




**T.C.**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KATKILI İNCE TANELİ ÇİMENTO ŞERBETİNİN VE ENJEKTE EDİLDİĞİ İNCE VE ORTA TANELİ KUMLARIN BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

**Mesut ÖZARSLAN**

**DOKTORA TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Nisan–2012**
**KONYA**
**Her Hakkı Saklıdır**

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

## KATKILI İNCE TANELİ ÇİMENTO ŞERBETİNİN VE ENJEKTE EDİLDİĞİ İNCE VE ORTA TANELİ KUMLARIN BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

**MESUT ÖZARSLAN**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: PROF.DR. MURAT MOLLAMAHMUTOĞLU**

**2012, 143 Sayfa**

**Jüri**
**Prof. Dr. MURAT MOLLAMAHMUTOĞLU**
**Prof. Dr. M.YAŞAR KALTAKCI**
**Prof. Dr. MUSTAFA LAMAN**
**Prof. Dr. ÖZCAN TAN**
**Yrd. Doç. Dr. ATİLA DEMİRÖZ**

Zemin enjeksiyonları özellikle son yıllarda zeminlerde meydana gelen oturmaların, sıvılaşma etkilerinin azaltılmasında ve zemin taşıma kapasitesilerinin artırılmasında kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında enjeksiyon teknikleri araştırılmış ayrıca değişik gradasyonlu kum numunelere penetrasyon yetisi ve enjekte edilen numunelerin mukavemet ve geçirimlilik özellikleri temel mühendisliginde ekonomik çözümler sunması sebebiyle ağırlıklı olarak ele alınmıştır. Bu amaçla, sabit Su/Çimento oranlı katkısız, addiment, silis dumanı, sodyum bentonit ve addiment + silis dumanı katkılı ince taneli çimento (Ultrafin 12) süspansiyonlarının farklı rölatif sıkılıklardaki ve gradasyondaki kumlara enjekte edilebilirlikleri ile farklı Su/Çimento oranlarında katkısız ince taneli çimento (Ultrafin 12) süspansiyonları incelenerek numunelerin dayanım ve geçirimlilik özellikleri ve kumlara enjektesi incelenmiştir.

Başarılı olan numunelerin mukavemet ve permeabilite özellikleri tespit edilmiştir. Su/Çimento oranı farklı sırayla 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan karışımların reolojik özelliklerinin belirlenmesi için, sedimantasyon, vicat iğnesi ve Marsh hunisi deneyleri sonucunda enjeksiyon için en uygun Su/Çimento oranları (katkılı karışımlar için 1.0) seçilmiştir. Reolojik özelliklerin belirlenmesinden sonra değişik gradasyonda hazırlanan ince ve orta kum karışımlarına farklı rölatif sıkılıklarda ve farklı Su/Çimento oranlarında sabit basınç altında enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Özellikle ince kum içeren numunelere yapılan enjeksiyonlardabaşarılı sonuçlar vermiştir. Rölatif sıkılık ile Su/Çimento oranı arasında enjekte edilebilirlik arasında önemli bir ilişki kurulmuştur. Sıkılığın artması enjeksiyonu azaltmış Su/Çimento oranının artması ilede enjeksiyon oldukça artmıştır. Katkısız karışımlarda Su/Çimento oranı 1.5'de İKY %100'de dahil olmak üzere tüm numunelerde başarı sağlanmıştır. Ultrafin 12 süspansiyonuna addiment katkısı katılması, katkısız karışımlara oranla enjekte edilebilirliği artırmıştır. Su/Çimento oranı 1.0'da %30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda İKY de %100 dahil olmak üzere tüm enjeksiyonlarda başarı sağlanmıştır. Ultrafin 12 süspansiyonuna silis dumanı katılması enjekte edilebilirliği etkilememiştir. S/Ç oranı 1.0 ile yapılan sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 karışımlarda süspansiyonun yüksek viskozitesinde dolayı numunelere enjeksiyon yapılamamıştır. Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarında karışımdaki addiment katkısının varlığından dolayı %30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda İKY %100'de dahil olmak üzere tüm enjeksiyonlarda başarı sağlanmıştır. Numuneler kür ortamında, 3, 7, 14, 28 ve 56. Günlerde deneylere tabi tutulmuştur. Sıkılık ve S/Ç oranlarındaki artış serbest basınç mukavemetlerini azaltmıştır.

Ultrafin 12 süspansiyonuna addiment ve silika dumanı katkıları mukavemet değerlerini arttırmıştır. Addiment + silis dumanı katkılı karışımların mukavemet değerleri diğer katkısız ve katkılı karışımlardan yüksek çıkmıştır. Enjekte edilebilirlik ve mukavemet değerleri açısından en uygun S/Ç oranının 1,0 olduğu kanaatine varılmıştır. Aynı zamanda numunelere kür uygulanarak 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Sabit basınç altında deneyler yapılarak reolojik özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. 1 aylık süre sonunda bir su kaybı tespit edilmemiş ve deney setindeki su seviyesinde herhangi bir azalım tesbit edilememiştir. Deney sonuçları açısından tüm deney numuneleri geçirimsizdir.

**Anahtar Kelimeler:** Addiment, enjeksiyon edilebilirlik, ince taneli çimento, mukavemet, permeabilite, reoloji, silis dumanı, sodyum bentonit.

## ABSTRACT

### Ph.D THESIS

### DETERMINATION OF SOME ENGINEERING PROPERTIES OF MICROFINE CEMENT GROUT WITH ADDITIVES AND GROUTED MEDIUM TO FINE SANDS

### MESUT OZARSLAN

### THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
### THE DEGREE OF DOCTOR IN
### CIVIL ENGINEERING

### Advisor: PROF.DR. MURAT MOLLAMAHMUTOĞLU

### 2012, 143 Pages

### Jury
### Prof. Dr. MURAT MOLLAMAHMUTOĞLU
### Prof. Dr. M.YAŞAR KALTAKCI
### Prof. Dr. MUSTAFA LAMAN
### Prof. Dr. ÖZCAN TAN
### Assoc. Prof. Dr. ATİLA DEMİRÖZ

Soil injections of settlements occurring in soils, especially in recent years, reducing the effects of liquefaction and ground transportation is used to increase capacity. Injection techniques researched this thesis also graded sand samples of different penetration ability and strength and permeability characteristics of the injected samples is mainly due to foundation engineering is considered to offer economic solutions. In this experimental study, it is aimed to investigate the grout ability of pure micro fine cement (Ultrafin 12) and added with addiment, silica fume, sodium bentonite injection, which is composed of constant water/cement (W/C) ratios, for different relative densities and the grout ability of pure micro fine cement (Ultrafine 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. 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 grout ability decreases with increasing relative density. As the proportion of water/cement ratio increases, grout ability 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.

The grout ability of doped addiment Ultrafine 12 suspension increased compared to pure mixtures. In all injections were achieved in 30%, 0% and 70% relative firm less including entire IKY on water/ cement 1.0 ration. The added silica fame to Ultrafine 12 suspension did not affected grout ability. Because of high viscosity of Ultrafine 12 suspension added sodium bentonite made of W/C 1.0 ration did not injection to samples. In all injections were achieved in 30%, 0% and 70% relative firm less including entire IKY, due to addiment contribution on Ultrafine 12 suspension doped addiment+silica fume. 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. Increased the strength values of addiment and silica fume, the addition of Ultrafine 12 suspension. The values of strength of addiment and silica fume mixtures were higher than additives and additive. It was deducted that appropriate proportion of water/cement is 1.0 for the optimum grout ability 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. a 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.

**Keywords:** Addiment, grout ability, micro fine cement, strength, permeability, rheology, silica fume, sodium bentonite.

# ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca, her türlü destek ve katkılarıyla ile şahsıma yön veren hocalarımdan tez danışmanım Bayburt Üniversitesi Rektörü Sayın ***Prof.Dr. MURAT MOLLAMAHMUTOĞLU***'na, Bölüm Başkanım Sayın ***Prof.Dr. M.YAŞAR KALTAKCI***'ya, Sayın ***Prof.Dr. ÖZCAN TAN***'a, Sayın ***Yrd. Doç.Dr. ATİLA DEMİRÖZ***'e, Sayın ***Yrd. Doç.Dr. MEHMET KAMANLI***'ya, Sayın Öğretim Görevlisi ***Mehmet Ali LORASOKKAY***'a ayrı ayrı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Diğer taraftan deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan İnşaat Yüksek Mühendisi ***AYDIN GÖKÇE***'ye ve İnşaat Yüksek Mühendisi ***EYÜPHAN AVCI***'ya, bu tez çalışmamda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve şahsıma büyük sabır gösteren eşim ***FİLİZ ÖZARSLAN***'a, iş ortağım ***ŞİFA TALU***'ya ve ağabeyim ***YILMAZ YILDIZ***'a da ayrıca teşekkür ederim.

**MESUT ÖZARSLAN**
**KONYA–2012**

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **vi**

**ÖNSÖZ** ..... **viii**

**İÇİNDEKİLER** ..... **ix**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **xi**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **4**

2.1. Literatür Özeti ..... 4
2.2. Enjeksiyon ..... 13
2.3. Enjeksiyonun Amacı ..... 13
2.4. Enjeksiyonun Kullanım Alanları ..... 14
2.5. Enjeksiyon Türleri ..... 14
2.5.1. Kompaksiyon enjeksiyonu ..... 14
2.5.2. Permeasyon enjeksiyonu ..... 15
2.5.3. Çatlatma enjeksiyonu ..... 16
2.5.4. Dolgu (Temas) enjeksiyonu ..... 16
2.5.5. Karıştırma/Jet enjeksiyonu ..... 16
2.6. İnce Taneli Çimento Enjeksiyonu ..... 17
2.7. Temel reolojik özellikler ..... 18
2.7.1. Stabilite ..... 18
2.7.2. Katılaşma veya jelleşme süresi ..... 19
2.7.3. Viskozite ..... 19
2.8. Enjekte edilebilirlik ..... 24

**3. MATERYAL VE YÖNTEM** ..... **27**

3.1. Giriş ..... 27
3.2. Enjeksiyon Deney Düzeneği ..... 27
3.3. Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kumun Özellileri ..... 30
3.3.1. Özgül ağırlık ..... 31
3.3.2. Minimum ve maksimum boşluk oranlarının belirlenmesi ..... 32
3.3.3. Tane dağılımı ..... 34
3.3.4. Kum numunelerinin permeabiliteleri ..... 35
3.4. Deneyde kullanılan ince taneli çimentonun özellikleri ..... 35
3.4.1. İnce çimento tane dağılımı ..... 35
3.5. Ultrafin 12 Çimentosunda Kullanılan Katkı Maddeleri ..... 37
3.5.1. Addiment injektionshilfe 1 katkısı ..... 38
3.5.2. Silika dumanı ..... 38
3.5.3. Sodyum bentonit ..... 39
3.5.4. Addiment injektionshilfe 1 + Silis Dumanı ..... 39
3.5.5 Katkısız Ultrafin 12 karışımı ..... 40

3.6. Deneyde Kullanılan Süspansiyonların Özellikleri .....40
3.6.1. Katkısız süspansiyonların hazırlanışı .....40
3.6.2. Katkılı süspansiyonların hazırlanışı .....41
3.6.3. Stabilite .....42
3.6.4. Katılaşma süresi .....47
3.6.5. Viskozite .....59
3.7. Enjeksiyon Deneylerinin Yapılışı .....77
3.7.1. Enjeksiyonda kullanılacak olan kum numunelerin hazırlanması .....77
3.7.2. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi .....78
3.7.3. Kalıpların enjeksiyon düzeneğine yerleştirilerek enjeksiyona hazır hale getirilmesi .....79
3.7.4. Enjeksiyonların yapılması .....80

**4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....82**

4.1. Enjeksiyon deneylerinin sonuçları .....82
4.1.1 Katkısız Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri .....82
4.1.2 Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri .....87
4.1.3 Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri .....89
4.1.4. Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri .91
4.1.5. Addiment +silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri .....91
4.2. Burwell Kriterlerine Göre Enjekte Edilebilirlik .....94
4.3. Enjeksiyonda Başarılı Olan Numunelerin Mukavemet Deneyleri .....95
4.3.1. Enjeksiyonda başarılı olan katkısız Ultrafin 12 numunelerin mukavemet deneyleri .....96
4.3.2. Addiment katkılı Ultrafin 12 numunelerin sabit S/Ç oranı ve değişken rölatif sıkılıktaki mukavemet değerleri .....104
4.3.3. Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 numunelerin sabit S/Ç oranı ve değişken rölatif sıkılıktaki mukavemet değerleri .....109
4.3.4. Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 numunelerin sabit S/Ç oranı ve değişken rölatif sıkılıktaki mukavemet değerleri .....112
4.4. Enjeksiyonda başarılı olan numunelerin permeabilite deneyleri .....116

**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....117**

5.1. Sonuçlar .....117
5.2. Öneriler .....124

**6. KAYNAKLAR .....125**

**7. ÖZGEÇMİŞ .....131**

# SİMGELER VE KISALTMALAR

## Simgeler

| | |
|---|---|
| A | Zemin numunesi enkesit alanı, ($mm^2$) |
| Dr | Rölatif sıkılık, (%) |
| $D_{10}$ | %10 gecen zemine karşılık gelen tane çapı, (mm) |
| $D_{15}$ | %15 gecen zemine karşılık gelen tane çapı, (mm) |
| $D_{85}$ | %85 gecen enjeksiyon materyaline karşılık gelen tane çapı, (mm) |
| $D_{95}$ | %95 gecen 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 |
| Gs | Zemin özgül ağırlığı |
| h | Suyun yüksekliği, |
| $\gamma$ | Yoğunluk, ($g/cm^3$) |
| $\gamma_L$ | Deneyde kullanılan sıvının yoğunluğu, ($g/cm^3$) |
| $\gamma_{su}$ | Saf suyun yoğunluğu, ($g/cm^3$) |
| $\mu$ | Dinamik viskozite, (cP) |
| $\mu/\gamma$ | Kinematik viskozite, ($m^2/s$) |
| $\tau$ | Kayma gerilmesi, ($g/cm^2$) |
| $\rho$ | Özgül ağırlık |
| $\tau_0$ | Başlangıç akma gerilmesi, ($g/cm^2$) |
| $\rho_{max}$ | Maksimum yoğunluk, ($g/cm^3$) |
| $\rho_{min}$ | Minimum yoğunluk, ($g/cm^3$) |
| $V_W$ | 15x15 cm boyundaki metal levhaya yapışan enjeksiyon ağırlığı, g |
| $\rho_w$ | Suyun özgül ağırlığı ($g/cm^3$) |
| H | Yükseklik, (mm) |
| L | Karakteristik uzunluk, (mm) |
| i | Hidrolik eğim, (mm/mm) |
| k | Permeabilite katsayısı, (cm/s) |
| M | Kalıbın kütlesi, (g) |
| $M_1$ | Kalıp ve gevsek kuru zemin kütlesi, (g) |
| $M_2$ | Kalıp 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, ($mm^3$) |
| Vm | Deneye tabi tutulan zeminin hacmi, ($mm^3$) |

## Kısaltmalar

| | |
|---|---|
| ACI | American Concrete Institude |
| 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 |
| NPC | Normal Portland Çimentosu |
| S/C | Su/Çimento. |

# 1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, zeminin sahip olduğu mühendislik özellikleri tasarım için büyük önem arz eder. Zeminin taşıma gücü, geçirimliliği oluşabilecek tasmanlar, kütle hareketleri her zaman tasarım beklentilerini karşılayacak nitelikte değildir. Geoteknik mühendisliğinin önemli çalışma alanlarından birisi de, zeminin sergilediği olumsuz mühendislik özelliklerinin kullanılan değişik iyileştirme teknikleri ile arzu edilir düzeye getirilmesidir.

Zemin iyileştirme yöntemleri; zeminde karşılaşılan sorun ve istenilen iyileşme türü ve miktarına bağlı olarak birçok alternatif sunar. Enjeksiyon her geçen gün daha geniş kullanım alanı bulan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Kötü zemin üzerine yapıların inşa edilmeye başlamasıyla birçok yeni zemin iyileştirme tekniği geliştirilmiştir. Bunlardan biride enjeksiyon tekniğidir. Sıvı şeklindeki karışımların basınç altında zemine tatbik edilmesiyle zemin özelliklerini iyileştirirler. Enjeksiyon ile zeminin mekanik özellikleri artar geçirimlilik özelliği azalır (Gouvvenot, 1998; Ribay ve ark., 2006).

Enjeksiyon tekniği her geçen gün teknoloji ile beraber gelişmektedir. En yaygın ve en eski bilinen enjeksiyon türü permeasyon enjeksiyonudur. Bu enjeksiyon türünde amaç; sertleştiğinde mukavemeti daha yüksek, permeabilitesi daha az, herhangi bir deplasmana yol açmadan boşlukların doldurulması işlemidir. Süspansiyonlar çimento partiküllerinin su ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılmasından elde edilir. Solüsyonlar ise kimyasal maddeler kullanılarak hazırlanan enjeksiyonlardır.

Portlant çimentosunun kaba kumdan çakıllara kadar nüfuz edebilmesi ince kumlar için kimyasal enjeksiyonlara gereksinimi doğurmuştur. Kimyasal enjeksiyonlarda karşılaşılan olumsuzluklar çevreye verdiği zararlar nedeni ile kullanımı sınırlandırılmıştır. Bundan dolayı alternatif olarak özellikle ince kumlar için çimento enjeksiyonu geliştirilmiştir.

Enjeksiyonlar genellikle, taşıma gücünün arttırılmasında, 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 arttırılmasında vb. yerlerde kullanılmaktadır (Shroff ve Shah, 1993).

Permeasyon enjeksiyonu enjeksiyon teknikleri içinde en çok bilinenidir. Çimento veya kimyasal katkılardan oluşan şerbetin düşük basınçlar altında zemine uygulanmasıdır. Basınçla uygulanan şerbet zemin boşluklar ile kaya çatlaklarına dolar. Boşluklara dolan şerbetin prizini almasıyla geçirimsiz beton kütleleri oluşur (Schwardz ve Chirumalla, 2007).

Permeasyon enjeksiyonunun düşük enjeksiyon basıncından dolayı zeminde herhangi bir ötelenme ve sıkışma oluşmaz. Permeasyon enjeksiyonunda enjeksiyon materyali olarak süspansiyon ve solüsyon karışımlar kullanılır (Yıldız, 2007).

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 (Mollamahmutoğlu ve Yılmaz, 2011).

**Tezin Amacı;**

Hazırlanan bu tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında daha önce yürütülen " Farklı Rölatif Sıkılık ve Tane Dağılımına Sahip Kum Zeminlerde ULTRAFİN 12 Enjeksiyonu Permeasyon Yetisi" yüksek lisans tezinin devamı niteliğindedir.

İnce taneli çimentolardan olan Ultrafin 12'ye addiment, bentonit ve silika dumanı katkı maddeleriyle ince ve orta kumlara enjekte edilebilirlikleri ile enjekte edilen numunelerin mukavemet ve permeabilite özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, oluşturulan enjeksiyon şerbetlerinin öncelikle reolojik özellikleri belirlenmiş, orta ve ince taneli kum ile siltlere uygun görülen enjeksiyon şerbetlerinin penetrasyon yetisi değerlendirilmiştir. Enjeksiyon çalışmaları, farklı S/Ç oranlı karışımlarla farklı rölatif sıkılıktaki kumlara yapılmıştır.

Bu çalışmada, ince taneli çimento + katkı maddesi + su karışımının değişik oranlardaki reolojik özelliklerinin araştırılması, uygun karışımlar için farklı dane dağılımına sahip kum numunelere, basınç altında çimento süspansiyonunun penetrasyon yetisi, enjeksiyon sonrası numunelerin serbest basınç dayanımı ve permeabilite değerlerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışma aşağıdaki şekilde planlanmış ve gerçekleştirilmiştir:

1. İnce taneli çimento (Ultrafin 12) ve çalışmanın esasını teşkil eden katkı maddeleri addiment, bentonit ve silika dumanı yurt dışından temin edilmiştir.
2. Enjekte edilecek olan kum numunesi ASTM standartlarına göre ince ve orta olmak üzere iki kısma bölünerek özgül ağırlıkları tespit edilmiştir.
3. Enjeksiyondan önce ince, orta kum numunelerin tane boyu dağılımı ve boşluk oranları bulunmuştur.
4. Permeabilitelerin tespiti için deneylerde kullanılacak kum numunelerin hidrolik iletkenlikleri bulunmuştur.
5. Reolojik özelliklerin ortaya konulması amacıyla sedimantasyon, vicat iğnesi ve Marsh hunisi deneyleri yapılmıştır.
6. Enjeksiyon deneyleri için Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuarında yer alan mevcut enjeksiyon deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneği mevcut gerçek durumu yansıtabilecek şekilde ve hataları minimize edecek şekilde düzenlenmiştir.
7. Farklı karışım oranlarındaki kum numuneleri enjeksiyon kalıplarına yerleştirilerek Ultrafin 12'ye addiment, bentonit ve silika dumanı katkı süspansiyonlarının enjeksiyon deneyleri yapılmıştır.
8. Enjeksiyon sonunda uygun katkılı numuneler küre tabi tutularak 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki mukavemetlerinin tespiti için tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.
9. Enjeksiyon sonunda uygun katkılı numuneler küre tabi tutularak 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki permeabilitelerinin belirlenmesi amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır.
10. Son olarak Ultrafin 12 süspansiyonlarına addiment, bentonit ve silika dumanı katkılarının kumlara enjekte edilebilirlikleri ve karışımların uygun S/Ç oranlı reolojik özellikleri belirlenmiştir.

# 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

## 2.1. Literatür Özeti

**Aitcin ve ark., 1984**'de yaptıkları çalışmada, çimento ve çimentonun ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 oranında silis dumanı ilave ederek elde edilen karışımların mukavemeti, vizkosite, tiksotropi, ve sulanma miktarlarını incelemişlerdir. Deneyler sonrasında en büyük basınç mukavemetinin % 20 silis dumanı ilave edilmiş karışımda elde edilmiş olup referans olarak alınan çimento karışımından %10 yüksek olduğunu ve bu karışımda sulanma miktarının azaldığını tespit etmişlerdir.

**Mitchell ve Wentz, 1991**'de yaptıkları çalışmada, gevşek-orta sıkı çakıllı kumlu tabakada permeasyon enjeksiyonu uygulamışlardır. Uygulamada sodyum silikat, MC 500 mikro-ince çimento ve priz süresi kontrolünde hacimce % 0,1'den az fosforik asit karışımlı harç kullanmışlardır. Araştırmacılar uygulama yapılan sahada Loma Prieta depremi sonrasında zeminde oturma ve yer hareketinin olmadığını bildirmişlerdir.

**Sandra ve ark., 1992**'de yaptıkları çalışmada, çimento, uçucu kül, bentonit ve hava sürükleyici katkılar kullanılarak karışımların mukavemet değerlerini ölçmüşlerdir. Kum ve uçucu kül %50 ile %100 oranlarında, % 0,5 bentonit ve % 1 hava sürükleyici katkı maddeleri karışımlarda kullanmışlardır. Mikserde karıştırdıkları karışımları 7,1 cm. çapında ve 14 cm yüksekliğinde flexi-glas kalıplara dökerek 28 gün %100 nemde kür etmişlerdir. Deneyler sonrasında %50 kum ve %50 uçucu kül karıştırılmış Su/Çimento oranının 1/1 olduğu numunelerde maksimum mukavemeti elde etmişlerdir.

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

**Vipulanandan ve Shenoy, 1992**'de yaptıkları çalışmada, çimento esaslı karışımlar ile enjeksiyona tabi tutulan kumların geoteknik özelliklerini incelemişlerdir. Çimento, çimento-sodyum silikat, çimento-bentonit, çimento-kalsiyum silikat, çimento-silis dumanı ve çimento-uçucu kül karışımlarının vizkosite, sertleşme süresi, sulanma ve basınç mukavemetini incelemişlerdir. Su/Katı oranı 1/1 olan karışımları kuma enjeksiyon ederek 38 mm. çapında 74-90 mm. uzunluğunda numuneler elde etmişlerdir. Su içinde kür edilen numunelerin 7 ve 28 günlük basınç mukavemetlerini belirlemiştir. En yüksek basınç mukavemetini çimento karışımı verirken silis dumanı ile yapılan

karışımın basınç mukavemeti bentonit ile yapılan karışımdan daha yüksek çıktığını belirlemişlerdir. Buna karşılık en fazla sulanma çimento karışımlarında oluşmakta diğer karışımlarda ise sulanma miktarının büyük ölçüde düşmekte olduğunu belirtmişlerdir. Enjeksiyon yapılan numunelerde bentonit bulunanlarda çimento ve silis dumanı kullanılan numunelerden daha fazla basınç ve çekme dayanımı bulmuşlardır.

**Krizek ve Helal, 1992**'de yaptıkları çalışmada, rölatif sıkılığı %65 ± %5 olan kumu 70 kPa enjeksiyon basıncı altında ince daneli çimento karışımı ile enjekte ederek 7 ve 28 günlük geçirgenlik basınç ve çekme mukavemetlerine bakmışlardır. Su/Çimento oranı 1 ile 3 arasında değişen karışımı düşey olarak enjeksiyon ettikten sonra 5 cm çapında 15 cm yüksekliğindeki numunelerin yarısını düşey yarısını yatay kür etmişlerdir. Düşey olarak kür edilen numunelerin geçirgenliği yatay olarak kür edilenlere göre daha düşük çıktığını, su/çimento oranı arttıkça geçirgenliğin aynı oranda arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca 1/1 Su/Çimento oranındaki numunelerin yatay ve düşey kür edilmeleri arasında basınç mukavemetlerinde bir değişiklik olmamasına rağmen su/çimento oranı 1.5/1 ve daha yüksek olanları için yatay olarak kür edilenlerin basınç mukavemetleri yüksek çıktığını belirtmişlerdir.

**Tosca ve Evans, 1992**'de yapmış oldukları çalışmada, 1,25 mm'den büyük olan kaya çatlakları ile zemin boşluklarının ekonomik olarak doldurulması için çimento, uçucu kül, bentonit ve hava sürükleyici katkıları farklı oranlarda karıştırarak çok sayıda harç elde etmişlerdir. Kum ve uçucu külü %50 ile %100 oranlarında doğal katkı olarak kullanmışlardır. Bazı karışımlarda %0,5 bentonit ve %1 hava sürükleyici katkı addeleri kullanmışlardır. Mikserde karıştırdıkları harçları 7,1 cm. çapında ve 14 cm yüksekliğinde kalıplara dökerek 28 gün boyunca nemli ortamda kür etmişler ve 1 gün, 7 gün, 14 gün ve 28 günlük basınç mukavemetlerini ölçmüşlerdir. %100 kum dolgu kullanılan numunelerden en yüksek basınç dayanımını elde etmişlerdir. Hava sürükleyici katkıların kullanıldığı kum/uçucu kül ve uçucu kül karışımlarından ise en düşük basınç dayanımını elde etmişlerdir. %50 kum ve uçucu kül ile yaptıkları harçlarda bentonit oranına bağlı olarak şişmenin meydana geldiğini fakat bentonitin sulanmayı azaltmasından dolayı büzülmeyi önlediğini belirtmişlerdir.

**Mori ve ark., 1992**'de yapmış oldukları çalışmada, iki farklı laboratuar enjeksiyon model düzeneği ve renkli harçlar kullanarak harcın sertleştikten sonraki geometrik şekli ve enjeksiyon edilebilirliğine etkisini incelemişlerdir. Enjeksiyon basıncı ile enjeksiyon edilebilirliğin arttığını fakat çevre basıncının artması ile enjeksiyon edilebilirliğin azaldığını belirtmişlerdir.

**Schwardz ve Krizek, 1992**'de yaptıkları çalışmada, Su/Çimento oranının artmasıyla mukavemet değerlerinin düştüğünü görmüştür.

**McFarlane ve Holtz, 1992**'de yapmış oldukları çalışmada, geçirimsiz duvarlarda yaygınca kullanılan zemin çimento-bentonit karışımlarının esnekliğini artırmak, ortamın permeabilitesini düşürmek için ince kum ve silte çelik lif, karbon lif, kevlor, polipropilen lif, stirenelateks, akrilik lateks, epoksi reçinesi ve asfalt emülsiyonu enjekte etmişlerdir. Deney sonucunda katkıların, numunelerin elastisite modülünü, basınç mukavemetini ve geçirgenliğini düşürdüğü saptamışlardır. Katkılı numunelerin basınç mukavemetinin katkısız numuneye göre %40 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

**Shroff ve Shah, 1992**'de yapmış oldukları çalışmada, polimer-çimento harçlarının sulu ortamdan etkileşimini, toprak ve kaya dolgu barajların temellerinin iyileştirmesinde kullanımını, karışımların viskozite ve mukavemetlerinin zamanla değişimini araştırmışlardır.

**Langevin, 1994'**de yaptığı çalışmada, katkısız düşük Su/Çimento oranlı ince taneli çimento karışımlarının Newton sıvısı gibi davranış sergilemediğini görmüştür. Karışımlardaki Su/Çimento oranının artmasının ve karışıma akışkanlaştırıcı maddelerin katılması ile karışımların viskoz davranış sergilemeye başladığını görmüştür.

**Langevin, 1994**'de yaptığı bir diğer çalışmada, ince taneli çimento karışımlarının priz sürelerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmada; sıcaklığın, çimento birleşiminin, çimento partikül boyutunun, Su/Çimento oranının, katkı maddesi eklenmesinin priz sürelerini eklediğini görmüştür.

**Schwardz ve Krizek, 1994**'de yaptıkları çalışmada süspansiyondaki Su/Çimento oranının artmasıyla enjekte edilebilirliğin arttığını görmüştür.

**Perret ve ark., 1997**'de yaptıkları çalışmada, normal portland çimentosu ve ince daneli çimento kullanarak değişik Su/Çimento oranlarında karışımlar hazırlamışlardır. Karışımlarda değişik miktarda silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı ve su tutucu katkılar kullanmışlardır. Karışımların reolojik özellikleri ve enjeksiyon edilebilirliklerini incelemişlerdir. Tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. 22 mm. iç çapında 370 mm. uzunluğundaki silindir kalıplarda bulunan kumun içine 75 kPa basınç altında karışımları enjekte etmişlerdir. Enjeksiyonun süreleri ve karışımın ilerlediği mesafeyi ölçmüştür. Buna göre Su/Çimento oranı 1.2 ve 2 olan hem portland hem de ince daneli çimento karışımında enjeksiyon %100 olarak yapılabilmiş fakat 0.5 ve 0.6 olan karışımlarda %14 ve %54 gibi oranlarda kaldığını görmüşlerdir. İnce taneli

karışımın enjeksiyon süresi portland çimentosunun %10'nu kadar olduğunu ölçmüşlerdir.

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

**Lowther ve Gabr, 1997'**de yaptıkları çalışmada, enjeksiyonu yaptıkları kumun geçirgenlik ve mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. Mukavemet deneyleri için %50 jel süresi ayarlayıcısı, % 45 su ve % 5 jel sertleştiricilerden oluşan harçları kullanmışlardır. Üniform kumu 30 cm çapında 60 cm uzunluğundaki kolon içerisine koymuşlar ve daha sonra 2 litre/dakika hızda enjeksiyon yapmışlardır.

**Akbulut, 1999**'da yapmış olduğu çalışmada, rölatif sıkılığı 0,30 ve 0,80 olan numunelere çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento-kil karışımları ile enjeksiyon yapmıştır. Enjeksiyon basıncı, zemin dane çapı, boşluk oranı, karışım suyu oranı, katkı maddelerinin tipi ve miktarı ile zaman parametre alınarak deneyler yapmıştır. Silis dumanı katılmış karışımlarla enjekte edilen numunelerin basınç mukavemeti Su/Çimento oranı 1/1 olan karışımlarda %30 ile 70 oranında arttığını belirtmiştir. Uçucu kül karışımında mukavemetlerin %5-25 oranında, kil katılmış karışımlarla yapılan enjeksiyonlarda numunelerin mukavemeti %15 oranında düştüğünü belirtmiştir. Permeabilite üzerine yapılan deneylerde permeabilite katsayısının 1.26 cm/sn'den 10-5 ile 10-7 arasına düştüğünü bildirmiştir.

**Toumbakari, 1999**'da yapmış olduğu çalışmada, enjeksiyon harçlarının mekanik ve ultrasonik mikser ile karıştırma işlemlerini araştırmışlardır. Harçların yeni karıştırıldığı andaki nüfuz edilebilmesi ve viskozitesinin karıştırma metotlarıyla nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Mekanik karıştırma işleminde çimento ve ince parçacıklardan oluşan karışımların zemin içerisine nüfuz edilemediğini, ultrasonik

karıştırma işleminde sınırlı s/ç oranında bile çok yüksek nüfuz edebildiğini belirtmişlerdir.

**Gallagher ve Mitchell, 2002**'de yaptıkları çalışmada, kolloidal silis enjeksiyonunun, doymuş gevşek kumun deformasyon özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için tekrarlı üç eksenli deneyler yapmışlardır. %5, %10, %15 ve %20 oranındaki kolloidal silis harcı ile enjeksiyon yaptıktan sonra numuneler üzerinde tekrarlı üç eksenli deneyler yapmışlardır. Doğal numunelerin tekrarlı üç eksenli deneylerinde eksenel deformasyonlarının artığı ve deney ilerledikçe toptan göçtüğünü buna karşılık silis ile enjeksiyon yapılmış numunelerinde deformasyonların küçük olduğunu belirtmişlerdir. Enjeksiyon uygulanmış zemini sertleştikten hemen sonra ve 4 ile 56 gün arasında kür ettikten sonra tekrarlı üç eksenli deneyine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda silika karışım oranının arttıkça zeminin sıvılaşma riskinin aynı oranda azaldığını ifade etmişler, %5 oranında silika karışımının sıvılaşma riskini kabul edilebilir miktarda düşürdüğünü belirtmişlerdir.

**Warner, 2004**'de yaptığı çalışmada, zemin enjeksiyonunun inşaat mühendisliğinde geniş uygulama alanlarına dikkat çekmiş enjeksiyonunun uygulama alanlarını;

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

**Akbulut ve Sağlamer, 2002**'de yaptıkları çalışmada, enjeksiyonu zeminlerin ve kayaların mühendislik özelliklerinin (Mukavemet, Geçirgenlik, Deformasyon)

iyileştirilmesi için zemin boşluklarına enjeksiyon materyalinin basınç altında enjekte edilmesi işlemi olarak tanımlamışlardır.

**Coric ve ark., 2003**'de yaptıkları çalışmada, yüksek oranlı su azaltıcı içeren S/Ç oranı 0,4 olan harçların akışkanlık, akma özellikleri, kararlılık, sertleşme ve hidratasyon oranı parametrelerini incelemişlerdir. Harçların ayrıca dayanım, gözenek boyutu ve dağılımı ile mikro yapı özelliklerini de incelemişlerdir. Aynı kıvam için, viskozite değiştirici karışımlar ile polinaftalin sülfonat veya polimelemin sülfonat bileşimi için yüksek oranlı su azaltıcı ihtiyacının %10 ile %40 arasında arttığını belirtmişlerdir.

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

**Karahanlıoğlu, 2001'**de yaptığı çalışmada, farklı oranlardaki bentonit, uçucu kül ve silis dumanı ile birlikte hazırlanan çimento enjeksiyonu karışımları granüler zeminlere uygulanmış ve bu zeminlerin enjeksiyondan sonraki serbest basınç mukavemetleri araştırmıştır. Deneyler için Taguchi Yöntemine göre 3 parametreli 4 seviyeli L16 deney tasarım tablosu seçilmiş, enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, kullanılan katı ağırlığının %0, %0.5, %1 ve %3'ü oranlarında bentonit, %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında uçucu kül ve %0, %5, %10 ve %20'si oranlarında silis dumanı kullanmıştır. Su/katı oranı 1 olarak hazırlanan enjeksiyon karışımları; rölatif sıkılığı 0.70, tane çapı aralığı 2-10 mm olan, 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik flexiglas kalıplar içerisindeki çakıl örneklerine 1 atmosfer basınç altında enjekte etmiştir. Bu örneklerin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerini belirlemiş, sadece çimento ile hazırlanan enjeksiyon karışımı uygulanmış numunelerin deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Bentonit, uçucu kül ve silis dumanının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerinide araştırmış, yapılan deneyler sonucunda; katkı maddeleri kullanılarak çimento enjeksiyonu uygulanmış zemin örneklerinin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin, sadece çimento ile enjeksiyon uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha yüksek olduğunu görmüştür. Ayrıca enjeksiyon uygulanmış zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

üzerinde en çok etkili parametrenin silis dumanı, en az etkili parametrenin ise bentonit olduğunu belirtmiştir.

**Güngörmüş, 2003**'de yapmış olduğu çalışmada farklı oranlardaki bentonit, uçucu kül ve silis dumanı ile birlikte hazırlanan çimento enjeksiyonu karışımları granüler zeminlere uygulamış ve bu zeminlerin enjeksiyondan sonraki serbest basınç mukavemetlerini araştırmıştır. Deneyler için Taguchi Yöntemine göre 3 parametreli 4 seviyeli L16 deney tasarım tablosu seçilmiş, enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, kullanılan katı ağırlığının %0, %0.5, %1 ve %3'ü oranlarında bentonit, %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında uçucu kül ve %0, %5, %10 ve %20'si oranlarında silis dumanı kullanmıştır. Su/Katı oranı 1 olarak hazırlanan enjeksiyon karışımları; rölatif sıkılığı 0.70, tane çapı aralığı 2-10 mm olan, 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik flexiglas kalıplar içerisindeki çakıl örneklerine 1 atmosfer basınç altında enjekte etmiştir. Bu örneklerin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerini belirlemiş, sadece çimento ile hazırlanan enjeksiyon karışımı uygulanmış numunelerin deney sonuçları ile karşılaştırma yapmıştır. Bentonit, uçucu kül ve silis dumanının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerinide araştırmış, yapılan deneyler sonucunda; katkı maddeleri kullanılarak çimento enjeksiyonu uygulanmış zemin örneklerinin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin, sadece çimento ile enjeksiyon uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha yüksek olduğunu görmüştür. Ayrıca enjeksiyon uygulanmış zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri üzerinde en etkili parametrenin silis dumanı, en az etkili parametrenin ise bentonit olduğunu belirlemiştir.

**Zaimoğlu, 2003**'de yaptığı çalışmada, farklı oranlardaki bentonit, uçucu kül ve silis dumanı ile birlikte hazırlanan enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemeti, dinamik viskozite, çökelme, priz süreleri ve akma özelliklerini araştırmıştır. Deneyler için Taguchi Yöntemine göre 3 parametreli 4 seviyeli L16 deney tasarım tablosu seçilmiştir. Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, kullanılan katı ağırlığının %0, %0.5, %1 ve %3' ü oranlarında bentonit, %10, %20, %30 ve %40' ı oranlarında uçucu kül ve %0, %5, %10 ve %20' i oranlarında silis dumanı kullanmıştır. Hazırlanan enjeksiyon karışımları için laboratuarda serbest basınç (7, 14 ve 28 günlük), çökelme, Marsh Hunisi, Vicat iğnesi ve dönmeli viskozimetre deneylerini yapmıştır. Deneyler üç farklı Su/Katı (S/K) oranlarında (0.75, 1.00 ve 1.25) yapmış olup deney sonuçlarını Taguchi Yöntemine göre ayrı ayrı değerlendirmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda; enjeksiyon karışım örneklerinin serbest basınç mukavemeti değişimi

üzerinde en etkili parametrenin uçucu kül, en az etkili parametrenin ise bentonit olduğunu belirlemiştir. Priz başlama süresi üzerindeki en etkili parametreler silis dumanı ve uçucu kül olurken, priz bitiş süresi üzerinde ise bentonit ve uçucu külün etkili olduğunu görmüştür. Akma süresi ve çökelme miktarı üzerinde ise en etkili parametrenin silis dumanı olduğunu belirlemiştir. Enjeksiyon karışımlarının incelenen özellikleri için optimum karışım oranlan Taguchi Yöntemi ile belirlemiş ve bu oranlar için doğrulama deneyleri yapmıştır. Ayrca %10 uçucu kül, %20 silis dumanı ve %3 bentonit, %10 uçucu kül, %20 silis dumanı kullanılarak hazırlanan enjeksiyon karışımlarının; rölatif sıkılığı 0.70, tane çapı aralığı 2-10 mm olan kalıp içerisindeki çakıl örneklerine 1 atmosfer basınç altında enjekte etmiştir.

**Kavak ve ark., 2005**'de yaptıkları çalışmada, kumlu, çakıllı zeminleri, boşluklu yada çatlaklı kayaları doldurup mühendislik özelliklerini değiştirmek ve sağlamlaştırmak amacıyla zemine çeşitli maddeleri basınçla verilmesi işlemine enjeksiyon olarak tanımlamışlardır. Literatürde enjeksiyon için yapılan çalışmaların çimento bazlı karışımlar ve kimyasal bazlı karışımlar olarak ikiye ayrıldığı görmüşler ve çalışmaların çoğunun numunelerin mukavemeti üzerine yapıldığını görmüşlerdir.

**Abraham, 2006**'da yaptığı çalışmada, ince taneli çimentolar ile birçok enjeksiyon denemesi yapmış ve enjekte edilebilirliğin zemin tipi, çimento tipi, numene boyutu, Su/Çimento oranı, Rölatif sıkılık, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon düzeneği gibi etkenlerle değiştiğini görmüştür.

**Mollamahmutoğlu ve Babuccu, 2006**'da yaptıkları çalışmada, enjeksiyon materyallerinin enjeksiyon sonrası, ya hemen ya da belirli bir zaman aralığında katılaşacak veya jelleşecek şekilde tasarlanacaklarını ifade etmişlerdir.

**Özgan ve diğerleri, 2007**'de düşük poroziteli zemin numunlerine laboratuvar ortamında çimento enjeksiyonu uygulamışlardır. Bu kapsamda Microcem 900 H tipi çimentoya farklı tip ve oranlarda süper akınkanlaştırıcı ile katkı maddeleri kullanarak enjeksiyon yapılmış olan farklı özelliklerde zemin numunlerinin basınç dayanımları belirlenmiştir. En büyük basınç dayanımının 118 kgf/cm$^2$ olduğunu bu değerin ise 20/80 Kum/Çakıl oranına sahip, % 35 rölatif sıkılıkta ve 6 atmosfer enjeksiyon basıncına maruz kalan % 5 oranında SAK ilave edilmiş zemin numunelerinde elde edilmiştir. Diğer taraftan en düşük basınç dayanımının ise 63 kgf/cm$^2$ ile 2 atmosfer basınca maruz kalan 40/60 Kum/Çakıl oranına sahip rölatif sıkılığı %35 olan % 3 $Na_2Si_4$ ilave edilmiş zemin numunelerinde olduğunu belirlemişlerdir.

**Yıldız, 2007**'de yaptığı çalışmada, ince taneli çimento+katkı maddesi+su karışımının değişik oranlardaki reolojik özelliklerinin araştırılması, uygun karışımlar için farklı dane dağılımına sahip kum numunelere, basınç altında çimento süspansiyonunun penetrasyon yetisi, enjeksiyon sonrası numunelerin serbest basınç dayanımı ve permeabilite değerlerini tespit etmiştir.

**Mutman, 2007**'de yaptığı çalışmada, düşük basınçlı çimento enjeksiyonu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesini incelemiştir. Çalışma kapsamında laboratuarda yapılan çalışmalarda farklı dane dağılımındaki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimini incelemiştir. Laboratuar çalışması sonunda yeterli serbest basınç mukavemeti için gerekli olan enjeksiyon basıncı ve harcın Su/Çimento (S/Ç) oranını belirlemiş, daha sonra seçilen farklı özellikteki sahalarda enjeksiyon uygulaması yapılarak zemin özelliklerinin değişimini incelemiştir.

**Mutman ve Kavak, 2007**'de yapmış oldukları çalışmada, zemin sıvılaşma riskini azaltmak amacı ile sahada kumlu zeminde düşük basınçlı çimento enjeksiyonu uygulamışlardır. Enjeksiyon öncesinde sahada standart penetrasyon deneyi ve koni penetrasyon deneyi deneylerini yapmışlar, deneyler sonrasında geoteknik özelliği belirlenen zeminde belli aralıklarla derinliğe bağlı olarak 100 kPa ve 150 kPa basınçla çimento enjeksiyonu uygulamışlar, enjeksiyonda su/çimento oranı 1 olan harç kullanmışlardır. Enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra sahalarda tekrar standart penetrasyon ve koni penetrasyon deneyleri yapmışlar, enjeksiyon öncesi ve sonrasında arazi deneylerinden elde edilen veriler ile zeminin sıvılaşma riskinin değişimi inceleyerek, kumlu zeminlerde düşük çimento enjeksiyonu ile sıvılaşma güvenlik sayılarında önemli artışlar gözlemlemişlerdir.

**Avcı, 2009**'da yaptığı çalışmada, ince taneli çimento enjeksiyon malzemelerinden biri olan Ultrafin12' nin, katkı malzemesi kullanılmadan, S/Ç oranı sabit tutularak farklı rölatif sıkılıktaki ince ve orta karışımlı kum numunelere ve S/Ç oranı değiştirilerek sabit rölatif sıkılıktaki ince ve orta kum karışımlı numunelere enjekte edilebilirlikleri, ayrıca enjekte edilen numunelerin mukavemet ve permeabilite özelliklerini belirlemiştir.

**Tekin ve Mollamahmutoğlu, 2010**'da yaptıkları çalışmada, çok ince taneli çimento (Rheocem 900) süspansiyonu ile farklı gradasyonlara sahip kumların enjekte edilebilirliği laboratuvar deneyleriyle araştırılmış, ince, orta ve iri kumlardan oluşan ve ince kum yüzdesi (İKY) 10, 15, 20, 25 ve 30 olan numunelere, Su/Çimento (S/Ç) oranı 0.8, 1.0, 1.2 olan süspansiyonların enjeksiyon deneylerini yapmş, deney sonuçlarına

göre literatürdeki enjekte edilebilirlik ilişkilerinin başarısını araştırmıştır. Sonuç olarak ince kum yüzdesinin ve S/Ç oranının enjekte edilebilirliği kontrol eden önemli etkenlerden olduğunu tespit etmişlerdir.

**Tekin ve Akbaş, 2010**'da yaptıkları çalışmada, çok değişkenli istatistiksel bir teknik olan diskriminant analizinin, enjekte edilebilirliğin tahmin edilmesine uygulanabilirliğini araştırmıştır. Öncelikle diskriminant analizinin yapısını özetlemiş, enjekte edilebilirliğin, süspansiyonun reolojik özellikleri, enjeksiyon basıncı, zeminin dane çapı dağılımı, zeminin rölatif sıkılığı ve ince dane miktarı ile değiştiği göz önünde bulundurarak, literatür ve deneysel çalışmalardan 88 adet enjeksiyon veri seti sağlamış, bu veriler üzerinde diskriminant analizini uygulamışlardır.

**Mollamahmutoğlu ve Yılmaz, 2011**'de yapmış oldukları çalışmada, permeasyon enjeksiyonunda enjeksiyon malzemesi olarak birçok malzeme kullanıldığını, portland çimentosunun bunlardan birisi olduğunu fakat tane çapı dağılımının büyük olmasından dolayı orta ve ince kumlara nüfuz etmesinin zor olduğunu belirtmişlerdir. Bu yüzden ince ve orta kumlara penetre olabilecek daha küçük tane çaplı malzemelere ihtiyaç duyulduğunu tespit etmişlerdir.

## 2.2. Enjeksiyon

Enjeksiyon, zeminlerin ve kayaların mühendislik özelliklerinin (Mukavemet, Geçirgenlik, Deformasyon) iyileştirilmesi için zemin boşluklarına enjeksiyon materyalinin basınç altında enjekte edilmesi işlemidir (Akbulut ve Sağlamer, 2002). Enjeksiyon materyalleri, enjeksiyon sonrası, ya hemen ya da belirli bir zaman aralığında katılaşacak veya jelleşecek şekilde tasarlanırlar (Mollamahmutoğlu ve Babuccu, 2006).

## 2.3. Enjeksiyonun Amacı

Enjeksiyonda amaç zeminin ya da kaya kütlesinin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesidir. Enjeksiyon iki önemli amaca sahiptir;

- Daha mukavim, daha sıkı ve/veya daha düşük permeabiliteli zemin veya kaya kütlesi oluşturmak,
- Zemin veya kaya içindeki boşlukları veya yapı ile yer arasındaki boşlukları doldurarak gerilme transferini (aktarımını) sağlamaktır (Mollamahmutoğlu ve Babuccu, 2006).

## 2.4. Enjeksiyonun Kullanım Alanları

İnşaat Mühendisliğinde enjeksiyon uygulamaları aşağıdaki nedenden dolayı uygulanmaktadır (Önalp, 1985).

- Aşırı oturmaların oluşmaması için boşlukların doldurulması,
- Suyun akışını engellemek ya da azaltmak amacıyla perdeler oluşturulması,
- Zemini güçlendirerek komşu kazı ve kazık çakımıyla oluşacak etkilerin önlenmesi,
- Yer altı suyu altındaki temel inşaatlarında zemin kurutma işleminden kaçınılma,
- Tünel kazısı sırasında oluşabilecek kazı duvarları ile üstteki tabakaların hareketinin kontrolü,
- Yanal toprak basıncını kısıtlama,
- Kazıkların yanal yük kapasitesini arttırma,
- Temellerin onarımı sırasında destek sağlama,
- Yamaç stabilitesini arttırma,
- Sıvılaşmanın önlenmesi,
- Hacim değişimi gösteren zeminde büzülme ve şişmenin azaltılması.

## 2.5. Enjeksiyon Türleri

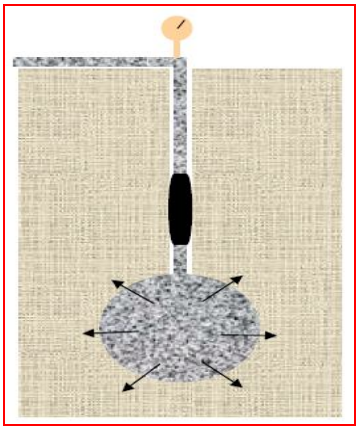
- Kompaksiyon enjeksiyonu
- Permeasyon enjeksiyonu
- Çatlatma enjeksiyonu
- Dolgu (temas) enjeksiyonu
- Karıştırma/Jet enjeksiyonu

### 2.5.1. Kompaksiyon enjeksiyonu

Kompaksiyon enjeksiyonu uygulama şekli olarak diğer enjeksiyon tekniklerinden farklıdır. Kompaksiyon enjeksiyonu zayıf ve yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında, temel ve döşemelerin desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrol altına alınmasında kullanılmaktadır (Mitchell, 1981; Graf, 1992).

Enjeksiyon karışımı zemin boşluklarına nüfuz etmeyecek şekilde ve zemin taneleri ile karışmayacak şekilde tasarlanır (Henn, 1996) Hazırlanan süspansiyonlar yüksek basınçlarda (1-7 MPa) zemine enjekte edilirler. Enjeksiyon materyali enjeksiyon

yapılan bölgede ampul şeklinde kütleler oluşturur (Şekil 2.1). Burada amaç zemin sıkılığının arttırılmasıdır (Henn, 1996; Karo, 2003).



**Şekil 2.1**. Kompaksiyon Enjeksiyonu (Rawlings, 2000)

### 2.5.2. Permeasyon enjeksiyonu

Bu enjeksiyon tekniğinde düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesinin, zemin boşluklarına, düşük basınçlarda formasyonu etkilemeden (örselemeden) zerk edilebilmesi işlemidir (Şekil 2.2) (Rawlings ve ark., 2000, Gouvenot 1987).

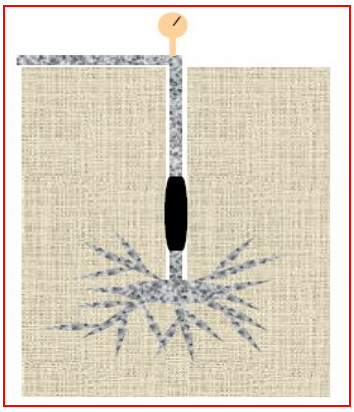
Permeasyon enjeksiyonuyla zemin iyileştirilmesi işleminde iki ana öğe etken olmaktadır. Birincisi, süspansiyonun mevcut zemin taneleri arasındaki teması güçlendirme eğiliminde olması, bu şekilde iskelet yapısı daha kuvvetli ve daha rijit olan bir zemin oluşturulmasıdır. İkincisi ise enjeksiyon malzemesinin zemin boşlukları arasındaki boşlukları doldurması böylelikle tekrarlı yükleme esnasında sıkışma eğiliminin azalmasıdır (Rawlings ve ark., 2000).



**Şekil 2.2.** Permeasyon enjeksiyonu (Rawlings ve ark., 2000).

### 2.5.3. Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu zeminin kontrollü bir şekilde düşük viskoziteli sıvılarla yüksek basınçlarda (>4 MPa) çatlatılması işlemidir. Çatlatma enjeksiyonu sonucunda zemin içinde ağaç dallarına benzer sertleşmiş çimento kanalları oluşur (Şekil 2.3). Böylelikle zemin kontrollü bir şekilde sıkıştırılır. Burada amaç, enjeksiyon malzemesinin zemin partikülleri arasındaki boşluklarda akmasını sağlamak değildir. Yöntem genellikle permeasyon enjeksiyonu yapılamayan geçirimliliği düşük ince taneli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır (Rawlings ve ark., 2000).



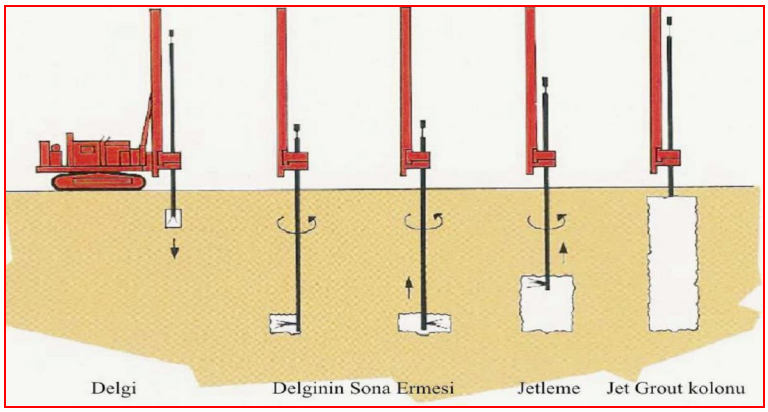
**Şekil 2.3.** Çatlatma enjeksiyonu (Rawlings, 2000)

### 2.5.4. Dolgu (Temas) enjeksiyonu

Dolgu enjeksiyonu zemindeki mevcut olan boşlukların enjeksiyon malzemesi ile doldurulması işlemidir. Genellikle tüneller ve su yapılarının boşluklarının ve çatlaklarının doldurulması işlemidir (Tekin, 2004).

### 2.5.5. Karıştırma/Jet enjeksiyonu

Zeminin yerinde enjeksiyon malzemesi ile karıştırılması işlemidir. Kontrollü bir şekilde hızla dönen enjeksiyon borusundan yatay olarak yüksek basınçlı hava veya su jeti etkisiyle çukur açılarak yüksek basınçlarda (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 edilir. Kuyunun tabanından yukarı doğru üniform bir zemin çimento karışımı oluşur. Şerbet prizlenmeden önce kolonlar örtüştürülerek yeraltında diyafram duvarlar elde edilir (Mollamahmutoğlu ve Babuccu, 2006). Sonuç olarak belirgin çapta ve boyda kolonlar oluşturulur. Oluşturulan kolonlar ile zemin iyileştirilerek düşük permeabiliteli ve yüksek dayanımlı formasyonlar elde edilir (Henn, 1996).




**Şekil 2.4.** Yer değiştirme enjeksiyonu (Küçükali, 2008).

## 2.6. İnce Taneli Çimento Enjeksiyonu

Normal Portland çimentosuyla hazırlanan karışımların ince ve orta taneli kumlara enjekte edilememesi ve kimyasal enjeksiyonların hem pahalı, hem de çevreye zarar vermesinden dolayı alternatif olarak daha ince partikül boyutlu ve büyük özgül yüzey alanlı ince taneli çimentolar üretilmiştir (Tekin, 2004). İnce taneli çimentolar düşük partikül boyutu ve yüksek özgül yüzey alanına sahiptir.

ACI'a (American Concrete Institude) göre partikül tane çapının %100'ünün 15 µm'den küçük olan taneli çimentolar ince taneli çimento, Avrupa standartlarına göre partikül boyutu 20 µm'den küçük tane çapındaki ve 800 $m^2$/kg'dan büyük özgül yüzey alanına sahip çimento olarak tanımlamıştır.

Portland çimentosunun ince ve orta kumlara enjekte edilememesinden dolayı kimyasal ve ince taneli enjeksiyonlara, kimyasal enjeksiyonların çevreye verdikleri olumsuz etkiler, düşük dayanımlar ve yüksek maliyet sonucu alternatif olarak ince taneli çimentolara yönelme olmuştur.

<u>İnce taneli çimentolar</u>

İyi penetrasyon yeteneğine sahiptir,

Geçirimsiz ortam oluşturması,

Çevreye verdiği zararsızlık

Yüksek mukavemet değerine sahip

olmasından dolayı günümüzde kullanımı artış göstermiştir.

İnce taneli çimentolarda hidratasyon, priz süresi, akma gerilmesi ve viskozite değerlerini iyileştirilmek için katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı maddelerinin

kullanımı ile daha akışkan ve düşük akma gerilmesine sahip enjeksiyonlar elde edilmektedir (Perret, 2000).

### 2.7. Temel reolojik özellikler

Reoloji, materyallerin akışkanlık ve deformasyon özelliğinin belirlenmesine denilir. Kullanılacak malzeme akışkansa akışkanın durumunun ve davranışının nasıl olacağını bilmek için reolojik özelliklerin belirlenmesi gerekir.

Süspansiyonlarının enjekte edilebilirlikleri karışımların reolojik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Scwardz ar all, 2000, Abraham, 2006). Enjeksiyon materyalinin önemli temel reolojik özellikleri; stabilite, katılaşma süresi/jelleşme ve viskozitedir (Schwarz, 1997). Diğer önemli mühendislik özellikleri, yoğunluk, süspansiyonların partikül boyutu ve enjekte edilmiş zeminin nihai mukavemetidir. Su/Çimento oranı, özgül yüzey, çimento tipi, çimento hidratasyonu, karıştırma süresi ve yoğunluğu çimento reolojisini etkilemektedir (Hakansson, 1992).

#### 2.7.1. Stabilite

Süspansiyon karışımında partiküller serbest haldeyken çökelme eğilimi gösterirler ve bu eğilim sonucunda da dibe çökerler ve berrak su üste kalır, bu olaya sedimantasyon denir (Warner, 2004).

Sedimantasyon olayı stokes yapası ve prensibine göre tanımlanır. Stokes yasasında süspansiyon sıvısındaki granüler partiküller, granül çapının karesi ile orantılı olarak, yerçekiminin etkisiyle hıza bağlı olarak çökelir. Partikül boyutu küçüldükçe sedimantasyon yoğunluğu azalır. Çok küçük partiküllerde yerçekiminin etkisinden başka partiküller arasında elektrokimyasal etkide (Brownian hareketi) görülür ve Stokes yasasıyla sedimantasyon beklenenden yavaş gelişir (Nonveiler, 1989).

Stabilite süspansiyonda şu şekilde tanımlanır; 1000 ml ölçekli cam silindir içindeki karışım üzerinde iki saat sonunda toplanan berrak su hacmi toplam hacmin %5'inden az ise stabildir denir (Hakansson, 1992).

Enjeksiyon mühendisleri, katının sıvıdan ayrışmasını veya tersini tanımlarken sedimantasyon yerine bleeding (kusma) terimini kullanmayı tercih ederler (Nonveiler, 1989).

Saf çimento enjeksiyonları yüksek bleeding değerlerine sahiptir ve bu nedenle stabil olmayan karışımlar olarak sınıflandırılır. Bentonit ilavesi, çimento enjeksiyonlarının stabilitesini iyileştirir (Nonveiler, 1989).

### 2.7.2. Katılaşma veya jelleşme süresi

Katılaşma süresi, süspansiyon türü enjeksiyonlar için enjeksiyon materyalinin akışkanlık özelliğini kaybetme süresidir. Priz süresi, çimento ve suyun birleştirildiği zaman ile çimento hamurunun fiziksel değişiklik göstererek katılaşmaya (plastikliğini kaybetmeye) başladığı zaman arasında geçen süre olarak tanımlanır. Çimento kökenli enjeksiyonlar için bu süre 2 ile 24 saat arasında, katkı maddelerinin kullanımına göre değişir. Katılaşma süresi enjeksiyon deneylerini kontrol altında tutabilmek açısından önemlidir. Zeminlerde yer altı suyu mevcutsa, prizin hızlı olması istenir. Enjeksiyon materyalinin bütün boşluklara ulaşması için belli süre geçmesi gerekir. Bu açıdan optimum katılaşma süresinin belirlenmesi gerekir. Katılaşma süresini Sıcaklık, Karıştırma suyu miktarı ve Rutubet etkilemektedir. Sıcaklığın artması ile priz süresi artar. Su/Çimento oranındaki su miktarının artması priz süresini azaltır. Çevrede rutubet bulunması prizi geciktirir ve priz süresini uzatır. Katkı maddelerinin kullanılmasıyla süspansiyonun akışkanlığı artar, Katılaşma süresi azaltılıp arttırılabilir (Warner, 2004).

### 2.7.3. Viskozite

Viskozite, moleküller arasındaki sürtünmeden dolayı akışkan malzemenin akmaya gösterdiği dirençtir. Akışın başlaması için aşılması gerekir. Süspansiyon karışımlar genelde Newton akışkanı olarak tanımlanmaz, Bingham sıvısı olarak tanımlanırlar. Newton sıvısının viskozite değeri kayma oranının değişmesiyle sabitken, Bingham sıvısının kayma oranı ve kayma gerilmesine göre değişkenlik gösterir. Bingham modelini eğimi viskoziteyi verir (Warner, 2004).

Newton viskoziteyi aşağıdaki şekilde tanımlamıştır:

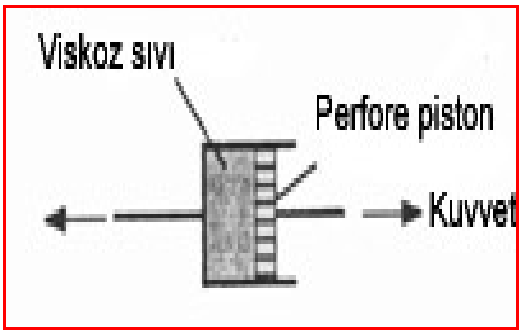
$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad \text{..... (2.1)}$$

Burada, $\tau$ = sıvı içindeki kayma gerilmesi

$\frac{dv}{dz}$ = hız gradyanı (eğimi); bir sıvı katmanının, bitişik sıvı katmanına göre rölatif hareketinin ne hızla olduğunu temsil eder.

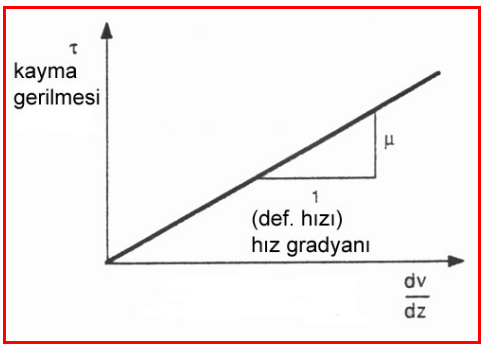
$\mu$ = viskozite

Yukarıdaki denklem, laminer akım için geçerlidir. Yani; dairesel veya spiral hareket akımları ile örselenmeyen düz akım çizgilerini takip eden sıvı partikül akımları söz konusudur (Warner, 2004).

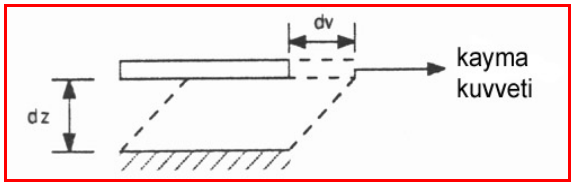



**Şekil 2.5.** Reolojik Model

Yukarıdaki şekilde de gösterildiği gibi, bir Newton sıvısında kayma gerilmesi (τ), hız gradyanı ile oransal olarak değişmektedir. Newton sıvısına tekabül eden mekanik model bir sönümleyicidir.

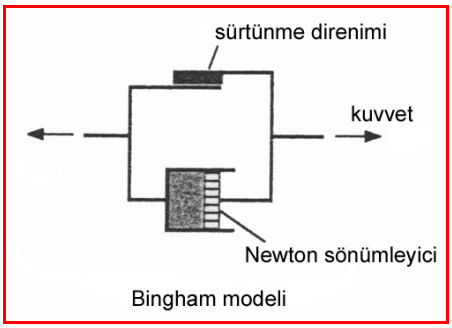



**Şekil 2.6.** Enjeksiyon sıvısının kayma gerilmesi – hız gradyanı arasındaki ilişki



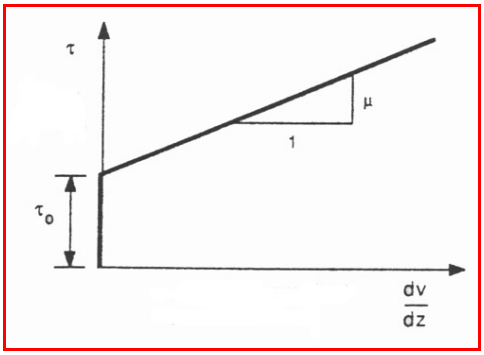

**Şekil 2.7.** Kayma gerilmesi deformasyon hızı arasında lineer ilişki

Kayma gerilmesi hız gradyanı (deformasyon hızı) arasında lineer bir ilişki varsa, reolojik model lineer olarak adlandırılır. Bir sıvı τ ile dv/dz arasında lineer olmayan ilişki sunuyorsa, bu sıvı non-Newton sıvısı olarak sınıflandırılır. Aşağıdaki şekil, sürekli deformasyon oluşmasından önce aşılması gereken başlangıç akma gerilmesine sahip bir materyalin davranışını sergilemektedir (Warner, 2004).




**Şekil 2.8.** Bingham Modeli (sürtünme direnimi-kuvvet)

Non-Newton sıvısının mekanik modeli, paralel halde (bağlantılı) bir sönümleyici ve sürtünme direnimli bir elemandır (Warner, 2004).




**Şekil 2.9.** Bingham modelinin reolojik davranış grafiği

Bu kurala uyan materyallere Bingham sıvısı denir. Aslında, Bingham modeli bir sıvı değil, visko-plastik katıdır. Buna rağmen, enjeksiyon literatüründe Bingham sıvısı çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bingham modeli reolojik davranışı,

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dz} \quad \text{..... (2.2)}$$

ile ifade edilmektedir. $\tau_0$ (başlangıç akma gerilmesi) rijitlik diye adlandırılır. Bazen de, akış limiti olarak tanımlanır. Yukarıdaki denkleme göre, akma davranışı ideal plastik olarak ifade edilir.

Karıştırılarak rijitliğini kaybeden fakat bir süre dokunulmadan terk edilip tekrar rijitliğini kazanan süspansiyonlar tiksotropik (thixotropic) olarak adlandırılır. Tiksotropik özelliğe sahip bentonit çimento enjeksiyonlarının stabilitesini sürdürmeye katkıda bulunurlar.

Su, Newton sıvısı gibi davranır. Süspansiyon içindeki kil partikülleri non-Newton maddesini temsil eder. Bir kil veya çimento enjeksiyonu yaklaşık olarak Bingham modeli (cismi) gibi düşünülebilir. Bentonit kil, tipik bir tiksotropik materyaldir. Viskozite 'μ' dinamik veya mutlak viskozite olarak da adlandırılır. Kütle yoğunluğu (ρ) ile bölünürse kinematik viskozite adını alır. Viskozite için SI birimi Pascal-saniyedir (Pa.s). Geleneksel olarak Centipoise (cP) birimi kullanılmaktadır. 1 cP = $10^{-3}$ Pa.s (20ºC'de suyun viskozitesidir) (Warner, 2004).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu.g}{\gamma} \qquad \text{.....(2.3)}$$

Burada, g = 9.81 m/sn$^2$
Kinematik viskozite birimleri, m$^2$/sn veya Centistoke'dur. (cSt)
1 cSt = $10^{-6}$ m$^2$/sn

(2.3) no'lu denklem türbülanslı akım için, dinamik "eddy" viskozite (η) ilave edilerek modifiye edilmiştir. Şöyle ki;

$$\tau = (\mu + \eta)\frac{du}{dz} \qquad \text{..... (2.4)}$$

Türbülanslı akım, pompalama esnasında enjeksiyon materyalinin stabilitesinin sürdürülmesi dikkate alındığında önemlidir. Zemin veya kaya ortama enjeksiyonun yayılma alanı veya mesafesi değerlendirildiğinde, genellikle laminer şartlar kabul edilir (Warner, 2004).

Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişte çoğunlukla boyutsuz Reynolds sayısı (Re) kullanılır.

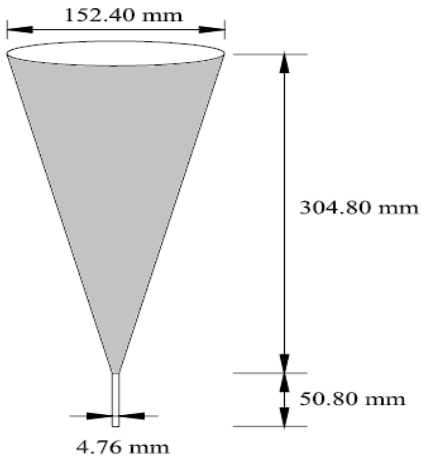
$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \nu L}{\mu} \qquad \text{.....(2.5)}$$

Bu ifadede, ν = akış hızı

R = karakteristik uzunluk (örneğin, boru çapı)

Düşük Reynolds sayısı, viskoz kuvvetlerin ataletsel kuvvetler üzerinde hakim olduğu ve laminer akışın oluştuğunu ifade eder (Warner, 2004).

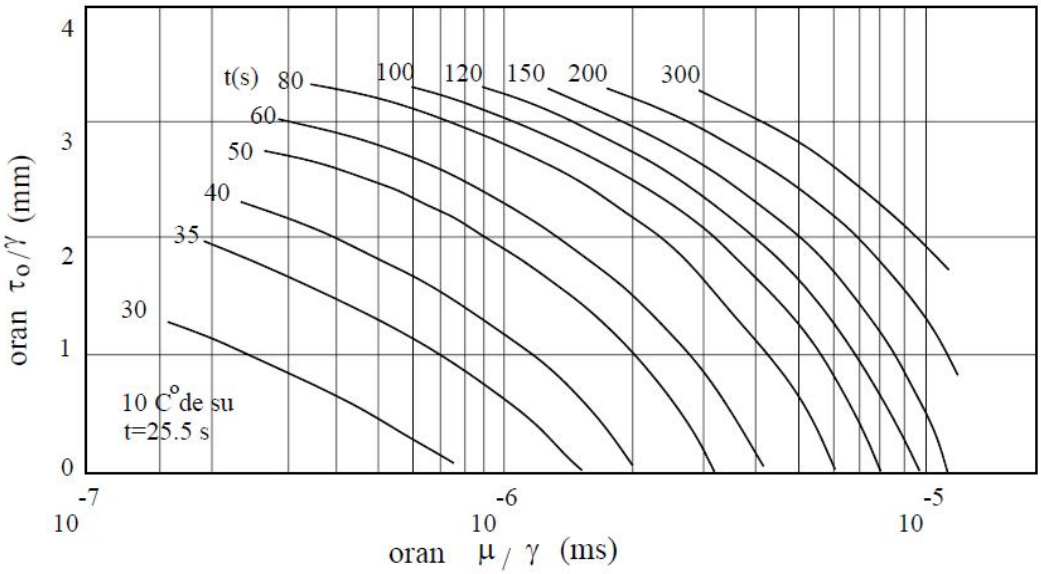
Zemin enjeksiyonlarında viskozitenin hesaplanmasında iki yöntem kullanılır. Birincisi standart bir huniden belirli miktarda sıvının akış süresinin ölçülmesiyle yapılabilir. İkincisi ise dijital viskometre ölçücü cihazların (Viskometre ve Rheometre) kullanılmasıdır (Langevin, 1994). Biz bu deneysel çalışmada birinci malzemeyle ölçüm yaptık (Şekil 2.10).




**Şekil 2.10.** Marsh hunisi

Bu deneyde, ilk 1000 ml sıvı çıkışı için zaman ölçümü yapılır. Marsh hunisi, viskoziteden ziyade, reolojik özelliklerin bütününü ölçer. Dolayısıyla, sonuçları izafi viskozite olarak ifade edilmektedir. Viskozitenin belirlenmesinde Marsh hunisinin yanında Lombardi kohezyon ölçer plakada kullanılmaktadır. Pürüzlü yüzeye sahip çelik bir levha (15 x 15 cm) enjeksiyon materyaline batırılır. Levhaya yapışan enjeksiyon malzemesi damlaması bitene kadar bekletilir. Levhanın her iki yüzüne yapışan ağırlık ($\Delta W$) belirlenir ve buradan başlanır. Akma gerilmesi (kohezyon) bulunur ($\tau_o$). Akma gerilmesinin bulunmasından sonra enjeksiyon malzemesinin birim hacim ağırlığı hesaplanır ($\gamma$). $\tau_o/\gamma$ değeri ile Marsh hunisinden elde edilene değerler, Lombardi'nin önerdiği grafiğe işaretlenerek enjeksiyon malzemesinin dinamik viskozitesi ($\mu$) bulunur (Lombardi, 1985).

Akışkanlaştırıcı katkılar, Sıcaklık, Su/Çimento oranı viskozite değerini etkiler. Sıcaklık ve Su/Çimento oranı arttıkça viskozite artar (Warner, 2004).




**Şekil 2.11.** Lombardi'nin önerdiği abak ($\tau_o/\gamma$-akış zamanı-kinematik viskozite ($\mu/\gamma$) (Kutlu, 2005).

## 2.8. Enjekte edilebilirlik

Enjeksiyon karışımının zemine penetre olmasına ya da olamamasına enjekte edilebilirlik denir (Schwarz, 1997). Süspansiyon karışımlarda enjekte edilebilirliği zeminin tane çapı büyüklüğü, maksimum çimento tane çapı, Su/Çimento oranı, zemindeki ince tane yüzdesi, rölatif sıkılık ve enjeksiyon basıncı etkiler (Lombardi, 1985).

Enjeksiyona etki eden önemli parametrelerden biri de, karışımların Su/Çimento oranıdır. Karışımlardaki S/Ç oranının artması enjekte edilebilirliği ve geçirgenliği arttırırken, mukavemeti azaltmaktadır (Akbulut, 1998).

Enjeksiyonun başarısı karışım tanelerinin, enjeksiyon yapılacak boşluklardan küçük olmasına bağlıdır. Su/çimento oranı arttırılarak yüksek basınçlarda daha iyi penetrasyon sonuçları elde edilebilir. Fakat ince taneli ortamlarda enjeksiyon basıncını tek başına arttırmak yeterli olmazken yüksek basınçlarda filtrasyon görülebilir. Filtrasyon yüksek basınç altında süspansiyon partiküllerinin süspansiyon sıvısından ayrılması olarak tanımlanır (Akbulut, 2002).

Bell (1993) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda tane büyüklüğü 2 mm' den küçük olan üniform kum içine çimento enjeksiyonu yapıldığında filtre formasyonu oluşacağını belirtmiştir. Taneli karışımların bir formasyona girme kabiliyeti askı malzemelerin tane büyüklüğüne, karışım tanelerin dolgu yapılarak boşluklardan daha küçük olmasına bağlıdır. Burwell bu durumu enjekte edilebilirlik (N) olarak formülize etmiştir (Burwell, 1958).

Zeminler için,

$$N = \frac{(D_{15})_{zemin}}{(D_{85})_{enjeksiyonmateryali}} \quad \text{..... (2.6)}$$

Burada,

$D_{15}$ = % 15 geçen zemine karşılık tane çapı,

$D_{85}$ = % 85 geçen enjeksiyon materyaline gelen tane çapı,

N > 24: enjeksiyon mütemadiyen mümkün,

N < 11: enjeksiyon mümkün değil.

Ayrıca enjekte edilebilirlik limit değerlere yaklaştığı zaman, karışımın uygunluğundan emin olmak için enjekte edilebilirliğin Eşitlik 2.7'e göre yeniden kontrol edilmelidir.

$$N_c = \frac{(D_{10})_{zemin}}{(D_{95})_{enjeksiyonmateryali}} \quad \text{.....(2.7)}$$

Burada,

$D_{10}$ = % 10 geçen zemine karşılık tane çapı

$D_{95}$ = % 95 geçen enjeksiyon materyaline gelen tane çapı.

$N_c$ > 11: enjeksiyon mütemadiyen mümkün

$N_c$ < 6: enjeksiyon mümkün değil.

Kayalar için,

$$N_R = \frac{Çatlakgenisligi}{(D_{95})_{enjeksiyonmateryali}} \quad \text{..... (2.8)}$$

Burada,

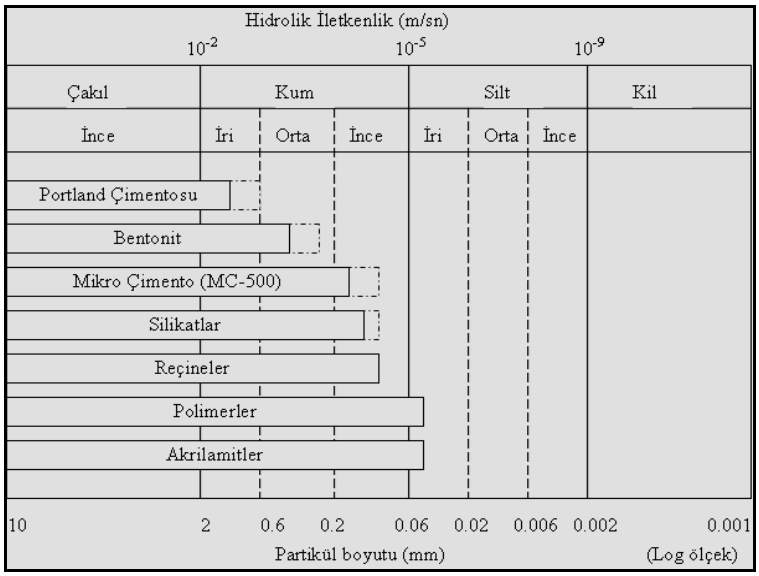
$D_{10}$ = % 10 geçen zemine karşılık tane çapı,

$N_R$ > 5: enjeksiyon mütemadiyen mümkün,

$N_R$ < 2: enjeksiyon mümkün değil.

İnce taneli çimento karışımları kullanılarak kuru ve yaş kumlara yapılan enjeksiyonlar sonucunda, kısmen suya kumların kuru kumlara oranla daha iyi enjekte oldukları belirlenmiştir (Perrets, 1997). Akışkanlaştırıcı kullanılarak yapılan çimento enjeksiyonlarında, kullanılan katkıların çimento karışımlarının enjekte edilebilirliği daha önce yapılan çalışmalarda görülmüştür (Yıldız, 2007).

Aşağıda Şekil 2.12'de çeşitli enjeksiyon türlerinin değişik viskoz karışımlara bağlı olarak penetrasyon yetisi gösterilmiştir (Kutzner, 1996).




**Şekil 2.12.** Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon yetisi (Kutzner, 1996)

Daha önceki yapılan çalışmalarda enjekte edilebilirlikte zeminin partikül boyutu ile çimentonun partikül boyutunun birbiri ile bağlantılı olduğunu göstermiştir. Deneylerde boşluk çaplarının, ince taneli çimento maksimum tane çapının 1,5-2,0 katına kadar olduğu durumlarda çimentonun boşluklara penetre olabildiğini göstermiştir (Herndon ve Lenahan, 1976; Cambefort, 1951; Abraham, 2006).

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1. Giriş

Bu deneysel çalışmanın amacı, farklı S/Ç oranlarında hazırlanan katkısız ince taneli çimento (Ultrafin 12) karışımları ile akışkanlaştırıcı, silis dumanı, sodyum bentonit, silis dumanı ve akışkanlaştırıcı katkılı ince taneli çimento karışımlarının farklı rölatif sıkılıkta, çeşitli gradasyonlu ince ve orta kum karışımlara enjekte edilebilirliğinin araştırılması, enjekte edilen numunelerin mukavemet ve permeabilite özelliklerinin belirlenmesidir.

Bu kapsamda, ilk olarak deneylerde kullanılacak mevcut enjeksiyon düzeneği modifiye edilmiştir. İnce taneli çimento olarak Ultrafin 12, katkı malzemeleri addiment, sodyum bentonit ve silis dumanı seçilmiştir. Ayrıca, deneylerde kullanılacak kum numuneler, çeşitli elek aralıklarından elenerek ince ve orta boyutta numuneler oluşturulmuş ve çeşitli oranlarda karıştırılarak hazır hale getirilmiştir. Çeşitli S/Ç oranlarında hazırlanan süspansiyonların reolojik özellikleri (stabilite, viskozite ve katılaşma süresi) araştırılmıştır. Farklı rölatif sıkılıkta ve tane boyutunda hazırlanan kum numunelere enjeksiyon deneyleri yapılmış, başarılı olan enjeksiyonlar kür ortamında bekletilerek mukavemet ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur.

## 3.2. Enjeksiyon Deney Düzeneği

Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. İnşaat Müh. Bölümü Anabilim Dalı Geoteknik Programında, Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU tarafından yönetilen mevcut tez ve doktora çalışmalarında kullanılan deney düzeneğinde, deneysel çalışmaların kapsamlı olması ve enjeksiyonun daha kolay ve seri yapılabilmesi amacıyla modifikasyona gidilmiştir.

Deney düzeneği;

5 adet mukavemet kalıbı,

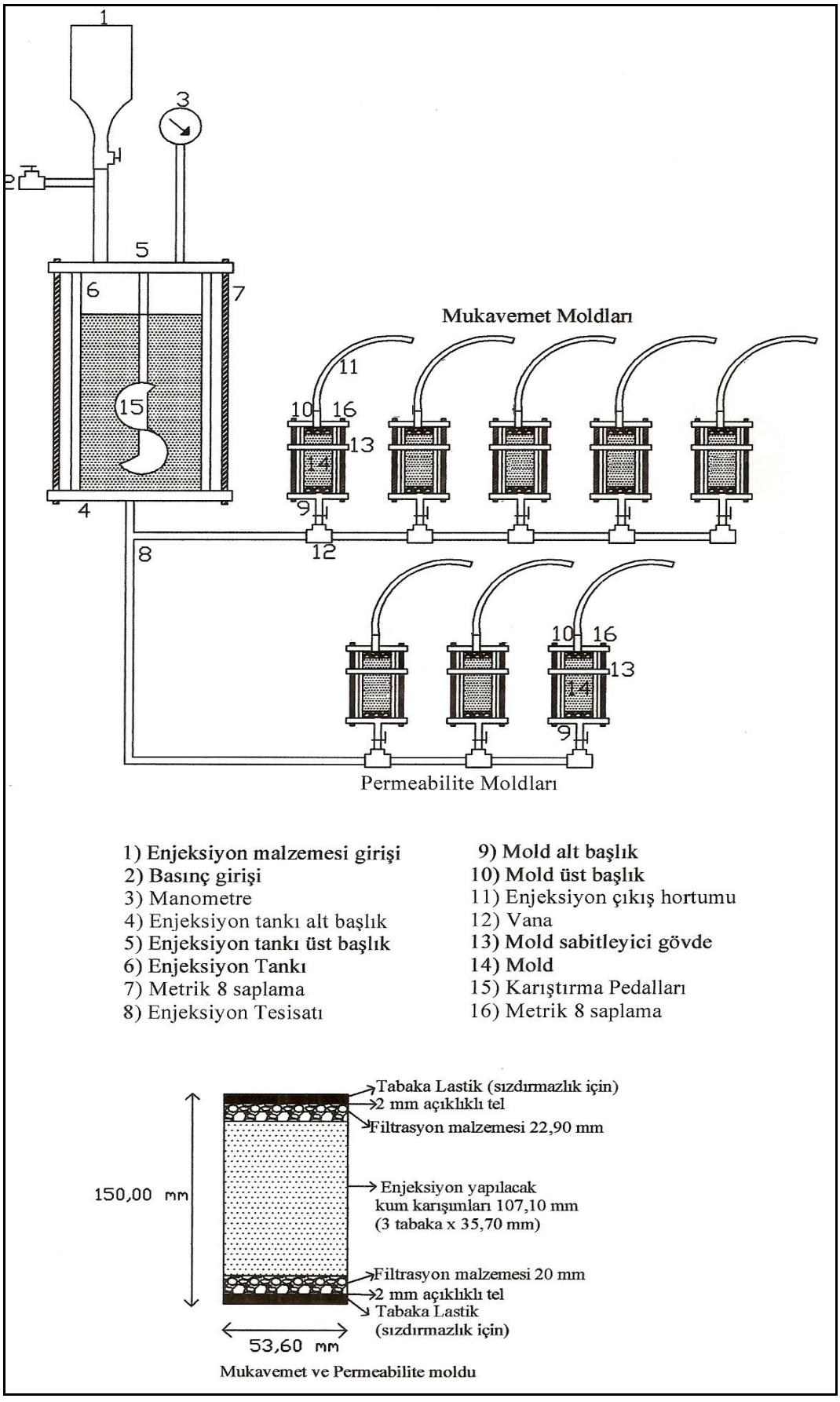
3 adet permeabilite kalıbı,

1 adet mikserli tank,

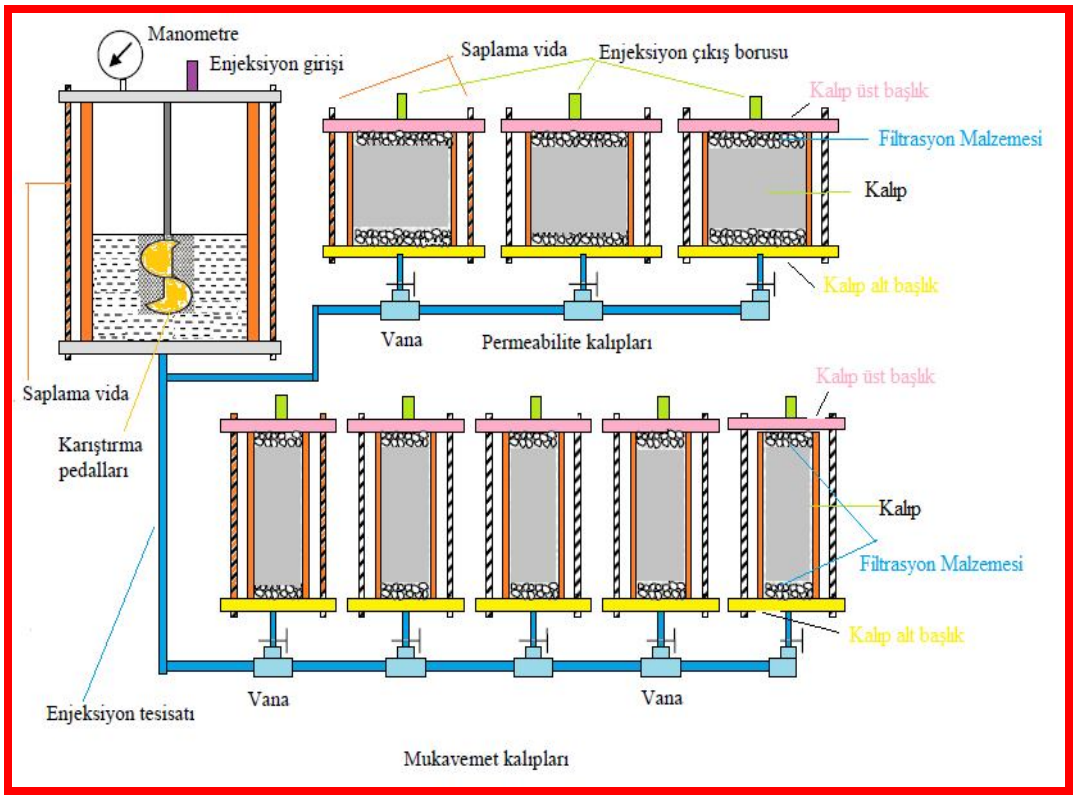
1 adet 0.70 MPa kapasiteli kompresör

Ara bağlantı elemanlarından

oluşmaktadır (Şekil 3.1), (Resim 3.1).




**Şekil 3.1.** Enjeksiyon deney düzeneği (Avcı, 2009)




**Şekil 3.1.** Enjeksiyon deney düzeneği (Avcı, 2009)



**Resim 3.1.** Enjeksiyon deney düzeneği

Enjeksiyon yapılacak numuneler için 20 adet D=53.60 mm çapında, H=150 mm yüksekliğinde plastik kalıplar imal edilmiştir. Kalıplar hem mukavemet, hem de permeabilite kalıbı olarakta kullanılmıştır. Plastik kalıplar, numunelerin düzgün bir şekilde dağılmadan kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırmış ve pratik olarak seri enjeksiyona olanak sağlanmıştır. Kalıplara yerleştirilen kum karışımların rölatif

sıkılıklarının ayarlanmasında 832.10 gr ağırlığında 53.60 mm çapında çelik tokmak kullanılmıştır.

Kum numunelerin rölatif sıkılığının sağlanabilmesi amacıyla 5 adet kalıbı sabitleyici, gövde için ilave çelik plakalar yaptırılmıştır. Bu plakalar sayesinde malzemeye istenen sıkılık değerleri elde edilmiş ve hazırlanan numuneler rahatlıkla taşınmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra, kalıpların alt ve üst kısımlarında enjeksiyon sızdırmazlığını sağlayacak rijit başlıklar kullanılmıştır. Rijit başlıklar her iki tarafından da enjeksiyon yapmaya uygun olarak geliştirilmiştir.

Başlıkların kalıplarla olan sızdırmazlığı ise lastik contalar yardımıyla sağlanmıştır. Kalıplara enjeksiyon şerbeti girişi bükülebilir çelik hortumlarla rijit başlıktan vana yardımıyla sağlanmış, kalıplardan su ve şerbetin çıkışını gözlemleyebilmek için şeffaf plastik hortumlar kullanılmıştır.

Hazırlanan enjeksiyon malzemesinin kalıplara iletimini sağlamak amacıyla, 200 mm çapında ve 400 mm boyunda karıştırıcı enjeksiyon tankı kullanılmıştır. Karıştırıcı tankta 40 dev/dak. 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 tanka geçişi ve basıncın ölçümü için 2 adet giriş bulunmaktadır. Alt başlıkta ise enjeksiyon malzemesinin kalıplara 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 kalıplar arasındaki ana bağlantısını sağlamak için 3/4" lik metal borular kullanılmıştır. Her bir kalıbın ana boruya bağlantısı 8 adet T bağlantı ve vanalarla sağlanmaktadır. Vanalardan çıkan enjeksiyon bükülebilir çelik borular sayesinde kalıplara geçiş yapmaktadır. Enjeksiyon tankına enjeksiyon malzemesinin kolay geçişini sağlayabilmek için 3/4" lik metal boru ve vana kullanılmıştır.

### 3.3. Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kumun Özellileri

Enjeksiyon deneylerinde inşaat kumu kullanılmıştır. Elde edilen inşaat kumu USCS sınıflama sistemine göre uygun elekler kullanılarak elenmiştir. Kumlar, tane çaplarına göre iki gruba ayrılmıştır.

#10-#40 (2,00mm–0,425mm) elek aralığında kalan malzeme, ***orta kum***

#40-#200 (0,425mm–0,075mm) elek aralığında kalan malzeme ***ince kum***

olarak gruplandırılmıştır. Kum numune içerisindeki silt ve kil olmaması için su ile iyice yıkanmıştır. Enjeksiyon deneylerinde sadece ince ve orta kum karışımlarından oluşan zemin numuneleri kullanılmıştır (Resim 3.2).




**Resim 3.2.** Yıkanmış, elenmiş ince ve orta kum numuneler (Avcı, 2009).

### 3.3.1. Özgül ağırlık

Deneylerde kullanılacak kumların özgül ağırlıkları ASTM C128-07a ve TS 1900-1'de belirtilen prosedürlere göre yapılmıştır (Avcı, 2009).

Piknometre ağırlığı ($M_1$) piknometre içine 100 gr kuru kum numunesi koyulup tartılmıştır ($M_2$). Piknometredeki numunenin üzerine saf su konularak bir gün bekletildikten 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 kurulanarak tartılır ($M_3$).

Son olarak piknometre havası alınmış saf su ile doldurulup tartılır ($M_4$) ve aşağıdaki formül yardımıyla özgül ağırlıklar hesaplanır (Eşitlik 3.1) (Avcı, 2009).

$$G_s = \frac{M_2 - M_1}{[(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)]} \frac{\gamma_L}{\gamma_{SU}} \quad \text{.....(3.1)}$$

Burada;

$M_1$ = piknometre

$M_2$ = piknometre+kuru zemin ağırlığı

$M_3$ = piknometre+kuru zemin ağırlığı+su

$M_4$ = piknometre+su

$\gamma_L$= deneyde kullanılan sıvının yoğunluğu

$\gamma_{su}$= saf suyun yoğunluğu

Kum nunumelere ait özgül ağırlıklar ince kum, $G_s$=2.70, orta kum, $G_s$=2.69 olarak belirlenmiştir.

### 3.3.2. Minimum ve maksimum boşluk oranlarının belirlenmesi

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak ince ve orta kumlar için maksimum ve minimum boşluk oranlarının belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler ASTM D4253 (Standart Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table) ve ASTM D4254 (Standart Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density)'de belirtilen standartlarına göre yapılmıştır. Maksimum ve minimum boşluk oranlarının hesaplanmasında 9.10 cm çapında, 10.58 cm yüksekliğinde, 4185 gr ağırlığında (M) ve 688 cm³ hacminde (V) kalıp kullanılmıştır.

**Maksimum boşluk oranının tayini:** Zemin numunesi, malzemeyi sıkıştırmadan özel huni yardımıyla, huni ucunu yukarıya kaldırılmadan kalıbın üst yüzeyini 1 cm aşacak şekilde yerleştirilir. Üstteki fazla malzeme çelik cetvel yardımıyla düzgün bir şekilde tıraşlandıktan sonra kalıp ve zemin numunesi tartılır ($M_1$). Eşitlik 3.2-3.3-3.4. kullanılarak maksimum boşluk oranı ($e_{max}$) bulunur.

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

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

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

Burada,

$\rho_{min}$ = Minimum yoğunluk,

$e_{max}$ = Maksimum boşluk oranı,

M = Kalıbın kütlesi.

$M_1$ = Kalıp+gevşek kuru zemin kütlesi

$M_{S1}$ = Deneye tabi tutulan gevşek kuru zemin kütlesi

$\rho_w$= Suyun özgül yoğunluğu, 1gr/cm³

$G_s$ = Zeminin özgül ağırlığı

$V_m$ = Deneye tabi tutulan zeminin hacmi (= kalıp hacmi V)

**Minimum boşluk oranının tayini:** Sıkıştırılacak kum numunesi, yakası takılmış kalıbın içine sıkışma sonrasında kalıp üst kenarından 1 cm taşacak kadar koyulur. Kalıp sarsma tablasına yerleştirilir. Kalıp üzerine maksimum sıkışmayı sağlamak için sürşarj ağırlığı (9411gr) konularak düzenek sarsma tablasında 5 dakika titreşim sonunda sarsma tablası durdurulup, sürşarj yükü ve koruyucu yaka alınarak üstteki fazla malzeme çelik cetvel yardımıyla düzgün bir şekilde tıraşlanarak kalıp ve zemin numunesi tartılır ($M_{S2}$). Aşağıda gösterilen formüllere göre minimum boşluk oranı ($e_{min}$) bulunur (Eşitlik 3.5.-3.6.-3.7.)

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

$$\rho_{max} = \frac{M_{s2}}{V_m} \quad \text{.....(3.6.)}$$

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

Burada,

$\rho_{max}$ = Maksimum yoğunluk

$e_{min}$ = Minimum boşluk oranı

M = Kalıbın kütlesi

$M_2$ = Kalıp ve sıkıştırıldıktan sonraki kuru zemin kütlesi

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

$\rho_w$= Suyun özgül ağırlığı, 1gr/cm³

$G_s$ = Zemin özgül ağırlığı

$V_m$ = Deneye tabi tutulan zeminin hacmi (= kalıp hacmi V)

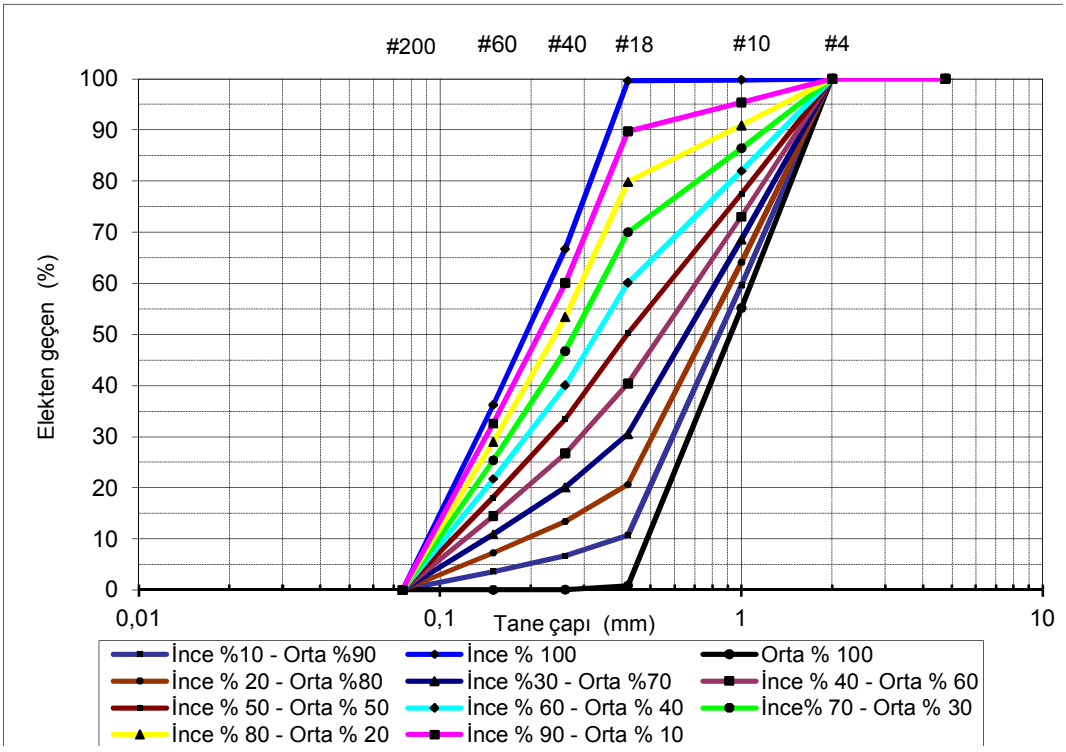
Deneyler sonucunda bulunan maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri Çizelge 3,1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1**. Farklı granülometride hazırlanan kum numunelerin max. ve min. boşluk oranları

| Numune No | Kum Oranı | | Karışım $\rho_{max}$ ($g/cm^3$) | Karışım $\rho_{min}$ ($g/cm^3$) | Karışım $e_{max}$ | Karışım $e_{min}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | İnce | Orta | | | | |
| 1 | 100 | 0 | 1,577 | 1,259 | 1,141 | 0,710 |
| 2 | 90 | 10 | 1,570 | 1,260 | 1,142 | 0,708 |
| 3 | 80 | 20 | 1,567 | 1,268 | 1,131 | 0,719 |
| 4 | 75 | 25 | 1,570 | 1,270 | 1,132 | 0,716 |
| 5 | 70 | 30 | 1,569 | 1,268 | 1,130 | 0,720 |
| 6 | 60 | 40 | 1,567 | 1,270 | 1,120 | 0,727 |
| 7 | 55 | 45 | 1,559 | 1,270 | 1,119 | 0,730 |
| 8 | 50 | 50 | 1,550 | 1,280 | 1,113 | 0,728 |
| 9 | 40 | 55 | 1,549 | 1,279 | 1,110 | 0,730 |
| 10 | 35 | 60 | 1,547 | 1,280 | 1,109 | 0,730 |
| 11 | 30 | 65 | 1,550 | 1,278 | 1,110 | 0,728 |
| 12 | 20 | 70 | 1,549 | 1,280 | 1,101 | 0,740 |
| 13 | 15 | 80 | 1,550 | 1,290 | 1,100 | 0,740 |
| 14 | 10 | 90 | 1,548 | 1,288 | 1,091 | 0,739 |
| 15 | 0 | 100 | 1,539 | 1,300 | 1,080 | 0,750 |

### 3.3.3. Tane dağılımı

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak kumların tane dağılım eğrileri TS1900'de belirtilen standartlara göre bulunmuştur. Şekil 3.2'de 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.** İnce ve orta kum numune karışımlarının tane boyutu dağılım eğrileri (Avcı, 2009).

### 3.3.4. Kum numunelerinin permeabiliteleri

Enjeksiyon deneyleri yapılacak olan ince ve orta kum numune karışımlarına sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılarak numunelerin geçirimlilik katsayıları bulunmuştur. (Avcı, 2009).

Çizelge 3.4'de enjeksiyon deneyinde kullanılan % 30 rölatif sıkılığa ait kum karışım oranlarına ait permeabilite katsayıları verilmiştir. Çizelge 3.4'e bakıldığında tane çapı büyüdükçe geçirgenlik artmıştır.

**Çizelge 3.2**. Kum zeminlere ait permeabilite katsayısı değerleri (Avcı, 2009) .

| 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 | $1{,}48 \times 10^{-1}$ |

## 3.4. Deneyde kullanılan ince taneli çimentonun özellikleri

Deneysel çalışmada Alman şirketi tarafından üretilen ince taneli çimento olarak Cementa AB isimli Ultrafin 12 çimentosu kullanılmıştır. Ultarafin 12, kaya ve kum zeminlerde enjeksiyon malzemesi kullanılmaktadır. Ultrafin 12 çimentosunun yüzey alanı 2200 m²/kg'dır. Ultrafin 12 düşük C3A (< % 3.5 toplam ağırlığın) içeriğinden dolayı sülfata dayanıklı ve düşük alkali içeriğinden (< %0,6 toplam ağırlığın) dolayı alkali-silika reaksiyonu görülmez (Avcı, 2009).

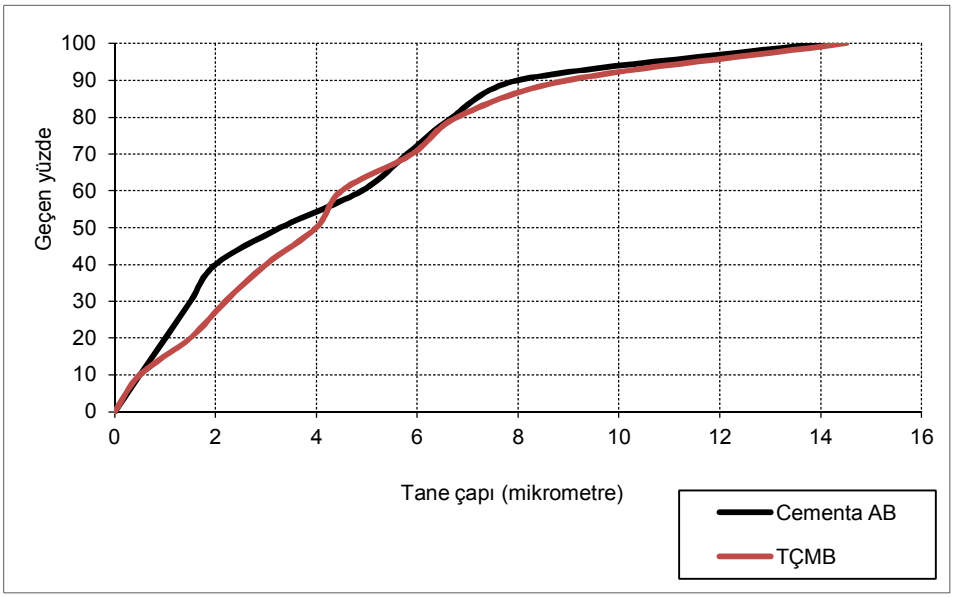
### 3.4.1. İnce çimento tane dağılımı

Fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olan birçok ince taneli çimento birçok firma tarafından üretilmektedir. (Perret et al, 2000; Mollamahmutoğlu and Yılmaz, 2011). Çizelge 3.3'de Ultrafin 12 ve diğer ince taneli çimentolara ait partikül boyutu ve birleşimlerine ait bazı bilgiler verilmiştir (Mollamahmutoğlu ve Yılmaz, 2011).

**Çizelge 3.3**. İnce taneli çimentolara ait partikül çapı ve çimento birleşimlerine ait bilgiler.

| İnce Taneli Çimento | Partikül Boyutu | Birleşim |
|---|---|---|
| Rheocem-650 | $D_{95}$<15 | Portland |
| Rheocem-800 | $D_{98}$<16 | Portland |
| Rheocem-900 | $D_{98}$<10 | Portland |
| MC-100 | $D_{max}$=8 | Curuf |
| MC-300 | $D_{max}$<40 | Portland |
| MC-500 | $D_{max}$=15 | Curuf+Portland |
| Spinor A6 | $D_{98}$=6 | Curuf |
| Spinor A12 | $D_{98}$=12 | Curuf |
| Spinor A16 | $D_{98}$=16 | Curuf |
| Ultrafine 12 | $D_{95}$=12 | Portland |
| Ultrafine 16 | $D_{95}$=16 | Portland |

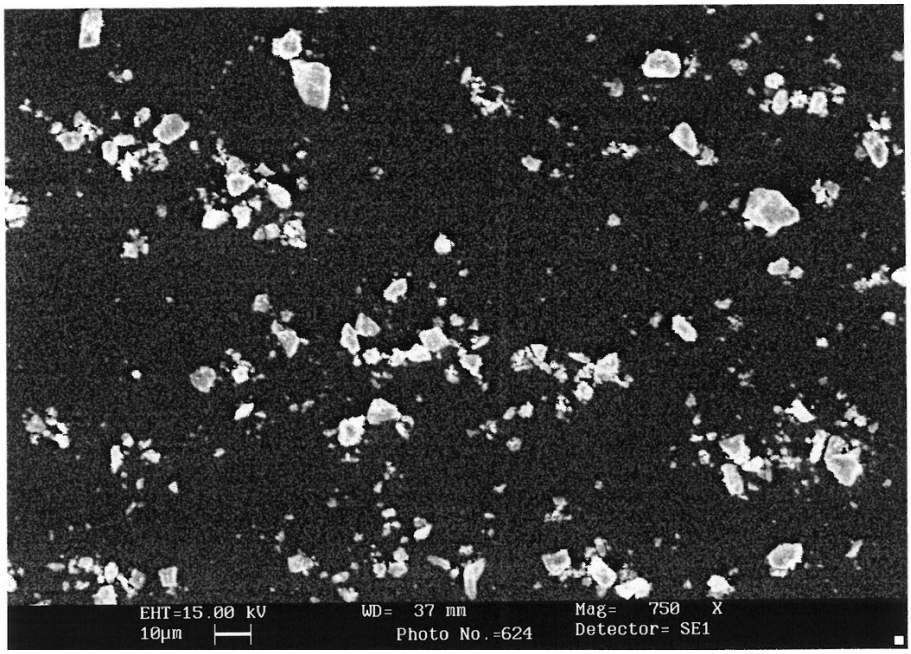
Deneylerde kullanılan Ultrafin 12 çimentosuna ait tane boyu dağılım eğrileri Şekil 3.3.'de verilmiştir. Şekilde firma tarafından sunulan tane boyu dağılımı tarafımızdan Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB)'nde "MASTERSIZER" tane boyu dağılım cihazıyla da analiz ettirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi veriler birbiri ile oldukça uyumludur (Avcı, 2009).



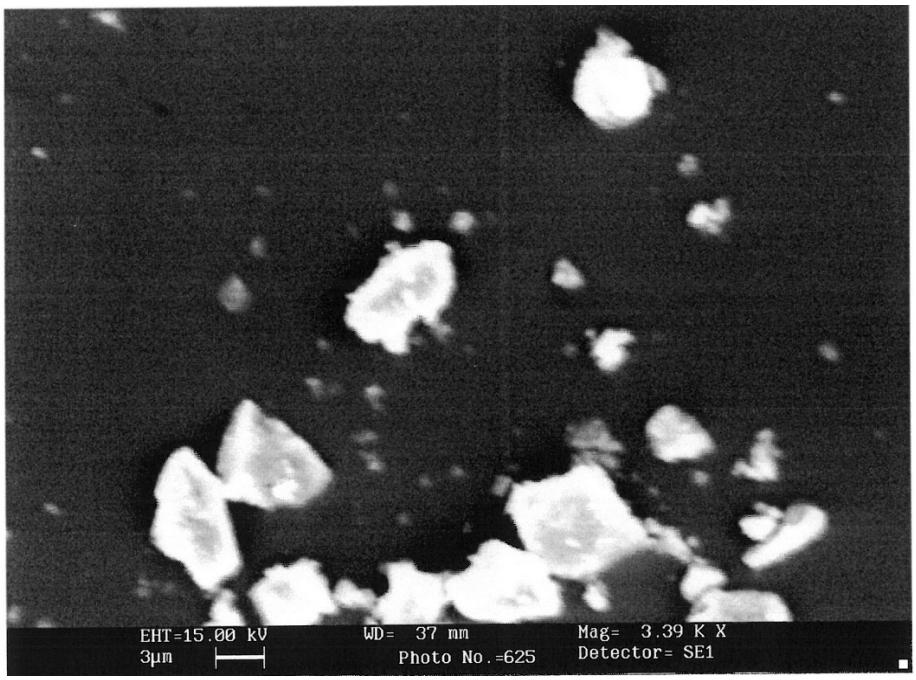

**Şekil 3.3.** Ultrafin 12 çimentosuna ait Cementa AB Firma ve TÇMB tane boyu analizi (Avcı, 2009)

Ultrafin 12 çimentosuna ait mikroskobik analiz Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. Ultrafin 12 çimentosunun genel olarak 1-10 mikron arasında değişen

boyutlarda köşeli ve düz yüzeyli tanecikler içerdiği görülmektedir. Bunun yanı sıra kısmen yuvarlak taneciklere de rastlanmaktadır.




**Şekil 3.4.** Taneciklerin genel olarak dağılımı (<12µn)




**Şekil 3.5.** Taneciklerin mikro-yapısı (<12µn)

## 3.5. Ultrafin 12 Çimentosunda Kullanılan Katkı Maddeleri

### 3.5.1. Addiment injektionshilfe 1 katkısı

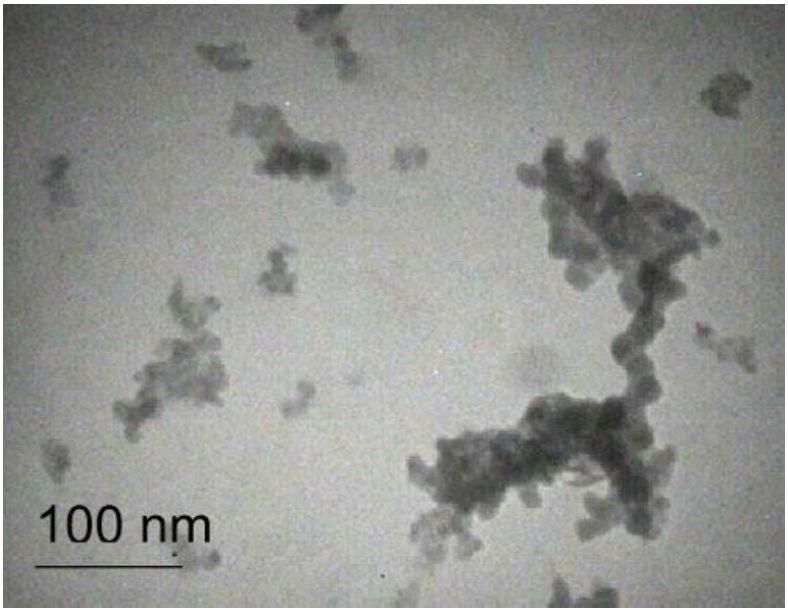
'Addiment Injektionshilte' akışkanlaştırıcı katkısı Alman şirketi 'SIKA' tarafından üretilmiştir. Bahsi geçen akışkanlaştırıcı yüksek kaliteli çimento süspansiyonları ve yapıştırıcı özellikli çimento karışımlarında kullanılmaktadır.

Deneylerde kullanılan akışkanlaştırıcı, üretici firmanın enjeksiyon uygulamaları için tavsiye etmiş olduğu aralık, çimento ağırlığının % 0.25 ila % 3'ü oranındadır. Deneysel çalışmalarımızda oran % 2 olarak benimsenmiştir.

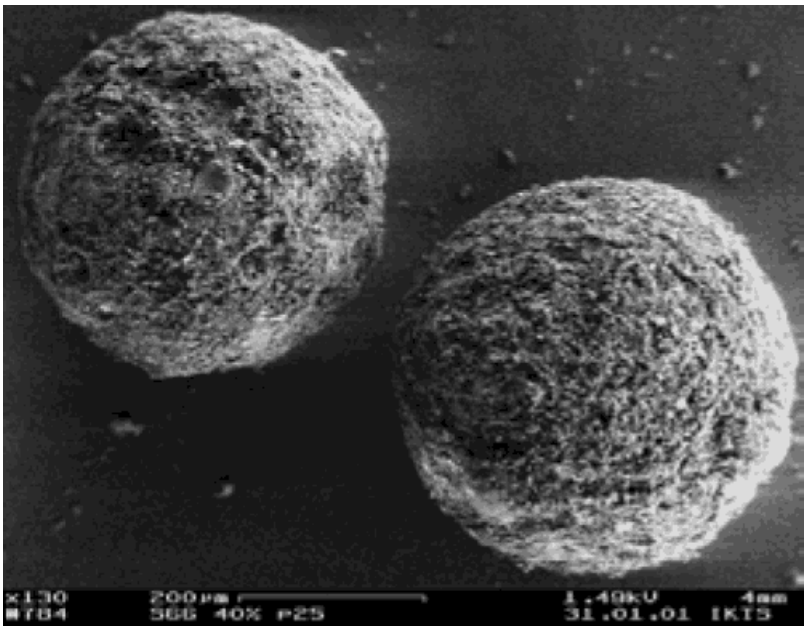
### 3.5.2. Silika dumanı

Deneysel çalışmalarda Alman şirketi (THA KASSEL) tarafından temin edilen "SILICA FUME" silis dumanı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarımızda çimento şerbetine ilave edilen silis dumanı miktarı kuru çimento ağırlığının % 10'dur. Bu oran genelde mukavemet ve durabiliteyi arttırmak için beton imalinde kullanılmaktadır.

Kullanılan silis dumanının tane boyu 3.21 mikrondur. Silis dumanına ait mikroskobik analiz Resim 3.3 ve Resim 3.4'te verilmiştir.




**Resim 3.3.** Taneciklerin genel olarak dağılımı




**Resim 3.4.** Taneciklerin mikroyapısı

### 3.5.3. Sodyum bentonit

Deneysel çalışmalarda Alman şirketi (NAUE GmbH & Co. KG)'den temin edilen ve tane boyutu 2 mikrondan daha az olan sodyum bentonit kullanılmıştır (Resim 3.5). Deneysel çalışmalarımızda çimento şerbetine ilave edilen bentonit miktarı kuru çimento ağırlığının % 1'idir.



**Resim 3.5.** Deneylerde kullanılan bentonit (URL-1).

### 3.5.4. Addiment injektionshilfe 1 + Silis Dumanı

Kuru çimento ağırlığının %10'u silis dumanı ve % 2'si Addiment karıştırılarak bir kısım deneyler yapılmıştır.

### 3.5.5 Katkısız Ultrafin 12 karışımı

Bu başlık adı altında yüksek lisans tezi olarak yapılan deneysel çalışmalar, bu doktora tezi deneysel çalışmalarının bir parçası olarak aynı tez danışmanı tarafından yönlendirilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin tamamı doktora tezi kapsamında yurt dışından ithal edilmiştir (Bu malzemeler ülkemizde üretilmemekte ve pazarı da bulunmamaktadır). Doktora deneysel çalışma programı oldukça kapsamlı olduğundan, deneylerin az bir kısmı, bu çalışma içinde referans gösterilecek şekilde yüksek lisans tezi çalışması olarak planlanmıştır (Avcı, 2009). Ayrıca yüksek lisans çalışması kapsamındaki bazı deneyler şüpheleri gidermek için tekrarlanmış ve deneysel verilerin yanlış hesaplanmış olanları da düzeltilerek (Çizelge 3.11; Avcı, 2009) bu tez kapsamında sunulmuştur.

## 3.6. Deneyde Kullanılan Süspansiyonların Özellikleri

### 3.6.1. Katkısız süspansiyonların hazırlanışı

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak katkılı ve katkısız Ultrafin 12 ince taneli çimentosuna ait en 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 karışımlara sedimantasyon, viskozite ve marsh hunisi deneyleri yapılmıştır (Avcı, 2009).

Bu karışımlardan katkısız enjeksiyon deneylerinde 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 su/ çimento (S/Ç) oranlı, addiment, silika dumanı, bentonit, addiment+silika dumanı katkılı enjeksiyon deneylerinde ise 1.00 su/çimento oranlı karışımlarda karar kılınmıştır.

***Karışımların bu oranlarda seçilme nedeni;*** enjekte edilebilirlik, minimum sedimantasyon yüzdesi, düşük viskozite, yüksek mukavemet ve minimum geçirgenlik elde etmektir.

Enjeksiyon şerbetini karıştırma işlemlerinde karıştırıcının devir sayısı ve karıştırma süresi önemli olup partiküllerin topaklaşmasının ve erken hidratasyonunun önüne geçmek için karıştırma işlemi özenle yürütülmüştür. 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 kolloidal karıştırıcıdır. Karıştırma süresi katkı maddesi kullanımı olması halinde 2 dakikadır.

Katkı maddesinin kullanılmaması sebebiyle karıştırma süresi 3 dakika olarak belirlenmiştir. Karıştırma işlemleri için G.Ü.M.M.F. İnşaat Müh. Bölümü Zemin Mekaniği laboratuarında bulunan mevcut 3000dev/dk.'lık 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 3.6.)

Karıştırma kabına su doldurulup mikser çalıştırılır. Mikser çalışırken ince taneli çimento (Ultrafin 12) ve katkı maddesi eklenir. Ekleme işlemi tamamlandıktan sonra yaklaşık 3 dakika boyunca malzemenin karışması beklenip süspansiyon enjeksiyon tankına boşaltılır (Avcı, 2009).



**Resim 3.6.** Enjeksiyon malzemesinin hazırlanmasında kullanılan mikser (Avcı, 2009).

### 3.6.2. Katkılı süspansiyonların hazırlanışı

#### 3.6.2.1. Addiment katkılı süspansiyonların hazırlanışı

Su içerisine belirlenen miktarlarda ince taneli çimento (Ultrafin 12) katılarak iki dakika boyunca mikserde karıştırılmış ve bu karışıma çimento ağırlığının % 2'si oranında akışkanlaştırıcı da eklenerek tekrar bir dakika daha mikserde karıştırılarak süspansiyonlar elde edilmiştir.

#### 3.6.2.2. Silis Dumanı katkılı süspansiyonlarının hazırlanışı

Karıştırma kabına gerekli olan su miktarı doldurulup mikser çalıştırılır. Mikser çalışırken ince taneli çimento (Ultrafin 12) malzemesi eklenerek, iki dakika boyunca karıştırıldıktan sonra gerekli olan silis dumanı ilave edilip, karıştırma işlemine bir dakika daha devam edilmiştir ve böylece süspansiyonlar hazır hale getirilmiştir.

### 3.6.2.3. Bentonit katkılı süspansiyonların hazırlanışı

Kaplar içerisine önce su sonra üzerine gerekli olan sodyum bentonit (kuru olarak Ultrafin 12 miktarının %1 oranında) eklenerek üç gün boyunca bekletilmiş ve bu bekletme esnasında zaman zaman cam çubukla karıştırılmıştır. Sonra, suyla doygun hale getirilen bentonit bulamacı mikserde karıştırıldıktan sonra kaplara aktarılarak en az bir gün daha bekletilmiştir. Tüm bu işlemler bentonitin iyice doyurulması ve homojen bir hale getirilmesi için yapılmıştır. Deneyden hemen önce kaplarda bekletilen bentonit bulamaçları mikserde bir kez daha karıştırılarak içerisine Ultrafin 12 çimentosu ilave edilmiştir. Bu karışım mikserde tekrar üç dakika daha karıştırılarak deneylere hazır hale getirilmiştir.

### 3.6.2.4. Addiment + Silis Dumanı katkılı süspansiyonların hazırlanışı

Su içerisine belirlenen miktarlarda ince taneli çimento (Ultrafin 12) katılarak iki dakika boyunca mikserde karıştırılmış ve bu karışıma çimento ağırlığının % 2'si oranında addiment, % 10 oranında ise silis dumanı eklenerek bir dakika daha mikserde karıştırılarak süspansiyonlar hazırlanmıştır.

### 3.6.3. Stabilite

Deney, hazırlanan süspansiyonda, su ile çimento tanelerinin birbirinden ayrılması, partiküllerin sedimantasyonunu tamamlaması, tüm partiküller çökeldikten sonraki yüzdeye dayanır. 2 saat sonunda berraklaşan su miktarı süspansiyonun başlangıç hacmine göre <%5'den ise süspansiyon stabildir. Ancak berraklaşan su hacmi süspansiyonun başlangıç hacmine göre >%5 ise süspansiyon stabil değildir. Deneyler ASTM C 940 standartına uygun olarak yapılmıştır.

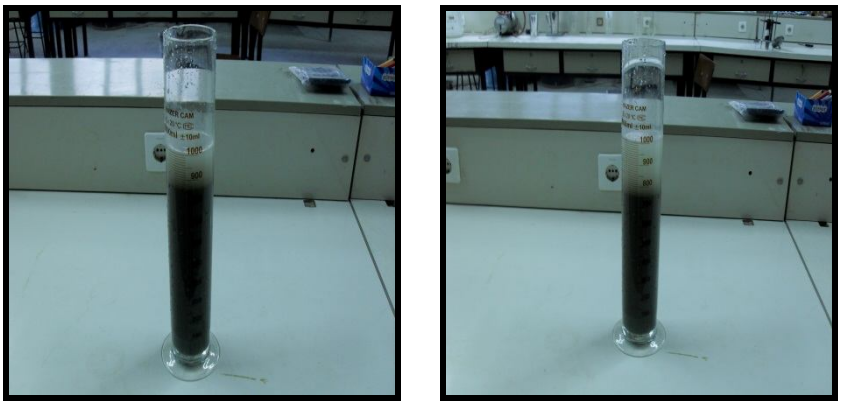
### 3.6.3.1. Katkısız Ultrafin 12 karışımı

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 sedimantasyon deneyleri yapılmıştır. 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 karışımlarda sedimantasyon hemen hemen hiç görülmezken, S/Ç oranları 1.0'in üzerinde olan karışımlarda sedimantasyon gözlenmektedir. S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan karışımların sedimantasyon yüzdeleri %5'in altında olmasından dolayı bu karışımlar

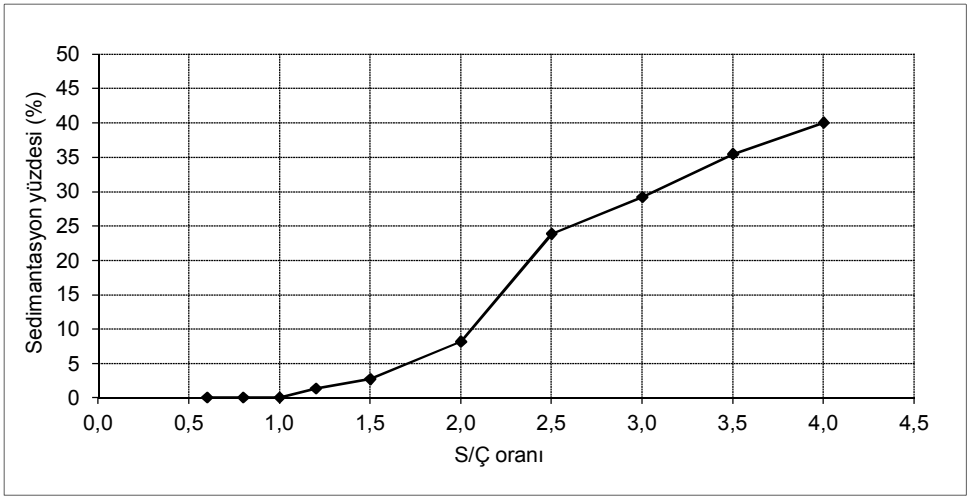
stabildir (Resim 3.7). S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 olan karışımların ise sedimantasyon yüzdeleri %5'in üzerinde olmalarından dolayı bu karışımlar stabil değildir (Resim 3.8) (Avcı, 2009).



**Resim 3.7.** Stabil süspansiyonlar (Avcı, 2009).



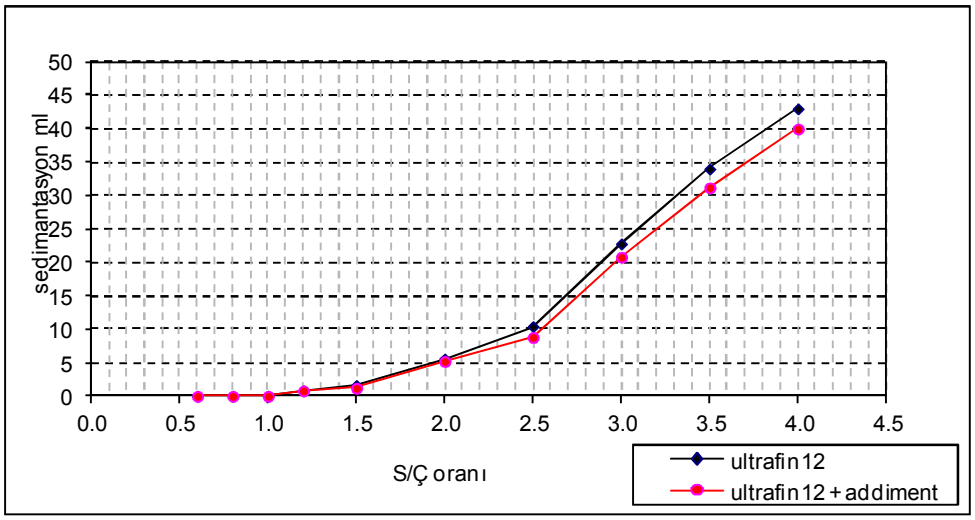
**Resim 3.8.** Stabil olmayan süspansiyonlar (Avcı, 2009).




**Şekil 3.6.** Farklı S/Ç oranlarında hazırlanan süspansiyonların 2 saat sonundaki sedimantasyon yüzdeleri (Avcı, 2009).

### 3.6.3.2. Addiment katkılı Ultrafin 12 karışımı

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 Addiment katkılı karışımlara sedimantasyon deneyleri yapılmıştı ve deneylere ait sonuçlar Şekil 3.7'de verilmiştir.



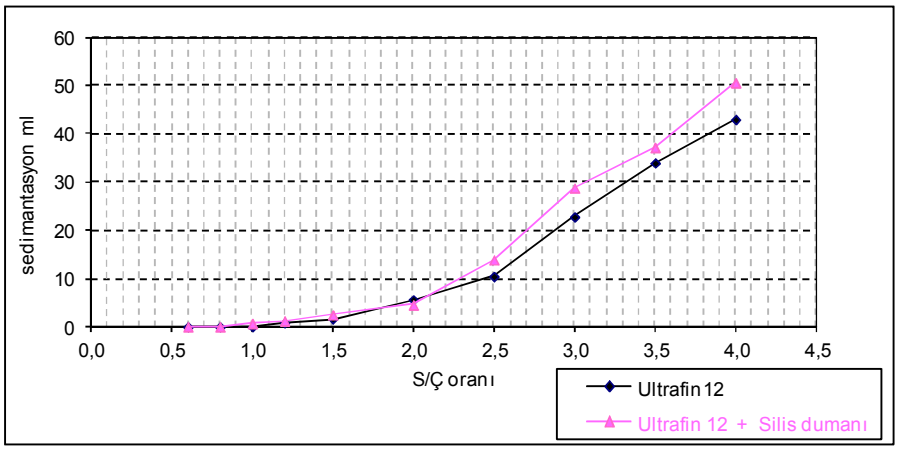

**Şekil 3.7.** Farklı S/Ç oranlarında hazırlanan addiment katkılı süspansiyonların sedimantasyon yüzdeleri.

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 karışımlarda sedimantasyon görülmezken, S/Ç oranları 1.0'in üzerinde olan karışımlarda sedimantasyon gözlenmektedir.

S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan karışımların sedimantasyon yüzdeleri %5'in altında 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 üzerinde olmalarından dolayı bu karışımlar stabil değildir. Addiment katkısı kullanılması sedimantasyon yüzdelerini katkısız karışımlara oranla düşürmüştür.

### 3.6.3.3. Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 karışımı

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 Silika Dumanı katkılı karışımlara sedimantasyon deneyleri yapılmış ve deneylere ait sonuçlar Şekil 3.8'de verilmiştir.




**Şekil 3.8.** Silis dumanı katkısının farklı S/Ç oranlarında hazırlanan süspansiyonların sedimantasyonuna etkisi.

Şekil 3.7 incelendiğinde, süspansiyonların sedimantasyon yüzdeleri S/Ç oranlarına bağlı olarak değişmektedir. 2 saatin sonunda S/Ç oranı 0.6, 0.8 olan karışımlarda sedimantasyon görülmezken, S/Ç oranları 0.8'in üzerinde olan karışımlarda sedimantasyon gözlenmektedir.

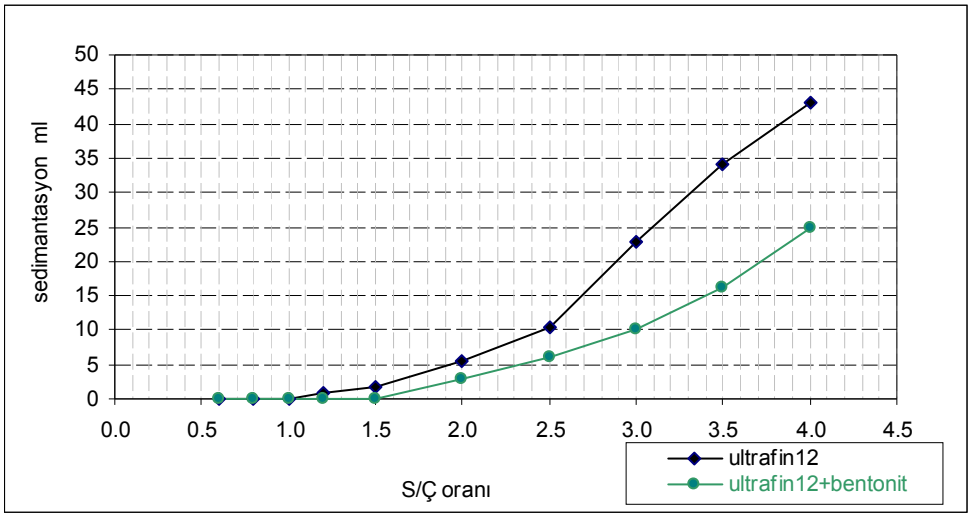
S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan karışımların sedimantasyon yüzdeleri %5 in altında olmasından dolayı bu karışımlar stabildir.

S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 olan karışımların ise sedimantasyon yüzdeleri %5' in üzerinde olmalarından dolayı bu karışımlar stabil değildir.

Silika dumanı katkısı kullanılması sedimantasyon yüzdelerini katkısız karışımlara oranla arttırmıştır.

### 3.6.3.4. Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 karışımı

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 Sodyum Bentonit katkılı karışımlara sedimantasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylere ait sonuçlar Şekil 3.9'de verilmiştir.




**Şekil 3.9.** Sodyum bentonit katkısının farklı S/Ç oranlarında hazırlanan süspansiyonların sedimantasyonuna etkisi.

Şekil 3.9. incelendiğinde, süspansiyonların sedimantasyon yüzdeleri S/Ç oranlarına bağlı olarak değişmektedir. 2 saatin sonunda S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0 olan karışımlarda katılaştığından dolayı deney yapılamazken, S/Ç oranları 1.0 'in üzerinde olan karışımlarda sedimantasyon gözlenmektedir.

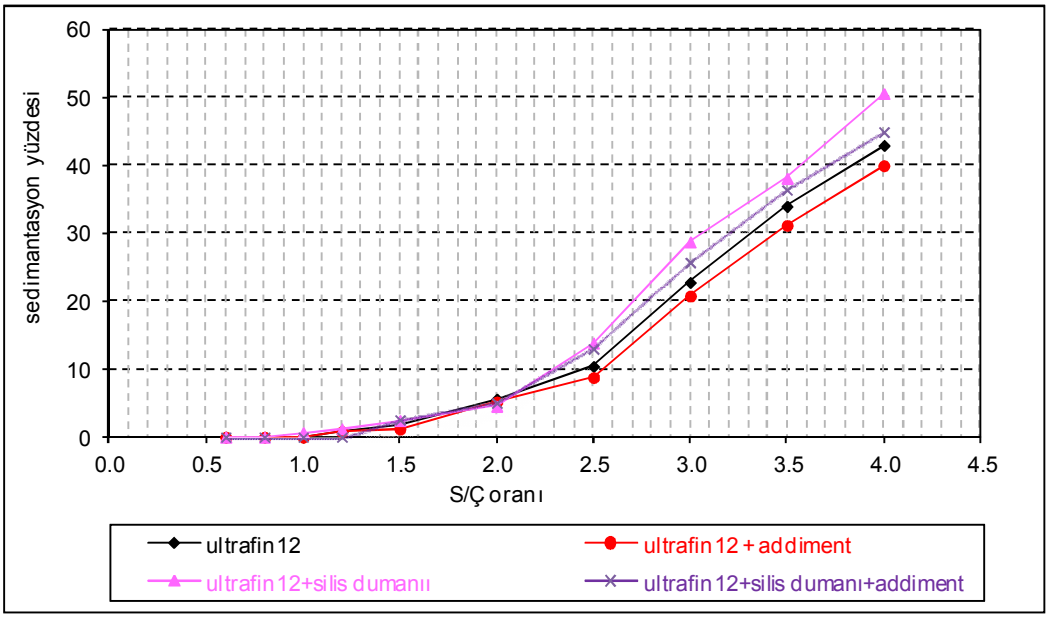
S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 olan karışımların sedimantasyon yüzdeleri %5 in altında olmasından dolayı bu karışımlar stabildir.

S/Ç oranı 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 olan karışımların ise sedimantasyon yüzdeleri %5'in üzerinde olmalarından dolayı bu karışımlar stabil değildir.

Sodyum Bentonit katkısı kullanılması sedimantasyon yüzdelerini katkısız karışımlara oranla azaltmıştır.

### 3.6.3.5. Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 karışımı

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 Addiment+Silis Dumanı katkılı karışımlara sedimantasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylere ait Şekil 3.10.'da verilmiştir.




**Şekil 3.10.** Silis dumanı ve Addiment katkılı farklı S/Ç oranlarında hazırlanan süspansiyonların sedimantasyonuna etkisi.

Şekil 3.10. incelendiğinde, süspansiyonların sedimantasyon yüzdeleri S/Ç oranlarına bağlı olarak değişmektedir. 2 saatin sonunda S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 olan karışımlarda sedimantasyon görülmezken, S/Ç oranları 1.2'in üzerinde olan karışımlarda sedimantasyon gözlenmektedir.

S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 olan karışımların sedimantasyon yüzdeleri % 5'in altında olmasından dolayı bu karışımlar stabildir.

S/Ç oranı 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 olan karışımların ise sedimantasyon yüzdeleri %5'in üzerinde olmalarından dolayı bu karışımlar stabil değildir.

Addiment + Silika dumanı katkısı kullanılması sedimantasyon yüzdelerini katkısız karışımlara oranla arttırmıştır.

### 3.6.4. 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 katkısız ve katkılı hazırlanan süspansiyonların ilk ve son katılaşma sürelerini bulmak için vicat deneyinden yararlanılmıştır. Deneyler ASTM C191'deki standartlarla göre yapılmıştır. Hazırlanan süspansiyonların vicat düzeneğine yerleştirilmesinden sonra, 327.5 gr ağırlığındaki Vicat iğnesi, süspansiyonun üst yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanır. İlk 30 dakika boyunca süspansiyonda penetrasyon okuması alınmaz. Daha sonraki her

10 dakika boyunca penetrasyon değerlerini bulmak için vicat deneyi sürdürülür (Resim 3.9).



**Resim 3.9.**Vicat iğnesi deneyi

### 3.6.4.1. Katkısız Ultrafin 12 süspansiyonları katılaşma süreleri

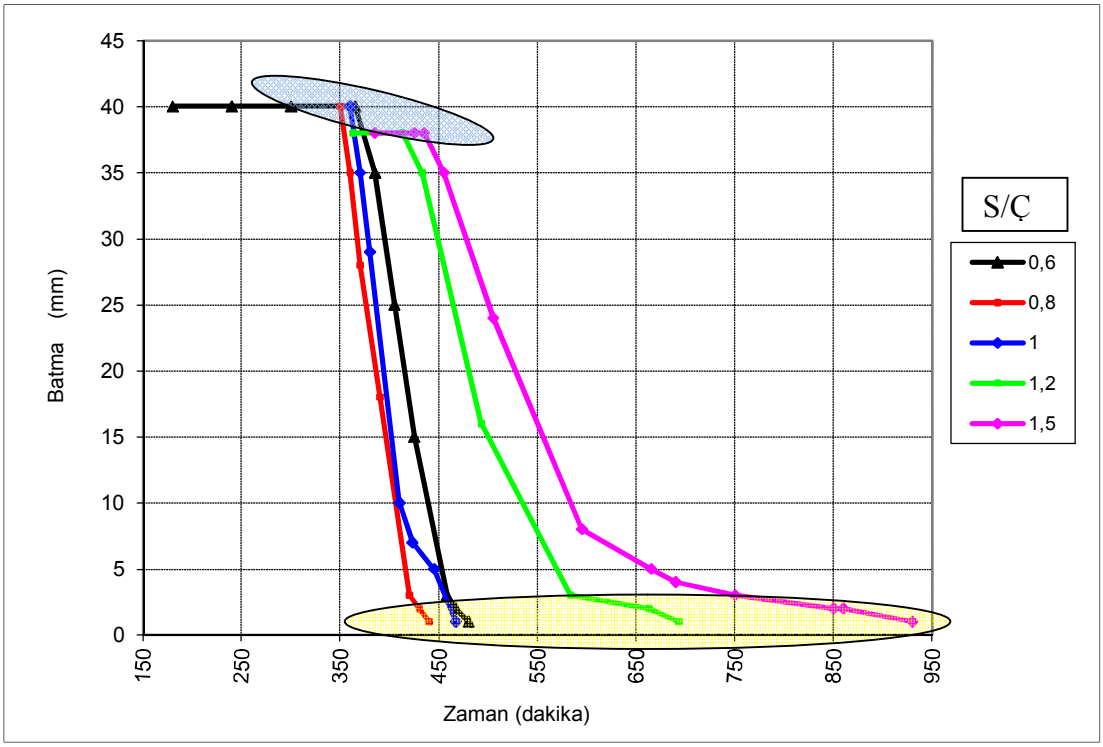
Vicat deneyi yapılan süspansiyonların penetrasyon değerleri Çizelge 3.4-3.5'de verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde S/Ç oranlarının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı görülmektedir. S/Ç oranı 3.0 ve 3.5'da yüksek su oranından dolayı süspansiyonda kofluk oluşmuş, malzeme prizini almasına rağmen iğne süspansiyona penetre olmaya devam etmiştir. Süspansiyonda kofluk oluşmasından dolayı deneye son verilmiştir. S/Ç oranı 4.0'de bir aylık süre geçmesine rağmen iğne süspansiyona penetre olmaya devam ettiği için deneye son verilmiştir (Avcı 2009).

**Çizelge 3.4.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların vicat deney sonuçları (TZ: toplam zaman, B: batma ) (Avcı, 2009).

| S/Ç oranı | | S/Ç oranı | | S/Ç oranı | | S/Ç oranı | | S/Ç oranı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | | 0.8 | | 1 | | 1.2 | | 1.5 | |
| 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) |
| 180 | 40 | 350 | 40 | 360 | 40 | 363 | 38 | 385 | 38 |
| 240 | 40 | 360 | 35 | 370 | 35 | 413 | 38 | 425 | 38 |
| 300 | 40 | 370 | 28 | 380 | 29 | 433 | 35 | 435 | 38 |
| 365 | 40 | 390 | 18 | 410 | 10 | 493 | 16 | 455 | 35 |
| 385 | 35 | 420 | 3 | 423 | 7 | 583 | 3 | 505 | 24 |
| 405 | 25 | 430 | 2 | 445 | 5 | 663 | 2 | 595 | 8 |
| 425 | 15 | 440 | 1 | 467 | 1 | 693 | 1 | 665 | 5 |
| 458 | 3 | | | 467 | | | | 690 | 4 |
| 467 | 2 | | | | | | | 750 | 3 |
| 480 | 1 | | | | | | | 850 | 2 |
| | | | | | | | | 860 | 2 |
| | | | | | | | | 930 | 1 |

**Çizelge 3.5.** S/Ç oranları 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan süspansiyonların vicat deney sonuçları (TZ: toplam zaman, B: batma) (Avcı, 2009).

| 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 | 2170 | 23 |
| 490 | 38 | 1625 | 35 | 1985 | 37 | 1980 | 38 | 2825 | 19 |
| 585 | 38 | 1680 | 28 | 2080 | 36 | 2075 | 38 | 3095 | 18 |
| 660 | 37 | 1980 | 24 | 2845 | 32 | 2840 | 38 | 3235 | 18 |
| 690 | 33 | 2075 | 22 | 3170 | 31 | 3165 | 38 | 3325 | 18 |
| 750 | 30 | 2840 | 18 | 4520 | 29 | 4515 | 38 | 3465 | 18 |
| 840 | 26 | 3165 | 14 | 5770 | 28 | 5765 | 37 | 4205 | 17 |
| 860 | 22,5 | 4515 | 10 | 7420 | 26 | 7415 | 36 | 5645 | 16 |
| 930 | 20 | 5760 | 9 | 8510 | 24 | 8505 | 35 | 7355 | 14 |
| 1040 | 14 | 7415 | 8 | 10485 | 21 | 10480 | 34 | 15865 | 12 |
| 1355 | 9 | 8505 | 7 | 11845 | 19 | 11840 | 32 | 21775 | 12 |
| 1595 | 6 | 10490 | 6 | 13225 | 17 | 13220 | 30 | 40495 | 8 |
| 1910 | 3 | 11850 | 6 | 14805 | 16 | 14800 | 27 | 49255 | 7 |
| 2925 | 2 | 13230 | 5 | 16045 | 15 | 16040 | 26 | 1 Ay dolduğu için deneye son verildi | |
| 4058 | 1 | 14810 | 4 | 17305 | 14 | 17300 | 25 | | |
| | | 16050 | 3,5 | 18925 | 13 | 18920 | 24 | | |
| | | 17310 | 3 | 19885 | 13 | 19880 | 25 | | |
| | | 18930 | 2 | 20365 | 13 | 20360 | 24 | | |
| | | 19890 | 2 | 21635 | 13 | 21630 | 24 | | |
| | | 20370 | 2 | 22285 | 13 | 22280 | 24 | | |
| | | 21640 | 2 | 23395 | 13 | 23390 | 24 | | |
| | | 22290 | 1 | 25095 | 13 | 25090 | 24 | | |
| | | | | 27505 | 13 | 27500 | 24 | | |
| | | | | 29125 | 13 | 29120 | 24 | | |
| | | | | 36025 | 13 | 36020 | 24 | | |
| | | | | Deneye son verildi. Numunede kofluk var. | | Deneye son verildi. Numunede kofluk var. | | | |



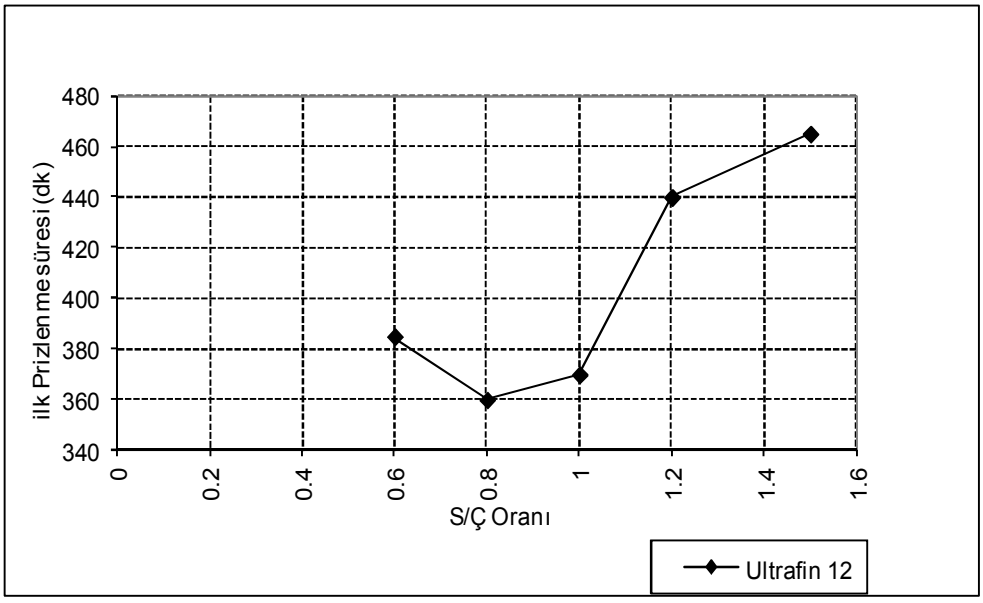

**Şekil 3.11.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların vicat deneyi sonucu (Penetrasyon-Zaman ilişkisi) (Avcı 2009).

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13.'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.

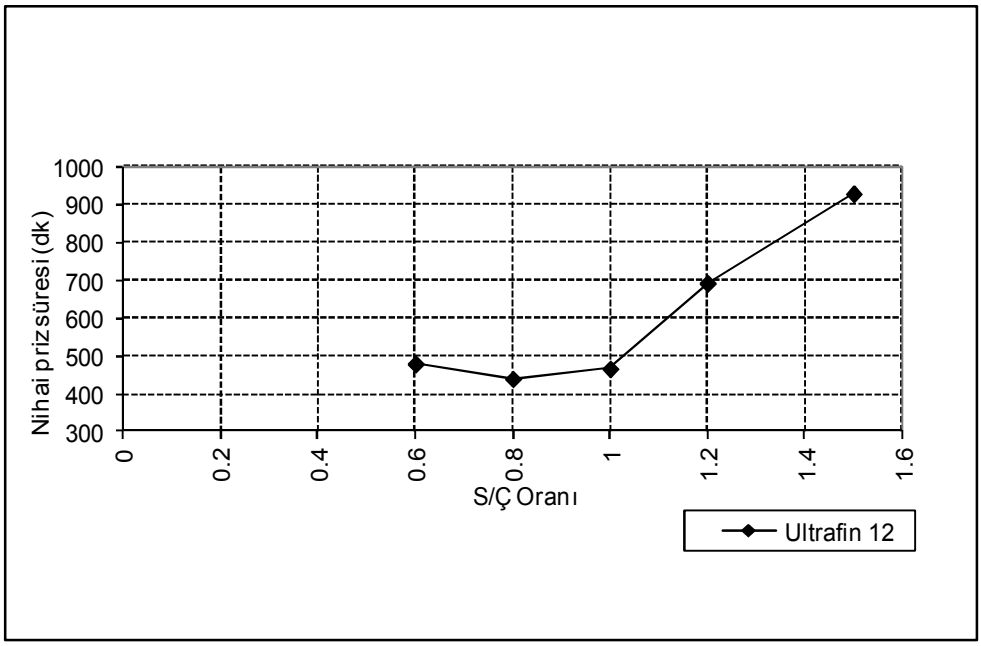
En kısa süreli priz başlangıç (390-360-375 dk.) ve priz bitiş (480-440-467 dk.) süreleri S/Ç oranı 0.6, 0.8 ve 1.0'da görülmekte iken, en uzun priz başlangıç (7965-17300-2170 dk.) ve bitiş süresi (kofluk oluştuğu ve bir ayı geçtiği için deneye son verildi) S/Ç oranı 3.0, 3.5 ve 4.0'de görülmektedir.

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.




**Şekil 3.12.** İlk prizlenme süresinin S/Ç oranı ile değişimi (Avcı, 2009).




**Şekil 3.13.** Nihai prizlenme süresinin S/Ç oranı ile değişimi (Avcı, 2009)

### 3.6.4.2. Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları katılaşma süreleri

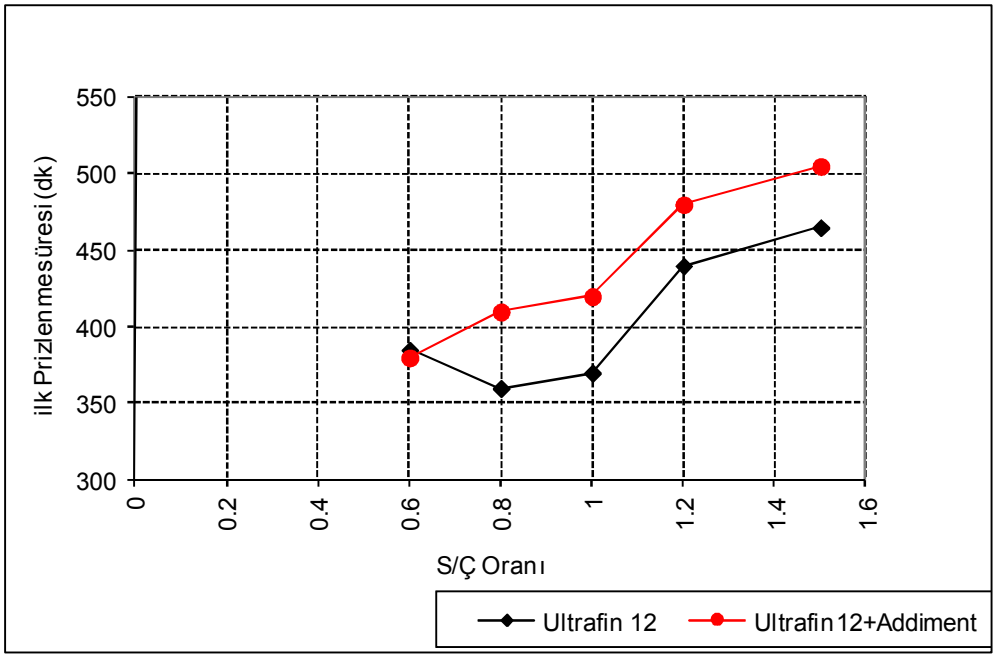
Vicat iğnesi deneyi yapılan Addiment katkılı süspansiyonların penetrasyon değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Çizelge incelendiğinde S/Ç oranlarının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı görülmektedir.

**Çizelge 3.6.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların Vicat iğnesi deney sonuçları (TZ: Toplam zaman, B: Batma )

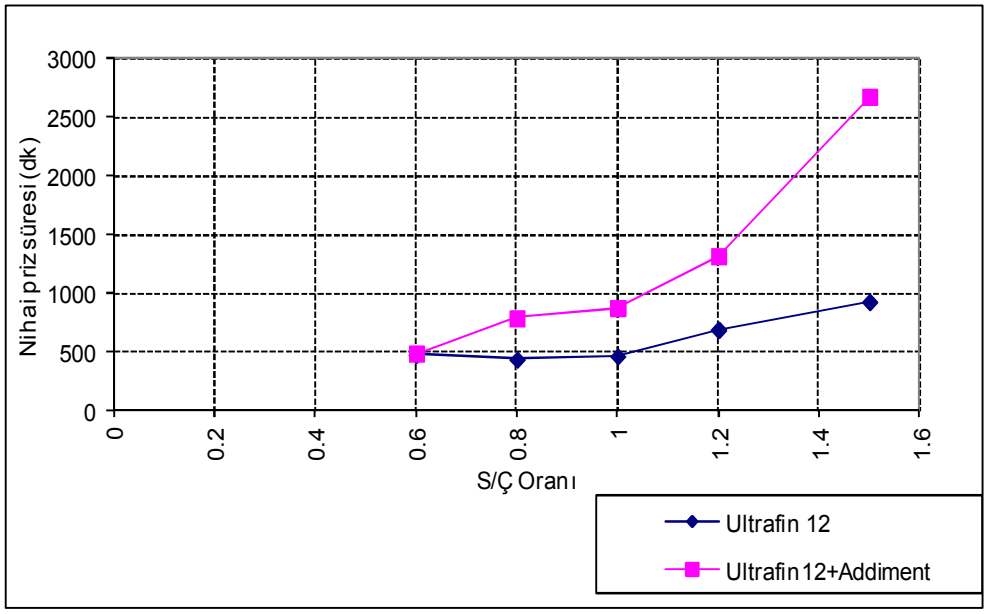
| S/Ç ORANI | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | | 0.8 | | 1 | | 1.2 | | 1.5 | |
| TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) |
| 180 | 40 | 240 | 40 | 180 | 40 | 180 | 39 | 60 | 38 |
| 240 | 40 | 350 | 40 | 240 | 40 | 240 | 39 | 120 | 38 |
| 300 | 40 | 400 | 40 | 300 | 40 | 300 | 39 | 180 | 38 |
| 360 | 40 | 410 | 35 | 360 | 40 | 360 | 39 | 240 | 38 |
| 380 | 35 | 470 | 28 | 420 | 35 | 420 | 39 | 300 | 38 |
| 400 | 25 | 550 | 18 | 480 | 29 | 480 | 35 | 480 | 34 |
| 420 | 15 | 670 | 3 | 660 | 10 | 600 | 27 | 720 | 26 |
| 460 | 3 | 730 | 2 | 720 | 6 | 840 | 14 | 1240 | 12 |
| 470 | 2 | 790 | 1 | 780 | 3 | 1020 | 6 | 1480 | 8 |
| 490 | 1 | | | 840 | 2 | 1200 | 2 | 1660 | 6 |
| | | | | 880 | 1 | 1320 | 1 | 1900 | 4 |
| | | | | | | | | 2200 | 3 |
| | | | | | | | | 2440 | 2 |
| | | | | | | | | 2680 | 1 |

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de her iki süspansiyonda da S/Ç oranının artmasıyla ilk ve nihai prizlenme süreleri artmaktadır. Ayrıca Ultrafin 12 süspansiyonlarına addiment katkısı S/Ç oranı 0.6 hariç diğer tüm S/Ç oranlarında ilk ve nihai prizlenme sürelerini önemli miktarda artırmaktadır.

Örneğin Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'de ilk prizlenme süresi 370 dk. iken addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'deki ilk prizlenme süresi 420 dk.'dır. Aynı şekilde Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'de priz bitiş süresi 467 dk. iken addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'deki priz bitiş süresi 880 dk. olarak tespit edilmiştir. Bu artış diğer S/Ç oranları içinde geçerlidir.




**Şekil 3.14.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan Ultrafin 12 + Addiment katkılı süspansiyonların priz başlangıç süreleri



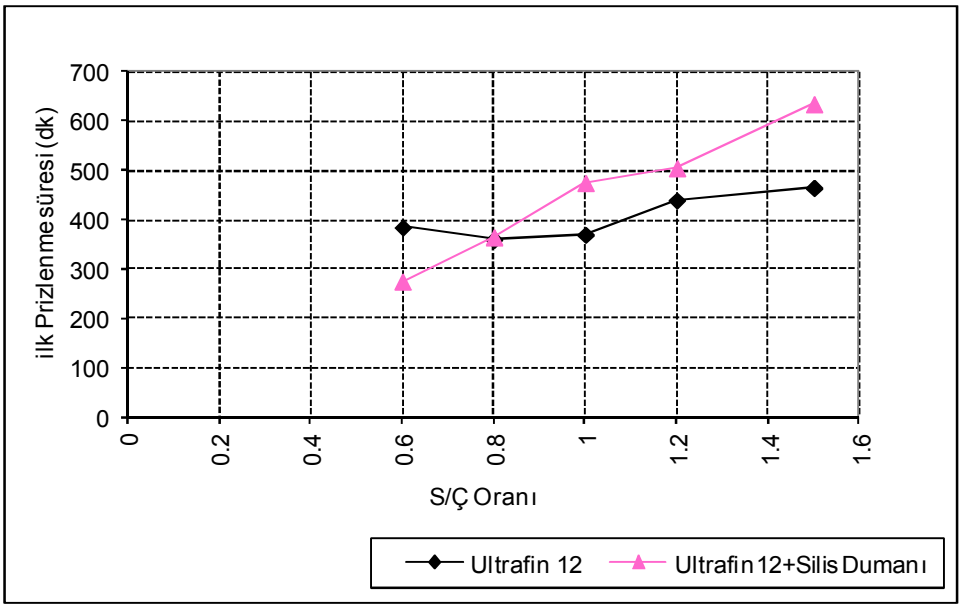

**Şekil 3.15.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan Ultrafin 12 + Addiment katkılı süspansiyonların priz bitiş süreleri.

### 3.6.4.3. Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları katılaşma süreleri

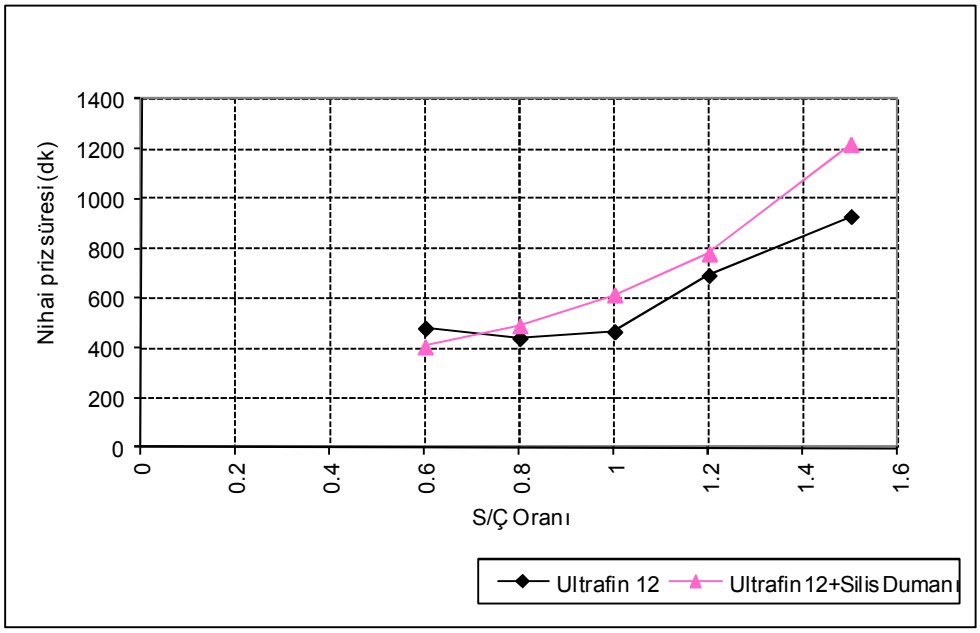
Vicat iğnesi deneyi yapılan silis dumanı katkılı süspansiyonların penetrasyon değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde S/Ç oranlarının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı görülmektedir.

**Çizelge 3.7.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların vicat iğnesi deney sonuçları (TZ: toplam zaman, B: batma )

| S/Ç ORANI | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | | 0.8 | | 1 | | 1.2 | | 1.5 | |
| TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) |
| 20 | 40 | 55 | 40 | 90 | 40 | 120 | 40 | 140 | 39 |
| 80 | 40 | 115 | 40 | 150 | 40 | 180 | 40 | 200 | 39 |
| 125 | 40 | 160 | 40 | 195 | 40 | 225 | 40 | 245 | 39 |
| 215 | 40 | 250 | 40 | 285 | 40 | 315 | 40 | 335 | 39 |
| 245 | 40 | 280 | 40 | 315 | 40 | 345 | 40 | 365 | 39 |
| 275 | 36 | 310 | 40 | 345 | 40 | 375 | 40 | 395 | 39 |
| 315 | 22 | 350 | 40 | 385 | 40 | 415 | 40 | 435 | 39 |
| 375 | 3 | 410 | 23 | 445 | 40 | 475 | 40 | 495 | 39 |
| 405 | 1 | 440 | 9 | 475 | 28 | 505 | 37 | 525 | 39 |
| | | 460 | 5 | 495 | 24 | 525 | 32 | 545 | 39 |
| | | 490 | 1 | 525 | 10 | 555 | 21 | 575 | 39 |
| | | | | 555 | 6 | 585 | 15 | 605 | 38 |
| | | | | 585 | 2 | 615 | 13 | 635 | 35 |
| | | | | 615 | 1 | 645 | 8 | 665 | 32 |
| | | | | | | 720 | 3 | 740 | 24 |
| | | | | | | 780 | 1 | 800 | 16 |
| | | | | | | | | 1130 | 2 |
| | | | | | | | | 1220 | 1 |




**Şekil 3.16.** İlk priz sürelerinin silis dumanı katkılı süspansiyonların S/Ç oranları ile değişimi.




**Şekil 3.17.** Nihai priz sürelerinin silis dumanı katkılı süspansiyonların S/Ç oranları ile değişimi.

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların priz başlangıç ve bitiş zamanları verilmiştir. En kısa süreli priz başlangıç süresi 275 dakika iken, en kısa priz bitiş süresi 405 dakikadır. Şekil 3.38 ve 3.39'a bakıldığında S/Ç oranı küçüldükçe priz başlangıç ve bitiş süreleri kısalmaktadır. Şekil 3.38 incelendiğinde silis dumanı katkısıyla süspansiyonlarda S/Ç oranı 0.6'daki priz başlangıç değeri S/Ç oranı 0.8'den büyük iken, değerler S/Ç Oranı 0.8'den sonra artış göstermiştir. Şekil 3.39'inde nihai prizlenme süreleri S/Ç oranının artmasıyla artış göstermiştir. Silis dumanı eklenmesi priz başlangıç ve bitiş sürelerini uzatmıştır.

### 3.6.4.4. Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları katılaşma süreleri

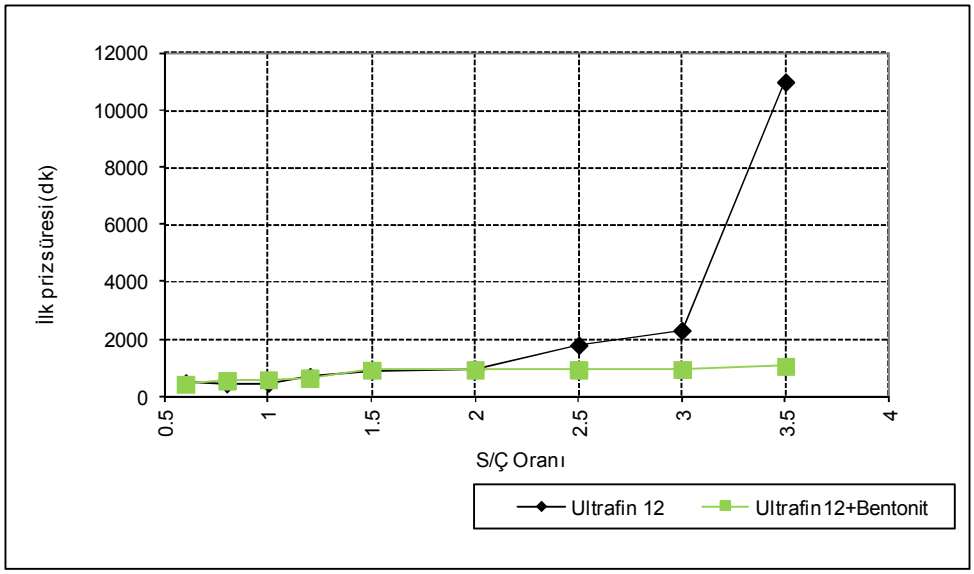
Sodyum bentonit katkılı S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 olarak hazırlanan stabil süspansiyonların ilk ve son katılaşma sürelerini bulmak için Vicat iğnesi deneyi yapılmıştır.

Vicat iğnesi deneyi yapılan süspansiyonların penetrasyon değerleri Çizelge 3.8'de verilmiştir. Çizelge 3.17 incelendiğinde S/Ç oranlarının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı görülmektedir.

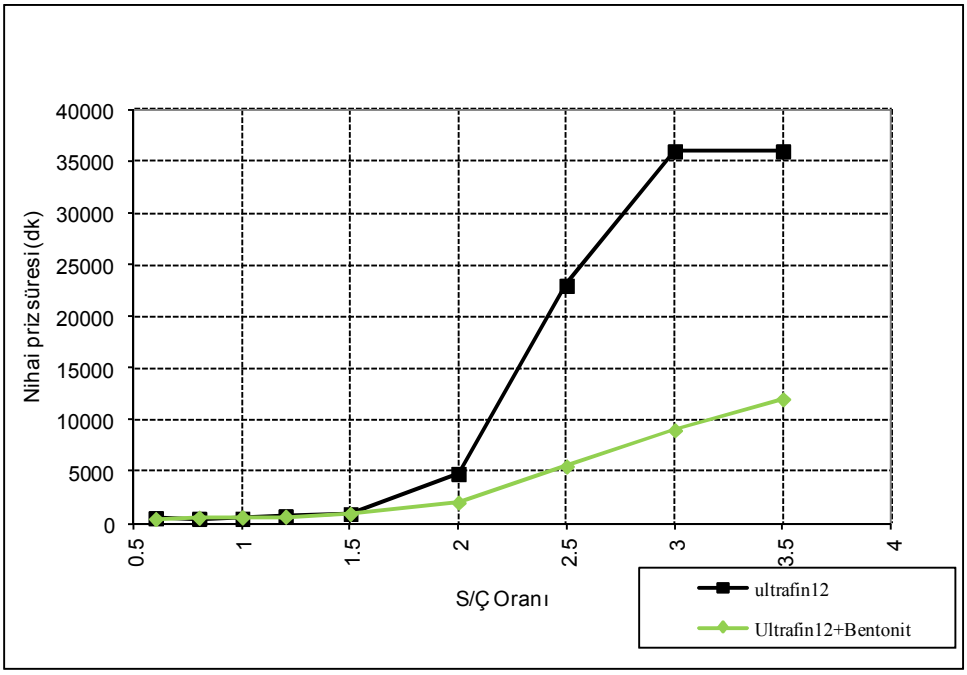
**Çizelge 3.8.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların vicat iğnesi deney sonuçları (TZ: toplam zaman, B: batma )

| S/Ç ORANI | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | | 0.8 | | 1 | | 1.2 | | 1.5 | |
| TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) |
| 40 | 40 | 203 | 39 | 240 | 39 | 270 | 39 | 290 | 39 |
| 180 | 40 | 333 | 20 | 370 | 26 | 400 | 35 | 420 | 39 |
| 270 | 39 | 543 | 1 | 580 | 1 | 610 | 2 | 630 | 8 |
| 410 | 2 | | | | | 645 | 1 | 665 | 4 |
| 430 | 1 | | | | | | | 850 | 2 |
| | | | | | | | | 920 | 1 |

Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 incelendiğinde Sodyum bentonit katkısız karışımlara oranla priz sürelerini kısaltmıştır. Özellikle S/Ç oranı 2.0'dan sonra priz başlangıç ve bitiş sürelerinde önemli azalmalar olmuştur. Örneğin S/Ç oranı 3.0 olan katkısız Ultrafin 12 süspansiyonların priz başlangıç ve bitiş süreleri 2460 – 36025 dk. iken, sodyum bentonit katkısıyla bu süreler 840–8790 dk.'ya düşmüştür. Sodyum bentonit katkısı prizlenme sürelerini kısaltarak, olumlu yönde etki etmiştir.




**Şekil 3.18.** İlk priz sürelerinin sodyum bentonit katkılı Ultrafin12 süspansiyonların S/Ç oranları ile değişimi.




**Şekil 3.19.** Nihai priz (priz bitiş süresi) sürelerinin sodyum bentonit katkılı Ultrafin12 süspansiyonların S/Ç oranları ile değişimi.

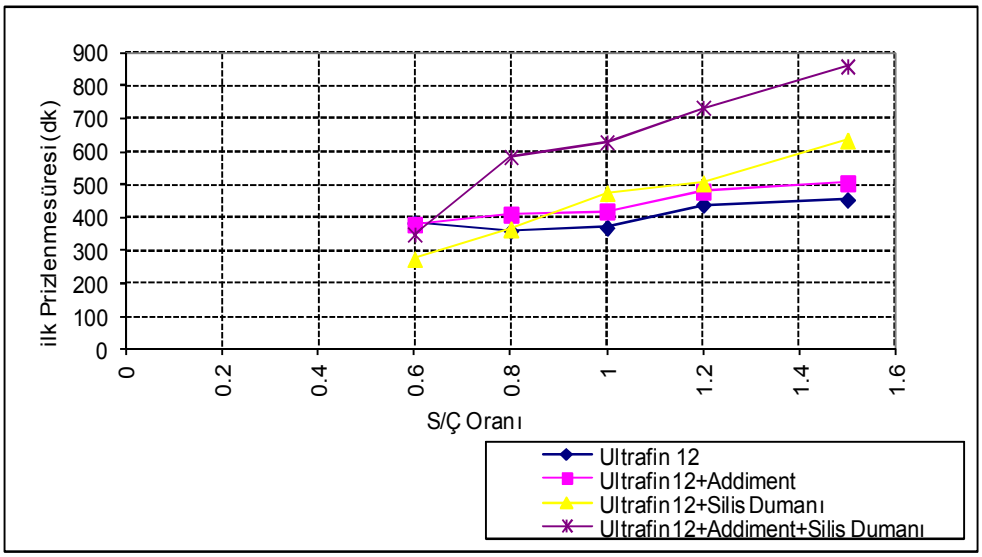
### 3.6.4.5. Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları katılaşma süreleri

Silis dumanı ve addiment katkılı S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olarak hazırlanan stabil süspansiyonların ilk ve son katılaşma sürelerini bulmak için vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır. Vicat iğnesi deneyi yapılan süspansiyonların penetrasyon değerleri Çizelge 3.9'da verilmiştir.

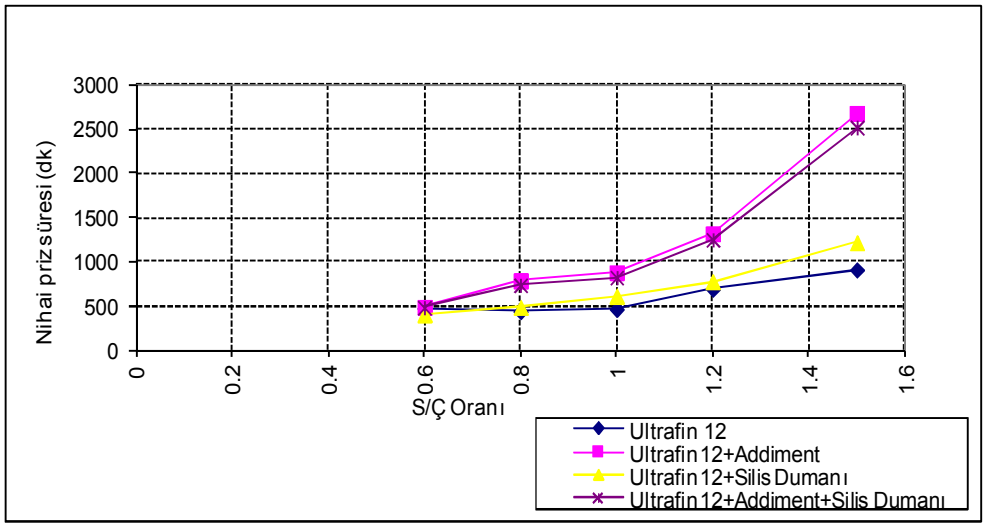
**Çizelge 3.9.** S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların Vicat iğnesi deney sonuçları (TZ: toplam zaman, B: batma ).

| S/Ç ORANI | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | | 0.8 | | 1 | | 1.2 | | 1.5 | |
| TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) | TZ (dk) | B (mm) |
| 225 | 39 | 305 | 40 | 285 | 40 | 262 | 40 | 240 | 39 |
| 295 | 39 | 385 | 40 | 445 | 40 | 422 | 40 | 400 | 39 |
| 325 | 39 | 445 | 40 | 525 | 40 | 502 | 40 | 480 | 39 |
| 405 | 18 | 465 | 40 | 585 | 40 | 562 | 40 | 540 | 39 |
| 465 | 3 | 545 | 40 | 625 | 38 | 602 | 40 | 1080 | 15 |
| 485 | 1 | 605 | 24 | 720 | 16 | 697 | 39 | 1230 | 12 |
| | | 645 | 13 | 825 | 1 | 1042 | 3 | 1410 | 8 |
| | | 740 | 1 | | | 1102 | 2 | 1740 | 2 |
| | | | | | | 1252 | 1 | 2520 | 1 |

Çizelge 3.8 incelendiğinde S/Ç oranlarının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı görülmekte olup, S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların priz başlangıç ve bitiş zamanları verilmiştir. En kısa süreli priz başlangıç süreleri S/Ç oranı 0.6 ve 0.8'de 340 ile 564 dakika arasında değişirken, priz bitiş süreleri ise S/Ç oranı 0.6 ve 0.8'de 485 ila 740 dakika arasında yer almaktadır.




**Şekil 3.20.** Addiment+Silika Dumanı katkılı karışımın priz başlangıç süresinin S/Ç oranıyla değişimi



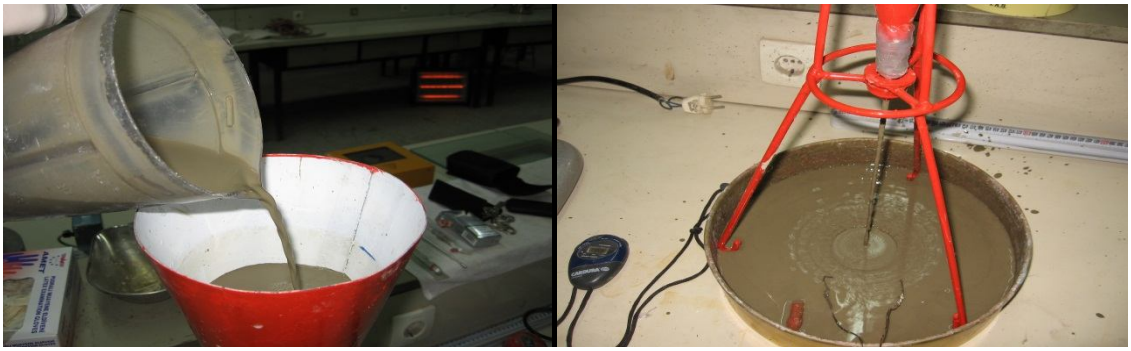

**Şekil 3.21.** Addiment+Silika Dumanı katkılı karışımın priz bitiş süresinin S/Ç oranıyla değişimi

Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'e bakıldığında genel olarak Ultrafin 12 süspansiyonlarına silika dumanı ve addiment katkısı priz başlangıç ve bitiş sürelerini artırmıştır. Yapılan katkılı ve katkısız deneyler içinde addiment+silika dumanlı karışım en yüksek priz başlangıç süresine sahiptir.

### 3.6.5. 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 katkılı ve katkısız karışımlara Marsh hunisi ve kohezyon ölçer plaka deneyleri yapılmıştır. Deneyler ASTM C939'daki prosedürlere göre yürütülmüştür.

Marsh hunisinden 1000 ml'lik süspansiyonların akması için geçen süre göreceli viskoziteyi verir (Resim 3.10.). Gerçek viskoziteyi bulmak için, Marsh hunisi deneyinin yanında kohezyon ölçer plaka deneyinden de yararlanılır. Kohezyon ölçer plaka deneyinde, 15x15 cm'lik hafif pürüzlü plaka, hazırlanan süspansiyona daldırılır ve çıkartılır ve daha sonra damlama durana kadar beklenir. Daha sonra plaka tartılarak plakanın her iki yüzüne yapışan süspansiyon miktarı belirlenir (Resim 3.11) (Avcı, 2009).



**Resim 3.10.** Marsh hunisinden süspansiyonun akması



**Resim 3.11.** Kohezyon ölçer plaka ile her iki yüzde tutulan süspansiyon ağırlığının belirlenmesi

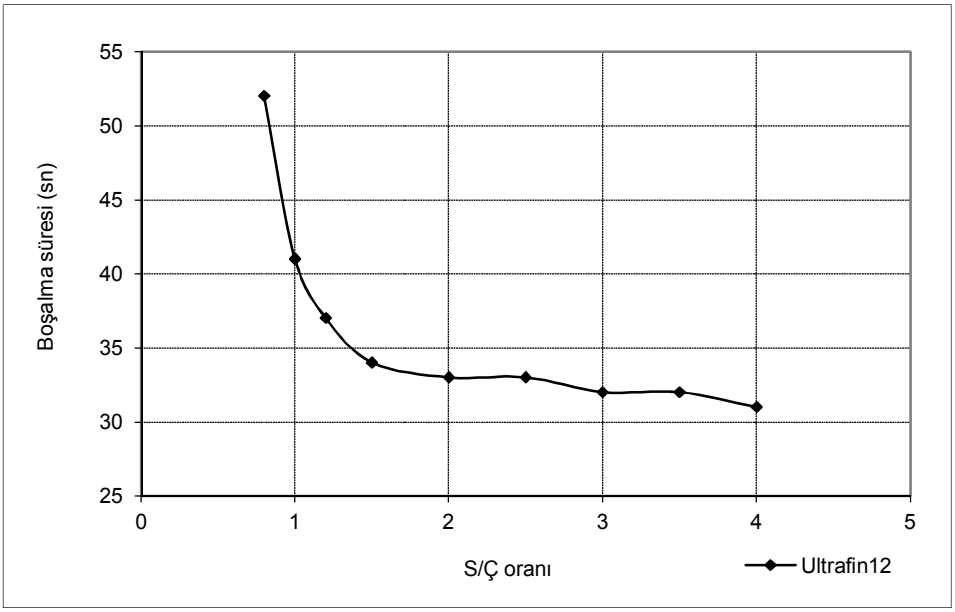
### 3.6.5.1 Katkısız Ultrafin 12 süspansiyonları viskozite değerleri

Katkısız Ultrafin 12 çimentosuyla S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 de yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 3.10'da, grafiksel gösterimleri ise Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'de verilmiştir (Avcı, 2009).

**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 karışımlara ait Marsh hunisi ve Kohezyon ölçer plaka deney sonuçları (Avcı 2009).

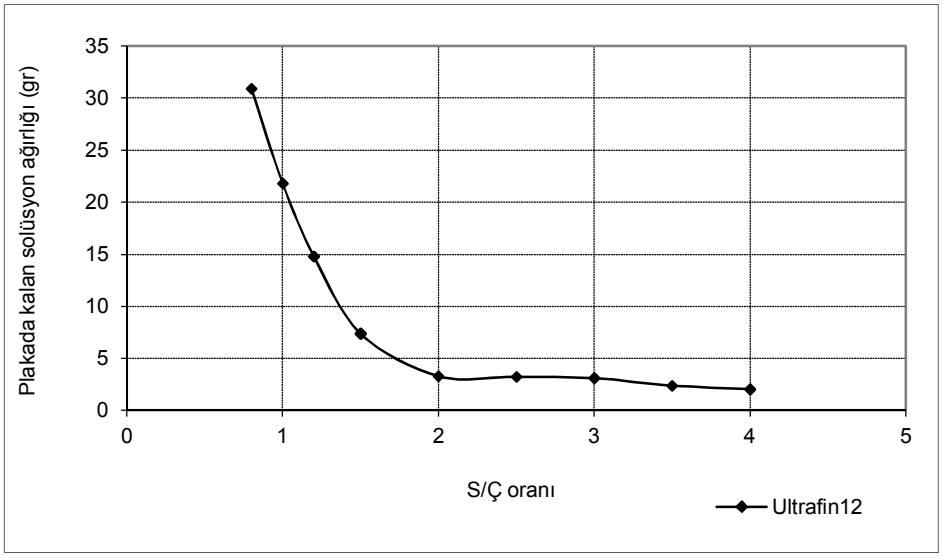
| Numune Adı | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ultrafin 12 (Katkısız) | | | | | | | |
| Marsh hunisi - Plaka - B.H.A. - Vicat deneyleri için kullanılacak malzeme listesi | | Marsh Hunisi Deneyi | | Plaka Deneyi | | | |
| Numune Adı S/Ç Oranı | Süspansiyon Miktarı (ml) | Marsh Hunisi Boşalma Süresi (sn) | Açıklama | Plaka Ağırlığı (gr) | Plaka + Süspansiyon ağırlığı (gr) | Plakada kalan Süspansiyon ağırlığı (gr) | Açıklama |
| 4 | 1000 | 31 | | 130,86 | 132,86 | 2 | |
| 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 | 3,2 | |
| 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 5/4 litre solüsyon kaldı | 130,86 | | -130,86 | Deney yapılamadı |

Şekil 3.22 incelendiğinde S/Ç oranının artması ile akış süresi 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 3.22.** Marsh hunisi deneyinde Akma süresi ile S/Ç oranının değişimi

Şekil 3.23'e 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 gr ağırlığında malzeme kalmıştır.




**Şekil 3.23.** Kohezyon ölçer plaka deneyinde plaka üzerindeki süspansiyon ağırlığının S/Ç oranı ile değişimi

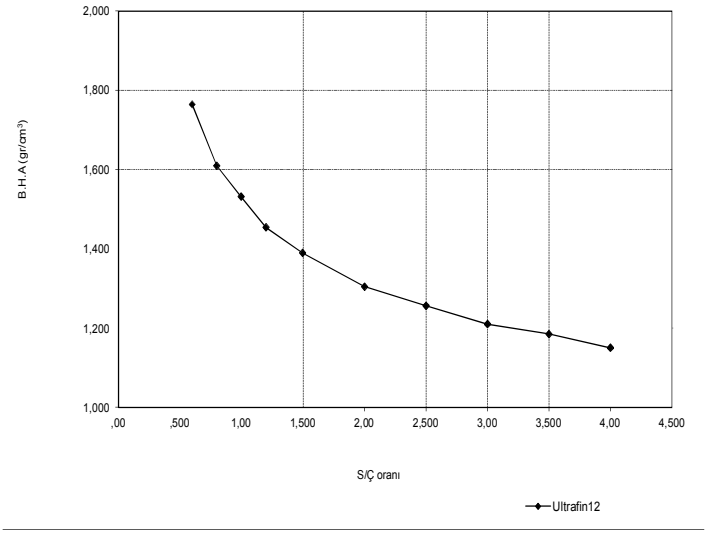
Marsh hunisi ve kohezyon ölçer plaka deneyleri yapıldıktan sonra, süspansiyonların birim hacim ağırlıkları (γ) belirlenir. Birim hacim ağırlıklar belirlenirken hacmi bilinen (Standart hacimsel büzülme kabı) kabın içine süspansiyon düzgün bir şekilde yerleştirilir. Tıraşlama camı kullanılarak süspansiyonun birim hacim kabı dışında kalan kısmı temizlenir ve birim hacim kabı tartılır (Resim 3.12). Buradan kabın içindeki süspansiyonun ağırlığı bulunur ve hacme bölünerek karışımların birim hacim ağırlıkları hesaplanır. Çizelge 3.11' da süspansiyonlara ait birim hacim ağırlık değerleri, Şekil 3.24'de ise grafik gösterimleri verilmiştir. Şekil 3.10 incelendiğinde S/Ç oranın artmasıyla birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmektedir. S/Ç oranı 0.6 da süspansiyonun birim hacim ağırlığı 1.454 gr/cm$^3$ iken, S/Ç oranı 4.0'da süspansiyonun birim hacim ağırlığı 1.150 gr/cm$^3$'dür.



**Resim 3.12.** Süspansiyonların birim hacim ağırlıklarının (γ) belirlenmesi

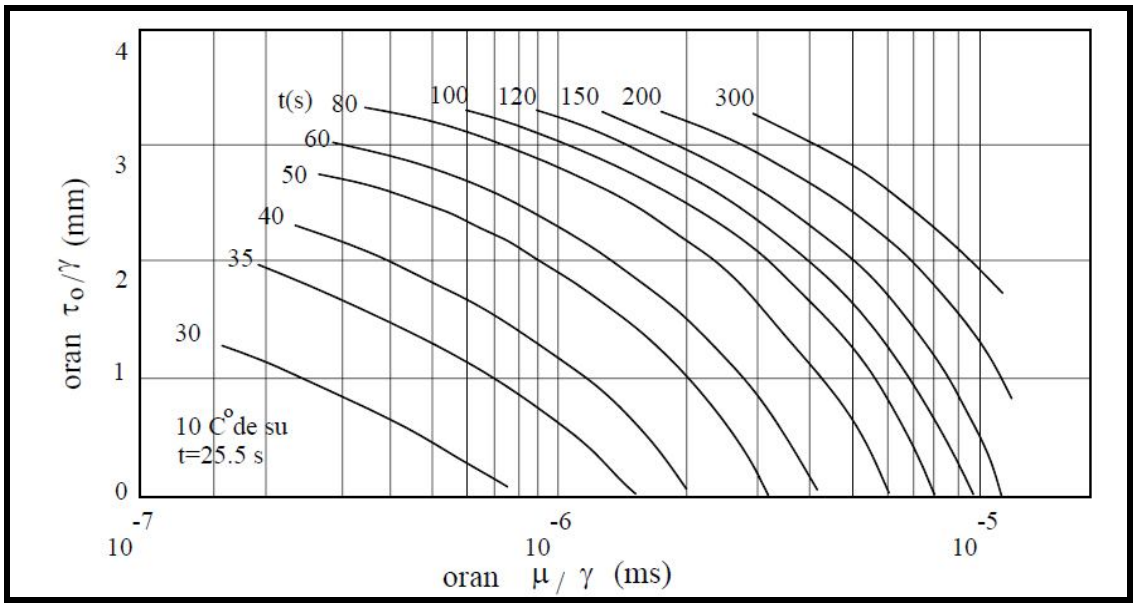
**Çizelge 3.11.** S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan katkısız karışımlara ait birim hacim ağırlıkları (Avcı, 2009).

| Numune Adı | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Ultrafin 12 (Katkısız) | | | | | |
| Numune Adı Su/Çim Oranı | B.H.A. Deneyi | | | | |
| | B.H.A. Kabının Hacmi (a) (cm$^3$) | B.H.A. Kabının ağırlığı (b) (gr) | B.H.A. Kab + solüsyon ağırlığı (c) (gr) | B.H.A. (c-b)/(a) gr/cm$^3$ | Açıklama |
| 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 3.24.** B.H.A ların S/Ç oranlarına göre değişimi.

Birim hacim ağırlıkların bulunmasıyla $\tau_o/\gamma$ değerleri elde edilir. Marsh hunisinden elde edilen değer ve $\tau_o/\gamma$ değeri Lombardi'nin önerdiği abağa girilerek kinematik viskozite ($\mu/\gamma$) değeri abaktan okunur (Şekil 3.25). Daha sonra kinematik viskozite ($\mu/\gamma$) değeri ile birim hacim ağırlık ($\gamma$) çarpılarak dinamik viskoziteye ($\mu$) geçilir. Süspansiyonlara ait bulunan dinamik viskozite ($\mu$) değerleri Çizelge 3.12'de verilmiştir.




**Şekil 3.25.** Lombardi'nin önerdiği abak ($\tau_o/\gamma$-akış zamanı-kinematik viskozite ($\mu/\gamma$)).

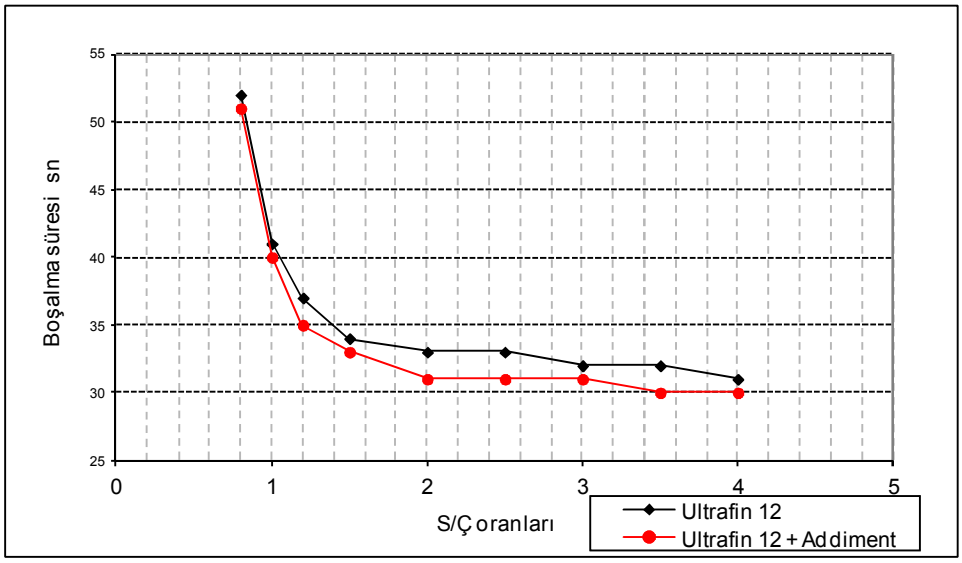
**Çizelge 3.12.** Viskozite deneylerine göre dinamik vizkozitenin ($\mu$) bulunması

| S/Ç oranı | Akış Zamanı (s) | ΔW (kN) | 2A (m²) | τ (kN/m²) | γ (kN/m³) | τ/γ (mm) | μ/γ (m.s) | μ (N.s/m²) | μ *(cP) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | Deney yapılamadı | | | | | | | | |
| 0.8 | 52,00 | $30,87x10^{-5}$ | 0,045 | $686x10^{-6}$ | 16,09 | 0,426 | $2,80x10^{-6}$ | 0,045050 | 45,05 |
| 1.0 | 41,00 | $21,78\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0484 | 15,31 | 0,316 | $1,60x10^{-6}$ | 0,024496 | 24,50 |
| 1.2 | 37,00 | $14,76\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0328 | 14,54 | 0,226 | $1,10x10^{-6}$ | 0,015990 | 15,99 |
| 1.5 | 34,00 | $7,35\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0163 | 13,89 | 0,118 | $0,60x10^{-6}$ | 0,008334 | 8,33 |
| 2.0 | 33,00 | $3,26\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0072 | 13,05 | 0,056 | $0,20x10^{-6}$ | 0,002610 | 2,61 |
| 2.5 | 33,00 | $3,20\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0071 | 12,56 | 0,057 | $0,18x10^{-6}$ | 0,002261 | 2,26 |
| 3.0 | 32,00 | $3,06\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0068 | 12,10 | 0,056 | $0,94x10^{-7}$ | 0,001137 | 1,14 |
| 3.5 | 32,00 | $2,35\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0052 | 11,85 | 0,044 | $0,91x10^{-7}$ | 0,001078 | 1,08 |
| 4.0 | 31,00 | $2,00\ x10^{-5}$ | 0,045 | 0,0044 | 11,50 | 0,039 | $0,89x10^{-7}$ | 0,001024 | 1,02 |
| $N.s/m^2$=Pa. s, cP: centipoise = $10^{-3}$ Pa.s | | | | | | | | | |

Çizelge 3.12 incelendiğinde karışımlardaki S/Ç oranının artması, dinamik viskozite ($\mu$) değerlerini düşürmüş ve karışımlar daha akışkan özellik göstermiştir. En büyük viskozite değeri S/Ç oranı 0.8'de (45.05 cP) gözlenmekte iken, en düşük viskozite değeri S/Ç oranı 4.0'da (1.02 cP) gözlenmiştir. S/Ç oranı 4.0 olan karışımın dinamik viskozitesinin ($\mu$) suyun viskozitesine (1.00 cP 20ºC'de) çok yakın olduğu görülmektedir. Bunun sebebi karışımdaki su miktarının fazla olmasıdır.

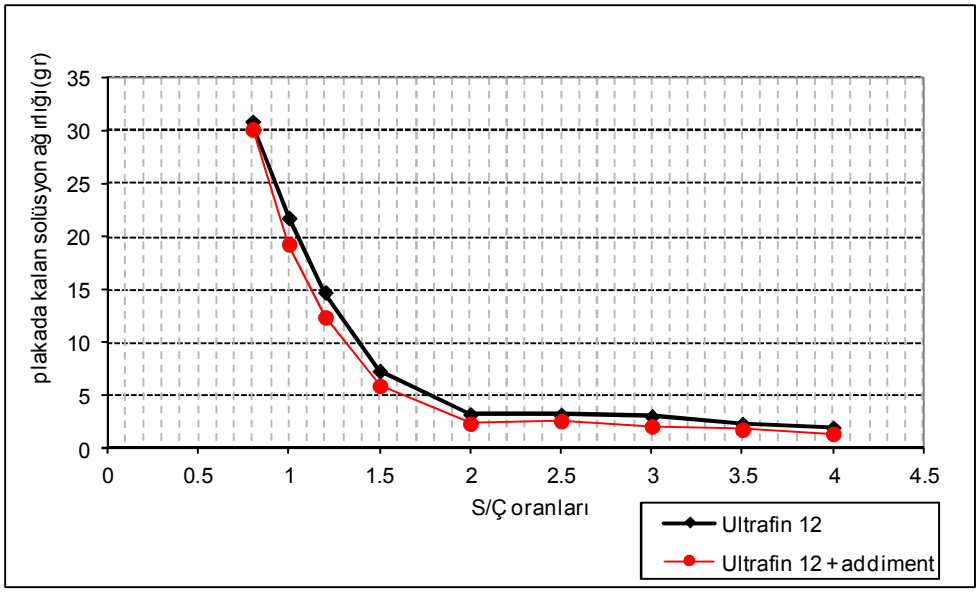
### 3.6.5.2. Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları viskozite değerleri

Enjeksiyon şerbetinin akış süresi ve akış özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla, S/Ç oranı 1.0 olan akışkanlaştırıcı addiment katkılı karışımlara Marsh hunisi ve Lombardi plakası kohezyon metre deneyleri yapılmıştır.



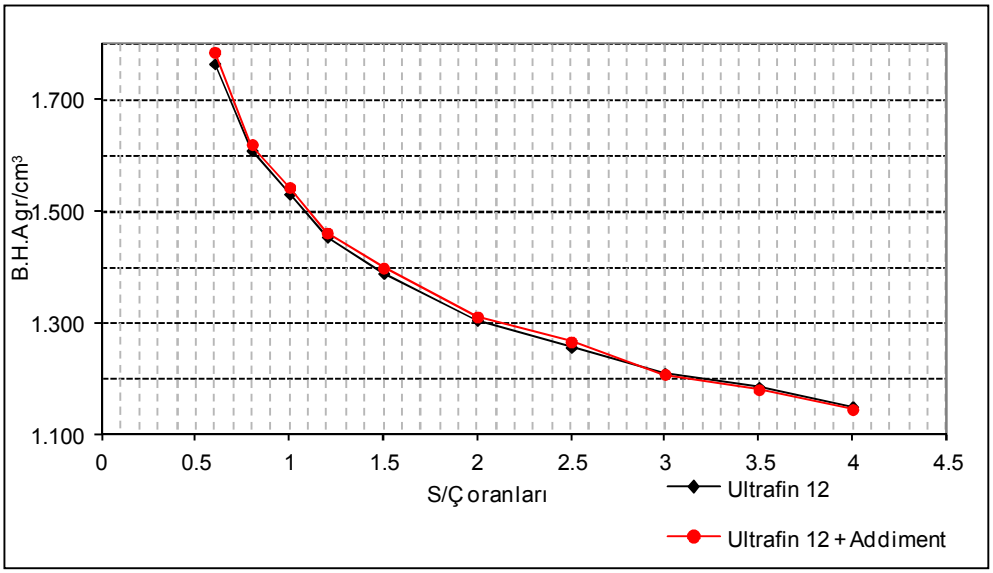

**Şekil 3.26.** Akma süresi ve S/Ç oranı arasındaki ilişki (20-22 $^{0}$C)

Şekil 3.26 Marsh hunisinden akan süspansiyonun akma süresi ile S/Ç oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 3.26 incelendiğinde her iki süspansiyonda da S/Ç oranının artması ile akış süresinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca Ultrafin 12 süspansiyonuna addiment katkısı akışkanlığı daha da arttırmaktadır. Örneğin S/Ç oranı 1.0 olan Ultrafin 12 süspansiyonunun Marsh hunisinden boşalma süresi 41 saniye iken addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun Marsh hunisinden boşalma süresi ise 40 saniyedir. Ayrıca S/Ç oranı arttıkça addiment katkısının etkisi daha da belirgin hale gelmektedir.




**Şekil 3.27.** Plaka üzerindeki süspansiyon ağırlığının S/Ç oranı ile değişimi (20-22 $^0$C)

Şekil 3.27'de bakıldığında her iki süspansiyonda da S/Ç oranının artışı ile plaka üzerinde kalan süspansiyon miktarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca addiment katkısı plaka yüzeylerinde tutunan süspansiyon miktarını azda olsa azaltmaktadır.



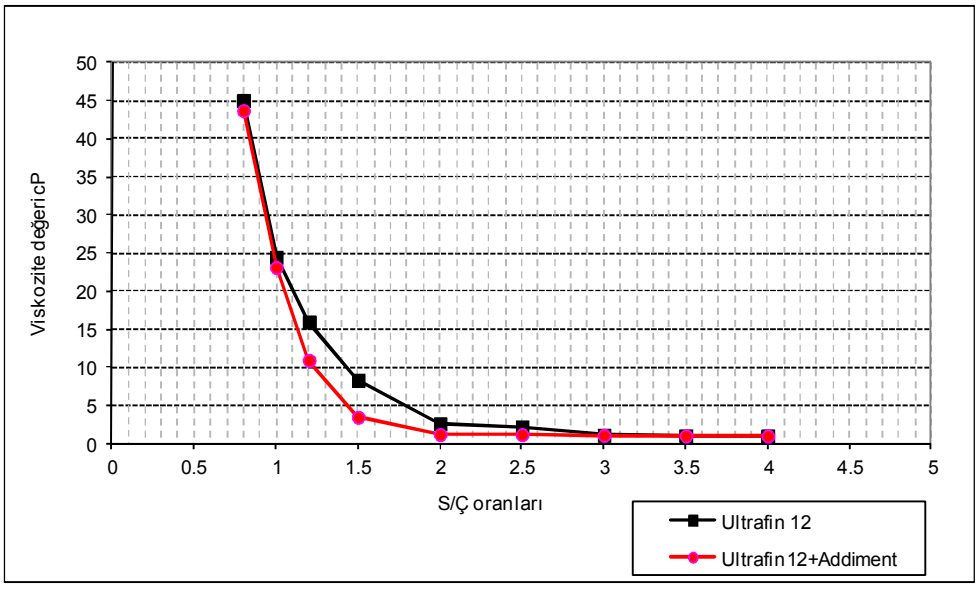

**Şekil 3.28.** Birim hacim ağırlıkların S/Ç oranlarına göre değişimi (20-22 $^0$C).

Şekil 3.28 incelendiğinde addiment katkılı ve katkısız süspansiyonların her ikisinde de S/Ç oranın artmasıyla birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca addiment katkısı birim hacim ağırlıkları üzerinde bir değişime yol açmamıştır.

**Çizelge 3.13.** Viskozite deneylerine göre dinamik viskozitenin (μ) bulunması (20-22 $^0$C)

| S/Ç oranı | Akış Zamanı (s) | ΔW (kN) | 2A (m²) | τ (kN/m²) | γ (kN/m³) | τ/γ (mm) | μ/γ (m.s) | μ (N.s/m$^2$) | μ *(cP) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | Deney yapılamadı | | | | | | | | |
| 0.8 | 51,00 | 30,14x10$^{-5}$ | 0,045 | 669,78x10$^{-5}$ | 16,20 | 0,413 | 2,86x10$^{-6}$ | 0,04633 | 43,74 |
| 1.0 | 40,00 | 19,31 x10$^{-5}$ | 0,045 | 429,11 x10$^{-5}$ | 15,43 | 0,278 | 1,70x10$^{-6}$ | 0,02623 | 23,15 |
| 1.2 | 35,00 | 12,42 x10$^{-5}$ | 0,045 | 276,00 x10$^{-5}$ | 14,62 | 0,189 | 0,75x10$^{-6}$ | 0,01097 | 10,97 |
| 1.5 | 33,00 | 5,95 x10$^{-5}$ | 0,045 | 132,22 x10$^{-5}$ | 13,99 | 0,095 | 0,25x10$^{-6}$ | 0,00350 | 3,50 |
| 2.0 | 31,00 | 2,38 x10$^{-5}$ | 0,045 | 52,88 x10$^{-5}$ | 13,11 | 0,040 | 0,93x10$^{-7}$ | 0,00122 | 1,22 |
| 2.5 | 31,00 | 2,63 x10$^{-5}$ | 0,045 | 58,44 x10$^{-5}$ | 12,67 | 0,046 | 0,95x10$^{-7}$ | 0,00120 | 1,20 |
| 3.0 | 31,00 | 2,12 x10$^{-5}$ | 0,045 | 47,11 x10$^{-5}$ | 12,08 | 0,039 | 0,92x10$^{-7}$ | 0,00111 | 1,11 |
| 3.5 | 30,00 | 1,81 x10$^{-5}$ | 0,045 | 40,22 x10$^{-5}$ | 11,81 | 0,034 | 0,89x10$^{-7}$ | 0,00105 | 1,05 |
| 4.0 | 30,00 | 1,42 x10$^{-5}$ | 0,045 | 31,56 x10$^{-5}$ | 11,46 | 0,028 | 0,88x10$^{-7}$ | 0,00101 | 1,01 |
| N.s/m$^2$=Pa. s, cP: centipoise = 10$^{-3}$ Pa.s | | | | | | | | | |

Şekil 3.29 incelendiğinde her iki süspansiyonda S/Ç oranının artması, viskozite (μ) değerlerini düşürmüş ve karışımlar daha akışkan özellik göstermiştir. Ayrıca Ultrafin 12 süspansiyonlarına addiment katkısı viskozite değerlerinde azaltmıştır.

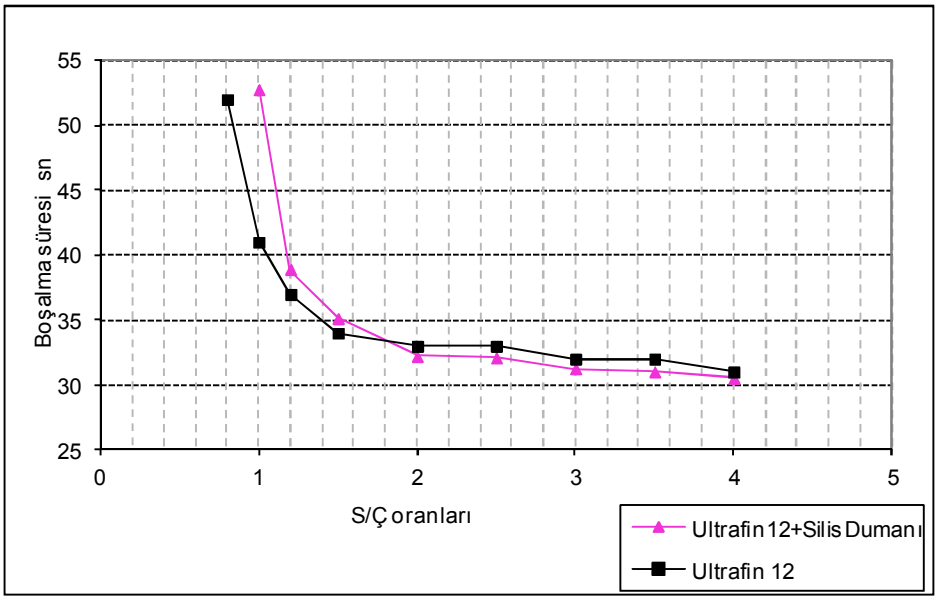



**Şekil 3.29.** Viskozitenin S/Ç oranlarına göre değişimi (15-20 $^0$C).

### 3.6.5.3. Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları viskozite değerleri

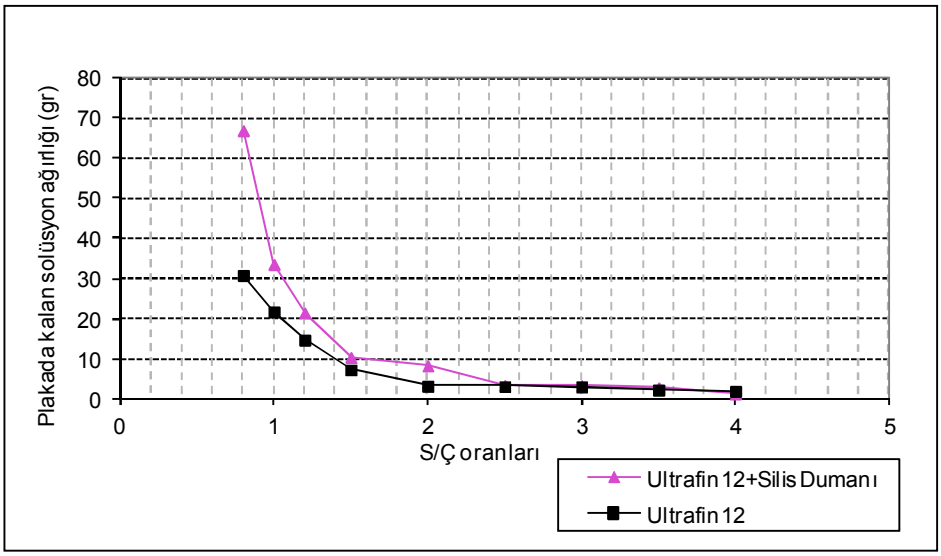
Enjeksiyon şerbetinin akış süresi ve akış özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla %10 silis dumanı katkılı, S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan karışımlara Marsh hunisi ve Lombardi plakası kohezyon metre deneyleri yapılmıştır.

Şekil 3.33 silika dumanı katkılı ve katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun farklı S/Ç oranlarında Marsh hunisinden boşalma sürelerini göstermektedir. Şekil 3.30 incelendiğinde S/Ç oranı 1.0 olan silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonun Marsh hunisinden 43.45 saniyede akışı gerçekleşirken, S/Ç oranı 1.0 olan katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun ise Marsh hunisinden boşalma süresi 41 saniyedir. Ulrafin12 süspansiyonunda görüldüğü gibi aynı şekilde silis dumanı katkılı Ultrafin12 süspansiyonlarında da S/Ç oranı arttıkça akışkanlık artmaktadır. Ancak süspansiyonda ki silis dumanı katkısının süspansiyonun akışkanlığına etkisi S/Ç oranı arttıkça kaybolmaktadır. S/Ç oranı 0.6 ve 0.8'de silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu, akışa karşı direnç gösterdiği için Marsh hunisinden tam boşalma sağlanamamıştır.




**Şekil 3.30.** Akma süresi ve S/Ç oranı arasındaki ilişki (20 $^0$C)

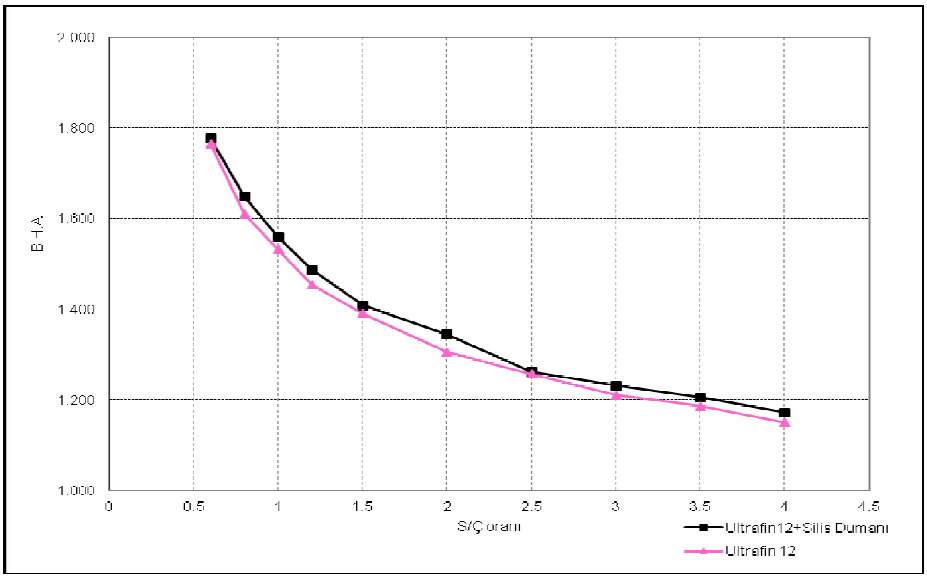
Şekil 3.31 silis dumanı katkılı ve katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun Lombardi kohezyon ölçer plaka deneyinde, plaka üzerinde kalan süspansiyon miktarının S/Ç oranıyla değimini göstermektedir. Şekil 3.34'e bakıldığında S/Ç oranı 2.5'a kadar plaka üzerinde kalan süspansiyon miktarı silis dumanı katkılı karışımlarda yüksek iken, S/Ç oranı 2.5'den sonra plaka üzerinde kalan süspansiyon miktarı hemen hemen aynıdır. Süspansiyonlara silis dumanı katkısı plaka yüzeylerinde kalan süspansiyon miktarını düşük S/Ç oranlarında arttırırken, yüksek S/Ç oranlarında kalan miktarı hemen hemen hiç etkilemediği görülmektedir.




**Şekil 3.31.** Plaka üzerindeki süspansiyon ağırlığının S/Ç oranı ile değişimi (19-20 $^0$C)

Şekil 3.32'de silis dumanı katkılı Ultrafin 12 ile katkısız Ultrafin 12 süspansiyonların birim hacim ağırlıklarının S/Ç oranıyla değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.35 incelendiğinde silis dumanı katkısının birim hacim ağırlığa fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Örneğin S/Ç oranı 1.0 olan süspansiyonun katkısız birim hacim ağırlığı 15.32 kN/m$^3$ iken, silis dumanı katkılı birim hacim ağırlığı 15.59 kN/m$^{3'}$dür.



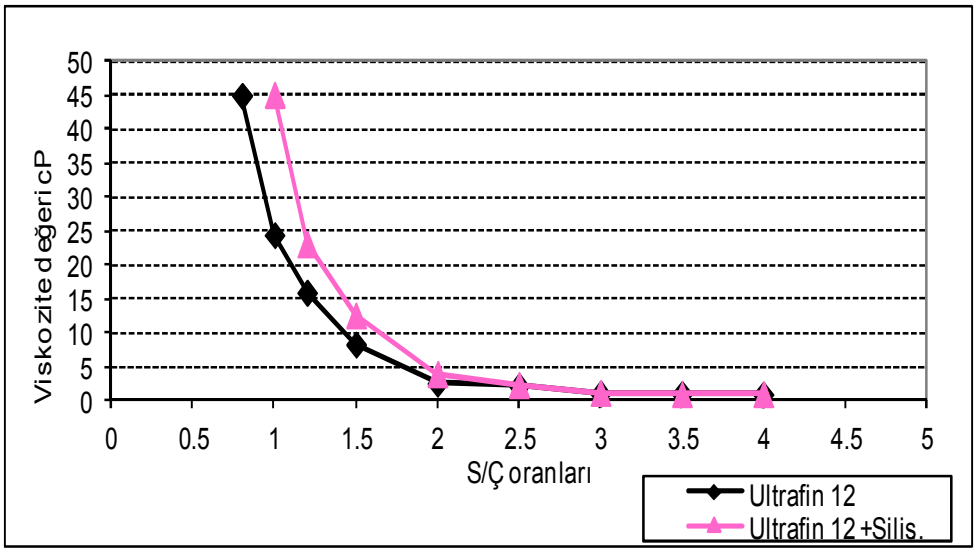

**Şekil 3.32.** Birim hacim ağırlığının S/Ç oranlarına göre değişimi (15-20 $^0$C).

**Çizelge 3.14.** Viskozite deneylerine göre dinamik viskozite (μ) değerleri (15-20 $^0$C)

| S/Ç oranı | Akış Zamanı (s) | ΔW (kN) | 2A (m²) | τ (kN/m²) | γ (kN/m³) | τ/γ (mm) | μ/γ (m.s) | μ (N.s/m$^2$) | μ *(cP) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | Deney yapılamadı | | | | | | | | |
| 0.8 | Deney yapılamadı | | | | | | | | |
| 1.0 | 43,45 | 33,57 x10$^{-5}$ | 0,045 | 746x10$^{-5}$ | 15,59 | 0,479 | 2,90x10$^{-6}$ | 0,045210 | 45,21 |
| 1.2 | 38,92 | 21,51 x10$^{-5}$ | 0,045 | 478 x10$^{-5}$ | 14,87 | 0,321 | 1,56x10$^{-6}$ | 0,023190 | 23,19 |
| 1.5 | 35,12 | 10,40 x10$^{-5}$ | 0,045 | 231,11 x10$^{-5}$ | 14,08 | 0,164 | 0,90x10$^{-6}$ | 0,012670 | 12,67 |
| 2.0 | 32,21 | 8,34 x10$^{-5}$ | 0,045 | 185,33 x10$^{-5}$ | 13,44 | 0,138 | 0,30x10$^{-6}$ | 0,004030 | 4,03 |
| 2.5 | 32,10 | 3,52 x10$^{-5}$ | 0,045 | 78,22 x10$^{-5}$ | 12,62 | 0,062 | 0,19x10$^{-6}$ | 0,002397 | 2,40 |
| 3.0 | 31,25 | 3,43 x10$^{-5}$ | 0,045 | 76,22 x10$^{-5}$ | 12,31 | 0,062 | 1,00x10$^{-7}$ | 0,001231 | 1,23 |
| 3.5 | 31,03 | 2,89 x10$^{-5}$ | 0,045 | 64,22 x10$^{-5}$ | 12,05 | 0,053 | 0,90x10$^{-7}$ | 0,001085 | 1,09 |
| 4.0 | 30,54 | 1,36 x10$^{-5}$ | 0,045 | 30,22 x10$^{-5}$ | 11,72 | 0,026 | 0,88x10$^{-7}$ | 0,001031 | 1,03 |
| N.s/m$^2$=Pa. s, cP: centipoise = 10$^{-3}$ Pa.s | | | | | | | | | |

Çizelge 3.14'de dinamik viskozite değerleri hesaplanmıştır. Çizelge incelendiğinde S/Ç oranı 0.6 ve 0.8'de süspansiyonun yoğunluğundan dolayı deneyler yapılamazken, S/Ç oranı 0.8'den sonra S/Ç oranın artmasıyla dinamik viskozite (μ) değeri düşmüştür.

Şekil 3.36 silis dumanı katkılı ve katkısız Ultrafin 12 süspansiyonların dinamik viskozite (μ) değerlerinin farklı S/Ç oranı ile değimini göstermektedir. Şekil 3.33 incelendiğinde silis dumanı katkılı süspansiyonlarda düşük S/Ç oranlarında viskozite değerleri yüksek çıkarken, S/Ç oranı 2.5'den sonra viskozite değerleri katkısız süspansiyon karışımları ile aynı çıkmıştır.



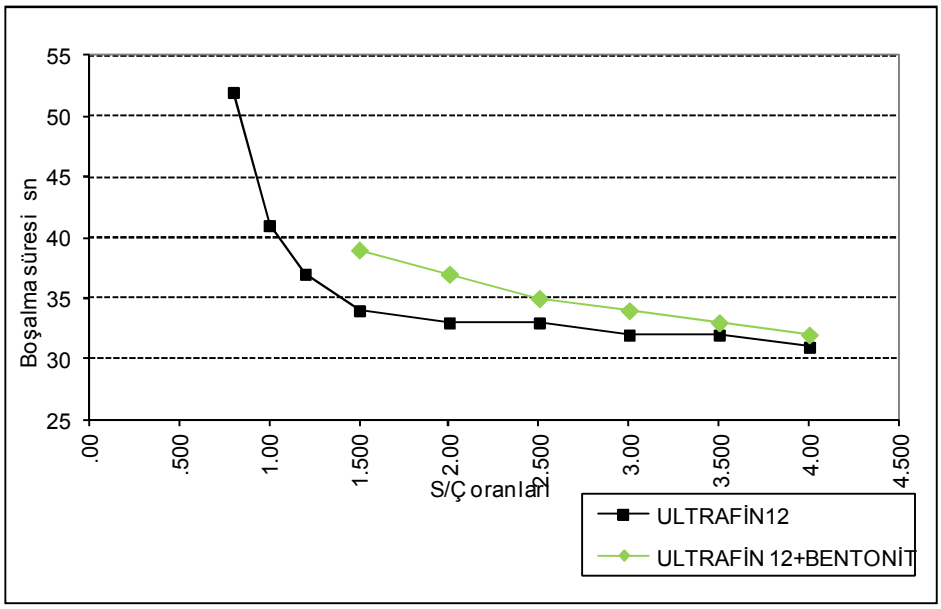

**Şekil 3.33.** Viskozitenin S/Ç oranlarına göre değişimi (15-20 $^0$C).

### 3.6.5.4. Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları viskozite değerleri

% 1 sodyum bentonit katkılı S/Ç oranı 1.0 olan Ultrafin 12 süspansiyonlarının akış süresi ve akış özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla, Marsh hunisi ve Lombardi plakası kohezyon metre deneyleri yapılmıştır.

Şekil 3.34 sodyum bentonit katkılı ve katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun farklı S/Ç oranlarında Marsh hunisinden boşalma sürelerini göstermektedir. S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 olan sodyum bentonitli karışımlarda süspansiyonun yoğunluğundan dolayı deneyler yapılamamıştır. Şekil 3.34 incelendiğinde sodyum bentonitli süspansiyonların katkısız süspansiyonlardan daha fazla sürede akış gerçekleştirdiği görülmektedir.

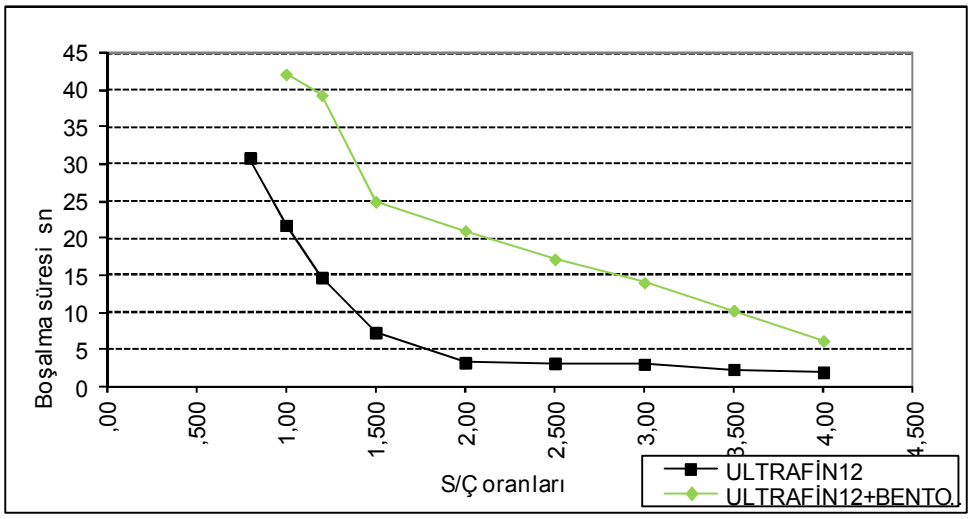
Örneğin S/Ç oranı 1.5 olan katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun akış süresi 34 saniye iken sodyum bentonit katkılı aynı S/Ç oranına sahip Ultrafin 12 süspansiyonunun akış süresi 39 saniyedir. Ayrıca S/Ç oranı büyüdükçe sodyum bentonitin etkisi de azalmaktadır.




**Şekil 3.34.** Akma süresi ve S/Ç oranı arasındaki ilişki (20 $^{0}$C)

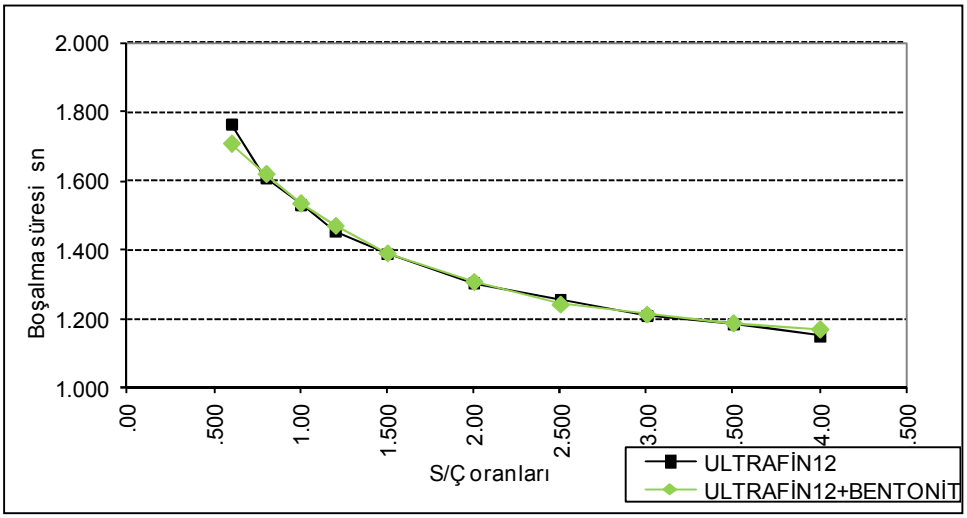
Şekil 3.35 sodyum bentonit katkılı ve katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun Lombardi kohezyon ölçer plaka deneyinde plaka üzerinde kalan süspansiyon miktarının S/Ç oranıyla değimini göstermektedir. Şekil 3.35 incelendiğinde, süspansiyonlara sodyum bentonit katkısı plaka yüzeylerinde kalan süspansiyon miktarını arttırmaktadır. Örneğin S/Ç oranı 1.0 olan Ultrafin 12 süspansiyonunun plaka yüzeyinde tutunma miktarı 21.78

gr iken sodyum bentonit katkılı aynı S/Ç oranlı süspansiyonun plaka yüzeyinde tutunma miktarı 42.16 gr'dır.




**Şekil 3.35.** Plaka üzerindeki süspansiyon ağırlığının S/Ç oranı ile değişimi (19-20 $^0$C)

Şekil 3.36'de sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 ile katkısız Ultrafin 12 süspansiyonların birim hacim ağırlıklarının S/Ç oranıyla değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.36 incelendiğinde Sodyum bentonit katkısının birim hacim ağırlığa fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Örneğin S/Ç oranı 1.0 olan süspansiyonun katkısız birim hacim ağırlığı 15.32 kN/m$^3$ iken, silis dumanı katkılı birim hacim ağırlığı 15.95 kN/m$^{3'}$dür.

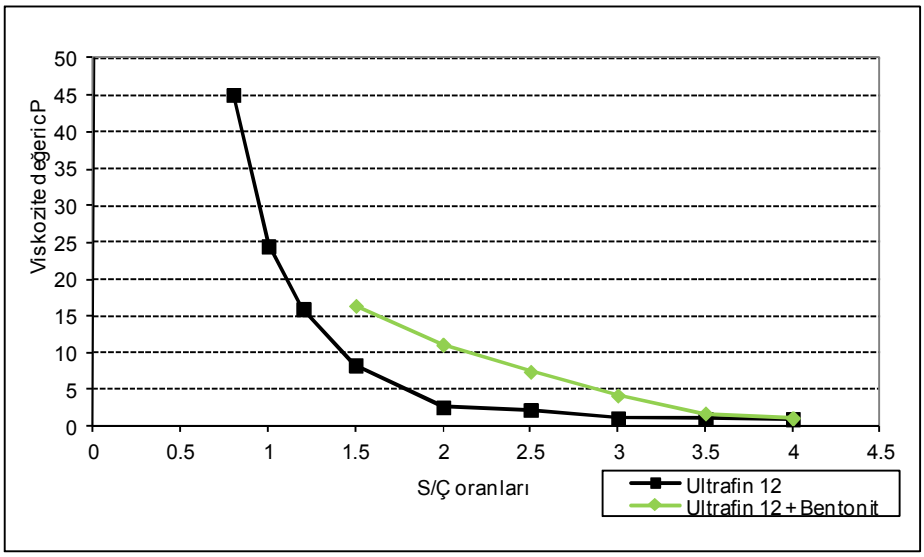



**Şekil 3.36.** Birim hacim ağırlıkların S/Ç oranlarına göre değişimi (15-20 $^0$C).

**Çizelge 3.15.** Viskozite deneylerine göre dinamik vizkozite (μ) değerleri (15-20 $^0$C)

| S/Ç oranı | Akış Zamanı (s) | ΔW (kN) | 2A (m²) | τ (kN/m²) | γ (kN/m³) | τ/γ (mm) | μ/γ (m.s) | μ (N.s/m$^2$) | μ *(cP) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | **Deney yapılamadı** | | | | | | | | |
| 0.8 | **Deney yapılamadı** | | | | | | | | |
| 1.0 | **Deney yapılamadı** | | | | | | | | |
| 1.2 | **Deney yapılamadı** | | | | | | | | |
| 1.5 | 39 | 24,98 x10$^{-5}$ | 0,045 | 555,11 x10$^{-5}$ | 13,91 | 0,399 | 1,18x10$^{-6}$ | 0,01641 | 16,41 |
| 2.0 | 37 | 21,05 x10$^{-5}$ | 0,045 | 467,78 x10$^{-5}$ | 13,09 | 0,357 | 0,85x10$^{-6}$ | 0,01113 | 11,13 |
| 2.5 | 35 | 17,20 x10$^{-5}$ | 0,045 | 382,22 x10$^{-5}$ | 12,43 | 0,307 | 0,60x10$^{-6}$ | 0,00746 | 7,46 |
| 3.0 | 34 | 14,07 x10$^{-5}$ | 0,045 | 312,67 x10$^{-5}$ | 12,15 | 0,257 | 0,35x10$^{-6}$ | 0,00425 | 4,25 |
| 3.5 | 33 | 10,28 x10$^{-5}$ | 0,045 | 228,44 x10$^{-5}$ | 11,89 | 0,192 | 0,15x10$^{-6}$ | 0,00178 | 1,78 |
| 4.0 | 32 | 6,21 x10$^{-5}$ | 0,045 | 138,00 x10$^{-5}$ | 11,71 | 0,118 | 0,98x10$^{-7}$ | 0,00115 | 1,15 |
| N.s/m$^2$=Pa. s, cP: centipoise = 10$^{-3}$ Pa.s | | | | | | | | | |

Çizelge 3.15'de dinamik viskozite değerleri hesaplanmıştır. Çizelge incelendiğinde S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2'de süspansiyonun yoğunluğundan dolayı deneyler yapılamazken, S/Ç oranı 1.5'den sonra S/Ç oranın artmasıyla dinamik viskozite (μ) değeri düşmüştür. Şekil 3.37 silis dumanı katkılı ve katkısız Ultrafin 12 süspansiyonların dinamik viskozite (μ) değerlerinin farklı S/Ç oranı ile değimini göstermektedir. Şekil 3.37 incelendiğinde sodyum bentonit katkılı süspansiyonların viskozite değerleri katkısız süspansiyonlara göre oldukça yüksek çıkmıştır. Örneğin S/Ç oranı 1.5'de sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun viskozite değeri 16.41 cP çıkarken, katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunda bu değer 8.33 cP'dir.



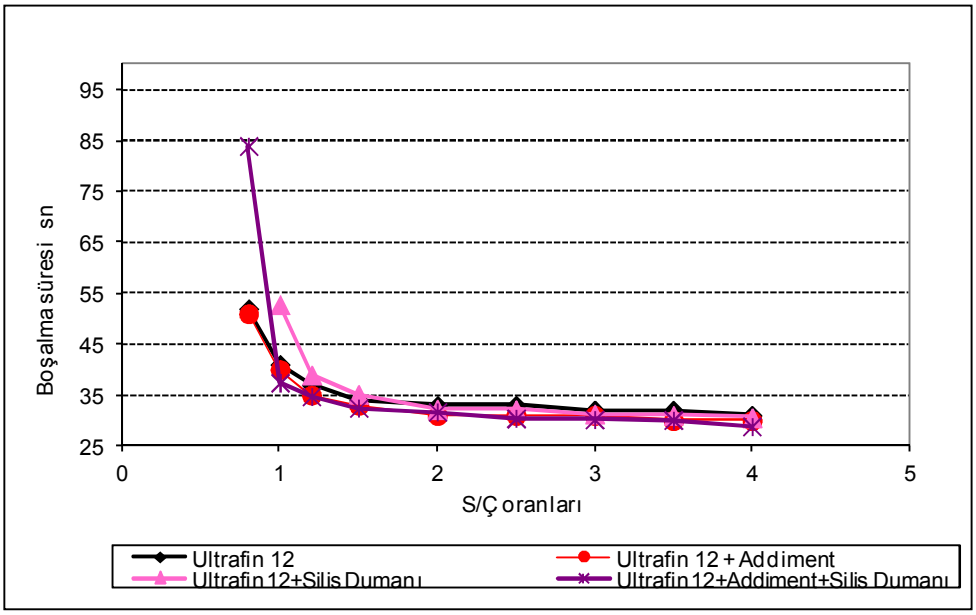

**Şekil 3.37.** Viskozitenin S/Ç oranlarına göre değişimi (15-20 $^0$C).

### 3.6.5.5. Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonları viskozite değerleri

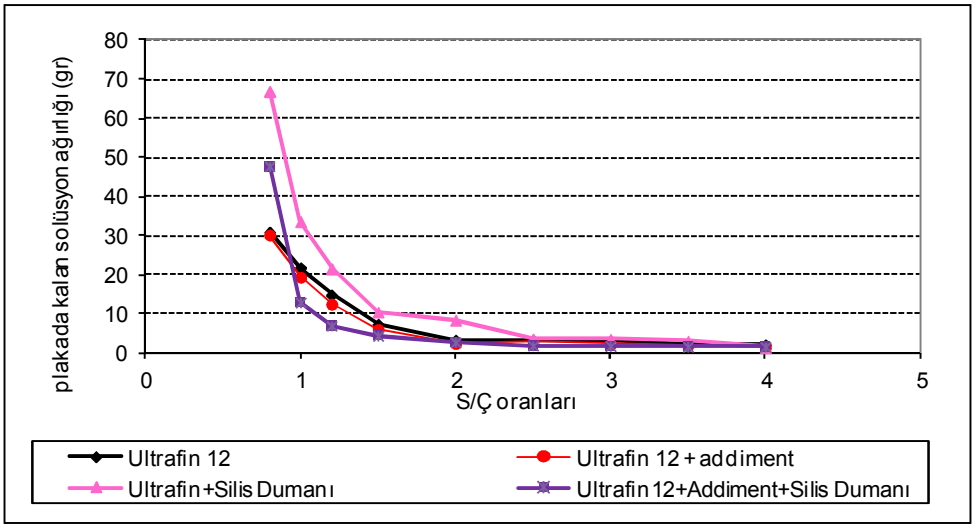
Enjeksiyon şerbetinin akış süresi ve akış özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla %10 silis dumanı ve % 2 addiment katkılı süspansiyonlara, S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan karışımlara Marsh hunisi ve Lombardi plakası kohezyon metre deneyleri yapılmıştır.

Şekil 3.38 incelendiğinde S/Ç oranı 1.0 olan silis dumanı ve addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonun Marsh hunisinden 42.93 saniyede akışı gerçekleşirken, S/Ç oranı 1.0 olan addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun ise Marsh hunisinden boşalma süresi 40 saniye, katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun Marsh hunisini terk etme süresi 41 saniye, silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun Marsh hunisini terk etme süresi 43.45 saniyedir. Görülüyor ki, Ultrafin 12 süspansiyonlarına silis dumanı katkısı süspansiyonların akışkanlığını azaltmaktadır. Ancak süspansiyonda ki silis dumanı katkısının süspansiyonun akışkanlığına etkisi S/Ç oranı arttıkça kaybolmaktadır.

Şekil 3.39 incelendiğinde, addiment+silis dumanı süspansiyonlarında silis dumanının varlığından dolayı plaka yüzeylerinde kalan malzeme miktarı düşük S/Ç oranlarında artarken, Yüksek S/Ç oranlarında bu değer hemen hemen katkısız karışımlarla aynıdır.

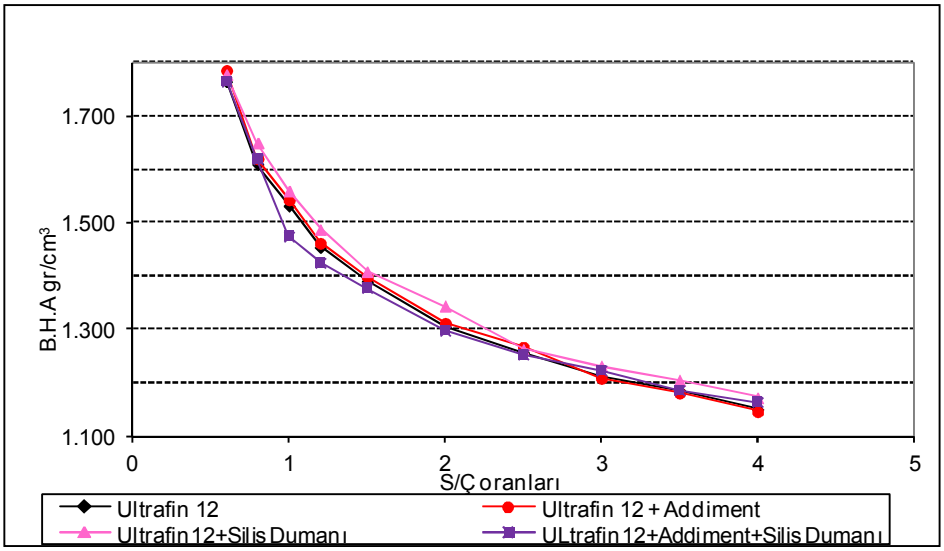



**Şekil 3.38.** Silis dumanı ve Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarına ait Marsh Hunisi boşalma süresi ve S/Ç oranı arasındaki ilişki (15-20 $^0$C)




**Şekil 3.39.** Plaka üzerindeki süspansiyon ağırlığının S/Ç oranı ile değişimi (15-20 $^0$C)

Şekil 3.40'da silis dumanı ve addiment katkılı Ultrafin 12 ile katkısız Ultrafin 12 süspansiyonların birim hacim ağırlıklarının S/Ç oranıyla değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.40 incelendiğinde silis dumanı ve addiment katkısının birim hacim ağırlığa fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Örneğin S/Ç oranı 1.0 olan süspansiyonun katkısız birim hacim ağırlığı 15.32 kN/m$^3$ iken, silis dumanı ve addiment katkılı birim hacim ağırlığı 15.83 kN/m$^{3'}$ dür.

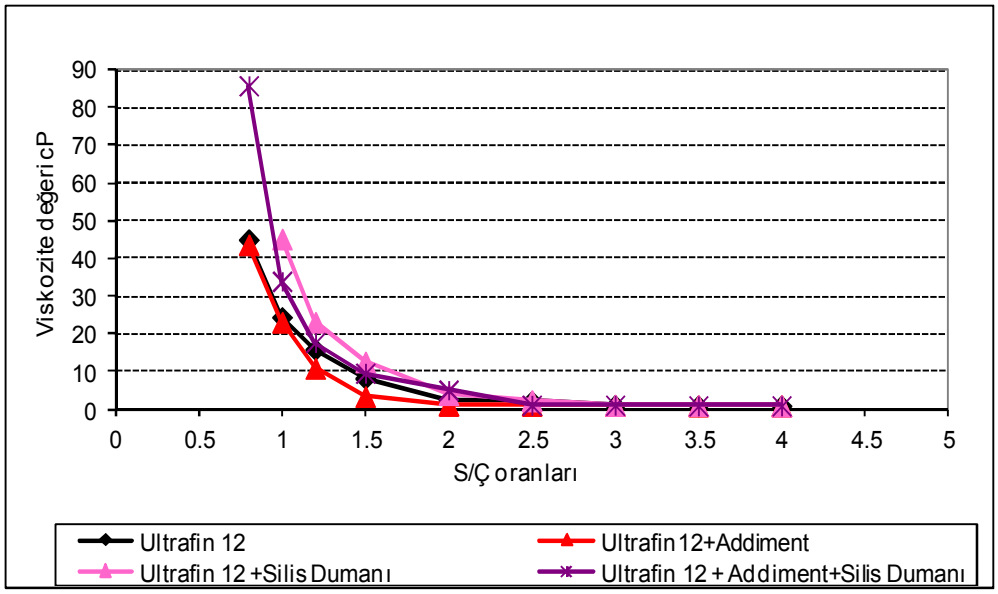



**Şekil 3.40.** Birim hacim ağırlıkların S/Ç oranlarına göre değişimi (15-20 $^0$C).

**Çizelge 3.16.** Viskozite deneylerine göre dinamik vizkozite(μ) değerleri (15-20 $^0$C)

| S/Ç oranı | Akış Zamanı (s) | ΔW (kN) | 2A (m²) | τ (kN/m²) | γ (kN/m³) | τ/γ (mm) | μ/γ (m.s) | μ (N.s/m$^2$) | μ *(cP) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | Deney yapılamadı | | | | | | | | |
| 0.8 | 84,00 | 47,71 x10$^{-5}$ | 0,045 | 1060,22 x10$^{-5}$ | 16,20 | 0,654 | 5,30x10$^{-6}$ | 0,08586 | 85,86 |
| 1.0 | 42,93 | 12,88 x10$^{-5}$ | 0,045 | 286,22 x10$^{-5}$ | 15,83 | 0,181 | 2,15x10$^{-6}$ | 0,03403 | 34,03 |
| 1.2 | 37,73 | 6,89 x10$^{-5}$ | 0,045 | 153,11 x10$^{-5}$ | 14,25 | 0,107 | 1,25x10$^{-6}$ | 0,01781 | 17,81 |
| 1.5 | 34,46 | 4,32 x10$^{-5}$ | 0,045 | 96,00 x10$^{-5}$ | 13,78 | 0,070 | 0,70x10$^{-6}$ | 0,00965 | 9,65 |
| 2.0 | 33,67 | 2,66 x10$^{-5}$ | 0,045 | 59,11 x10$^{-5}$ | 12,98 | 0,046 | 0,40x10$^{-6}$ | 0,00519 | 5,19 |
| 2.5 | 31,39 | 1,81 x10$^{-5}$ | 0,045 | 40,22 x10$^{-5}$ | 12,53 | 0,032 | 0,99x10$^{-7}$ | 0,00124 | 1,24 |
| 3.0 | 31,23 | 1,71 x10$^{-5}$ | 0,045 | 38,00 x10$^{-5}$ | 12,23 | 0,031 | 0,97x10$^{-7}$ | 0,00119 | 1,19 |
| 3.5 | 30,11 | 1,54 x10$^{-5}$ | 0,045 | 34,22 x10$^{-5}$ | 11,86 | 0,029 | 0,90x10$^{-7}$ | 0,00107 | 1,07 |
| 4.0 | 30,05 | 1,50 x10$^{-5}$ | 0,045 | 33,33 x10$^{-5}$ | 11,64 | 0,029 | 0,88x10$^{-7}$ | 0,00102 | 1,02 |
| N.s/m$^2$=Pa. s, cP: centipoise = 10$^{-3}$ Pa.s | | | | | | | | | |

Çizelge 3.16'da dinamik viskozite değerleri hesaplanmıştır. Çizelge incelendiğinde S/Ç oranı 0.6'da süspansiyonun yoğunluğundan dolayı deneyler yapılamazken, S/Ç oranı 0.8'den sonra S/Ç oranın artmasıyla dinamik viskozite (μ) değeri düşmüştür.




**Şekil 3.41.** Viskozitenin S/Ç oranlarına göre değişimi (15-20 $^0$C).

Şekil 3.41'e bakıldığında süspansiyonlara addiment+silis dumanı katkısı S/Ç oranlarının düşük olduğu süspansiyonlarda viskoziteyi arttırdığı ancak S/Ç oranlarının artmasıyla viskozite değerlerinde katkısız karışımlara oranla bir değişme olmadığı

görülmektedir. Bu artış karışımlardaki silika dumanın varlığından kaynaklanmaktadır. Karışımlardaki addiment viskozite değeri için etkin bir rol oynayamamıştır. S/Ç oranları 3.0'dan sonra süspansiyonların viskozite değerleri hemen hemen aynıdır.

### 3.7. Enjeksiyon Deneylerinin Yapılışı

Enjeksiyon deneylerinin yapılışı aşağıdaki adımları içerir.

#### 3.7.1. Enjeksiyonda kullanılacak olan kum numunelerin hazırlanması

Tüm gradasyonlar için belirlenen $e_{max}$-$e_{min}$ değerleri yardımı ile istenen rölatif sıkılık değerlerinde gerekli boşluk oranı ($e_0$) belirlenmiştir. Belirli olan kalıp hacmi ve boşluk oranı için ($e_0$) kalıp içine ne kadar numune (M) koyulacağı hesaplanmış ve aşağıda formülize edilmiştir (Eşitlik 3.8.-3.9.-3.10). Çizelge 3.17'de istenen rölatif sıkılık değerlerine göre hesaplanmış numune ağırlıkları gösterilmiştir.

$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad \text{.....(3.8.)}$$

$$e_0 = \frac{Gs \times \rho_w}{\gamma} - 1 \quad \text{.....(3.9.)}$$

$$M = \rho \times V_m \quad \text{.....(3.10.)}$$

Burada,

$e_0$ = İstenilen sıkılıktaki kum karışımının boşluk oranı,

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

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

$\gamma$ = İstenilen sıkılıktaki kum karışımının yoğunluğu, gr/cm$^3$,

$\rho_w$ = Suyun özgül ağırlığı,

Gs = Özgül ağırlık,

M = Kalıp içine yerleştirilen kumun kütlesi (gr),

V = Kalıp hacmi.

**Çizelge 3.17.** Kum karışımların istenen rölatif sıkılık değerine göre numune ağırlıklarının hesaplanması.

| Numune no | Kum Oranı % | | Rölatif Sıkılık | S/Ç oranı | Kalıp | | Hedef Numune Boyu (cm) | Filtre hariç hedef numune hacmi (V) ($cm^3$) | Num Boyunun 1/3 ü (cm) | $D_r$ | Karışımın Gs | $e_0$ | Numune ağırlığı (M) (gr) | Tabaka ağırlığı (M/3) (gr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | İnce | Orta | | | Çapı cm | Boyu cm | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 100 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 0,982 | 2,70 | 1,36 | 329,05 | 109,68 |
| 2 | 30 | 70 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 0,992 | 2,70 | 1,35 | 327,56 | 109,19 |
| 3 | 35 | 65 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 0,993 | 2,70 | 1,35 | 327,31 | 109,10 |
| 4 | 40 | 60 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 0,995 | 2,70 | 1,35 | 327,07 | 109,02 |
| 5 | 45 | 55 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 0,997 | 2,70 | 1,35 | 326,82 | 108,94 |
| 6 | 50 | 50 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 0,998 | 2,70 | 1,35 | 326,57 | 108,86 |
| 7 | 55 | 45 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 1,000 | 2,70 | 1,35 | 326,33 | 108,78 |
| 8 | 60 | 40 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 1,002 | 2,70 | 1,35 | 326,08 | 108,69 |
| 9 | 70 | 30 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 1,005 | 2,70 | 1,35 | 325,60 | 108,53 |
| 10 | 75 | 25 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 1,007 | 2,70 | 1,35 | 325,35 | 108,45 |
| 11 | 80 | 20 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 1,008 | 2,70 | 1,34 | 325,11 | 108,37 |
| 12 | 100 | 0 | 0,3 | 1 | 5,36 | 15 | 10,72 | 241,88 | 3,57 | 1,015 | 2,70 | 1,34 | 324,14 | 108,05 |

### 3.7.2. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi

Kalıp başlıklarına sızdırmazlığı sağlamak amacıyla lastik contalar yerleştirilmiştir. Enjeksiyon işleminden sonra numunenin kalıbından kolay çıkmasını sağlamak amacıyla kalıp, gövde sabitleyici plaka ve başlıklar vazelinlenmiştir. Numunenin kalıba yerleştirilebilmesi için, kalıp alt başlığa; gövde sabitleyici plaka, metrik 8 uzatmalar ve saplama somunlar sayesinde sabitlenmiştir. Kalıbın alt başlığa sabitlenmesinden sonra en alta 2 mm açıklıklı tel yerleştirilerek filtrasyon malzemesinin başlık deliğinden çıkışı engellenmiştir. Telin üzerine tabaka kalınlığı 2 cm olan iri kumdan oluşan filtrasyon malzemesi yerleştirilerek enjeksiyon esnasında numunenin kalıptan çıkışı engellenmiştir. Filtrenin üzerine hesaplanan miktardaki numune (Çizelge 3.16), homojenliğin sağlanabilmesi için 3.57 cm'lik 3 tabaka halinde huni ile yerleştirilip (Resim 3.13), çelik tokmak yardımıyla kontrollü bir şekilde sıkıştırılmıştır. Sıkışma esnasında tabakaların istenilen kalınlığa (rölatif sıkılığa) gelip gelmediği kumpasla ölçülmüştür. Sıkışma tamamlandıktan sonra numune üzerine tekrar tabaka kalınlığı 2.28 cm olan iri kumdan oluşan filtrasyon malzemesi ve 2 mm açıklıklı tel yerleştirilerek, kalıp üst başlığı metrik 8 uzatma ve saplama somunlarla kalıba sabitlenmiştir (Resim 3.14).



**Resim 3.13.** Numunelerin kalıba yerleştirilmesi.




**Resim 3.14.** Kalıba üst başlığın sabitlenmesi

### 3.7.3. Kalıpların enjeksiyon düzeneğine yerleştirilerek enjeksiyona hazır hale getirilmesi

Kalıplar enjeksiyon düzeneğine bükülebilir çelik hortumlar sayesinde monte edilmiştir (Resim 3.15.). Düzeneğe 5 adet mukavemet kalıbı, 3 adet permeabilite kalıbı yerleştirilmiştir. Düzeneğe monte edilen kalıplara enjeksiyon deneyinden önce su verilerek numuneler doyurulmuş, aynı zamanda enjeksiyon tesisatının yapısı gereği boru ve fittings malzemelerinin yüzey ıslağı sağlanmıştır.

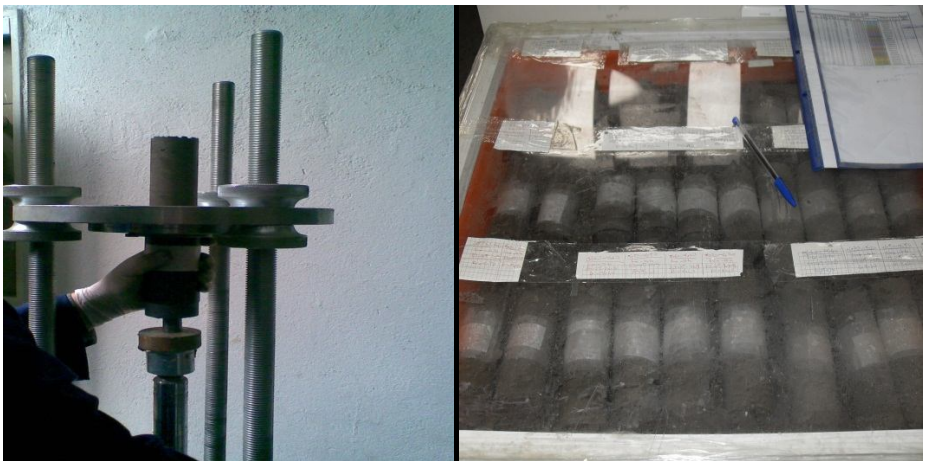



**Resim 3.15.** Kalıpların düzeneğe yerleştirilmesi

### 3.7.4. Enjeksiyonların yapılması

Mikserde istenen S/Ç oranlı katkılı ve katkısız süspansiyonlar hazırlanmış, vakit geçirmeden enjeksiyon tankına dökülerek tank pedalları çalıştırılmıştır. Daha sonra kompresör çalıştırılarak sisteme istenen basıncın ulaşması sağlanmıştır. Kompresörsün 0.7 MPa basınç verebilme kapasitesinde olmasından dolayı enjeksiyon basıncı 0.5 MPa olarak belirlenmiştir. Gereken basınç sağlandıktan sonra ana vana açılmış ve kalıplara bağlı bükülebilir çelik hortum girişlerine süspansiyonun ulaşması sağlanmıştır. Sırayla kalıpların bağlı olduğu bükülebilir çelik hortumların vanaları açılarak kalıplara bağlı şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. Hortumlardan süspansiyon çıkışı görülmesi halinde enjeksiyon başarılı, sadece su çıkışı görülmesi durumunda enjeksiyonun başarısız olduğu ön kanaatine varılmıştır. Enjeksiyonun başarı durumu, bir gün beklendikten sonra numuneler kalıptan çıkarıldığında kesinleşmiştir. Enjeksiyon işleminden 30 dakika sonra vanalara bağlı bükülebilir çelik hortumlar sökülerek manşonlu kör tapalar kalıplara takılmıştır. Bu sayede tesisat içerisinde kalan süspansiyon malzemesi suyla, prizlenme oluşmadan temizlenmiştir.

Enjeksiyonda başarılı olmuş mukavemet deneyi yapılacak olan numuneler düzenekte 1 gün bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmış (Resim 3.16), etiketlenerek kür ortamına yerleştirilmiştir.



**Resim 3.16.** Numunelerin kalıptan çıkarılışı ve kür ortamına yerleştirilmesi

Enjeksiyonda başarılı olmuş permeabilite deneyi yapılacak olan numuneler ise 1 gün düzenekte bekletildikten sonra alt, gövde ve üst başlıkları sökülerek kalıptan çıkarılmadan etiketlenerek kür ortamına yerleştirilmiştir (Resim 3.17).



**Resim 3.17**. Enjeksiyonda başarılı olmuş ve permeabilite deneyi için kalıp da bekletilen numune.

# 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

## 4.1. Enjeksiyon deneylerinin sonuçları

Enjeksiyon deneyleri beş kısımda yürütülmüştür. Enjeksiyon deneylerinin tümü 0.5 MPa enjeksiyon basıncında yürütülmüştür.

1. kısımda sabit S/Ç oranıyla hazırlanmış katkısız Ultrafin 12 süspansiyon enjeksiyonlarının farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri ile farklı S/Ç oranlıyla hazırlanmış katkısız Ultrafin 12 süspansiyon enjeksiyonlarının farklı gradasyonda ve sabit rölatif sıkılıktaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri, (Avcı, 2009 tarafından yapılmış olan tez çalışmasının devamı niteliğindedir).

2. kısımda Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarının sabit S/Ç oranıyla farklı rölatif sıkılıktaki numunelere penetrasyon yetileri,

3. kısımda silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarının sabit S/Ç oranıyla farklı rölatif sıkılıktaki numunelere penetrasyon yetileri,

4. kısımda bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarının sabit S/Ç oranıyla farklı rölatif sıkılıktaki numunelere penetrasyon yetileri,

5. kısımda addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarının sabit S/Ç oranıyla farklı rölatif sıkılıktaki numunelere penetrasyon yetileri, incelenmiştir.

### 4.1.1 Katkısız Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri

#### 4.1.1.1. Sabit S/Ç oranlı katkısız süspansiyonların farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri

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

Sabit S/Ç oranlı deneylerin yapılmasında Ultrafin 12'nin reolojik özellikleri göz önünde bulundurulmuş ve en uygun S/Ç oranı 1.0 olarak belirlenmiştir. Bu oranın belirlenmesinde Ultrafin12'nin sedimantasyon yüzdesi, priz süresi ve viskozitesi etkin rol oynamıştır.

Deneylere ilk olarak rölatif sıkılık %30'la başlanmış başarı sınır değerleri belirlendikten sonra, rölatif sıkılık değerleri %10 artırılarak %70'e kadar enjeksiyonlar denenmiş, %70 rölatif sıkılıkta deneylere son verilmiştir. Rölatif sıkılık değerlerinin bu

aralarda seçilmesinin nedeni doğal arazi zemin sıkılıklarının temsil edilebilmesidir. Numuneler istenen rölatif sıkılık değerleri verilirken, çevresel nedenlerden dolayı (kalıpları düzeneğe yerleştirme, kalıp başlıklarını yerleştirme, taşıma v.b.) rölatif sıkılık değerlerinde ± 2'ye varan sapmalar görülebilir. Çizelge 4.1.'de enjeksiyon deneylerinin başarı durumları verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** S/Ç oranı 1.0 olan katkısız süspansiyonun farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kum numunelerde enjeksiyon başarı durumu.

| $D_r$ = % 30 | | | | $D_r$ = % 40 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu | Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu |
| | İnce | Orta | | | İnce | Orta | |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | 1 | 30 | 70 | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı | 2 | 40 | 60 | Başarılı |
| 3 | 35 | 65 | Başarılı | 3 | 50 | 50 | Başarılı |
| 4 | 40 | 60 | Başarılı | 4 | 60 | 40 | Başarılı |
| 5 | 45 | 55 | Başarılı | 5 | 70 | 30 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) |
| 6 | 50 | 50 | Başarılı | $D_r$ = % 50 | | | |
| 7 | 55 | 45 | Başarılı | Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu |
| 8 | 60 | 40 | Başarılı | | İnce | Orta | |
| 9 | 70 | 30 | Başarılı | 1 | 30 | 70 | Başarılı |
| 10 | 75 | 25 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | 2 | 40 | 60 | Başarılı |
| 11 | 80 | 20 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | 3 | 50 | 50 | Başarılı |
| 12 | 100 | 0 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | 4 | 60 | 40 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) |
| $D_r$ = % 60 | | | | $D_r$ = % 70 | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu | Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu |
| | İnce | Orta | | | İnce | Orta | |
| 1 | 20 | 80 | Başarılı | 1 | 10 | 90 | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı | 2 | 20 | 80 | Başarılı |
| 3 | 40 | 60 | Başarılı | 3 | 30 | 70 | Başarılı |
| 4 | 50 | 50 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | 4 | 40 | 60 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) |
| | | | | 5 | 50 | 50 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) |

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.

%30 rölatif sıkılıkta ilk olarak %100 ince, %100 orta kuma enjeksiyon denenmiştir. %100 orta kumda tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan

enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir (Resim 4.1). % 100 ince kumda ise hortumdan su çıkışı gözlenmiş ve filtrasyon görülmüştür (Resim 4.2). %100 ince kuma yapılan enjeksiyon çalışmalarında 2/3 oranında penetrasyonun sağlanması enjeksiyon denemelerini İKY büyük olan değerlere yönlendirmiştir. Bu şekilde enjeksiyon planı ortaya çıkmıştır.



**Resim 4.1.** % 30 rölatif sıkılıktaki %100 orta kum numunede tam penetrasyon



**Resim 4.2.** %30 rölatif sıkılıktaki %100 ince kum numunede filtrasyon (2/3 penetrasyon)

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

%40 rölatif sıkılıkta yapılan denemelere ilk olarak %30 rölatif sıkılık da başarı sınır değeri olan İKY70'le başlanmıştır. Bu oranın denenmesinin nedeni %30 rölatif sıkılıkta başarı sağlanan İKY' nin %40 rölatif sıkılıkta da penetrasyonun sağlanıp

sağlanamayacağının görülmesidir. Bu sayede rölatif sıkılığın artması penetre olabilirliği nasıl etkiyeceği 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 sıkılıkta başarı sınır değerinin (İKY 60) bulunmasıyla denemelere son verilmiştir.

%50 rölatif sıkılıkta enjeksiyona, %40 rölatif sıkılık başarı sınır değeri olan İKY 60 la başlanmış, İKY 60 da başarı sağlanamaması üzerine İKY 50, 40 ve 30'la denemelere devam edilmiş, bu değerlerde başarı sağlanması ve sınır başarı değerinin bulunmasıyla (İKY 50) denemelere son verilmiştir.

%60 rölatif sıkılıkta enjeksiyona, %50 rölatif sıkılık başarı sınır değeri olan İKY 50 ile başlanmış bu değerde filtrasyon görülmesi üzerine, İKY değerleri düşürülerek İKY 40, 30, 20 üzerinde denemeler yapılmış ve bu değerlerde başarı sağlanmıştır. Başarı sınır değerinin (İKY 40) bulunmasıyla %60 rölatif sıkılıktaki denemelere son verilmiştir.

Son olarak, %70 rölatif sıkılık değerinde enjeksiyon denemeleri yapılmıştır. Denemelere %50 ve %60 rölatif sıkılık başarı sınır değerleri olan İKY 50 ve 40 ile başlanmış bu değerlerde filtrasyon görülmesi üzerine İKY si düşürülerek İKY 30, 20, 10 değerleri üzerlerinde enjeksiyonlar denenmiş ve bu değerlerde başarı sağlanmıştır. %70 rölatif sıkılıkta başarı sınır değerinin (İKY30) bulunmasıyla denemelere 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.

#### 4.1.1.2. Farklı S/Ç oranlıyla hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı gradasyonda ve sabit rölatif sıkılıktaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri

Bu kısımdaki deneysel çalışmada farklı S/Ç oranıyla hazırlanmış katkısız süspansiyonların farklı gradasyonda ve sabit rölatif sıkılıktaki kumlar üzerindeki penetrasyon yetileri incelenmiştir.

Deneylerde kullanılacak sabit rölatif sıkılık değeri %30 olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon yapılacak S/Ç oranlarının belirlenmesinde enjekte edilebilirliğin yanında Ultafin12'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. Çizelge 4.2 de enjeksiyonların başarı durumları verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Farklı S/Ç oranlı süspansiyonların, %30 rölatif sıkılıklı ve değişik gradasyonlu kumlara penetrasyon başarı durumları

| S/Ç = 0.8 | | | | S/Ç = 1.0 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu | Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu |
| | İnce | Orta | | | İnce | Orta | |
| 1 | 30 | 70 | Başarılı | 1 | 0 | 100 | Başarılı |
| 2 | 40 | 60 | Başarılı | 2 | 30 | 70 | Başarılı |
| 3 | 50 | 50 | Başarılı | 3 | 35 | 65 | Başarılı |
| 4 | 60 | 40 | Başarılı | 4 | 40 | 60 | Başarılı |
| 5 | 70 | 30 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | 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 | | | | S/Ç = 1.5 | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu | Numune No | Kum Oranı % | | Başarı Durumu |
| | İnce | Orta | | | İnce | Orta | |
| 1 | 60 | 40 | Başarılı | 1 | 60 | 40 | Başarılı |
| 2 | 70 | 30 | Başarılı | 2 | 70 | 30 | Başarılı |
| 3 | 80 | 20 | Başarılı | 3 | 80 | 20 | Başarılı |
| 4 | 90 | 10 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | 4 | 90 | 10 | Başarılı |
| 5 | 100 | 0 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | 5 | 100 | 0 | Başarılı |

S/Ç oranı 1.0'da yapılan enjeksiyon denemesine ilk olarak İKY 100'le başlanmıştır. Deney sonucunda filtrasyon görülmüştür. Daha sonra İKY 80, 75, 70 ile denemelere devam edilmiş, İKY 70'de başarı sağlanırken, İKY 75 ve 80 de filtrasyon görülmüştür. İKY 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30'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 denenmesinin 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 dâhil 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'ın 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.

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. 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.

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 1.00'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.

### 4.1.2 Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri

Bu kısımdaki deneysel çalışmada, sabit S/Ç oranında hazırlanmış addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarının farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kumlara penetrasyon yetileri incelenmiştir.

Sabit S/Ç oranlı deneylerin yapılmasında addiment katkılı Ultrafin 12'nin reolojik özellikleri göz önünde bulundurulmuş ve en uygun S/Ç oranı 1.0 olarak belirlenmiştir. Bu oranın belirlenmesinde Ultrafin12'nin sedimantasyon yüzdesi, priz süresi ve viskozitesi etkin rol oynamıştır.

Deneylere ilk olarak rölatif sıkılık %30'la başlanmış ve daha sonra rölatif sıkılık %50 ve %70 ile denemelere devam edilmiştir. Rölatif sıkılık değerlerinin bu aralarda seçilmesinin nedeni doğal arazi zemin sıkılıklarının temsil edilebilmesidir. Numuneler istenen rölatif sıkılık değerleri verilirken, çevresel nedenlerden dolayı (kalıpları düzeneğe yerleştirme, kalıp başlıklarını yerleştirme, taşıma v.b.) rölatif sıkılık değerlerinde ± 2'ye varan sapmalar görülebilir.

%30 rölatif sıkılıkta ilk olarak %100 ince, %100 orta kuma enjeksiyon denenmiştir. Her iki numuneye de tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. Daha sonra İKY 90, 80, 75, 70, 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. %30 rölatif sıkılıkta İKY 100 dâhil olmak üzere tüm numunelerde başarı sağlanmıştır.

%50 rölatifte de aynı şekilde denemelere %100 ince, %100 orta kumla başlanmıştır. Her iki numuneye de tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. Daha sonra İKY 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. %50 rölatif sıkılıkta İKY 100 dâhil olmak üzere tüm numunelerde başarı sağlanmıştır.

%70 rölatif sıkılıklarda da rölatif sıkılık %30 ve %50'de olduğu gibi denemelere %100 ince, %100 orta kumla başlanmıştır. Denemelerde her iki numunede de tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. Daha sonra İKY 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. %70 rölatif sıkılıkta İKY 100 dâhil olmak üzere tüm numenlerde başarı sağlanmıştır.

**Çizelge 4.3.** S/Ç oranı 1.0 olan addiment katkılı süspansiyonun farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kum numunelerde enjeksiyon başarı durumu.

| $D_r$ = % 30 | | | | $D_r$ = % 50 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Numune No | Kum Oranı % | | Durumu | Numune No | Kum Oranı % | | Durumu |
| | İnce | Orta | | | İnce | Orta | |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | 1 | 0 | 100 | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı | 2 | 30 | 70 | Başarılı |
| 3 | 35 | 65 | Başarılı | 3 | 40 | 60 | Başarılı |
| 4 | 40 | 60 | Başarılı | 4 | 50 | 50 | Başarılı |
| 5 | 45 | 55 | Başarılı | 5 | 60 | 40 | Başarılı |
| 6 | 50 | 50 | Başarılı | 6 | 70 | 30 | Başarılı |
| 7 | 55 | 45 | Başarılı | 7 | 80 | 20 | Başarılı |
| 8 | 60 | 40 | Başarılı | 8 | 90 | 10 | Başarılı |
| 9 | 70 | 30 | Başarılı | 9 | 100 | 0 | Başarılı |
| 10 | 75 | 25 | Başarılı | | | | |
| 11 | 80 | 20 | Başarılı | | | | |
| 12 | 90 | 10 | Başarılı | | | | |
| 13 | 100 | 0 | Başarılı | | | | |

| $D_r$ = % 70 | | | |
|---|---|---|---|
| Numune No | Kum Oranı % | | Durumu |
| | İnce | Orta | |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı |
| 3 | 40 | 60 | Başarılı |
| 4 | 50 | 50 | Başarılı |
| 5 | 60 | 40 | Başarılı |
| 6 | 70 | 30 | Başarılı |
| 7 | 80 | 20 | Başarılı |
| 8 | 90 | 10 | Başarılı |
| 9 | 100 | 0 | Başarılı |

### 4.1.3 Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri

Bu kısımdaki deneysel çalışmada, sabit S/Ç oranının da hazırlanmış silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarının farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kumlara penetrasyon yetileri incelenmiştir.

Sabit S/Ç oranlı deneylerin yapılmasında silis dumanı katkılı Ultrafin 12'nin reolojik özellikleri göz önünde bulundurulmuş ve en uygun S/Ç oranı 1.0 olarak belirlenmiştir. Bu oranın belirlenmesinde silis dumanı katkılı Ultrafin 12'nin sedimantasyon yüzdesi, priz süresi ve viskozitesi etkin rol oynamıştır.

30 rölatif sıkılıkta ilk olarak %100 ince, %100 orta kuma enjeksiyon denenmiştir. %100 orta kumda tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. % 100 ince kumda ise hortumdan su çıkışı gözlenmiş ve

filtrasyon görülmüştür. %100 ince kuma yapılan enjeksiyon çalışmalarında 2/3 oranında penetrasyonun sağlanması enjeksiyon denemelerini İKY büyük olan değerlere yönlendirmiştir.

**Çizelge 4.4.** S/Ç oranı 1.0 olan silis dumanı katkılı süspansiyonun farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kum numunelerde enjeksiyon başarı durumu.

| $D_r$ = % 30 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Numune No | Kum Oranı % | | Durumu (Katkısız Ultrafin 12) | Durumu (Silis dumanı +Ultrafin 12) |
| | İnce | Orta | | |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı | Başarılı |
| 3 | 35 | 65 | Başarılı | Başarılı |
| 4 | 40 | 60 | Başarılı | Başarılı |
| 5 | 45 | 55 | Başarılı | Başarılı |
| 6 | 50 | 50 | Başarılı | Başarılı |
| 7 | 55 | 45 | Başarılı | Başarılı |
| 8 | 60 | 40 | Başarılı | Başarılı |
| 9 | 70 | 30 | Başarılı | Başarılı |
| 10 | 75 | 25 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) |
| 11 | 80 | 20 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Başarısız |
| 12 | 100 | 0 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Başarısız |
| $D_r$ = % 50 | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Durumu (Katkısız Ultrafin 12) | Durumu (Silis dumanı +Ultrafin 12) |
| | İnce | Orta | | |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı | Başarılı |
| 3 | 40 | 60 | Başarılı | Başarılı |
| 4 | 50 | 50 | Başarılı | Başarılı |
| 5 | 60 | 40 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) |
| $D_r$ = % 70 | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Durumu (Katkısız Ultrafin 12) | Durumu (Silis dumanı +Ultrafin 12) |
| | İnce | Orta | | |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | Başarılı |
| 2 | 10 | 70 | Başarılı | Başarılı |
| 3 | 20 | 60 | Başarılı | Başarılı |
| 4 | 30 | 50 | Başarılı | Başarısız |

Daha sonraki denemeler İKY 80, 75 ve 70 ile olmuştur, İKY 80 ve 75 de başarı sağlanamazken, İKY 70'de başarılı olunmuştur. Enjeksiyon denemelerine İKY 60, 55, 50, 45, 40, 30'la devam edilmiş bu değerlerde de başarı sağlanmıştır. Başarı sınır değerinin (İKY 70) bulunmasıyla %30 rölatif sıkılıktaki enjeksiyon denemelerine son verilmiştir. Enjeksiyonda başarılı olan tüm numunelerde tam penetrasyon sağlanmış,

başarısız olan numunelerde ise 2/3 oranında penetrasyon görülmüştür. Silis dumanı katkılı enjeksiyonların başarı sınır değerleri katkısız Ultrafin 12'nin değerleri ile aynı çıkmıştır.

%50 rölatifte de denemelere katkısız Ultrafin 12'de başarısız olunan İKY 60 ile başlanmıştır. Enjeksiyon denemesinde bu İKY'de başarı sağlanamazken, İKY 50 ile denemelere devam edilmiş bu denemelerde başarı sağlanırken, numunelerde tam penetrasyon görülmüştür. Daha sonra İKY 40, 30, 0 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür.%50 rölatif sıkılıkta enjeksiyon başarı sınır değeri İKY 50'dir.

%70 rölatifte de denemelere İKY 30 ile başlanmıştır. Enjeksiyon denemesinde bu İKY'de başarı sağlanamazken, İKY 20 ile denemelere devam edilmiş bu denemelerde başarı sağlanırken, numunelerde tam penetrasyon görülmüştür. Daha sonra İKY 10, 0 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. %70 rölatif sıkılıkta enjeksiyon başarı sınır değeri İKY 20'dir.

### 4.1.4. Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri

Bu kısımdaki deneysel çalışmada, sabit S/Ç oranında hazırlanmış sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarının farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kumlara penetrasyon yetileri incelenmiştir

S/Ç oranı 1.0 ile hazırlanan süspansiyonlar numunelere enjekte edilmeye çalışılmış süspansiyonun yoğunluğundan ve viskozitesinden dolayı numunelere enjekte edilememiştir. Çalışmalar sodyum bentonit katkılı süspansiyonların reolojik özelliklerin belirlenmesinden öteye taşınamamıştır.

### 4.1.5. Addiment +silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonu enjeksiyon deneyleri

Silis dumanı ve addiment katkılı S/Ç oranı 1.0 olan süspansiyonların, farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kum numunelere penetrasyon yetileri test edilmiştir.

Silis dumanı ve addiment katkılı farklı S/Ç oranlarında reolojik özellikleri çalışılan süspansiyonların viskozite, stabilite ve prizlenme süreleri dikkate alındığında enjeksiyon deneyleri için en uygun S/Ç oranı 1.0 olarak belirlenmiştir.

Deneylere ilk olarak rölatif sıkılık %30'la başlanmış ve daha sonra rölatif sıkılık %50 ve %70'le denemelere devam edilmiştir. Rölatif sıkılık değerlerinin bu aralarda

seçilmesinin nedeni doğal arazi zemin sıkılıklarının temsil edilebilmesidir. Numuneler istenen rölatif sıkılık değerleri verilirken, çevresel nedenlerden dolayı (kalıpları düzeneğe yerleştirme, kalıp başlıklarını yerleştirme, taşıma v.b.) rölatif sıkılık değerlerinde ± 2'ye varan sapmalar görülebilir.

%30 rölatif sıkılıkta ilk olarak %100 ince, %100 orta kuma enjeksiyon denenmiştir. Her iki numuneye de tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. Daha sonra İKY 70, 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. %30 rölatif sıkılıkta İKY 100 dâhil olmak üzere tüm numunelerde başarı sağlanmıştır.

%50 rölatifte de aynı şekilde denemelere %100 ince, %100 orta kumla başlanmıştır. Her iki numuneye de tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. Daha sonra İKY 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. %50 rölatif sıkılıkta İKY 100 dâhil olmak üzere tüm numunelerde başarı sağlanmıştır.

%70 rölatif sıkılıklarda da rölatif sıkılık %30 ve %50'de olduğu gibi denemelere %100 ince, %100 orta kumla başlanmıştır. Denemelerde her iki numunede de tam penetrasyon sağlanırken, şeffaf hortumlardan enjeksiyon çıkışı gözlenmiştir. Daha sonra İKY 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10 olan numunelere denemeler yapılmış, bu denemelerde başarı sağlanmış ve tam penetrasyon görülmüştür. %70 rölatif sıkılıkta İKY 100 dâhil olmak üzere tüm numunelerde başarı sağlanmıştır.

Silis dumanı ve addiment katkılı Ultrafin 12 çimento süspansiyonlarının çeşitli rölatif sıkılıkta ve gradasyonda oluşturulan kum numunelere enjeksiyonu denenmiş, silis dumanı katkılı Ultrafin 12 ile katkısız Ultrafin12 süspansiyonlarının penetre olamadığı rölatif sıkılık ve gradasyonlarda ki kum numunelere üçlü karışımın (Ultrafin 12 + silika dumanı + addiment) rahatlıkla penetre olabildiği görülmüştür.

**Çizelge 4.5.** Silis dumanı + Addiment katkılı S/Ç oranı 1.0 olan süspansiyonun farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kum numunelerde enjeksiyon performansı

| Numune no | Kum Oranı % | | $D_r$ = % 30 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | İnce | Orta | Durumu (Katkısız Ultrafin 12) | Durumu (Silis dumanı+Ultrafin 12) | Durumu (Addiment+Silis dumanı+Ultrafin 12) |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 3 | 35 | 65 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 4 | 40 | 60 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 5 | 45 | 55 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 6 | 50 | 50 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 7 | 55 | 45 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 8 | 60 | 40 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 9 | 70 | 30 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 10 | 75 | 25 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Başarılı |
| 11 | 80 | 20 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Başarısız | Başarılı |
| 12 | 90 | 10 | - | - | Başarılı |
| 13 | 100 | 0 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Başarısız | Başarılı |
| Numune no | Kum Oranı % | | $D_r$ = % 50 | | |
| | İnce | Orta | Durumu (Katkısız Ultrafin 12) | Durumu (Silis dumanı + Ultrafin 12) | Durumu (Addiment + Silis dumanı +Ultrafin 12) |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 2 | 30 | 70 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 3 | 40 | 60 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 4 | 50 | 50 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 5 | 60 | 40 | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Kısmi Başarılı (Filtrasyon) | Başarılı |
| 6 | 70 | 30 | - | - | Başarılı |
| 7 | 80 | 20 | - | - | Başarılı |
| 8 | 90 | 10 | - | - | Başarılı |
| 9 | 100 | 0 | - | - | Başarılı |
| Numune no | Kum Oranı % | | $D_r$ = % 70 | | |
| | İnce | Orta | Durumu (Katkısız Ultrafin 12) | Durumu (Silis dumanı + Ultrafin 12) | Durumu (Addiment + Silis dumanı +Ultrafin 12) |
| 1 | 0 | 100 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 2 | 10 | 70 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 3 | 20 | 60 | Başarılı | Başarılı | Başarılı |
| 4 | 30 | 50 | Başarılı | Başarısız | Başarılı |
| 5 | 40 | 60 | - | - | Başarılı |
| 6 | 50 | 50 | - | - | Başarılı |
| 7 | 60 | 40 | - | - | Başarılı |
| 8 | 70 | 30 | - | - | Başarılı |
| 9 | 80 | 20 | - | - | Başarılı |
| 10 | 90 | 10 | - | - | Başarılı |
| 11 | 100 | 0 | - | - | Başarılı |

## 4.2. Burwell Kriterlerine Göre Enjekte Edilebilirlik

Yapılan tüm enjeksiyon deney sonuçları Burwell kriterlerine göre değerlendirilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.6.** Burwell kriterlerine göre enjekte edilebilirlik.

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

Çizelge 4.6'ya bakıldığında İKY 0,10, 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 yapılabilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; hem yapılan enjeksiyon deney sonuçları, hem de Burwell kriterleri enjekte edilebilirlik hesapları birbirini doğrulamaktadır.

### 4.3. Enjeksiyonda Başarılı Olan Numunelerin Mukavemet Deneyleri

Enjeksiyonda başarılı olan numuneler bir gün kalıplarda bekletildikten sonra, kalıplardan çıkartılmıştır. Çıkartma işlemi, kalıba yapılan özel başlık ve çelik tokmakla yapılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler kür ortamında bekletilmiştir. Kalıplardan çıkarılan numunelere mukavemet değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

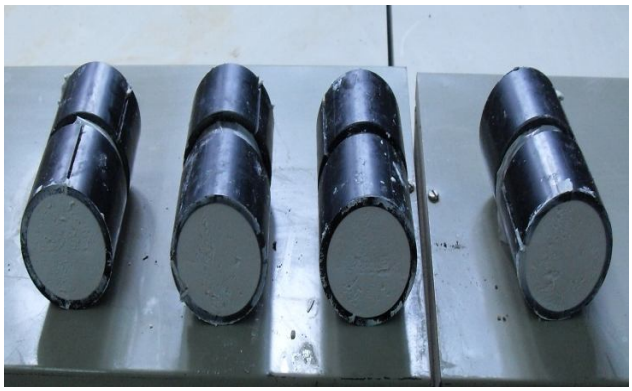
Numuneler kür ortamından çıkarıldıktan sonra boyu çapın iki katı olacak şekilde beton kesicide kesilmiştir (Resim 4.3). Daha sonra beton yüzeylere; hem düzgün terazisinde yüzeyler oluşturmak, hem de basıncın tüm yüzeye üniform dağılmasını sağlamak amacıyla özel başlıklar yapılmıştır. Başlıkların oluşturulmasında kartonpiyer alçısı kullanılmıştır (Resim 4.4). 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 kalıpları imal edilmiştir (Resim 4.5). Bu kalıplar numuneye kolay bir şekilde yerleşmekte, alçının prizini almasından sonra kolayca numuneden çıkartılabilmektedir.



**Resim 4.3.** Beton kesicide tıraşlanan numune.



**Resim 4.4.** Numunelerine alçı başlık yapılması.



**Resim 4.5.** Özel başlık kalıpları.

Mukavemet değerinin ölçülmesi için 4 ton yük halkası kapasiteli 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. Numuneler prizini aldıktan sonra serbest basınç deney aletine yerleştirilerek, numunelere 1,27 mm/s sabit hızla yükleme yapılmış ve yük halkasından kırılma anındaki maksimum değerler okunmuştur.

Mukavemet deneyleri beş farklı durumdaki enjekte edilmiş numunelere yapılmıştır. Birinci olarak, dayanımın, sabit S/Ç oranında değişken rölatif sıkılıktaki değimi ile sabit rölatif sıkılıkta S/Ç oranlarının değişiminin numunelerin dayanımlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır. İkincisinde sabit S/Ç oranlı addiment katkılı Ultrafin 12, üçüncüsünde silis dumanı katkılı Ultrafin 12, dördüncüsünde addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonların mukavemet değerlerinin İKY ve rölatif sıkılıkla nasıl değiştiği incelenmiştir.

### 4.3.1. Enjeksiyonda başarılı olan katkısız Ultrafin 12 numunelerin mukavemet deneyleri

#### 4.3.1.1. Sabit S/Ç oranı ve değişken rölatif sıkılıktaki katkısız Ultrafin 12 numunelerin mukavemet değerleri

Bu çalışmada, S/Ç oranı 1.0, rölatif sıkılık değerleri %30-40-50-60-70 olan enjeksiyonda başarılı olmuş numunelere mukavemet deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4.7'de numunelerin 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki basınç dayanımları gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 incelendiğinde %30 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin %100 orta kumda (11,80 MPa, 56 günlük basınç dayanımı), en düşük basınç değerinin (7.20 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 4.6'da ince kum yüzdesi fazla olan numunenin (rölatif sıkılık %30, İKY 70), Resim 4.7'de ise ince kum yüzdesi düşük olan numunenin (rölatif sıkılık %30, İKY 30) tipik kırılma biçimleri görülmektedir.

**Çizelge 4.7.** Farklı rölatif sıkılıktaki 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 | 6,08 | 7,20 |
| Dr = %40 | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 100 | 0,40 | 0,52 | 1,17 | 1,83 | 4,01 | 4,66 |
| 2 | 30 | 70 | 0,25 | 0,49 | 0,93 | 1,66 | 3,32 | 3,86 |
| 3 | 40 | 60 | 0,19 | 0,45 | 0,87 | 1,56 | 3,18 | 3,68 |
| 4 | 50 | 50 | 0,16 | 0,33 | 0,81 | 1,51 | 2,99 | 3,50 |
| Dr = %60 | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 100 | 0,28 | 0,54 | 1,32 | 2,67 | 5,63 | 6,61 |
| 2 | 10 | 90 | 0,25 | 0,51 | 1,28 | 2,24 | 4,49 | 5,21 |
| 3 | 20 | 80 | 0,22 | 0,46 | 1,13 | 2,05 | 4,01 | 4,65 |
| 4 | 30 | 70 | 0,21 | 0,41 | 1,02 | 1,76 | 3,63 | 4,21 |

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 taneler arasındaki boşluklar azalmış ve numuneye süspansiyonun penetrasyonu zorlaşmıştır.

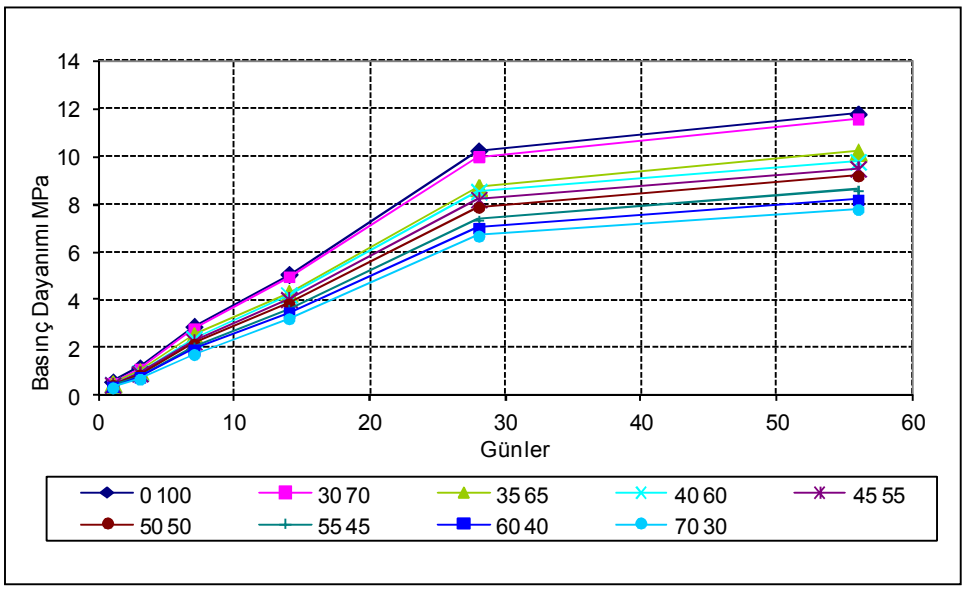


**Resim 4.6.** Rölatif sıkılık %30, İKY 70 olan numunenin tipik kırılma biçimi.

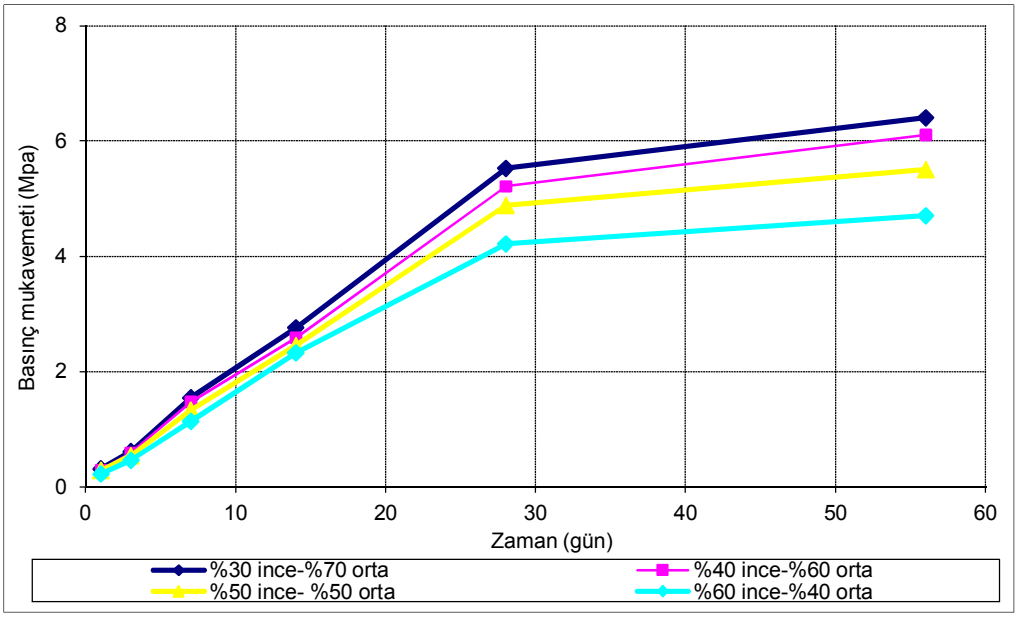


**Resim 4.7.** Rölatif sıkılık %30, İKY 30 olan numunenin tipik kırılma biçimi.

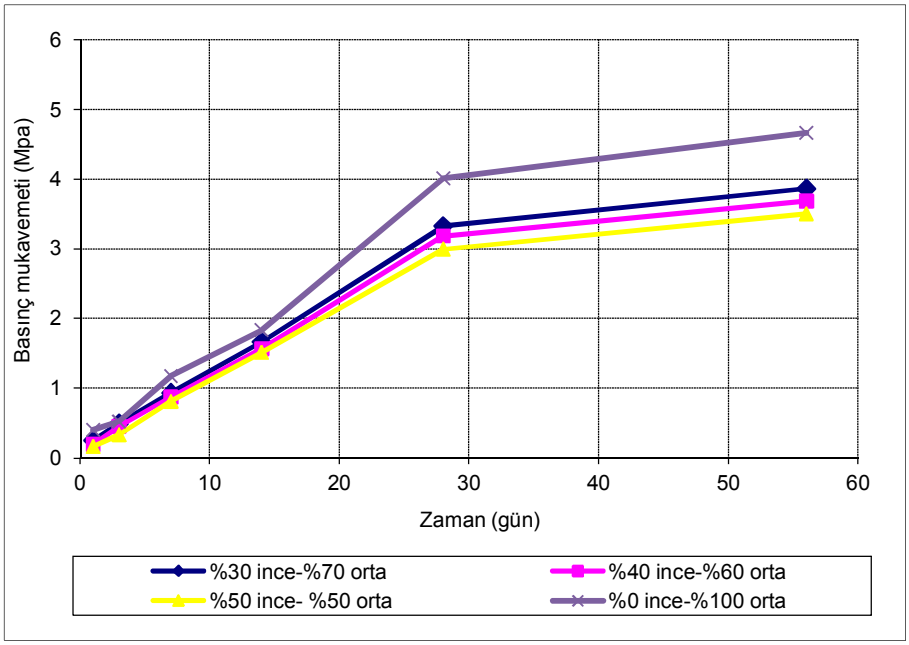
Sonuçların daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi amacıyla değerler grafiğe dökülmüştür. Şekil 4.1- 4.2- 4.3- 4.4 -4.5'de numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi verilmiştir. Bahsi geçen şekillere bakıldığında basınç mukavemetinin büyük bir kısmının 28. güne kadar kazanıldığı, numunelerin mukavemet değerlerinin yaklaşık %90' nını 28 günde kazandığı görülmektedir. Basınç dayanımındaki en büyük artışlar 7, 14 ve 28. günlerde olmuştur. Ayrıca, numunelere 1. ve 3. günde yapılan basınç mukavemeti deney sonuçları birbirine oldukça yakınken, ince kum yüzdesi değerine bağlı olarak 56. güne kadar basınç mukavemeti değerlerindeki farklılaşma daha da belirgin hale gelmektedir.



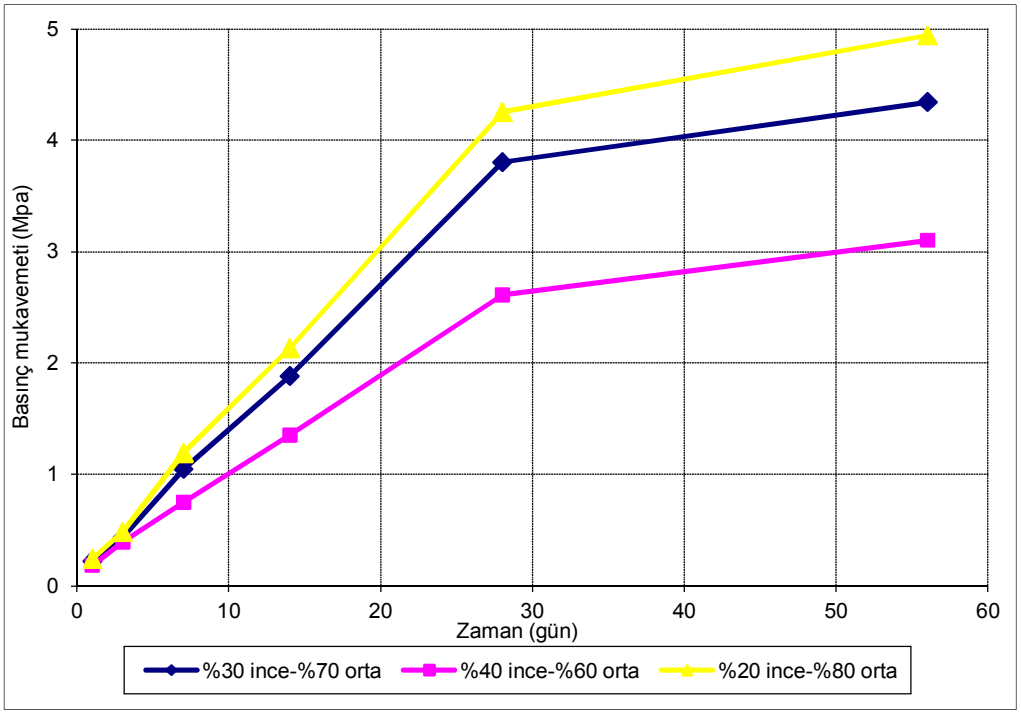

**Şekil 4.1.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



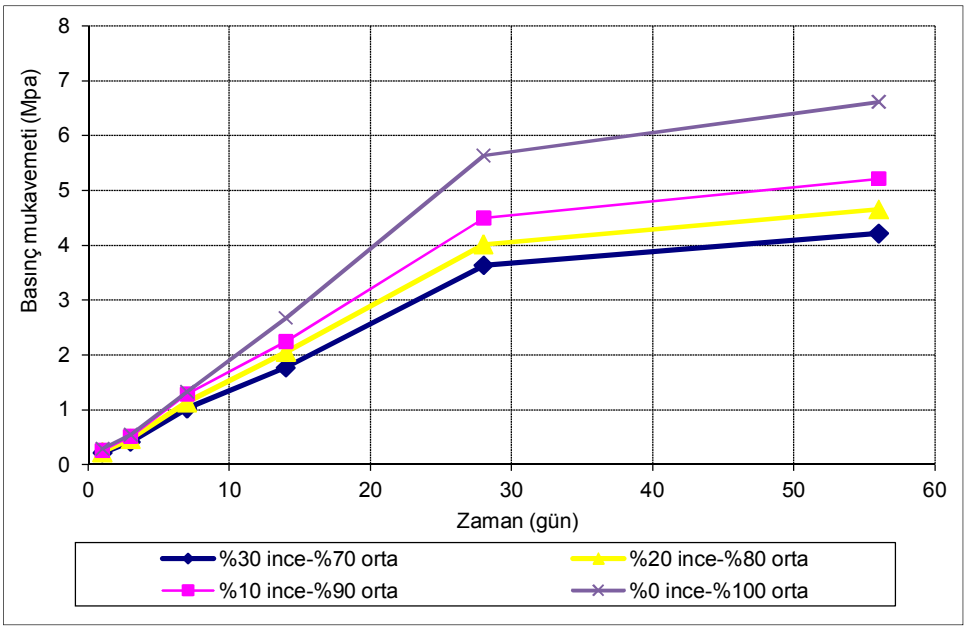

**Şekil 4.2.** %40 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.3.** %50 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.4.** %60 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.5.** %70 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

### 4.3.1.2. Sabit rölatif sıkılıkta ve farklı S/Ç oranlarındaki katkısız Ultrafin 12 numunelerin mukavemet değerleri

Enjeksiyonda başarılı olmuş rölatif sıkılık değeri % 30, S/Ç oranları 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan numunelere mukavemet deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4.8' de numunelerin 1, 3, 7, 14, 28, 56. günlerdeki basınç dayanımları verilmiştir.

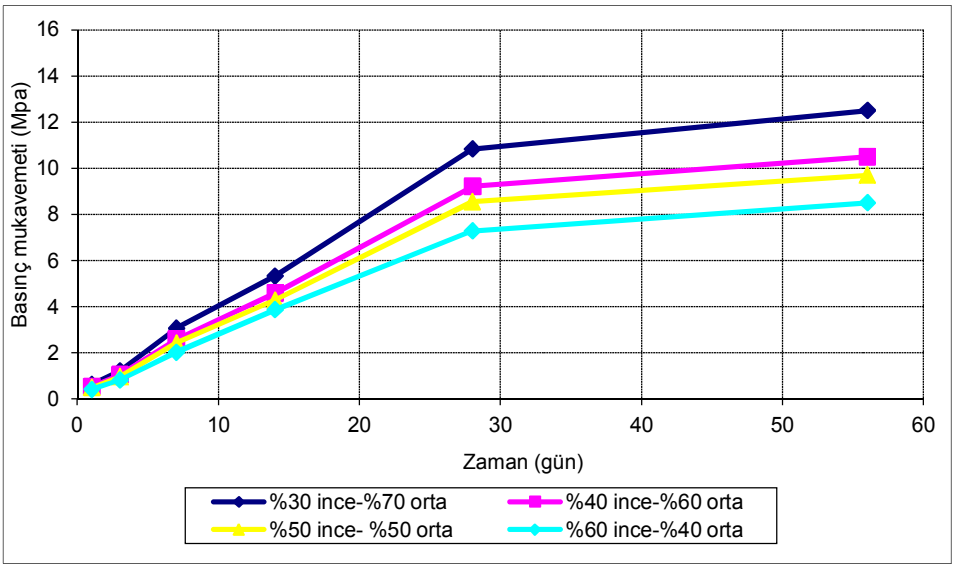
**Çizelge 4.8.** Farklı S/Ç oranlı numunelerin basınç mukavemetleri.

| 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 |

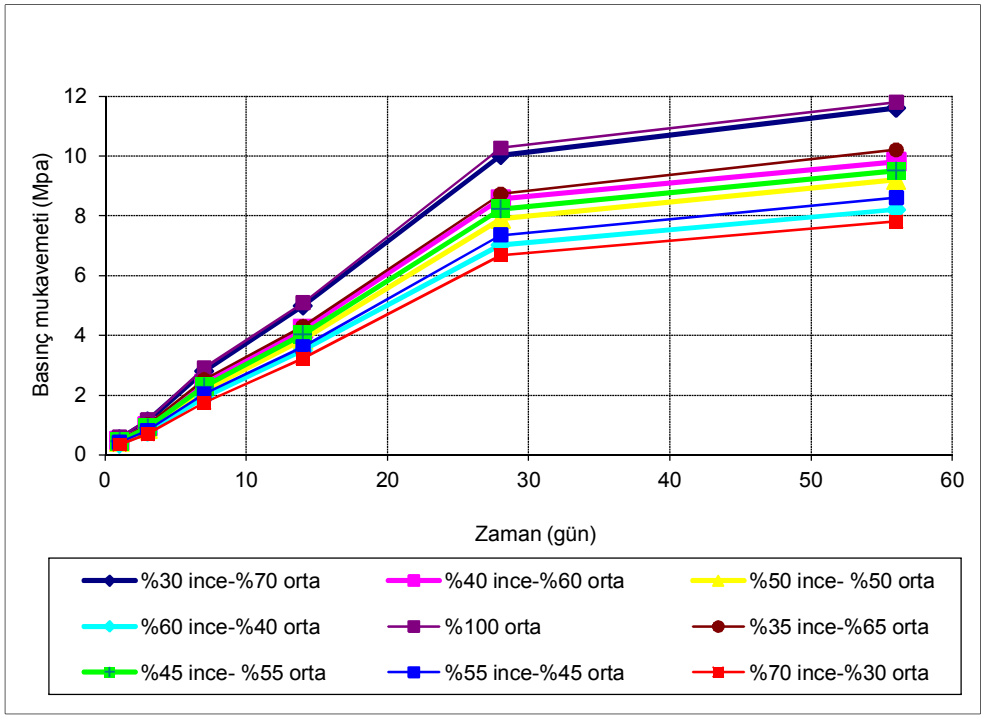
Çizelge 4.8 incelendiğinde, S/Ç oranları 0.8, 1.2 ve 1.5 olan değerlerde ince kum yüzdesinin artması ile basınç dayanımları düşmüştür. Bunun nedeni; İKY'nin artışıyla taneler arasındaki boşluklar azalmış ve numuneye süspansiyonun penetrasyonu güçleşmiştir.

Çizelge 4.8'e bakıldığında farklı S/Ç oranlarında aynı İKY'ye sahip numuneler incelendiğinde; en büyük basınç dayanımının S/Ç oranı 0.8 olan numunelerde, en düşük basınç dayanımının S/Ç oranı 1.5 olan numunelerde olduğu görülmüştür. S/Ç oranının artması ile basınç dayanımı düşmüştür.

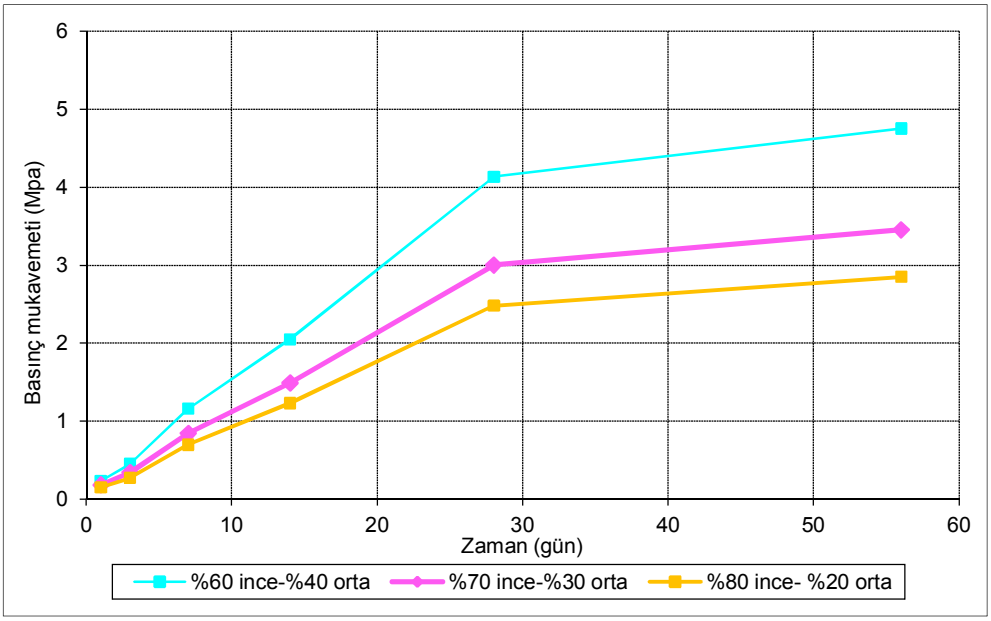
Şekil 4.6-4.7-4.8-4.9'a numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi verilmiştir. Şekillere bakıldığında basınç mukavemetinin büyük bir kısmının 28. günde kazanıldığı, 28. günden sonra dayanım değerlerinde çok büyük bir artış olmadığı görülmektedir. Basınç dayanımındaki en büyük artışlar 7, 14 ve 28. günlerde olmuştur.



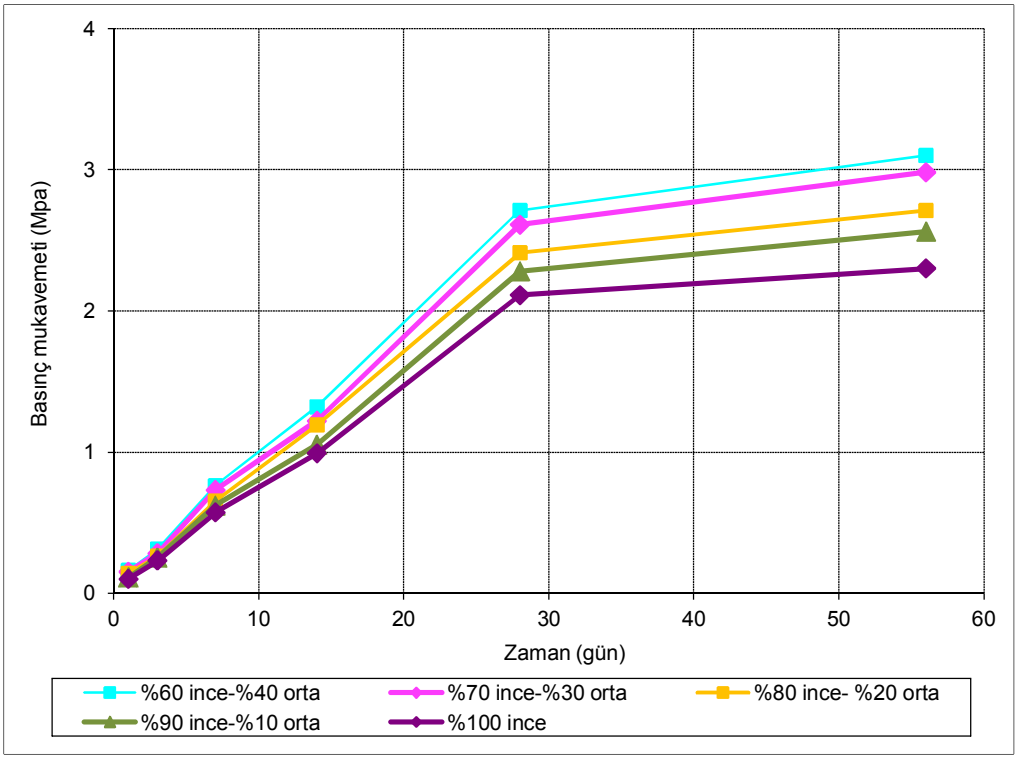

**Şekil 4.6.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 0.8 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.7.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.8.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.2 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.9.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.5 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

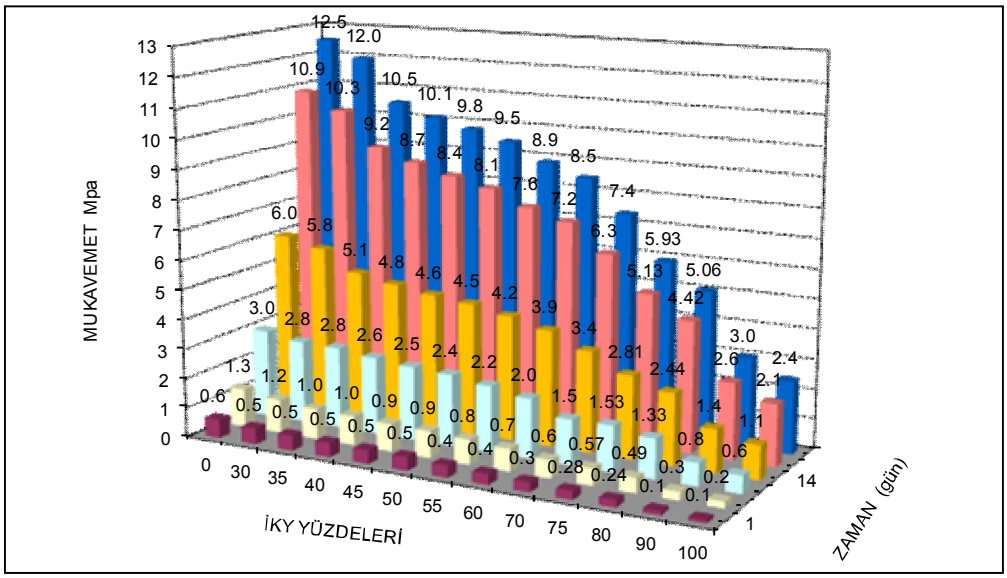
### 4.3.2. Addiment katkılı Ultrafin 12 numunelerin sabit S/Ç oranı ve değişken rölatif sıkılıktaki mukavemet değerleri

Enjeksiyonda başarılı olan numunelere mukavemet değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Mukavemet deneylerinde addiment katkılı Ultrafin 12'li numunelerin dayanımlarının, sabit S/Ç oranında değişken rölatif sıkılık ile nasıl değiştiği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, daha önce enjeksiyonda başarılı olmuş S/Ç oranı 1.0, rölatif sıkılık değerleri %30–50–70 olan numunelere mukavemet deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4.9'da numunelerin 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki basınç dayanımları gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 incelendiğinde %30-%50-%70 rölatif sıkılıklarda, en yüksek basınç değerinin %100 orta kum numunelerinde, en düşük basınç değerinin ise İKY 100 olan kum numunelerinde olduğu görülmüştür. İnce kum yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımları düşmüştür. İnce kum yüzdesinin artmasıyla taneler arasındaki boşluklar azalmış ve süspansiyon numunelere daha az penetre olmuştur. Rölatif sıkılığın artmasıyla numuneler arasındaki boşluk azalmış, enjeksiyonların numunelere penetrasyonu zorlaşmıştır. Diğer bir ifadeyle rölatif sıkılığın artmasıyla mukavemet değerleri düşmüştür.

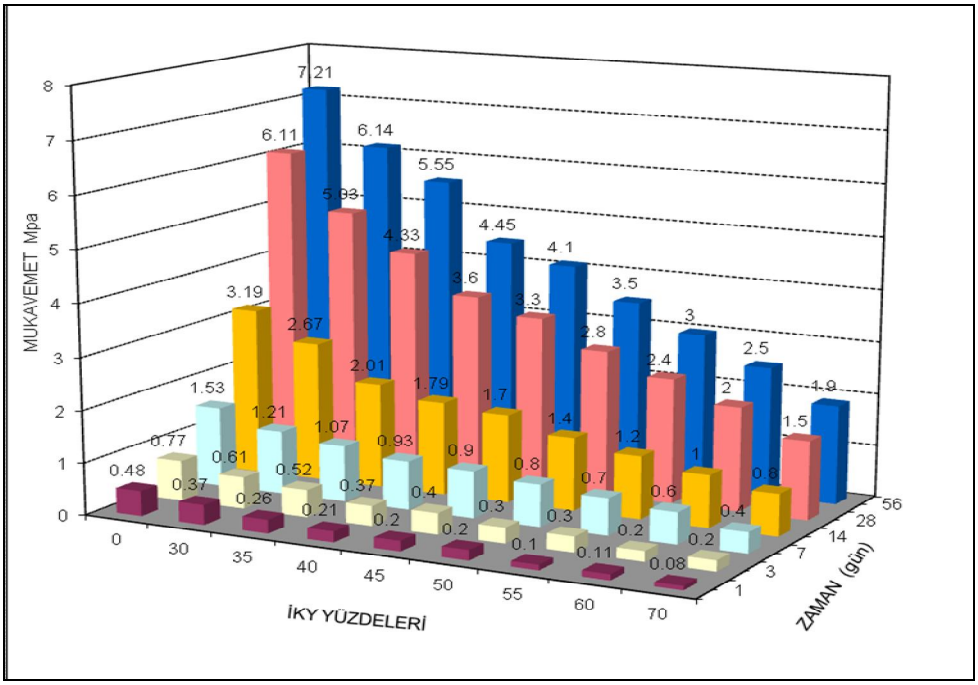
Sonuçların yorumlanabilmesi amacıyla değerler grafiğe dökülmüştür. Şekil 4.10-4.11-4.12'de numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi verilmiştir. Şekiller incelendiğinde basınç mukavemetinin büyük bir kısmının 28. güne kadar kazanıldığı, 28. günden sonra dayanım değerlerinde çok büyük bir artış olmadığı 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 yakınken, ince kum yüzdesi değerine bağlı olarak 56. güne kadar basınç mukavemeti değerlerindeki farklılaşma daha da belirgin hale gelmektedir.



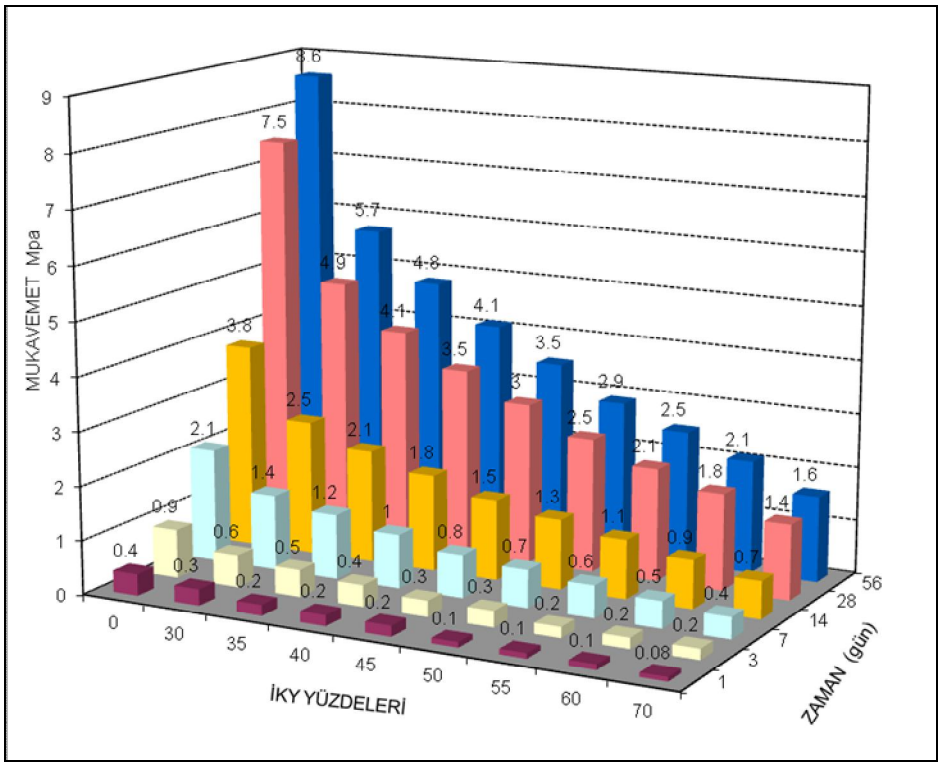

**Şekil 4.10.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

**Çizelge 4.9.** Enjeksiyon yapılmış farklı rölatif sıkılıktaki 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 | 0,6 | 1,3 | 3,0 | 6,0 | 10,9 | 12,5 |
| 2 | 30 | 70 | 0,5 | 1,2 | 2,8 | 5,8 | 10,3 | 12,0 |
| 3 | 35 | 65 | 0,5 | 1,0 | 2,8 | 5,1 | 9,2 | 10,5 |
| 4 | 40 | 60 | 0,5 | 1,0 | 2,6 | 4,8 | 8,7 | 10,1 |
| 5 | 45 | 55 | 0,5 | 0,9 | 2,5 | 4,6 | 8,4 | 9,8 |
| 6 | 50 | 50 | 0,5 | 0,9 | 2,4 | 4,5 | 8,1 | 9,5 |
| 7 | 55 | 45 | 0,4 | 0,8 | 2,2 | 4,2 | 7,6 | 8,9 |
| 8 | 60 | 40 | 0,4 | 0,7 | 2,0 | 3,9 | 7,2 | 8,5 |
| 9 | 70 | 30 | 0,3 | 0,6 | 1,5 | 3,4 | 6,3 | 7,4 |
| 10 | 75 | 25 | 0,28 | 0,57 | 1,53 | 2,81 | 5,13 | 5,93 |
| 11 | 80 | 20 | 0,24 | 0,49 | 1,33 | 2,44 | 4,42 | 5,06 |
| 12 | 90 | 10 | 0,1 | 0,3 | 0,8 | 1,4 | 2,6 | 3,0 |
| 13 | 100 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,6 | 1,1 | 2,1 | 2,4 |
| Dr = %50 | | | | | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | İnce | Orta | 1.gün | 3.gün | 7. gün | 14.gün | 28.gün | 56.gün |
| 1 | 0 | 100 | 0,48 | 0,77 | 1,53 | 3,19 | 6,11 | 7,21 |
| 2 | 30 | 70 | 0,37 | 0,61 | 1,21 | 2,67 | 5,03 | 6,14 |
| 3 | 40 | 60 | 0,26 | 0,52 | 1,07 | 2,01 | 4,33 | 5,55 |
| 4 | 50 | 50 | 0,21 | 0,37 | 0,93 | 1,79 | 3,60 | 4,45 |
| 5 | 60 | 40 | 0,2 | 0,4 | 0,9 | 1,7 | 3,3 | 4,1 |
| 6 | 70 | 30 | 0,2 | 0,3 | 0,8 | 1,4 | 2,8 | 3,5 |
| 7 | 80 | 20 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1,2 | 2,4 | 3,0 |
| 8 | 90 | 10 | 0,11 | 0,2 | 0,6 | 1,0 | 2,0 | 2,5 |
| 9 | 100 | 0 | 0,08 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,5 | 1,9 |
| Dr = %70 | | | | | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | İnce | Orta | 1.gün | 3.gün | 7. gün | 14.gün | 28.gün | 56.gün |
| 1 | 0 | 100 | 0,4 | 0,9 | 2,1 | 3,8 | 7,5 | 8,6 |
| 2 | 30 | 70 | 0,3 | 0,6 | 1,4 | 2,5 | 4,9 | 5,7 |
| 3 | 40 | 60 | 0,2 | 0,5 | 1,2 | 2,1 | 4,1 | 4,8 |
| 4 | 50 | 50 | 0,2 | 0,4 | 1,0 | 1,8 | 3,5 | 4,1 |
| 5 | 60 | 40 | 0,2 | 0,3 | 0,8 | 1,5 | 3,0 | 3,5 |
| 6 | 70 | 30 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1,3 | 2,5 | 2,9 |
| 7 | 80 | 20 | 0,1 | 0,2 | 0,6 | 1,1 | 2,1 | 2,5 |
| 8 | 90 | 10 | 0,10 | 0,2 | 0,5 | 0,9 | 1,8 | 2,1 |
| 9 | 100 | 0 | 0,08 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 1,4 | 1,6 |




**Şekil 4.11.** %50 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.12.** %70 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

**Çizelge 4.10.** Ultrafin 12 ve Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarına ait mukavemet deney sonuçları.

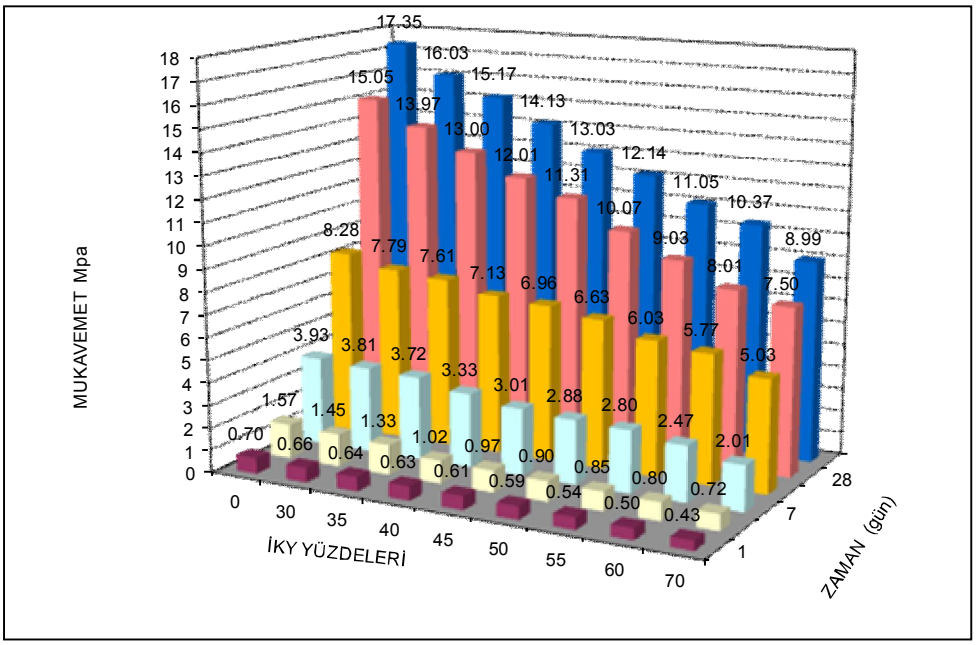
| S/Ç =1 Dr= %30 | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ULTRAFİN 12 | | | | | | | | ULTRAFİN 12 + ADDİMENT | | | | | | |
| Numune No | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | % | 1,00 | 3,00 | 7,00 | 14,00 | 28,00 | 56,00 | % | 1,00 | 3,00 | 7,00 | 14,00 | 28,00 | 56,00 |
| 1 | 0 | 0,58 | 1,16 | 2,90 | 5,08 | 10,26 | 11,80 | 0 | 0,62 | 1,32 | 2,99 | 6,04 | 10,89 | 12,53 |
| 2 | 30 | 0,52 | 1,12 | 2,79 | 4,98 | 10,02 | 11,60 | 30 | 0,54 | 1,15 | 2,79 | 5,75 | 10,33 | 11,96 |
| 3 | 35 | 0,49 | 1,00 | 2,51 | 4,29 | 8,72 | 10,20 | 35 | 0,50 | 1,02 | 2,76 | 5,06 | 9,18 | 10,52 |
| 4 | 40 | 0,47 | 0,95 | 2,38 | 4,21 | 8,55 | 9,80 | 40 | 0,48 | 0,97 | 2,61 | 4,79 | 8,74 | 10,11 |
| 5 | 45 | 0,45 | 0,91 | 2,27 | 4,02 | 8,22 | 9,50 | 45 | 0,46 | 0,92 | 2,48 | 4,59 | 8,40 | 9,80 |
| 6 | 50 | 0,43 | 0,86 | 2,16 | 3,85 | 7,89 | 9,20 | 50 | 0,45 | 0,89 | 2,42 | 4,46 | 8,11 | 9,49 |
| 7 | 55 | 0,41 | 0,81 | 2,03 | 3,61 | 7,35 | 8,60 | 55 | 0,40 | 0,83 | 2,24 | 4,22 | 7,59 | 8,87 |
| 8 | 60 | 0,37 | 0,77 | 1,92 | 3,48 | 7,02 | 8,20 | 60 | 0,36 | 0,75 | 2,03 | 3,91 | 7,24 | 8,46 |
| 9 | 70 | 0,33 | 0,69 | 1,73 | 3,22 | 6,08 | 7,20 | 70 | 0,32 | 0,61 | 1,51 | 3,41 | 6,32 | 7,37 |
| 10 | 75 | - | - | - | - | - | - | 75 | 0,28 | 0,57 | 1,53 | 2,81 | 5,13 | 5,93 |
| 11 | 80 | - | - | - | - | - | - | 80 | 0,24 | 0,49 | 1,33 | 2,44 | 4,42 | 5,06 |
| 12 | 90 | - | - | - | - | - | - | 90 | 0,14 | 0,28 | 0,76 | 1,43 | 2,58 | 3,02 |
| 13 | 100 | - | - | - | - | - | - | 100 | 0,10 | 0,22 | 0,59 | 1,13 | 2,09 | 2,44 |
| S/Ç =1 Dr= %50 | | | | | | | | | | | | | | |
| ULTRAFİN 12 | | | | | | | | ULTRAFİN 12 + ADDİMENT | | | | | | |
| Numune No | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | % | 1,00 | 3,00 | 7,00 | 14,00 | 28,00 | 56,00 | % | 1,00 | 3,00 | 7,00 | 14,00 | 28,00 | 56,00 |
| 1 | 0 | 0,40 | 0,52 | 1,17 | 1,83 | 4,01 | 4,66 | 0 | 0,48 | 0,77 | 1,53 | 3,19 | 6,11 | 7,21 |
| 2 | 30 | 0,25 | 0,49 | 0,93 | 1,66 | 3,32 | 3,86 | 30 | 0,37 | 0,61 | 1,21 | 2,67 | 5,03 | 6,14 |
| 3 | 40 | 0,19 | 0,45 | 0,87 | 1,56 | 3,18 | 3,68 | 40 | 0,26 | 0,52 | 1,07 | 2,01 | 4,33 | 5,55 |
| 4 | 50 | 0,16 | 0,33 | 0,81 | 1,51 | 2,99 | 3,50 | 50 | 0,21 | 0,37 | 0,93 | 1,79 | 3,60 | 4,45 |
| 5 | 60 | - | - | - | - | - | - | 60 | 0,18 | 0,38 | 0,93 | 1,68 | 3,28 | 4,12 |
| 6 | 70 | - | - | - | - | - | - | 70 | 0,15 | 0,32 | 0,78 | 1,42 | 2,78 | 3,49 |
| 7 | 80 | - | - | - | - | - | - | 80 | 0,13 | 0,27 | 0,66 | 1,21 | 2,36 | 2,96 |
| 8 | 90 | - | - | - | - | - | - | 90 | 0,11 | 0,23 | 0,56 | 1,02 | 2,00 | 2,51 |
| 9 | 100 | - | - | - | - | - | - | 100 | 0,08 | 0,18 | 0,43 | 0,79 | 1,54 | 1,93 |
| S/Ç =1 Dr= %70 | | | | | | | | | | | | | | |
| ULTRAFİN 12 | | | | | | | | ULTRAFİN 12 + ADDİMENT | | | | | | |
| Numune No | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | % | 1,00 | 3,00 | 7,00 | 14,00 | 28,00 | 56,00 | % | 1,00 | 3,00 | 7,00 | 14,00 | 28,00 | 56,00 |
| 1 | 0 | 0,28 | 0,54 | 1,32 | 2,67 | 5,63 | 6,61 | 0 | 0,41 | 0,85 | 2,10 | 3,82 | 7,45 | 8,64 |
| 2 | 10 | 0,25 | 0,51 | 1,28 | 2,24 | 4,49 | 5,21 | 10 | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 20 | 0,22 | 0,46 | 1,13 | 2,05 | 4,01 | 4,65 | 20 | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 30 | 0,21 | 0,41 | 1,02 | 1,76 | 3,63 | 4,21 | 30 | 0,27 | 0,56 | 1,38 | 2,52 | 4,89 | 5,67 |
| 5 | 40 | - | - | - | - | - | - | 40 | 0,23 | 0,48 | 1,17 | 2,12 | 4,15 | 4,81 |
| 6 | 50 | - | - | - | - | - | - | 50 | 0,19 | 0,40 | 0,99 | 1,80 | 3,51 | 4,07 |
| 7 | 60 | - | - | - | - | - | - | 60 | 0,16 | 0,34 | 0,84 | 1,52 | 2,98 | 3,45 |
| 8 | 70 | - | - | - | - | - | - | 70 | 0,14 | 0,29 | 0,71 | 1,29 | 2,52 | 2,93 |
| 9 | 80 | - | - | - | - | - | - | 80 | 0,12 | 0,25 | 0,60 | 1,09 | 2,14 | 2,48 |
| 10 | 90 | - | - | - | - | - | - | 90 | 0,10 | 0,21 | 0,51 | 0,93 | 1,81 | 2,10 |
| 11 | 100 | - | - | - | - | - | - | 100 | 0,08 | 0,16 | 0,39 | 0,71 | 1,39 | 1,62 |

Çizelge 4.10 incelendiğinde Ultrafin 12 süspansiyonlarına addiment katkısı hem enjekte edilebilirliği hem de mukavemet değerlerini arttırmıştır. %30 rölatif sıkılıkta İKY 0 da katkısız Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 11.80 MPa (56 günlük basınç dayanımı) iken, addiment katkılı Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 12.53 MPa (56 günlük basınç dayanımı)'dır. Aynı şekilde, addiment katkılı diğer numunelerde katkısız numunelere oranla mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir.

### 4.3.3. Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 numunelerin sabit S/Ç oranı ve değişken rölatif sıkılıktaki mukavemet değerleri

Enjeksiyonda başarılı olan numunelere mukavemet değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

Silis dumanı katkılı S/Ç oranı 1.0 ile yapılan enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numuneler ile rölatif sıkılık değerleri %30-50-70 olan enjeksiyon deneylerinde başarılı sağlanan numunelere mukavemet deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4.11'de numunelerin 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki basınç dayanımları gösterilmiştir.

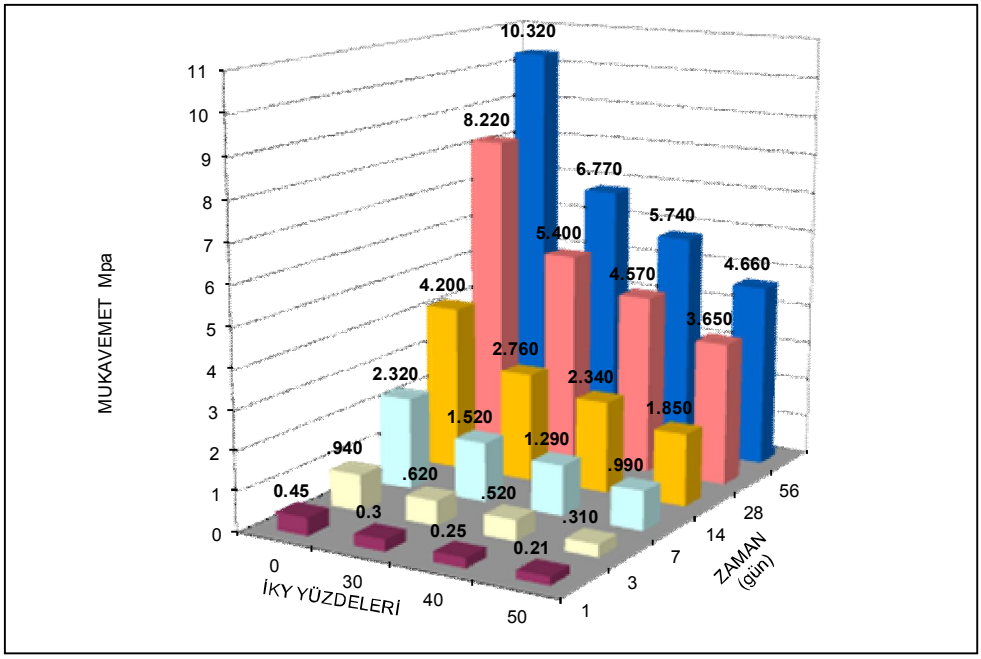



**Şekil 4.13.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

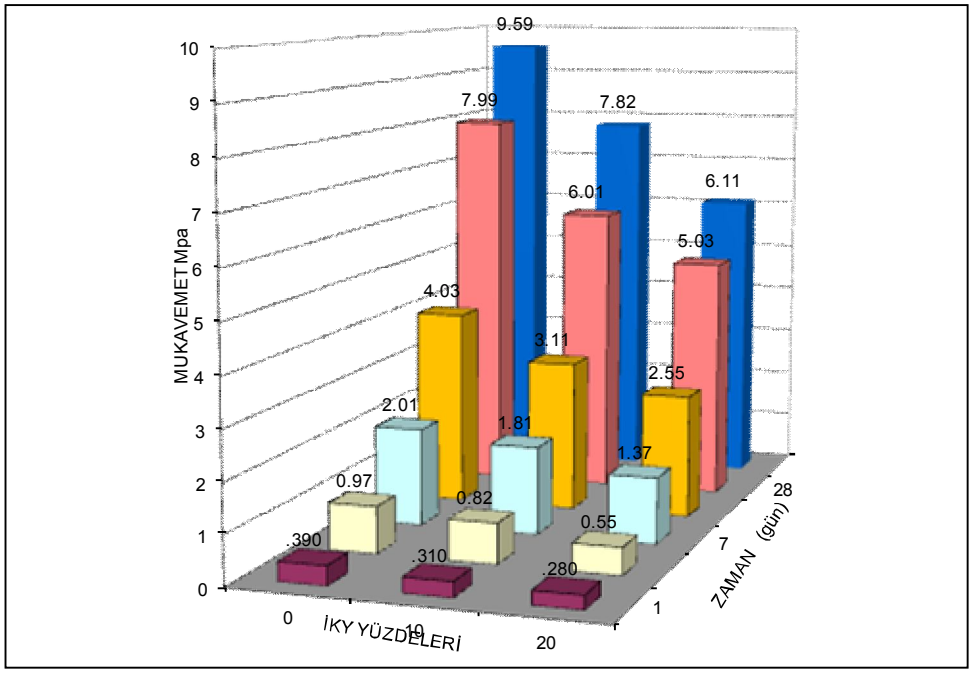
**Çizelge 4.11.** Silis dumanı katkılı farklı rölatif sıkılıkta ve değişik gradasyondaki numunelerin basınç mukavemeti değerleri.

| 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 | 0,70 | 1,57 | 3,93 | 8,28 | 15,05 | 17,35 |
| 2 | 30 | 70 | 0,66 | 1,45 | 3,81 | 7,79 | 13,97 | 16,03 |
| 3 | 35 | 65 | 0,64 | 1,33 | 3,72 | 7,61 | 13,00 | 15,17 |
| 4 | 40 | 60 | 0,63 | 1,02 | 3,33 | 7,13 | 12,01 | 14,13 |
| 5 | 45 | 55 | 0,61 | 0,97 | 3,01 | 6,96 | 11,31 | 13,03 |
| 6 | 50 | 50 | 0,59 | 0,90 | 2,88 | 6,63 | 10,07 | 12,14 |
| 7 | 55 | 45 | 0,54 | 0,85 | 2,80 | 6,03 | 9,03 | 11,05 |
| 8 | 60 | 40 | 0,50 | 0,80 | 2,47 | 5,77 | 8,01 | 10,37 |
| 9 | 70 | 30 | 0,43 | 0,72 | 2,01 | 5,03 | 7,50 | 8,99 |
| Dr = %50 | | | | | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | İnce | Orta | 1.gün | 3.gün | 7. gün | 14.gün | 28.gün | 56.gün |
| 1 | 0 | 100 | 0,45 | 0,94 | 2,32 | 4,20 | 8,22 | 10,32 |
| 2 | 30 | 70 | 0,30 | 0,62 | 1,52 | 2,76 | 5,40 | 6,77 |
| 3 | 40 | 60 | 0,25 | 0,52 | 1,29 | 2,34 | 4,57 | 5,74 |
| 4 | 50 | 50 | 0,21 | 0,31 | 0,99 | 1,85 | 3,65 | 4,66 |
| Dr = %70 | | | | | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Basınç Mukavemeti | | | | | |
| | İnce | Orta | 1.gün | 3.gün | 7. gün | 14.gün | 28.gün | 56.gün |
| 1 | 0 | 100 | 0,39 | 0,97 | 2,01 | 4,03 | 7,99 | 9,59 |
| 2 | 10 | 90 | 0,31 | 0,82 | 1,81 | 3,11 | 6,01 | 7,82 |
| 3 | 20 | 80 | 0,28 | 0,55 | 1,37 | 2,55 | 5,03 | 6,11 |

Şekil 4.13–4.14–4.15'de görüldüğü gibi kür süresi arttıkça mukavemet değerlerinde artış oluşmaktadır. Numuneler 28. güne kadar dayanımlarının %90'ını kazanmaktadırlar. İKY'deki ve rölatif sıkılıklardaki artış dayanım değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.




**Şekil 4.14.** %50 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.



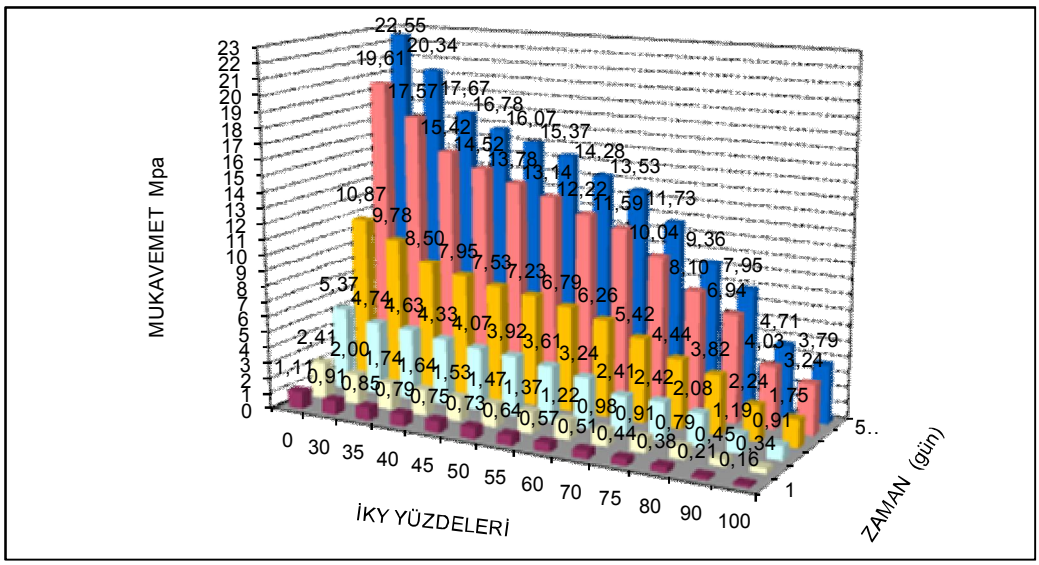

**Şekil 4.15.** %70 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

Çizelge 4.11 incelendiğinde silika dumanı katkısının mukavemet değerlerini oldukça iyileştirdiğini göstermektedir. %30 rölatif sıkılıkta İKY 0'da katkısız numunelerin dayanımları 11.80 MPa (56 günlük basınç dayanımı) iken, addiment katkılı numunelerin basınç dayanımları 12.53 (56 günlük basınç dayanımı), silika

dumanı katkılı numunelerin basınç dayanımları ise 17.35 MPa (56 günlük basınç dayanımı)'dır. Diğer rölatif sıkılık ve İKY'lerde de silika dumanı katkılı karışımların mukavemet değerleri katkısız ve addiment katkılı karışımlara oranla yüksektir. Silika dumanı katkısının mukavemet değerlerine olumlu etkisi olmuştur.

### 4.3.4. Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 numunelerin sabit S/Ç oranı ve değişken rölatif sıkılıktaki mukavemet değerleri

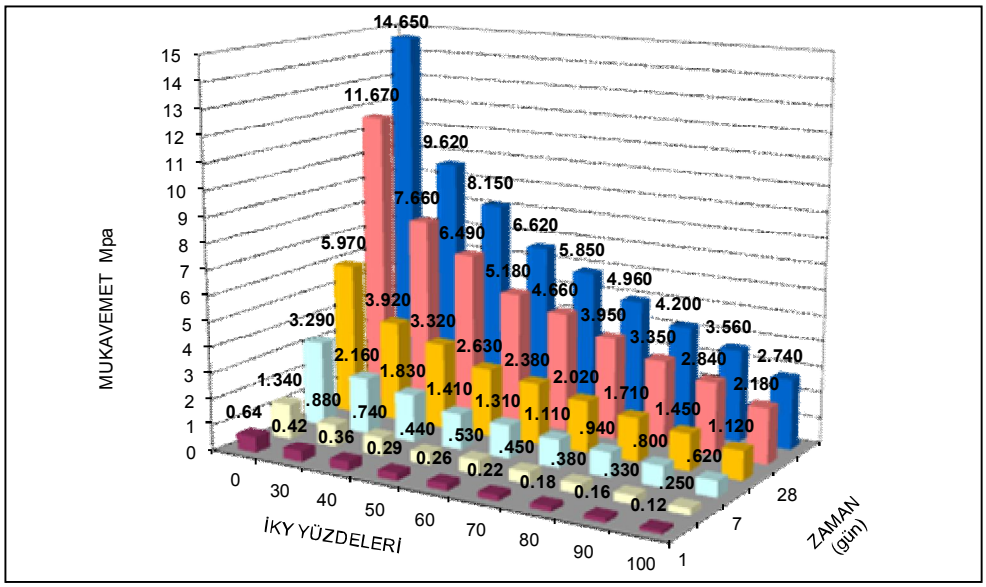
Enjeksiyonda başarılı olan numunelere mukavemet değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bu aşamada, silis dumanı ve addiment katkılı S/Ç oranı 1.0 olan süspansiyonlar ile rölatif sıkılık değerleri %30–50–70 olan değişik gradasyondaki kum numunelere enjeksiyon yapılarak mukavemet deneyleri yürütülmüştür. Çizelge 4.12'de numunelerin 1, 3, 7, 14, 28 ve 56. günlerdeki basınç dayanımları gösterilmiştir. Çizelge 4.12 incelendiğinde %30 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin İKY 0'da (22.55 MPa, 56 günlük basınç dayanımı), en düşük basınç değerinin (3.79 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY 100'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. %30 rölatif sıkılıkta İKY 0'da mukavemet değeri 3.79 MPa (56 günlük basınç dayanımı) iken, %50 rölatif sıkılıkta 2.74 MPa (56 günlük basınç dayanımı), %70 rölatif sıkılıkta 2.18 MPa (56 günlük basınç dayanımı) dır. Rölatif sıkılığın artmasıyla taneler arasındaki boşluklar azalmasından dolayı enjekte edilebilirlik azalmış ve mukavemet değerleri düşmüştür.



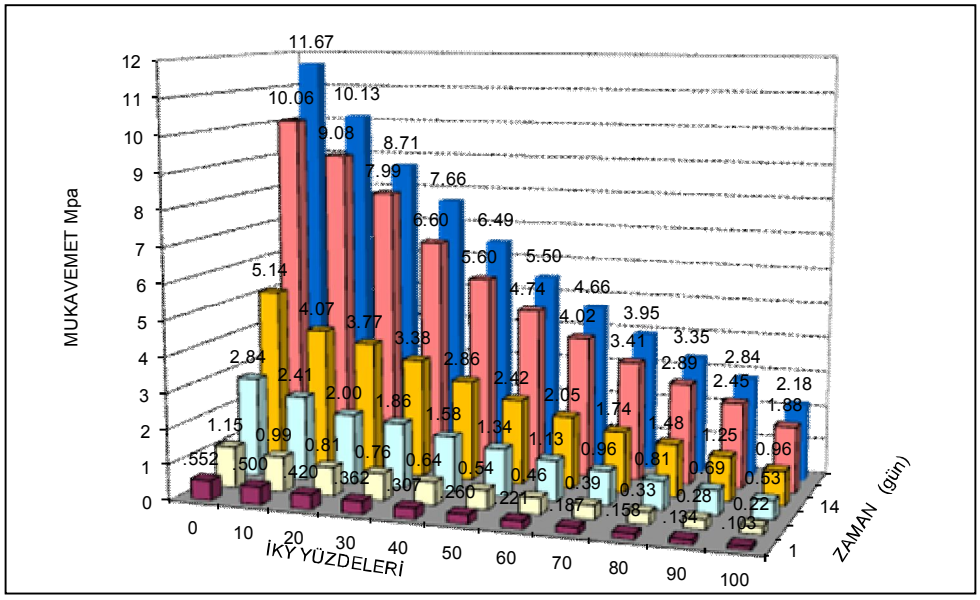

**Şekil 4.16.** %30 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

**Çizelge 4.12.** Silis dumanı + Addiment katkılı farklı rölatif sıkılıkta ve değişik gradasyondaki 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 | 1,11 | 2,41 | 5,37 | 10,87 | 19,61 | 22,55 |
| 2 | 30 | 70 | 0,91 | 2,00 | 4,74 | 9,78 | 17,57 | 20,34 |
| 3 | 35 | 65 | 0,85 | 1,74 | 4,63 | 8,50 | 15,42 | 17,67 |
| 4 | 40 | 60 | 0,79 | 1,64 | 4,33 | 7,95 | 14,52 | 16,78 |
| 5 | 45 | 55 | 0,75 | 1,53 | 4,07 | 7,53 | 13,78 | 16,07 |
| 6 | 50 | 50 | 0,73 | 1,47 | 3,92 | 7,23 | 13,14 | 15,37 |
| 7 | 55 | 45 | 0,64 | 1,37 | 3,61 | 6,79 | 12,22 | 14,28 |
| 8 | 60 | 40 | 0,57 | 1,22 | 3,24 | 6,26 | 11,59 | 13,53 |
| 9 | 70 | 30 | 0,51 | 0,98 | 2,41 | 5,42 | 10,04 | 11,73 |
| 10 | 75 | 25 | 0,44 | 0,91 | 2,42 | 4,44 | 8,10 | 9,36 |
| 11 | 80 | 20 | 0,38 | 0,79 | 2,08 | 3,82 | 6,94 | 7,95 |
| 12 | 90 | 10 | 0,21 | 0,45 | 1,19 | 2,24 | 4,03 | 4,71 |
| 13 | 100 | 0 | 0,16 | 0,34 | 0,91 | 1,75 | 3,24 | 3,79 |
| Dr = %50 | | | | | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | İnce | Orta | 1.gün | 3.gün | 7. gün | 14.gün | 28.gün | 56.gün |
| 1 | 0 | 100 | 0,64 | 1,34 | 3,29 | 5,97 | 11,67 | 14,65 |
| 2 | 30 | 70 | 0,42 | 0,88 | 2,16 | 3,92 | 7,66 | 9,62 |
| 3 | 40 | 60 | 0,36 | 0,74 | 1,83 | 3,32 | 6,49 | 8,15 |
| 4 | 50 | 50 | 0,29 | 0,44 | 1,41 | 2,63 | 5,18 | 6,62 |
| 5 | 60 | 40 | 0,26 | 0,53 | 1,31 | 2,38 | 4,66 | 5,85 |
| 6 | 70 | 30 | 0,22 | 0,45 | 1,11 | 2,02 | 3,95 | 4,96 |
| 7 | 80 | 20 | 0,18 | 0,38 | 0,94 | 1,71 | 3,35 | 4,20 |
| 8 | 90 | 10 | 0,16 | 0,33 | 0,80 | 1,45 | 2,84 | 3,56 |
| 9 | 100 | 0 | 0,12 | 0,25 | 0,62 | 1,12 | 2,18 | 2,74 |
| Dr = %70 | | | | | | | | |
| Numune No | Kum Oranı % | | Basınç Mukavemeti | | | | | |
| | İnce | Orta | 1.gün | 3.gün | 7. gün | 14.gün | 28.gün | 56.gün |
| 1 | 0 | 100 | 0,55 | 1,15 | 2,84 | 5,14 | 10,06 | 11,67 |
| 2 | 10 | 90 | 0,50 | 0,99 | 2,41 | 4,07 | 9,08 | 10,13 |
| 3 | 20 | 80 | 0,42 | 0,81 | 2,00 | 3,77 | 7,99 | 8,71 |
| 4 | 30 | 70 | 0,36 | 0,76 | 1,86 | 3,38 | 6,60 | 7,66 |
| 5 | 40 | 60 | 0,31 | 0,64 | 1,58 | 2,86 | 5,60 | 6,49 |
| 6 | 50 | 50 | 0,26 | 0,54 | 1,34 | 2,42 | 4,74 | 5,50 |
| 7 | 60 | 40 | 0,22 | 0,46 | 1,13 | 2,05 | 4,02 | 4,66 |
| 8 | 70 | 30 | 0,19 | 0,39 | 0,96 | 1,74 | 3,41 | 3,95 |
| 9 | 80 | 20 | 0,16 | 0,33 | 0,81 | 1,48 | 2,89 | 3,35 |
| 10 | 90 | 10 | 0,13 | 0,28 | 0,69 | 1,25 | 2,45 | 2,84 |
| 11 | 100 | 0 | 0,10 | 0,22 | 0,53 | 0,96 | 1,88 | 2,18 |




**Şekil 4.17.** %50 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.




**Şekil 4.18.** %70 rölatif sıkılıkta, S/Ç oranı 1.0 olan numunelerin basınç mukavemeti-zaman ilişkisi.

Şekil 4.16- 4.17- 4.18' de görüldüğü gibi kür süresi arttıkça mukavemet değerlerinde artış oluşmaktadır. Numuneler 28. güne kadar dayanımlarının %90' nını kazanmaktadırlar. İKY' deki ve rölatif sıkılıklardaki artış dayanım değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.

**Çizelge 4.13.** Katkısız Ultrafin 12, Ultrafin 12 + Addiment, Ultrafin 12 + Silis Dumanı, Ultrafin 12 + Addiment+ süspansiyonlarına ait toplu mukavemet deney sonuçları.

| S/Ç =1 - Dr= %30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ULTRAFİN 12 | | | | | | | | ULTRAFİN 12 + ADDİMENT | | | | | | | ULTRAFİN 12 + SİLİS DUMANI | | | | | | | ULTRAFİN 12+SİLİS DUMANI+ADDİMENT | | | | | | |
| Numune No | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 |
| 1 | 0 | 0,58 | 1,16 | 2,90 | 5,08 | 10,26 | 11,80 | 0 | 0,62 | 1,32 | 2,99 | 6,04 | 10,89 | 12,53 | 0 | 0,70 | 1,57 | 3,93 | 8,28 | 15,05 | 17,35 | 0 | 1,11 | 2,41 | 5,37 | 10,87 | 19,61 | 22,55 |
| 2 | 30 | 0,52 | 1,12 | 2,79 | 4,98 | 10,02 | 11,60 | 30 | 0,54 | 1,15 | 2,79 | 5,75 | 10,33 | 11,96 | 30 | 0,66 | 1,45 | 3,81 | 7,79 | 13,97 | 16,03 | 30 | 0,91 | 2,00 | 4,74 | 9,78 | 17,57 | 20,34 |
| 3 | 35 | 0,49 | 1,00 | 2,51 | 4,29 | 8,72 | 10,20 | 35 | 0,50 | 1,02 | 2,76 | 5,06 | 9,18 | 10,52 | 35 | 0,64 | 1,33 | 3,72 | 7,61 | 13,00 | 15,17 | 35 | 0,85 | 1,74 | 4,63 | 8,50 | 15,42 | 17,67 |
| 4 | 40 | 0,47 | 0,95 | 2,38 | 4,21 | 8,55 | 9,80 | 40 | 0,48 | 0,97 | 2,61 | 4,79 | 8,74 | 10,11 | 40 | 0,63 | 1,02 | 3,33 | 7,13 | 12,01 | 14,13 | 40 | 0,79 | 1,64 | 4,33 | 7,95 | 14,52 | 16,78 |
| 5 | 45 | 0,45 | 0,91 | 2,27 | 4,02 | 8,22 | 9,50 | 45 | 0,46 | 0,92 | 2,48 | 4,59 | 8,40 | 9,80 | 45 | 0,61 | 0,97 | 3,01 | 6,96 | 11,31 | 13,03 | 45 | 0,75 | 1,53 | 4,07 | 7,53 | 13,78 | 16,07 |
| 6 | 50 | 0,43 | 0,86 | 2,16 | 3,85 | 7,89 | 9,20 | 50 | 0,45 | 0,89 | 2,42 | 4,46 | 8,11 | 9,49 | 50 | 0,59 | 0,90 | 2,88 | 6,63 | 10,07 | 12,14 | 50 | 0,73 | 1,47 | 3,92 | 7,23 | 13,14 | 15,37 |
| 7 | 55 | 0,41 | 0,81 | 2,03 | 3,61 | 7,35 | 8,60 | 55 | 0,40 | 0,83 | 2,24 | 4,22 | 7,59 | 8,87 | 55 | 0,54 | 0,85 | 2,80 | 6,03 | 9,03 | 11,05 | 55 | 0,64 | 1,37 | 3,61 | 6,79 | 12,22 | 14,28 |
| 8 | 60 | 0,37 | 0,77 | 1,92 | 3,48 | 7,02 | 8,20 | 60 | 0,36 | 0,75 | 2,03 | 3,91 | 7,24 | 8,46 | 60 | 0,50 | 0,80 | 2,47 | 5,77 | 8,01 | 10,37 | 60 | 0,57 | 1,22 | 3,24 | 6,26 | 11,59 | 13,53 |
| 9 | 70 | 0,33 | 0,69 | 1,73 | 3,22 | 6,08 | 7,20 | 70 | 0,32 | 0,61 | 1,51 | 3,41 | 6,32 | 7,37 | 70 | 0,43 | 0,72 | 2,01 | 5,03 | 7,50 | 8,99 | 70 | 0,51 | 0,98 | 2,41 | 5,42 | 10,04 | 11,73 |
| 10 | 75 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 75 | 0,28 | 0,57 | 1,53 | 2,81 | 5,13 | 5,93 | 75 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 75 | 0,44 | 0,91 | 2,42 | 4,44 | 8,10 | 9,36 |
| 11 | 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 80 | 0,24 | 0,49 | 1,33 | 2,44 | 4,42 | 5,06 | 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 80 | 0,38 | 0,79 | 2,08 | 3,82 | 6,94 | 7,95 |
| 12 | 90 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 90 | 0,14 | 0,28 | 0,76 | 1,43 | 2,58 | 3,02 | 90 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 90 | 0,21 | 0,45 | 1,19 | 2,24 | 4,03 | 4,71 |
| 13 | 100 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 100 | 0,10 | 0,22 | 0,59 | 1,13 | 2,09 | 2,44 | 100 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 100 | 0,16 | 0,34 | 0,91 | 1,75 | 3,24 | 3,79 |
| S/Ç =1 - Dr= %50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Numune No | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 |
| 1 | 0 | 0,40 | 0,52 | 1,17 | 1,83 | 4,01 | 4,66 | 0 | 0,48 | 0,77 | 1,53 | 3,19 | 6,11 | 7,21 | 0 | 0,45 | 0,94 | 2,32 | 4,20 | 8,22 | 10,32 | 0 | 0,64 | 1,34 | 3,29 | 5,97 | 11,67 | 14,65 |
| 2 | 30 | 0,25 | 0,49 | 0,93 | 1,66 | 3,32 | 3,86 | 30 | 0,37 | 0,61 | 1,21 | 2,67 | 5,03 | 6,14 | 30 | 0,30 | 0,62 | 1,52 | 2,76 | 5,40 | 6,77 | 30 | 0,42 | 0,88 | 2,16 | 3,92 | 7,66 | 9,62 |
| 3 | 40 | 0,19 | 0,45 | 0,87 | 1,56 | 3,18 | 3,68 | 40 | 0,26 | 0,52 | 1,07 | 2,01 | 4,33 | 5,55 | 40 | 0,25 | 0,52 | 1,29 | 2,34 | 4,57 | 5,74 | 40 | 0,36 | 0,74 | 1,83 | 3,32 | 6,49 | 8,15 |
| 4 | 50 | 0,16 | 0,33 | 0,81 | 1,51 | 2,99 | 3,50 | 50 | 0,21 | 0,37 | 0,93 | 1,79 | 3,60 | 4,45 | 50 | 0,21 | 0,31 | 0,99 | 1,85 | 3,65 | 4,66 | 50 | 0,29 | 0,44 | 1,41 | 2,63 | 5,18 | 6,62 |
| 5 | 60 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 60 | 0,18 | 0,38 | 0,93 | 1,68 | 3,28 | 4,12 | 60 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 60 | 0,26 | 0,53 | 1,31 | 2,38 | 4,66 | 5,85 |
| 6 | 70 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 70 | 0,15 | 0,32 | 0,78 | 1,42 | 2,78 | 3,49 | 70 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 70 | 0,22 | 0,45 | 1,11 | 2,02 | 3,95 | 4,96 |
| 7 | 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 80 | 0,13 | 0,27 | 0,66 | 1,21 | 2,36 | 2,96 | 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 80 | 0,18 | 0,38 | 0,94 | 1,71 | 3,35 | 4,20 |
| 8 | 90 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 90 | 0,11 | 0,23 | 0,56 | 1,02 | 2,00 | 2,51 | 90 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 90 | 0,16 | 0,33 | 0,80 | 1,45 | 2,84 | 3,56 |
| 9 | 100 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 100 | 0,08 | 0,18 | 0,43 | 0,79 | 1,54 | 1,93 | 100 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 100 | 0,12 | 0,25 | 0,62 | 1,12 | 2,18 | 2,74 |
| S/Ç =1 - Dr= %70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Numune No | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | | İKY | Basınç Mukavemeti (MPa) | | | | | |
| | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | % | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 |
| 1 | 0 | 0,28 | 0,54 | 1,32 | 2,67 | 5,63 | 6,61 | 0 | 0,41 | 0,85 | 2,10 | 3,81 | 7,45 | 8,64 | 0 | 0,39 | 0,97 | 2,01 | 4,03 | 7,99 | 9,59 | 0 | 0,55 | 1,15 | 2,84 | 5,14 | 10,06 | 11,67 |
| 2 | 10 | 0,25 | 0,51 | 1,28 | 2,24 | 4,49 | 5,21 | 10 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 10 | 0,31 | 0,82 | 1,81 | 3,11 | 6,01 | 7,82 | 10 | 0,50 | 0,99 | 2,41 | 4,07 | 9,08 | 10,13 |
| 3 | 20 | 0,22 | 0,46 | 1,13 | 2,05 | 4,01 | 4,65 | 20 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 20 | 0,28 | 0,55 | 1,37 | 2,55 | 5,03 | 6,11 | 20 | 0,42 | 0,81 | 2,00 | 3,77 | 7,99 | 8,71 |
| 4 | 30 | 0,21 | 0,41 | 1,02 | 1,76 | 3,63 | 4,21 | 30 | 0,27 | 0,56 | 1,38 | 2,50 | 4,89 | 5,67 | 30 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 30 | 0,36 | 0,76 | 1,86 | 3,38 | 6,60 | 7,66 |
| 5 | 40 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 40 | 0,23 | 0,48 | 1,17 | 2,12 | 4,15 | 4,81 | 40 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 40 | 0,31 | 0,64 | 1,58 | 2,86 | 5,60 | 6,49 |
| 6 | 50 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 50 | 0,19 | 0,40 | 0,99 | 1,80 | 3,51 | 4,07 | 50 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 50 | 0,26 | 0,54 | 1,34 | 2,42 | 4,74 | 5,50 |
| 7 | 60 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 60 | 0,16 | 0,34 | 0,84 | 1,52 | 2,98 | 3,45 | 60 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 60 | 0,22 | 0,46 | 1,13 | 2,05 | 4,02 | 4,66 |
| 8 | 70 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 70 | 0,14 | 0,29 | 0,71 | 1,29 | 2,52 | 2,93 | 70 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 70 | 0,19 | 0,39 | 0,96 | 1,74 | 3,41 | 3,95 |
| 9 | 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 80 | 0,12 | 0,25 | 0,60 | 1,09 | 2,14 | 2,48 | 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 80 | 0,16 | 0,33 | 0,81 | 1,48 | 2,89 | 3,35 |
| 10 | 90 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 90 | 0,10 | 0,21 | 0,51 | 0,93 | 1,81 | 2,10 | 90 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 90 | 0,13 | 0,28 | 0,69 | 1,25 | 2,45 | 2,84 |
| 11 | 100 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 100 | 0,08 | 0,16 | 0,39 | 0,71 | 1,39 | 1,62 | 100 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 100 | 0,10 | 0,22 | 0,53 | 0,96 | 1,88 | 2,18 |

Çizelge 4.13 incelendiğinde Ultrafin 12 süspansiyonlarına addiment+silis dumanı katkısı hem enjekte edilebilirliği hem de mukavemet değerlerini arttırmıştır. %30 rölatif sıkılıkta İKY 0 da katkısız Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 11,80 MPa (56 günlük basınç dayanımı) iken, addiment katkılı Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 12,53 MPa (56 günlük basınç dayanımı), silis dumanı katkılı numunelerin basınç dayanımı 17,35 MPa (56 günlük basınç dayanımı), Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 22.55 MPa (56 günlük basınç dayanımı)'dır. Addiment+silis sumanı katkılı karışımların mukavemet değerleri diğer karışımlardan yüksek çıkmıştır.

### 4.4. Enjeksiyonda başarılı olan numunelerin permeabilite deneyleri

Enjeksiyonda başarılı olmuş katkısız, addiment katkılı, silis dumanı katkılı, addiment+silis dumanı katkılı permeabilite numuneleri bir gün enjeksiyon düzeneğinde bekletildikten sonra kalıp başlıkları sökülerek numuneler kalıplardan 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 kalıp başlıkları tekrar takılıp düşen seviyeli permeabilite düzeneğine yerleştirilmiştir (Resim 4.8).



**Resim 4.8.** Düşen seviyeli permeabilite deneyinin yapılması.

Deney düzeneğine bağlı numunelerden bir aylık süre zarfında herhangi bir su çıkışı gözlenmemiş ve düzenekteki su seviyesinde herhangi bir düşüş olmamıştır. Permeabilite deney sonuçlarına göre tüm numuneler geçirimsizdir.

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, öncelikle sabit Su/Çimento oranına sahip katkısız ve addiment, silis dumanı, sodyum bentonit, addiment+silis dumanı katkılı ince taneli çimento (Ultrafin 12) süspansiyonlarının farklı rölatif sıkılıklarda ve gradasyonlardaki kum numunelere enjekte edilebilirlikleri ve enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numunelerin mukavemet değerlerinin belirlenmesi ile farklı Su/Çimento oranına sahip katkısız ince taneli çimento (Ultrafin 12) süspansiyonlarının, sabit rölatif sıkılıkta ve farklı gradasyondaki kum numunelere enjekte edilebilirlikleri ve enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numunelerin mukavemet değerleri araştırılmıştır.

***Katkısız Ultrafin 12***'li karışımlarda sedimantasyon deneyinde S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların sedimantasyon sonuçları % 0; 0; 0; 1.33; 2.67; 8.15; 23.81; 29.17; 35.44; 40.00'dır. Sonuçlara göre sedimantasyon yüzdesi %5'in altında olan S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan katkısız karışımlar stabil iken, sedimantasyon yüzdesi %5'in üstünde olan S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan katkısız karışımlar stabil değildir.

***Addiment*** katkısı kullanılması sedimantasyonu katkısız karışımlara oranla etkilememiştir. Katkısız karışımlarda olduğu gibi addiment katkılı karışımlarda da S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan süspansiyonların sedimantasyon yüzdeleri %5'in altında, S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 olan karışımların ise sedimantasyon yüzdeleri %5'in üzerinde çıkmıştır. S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 olan addiment katkılı karışımlar stabil iken, S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan karışımlar stabil değildir.

***Ultrafin 12 süspansiyonlarına silis dumanı katkısı*** kullanılması sedimantasyonu iyileştirmiştir. Katkısız ve addiment katkılı Ultrafin 12'li karışımlarda stabilite sağlanamayan S/Ç oranlarında (S/Ç oranı 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0), silis dumanı katkılısıyla stabilite sağlanmış ve sedimantasyon yüzdeleri %5'in altında çıkmıştır. Silis dumanı katkılı tüm karışımlar (S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0) stabildir.

***İnce taneli (Ultrafin 12) süspansiyonlara, sodyum bentonit*** katılmasıyla, silis dumanı katkılı karışımlarda olduğu gibi, tüm sedimantasyon değerleri % 5'in altında çıkmış ve bu nedenle tüm karışımlar (S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5,

4.0) stabil olarak kabul edilmiştir. Sodyum bentonit katkısı da silis dumanı katkısında olduğu gibi sedimantasyonu olumlu etkilemiştir.

***İnce taneli çimento (Ultrafin 12) süspansiyonuna addiment + silis dumanı*** katılmasıyla S/Ç oranı 0.6'da dahil olmak üzere Su/Çimento oranı 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan tüm karışımların sedimantasyonu %5'in altında çıkmış ve stabil olarak kabul edilmiştir. Addiment+silis dumanı katkısı da sedimantasyonu olumlu etkilemiştir.

Vicat deneyinde katkısız Ultrafin 12 süspansiyonlarının S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5 de priz başlangıç süreleri 385, 360, 370, 433, 455, 680, 1625 dakika, priz bitiş süreleri 480, 440, 467, 693, 930, 4058, 16050 dakikadır. S/Ç oranı 3.0, 3.5 ve 4.0 olan karışımlarda kofluk oluşmuş, deney süresi 1 ayı geçtiği için deneylere son verilmiştir. S/Ç oranı 1.0'a kadar priz başlangıç ve bitiş süreleri birbirine yakın iken, S/Ç oranı 1.0'dan sonra S/Ç oranının artmasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri artmıştır.

Ultrafin 12 süspansiyonlarına addiment katkısı S/Ç oranı 0.6 hariç diğer tüm S/Ç oranlarında ilk ve son prizlenme sürelerini önemli miktarda artırmaktadır. Örneğin katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'de ilk prizlenme süresi 370 dk. iken addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'deki ilk prizlenme süresi 420 dk.'dır. Aynı şekilde katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'de priz bitiş süresi 467 dk. iken addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'deki priz bitiş süresi 880 dk. olarak tespit edilmiştir. Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonların 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 S/Ç oranlarında priz başlangıç süreleri 380; 410; 420; 480; 480 dakika, priz bitiş süreleri 490, 790, 880, 1320, 2680 dakikadır.

Ultrafin 12 süspansiyonuna silika dumanı katılması, addiment katkısında olduğu gibi S/Ç oranı 0.6'dan sonraki S/Ç oranlarında ilk ve son prizlenme sürelerini arttırmıştır. Örneğin katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.5'deki ilk priz süresi 455 dakika iken silis dumanı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.5'deki ilk priz süresi 605 dakikadır. Aynı şekilde katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.5'de priz bitiş süresi 930 dakika iken, silis dumanı katkılı karışımın priz bitiş süresi 1120 dakikadır. Silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonların S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5'de priz başlangıç süreleri 275; 410; 475; 475; 605 dakika, priz bitiş süreleri 405, 490, 615, 780, 1120 dakikadır.

Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 karışımları katkısız karışımlara oranla priz sürelerini kısaltmıştır. Özellikle S/Ç oranı 2.0'dan sonra priz başlangıç ve bitiş sürelerinde önemli azalmalar olmuştur. Örneğin S/Ç oranı 3.0 olan katkısız Ultrafin 12

süspansiyonların priz başlangıç ve bitiş süreleri 2460 – 36025 dk. iken, sodyum bentonit katkısıyla bu süreler 840 – 8790 dk.'ya düşmüştür. Sodyum bentonit katkısı prizlenme sürelerini kısaltarak, olumlu yönde etki etmiştir. Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonların S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5'de priz başlangıç süreleri 270; 333; 370; 400; 630 dakika, priz bitiş süreleri 485, 740, 825, 1252, 2520 dakikadır.

Ultrafin 12 süspansiyonlarına silika dumanı+addiment katkısı priz başlangıç ve bitiş sürelerini artırmıştır. Yapılan katkılı ve katkısız deneyler içinde addiment+silika dumanlı karışım en yüksek priz başlangıç süresine sahiptir. Örneğin katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'de ilk prizlenme süresi 370 dk. iken addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'deki ilk prizlenme süresi 420 dk, silika dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0' deki ilk prizlenme süresi 475 dk, sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'deki ilk prizlenme süresi 370 dk, addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun S/Ç oranı 1.0'deki ilk prizlenme süresi 625 dk.'dır. Addiment + silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonların S/Ç oranları 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5' de priz başlangıç süreleri 405; 605; 625; 602; 1080 dakika, priz bitiş süreleri 485, 740, 825, 1252, 2520 dakikadır.

Viskozite deneyi sonucunda katkısız Ultrafin 12 süspansiyonların S/Ç oranı 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0'de dinamik viskozite (μ) değerleri 45.05, 24.50, 15.99, 8.33, 2.61, 2.26, 1.14, 1.08, 1.02 centipoise'dir. S/Ç oranı 0.6 da süspansiyonun yoğunluğundan dolayı Marsh hunisi ve kohezyon ölçer plaka deneyleri yapılamamıştır. S/Ç oranı 4.0'ın dinamik viskozitesi değeri (1.02 centipoise) suyunkine (20°C de 1.0020 centipoise) çok yakındır. S/Ç oranının artmasıyla dinamik viskozite değerleri (μ) azalmıştır.

Ultrafin 12 süspansiyonuna addiment katkısı akışkanlığı arttırmaktadır. Örneğin S/Ç oranı 1.0 olan katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunun dinamik viskozite (μ) değeri 24.50 cP, iken addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun dinamik viskozite (μ) değeri 23.15 cP'dir. Su/Çimento oranı 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan addiment katkılı süspansiyonların dinamik viskozite değeri (μ) değerleri 43.74, 23.15, 10.97, 3.50, 1.22, 1.20, 1.11, 1.05, 1.01 centipoise'dir. Su/Çimento oranı 0.6'da süspansiyonun yoğunluğundan dolayı Marsh hunisi ve kohezyon ölçer plaka deneyleri yapılamamıştır.

Silis dumanı katkılı süspansiyonlarda düşük S/Ç oranlarında viskozite değerleri yüksek çıkarken (S/Ç oranı 1.0, 1.2, 1.5, 2.0), S/Ç oranı 2.0'dan sonra (S/Ç oranı 2.5,

3.0, 3.5, 4.0) viskozite değerleri katkısız süspansiyon karışımları ile birbirine yakın çıkmıştır. S/Ç oranı 0.6 ve 0.8'de süspansiyonun yoğunluğundan dolayı deneyler yapılamazken, S/Ç oranı 0.8'den sonra S/Ç oranın artmasıyla dinamik viskozite (μ) değerleri düşmüştür. Su/Çimento oranı 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan silis dumanı katkılı süspansiyonların dinamik viskozite (μ) değerleri 45.21, 23.19, 12.67, 4.03, 2.40, 1.23, 1.09, 1.03 centipoise'dir.

S/Ç oranı 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 olan sodyum bentonitli karışımlarda süspansiyonun yoğunluğundan dolayı deneyler yapılamamıştır. Sodyum bentonit katkılı süspansiyonların viskozite değerleri katkısız süspansiyonlara göre oldukça yüksek çıkmıştır. Örneğin S/Ç oranı 1.5'de sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 süspansiyonunun viskozite değeri 16.41 cP çıkarken, katkısız Ultrafin 12 süspansiyonunda bu değer 8.33 cP'dir. Su/Çimento oranı 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan sodyum bentonit katkılı süspansiyonların dinamik viskozite değeri (μ) değerleri 16.41, 11.13, 7.46, 4.25, 1.78, 1.15 centipoise'dir.

Addiment+silis dumanı katkısı S/Ç oranlarının düşük olduğu süspansiyonlarda (S/Ç oranı 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5) viskoziteyi arttırdığı ancak S/Ç oranlarının artmasıyla viskozite değerlerinde katkısız karışımlara oranla bir değişme sebep olmadığı görülmektedir. Örneğin S/Ç oranı 0.8'de addiment+silis dumanı katkılı karışımın dinamik viskozite değeri 85.86 cP, katkısız karışımın viskozite değeri 45.05 cP iken S/Ç oranı 4.0'da addiment+silis dumanı katkılı karışımın dinamik viskozite değeri 1.02 cP, addiment+silis dumanı katkılı karışımın dinamik viskozite değeri 1.02 cP çıkmaktadır. Dinamik viskozitenin düşük S/Ç oranlarında yüksek çıkmasının sebebi karışımlardaki silika dumanın varlığıdır. Karışımlardaki addiment katkısı, silika dumanı+addiment katkılı karışımın viskozite değeri için etkin bir rol oynayamamıştır. Su/Çimento oranı 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 olan addiment+silis dumanı katkılı süspansiyonların dinamik viskozite değeri (μ) değerleri 85.86, 34.03, 17.81, 9.65, 5.19, 1.24, 1.19, 1.07, 1.02 centipoise'dir. Su/Çimento oranı 0.6'da süspansiyonun yoğunluğundan dolayı deneyler yapılamamıştır.

Katkısız Ultrafin 12 karışımlarının S/Ç 1.0 oranının da farklı rölatif sıkılıktaki ve gradasyondaki kumlara enjeksiyon çalışmalarında rölatif sıkılığın ve ince kum yüzdesinin artmasıyla penetre olabilirliğin düştüğü görülmüştür; % 30 rölatif sıkılıkta İKY 0, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 ve 70'de başarı sağlanırken, İKY 75,80 ve 100'de başarısız olunmuştur. % 40 rölatif sıkılıkta İKY 30, 40, 50, 60'da başarı sağlanırken, İKY 70'de başarısız olunmuştur. %50 rölatif sıkılıkta İKY 30, 40 ve 50'de başarı

sağlanırken, İKY 60'da başarısız olunmuştur. %60 rölatif sıkılıkta İKY 20, 30, ve 40'da başarı sağlanırken İKY 50'de başarısız olunmuştur. %70 rölatif sıkılıkta İKY 10, 20, ve 30'da başarı sağlanırken, İKY 40 ve 50'de başarısız olunmuştur. Başarı sağlanan numunelerde tam penetrasyon görülürken, başarısız olan numunelerde 2/3 oranında penetrasyon sağlanmıştır.

Katkısız Ultrafin 12 karışımlarının farklı S/Ç oranıyla farklı gradasyonda ve % 30 rölatif sıkılıktaki kumlara enjeksiyon çalışmalarında S/Ç oranının artmasıyla penetre olabilirliğin arttığı görülmüştür; 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'da 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 dâhil olmak üzere tüm enjeksiyonlarda başarı sağlanmıştır.

Addiment katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarına Su/Çimento oranı 1'de farklı rölatif sıkılıkta ve gradasyondaki kum numunelere yapılan deney çalışmalarında daha önce katkısız Ultrafin karışımlarında başarı sağlanamayan İKY' lerinde başarı sağlanmıştır. Addiment katkısı S/Ç oranı 1.0 için enjekte edilebilirliği olumlu etkilemiştir. Yapılan enjeksiyon çalışmalarında tüm rölatif sıkılıklarda (rölatif sıkılık %30; %50; %70) İKY %100'de dahil olmak üzere tüm İKY' lerde başarı sağlanmıştır.

Ultrafin 12 süspansiyonlara silis dumanı katılması yapılan S/Ç 1.0 oranlı enjeksiyon çalışmalarında rölatif sıkılık % 30 ve % 50'de enjeksiyon başarı sınır değerleri (rölatif sıkılık % 30 için İKY %70, rölatif sıkılık %50 için İKY %50) katkısız karışım enjeksiyon başarı sınır değerleri ile aynı çıkarken, rölatif sıkılık %70'de silis dumanı katkılı karışım için başarı sınır değeri İKY % 20, katkısız Ultrafin 12 için başarı sınır değeri İKY %30 çıkmıştır. Silis dumanı katkılı karışımlarda %30 rölatif sıkılıkta İKY %0, %30, %35, %40, %45 %50, %55, %60 ve %70'de başarı sağlanırken, İKY %75, %80 ve %100'de başarısız olunmuştur. %50 rölatif sıkılıkta İKY %0, %30, %40, %50'de başarı sağlanırken. İKY %60'da başarısız olunmuştur. %70 rölatif sıkılıkta İKY %0, %10, %20'de başarı sağlanırken. İKY %30'da başarısız olunmuştur.

Sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 karışımlarda S/Ç oranı 1.0 ile yapılan enjeksiyon denemelerinde sodyum bentonitin yüksek viskozite değerinden dolayı numunelere enjeksiyon yapılamamıştır.

Addiment+silis dumanı katkısı ile yapılan enjeksiyon çalışmaları ile sadece addiment katkılı karışımların verdiği sonuçlar enjekte edilebilirlik sonuçları benzerlik

arz etmiştir. Bu da, addiment+silis dumanı katkılı, İnce taneli çimento (Ultrafin 12) süspansiyonu enjekte edilebilirlikte, addimentin baskın rol oynadığını göstermektedir. Addiment+silika dumanı katkılı karışımlarla yapılan enjeksiyon çalışmalarında; rölatif sıkılık % 30, %50, %70'de İKY %100'de dahil olmak üzere tüm yüzdelerde başarı sağlanmıştır.

Katkısız Ultrafin 12 süpansiyonları ile S/Ç oranı 1.0 de yapılan enjeksiyon çalışmalarında başarılı olan numunelere yapılan mukavemet deney sonuçlarına göre: %30 rölatif sıkılıkta, 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 sıkılık değerlerinde de ince kum yüzdesinin artması basınç dayanımlarını düşürmüştür. İnce kum yüzdesinin artmasıyla taneler arasındaki boşluklar azalmış ve süspansiyon numunelere daha az penetre olmuştur. Rölatif sıklık değerlerinin artmasıyla basınç dayanımı değerlerini düşmüştür.

Örneğin İKY 30 numunesi, %30 rölatif sıkılıkta 56. günde 11.60 MPa basınç dayanımına sahipken, rölatif sıkılık %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 sıkılıkta 56. günde 9.80 MPa basınç dayanımına sahipken, rölatif sıkılık %40, 50, 60 değerlerinde 56. günde 6.10, 4.30, 3.10 MPa basınç dayanımına sahiptir.

Katkısız Ultrafin 12 süspansiyonu ile farklı S/Ç oranıyla, % 30 rölatif sıkılıkta yapılan enjeksiyon denemelerinde başarılı olan numunelerin mukavemet deney sonuçları S/Ç oranının artmasıyla basınç dayanımının düştüğünü göstermiştir. Örneğin 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 sahiptir. 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, 2.98 MPa basınç dayanımına sahiptir. 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.

Ultrafin 12 süspansiyonuna addiment katkısı mukavemet değerlerini arttırmıştır. Örneğin %30 rölatif sıkılıkta İKY 0'da katkısız Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 11.80 MPa (56 günlük basınç dayanımı) iken, addiment katkılı Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 12.53 MPa (56 günlük basınç dayanımı)'dır. Aynı şekilde addiment katkılı diğer numunelerde katkısız numunelere oranla mukavemet

değerlerinde artış gözlenmiştir. Addiment katkılı ince taneli çimento süspansiyonunda %30 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (12.50 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (2.40 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %100'de olduğu tespit edilmiştir. %50 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (7.21 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (1.90 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %100'de olduğu görülmüştür. %70 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (8.60 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (1.60 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %100'de olduğu görülmüştür.

Ultrafin 12 süspansiyonuna silika dumanı katkısı mukavemet değerlerini oldukça iyileştirmiştir. %30 rölatif sıkılıkta İKY 0 da katkısız numunelerin basınç dayanımları 11.80 MPa (56 günlük basınç dayanımı) iken, addiment katkılı numunelerin basınç dayanımları 12.53 M.Pa (56 günlük basınç dayanımı), silika dumanı katkılı numunelerin basınç dayanımları ise 17.35 MPa (56 günlük basınç dayanımı) 'dır. Diğer rölatif sıkılık ve İKY'lerde de silika dumanı katkılı karışımların mukavemet değerleri katkısız ve addiment katkılı karışımlara oranla yüksektir. Silika dumanı katkısının mukavemet değerlerine olumlu etkisi olmuştur. Silis dumanı katkılı ince taneli çimento süspansiyonunda, %30 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (17.35 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (8.99 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %70'de olduğu görülmüştür. %50 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (10.32 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0 da, en düşük basınç değerinin (4.66 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %50'de olduğu görülmüştür. %70 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (9.59 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (6.11 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %20'de olduğu görülmüştür.

Ultrafin 12 süspansiyonlarına addiment+Silis dumanı katkısı mukavemet değerlerini arttırmıştır. Addiment+silis dumanı katkılı karışımların mukavemet değerleri diğer katkısız ve katkılı karışımlardan yüksek çıkmıştır. %30 rölatif sıkılıkta İKY 0'da katkısız Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 11.80 MPa (56 günlük basınç dayanımı) iken, addiment katkılı Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 12.53 MPa (56 günlük basınç dayanımı), Silis Dumanı katkılı numunelerin basınç dayanımı 17.35 MPa (56 günlük basınç dayanımı), addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12'li numunelerin basınç dayanımı 22.55 MPa (56 günlük basınç dayanımı)'dır. Addiment+silika dumanı katkılı ince taneli çimento süspansiyonu ile yapılan

deneylerde, %30 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (22.50 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (3.79 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %100'de olduğu görülmüştür. %50 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (14.65 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (2.74 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %100'de olduğu görülmüştür. %70 rölatif sıkılıkta, en yüksek basınç değerinin (11.67 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) İKY %0'da, en düşük basınç değerinin (2.18 MPa, 56 günlük basınç dayanımı) ise İKY %100'de olduğu görülmüştür.

Enjeksiyonda başarılı olmuş numunelerde geçirimlilik kontrolü için yapılan düşen seviyeli permeabilite deneylerinde, numuneler bir ay boyunca permeabilite düzeneğinde bekletilmiş ve bu süre boyunca numunelerden herhangi bir biçimde su çıkışı gözlenmemiştir. Dolayısıyla, tüm numunelerin geçirimsiz olduğu sonucuna varılmıştır.

## 5.2. Öneriler

Farklı enjeksiyon basınçlarında ince taneli kum numunelere katkılı ve katkısız mikrotaneli çimento enjeksiyonlarının penetrasyon yetisi araştırılarak, kimyasal enjeksiyonlara alternatiflik irdelenmelidir.

Benzer şekilde ince taneli kum numunelerinin farklı rölatif sıkılıklardaki enjekte edilebilirliğide araştırılmalıdır.

İlave olarak yukarıda bahsi geçen her iki koşulda da mikrotaneli çimento şerbetlerine çeşitli süper-akışkanlaştırıcılar ilave edilerek, enjeksiyon performansı araştırılmalıdır.

Ayrıca, silt boyutundaki numunelere de katkılı ve katkısız ince taneli çimento şerbetleriyle, farklı enjeksiyon basınçlarında, enjekte edilebilirlik araştırılmalıdır.

İnce taneli çimento enjeksiyonlarının kullanımı, kimysal enjeksiyonlara alternatif gibi görünmesi ve avantajları nedeniyle, dünya genelinde süratle artmaktadır. Ülkemizde de çok yakın bir zamanda geniş kullanım alanı kazanacaktır. Ancak ince taneli çimentoların ithal ve pahalı oluşu ülkemizde üretimini zorunlu kılmaktadır.

# 6. KAYNAKLAR


Abraham, A., 2006, Effect of initial moisture state on the engineering properties of Microfine cement grouted sands. M.Sc. Thesis, *The University of Alabama in Huntsville*, Alabama, 1–72. (İngilizce)

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

Akbulut, S. A. Saglamer, 2002 (b). Estimating the groutability of granular soils: a new approach. Tunnell. Underground Space Technol 17: 371–380. Anagnostopoulos, C. A. 2005. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts. Tunnell. *Underground Space Technology,* 20: 525–533. (İngilizce)

Akbulut, S., 1999, Enjeksiyon ile granüler zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul; 1-100. (Türkçe)

Akbulut, S., Sağlamer, A., 2002 (a), Estimating the groutability of gronular soils; A new Approach, *Tunnelling and Underground Space Technology,* 17 (4), 371-380. (İngilizce)

Ata, A., 1997, Silica fume in cement and silicate grouts and grouted sands. In: Grouting: Compaction, Remediation and Testing. Vipulanandan, C. (Ed.) Geotechnical Special Publication No.66, *ASCE,* New York, 242–257. (İngilizce)

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

Avcı, E., 2009, Farklı rolatif sıkılık ve tane dağılımına sahip kum zeminlerde Ultrafin 12 enjeksiyonu permeasyon yetisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara, 1-21. (Türkçe)

Bell, F.G., 1993, Engineering Treatment of Soils, *E&F, Spon.,* London, 10-160. (İngilizce)

Burwell, E.B., 1958, Cement and Clay Grouting of Foundatations, *ASCE Journal Soil Mechanics and Foundation Division,* 84 (1): 1-11. (İngilizce)

Cambefort, H., 1951, Foliate Gravelly Alluvium with Opened Structure, *Proceeding of the 4'th International Conference on Large Dams*, New Delhi, 4; 431-452. (İngilizce)

Chupin, O., Saiyouri, N., Hicher, P.Y., 2003, "Numerıcal Modeling of Cement Grout Injection Insaturated Porous Media", *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*.

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

Dano, C., Hilcher, P.Y., Tailliez, S., 2004, Engineering properties of grouted sands. *J. Geotech. Geoenv. Eng.* 130: 328–338. (İngilizce)

De Paoli, B., Bosco, B., Granata, R., Bruce, DA., 1992, Fundamental observations on cement based grouts (2): Microfine cements and the Cemill1 process. In: Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. Borden, R. H., Holtz, R. O., and Juran, I. (eds.), *New Orleans,* Louisiana, USA, 486–499. (İngilizce)

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

Gouvenot, D., 1987. Injection des sols et législation relative aux nappes phréatiques. Proc., Comptes-Rendus des Journées d'Études Internationales de l'AFTES, *Bordeaux*, France, 455–459. (Fransızca)

Graf, E., 1992, Compaction Grout, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, *ASCE Geotecnical Special Publication,* 1(30): 275-287. (İngilizce)

Güngörmüş, G., 2003*, "Bentonit uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu uygulanan granüler zeminlerde serbest basınç mukavemetinin incelenmesi"*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Hakansson, U., Hassler, L., Stille, H., 1992, Rheological Properties of Microfine Cement Grouts, *Tunneling and Underground Space Technology,* 7(4): 453- 458. (İngilizce)

Hausmann, M.R., 1990, Modification at depth by grouting, Engineering Principles of Ground Modification, *Mc Graw Hill,* Singapur, 346-379. (İngilizce)

Henn, R., 1996, Practical guide to grouting of underground structures, *Thomas Telford,* London, 15-24, 121-128. (İngilizce)

Herndon, J. And Lenahan, T., 1976, Design and Operations Manual, Federal Highway Administration, Halliburton Services, Duncan, Oklahoma, Technical Report. *Grouting in Soils*, 2; 21-28. (İngilizce)

Karahanoğlu, H.İ., 2001, "*Uçucu kül ve bentonit ile hazırlanan çimento enjeksiyonlarının kohezyonsuz zeminlerdeki davranış ve özelliklerinin model deneylerle araştırılması"*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Karol, R.H., 2003, Chemical grouting and soil stabilization, *M. Dekker,* New Jersey, 113-131. (İngilizce)

Kavak, A., Mutman, U., Keskin, E., 2005, "*Granüler Zeminlerde Çimento Enjeksiyonu*", Deprem sempozyumu, Kocaeli.

Krizek, R.J., Helal, M., 1992, "Anisotropic Behavior of Cement-Grouted Sand", *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE*, 30, 541-550.

Krizek, R.J., Liao, H.J., Borden,R.H., 1992, Mechanical properties of microfine cement/sodium silicat grouted sand. In: Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. Borden,R. H., Holtz, R. O., and Juran, I. (eds.), *New Orleans,* Louisiana, USA, 688–699. (İngilizce)

Kutlu, İ., 2005, *"Silis Dumanı Katkılı İnce Taneli Çimento(Rheocem 650) Enjeksiyonun İnce Taneli Kumlara Enjeksiyon Performansı"* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2-40 Ankara.

Kutzner, C., 1996, Grouting of Rock and Soil, *Balkema Puplishers,* Netherlands, 10-12, 190-195. (İngilizce)

Küçükali, N., 2008, "Demiryolu Altyapısının Jet Enjeksiyon Yöntemi ile İyileştirilmesi" Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Langevin, M., 1994, Rheological and mechanical behavior of microfine cement-based grouts, PhD. Thesis, *McGilf University*, Montreal, Canada, 1-100. (İngilizce)

Littlejohn, G.S., 1982, Design of cement based grouts. In: Baker, W. H. (ed.) Grouting in Geotech. *NY:ASCE,* New York, 35–48. (İngilizce)

Lombardi, G., 1985, The role of cohesion in cement grouting of rock, *15th International Congress On Large Dams.,* Lausanne, 3: 235-260. (İngilizce)

Lowther, J., Gabr, M. A., 1997, "Permeability and Strength Characteristics of Urethane-Grouted Sand", *Grouting, Geotechnical Special Publication of ASCE*, 66, 258-270.

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

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

Mitchell, J.K., 1981, State of the Art Report on Soil Improvement, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division,* 96(1), 24-26. (İngilizce)

Mollamahmutoglu, M., 2003, Treatment of medium to coarse-grained sands by fine-grained Portland cement (FGPC) as an alterative grouting material to silicate-ester grouts. *Cement Concrete Agg,* 25: 1235–1242. (İngilizce)

Mollamahmutoğlu, M., Babuccu, F., 2006, Zeminlerde sıvılaşma analiz ve iyileştirme yöntemleri, *Gazi Kitabevi,* Ankara, 132-139. (Türkçe)

Mollamahmutoğlu, M., Yılmaz, Y., 2011, Engineering Properties of Medium to- Fine Sands Injected with Microfine, *Marine Georesources and Geotechnology* 29(2): 95-100. (İngilizce)

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

Mutman, U., 2007, "*Düşük Basınçlı Çimento Enjeksiyonu İle Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi", Doktora* Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Kocaeli.

Mutman, U., Kavak, A., 2007, "*Sıvılaşma Riskinin Düşük Basınçlı Çimento Enjeksiyonu İle Azaltılması",* International Earthquake Symposium, Kocaeli.

Naudts, A., Landry, E., Hooey, S., Naudts, W., 2003, Additives and admixtures in cement-based grouts. In: Proceedings of the 3rd International Conference. Grouting and Ground Treatment. Johnsen, L. F., Bruce, D. A., and Byle, M. J. (eds.), New Orleans, Louisiana. Geotechnical Special Publication No.120, Reston, VA: *ASCE*. 1180–1191. (İngilizce)

Nonveiler, E., 1989, Grouting Suspensions, Solitions and Resin, *Elsevier Science Publisher,* New York, 35-68. (İngilizce)

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

Özgan, E., Gökdemir, A., Subaşı, S., Yıldız, K., 2007, "*Düşük Poroziteli Zeminlerde Mıcrocem 900 H Çimento Enjeksiyonu Uygulaması"*International Earthquake Symposium, Kocaeli.

Perret, S., Ballivy, G., Khayat, H., Mnif, T., 1997, Injectability of fine sand with cement-based grout, *Proceeding of the Geo-Logan 97 Conference on grouting,* Logan-Utah , 289-305. (İngilizce)

Perret, S., Palardy, D., Ballivy G., 2000, Rheological Behaviour and Setting Time of Microfine Cement Based Grouts, *ACI Materials Journal*, 97 (4): 472-477. (İngilizce)

Rawlings, C.G., Hellawell, E., Kilkeny, E., 2000, Grouting for Ground Engineering, *Ciria,* London, 15-74. (İngilizce)

Ribay, E.D., 2006, Maigre I.D, Cabrillac, R.; and Gouvenot, D. 2006 Factors Affecting the Creep Behavior of Grouted Sand, *Journal of Geotecnical and Geoenvironmental Engineering,* ASCE, 488-492. (İngilizce)

Sandra, T., Jeffrey, C. E., 1992, "The Effects of Fillers and Admixtures on Grout Performance", Grouting Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Engineering Division of ASCE, Volume: 2, No: 30, Lousiana.

Schwarz, L. G. and R. J. Krizek. 2000. Evolving morphology of early age Microfine cement grout. In: Advances in Grouting and Ground Modification. Geotech. Special Pub. *ASCE*, 181–199. (İngilizce)

Schwarz, L., 1997, Roles of rheology and chemical filtration on injectability of microfine cement grouts, Doktara Tezi, *Orthwestern University,* IIIionis, 9–32. (İngilizce)

Schwarz, L.G., Krizek R.J., 1992, Effect of mixing on rheological properties of Microfine cement grout. In: Proceedings of Grouting Soil Improvement and Geosynthetics. New Orleans, LA, USA: GT Div=*ASCE*, 512–525. (İngilizce)

Schwarz, L.G., Krizek, R.J., 1994, Effect of preparation technique on permeability and strength of cement-grouted sand. *Geotech. Testing J.*, 17: 434–443. (İngilizce)

Schwarz, L.G., Member Geo-Institute and ASCE, and Chirumalla, M., 2007, Effect of Injection pressure on Permeability and Strength of Microfine Cement GSP 168 Grouting for Ground Improvement, *ASCE*, 1-10. (İngilizce)

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

Shroff, A., V., Shah, D., L., 1993, Grouting Technology in Tunneling and Dam Construction, *Balkema,* Brookfield, 13-71; 230-300. (İngilizce)

Tekin, E., 2004, 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. (Türkçe)

Tekin, E., Akbaş, S. O., 2010, "*Çimento Enjeksiyonlarının Kumlara Enjekte Edilebilirliğinin Diskriminant Analizi İle İrdelenmesi*" Gazi Üniv. Müh.- Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt 25, No 3, 625-633.

Tekin, E., Mollamahmutoğlu, M., 2010, "*Çok ince taneli çimento (rheocem 900) enjeksiyonu ile farklı gradasyona sahip kumların enjekte edilebilirliği*" Gazi Üniv. Müh.- Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt 25, No 3, 533-539.

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

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

Vipulanandan, C., Shenoy S., 1992, Properties of cement grouts and grouted sands with additives. In: Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. Borden, R. H., Holtz, R. O., and Juran, I. (eds.), *New Orleans*, Louisiana, USA, 500–511. (İngilizce)

Warner, J., 2003, Soil solidification with ultra fine cement grout. grouting and ground treatment. In: Proceedings of the 3rd International Conference. Johnsen, L. F., Bruce, D. A., and Byle, M. J. (eds.), New Orleans, Louisiana. Geotechnical Special Publication No.120, Reston, VA: *ASCE*, 1360–1371. (İngilizce)

Warner, J., 2004, Practical Handbook of Grouting Soil Rock and Structures, *Jhon Wiley&Sons.,* New Jersey, 1-178, 207-295. (İngilizce)

Yıldız, B., 2007, 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. (Türkçe)

Zaimoğlu, A. Ş., 2003, "*Bentonit, uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu karşımlarında fiziksel ve mekanik özelliklerin Taguchi yöntemi ile incelenmesi"*, *Doktora* Tezi, Atatürk *Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Erzurum.

Zebovitz, S., Krizek, R.J., Atmatzidis, D.K., 1989, Injection of fine sands with very fine cement grout. *J. Geotech. Eng.,* 115: 1717–1733. (İngilizce)

URL1, http://www.ironoxideindia.net

## 7. ÖZGEÇMİŞ

**KİŞİSEL BİLGİLER:**


**Adı Soyadı** : MESUT ÖZARSLAN
**Uyruğu** : TÜRKİYE CUMHURİYETİ
**Doğum Yeri ve Tarihi** : SİVAS – 18/04/1976
**Telefon** : 0090.312.4724374
**Faks** : 0090.312.4724878
**e-mail** : mesutozarslan@gmail.com


**EĞİTİM:**

| Derece | | Adı, İlçe, İl | Bitirme Yılı |
|---|---|---|---|
| Lise | : | SİVAS LİSESİ-SİVAS | **1993** |
| Üniversite | : | SELÇUK ÜNİVERSİTESİ-KONYA | **1999** |
| Yüksek Lisans | : | SELÇUK ÜNİVERSİTESİ-KONYA | **2004** |

**İŞ DENEYİMLERİ:**

| Yıl | Kurum | Görevi |
|---|---|---|
| 1999-2002 | T.C. SELÇUK ÜNİVERSİTESİ | Araştırma Görevlisi |
| 2002-2004 | T.C. BAŞBAKANLIK-TOKİ | Uzman Yardımcısı |
| 2004-2007 | T.C. BAŞBAKANLIK-TOKİ | Uzman |
| 2007-2008 | T.C. BAŞBAKANLIK-TOKİ | Şube Müdürü |
| 2008-2009 | ÖZ YAPI PROJE ZEMİN LTD. ŞTİ. | Genel Müdür |
| 2009-(Devam) | SARL CHIFA MESUT ALGERIA | Genel Müdür |

**UZMANLIK ALANLARI:**

- GEOTEKNİK PROJE VE UYGULAMASI,
- TOPLU KONUT UYGULAMASI,
- ALTYAPI (İÇMESUYU, KANALİZASYON VE SU ARITMA) UYGULAMASI
- ALT VE ÜST GEÇİT PROJE VE UYGULAMASI,
- ÇEVRE DÜZENLEME UYGULAMASI,
- ÖN ÇED VE ÇED RAPORLARININ HAZIRLANMASI

**YABANCI DİLLER:**

- İNGİLİZCE
- ARAPÇA (konuşma)

**BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER:**

- 1999-2002 TÜRK SRANDARTLARI ENSTİTÜSÜ-Bilirkişi
- 2001-2002 KONYA İDARE MAHKEMESİ-Bilirkişi
- 2004-2005 T.C. BAYINDIRLIK VE İSKAN BAKANLIĞI-Deprem Şurası Alt Komisyon Üyesi
- 2005-2006 T.C. BAŞBAKANLIK-Pakistan Deprem Bölgesi Koordinatörü (Geçici Görev)

**YAYINLAR:**

1. Nalçakan, M., Özarslan M., 2006, "8 Ekim 2005 Kuzey Pakistan Depremi Zemin Koşulları ve Heyelanlar", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, KTÜ, Trabzon.
2. Nalçakan, M., Özarslan M., 2008, "Zemin Sıvılaşma Analizlerinde SPT ve CPT Mukayesesi", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, Konya.