artması ile basınç dayanımları düşmüştür. Bunun nedeni; ince kum yüzdesi fazla olan numunelerde taneler arasındaki boşlukların azalmasından dolayı numunelere iyi penetrasyonun sağlanamamasıdır.

Çizelge 3.17 ye bakıldığında Farklı S/Ç oranlarında aynı İKY'ye sahip numuneler incelendiğinde; en büyük basınç dayanımının S/Ç oranı 0,8'de, en düşük basınç dayanımının S/Ç oranı 1,5'de olduğu görülmüştür. S/Ç oranının artması basınç dayanımını düşürmüştür.

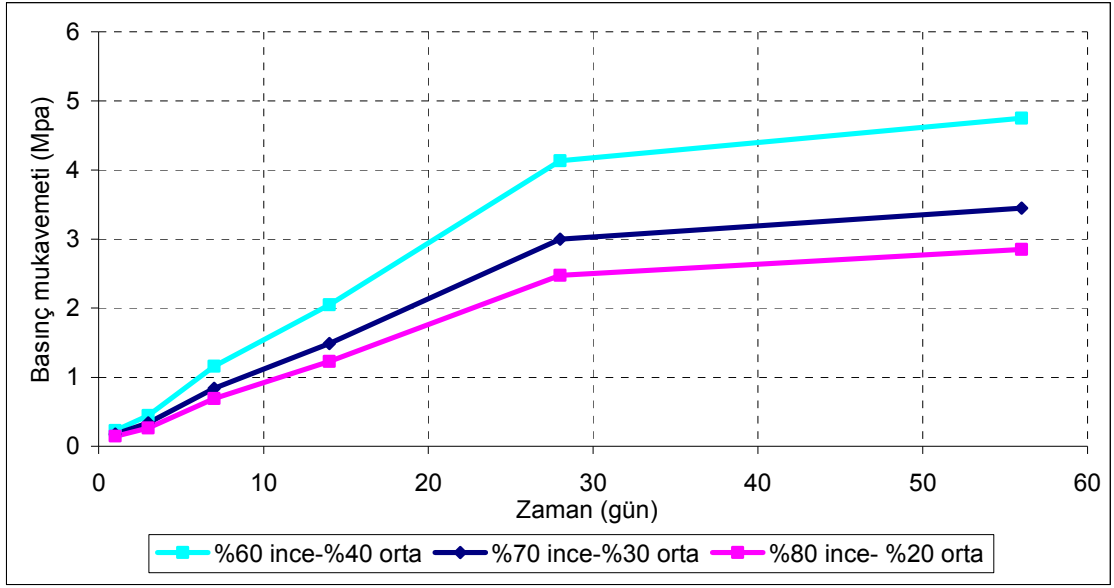
Şekil 3.17-3.18-3.19-3.20' de numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi verilmiştir. Şekil 3.17-3.18-3.19-3.20 bakıldığında basınç mukavemetinin büyük bir kısmının 28. güne kadar kazanıldığı, 28. günden sonra dayanım değerlerinde çok büyük bir artış olmadığı gözlenmiştir. Basınç dayanımındaki en büyük artışlar 7, 14 ve 28. günlerde olmuştur.



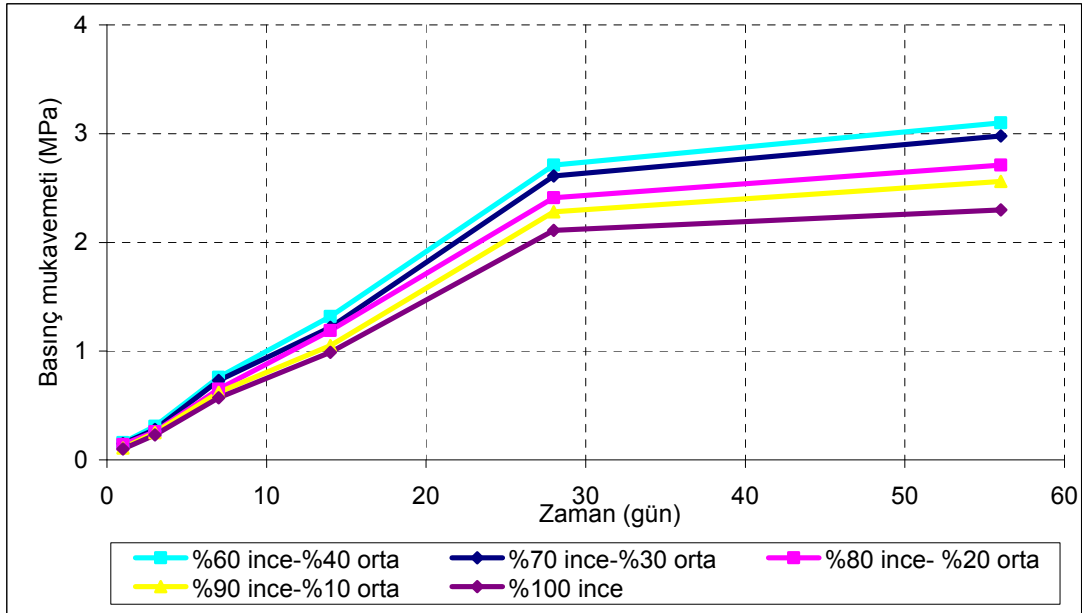
Şekil 3.17 % 30 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 0.8 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



Şekil 3.18 % 30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



Şekil 3.19 % 30 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,2 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



Şekil 3.20 % 30 rölatif sıklıkta, S/Ç oranı 1,5 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

3.9. Enjeksiyonda başarılı olan numunelerin permeabilite deneyleri

Enjeksiyonda başarılı olmuş permeabilite numuneleri 1 gün bekletildikten sonra mold başlıkları sökülerek numuneler moldlardan çıkarılmadan kür ortamına alınmıştır. Numunelere 1, 3, 7, 14, 28, 56. günlerde düşen seviyeli permeabilite deneyleri uygulanmıştır. Kür ortamından çıkarılan numunelere permeabilite deneyi yapılacağı zaman mold başlıkları tekrar takılıp düşen seviyeli permeabilite düzeneğine yerleştirilmiştir (Resim 3.33).



Resim 3.33 Düşen seviyeli permeabilite deneyinin yapılması.

Deney düzeneğine bağlı numuneler belirlenen günlerde düşen seviyeli permeabilite deneyine tabi tutulmuş, düzeneğe bağlı numunelerden 1 aylık süre zarfında herhangi bir su çıkışı gözlenmemiş ve düzenekteki su seviyesinde herhangi bir düşüş olmamıştır. Permeabilite deney sonuçlarına göre tüm numuneler geçirimsizdir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sabit Su/Çimento oranlı katkısız ince taneli çimento (Ultrafin 12) enjeksiyonunun farklı rölatif sıklılıklardaki ve gradasyondaki kumlara enjekte edilebilirlikleri ile farklı Su/Çimento oranlı katkısız ince taneli çimento (Ultrafin 12) enjeksiyonunun sabit rölatif sıklılıktaki ve farklı gradasyondaki kumlara enjekte edilebilirlikleri laboratuarda yapılan enjeksiyon deneyleri ile araştırılmıştır.

Sedimentasyon deneyi sonucuna göre; S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 olan süspansiyonların sedimentasyon yüzdeleri % 0; 0; 0; 1,33; 2,67; 8,15; 23,81; 29,17; 35,44; 40,00' dir. S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5 olan süspansiyonların sedimentasyon yüzdeleri % 5' in altında, stabil iken, S/Ç oranı 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan süspansiyonların sedimentasyon yüzleri % 5' in üzerinde, stabil değildir. S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0 olan süspansiyonlarda hiç sedimentasyon görülmezken, S/Ç oranı 1,0' den sonra S/Ç oranının artmasıyla sedimentasyon yüzdesi artmıştır.

Vicat deneyi sonunda, S/Ç oranı 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5 olan süspansiyonların priz başlangıç süreleri 385, 360, 370, 433, 455, 680, 1625 dakika ve priz bitiş süreleri 480, 440, 467, 693, 930, 4058, 16050 dakikadır. S/Ç oranı 3,0, 3,5 ve 4,0 olan süspansiyonlarında kofluk oluşmuş ve deney süresinin 1 ayı geçmesinden dolayı deneylere son verilmiştir. S/Ç oranı 1,0' e kadar süspansiyonların priz başlangıç ve bitiş süreleri değişken iken, S/Ç oranı 1,0' den sonra S/Ç oranının artmasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri artmıştır.

Viskozite deneyi sonucunda, S/Ç oranı 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 olan süspansiyonların dinamik viskozite (μ) değerleri 4,67; 2,99; 2,40; 2,01; 1,50; 1,38; 1,16; 1,13; 1,04 centipoise'dir. S/Ç oranı 0,6' da süspansiyonun yoğunluğundan dolayı Marsh hunisi ve kohezyon ölçer plaka deneyleri yapılamamıştır. S/Ç oranı 4,0' ün dinamik viskozitesi değeri (1,04 centipoise) suyunkine (20°C de 1,00 centipoise) çok yakındır. S/Ç oranının artmasıyla dinamik viskozite değerleri (μ) azalmıştır.

Sedimentasyon, viskozite ve katılaşma süresi deney sonuçlarına göre enjeksiyon yapılabilecek en uygun S/Ç oranları 0,8, 1,0, 1,2 ve 1,5 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu oranlarda enjeksiyon deneyleri yapılmıştır.

S/Ç 1,0 oranında hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı rölatif sıklıktaki ve gradasyondaki kumlara enjeksiyon çalışmalarında; % 30 rölatif sıklıkta İKY % 0, % 30, % 35, % 40, % 45, % 50, % 55, % 60 ve % 70 de başarı sağlanırken, İKY % 75, % 80 ve % 100 de başarısız olunmuştur. % 40 rölatif sıklıkta İKY % 30, % 40, % 50, % 60 da başarı sağlanırken, İKY % 70 de başarısız olunmuştur. % 50 rölatif sıklıkta İKY % 30, % 40 ve % 50 de başarı sağlanırken, İKY % 60 da başarısız olunmuştur. % 60 rölatif sıklıkta İKY % 20, % 30, ve % 40 da başarı sağlanırken İKY % 50 de başarısız olunmuştur. % 70 rölatif sıklıkta İKY % 10, % 20 ve % 30 da başarı sağlanırken, İKY % 40 ve % 50 de başarısız olunmuştur. Başarılı olan enjeksiyonlarda süspansiyon numunelerin tamamına penetre olurken, başarısız olan enjeksiyonlarda süspansiyon numunelerin 2/3' üne penetre olmuştur. Rölatif sıklılığın ve ince kum yüzdesinin atmasıyla penetre olabilirlik düşmüştür.

Farklı S/Ç oranıyla hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı gradasyonda ve % 30 rölatif sıklıktaki kumlara enjeksiyon çalışmalarında; S/Ç oranı 0.8 ile İKY % 30, % 40, % 50 ve % 60' da başarı sağlanırken, İKY % 70 de başarısız olunmuştur. S/Ç oranı 1,0' de İKY % 0, % 30, % 35, % 40, % 45, % 50, % 55, % 60 ve % 70 de başarı sağlanırken, İKY % 75, % 80 ve % 100' de başarısız olunmuştur. S/Ç oranı 1,2' de İKY % 60, % 70, % 80, % 90 da başarı sağlanırken, İKY % 100' de başarısız olunmuştur. S/Ç oranı 1,5 de İKY % 100 de dahil olmak üzere tüm enjeksiyonlarda başarı sağlanmıştır. Başarılı olan enjeksiyonlarda süspansiyon numunelerin tamamına penetre olurken, başarısız olan enjeksiyonlarda süspansiyon numunelerin 2/3' üne penetre olmuştur. S/Ç oranının artmasıyla penetre olabilirlik artmıştır.

S/Ç oranı 1,0 olan enjeksiyon deneyleri yapılmış farklı rölatif sıklıklardaki ve gradasyondaki kum numunelere yapılan mukavemet deney sonuçlarına göre; % 30 rölatif sıklıkta, en yüksek basınç değerinin (11,80 MPa, 56 günlük basınç dayanımı)

İKY % 0' da, en düşük basınç değerinin (7,80 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY % 70' de olduğu görülmüştür. Aynı şekilde, % 40-50-60-70 rölatif sıklık değerlerinde de ince kum yüzdesinin artması basınç dayanımlarını düşürmüştür. İnce kum yüzdesinin artmasıyla taneler arasındaki boşluklar azalmış ve süspansiyon numunelere daha az penetre olmuştur. İKY % 30 numunesi, % 30 rölatif sıklıkta 56. günde 11,60 MPa basınç dayanımına sahipken, rölatif sıklık % 40, 50, 60, 70 değerlerinde 56. günde 6,40; 4,91; 4,34; 4,21 MPa basınç dayanımına sahiptir. Aynı şekilde İKY % 40 numunesi , % 30 rölatif sıklıkta 56. günde 9,80 MPa basınç dayanımına sahipken, rölatif sıklık % 40, 50, 60 değerlerinde 56. günde 6,10; 4,30; 3,10 Mpa basınç dayanımına sahiptir. Rölatif sıklık değerlerinin artmasıyla basınç dayanımı değerleri düşmüştür.

Farklı S/Ç oranlı ve % 30 rölatif sıklıkta enjeksiyon yapılmış kum numunelere yapılan mukavemet deney sonuçlarına göre; İKY % 60 numunesi, S/Ç oranı 0,8' de 56. günde 8,50 MPa basınç dayanımına sahipken, S/Ç oranları 1.0, 1.2, 1.5' de 56. günde 8,20; 4,75; 3,10 MPa basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde İKY % 70 numunesi, S/Ç oranı 1,0' da 56. günde 7,80 MPa basınç dayanımına sahipken, S/Ç oranları 1,2 ve 1,5' de 56. günde 3,45 ve 2,98 MPa basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Farklı S/Ç oranlarında aynı İKY' ye sahip numuneler incelendiğinde; en büyük basınç dayanımının S/Ç oranı 0,8' de, En düşük basınç dayanımının S/Ç oranı 1,5' de olduğu görülmüştür. S/Ç oranının artması basınç dayanımını düşürmüştür.

Enjeksiyonda başarılı olmuş numunelerde geçirimsizliğin kontrol edilmesi amacıyla yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyleri için numuneler 1 ay düzenekte bekletilmiş, numunelerden su çıkışı gözlenmemiştir. Permeabilite deney sonuçlarına göre tüm numunelerin geçirimsiz olduğu belirlenmiştir.

Ultrafin 12 ince taneli çimento, ince kumlar üzerinde mükemmel penetrasyon yetisi göstermiştir. Hem enjekte edilebilirlik hem de ulaşılan mukavemet değerleri açısından, en uygun S/Ç oranının 1,0 olduğu kanaatine varılmıştır.

Öneri:

Bu çalışmada ince taneli çimento enjeksiyonu için katkı maddesi kullanılmamıştır. İnce taneli çimento enjeksiyonları için viskoziteyi azaltıcı süper-akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri kullanılarak model deneylerin yapılmasıyla enjekte edilebilirlik araştırılmalıdır.

EKLER

EK 1. Enjeksiyon deneyinde kullanılan aparatlar



Resim 1.1. Plastik enjeksiyon moldu.



Resim 1. 2. Numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan çelik tokmak.

EK 1. (Devam) Enjeksiyon deneyinde kullanılan aparatlar



Resim 1. 3. Moldu sabitleyici gövde



Resim 1. 4. Moldlardan sızdırmazlığı sağlayan lastik contalar.

EK 1. (Devam) Enjeksiyon deneyinde kullanılan aparatlar



Resim 1. 5. Enjeksiyon malzemesi giriş ve çıkışını sağlayan çelik hortum ve vanalar.



Resim 1. 6. Moldlardan su ve şerbetin çıkışını gözlemlemek için plastik şeffaf hortumlar

EK 1. (Devam) Enjeksiyon deneyinde kullanılan aparatlar



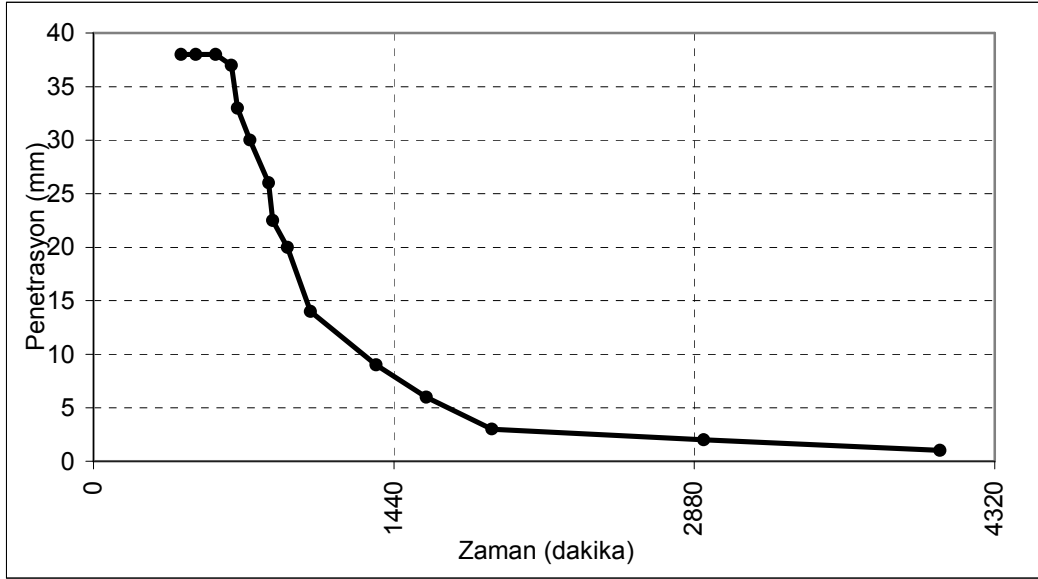
Resim 1. 7. Mikserli enjeksiyon tankı ve enjeksiyon tankına malzeme girişini sağlayan borular.

EK 1. (Devam) Enjeksiyon deneyinde kullanılan aparatlar

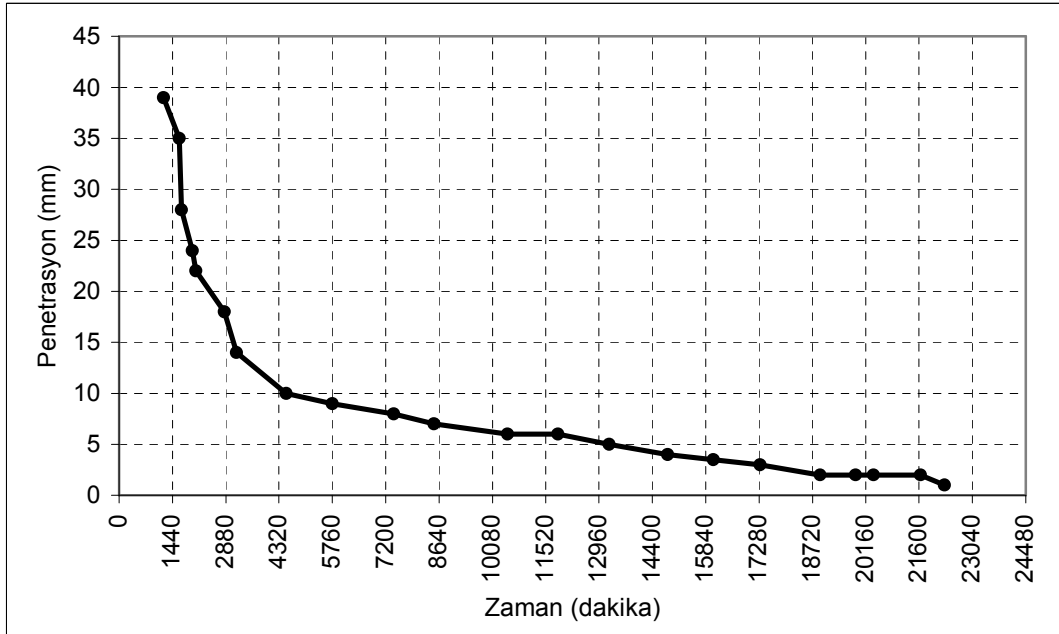


Resim 1. 8. Maksimum ve Minimum boşluk oranlarının belirlenmesinde kullanılan aparatlar.

EK 2. S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 olan süspansiyonların Vicat deney sonuçları.

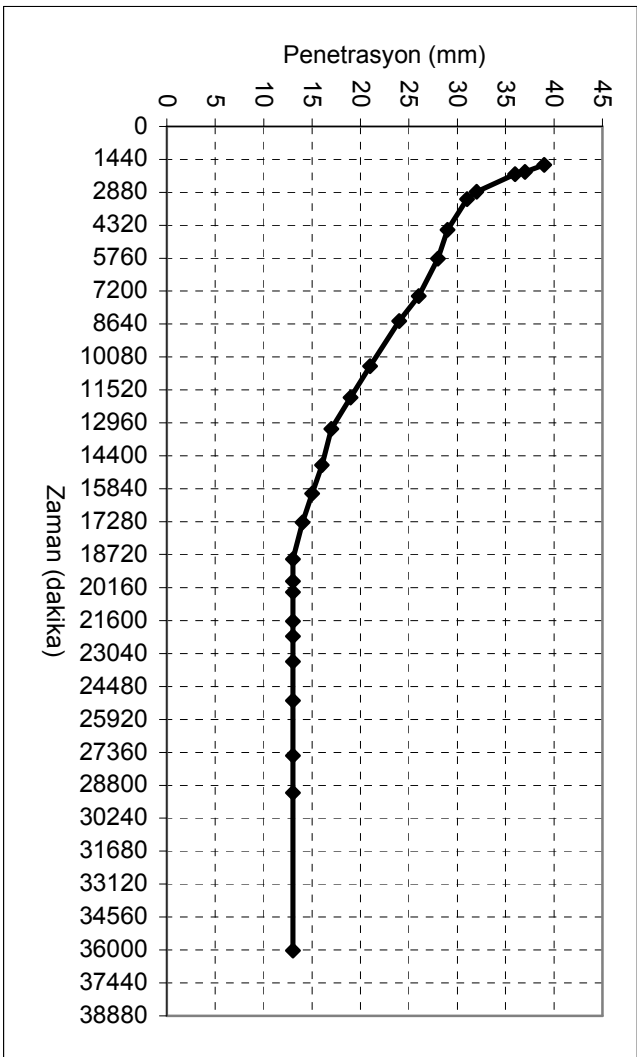


Çizelge 2. 1. S/Ç oranı 2.0 olan süspansiyonun Vicat deneyi sonucu (Penetrasyon-Zaman ilişkisi).

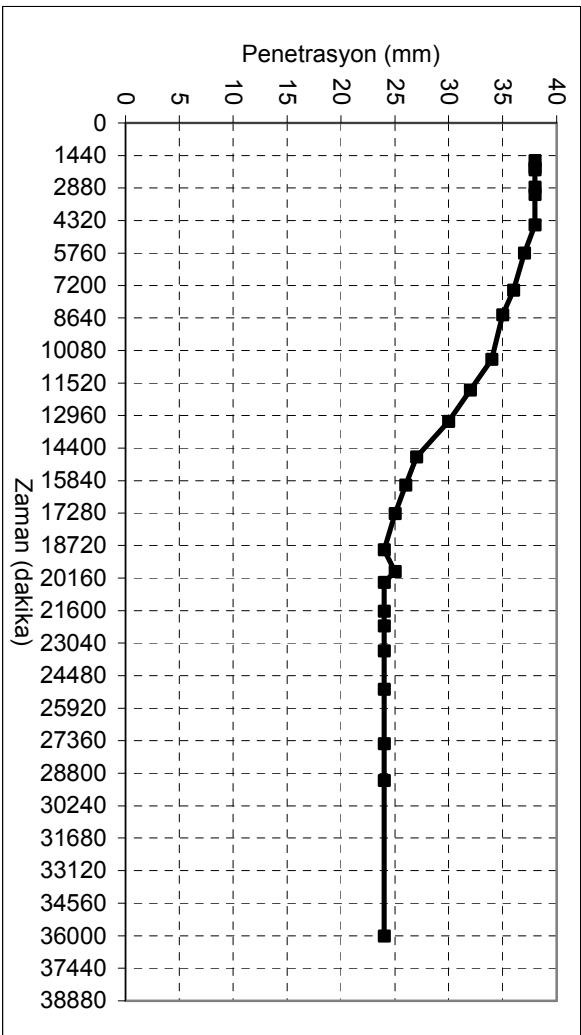


Çizelge 2. 2. S/Ç oranı 2.5 olan süspansiyonun Vicat deneyi sonucu (Penetrasyon-Zaman ilişkisi).

EK 2. (Devam) S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 olan süspansiyonların Vicat deney sonuçları

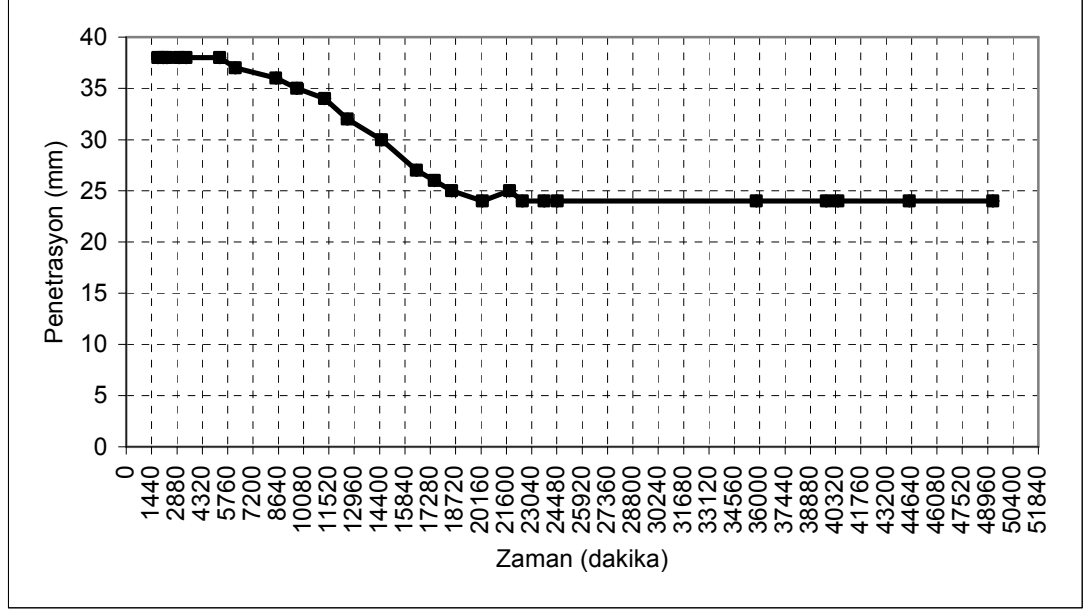


Çizelge 2. 3: S/Ç oranı 3.0 olan süspansiyonun Vicat deneyi sonucu (Penetrasyon-Zaman ilişkisi).



Çizelge 2. 4: S/Ç oranı 3.5 olan süspansiyonun Vicat deneyi sonucu (Penetrasyon-Zaman ilişkisi).

EK 2. (Devam) S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 olan süspansiyonların Vicat deney sonuçları



Çizelge 2. 5. S/Ç oranı 4.0 olan süspansiyonun Vicat deneyi sonucu (Penetrasyon-Zaman ilişkisi).

KAYNAKLAR

1. Hausmann, M., R., “Modification at depth by grouting”, Engineering Principles of Ground Modification, **Mc Graw Hill**, Singapur, 346-379 (1990).
2. Shroff, A., V., Shah, D., L., “Grouting Technology in Tunneling and Dam Construction”, **Balkema**, Brookfield, 13-71; 230-300 (1993).
3. Yıldız, B., “Rheobuild 2000 PF Katkılı Rheocem 900 İnce Taneli Çimentonun Değişik Gradasyonlu Kum Numunelere Penetrasyon Yetisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-46, (2007).
4. Mollamahmutoğlu, M. and Babuccu, F., “Zeminlerde sıvılaşma analiz ve iyileştirme yöntemleri”, **Gazi Kitabevi**, Ankara, 132-139 (2006).
5. Kutzner, C., “Grouting of Rock and Soil”, **Balkema Publishers**, Netherlands, 10-12, 190-195 (1996).
6. Nonveiller, E., “Grouting Suspensions, Solitions and Resin”, **Elsevier Science Publisher**, New York, 35-68 (1989).
7. Rawlings, C., G., Hellawell, E., E., Kilkeny, “Grouting for Ground Engineering”, **Ciria**, London, 15-74 (2000).
8. Tekin, E., “İnce taneli çimento (Rheocem 900) enjeksiyonu ile değişik gradasyonlu kumların enjekte edilebilirliği üzerinde deneysel çalışmalar”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-8, 19, 69 (2004).
9. Gallavresi, F., “Grouting Improvement of Foundation Soils”, Grouting Soil Improvement and Geosynthetics, **ASCE Geotechnical Special Publication**, 1-39 (1992).

10. Committee on Grouting of the Geotechnical Engineering Division “Preliminary Glossary of Terms Relating to Grouting”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106 (GT7): 803-815 (1980).
11. Graf, E., “Compaction Grout”, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, *ASCE Geotechnical Special Publication*, 1(30): 275-287 (1992).
12. Mitchell, J., K., “State of the Art Report on Soil Improvement”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 96(SM1) (1981).
13. Warner, J., “Practical Handbook of Grouting Soil Rock and Structures”, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 1-178, 207-295 (2004).
14. Boulanger, R., W., and Hayden, P., F., “Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil”, *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 121(12): 844-855 (1995).
15. Perret, S., Palardy, D., Ballivy G., “Rheological Behaviour and Setting Time of Microfine Cement Based Grouts”, *ACI Materials Journal*, 97 (4): 472-477 (2000) .
16. Kutzner, C., “Grouting of Rock and Soil”, *Balkema Publishers*, Netherlands, 10-12, 190-195, (1996).
17. Schwarz, L., “Roles of rheology and chemical filtration on injectability of microfine cement grouts”, Doktora Tezi, *Northwestern University*, Illinois, 9–32 (1997).
18. Hakansson, U., Hassler, L., Stille, H., “Rheological Properties of Microfine Cement Grouts”, *Tunneling and Underground Space Technology*, 7(4): 453-458 (1992).

19. Akbulut, S., Sağlamer, A., “Daneli Zeminlerde Enjeksiyon Basıncı ve Dane Çapının Enjeksiyon Edilebilirlik Açısından Etkileri”, **İMO Teknik Dergi**, Ankara, 14(3): 2985-2995 (2003).
20. Nonveiller, E., “Grouting Suspensions, Solutions and Resin”, **Elsevier Science Publisher**, New York, 35-68 (1989).
21. Banfill, P., F., G., “Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials” **Construction and Building Materials**, 8 (1): 43-44 (1993).
22. ASTM C940, “Standart Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the laboratory”, **ASTM, Pennsylvania**, 1-3 (2003).
23. ASTM C191, “Standart Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement By Vicat Needle”, **ASTM, Pennsylvania**, 4 (1): 179-184 (2003).
24. ASTM C939 “Standart Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)”, **ASTM, Pennsylvania**, 4 (2): 1-3 (2003).
25. Lombardi, G., “The role of cohesion in cement grouting of rock”, **15th International Congress On Large Dams**, Lausanne, 3: 235-260 (1985).
26. Cambefort, H., “The Principles and Applications of Grouting”, **Quarterly Journal of Engineering Geology**, 10(2): 57-95 (1977).
27. Bell, F., G., “Engineering Treatment of Soils”, **E&FN Spon.**, London, 10-160 (1993).

28. Akbulut, S., “Enjeksiyon ile granüler zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul; 1-100 (1999).
29. Burwell, E., B., “Cement and Clay Grouting of Foundations”, **ASCE Journal Soil Mechanics and Foundation Division.**, 84 (1) : 1-11 (1958).
30. Littlejohn, G., S., “Design of Cement Based Grouts”, **Grouting in Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers** , New York, 35-48, (1982).
31. Mori, A., Tamura, M., Shibata, H., and Hayashi, H., “Some Factors Related to Injected Shape in Grouting”, **Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, American Society of Civil Engineers** , New Orleans, 313-323, (1992).
32. Mnif, T., “Injectability of Fissured Media with Cement-Based Grouts”, PhD thesis, **University de Sherbrooke** , French, 1-102 (1997).
33. Perrets, S., Ballivy, G., Khayat, H., and Mnif, T., “Injectability of fine sand with cement-based grout”, **Proceeding of the Geo-Logan 97 Conference on grouting**, Logan-Utah , 289-305, (1997).
34. TS 1900-1, “İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri”, **TSE**, Ankara, 1-99, (2007).
35. ASTM C128-07a “Standart Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate”, **ASTM**, 1-7, (2007).
36. ASTM D4253 “Standart Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table ”, **ASTM**, 1-15, (2006).
37. ASTM D4254 “Standart Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density”, **ASTM**, 1-15, (2006).

38. Internet: heidelbergcement, “Ultrafin12”, http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/8AC1A6E3-9629-3BC-9BA9-18CE35C59167/0/Ultrafin12_Eng.pdf, (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : AVCI, Eyüphan
Uyruğu : T.C.
Dogum tarihi ve yeri : 03.03.1983 ANKARA
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 341 79 64
e-mail : eyubhanavci@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Dokuz Eylül Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği	2006
Lise	Ankara Gölbaşı Anadolu Lisesi	2001

Yabancı Dil

İngilizce

İş Deneyimleri

Yıl	Yer	Görev
2006-2008	Dolunay İnşaat Antares Alışveriş Merkezi İnşaatı	Teknik Ofis Mühendisi
2008-	Nata Group Türkmenistan Köprü İnşaatı	Saha Mühendisi