

İNCE TANELİ ÇİMENTO (RHEOCEM 900) KARIŞIMLARININ REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Erhan TEKİN

İnşaat Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
etekin@gazi.edu.tr

(Geliş / Received: 17.02.2010; Kabul / Accepted: 11.08.2011)

ÖZET

Enjeksiyon malzemesinin davranışını tahmin etmek için reolojik model ve özelliklerin bilinmesi gerekir. Bu amaç doğrultusunda ince taneli çimento (Rheocem 900) karışımının reolojik özellikleri araştırılmıştır. Su/Çimento (S/Ç) oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 olan ince taneli çimento karışımlarının sedimantasyon, Mars hunisi akış zamanı ve Vicat deneyleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılarak hazırlanan aynı oranlardaki S/Ç oranına sahip karışımın reolojik özellikleriyle karşılaştırılmıştır. SA kullanılan karışımların kullanılmayanlara göre daha iyi reolojik özelliklere ve penetrasyon yetisine sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Reolojik özellikler, Reolojik model, İnce taneli çimento.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF MICRO FINE CEMENT (RHEOCEM 900) GROUTS

ABSTRACT

To predict the behaviour of grouting material you need to know rheological model and properties. In this context, rheological properties of the microfine cement (Rheocem 900) grouts were investigated. Bleeding, Marsh cone flow meter and Vicat tests are carried out to determine the rheological properties of microfine cement grouts having water/cement (w/c) ratios of 0,8, 1,0, and 1,2. Obtained results were compared with rheological properties of microfine cement grout having with w/c ratio of 1,0 prepared with super plasticizer. It was determined that grouts prepared with super plasticizers have better rheological properties and penetration performance when compared with grouts prepared without super plasticizer.

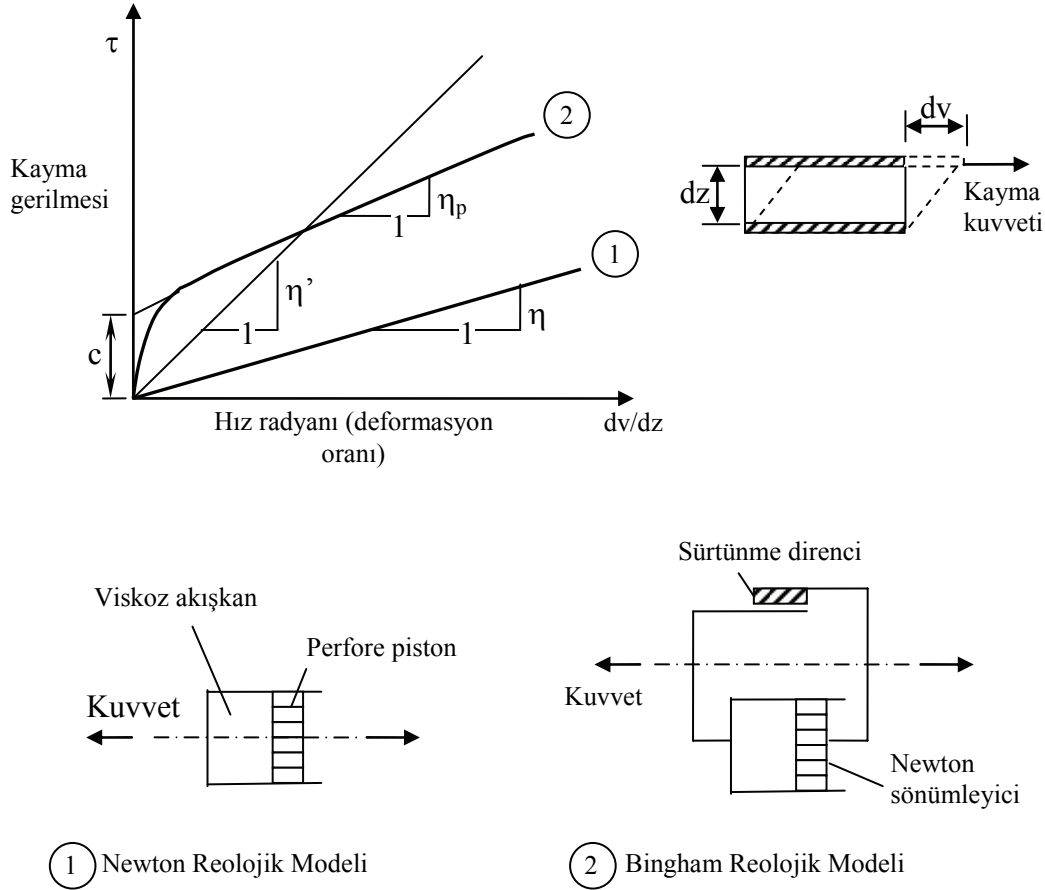
Keywords: Rheological properties, Rheological model, Microfine cement.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Reoloji, maddenin akış ve deformasyon bilimidir. Kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve zaman arasındaki ilişkilerle ilgilenir [1, 2]. Gazların, sıvıların ve katıların mekanik özelliklerinin çalışmalarını kapsar. Zemin ve kaya enjeksiyonunun davranışını taklit ve başarısını tahmin etmek için karışımın davranışını anlamak gerekir [3-6]. Karışımın reolojisi, katı ve sıvı fazda fiziksel ve kimyasal işlemlerin etkisinden dolayı komplekstir. Katılar arasındaki iç kuvvetler akma gerilmesi ile sonuçlanır. Akma gerilmesi, hareketi başlatmak için yenilmek zorundadır. Aşılmadığı durumda, süspansiyon zayıf katı gibi davranır. Akma gerilmesi, katı davranıştan sıvı davranışa geçişi sağlayan malzeme özelliği olarak

tanımlanabilir. Çimento karışımları akma gerilmesi göstermesine rağmen, yalnızca süspansiyon değildir. Aynı zamanda hidrasyon sürecinde kimyasal reaksiyonlara da girdiklerinden zamana göre reolojideki davranışı değişir.

Bütün süspansiyonlar yerçekimi ile aktarılma eğilimindedir. Bu durum karışımın sedimantasyondan dolayı penetre edilebilirliğinden çok efektif yenilmeyi etkiler. Enjekte olmuş boşlukların bir kısmı su ile dolu olarak kalır. Basınç filtrasyonundan dolayı su kaybetmenin penetre olabilirlik üzerindeki etkisi daha büyüktür. Basınçla enjekte edilen karışım stabil olsa dahi zemin ortamında su kaybedebilir. Su kaybetme karışımın hızlı katılaşmasına neden olur. Viskoziye ve karışımın yoğunluğu arttığından karışımın



Şekil 1. Newton ve Bingham modeli için reolojik diyagramlar (Reological diagrams for Newton and Bingham models)

kekleşmesine yol açar. Bu fenomen reolojik değişime neden olarak akışı durdurur ve basınç artırılırsa hidrolik kırılmaya yol açabilir. Bu yüzden enjekte edilebilirliğin tahmin edilmesi için reolojik davranışı etkileyen S/Ç oranı, özgül yüzey, çimento türü, hidrasyon, karıştırma zamanı, yoğunluk ve sıcaklık faktörlerinin iyi bilinmesi gerekir [3].

Bu çalışmada ince taneli çimento (Rheocem 900) karışımının reolojik özelliklerini belirlemek amaçlanmıştır. Uygulamada en çok kullanılan S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 olan ince taneli çimento karışımlarının sedimentasyon, Marsh hunisi, Vicat ve enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar S/Ç oranı 1,0 olan süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılarak elde edilen karışım materyallerinin reolojik özellikleriyle ve enjeksiyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. REOLOJİK MODELLER (RHEOLOGICAL MODELS)

Newton akışkanında, kayma gerilmesi (τ) hız gradyanı (deformasyon oranı) ile orantılı olarak değişir. Newton sıvılarının viskoziteleri, Eş. 1 ile tanımlanır:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz} \quad (1)$$

Bu eşitlikte η : dinamik viskozite, dv/dz : hız eğimidir. Eş. 1. Laminar akımlar için geçerli olup, Eddy eğrileri olarak hareketi bozulmadan düz akımları takip eden sıvı partiküllerin reolojisini açıklar. Dinamik viskozitenin, özgül ağırlığa (ρ) bölünmesiyle kinematik viskozite bulunur (ν):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta \cdot g}{\gamma} \quad (2)$$

Burada, $g = 9,81 \text{ m/sn}^2$ yerçekimi ivmesidir. Reolojik açıdan iyi bilinen bir gerçektir ki su Newton yasasına hareket eder ve kohezyonu olmamasından ve viskozitesinden dolayı Newton cismi olarak tanımlanır. Şekil 1'de su ve kararlı bir karışım için reolojik davranışın iki yasası gösterilmiştir. Birinci eğri su gibi tipik Newton viskoz akışkanı (Eş. 1); ikinci eğri ise sadece viskozite ile değil aynı zamanda kohezyonla (c) tanımlanan Bingham sıvısını göstermektedir (Eş. 3).

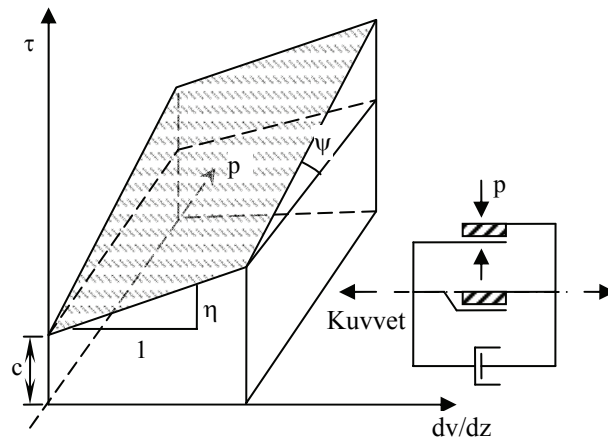
$$\tau = c + \eta_p \frac{dv}{dz} \cong \eta' \frac{dv}{dz} \quad (3)$$

Burada η_p : plastik viskozite, η' : görünür viskozitedir. Karışım reolojisini karakterize etmek için birçok reolojik model vardır. Uygulamalarda ortamın

geometrisini tanımlamak oldukça güç olduğundan, karışık reolojik model göz önüne alınmamalıdır.

Reolojik model olabildiğince basit tutulmalıdır. Kohezyon ve viskozite sergileyen en basit reolojik model Bingham modelidir (Şekil 1). Basit olmasına rağmen, birçok araştırmacı [7-12] tarafından çimento karışımları için uygun olduğu rapor edilmiştir. Türbülanslı akım, karışımın pompalanması esnasında, enjeksiyon materyalinin stabilitesini sürdürmesi açısından önemlidir. Ancak enjeksiyon materyalinin zemine penetrasyonunda ve zemin içerisindeki ilerleyişi esnasında genelde laminar akım kabul edilir [13].

Şekil 1'de gösterilen iki sıvı içsel sürtünme sergilemez. Eğer içsel sürtünme göstereceklerdi kayma gerilmeleri sıvı basıncına da bağlı olarak değişir ve davranışları Şekil 2'de gösterildiği gibi olur. Karışım stabil değilse bileşenlerine ayrılır ve davranışı tahmin etmek mümkün olmaz. Basit teorik temeller ve orta düzeydeki deneysel bulgular göstermiştir ki, uzun süren enjeksiyon işleminin sonunda Şekil 2'de gösterildiği gibi içsel sürtünme görülür ve enjeksiyon mümkün olmaz [14]. Örneğin S/Ç oranı düşük karışımlarda çimento taneleri bir araya gelerek enjeksiyon işlemine karşı sürtünme oluşturur. Böylece S/Ç oranı daha da düşer.



Şekil 2. İçsel sürtünmeye sahip Bingham Modeli'nin reolojik yüzeyi [9] (Rheological surface of a Bingham body with internal friction)

Bingham cisminin tanımına göre, stabil karışımın kohezyonu olmasına rağmen; içsel sürtünmesi yoktur. Bu yenilme gerilmesinin basınçtan etkilenmediği anlamına gelir. Çünkü çimento için fazla miktarda su bulunduğu normal basınç su tarafından taşınmaktadır. Diğer taraftan kuru çimento karışımı içsel sürtünmeye sahiptir. Bu durum reolojik olarak Eş.4 ile modellenilebilir:

$$\tau = c + \eta \frac{dv}{dz} + p \cdot f(\psi) \quad (4)$$

Bu eşitlikte p: yerel basınç, ψ : içsel sürtünme açısıdır. Kararlı karışımın davranışı iki fiziksel özellik ile tanımlanır: Viskozite ve kohezyon. Lombardi [9] kohezyonun karışımın ulaşabileceği en uzak mesafeyi belirleyeceğini; viskozitenin ise akış oranını ve enjeksiyon işlemini tamamlamak için gereken süreyi belirlediğini göstermiştir. Pratik uygulamalarda iki fiziksel özelliğe ek olarak karışımın özgül ağırlığını (δ) da hesaba katmak gerekir. Bu üç özellik sıvı kütlesinin içerisindeki akım şartlarını tanımlamak için yeterlidir. Ayrıca akış yüzeyinin akışın tamamına yaptığı etki göz önünde bulundurulmalıdır. İki uçta olan sınır, su ve stabil karışımlar, kolayca tanımlanan kanunları takip ettiğinden hesaplamalarla analiz edilebilirler. Bunların haricindeki kararsız karışımlarda davranışı tahmin etmek zordur ve matematiksel yaklaşımlar yoktur. Fiziksel model geniş bir aralıkta sonuçlar üretir. Elbette ki, reolojik kanunlar ya da modeller gerçekliğe olan bir yaklaşımdır ve genelde iyi sonuç verir. Buradaki kısıtlayıcı etken çimentonun belirli bir tane büyüklüğüne sahip olmasıdır. Bundan dolayı karışım daha küçük olan aralıklara giremez. Reolojik model bu durumda geçerliliğini kaybeder. Bir başka kısıtlayıcı etken ise yüksek akış hızlarının olduğu durumdur ki bu akışın laminar akımdan türbülanslı akıma geçmesi olarak tanımlanır.

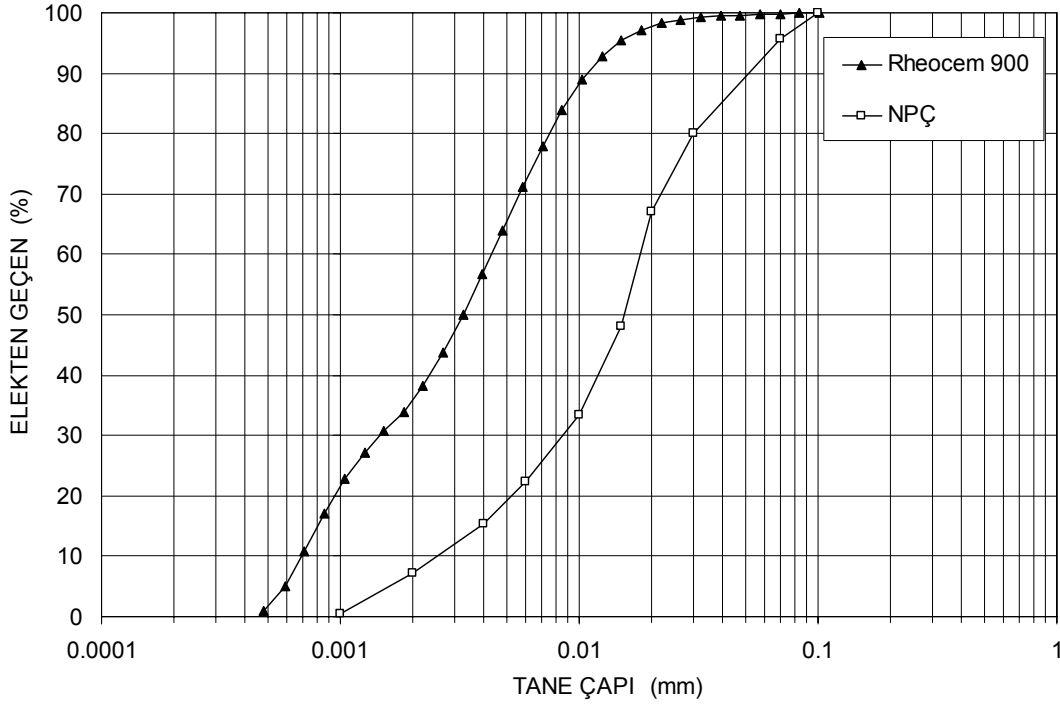
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

3.1. Enjeksiyon Malzemesinin Özellikleri (Properties of grouting material)

Bu çalışmada Portland çimentosu temelli olan Rheocem 900 ince taneli çimento malzemesi kullanılmıştır. Spesifik yüzey alanı 900 m²/kg ve yoğunluğu 1900 kg/m³'tür [15]. Öte yandan normal portland çimentosunun (NPC Tip 1) spesifik yüzey alanı 225 ve 320 m²/kg arasındadır [16]. Rheocem 900 ve normal portland çimentolarının kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de; tane boyut dağılımları ise Şekil 3'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Rheocem 900 ve NPC'nin kimyasal kompozisyonu [15, 17]. (Chemical composition of Rheocem 900 and NPC)

Bileşen	Rheocem 900 (%)	NPC (%)	Bileşen	Rheocem 900 (%)	NPC (%)
SiO ₂	12,9-26,0	21,36	Na ₂ O	-	0,20
Al ₂ O ₃	2,0-6,0	3,98	K ₂ O	-	0,80
Fe ₂ O ₃	1,6-4,3	3,15	P ₂ O ₅	-	0,21
CaO	37,3-64,3	62,41	TiO ₂	-	0,19
MgO	2,1-7,9	2,57	SrO	-	0,27
SO ₃	1,0-2,3	3,43	SO ₃	-	3,43
CaSO ₄	1,0-5,0	-	C	-	0,64
CaCO ₃	1,0-5,0	-			



Şekil 3. Rheocem 900 ve NPÇ'nin tane dağılımı (Grain size distribution of Rheocem 900 and NPC)

3.2. Temel Reolojik Özellikler (Basic Rheological Properties)

Karışımın temel reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla S/Ç oranı 0,8, 1,0, 1,2 olan ince taneli çimento süspansiyonlarına sedimantasyon, Marsh hunisi ve Vicat deneyleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar Yıldız [18] tarafından %2 oranında süper akışkanlaştırıcı (Rheobuild 2000 PF) kullanılarak hazırlanan süspansiyonların reolojik özellikleri ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Enjeksiyon malzemesinin karıştırma süresinin ve karıştırıcının seçiminde ince taneli çimento üreticisi firmanın belirlediği şartlar göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre karıştırma işlemi, 2800 devir/dakika özelliğe sahip koloidal karıştırıcı ile 3 dakika boyunca yapılmıştır [15].

3.2.1. Stabilite (Stability)

1000ml'lik cam mezür içerisindeki çimento karışımının, 2 saat sonra üst bölgesinde kalan suyun, karışımın başlangıçtaki hacmine bölünmesiyle elde edilen oran %5 ise karışım stabildir [19]. Eğer karışım, karıştırıcı ya da enjeksiyon borularındaki türbülans dolaylı çökeliyorsa, karışım stabil değildir. Emülsiyonun kırılması ya da jellerden sıvı çıkışı sedimantasyon olarak düşünülebilir. Stabilite, sedimantasyon materyalin tane boyutuna, partiküllerin özgül yüzeyine, sıvı ve partiküller arasındaki yüzey hareketinin yoğunluğuna bağlıdır [20].

Deneyler sırasında, sedimantasyon yüzdesinin belirlenmesi amacıyla ASTM C940'dan

faydalanılmıştır [21]. Buna göre stabilite deneyi aşağıdaki adımları içerir:

- Dene yapılacak ortamın sıcaklığı $23,0 \pm 2^\circ\text{C}$ olmalıdır.
- Enjeksiyon materyali karıştırılır. Sıcaklığı ölçülür ve 1000 ml'lik ölçü silindire aktarılır.
- Enjeksiyon materyalinin bünyesinde olan suyun ölçü silindirinden buharlaşarak kayıplara yol açmaması için ölçü silindiri tıkaç yardımıyla kapatılır.
- İlk 60 dakika için, her 15 dakikalık sürelerde üstte kalan su miktarının hacimsel okumaları alınır. Daha sonraki okumalar, her 10 dakikada yapılır. Alınan iki okuma aynı olduğunda deney durdurulur.
- Sedimantasyon yüzdesi $\frac{V_w}{V_1} \times 100$ formülü ile hesaplanır.

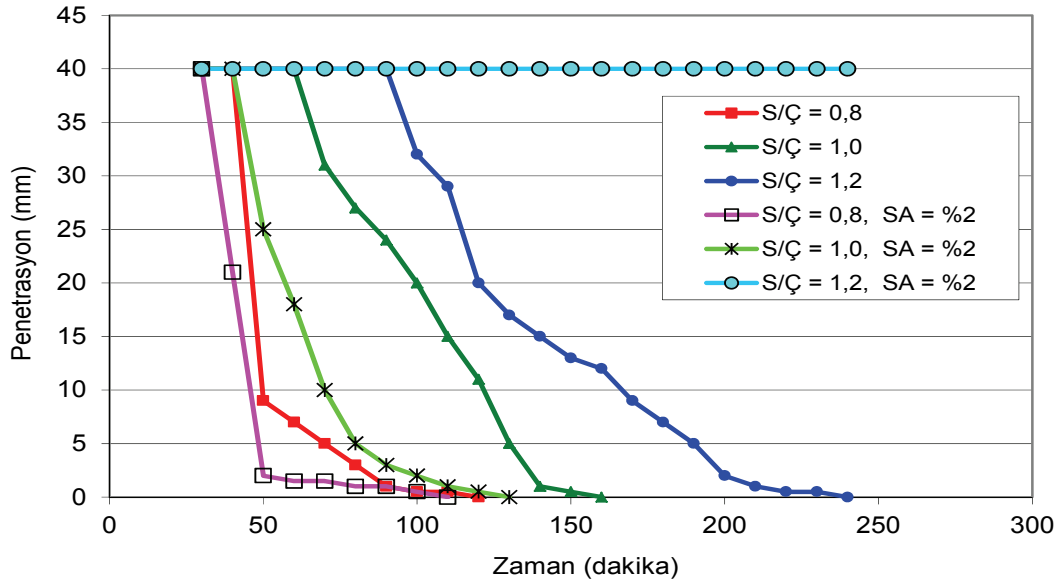
Burada;

V_1 : Denein başlangıcında numunenin hacmi, ml

V_w : Sedimente olan su hacmi, ml olarak tanımlanır.

- Sedimantasyon yüzdesi %5'ten küçükse süspansiyon stabildir.

S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 oranlarında hazırlanan çimento süspansiyonları 1000ml'lik ölçü silindire koyularak sedimantasyon deneyleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Karışımların sedimantasyonlarının zamanla değişimi [22, 18] (Bleeding of grouts with varying time)

S/Ç oranı 1,2 olan karışım daha az sedimantasyon yaparken, S/Ç oranı 0,8 olan karışım daha çok sedimantasyon yapmıştır. Bunun nedeni, karışımın içerisinde bulunan çimento miktarının artmasıdır. Ayrıca S/Ç oranı büyük olan karışımında, sedimantasyonun sabitlenme süresine daha çabuk ulaşılmıştır. Bu durum ise, artan çimento miktarının, ilk katılaşma süresini kısaltmasıyla açıklanabilir. Karışımların sedimantasyon kapasiteleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Buna göre bütün karışımlar stabildir.

Tablo 2. Karışımların sedimantasyon kapasiteleri [22,18] (Bleeding capacity of grouts)

Karışım	Sedimantasyon kapasitesi (%)	Stabilite
S/Ç = 0,8	1,4	Stabil
S/Ç = 1,0	1,1	Stabil
S/Ç = 1,2	1,0	Stabil
S/Ç=0,8, SA = %2	1,0	Stabil
S/Ç=1,0, SA = %2	1,0	Stabil
S/Ç=1,2, SA = %2	0,2	Stabil

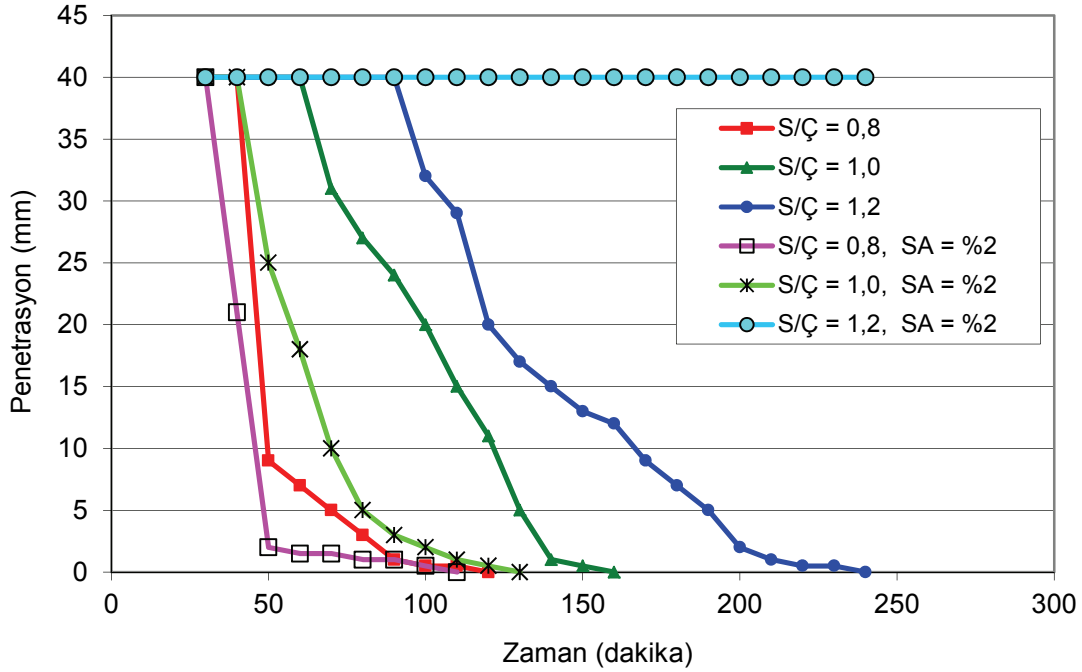
3.2.2. Katılaşma Süresi (Setting Time)

Enjeksiyon malzemesinin partikülleri arasında, fiziko-kimyasal bağların oluşması için gereken süredir. Çimento tabanlı karışımlarda kullanılan katkı maddelerine bağlı olarak prizlenme süreleri 4 ile 24 saat arasında gerçekleşir. Süspansiyonun katılaşma süresi, karışımın gideceği son noktaya ulaşmasına yeterli olmalıdır. İstenilen noktaya ulaştıktan sonra, katılaşma olmalıdır. Kimyasal karışımlar için jelleşme, çok hızlı gelişebileceğinden kritik olabilir [13].

Deneyler sırasında katılaşma zamanının belirlenmesi amacıyla ASTM C191'den yararlanılmıştır [23]. Buna göre Vicat deneyi aşağıdaki adımları içerir:

- Karışım 20,0° ile 27,5°C arasında bir sıcaklığa sahip olmalıdır.
- Vicat düzeneği, çimento süspansiyonun yüzeyine temas edecek şekilde hazırlanır. Ölçme sistemi bu noktaya göre ayarlanır.
- İlk 30 dakika boyunca hazırlanan süspansiyon öylece bırakılır.
- Sonraki her 15 dakika boyunca düzener serbest bırakılarak, 1mm çapındaki Vicat iğnesinin, süspansiyonun içerisine penetre olması sağlanır. Penetrasyon değeri olarak 25mm okunduğunda, ilk prizlenme zamanı bulunmuş olur. Eğer 25mm'den daha az bir değer okunduysa, zaman aralığında interpolasyon yapılır ve 25mm'ye karşılık gelen değer bulunur.
- Son prizlenme zamanı, Vicat iğnesi düşürüldüğünde, 1mm'den daha az penetre olduğu değere karşılık gelen zamandan bulunur.
- Deney sırasında dikkat edilmesi gereken husus, kalıbın kenarlarından 10mm ve daha önce deney yapılan noktadan 5mm yarıçaptaki bölgeden farklı bir alanda Vicat iğnesi penetrasyonlarının gerçekleştirilmesidir.

S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 olarak hazırlanan ince taneli çimento karışımlarının ilk ve son katılaşma sürelerini bulmak için Vicat deneyinden yararlanılmıştır. Buna göre sonuçlar Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Karışımların katılaşma-zaman ilişkisi [22, 18] (Setting-time relationship of grouts)

Bu çalışma kapsamında, çeşitli oranlarda S/Ç oranına sahip karışımların ilk ve son katılaşma zamanları 45. ile 210. dakikalar arasında değişmektedir. Bununla birlikte akışkanlaştırıcı kullanılan karışımlarda ise ilk ve son katılaşma zamanları 38. ile 110. dakikalar arasında gerçekleşmiştir. S/Ç oranı 1,2 ve %2 SA oranına sahip süspansiyonda ise katılaşma gerçekleşmemiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Karışımların ilk ve son katılaşma zamanları [22, 18] (Initial and final setting time of grouts)

Karışım	İlk katılaşma (dakika)	Son katılaşma (dakika)
S/Ç = 0,8	45	90
S/Ç = 1,0	87	140
S/Ç = 1,2	114	210
S/Ç = 0,8, SA = %2	38	80
S/Ç = 1,0, SA = %2	50	110
S/Ç = 1,2, SA = %2	-	-

3.2.3. Viskozite (Viscosity)

Viskozite bir sıvı tabakasının, bitişik sıvı tabakasına göre bağlı hareketinin ne oranda olduğunu temsil eder. Bingham karışımları için, Lombardi [9], huni akış zamanı ve basit kohezyon plaka ölçer önermiştir. Bu yöntemle Marsh hunisi içerisine doldurulan 1000ml'lik karışımın akması için geçen zaman ölçülür. Pürüzlü yüzeye sahip ince çelik levha (15x15

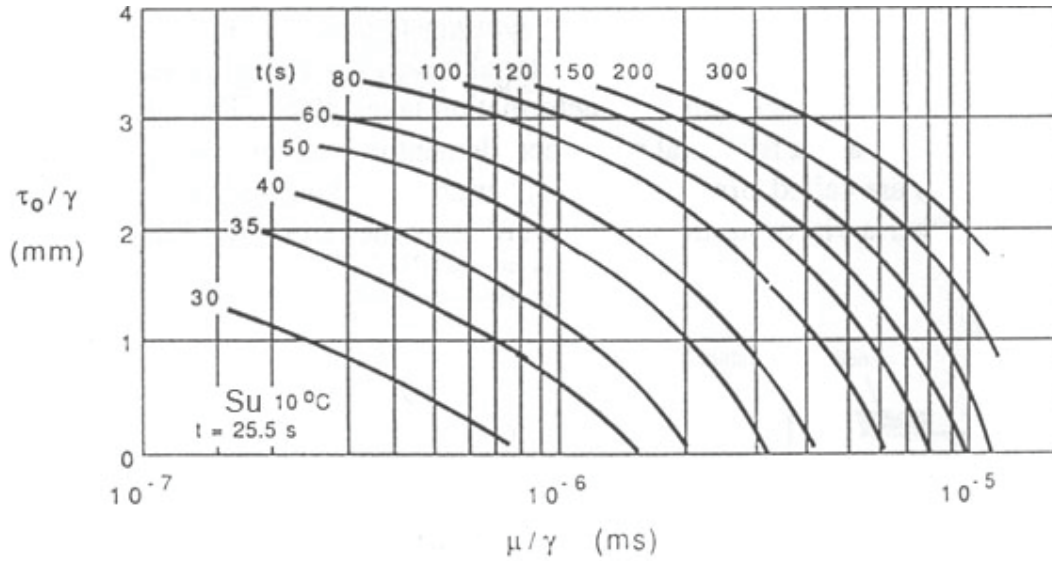
cm), enjeksiyon malzemesine batırılır. Plaka çıkartılarak, levhaya yapışan süspansiyonun damlaması durana kadar beklenir ve başlangıç akma gerilmesi (kohezyon) τ_0 , levhaya yapışan enjeksiyon malzemesi ağırlığından (ΔW) belirlenir (Eş. 5):

$$\tau_0 = \Delta W / 2A \quad (5)$$

Burada, τ_0 : başlangıç akma gerilmesi (kN/m^2), A : 15x15 cm boyutundaki çelik levhanın alanı (m^2), ΔW : Levhaya yapışan enjeksiyon materyali ağırlığıdır (kN). Eş. 5'de kullanılmak üzere karışımın birim hacim ağırlığı hesaplanır (γ). Lombardi'nin [9] önerdiği Şekil 6 yardımıyla, τ_0/γ değerine karşılık η/γ değeri bulunur. Böylece, Marsh hunisi yardımıyla, "gerçek viskozite" belirlenir.

Deneyler sırasında, Marsh hunisi akış zamanlarının belirlenmesi amacıyla ASTM C939'dan faydalanılmıştır. Buna göre deney aşağıdaki adımları içerir [24]:

- Deney yapılacak ortamın sıcaklığı $23,0 \pm 2^\circ\text{C}$ olmalıdır.
- Enjeksiyon materyali karıştırılır ve sıcaklığı ölçülerek 1000ml'lik ölçü silindire aktarılır.
- Marsh hunisinin deliği kapatılarak, karışım ölçü silindirinden huniye aktarılır.
- Karışımın huniden akması için gereken zaman, kronometre ile belirlenir.



Şekil 6. Akma gerilmesi ve viskoziteye karşı Marsh hunisi akış zamanı (Marsh cone flow time versus yield stress and viscosity)

Tablo 4. Karışımların Marsh hunisi akış zamanları ve viskoziteleri [22, 18] (Marsh cone flow time and viscosity of grouts)

1000 ml karışım	Akış zamanı (s)	ΔW (kg.m/s ²)	γ (kN/m ³)	τ_0/γ (mm)	η/γ (m.s)	η (cP)
S/Ç = 0,8	34,0	0,0483	16,71	0,06418	$1,13 \times 10^{-6}$	18,9
S/Ç = 1,0	33,5	0,0296	16,11	0,04086	$1,11 \times 10^{-6}$	17,2
S/Ç = 1,2	32,0	0,0170	15,17	0,02487	$1,00 \times 10^{-6}$	15,2
S/Ç = 0,8, SA = %2	33,0	0,0510	15,40	0,03725	$1,10 \times 10^{-6}$	16,9
S/Ç = 1,0, SA = %2	32,4	0,0304	14,51	0,02357	$1,05 \times 10^{-6}$	15,2
S/Ç = 1,2, SA = %2	32,0	0,0263	13,64	0,02170	$1,01 \times 10^{-6}$	13,8

S/Ç oranı 0,8, 1,0, 1,2 olan karışımların viskoziteleri Marsh hunisi deneyleri ile belirlenerek, sonuçlar Tablo 4'de süper akışkanlaştırıcı kullanılan deney sonuçlarıyla birlikte verilmiştir.

3.3. Enjeksiyon Deneyleri (Grouting Tests)

Kumlar, ASTM standartlarına uygun elekler kullanılarak, #4-#10 (4,8mm-2,0mm) elek aralığında kalan numune iri kum; #10-#40 (2,0mm-0,43mm) elek aralığında kalan numune orta kum ve #40-#200 (0,43mm-0,075mm) elek aralığında kalan numune ince kum olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Enjeksiyon kalıpları, numune çıkışını kolaylaştırmak amacıyla yağlanmıştır. Kalıpların alt ve üst rijit başlıklarına, geçirimsizliği sağlamak amacıyla lastik conta ve iri kumun enjeksiyon tesisatının içerisine girmesini engellemek için naylon elek yerleştirilmiştir. Kum numunelerin bağıl sıklıkları (D_r) %30±3 olarak hazırlanmıştır. İnce, orta, iri kum gruplarından oluşan gradasyonlara S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 olan karışımların enjeksiyon deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar Yıldız [18] tarafından süper akışkanlaştırıcı kullanılarak sağlanan deney

sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak Tablo 5'de verilmiştir.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 olan ince taneli çimento karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla sedimantasyon, Vicat ve Marsh Hunisi akış zamanı deneyleri yapılmıştır. Buna göre deneysel çalışmada kullanılan karışımların (S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2) sedimantasyon kapasiteleri, ASTM C940'a göre, 2 saatlik sürede %5'ten küçük olduğundan hepsi stabildir (Tablo 2). Akışkanlaştırıcı kullanılan karışımlarda sedimantasyon kapasitesi, kullanılmayan karışımlara göre daha azdır.

Vicat deneyi sonuçlarına göre S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 olan karışımların ilk katılaşma zamanı sırasıyla, 45, 87, 114 dakika iken, son katılaşma zamanları sırasıyla 90, 140 ve 210 dakika olarak bulunmuştur. S/Ç oranı 0,8 ve 1,2 olan karışımlarda %2 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmasıyla ilk ve son katılaşma zamanlarına süper akışkanlaştırıcı

Tablo 5. Enjeksiyon deney sonuçları [22, 18] (Grouting test results)

Kum (%)			S/Ç	SA (%)	D _r (%)	Basınç (kPa)	Enjeksiyon sonucu
İnce	Orta	İri					
100	0	0	1,2	-	30	100	Başarısız
0	100	0	0,8	-	27	100	Başarılı
10	45	45	0,8	-	30	100	Başarılı
15	42,5	42,5	0,8	-	32	100	Başarılı
20	40	40	0,8	-	30	100	Başarısız
10	45	45	1,0	-	30	90	Başarılı
10	45	45	1,0	2	30	100	Başarılı
15	42,5	42,5	1,0	-	30	100	Başarılı
20	40	40	1,0	-	30	100	Başarılı
20	40	40	1,0	2	30	100	Başarılı
25	37,5	37,5	1,0	-	30	100	Başarısız
30	35	35	1,0	-	30	100	Başarısız
30	35	35	1,0	2	30	300	Başarılı
30	35	35	1,0	2	30	200	Başarısız
40	30	30	1,0	2	30	400	Başarılı
40	30	30	1,0	2	30	300	Başarısız
50	25	25	1,0	2	30	500	Başarısız
10	45	45	1,2	-	30	100	Başarılı
15	42,5	42,5	1,2	-	30	100	Başarılı
20	40	40	1,2	-	28	100	Başarılı
25	37,5	37,5	1,2	-	31	100	Başarılı
30	35	35	1,2	-	30	100	Başarısız

kullanılmayan karışımlara göre daha erken ulaşılmıştır.

S/Ç oranı 0,8, 1,0 ve 1,2 olan karışımların viskozite sonuçları, Marsh Hunisi akış deneyi ve Lombardi'nin öngördüğü basit kohezyon plaka ölçer yardımıyla yapılmış ve sırasıyla 18,9, 17,2, 15,2 cP olarak bulunmuştur. SA %2 olan karışımlarda viskozite değerleri daha düşüktür. Süper akışkanlaştırıcının eklenmesi akma gerilmesini ve plastik viskoziteyi azaltmaktadır [25].

S/Ç oranı 0,8 olan ince taneli çimento karışımının, ince kum yüzdesi (İKY) 15 olan granülemetriye sahip numuneye, s/ç oranı 1,0 olan çimento süspansiyonun, İKY 20 olan numuneye, s/ç oranı 1,2 olan çimento süspansiyonun, İKY 25 olan numuneye enjekte olduğu görülmüştür. Yıldız (2007) SA %2 kullanılarak hazırlanan S/Ç oranı 1,0 olan karışımın 300 kPa basıncı altında İKY 30, 400 kPa basınçta İKY 40 olan numunelere nüfuz ederken; 200 kPa enjeksiyon basıncı altında İKY 30, 300 kPa basınçta İKY 40 olan numunelere nüfuz etmediğini saptamıştır [18]. Süper akışkanlaştırıcı kullanımı Rheocem 900 karışımının enjeksiyon performansında iyileşme sağlamaktadır.

5. SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

γ	birim hacim ağırlık
ψ	içsel sürtünme açısı

τ	kayma gerilmesi
ν	kinematik viskozite
η	dinamik viskozite
η'	görünür viskozite
η_p	plastik viskozite
τ_0	başlangıç akma gerilmesi, [kN/m ²]
ΔW	levhaya yapışan enjeksiyon materyali ağırlığı
A	15x15 cm boyutundaki çelik levhanın alanı, [m ²]
c	kohezyon
dv/dz	hız eğimi
g	yerçekimi ivmesi
p	basınç
S/Ç	su çimento oranı
SA	süper akışkanlaştırıcı
V ₁	deneyin başlangıcında numunenin hacmi, [ml]
V _w	Sedimente olan su hacmi, [ml]

6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi BAP 06/2004-19 kodlu ve "İnce taneli çimento enjeksiyonu ile granüler zeminlere enjeksiyon çalışmaları" isimli proje tarafından desteklenmiştir. Yazar, Gazi Üniversitesi BAP Başkanlığı'na teşekkür eder.

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G., **Rheology of Fresh Concrete**, Pitman, London, 1983.
2. Tattersall, G.H., **Workability and Quality Control of Concrete**, Spon, London, 1991.

3. Schwarz, L.G., **Roles of rheology and chemical filtration on injectability of microfine cement grouts**, Doktora Tezi, Northwestern Univeristy, Illionis, 9-32, 1997.
4. Wallner, M., “Propagation of sedimentation stable cement pastes in jointed rock”, **Rock Mechanics and Waterways Construction**, University of Aachen, BRD, 1976.
5. Hassler, L., Hakansson, U., Stille, H., Computer-simulated flow of grouts in jointed rock, **Tunneling and Underground Space Technology**, Cilt 7, No 4, 441– 446, 1992.
6. Eriksson, M., Stille, H., Andersson, J., Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture, **Tunneling and Underground Space Technology**, Cilt 15, No 4, 353– 364, 2000.
7. Banfill, P.F.G., “A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques”, **Magazine of Concrete Research**, Cilt 33, No 114, 37-47, 1983.
8. Littlejohn, G.S., “Design of cement based grouts”, Grouting in geotechnical engineering, **In Proc. of an ASCE Conf.**, New Orleans, New York, 1982.
9. Lombardi, G., “The role of cohesion in cement grouting of rock”, **15th International Congress On Large Dams**, Lausanne, Cilt 3, 235-260, 1985.
10. Deere, D.U., Lombardi, G., “Grout slurries - thick or thin?”, **Issues in dam grouting**, ASCE, New York, 156-164, 1985.
11. Hassler, L., Stille, H., Hakansson, U., “Simulation of grouting in jointed rock”, **In Proc. of the 6.th Int. Congress on Rock Rock Mechanics**, Montreal, Canada, Cilt 2, 943-946, 1987.
12. Hakansson, U., Hassler, L., Stille, H., “A technique for measuring the rheological properties of injected grout”, **Swedish Rock Engineering Research Foundation**, Stockholm, 241:1/91, 1991.
13. Hausmann, M. R., “Modification at depth by grouting”, **Engineering Principles of Ground Modification**, Mc Graw Hill, Singapur, 346-376, 1990.
14. De Paoli, B., Bosco, B., Granata, R., Bruce, D.A., “Fundamental Observations on Cement Based Grouts (1): Traditional Materials”, **Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics**, ASCE, New Orleans, 474-485, 1992.
15. Rheocem 900 Users Manual, **UGC International Division of MBT**, Zurich, 1-2, 2004.
16. Perret, S., Palardy, D., Ballivy, G., “Rheological Behavior and Setting time of microfine cement-based grouts”, **ACI Materials Journal**, Cilt 97, No 4, 472-478, 2000.
17. Mirza, J., Mirza, M.S., Roy, V., Saleh, K., “Basic rheological and mechanical properties of high-volume fly ash grouts”, **Construction and Building Materials**, Cilt 16, 353-363, 2002.
18. Yıldız, B., **Rheobuild 2000 PF Katkılı Rheocem 900 İnce Taneli Çimentonun Değişik Gradasyonlu Kum Numunelere Penetrasyon Yetisi**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
19. Mollamahmutoğlu, M., “Microcem 900 enjeksiyonu temel karakteristikleri”, **İMO Teknik Dergi**, Ankara, 1027-1036, 1995.
20. Banfill, P.F.G., “Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials”, **Construction and Building Materials**, Cilt 8, No 1, 43-44, 1993.
21. ASTM C940, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, **ASTM**, Pennsylvania, 1-3, 2003.
22. Tekin, E., **İnce Taneli Çimento (Rheocem 900) Enjeksiyonu ile Değişik Gradasyonlu Kumların Enjektelerde Edilebilirliği Üzerine Deneysel Çalışmalar**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.
23. ASTM C191, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, **ASTM**, Pennsylvania, 179-184, 2003.
24. ASTM C939, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), **ASTM**, Pennsylvania, 1-3, 2003.
25. Hakansson, U., Hassler, L., Stille, H., “Rheological properties of microfine cement grouts”, **Tunneling and Underground Space Technology**, Cilt 7, No 4, 453-458, 1992.

