

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PORTLAND ÇİMENTOSU**  
**KOMPOZİSYONUNUN AKIŞKANLAŞTIRICI**  
**KATKI PERFORMANSINA ETKİSİ**

**Ahmet Hilmi AYTAÇ**

**Eylül, 2006**  
**İZMİR**

**PORTLAND ÇİMENTOSU  
KOMPOZİSYONUNUN AKIŞKANLAŞTIRICI  
KATKI PERFORMANSINA ETKİSİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

**Ahmet Hilmi AYTAÇ**

**Eylül, 2006**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**Ahmet Hilmi AYTAÇ**, tarafından **Prof. Dr. Kambiz RAMYAR** yönetiminde hazırlanan “**PORTLAND ÇİMENTOSU KOMPOZİSYONUNUN AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI PERFORMANSINA ETKİSİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

---

Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

---

Yönetici

---

Prof. Dr. Bülent BARADAN

---

Jüri Üyesi

---

Doç. Dr. Akın ALTUN

---

Jüri Üyesi

---

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya değerli görüşleri ve tecrübeleriyle yön veren, çalışma süresince engin hoşgörüsünü eksik etmeyen danışman hocam, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Başkanı, Sayın Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim süresince gösterdikleri yakın ilgiden dolayı Sn. Prof. Dr. Bülent BARADAN, Sn. Yrd. Doç. Dr. Selçuk TÜRKEKEL ve Sn. Yrd. Doç. Dr. Şemsi YAZICI'ya teşekkür ederim.

Malzeme temininden raporlama aşamasına kadar, çalışmanın her kademesinde kendisiyle ortak karar aldığım, bu süreç içerisinde görüşleriyle birlikte, özellikle deneysel çalışmalar esnasındaki yardımlarıyla bu çalışmaya katkıda bulunan; kendisiyle çalıştığım 2 yıl içerisinde her konuda yakın ilgisini eksik etmeyen Araş. Gör. Sn. Serdar AYDIN'a çok teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim süresince kendileriyle pek çok şey paylaştığım, bilgi ve tecrübelerinin yanında, samimi dostluklarını da esirgemeyen değerli büyüklerim Dr. Müh. Halit YAZICI, Araş. Gör. Hüseyin YİĞİTER, Araş. Gör. Mert YARDIMCI, Araş. Gör. Burak FELEKOĞLU, Araş. Gör. Ali TOPAL, ve Araş. Gör. Kamile TOSUN'a çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar esnasında ve yardıma ihtiyaç duyduğum daha pek çok konuda beni geri çevirmeyen değerli arkadaşım İnş. Yük. Müh. Yiğit ALTUNTAŞ'a ve yine deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı İnş. Müh. Onur KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma esnasında, laboratuvarlarından faydalanmama imkan tanıyan ve malzeme analizleri konusundaki önemli yardımlarını esirgemeyen ÇİMENTAŞ A.Ş.'ye ve çalışanları; Kalite Kontrol Şefi Sn. Nilüfer AZRAK KARAKAŞ'a, İnşaat Teknikeri

Sn. Ayhan TURAN'a, İnşaat Teknikeri Sn. İlhan AK'a ve tüm laboratuvar personeline, gösterdikleri kolaylıklardan dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Kimyasal katkıların analizi için verdiği destek ve ilgisinden dolayı YKS firması ürün müdürü Sayın İnş. Yük. Müh. Okan DUYAR'a teşekkür ederim.

Çalışma kapsamında, mal ve hizmet alımları konusundaki maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma kapsamında kullanılan çimentoların temin edilmesinde gösterdikleri kolaylıklardan dolayı BATIÇİM, ÇİMENTAŞ, OYAK ÜNYE, ELAZIĞ, AKÇANSA ÇANAKKALE, DENİZLİ, LAFARGE ASLAN, NİĞDE, ÇİMSA, KONYA, AŞKALE, KURTALAN, GÖLTAŞ, SET TRAKYA, SET BALIKESİR, NUH, BATI SÖKE ve BURSA çimento fabrikalarına; yine kimyasal katkıların teminindeki yardımlarından dolayı YKS, CHRYSO, KONSAN ve SİKA A.Ş.' ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi destekleri, gösterdikleri hoşgörü ve anlayış için çok değerli aileme şükranlarımı sunarım.

Hilmi AYTAÇ

# PORTLAND ÇİMENTOSU KOMPOZİSYONUNUN AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI PERFORMANSINA ETKİSİ

## ÖZ

Günümüzde süperakışkanlaştırıcı katkıları, hazır beton endüstrisinin vazgeçilmez unsuru haline gelmiştir. Bu çalışmada, süperakışkanlaştırıcı katkıların çimentonun özelliklerine bağlı olarak gösterdikleri performansın belirlenmesi amaçlanmıştır; çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkı arasındaki etkileşimin, başlangıç akışkanlığı ve kıvam kaybını nasıl etkilediği konusuna açıklık getirilmeye çalışılmıştır.

Deneysel çalışmada, Türkiye'nin çeşitli çimento fabrikalarından temin edilen 18 adet CEMI 42,5, 1 adet SDÇ 32,5 ve 1 adet BPC 42,5 tipi çimento ve farklı firmalarca üretilmiş 4 adet naftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Hazırlanan hamur karışımları üzerinde "Marsh Hunisi" ve "Mini Çökme" deneyleri yapılarak akış süresi ve yayılma değerleri elde edilmiştir. Beton karışımları tek katkı ile hazırlanmış; taze karışımlarda çökme, çökme kaybı ve hava içeriği; sertleşmiş betonda ise farklı yaşlardaki basınç dayanımı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde başlangıç akışkanlığının, çimentonun  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  oranı ve  $C_4AF$  miktarı ile ilgili olduğu görülmüştür.  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  oranının artışı akış sürelerinin azalmasına yol açarken,  $C_4AF$  oranının artışı akış sürelerinin artmasına yol açmıştır. Süperakışkanlaştırıcı özelliklerinin başlangıç akışkanlığı üzerindeki etkisinin, çimento kaynaklı etkilere göre çok önemsiz mertebede olduğu görülmüştür. Kıvam kaybı ise hem çimento hem de süperakışkanlaştırıcıların özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermiştir.  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  oranının göreceli olarak yüksek değerler alması kıvam kayıplarını azaltmıştır. Ayrıca, çimento hamuru ve beton deneyi verileri arasında, başlangıç akışkanlığı açısından çok iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Süperakışkanlaştırıcı, çimento, çimento-süperakışkanlaştırıcı uyumu, Marsh hunisi, mini çökme, kıvam kaybı, basınç dayanımı.

# EFFECT OF COMPOSITION OF PORTLAND CEMENT ON THE PERFORMANCE OF SUPERPLASTICIZER ADMIXTURE

## ABSTRACT

Nowadays, superplasticizer admixtures have become one of the major ingredients of concrete in ready-mixed concrete industry. In this study, it was aimed to determine the performance of superplasticizer admixtures, which in turn depends on the properties of cement. Thus, the effect of cement-superplasticizer interaction on the initial fluidity and the loss of consistency was investigated.

In the experimental study, 18 ordinary Portland cements CEMI 42.5 (from 18 cement plants), a sulfate resistant cement SDC 32.5, a white Portland cement BPC 42.5 and 4 different naphthalene sulfonate based superplasticizer admixtures were used. Flow time and flow diameter values of cement pastes were determined from “Marsh Funnel” and “Mini Slump” tests, respectively. Concrete mixtures were prepared using only one of the admixtures. The slump, slump loss and air content of fresh mixtures as well as the compressive strength of hardened concrete at different ages were determined.

It was concluded that, the initial fluidity of the paste was affected by the  $C_3A/Na_2O_{\text{equivalent}}$  ratio and  $C_4AF$  content of the cement. Increasing in the  $C_3A/Na_2O_{\text{equivalent}}$  ratio reduced the flow time while increasing in  $C_4AF$  content increased the flow time. It was also clearly observed that the effect of properties of superplasticizer on the initial fluidity is negligible compared to that of cement. However, the properties of both cement and superplasticizer were found to be effective on the loss of consistency of the mixtures. Relatively higher  $C_3A/Na_2O_{\text{equivalent}}$  ratio of cement reduced the loss of consistency. It should also be noted that there is a good correlation between the initial fluidity of the pastes and concrete mixtures.

**Keywords:** Superplasticizer, cement, cement-superplasticizer compatibility, Marsh funnel, mini slump, loss of consistency, compressive strength.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	v
ABSTRACT.....	vi
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	3
<b>BÖLÜM İKİ – TAZE BETON ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR.....</b>	<b>4</b>
2.1 Reoloji.....	4
2.2 İşlenebilme.....	6
<b>BÖLÜM ÜÇ – ÇİMENTO VE SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICI KATKILAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....</b>	<b>8</b>
3.1 Portland Çimentosu ve Özellikleri.....	8
3.1.1 C <sub>3</sub> S ve C <sub>2</sub> S.....	9
3.1.2 C <sub>3</sub> A.....	9
3.1.3 C <sub>4</sub> AF.....	12
3.2 Süperakışkanlaştırıcı Katkılar ve Özellikleri.....	12
3.2.1 Süperakışkanlaştırıcı Katkıların Önemi.....	12
3.2.2 Süperakışkanlaştırıcı Tipleri.....	14
3.2.3 Süperakışkanlaştırıcıların Üretimi.....	14
3.2.3.1 Sülfonasyon.....	15



3.2.3.2	Kondensasyon (Polimerizasyon).....	16
3.2.3.3	Nötralizasyon.....	16
3.2.3.4	Filtrasyon.....	17
3.2.4	Süperakışkanlaştırıcıların Etki Mekanizması.....	17
3.2.4.1	Elektrostatik Etki.....	17
3.2.4.1.1	Zeta Potansiyel.....	18
3.2.4.2	Stearik Etki.....	19
3.2.5	Süperakışkanlaştırıcıların Beton Özellikleri Üzerine Etkisi.....	21
3.2.5.1	Süperakışkanlaştırıcıların Taze Haldeki Özellikler Üzerine Etkisi.....	21
3.2.5.1.1	Su Azaltma.....	21
3.2.5.1.2	Çökme ve Çökme Kaybı.....	21
3.2.5.1.3	Priz Süresi.....	23
3.2.5.1.4	Hava Sürüklenme.....	24
3.2.5.1.5	Ayrışma.....	24
3.2.5.1.6	Kanama.....	24
3.2.5.1.7	Pompalanabilme.....	24
3.2.5.2	Süperakışkanlaştırıcıların Sertleşmiş Haldeki Özellikler Üzerine Etkisi.....	25
3.2.6	Süperakışkanlaştırıcının Eklenme Metodu.....	26

## **BÖLÜM DÖRT – ÇİMENTO - SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICI KATKI**

### **UYUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....27**

4.1	Çimentodan Kaynaklanan Etkiler.....	27
4.1.1	Kimyasal Kompozisyon.....	27
4.1.2	İncelik.....	32
4.1.3	Kalsiyum Sülfatın Miktarı ve Formu.....	33
4.1.4	Alkali Etkisi.....	38
4.1.5	Öğütmeyi Kolaylaştırıcı Katkı Maddelerinin Etkisi.....	41
4.2	Süperakışkanlaştırıcıdan Kaynaklanan Etkiler.....	41

4.2.1 Katkı Kökeni, Moleküler Ağırlık, Sülfonasyon ve Polimerizasyon Derecesi.....	42
4.2.2 Counter-Ion (Karşıt İyon) Kökeni.....	45
4.2.3 Süperakışkanlaştırıcının Çimento Bileşenleri Üzerinde Tutunma Oranı.....	46
4.2.4 Süperakışkanlaştırıcının Eklenme Zamanı.....	48
4.2.5 Sıcaklık.....	49

## **BÖLÜM BEŞ – ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER..... 50**

5.1 Marsh Hunisi Deneyi.....	50
5.2 Mini Çökme Deneyi.....	53

## **BÖLÜM ALTI – DENEYSEL ÇALIŞMA..... 54**

6.1 Malzeme Özellikleri.....	55
6.1.1 Çimento.....	55
6.1.2 Kimyasal Katkı.....	55
6.1.3 Agrega.....	55
6.2 Hamur Deneyleri.....	58
6.2.1. Deney Yöntemi.....	59
6.3 Beton Deneyleri.....	61
6.3.1 Deney Yöntemi.....	61

## **BÖLÜM YEDİ– BULGULAR VE TARTIŞMA..... 63**

7.1 Çimento İnceliğinin Başlangıç Akışkanlığına Etkisi.....	63
7.1.1 Marsh Hunisi Deney Sonuçları.....	64
7.1.2 Mini Çökme Deneyi Sonuçları.....	64
7.1.3 Sonuç.....	65
7.2 Çimento Kompozisyonunun Başlangıç Akışkanlığına Etkisi.....	66

7.3 Kullanılan Katkının Başlangıç Akışkanlığına Etkisi.....	108
7.4 Başlangıç Akışkanlığı Açısından Marsh Hunisi Verilerinin Mini Çökme Verileriyle Uyumu.....	112
7.5 Çimento Kompozisyonunun Kıvam Kayıpları Üzerindeki Etkisi.....	114
7.6 Kullanılan Katkının Kıvam Kaybına Etkisi.....	123
7.7 Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	123
7.8 Marsh Hunisi ve Mini Çökme Deneyi İçin Farklı Zamanlarda Yapılan Ölçümlerin Karşılaştırılması.....	126
<b>BÖLÜM SEKİZ–SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>129</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>131</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>145</b>

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Beton, çimento, agrega, su ve katkıların biraraya gelerek oluşturdukları kompozit bir malzemedir. Agregalar beton hacminin önemli bir bölümünü (%70-75) oluşturmalarına rağmen, sistemdeki aktif bileşenin, esas olarak çimento hamuru olduğu söylenebilir. Çünkü betonun özellikleri ve performansı büyük oranda çimento hamuru tarafından kontrol edilir. Betonda kullanılan kimyasal katkı malzemelerinin, prizi kontrol etme, hava sürüklenme, su azaltma, işlenebilmeyi artırma vb. gibi yararlı etkileri de, bu malzemelerin asıl olarak çimento hamuru üzerindeki etkileri sonucunda ortaya çıkar (Ramachandran, 1995).

Beton içerisine su, çimento ve agreganın dışında, karıştırmanın hemen öncesinde ya da karıştırma esnasında katılan malzemeler “katkı” olarak tanımlanır. Beton teknolojisinde kullanılan katkılar içerisinde, suda çözünebilir kimyasal katkılar çok önemli yer tutar. Günümüzde en sık kullanılan kimyasal katkılar ise süperakışkanlaştırıcılardır (Ramachandran, 1995).

Katkılar, serbest halde, katı veya çözelti olarak kalabilir, yüzey ile etkileşime girebilir veya çimento hamuru ya da çimento bileşenleri ile birleşebilir. Etkileşimin tipi ve boyutu, su ihtiyacı, hidrasyon ısı, oluşan hidrasyon ürünlerinin kompozisyonu, priz süresi, mikroyapı, dayanım ve durabilite gibi betonun fiziko-kimyasal ve mekanik özelliklerini etkileyebilir. Etkileşimin sebebinin anlaşılması; taze ve sertleşmiş beton özellikleri açısından katkı seçiminde yeni yöntemlerin geliştirilmesi, betonda kullanılacak iki veya daha fazla katkı arasındaki uyumun anlaşılması, beton özelliklerinin tahmin edilmesi, problemlerin giderilmesi, daha kaliteli beton üretimi, yeni tip katkıların geliştirilmesi ve atık malzemelerin daha iyi değerlendirilmesi gibi önemli ilerlemelerin ortaya çıkmasını sağlayabilir (Ramachandran, 1995).

Akışkanlaştırıcı katkı kullanılmadan üretilen, göreceli olarak daha yüksek su/çimento (s/ç) oranına sahip olan betonların reolojik özellikleri, karışım suyu

miktarı, çimentodaki kalsiyum sülfatın farklı formları ve çimentonun reaktivitesi tarafından kontrol edilir. Bu tip betonlarda çökme kaybı problemi göreceli olarak daha az ortaya çıkar. Bunun yanında, son yıllarda, betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı, hazır beton sektöründe geniş kullanım alanı bulan kimyasal katkıların, özellikle de akışkanlaştırıcıların kullanımı, betonun reolojik özellikleri üzerinde önemli rol oynar. Bazen süperakışkanlaştırıcı katılarak hazırlanan, göreceli olarak daha düşük s/ç oranına sahip yüksek performanslı betonlarda, yüksek başlangıç akışkanlığı kısa sürer ve hızlı çökme kaybı meydana gelir. Bu durumda, kullanılan çimento ve akışkanlaştırıcının reolojik olarak uyumsuz olduğu söylenebilir. Katkılı betonda reolojik özellikler, katkı dozajının yanında, çimento ve katkı arasındaki etkileşimden büyük ölçüde etkilenir (Kim, 2000).

Huynh (1996), süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı yüksek performanslı betonların reolojisinin, çimento, süperakışkanlaştırıcı veya bunların etkileşimi ile ilgili birçok parametreden etkilendiğini söylemiştir (Jiang ve diğer., 1999). Buna göre:

- çimentonun kimyasal ve faz bileşimi, özellikle  $C_3A$  ve alkali içeriği,
- çimentonun inceliği,
- çimentodaki kalsiyum sülfatın miktarı ve tipi,
- süperakışkanlaştırıcının kimyasal yapısı ve ortalama molekül ağırlığı,
- süperakışkanlaştırıcının sülfonasyon derecesi ve counter-ion<sup>1</sup>'un kökeni,
- süperakışkanlaştırıcının dozajı ve ekleme metodu

gibi özellikler beton reolojisini etkileyebilmektedir. Bu sonuçlar Hanna ve diğer. (1989) tarafından da desteklenmiştir. Araştırmacılar, çimentoyla ilgili olarak,  $C_3A$  ve  $C_4AF$  içeriği,  $C_3A$ 'nın kendi morfolojik yapısı ile klinkerin sülfürizasyon derecesine bağlı olarak ortaya çıkan reaktifliği ve kalsiyum sülfatın içeriği ve formunun; süperakışkanlaştırıcı ile ilgili olarak da, moleküler zincir uzunluğu ile bu zincirdeki sülfonat grubu pozisyonunun, uyumu etkileyen parametreler olduğunu söylemiştir (Aitcin ve Neville, 1993).

---

<sup>1</sup> counter-ion: Kimyasal katkının yapısındaki  $Mg^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^+$ ,  $H^+$  vb. “+” yüklü iyonlar.

Katkı-çimento uyumuyla ilgili pek çok çalışma yapılmasına rağmen, akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan çimento hamuru ya da betonun reolojik davranışını tahmin etmek, yine de kolay değildir. Bunun sebebi ise katkı-çimento etkileşiminin pek çok parametreden etkilenmesi ve bu etkileşimin henüz tam olarak anlaşılammış olmasıdır (Kim, 2000).

### **1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Ülkemizde ve dünyada en yaygın şekilde kullanılan naftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı ve Portland çimentosu (CEM I 42,5) arasındaki etkileşimin ortaya konulması, çalışmanın asıl amacıdır. Çalışma kapsamında uyumsuzluğa neden olan parametre ya da parametreler belirlenmeye çalışılmış tır.

Günümüzde kimyasal katkı kullanılmadan beton üretimi neredeyse gerçekleştirilmemektedir. Bununla birlikte, hazır beton sektörünün en önemli problemlerinden birisi, kimyasal katkı-çimento uyumsuzluğudur. Etki mekanizmasının tam olarak ortaya çıkarılamamasındaki en önemli sebep, yapılan araştırmalarda kullanılan çimento ve katkı sayının oldukça az olmasıdır. Genellikle tek katkı kullanılmış ve çimento tipi değişken olarak alınmıştır. Ya da tek bir çimento kullanılarak, katkı değişken olarak seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında, etki mekanizması, farklı kimyasal kompozisyona sahip 20 adet çimento ve farklı firmalarca üretilmiş 4 adet akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma hem çimento hamuru hem de beton üzerinde gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM İKİ

### TAZE BETON ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

Ülkemizde yapılan yapıların büyük çoğunluğu betonarme olarak yapılmaktadır. Bu yapıların projelendirme aşamasında betonun dayanım özelliği çok ön planda da olsa, aslında betonun dayanımı ve dayanıklılığı taze haldeki özelliklerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu yüzden betonun taze haldeki özellikleriyle ilgili temel kavramları bilmekte fayda vardır. Aşağıda betonun taze haldeki özellikleriyle ilgili temel bilgiler verilmiştir.

#### 2.1 Reoloji

Reoloji, malzemenin deformasyon ve akış özelliklerini inceleyen bilim dalı olarak tanımlanır (Hackley ve Ferraris, 2001). Reolojik özellikler s/ç oranı, çimento tipi, çimentonun özgül yüzey alanı, karıştırma prosedürü, karıştırmadan sonra geçen süre ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Ramachandran, 1995).

Akışkanlar, uygulanan kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ve deformasyon oranı ( $d\gamma/dt$ ) arasındaki ilişkiden ortaya çıkan akış eğrileriyle karakterize edilirler (Griesser, 2002). Su gibi newtonyen akışkanlarda, kayma gerilmesi ve deformasyon oranı arasında doğrusal bir ilişki vardır ve akış davranışı tek parametreye (plastik viskozite) bağlı olarak belirlenir (Denklem 2.1). Bu durumda kayma gerilmesi:

$$\tau = \eta * (d\gamma/dt) \quad (\text{Denklem 2.1})$$

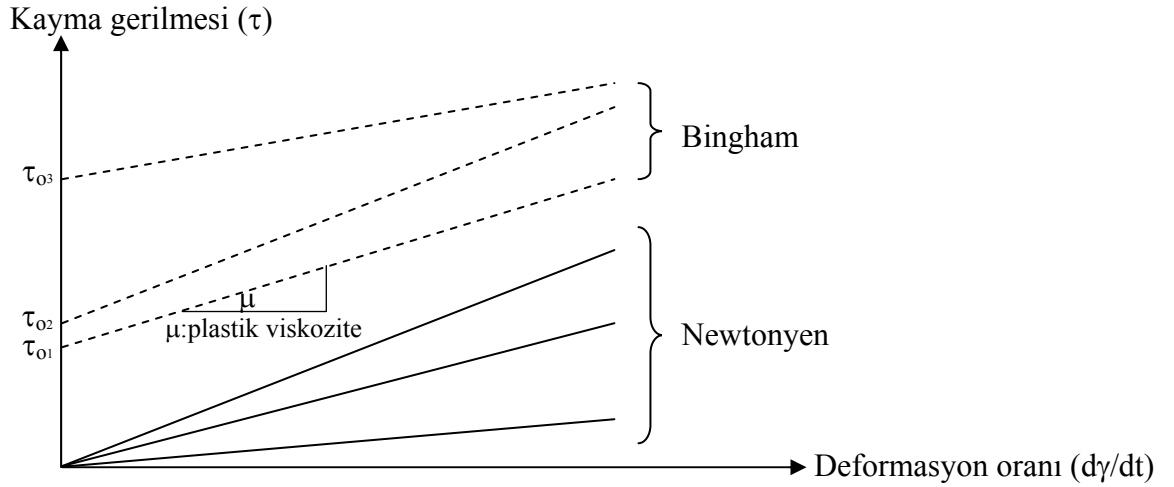
olarak tanımlanır. Burada “ $\eta$ ”, viskozite katsayısını ifade etmektedir.

Bununla birlikte pek çok akışkan (örneğin beton), newtonyen davranış sergilemez ve dolayısıyla bunların akışkanlık davranışını belirlemek için tek parametreye bağlı bir model kurmak doğru olmaz (Griesser, 2002).

En fazla kabul gören iki parametrelili reolojik model, Bingham modelidir. Bingham modelinde bu iki parametre, eşik kayma gerilmesi ( $\tau_0$ ) ve plastik viskozite ( $\mu$ ) olarak tanımlanmıştır (Denklem 2.2). Eşik kayma gerilmesinin hemen üzerindeki bir gerilme değerinde malzeme akışkanlık kazanır. Diğer bir deyişle bu gerilmenin altında, malzeme katı gibi davranmaktadır (Hackley ve Ferraris, 2001). Plastik viskozite ise, malzemenin eşik kayma gerilme değerini aştıktan sonra, akışa karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Bingham modeli viskoplastik davranışı temsil eden bir model olarak öngörülebilir. Çimento hamuru, harç ve beton, viskoplastik davranış gösteren akışkanlardır. Kendiliğinden yerleşen beton gibi özel betonlar ise genel olarak daha kompleks modeller gerektirmektedir (Ferraris, 1999). Şekil 2.1’de Bingham modeli ve Newtonyen davranışa ait tipik kayma gerilmesi-deformasyon oranı ilişkileri görülmektedir.

$$\tau = \tau_0 + \mu * (dy/dt)$$

(Denklem 2.2)



Şekil 2.1 Tipik kayma gerilmesi-deformasyon oranı ilişkileri

Reolojik incelemede çimento pastası, harç ve beton, en iyi şekilde Bingham modeli ile temsil edilir (Akman, 1999).

Betonun reolojik özellikleri ya da akış halindeki davranışı, üretimden sonraki aşamalarda pompalanabilme, yerleştirilebilme ve sıkıştırılabilmeyi; sertleşmiş halde



ise dayanım ve dayanıklılığı etkilemesi açısından büyük öneme sahiptir (Ferraris, 1999).

Agrega ve hamur fazından oluşan beton karışımında, katkılar, asıl olarak çimento hamurunun akış özelliklerini etkiler. Dolayısıyla mineral ya da kimyasal katkı seçimine yönelik deneylerin sadece hamur üzerinde yapılması mantıklı gözükabilir. İdeal olarak, deney sonuçlarının betonun işlenebilme özellikleriyle ilişkili olması beklenir. Ancak şimdiye kadar hamur ve beton reolojileri arasında tam bir ilişki henüz elde edilememiştir. Bunun sebebi ise, hamur deneyleri verilerinin, hamurun beton içerisindeki davranışının tecrübe edilmesiyle değil, betondan ayrık bir şekilde gerçekleştirilen deneylerden elde edilmiş olmasıdır. Dolayısıyla hamurda ölçülen reolojik parametreler betondan elde edilen parametrelerle örtüşmeyebilir (Ferraris ve diğer., 2001)

Süperakışkanlaştırıcılar (SA) reolojik davranışı önemli ölçüde etkiler. SA eklenmesiyle karışımın eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitesi azalır (Ramachandran, 1995). Banfill'in (1979) yaptığı çalışmada %0,8 sülfone naftalin formaldehit kondansesi (SNF) ilavesinde, eşik kayma gerilmesi neredeyse sıfır değerini almıştır (Ramachandran, 1995).

Pratik açıdan bakıldığında yüksek performanslı beton üretiminde, hedeflenen dayanımı yakalamak, reolojinin kontrol edilmesinden çok daha kolay olmaktadır (Aİtçin, 2004).

## 2.2 İşlenebilme

Taze betonun “kolayca karılabilmesi, ayrışma yapmadan taşınabilmesi, yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilebilmesi”, betonun ne ölçüde işlenebilir olduğunun bir göstergesidir. Bu nedenle, bu özelliklerin tümü “işlenebilme” adı altında tek bir özellik olarak ifade edilmektedir (Erdoğan, 2003).

İşlenebilme, taze betonun en önemli özelliğidir. Yeterli işlenebilmeye sahip olmayan beton, sertleştiğinde yeterli dayanımı ve dayanıklılığı gösteremez (Erdoğan, 2003).

İşlenebilme özelliği, beton içerisindeki her bileşenden ve üretim esnasındaki her türlü koşuldan etkilenir. Bunlar çimento özellikleri ve miktarı, su miktarı, agrega gradasyonu, ince ve kaba agreganın tane şekli ve yüzey yapısı, sürüklenmiş hava miktarı, kimyasal ve mineral katkıların tipi ve miktarları, ortam sıcaklığı ve beton karışımının sıcaklığı, karıştırma prosedürü ve betonun, karıldığı andan kıvamının ölçüleceği ana kadar geçen süre olarak sıralanabilir (Wong ve diğer., 2001).

Basit ve kolayca uygulanabilir bir deney yöntemi olmasından dolayı, çökme deneyi taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla kullanılan deney yöntemleri arasında en popüler olanıdır (Erdoğan, 2003). Çökme deneyi asıl olarak betonun tek bir reolojik parametresiyle (eşik kayma gerilmesi) korelasyon gösterir. Ancak çökme deneyi, beton için diğer önemli reolojik parametre olan plastik viskozite hakkında bir fikir vermez (Wong ve diğer., 2001). Tek parametreye bağlı olarak gerçekleştirilen bu deney “tek parametrelili” ya da “tek noktali” deney olarak ifade edilmektedir. Tek noktali deneyler gerçekleştirilirken dikkatli olunmalıdır, çünkü bu deneyler betonun akışkanlık özelliğini tam olarak yansıtmaz (Griesser, 2002).

Çökme deneyi statik bir deneydir ve işlenebilmeyi ölçmez. Ancak bu deney yöntemiyle işlenebilme hakkında önemli bir fikir elde edilebilir (Wong ve diğer., 2001).

Reometreler betonun akma davranışı hakkında daha iyi fikir vermektedir. Bunlar hem eşik kayma gerilmesi hem de plastik viskoziteyi ölçmede kullanıldıkları için “iki noktali” ya da “iki parametrelili” deneyler olarak bilinir. Fakat reometreler genel olarak boyutlarının büyük olması ve ağırlıkları nedeniyle pratikte pek kullanılmazlar. Üstelik bu deneyler tek noktali deneylere göre çok daha fazla vakit almaktadır. Bununla birlikte beton karışımlarının optimizasyonu için reometreler oldukça önemli bilgiler sağlar (Griesser, 2002).

## BÖLÜM ÜÇ

### ÇİMENTO VE SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICI KATKILAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Çimento ve katkı arasındaki etkileşimi daha iyi anlayabilmek için bu iki malzemenin özelliklerinin bilinmesinde fayda vardır. Aşağıda çimento ve süperakışkanlaştırıcılara ait genel bilgiler verilmiştir.

#### 3.1 Portland Çimentosu ve Özellikleri

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve “klinker” olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilen bir üründür. Bu ürün su ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanır (Erdoğan, 2003).

Çimento üretiminde kullanılan klinkerin hammaddeleri kalkerli ve killi malzemelerdir. Kalker ( $\text{CaCO}_3$ ), yüksek sıcaklığa maruz kaldığında ( $900\text{ }^\circ\text{C}$ ), sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) ve karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) olarak ayrışır. Kalkerli malzemeleri çoğunlukla saf olarak bulmak mümkün olmayabilir. Çok büyük miktarı  $\text{CaCO}_3$ 'den oluşan kalkerin içerisinde bir miktar da magnezyum karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) bulunabilmektedir.  $\text{MgCO}_3$ , yüksek sıcaklık etkisinde  $\text{MgO}$  ve  $\text{CO}_2$  olarak ayrışır (Erdoğan, 2003).

Killi malzemeler ise esas olarak silika ve alümin'den oluşmaktadır. Kil yüksek sıcaklığa maruz kaldığında ( $\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ ), silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) olarak ayrışır. Killerde çok küçük miktarlarda demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve başka yabancı maddeler de bulunabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Pişirilme işlemine tabi tutulacak hammadde karışımında uygun oranlarda  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gibi oksitlerin yer almış olması gerekmektedir. Hammadde karışımının döner fırınlarda pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan ve klinkerin yapısını

oluşturan ana bileşenler Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Çimentonun yapısını oluşturan ana bileşenler klinkerdeki bileşenlerin aynısıdır (Erdoğan, 2003).

Tablo 3.1 Çimentonun ana bileşenleri

Ana bileşenler	Çimento kimyasına göre sembolü
Dikalsiyum silikat, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Trikalsiyum silikat, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Trikalsiyum alüminat, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Tetrakalsiyum alüminoferrit, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Çimento ve su birleştiği anda her ana bileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona (hidratasyon) girmekte ve bu reaksiyonlar etkisiyle çimento hamuru katılaşmakta (priz almakta) ve sertleşmektedir (dayanım kazanmaktadır). Aşağıda çimentonun ana bileşenleri ile ilgili kısaca bilgi verilmiştir.

### 3.1.1 $\text{C}_3\text{S}$ ve $\text{C}_2\text{S}$

$\text{C}_3\text{S}$  ve  $\text{C}_2\text{S}$ ’in su ile yaptığı reaksiyonlar aşağıdaki denklemlerle gösterilmektedir:



Bu denklemlerde “H” suyu ( $\text{H}_2\text{O}$ ); “CH” ise sönmüş kireci ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) simgelemektedir. “ $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ”, “tobermorit” olarak adlandırılmaktadır ve sistemdeki asıl bağlayıcılık özelliği bu ürün tarafından sağlanır. Gerek  $\text{C}_3\text{S}$ , gerekse  $\text{C}_2\text{S}$ ’in hidratasyonu sonucu oluşan ürünlerin türü aynıdır (Erdoğan, 2003).

### 3.1.2 $\text{C}_3\text{A}$

Portland çimentosundaki  $\text{C}_3\text{A}$  miktarı ortalama olarak %4-11 arasında değişir.  $\text{C}_3\text{A}$ , hidratasyonun ilk zamanlarındaki reaksiyonları önemli ölçüde etkiler (Ramachandran, 1995).

$C_3A$ 'nın suyla reaksiyona girmesiyle birlikte termodinamik açıdan kararsız, hekzagonal yapıdaki  $C_2AH_8$  ve  $C_4AH_{13}$  oluşur (Denklem 3.3). Bunlar kısa süre sonra, kararlı kübik yapıdaki  $C_3AH_6$ 'ya dönüşür (Denklem 3.4). Bu yapı  $80\text{ }^\circ\text{C}$  ve üzerindeki sıcaklıklarda doğrudan  $C_3A$ 'nın hidrate olmasıyla da oluşabilir (Denklem 3.5) (Ramachandran, 1995).

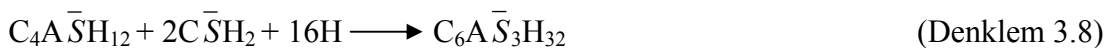


$C_3A$ 'nın su ile yaptığı reaksiyonlar çok hızlı gerçekleştiğinden çimento hamurunun "ani priz" yapmasına sebep olur. Ani priz sonucunda çimento hamuru derhal katılaşma gösterdiği gibi, önemli sayılabilecek bir dayanım da kazanmaz (Erdoğan, 2003).

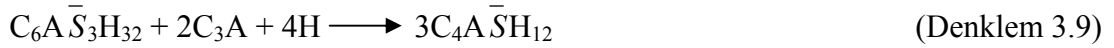
Çimentonun ani prizini kontrol altına alabilmek amacıyla klinkere bir miktar (%3-6) alçıtaşı ( $C\bar{S}H_2$ ) katılmakta ve bu iki malzeme birlikte öğütülmektedir.  $C_3A$ , alçıtaşı ve suyun reaksiyonu Denklem 3.6 ve Denklem 3.7'de verilmiştir.



$C_4A\bar{S}H_{12}$  (kalsiyum alümina monosülfohidrat-monosülfat) ürünü yarı kararlı özelliktedir ve daha fazla sülfatın bulunduğu bir ortamda  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$  durumuna dönüşebilmektedir (Denklem 3.8) (Erdoğan, 2003).



$C_6A\bar{S}_3H_{32}$ , "etrenjit" olarak da bilinir. Ortamdaki alçıtaşı tükendiğinde sistemdeki  $C_3A$  henüz tükenmemişse, kalan  $C_3A$  etrenjitle reaksiyona girerek tekrar monosülfata dönüşür (Denklem 3.9) (Ramachandran, 1995).



$C_3A$ , çimento içerisinde farklı polimorfik formlarda bulunabilir. Regourd (1978),  $C_3A$ 'nın içerisinde hapsolmuş bulunan  $Na^+$  iyonlarının %2,4'den az olması halinde kübik, %2,4-5,3 arasında bulunması halinde ortorombik, %5,3'den fazla olması halinde ise monoklinik yapının oluştuğunu söylemiştir (Aİtcin, 2004).  $C_3A$ 'nın içerisinde hapsolmuş olan  $Na^+$  iyonlarının miktarı, fırındaki  $Na^+/SO_3^-$  dengesine bağlıdır. Grzeszczyk (1994) ve Miller ve Tang (1996), özellikle sülfür açısından zengin olan yakıt kullanıldığında, ortamda aşırı miktarda bulunan  $SO_3$ 'ün hızlı bir şekilde alkalilerle reaksiyona girerek ilk alkali sülfatları oluşturduğunu söylemiştir. Bu durumda,  $C_3A$ 'nın içerisine girme eğiliminde olan  $Na^+$  iyonları azaldığından,  $C_3A$  kübik formda kristalleşir. Bu durumun tam aksine, eğer alkali miktarı  $SO_3$  miktarından fazla ise, çok sayıdaki  $Na^+$  iyonları  $C_3A$ 'nın içerisine girer ve  $C_3A$  ortorombik formda kristalleşir (Aİtcin, 2004).

Ticari çimentolardaki  $C_3A$ , genel olarak kübik ve ortorombik yapının karışımı olarak bulunmaktadır.  $C_3A$ 'nın kristal yapısı, süperakışkanlaştırıcının varlığında, özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda reolojik açıdan büyük önem taşımaktadır (Aİtcin, 2004). Kübik formda olan  $C_3A$ , sülfat iyonlarıyla hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve üzerinde oluşan etrenjit tabakası sonraki hidrasyon sürecini yavaşlatır. Böylece, çimento hidrasyonunun durgunluk devresinde çok fazla kıvam kaybı gerçekleşmeden betonun taşınması ve yerleşmesi mümkün olur. Ortorombik yapıda olan  $C_3A$  ise, kübik forma göre biraz daha yavaş bir tepkime gösterir ve sürekli devam eden iğne şekilli etrenjit oluşumuna neden olur. Ancak bu etrenjit yapısı kübik formdaki durumun aksine sıkı bir tabaka değil, gevşek bir ağ şeklinde kendini gösterir (Aİtcin, 2004).

Odler ve Wonnemann (1983),  $SO_3$ 'ün yokluğunda,  $Na_2O$  ve  $K_2O$ 'nun klinkerdeki  $C_3A$  fazının içine girerek yapısını değiştirdiğini (kübik formdan ortorombik yapıya dönüştürdüğünü) söylemiştir.  $C_3A$ 'nın içine  $Na_2O$ 'nun girmesi durumunda hidrasyonun yavaşladığı,  $K_2O$  girmesi durumunda ise hızlandığı belirtilmiştir.

### 3.1.3 $C_4AF$

$C_4AF$  bileşeninin hidratasyonu,  $C_3A$ 'nın hidratasyonuna benzemektedir.  $C_3A$ 'nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demiroksit almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum alümina sülfhidrat ürünleri,  $C_4(A,F)\bar{S}H_{12}$  ve  $C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$  kompozisyonuna sahip olmaktadır (Erdoğan, 2003).

## 3.2 Süperakışkanlaştırıcı Katkılar ve Özellikleri

Yüksek performanslı betonlarda dayanım, dayanıklılık ve işlenebilme özelliklerinin normal betondan daha yüksek olması beklenmektedir. Yüksek performanslı beton üretiminde ana hedef kısaca, s/ç oranı veya su/bağlayıcı (s/b) oranını üretim sırasında olabildiğince düşük tutmaya çalışmaktır. İkinci önemli hedef ise, betonu ayrışma ve boşluk olmadan kolayca yerine yerleştirmektir. Bu iki istek klasik beton teknolojisindeki en önemli çelişkidir. Ancak yüksek oranda su azaltıcılar veya diğer deyişle süperakışkanlaştırıcıların (SA) icat edilmesi ile bu çelişki ortadan kalkmıştır. Bundan dolayı, yüksek performanslı betonların temel katkısının SA'lar olduğu söylenebilir (Akman, 1999).

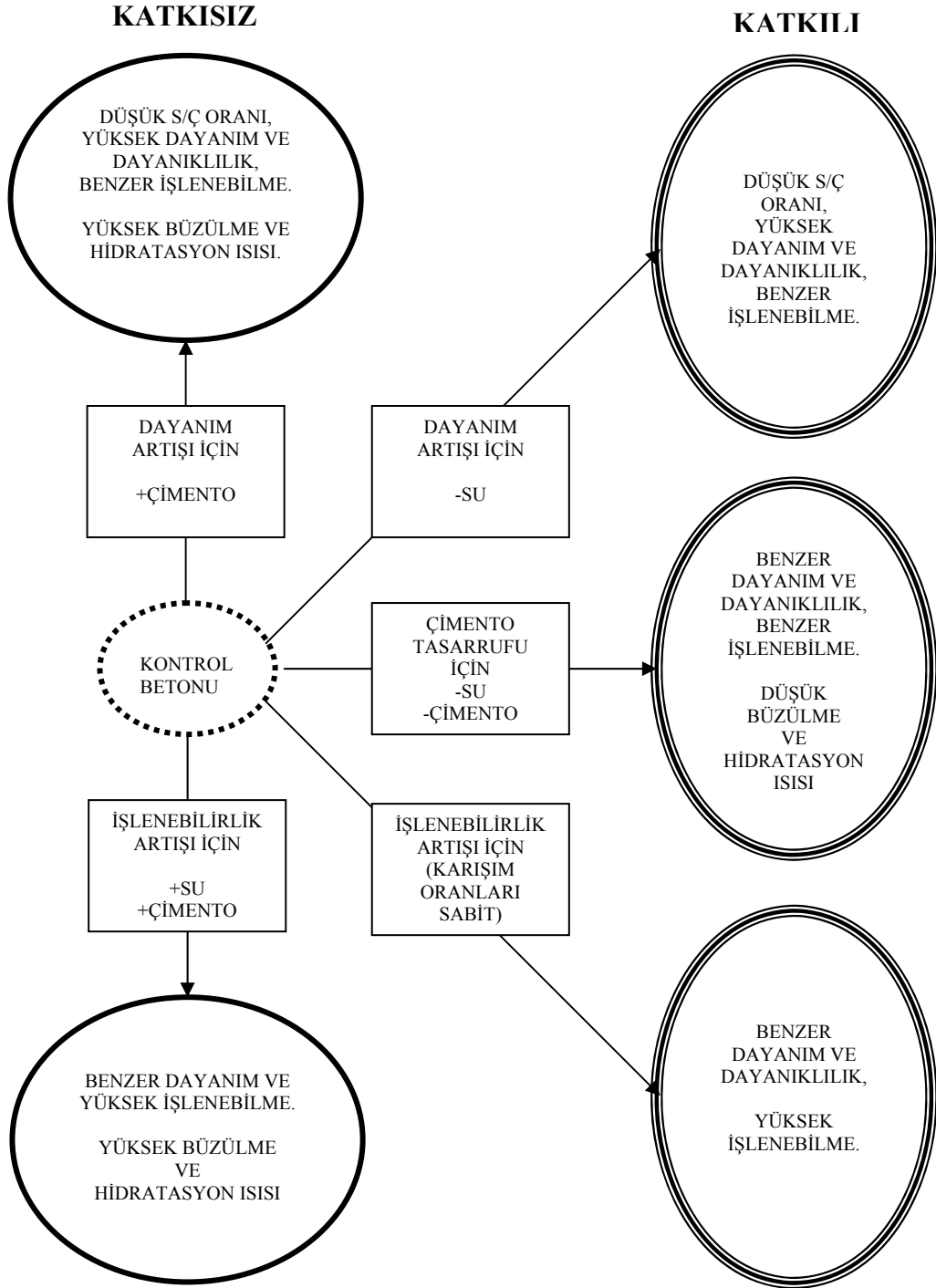
### 3.2.1 Süperakışkanlaştırıcı Katkılarının Önemi

Son 30 yıl içerisinde beton teknolojisinde kaydedilen en önemli ilerleme, süperakışkanlaştırıcı katkıların kullanılmasıdır. SA'ları diğer kimyasal katkılardan ayıran en önemli özellik ise çok fonksiyonlu iyileşme sağlamalarıdır (Şekil 3.1) (Collepari, 2005).

Sabit bir işlenebilme değerinde, SA'ların su azaltıcı olarak kullanılması durumunda, s/ç oranının azalması dolayısıyla kapiler boşluk ve geçirimsizlik azalır. Böylece dayanım ve dayanıklılıkta artış sağlanır (Collepari, 2005).

Süperakışkanlaştırıcı kullanıldığında, su ve çimento azaltılarak, dayanım ve işlenebilme özelliklerinde değişim olmaksızın çimento tasarrufu yapılabilir. Ayrıca çimentonun azaltılması sayesinde hidratasyon ısı azalır. Katkının bu amaçla

kullanımı, özellikle sıcak iklimlerde ve kütle beton uygulamalarında oldukça yararlı olabilir. Ayrıca çimentonun ve suyun azalması ve dolaylı olarak, azalan hamur hacminin yerini agreganın alması sayesinde agrega/çimento oranı artar ve böylece büzülme azalır (Collepari, 2005).



Şekil 3.1 Süperakışkanlaştırıcıların betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisi



Kontrol karışımının bileşenlerine hiç müdahale edilmeden süperakışkanlaştırıcı eklenmesi durumunda ise dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde değişme olmadan, işlenebilmede artış gözlenir (Collepari, 2005).

Katkı kullanılmadığı durumda dayanım artışı sağlamak için çimento ilavesi gereklidir. Dayanım kaybı olmadan işlenebilmede artış sağlamak amacıyla ise hem çimento hem su ilavesi gerekir. Her iki durumda da çimento içeriğinin artması yüksek büzülme ve hidrasyon ısısına neden olur (Collepari, 2005).

### ***3.2.2 Süperakışkanlaştırıcı Tipleri***

Aİtcin (2004), SA'ların 4 ana bölüme ayrıldığını söylemiştir. Bunlar:

1. Polinaftalin sülfonatlar (sülfone naftalin formaldehit kondansesi-SNF)
2. Polimelamin sülfonatlar (sülfone melamin formaldehit kondansesi-SMF)
3. Modifiye lignosülfonatlar (MLS)
4. Poliakrilat ve Polikarboksilatlar (PC)

olarak sıralanabilir.

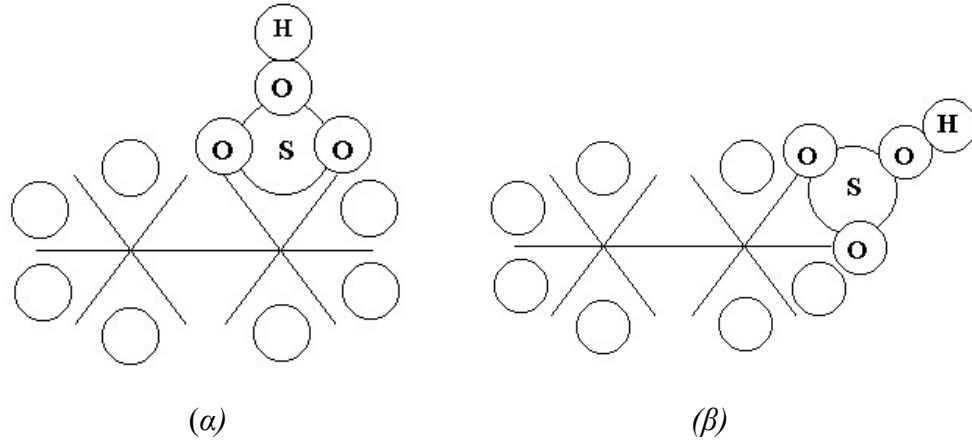
### ***3.2.3 Süperakışkanlaştırıcıların Üretimi***

Aynı kökene sahip olan SA'lar birbirlerinden daha iyi ya da daha kötü performans gösterebilir. Lahalih ve diğer. (1988), bunun nedenini anlamak ve SA'ların beton içerisinde nasıl bir mekanizmaya sahip olduğunu belirlemek amacıyla, bunların nasıl üretildiğinin bilinmesi gerektiğini söylemiştir (Aİtcin, 2004).

Aşağıda SNF esaslı SA'nın üretim aşamaları hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

### 3.2.3.1 Sülfonasyon

Bu aşamada naftalin ve sülfürik asit, ısıtılan reaktörde uygun oranlarda karıştırılır. Asidik sülfonat grubu ( $\text{HSO}_3$ ) naftalin molekülüne 2 farklı pozisyonda bağlanır. Saat 12 yönünde bağlanması durumunda “ $\alpha$ ”, saat 2 yönünde bağlanması durumunda ise “ $\beta$ ” pozisyonu olarak adlandırılır (Şekil 3.2) (Aİtcin, 2004).



Şekil 3.2 Sülfonat grubunun  $\alpha$  ve  $\beta$  pozisyonunda bağlanması

Sülfonat grubunun  $\beta$  pozisyonu olarak bağlanması SA molekülünü daha verimli yapar. Dolayısıyla katkı üreticilerinin, üretim esnasında sülfonat grubunun max. sayıda  $\beta$  pozisyona sahip olmasını sağlamak amacıyla termodinamik parametreleri ayarlamaları gerekmektedir. Ancak tüm sülfonat gruplarının hepsinin  $\beta$  pozisyonunda bağlanması hemen hemen imkansızdır. Üretim esnasındaki kontrol iyi değilse toplam sülfonat gruplarının %50'si  $\beta$  pozisyonunda bağlanır. Kontrolün iyi olması durumunda ise bu değer %85-90 olabilmektedir. Sülfonat grubunun  $\alpha$  ya da  $\beta$  pozisyonu, manyetik rezonans yöntemiyle belirlenir (Aİtcin, 2004).

Sülfonasyondaki diğer önemli nokta ise molekül üzerinde sülfonatlaşmış olan alanların sayısıdır. Teorik olarak her bir naftalin molekülünde, her bir karbon halkasında 1 tane olmak üzere, 2 adet alan olmasına karşın, pratikte hemen hemen sadece 1 tane alan sülfone olur. Sülfonatlaşmış grup sayısının polimerde mevcut olan pozisyon sayısına oranının 0,90-0,95 civarında olması durumunda sülfonasyonun mükemmel yakın olduğu söylenebilir (Aİtcin, 2004). Hsu ve diğer. (2000) de benzer

şekilde, sülfonasyon derecesini “sülfür/karbon” oranı olarak tanımlamış; bu oranın, molekül içerisindeki sülfonatlaşmış grup sayısını temsil ettiğini söylemiştir.

### 3.2.3.2 Kondensasyon (Polimerizasyon)

Naftalin gruplarının polimerizasyonu 2 naftalin grubu ve 1 formaldehit molekülü arasındaki kondensasyon reaksiyonu ile gerçekleştirilir. Molekül zincirlerini mümkün olduğu kadar uzun tutabilmek için üreticiler kondensasyon şartlarını kontrol altında tutmalıdır (Aİtcin, 2004).

Polimer zincirini uzatmak, genel olarak, SA'nın viskozitesini artırır. Ancak polimer zincirlerinin dallanmış olması ya da çapraz bağlanması da SA'nın viskozitesini arttırabilir. Yani, SA'nın viskozitesinin artmış olması her zaman polimer zincirinin uzun olması anlamına gelmeyebilir. Dolayısıyla SA'nın performansının artması da böyle bir durumda söz konusu olmayabilir. Pratik açıdan bakıldığında, ortalama polimerizasyon derecesinin 9-10'dan fazla olması durumunda; moleküler ağırlığın ve dolayısıyla viskozitenin artması, polimer zincirlerinin lineer uzamasından daha çok, çapraz bağlanmadan kaynaklandığı için, bu değerlerin ötesinde SA'nın etkinliği azalmaya başlar (Aİtcin, 2004). SA'nın viskozitesi, kısmen, ortalama moleküler ağırlığı yansıtır. Ortalama moleküler ağırlık ise performansı etkileyen en önemli faktörlerden birisidir (Aİtcin ve diğer, 1994).

### 3.2.3.3 Nötralizasyon

Naftalin sülfonik asitin pH değeri 2-3 civarındadır ve bu değer yüksek pH değerine sahip bir çimento-su karışımı için oldukça düşük bir değerdir. Dolayısıyla sülfonik asit, bir baz kullanılarak nötralize edilmelidir. En çok kullanılan baz NaOH olmasına rağmen zaman zaman  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de kullanılmaktadır. Bu işlem sonucunda sodyum ya da kalsiyum tuzları oluşur (Aİtcin, 2004).

### 3.2.3.4 Filtrasyon

Bu işlem, gerekli olduğu zamanlarda, SA molekülünün içinde aktif katı maddenin mümkün olduğu kadar çok miktarda olabilmesi için sülfatların sistemden çıkarılması işlemidir. Üreticiler ürünlerinde genel olarak toplam katı madde oranını belirtir. Aktif katı madde oranı nadiren belirtilir (Aİtcin, 2004).

Sonuç olarak SA'ların performansını etkileyecek olan önemli parametreler şu şekilde sıralanabilir (Aİtcin, 2004):

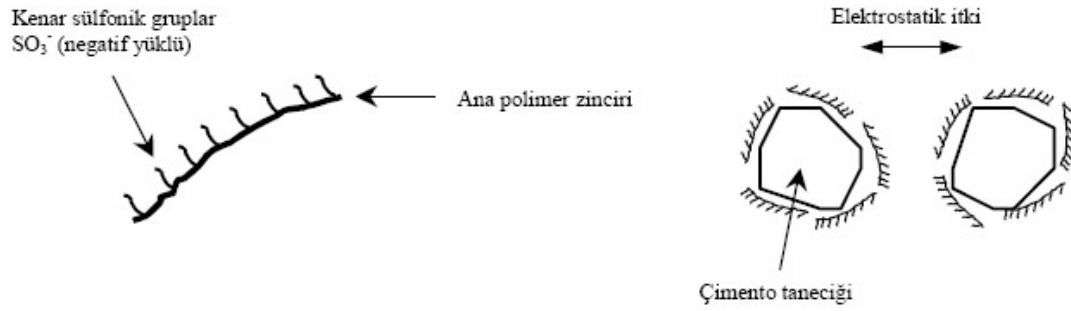
- Sülfonat gruplarının  $\alpha$  ya da  $\beta$  pozisyonunda bağlanması (daha çok  $\beta$  pozisyonunda daha iyi performans),
- Her bir naftalin halkasındaki sülfonatlaşmış naftalin grubu sayısı,
- Polimerizasyon derecesi (SNF esaslı süperakışkanlaştırıcıda çok fazla dallanma ve çapraz bağlanmadan kaçınmak için optimum polimerizasyon sayısı 9-10 civarı olarak kabul edilir),
- Toplam aktif katı madde miktarı.

### 3.2.4 Süperakışkanlaştırıcıların Etki Mekanizması

SA varlığında çimento tanelerinin dağılma özelliği genel olarak “elektrostatik” ve “stearik” etki mekanizmasıyla açıklanır. Aşağıda bu iki etkiyle ilgili genel bilgiler verilmiştir.

#### 3.2.4.1 Elektrostatik Etki

Süperakışkanlaştırıcılar, çimento taneleri üzerindeki dağıtma etkisi sayesinde topaklaşmayı önler. Bu etki sayesinde çimento hamurunun akışkanlığı artar. Çimento taneleri arasında topaklaşmaya neden olan çekim kuvvetleri, negatif yüklü SNF ve SMF gibi polimerlerin çimento tanesi üzerinde tutunması neticesinde nötr hale gelmekte ve böylece dağıtma etkisi gerçekleşmiş olmaktadır (Şekil 3.3) (Collepardi, 2005).



Şekil 3.3 Elektrostatik itki etkisi

Çimento taneleri arasındaki elektrostatik itki Zeta potansiyel ölçümüyle belirlenir (Colleparadi, 2005).

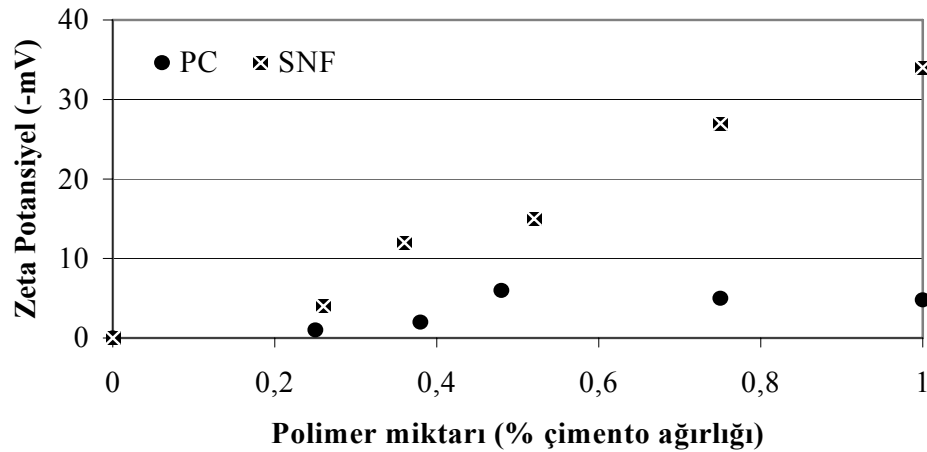
**3.2.4.1.1 Zeta Potansiyel.** Katı-sıvı arayüzeyinde meydana gelen kuvvetler, karışımın stabilitesi açısından oldukça önemlidir. Askıdaki her parçacık benzer elektriksel yük taşır ve bunların arasında bir itme kuvveti oluşur. Bu elektriksel yükler yeterince fazlaysa taneler birbirinden ayrık kalırlar. Bu yükün ortadan kalkması ya da azalması ise topaklaşmaya neden olur. Bu durum karışımın karakterini değiştirir (Anonim, bt).

Çift katman modeli, yüklü kolloidal parçacığın çevresindeki iyonik ortamı modeller ve elektriksel itkinin nasıl gerçekleştiğini ortaya koyar. Başlangıçta yüksek negatif yükü taşıyan kolloidal parçacık (NYKP) üzerine pozitif yüklü iyonlar yapışır ve böylece NYKP etrafında pozitif yüklerden oluşan bir katman meydana gelir. Bu katman “Stern katmanı” olarak adlandırılır. Bu katman oluşuktan sonra ilave pozitif iyonlar hala NYKP tarafından çekilir ancak diğer taraftan pozitif yüklerle dolu olan Stern katmanı bu yükleri iter. Bu dinamik denge durumunda, Stern katmanının hemen dışında yine pozitif yüklü “diffuse katmanı” oluşur. Denge durumuna ulaşıncaya kadar NYKP’den uzaklaştıkça pozitif yüklü iyon konsantrasyonu azalır, negatif yüklü iyon konsantrasyonu ise artar. Bu iki katmandan genel olarak “çift katman” olarak söz edilir. Bu katmanın kalınlığı iyon tipi ve konsantrasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterir (Anonim, bt).

Parçacığın hareketi, dielektrik sabiti, sıvının viskozitesi ve parçacıkla sıvı arasındaki yüzeyin elektrik potansiyeli ile ilişkilidir. Stern katmanı ile diffuse katmanının birleştiği yer, kayma yüzeyi olarak adlandırılır. Stern katmanı NYKP'ye rijit bir şekilde bağlıdır ancak bu durum diffuse katmanı için geçerli değildir. Bu iki katman arasındaki elektriksel potansiyel, parçacığın hareketiyle doğrudan ilişkilidir ve "Zeta potansiyeli" olarak adlandırılır. Elektrostatik itki söz konusu olduğunda Zeta potansiyeli yüzey potansiyeline göre çok daha fazla önem kazanmaktadır (Anonim, bt).

#### 3.2.4.2 Stearik Etki

Sakai ve Diamon (1997), polikarboksilat esaslı (PC) katkıların sağladığı Zeta potansiyel değerinin (0,3-5 mV), SNF esaslı katkılara (23-28 mV) göre çok önemsiz mertebede olduğunu söylemiştir (Collepari, 2005). Collepari (1993), yaptığı çalışmada bunu doğrular nitelikte sonuçlar elde etmiştir (Şekil 3.4) (Collepari, 2005).

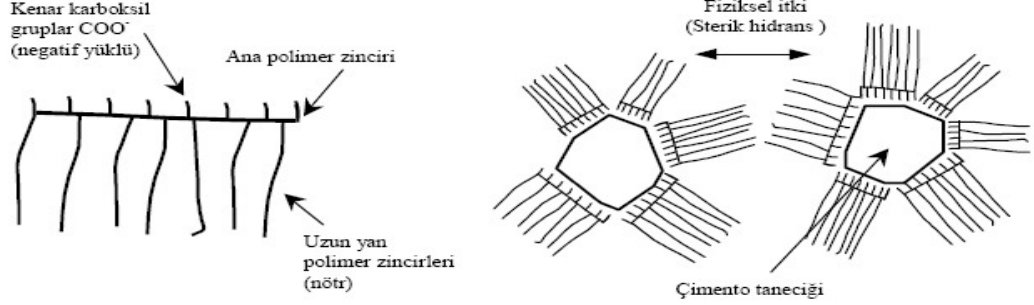


Şekil 3.4 Polimer miktarına bağlı olarak Zeta potansiyelin değişimi (Collepari, 1993)

Bu sonuçlar, süperakışkanlaştırıcının çimento tanelerini dağıtma etkisinin sadece elektrostatik itkidenden kaynaklanmadığını göstermektedir.

PC esaslı katkıların dağıtma etkisi elektrostatik itkidenden çok, stearik (fiziksel-geometrisel) engelleme etkisi ile açıklanmaktadır. Polimer molekülündeki yan

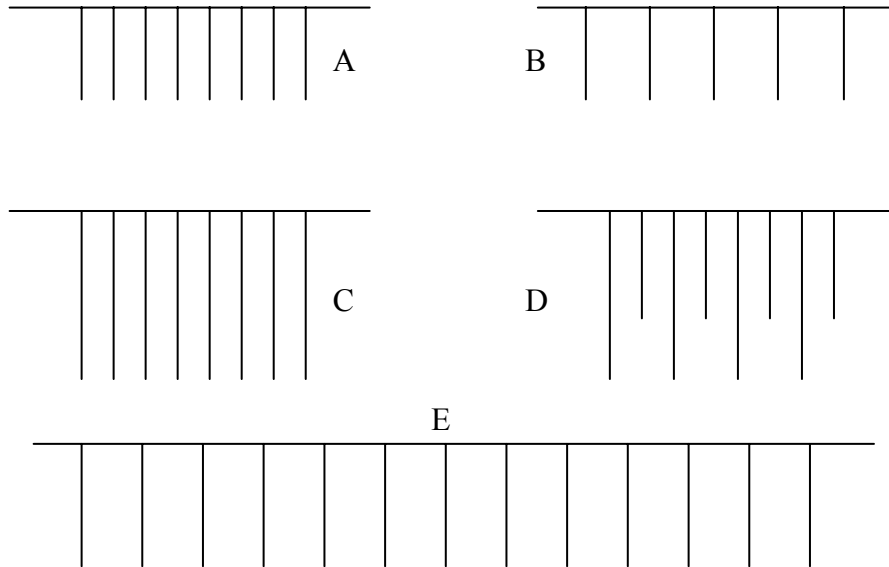
zincirler çimento taneleri arasında fiziksel bir engel oluşturmakta ve topaklaşmayı önlemektedir (Şekil 3.5) (Collepardi, 2005).



Şekil 3.5 Stearik etki

Stearik itkinin en önemli avantajı, elektrostatik itkinin tam tersine, çimento kompozisyonundan kaynaklanan, çözeltideki iyon tipi ve yoğunluğundan çok daha az etkilenmesidir (Houst ve diğer., bt.a).

Stearik itkide önemli rol oynayan parametreler ana zincir uzunluğu, yan zincirlerin uzunluğu ve yan zincirler arası mesafe olarak sayılabilir (Şekil 3.6) (Houst ve diğer., bt.a).



Şekil 3.6 Polikarboksilat esaslı SA'lara ait tipik moleküler yapı çeşitleri. Yan zincirler arasındaki mesafe farklılığı (A-B), yan zincir uzunluğu farklılığı (C-D), ana zincir uzunluğu farklılığı (A, B, C, D – E)

### **3.2.5 Süperakışkanlaştırıcıların Beton Özellikleri Üzerine Etkisi**

Betonda SA kullanımı, taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerde bir takım değişikliklere yol açar. SA'ların, betonun taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerindeki etkileri aşağıda açıklanmıştır.

#### *3.2.5.1 Süperakışkanlaştırıcıların Taze Haldeki Özellikler Üzerine Etkisi*

*3.2.5.1.1 Su Azaltma.* SA'lar genel olarak kontrol karışımıyla aynı çökmeyi sağlayacak şekilde, su azaltmak amacıyla kullanılır. SA'lar en az %12 oranında su azaltmalarına karşın, bazı SA'lar %30'dan fazla su azaltabilmektedir (ACI 212.4R, 2004).

*3.2.5.1.2 Çökme ve Çökme Kaybı.* Sabit bir su içeriğinde betona SA eklenmesi, çökme değerini artırır. Katkı dozajının artması çökme değerinin de artmasını sağlar (ACI 212.4R, 2004). Çökme kaybı akışkanlığın zamanla azalması olarak tanımlanır. Bu durum çökme kaybının hidrasyon reaksiyonlarının bir sonucu olduğunu gösterir. Hidrasyon reaksiyonlarının hızlanması çökme kaybının artmasına yolaçar, aksi durumda ise çökme kaybı azalır (Chandra ve Björnström, 2002b).

Çökme kaybı, hazır beton endüstrisinde en önemli problemlerden birisidir. Hazırlanan beton karışımının taşınmasının uzun sürmesi durumunda, özellikle sıcak havalarda, kıvamı tekrar arttırmak amacıyla su katılmasını engellemek için, betonun başlangıç çökme değerini koruması istenir. Araştırmalar, tekrar kıvam kazanması için betona ilave edilen suyun, dayanım ve dayanıklılık problemlerine yol açabileceğini göstermiştir. Sabit bir başlangıç çökme değerine sahip SMF veya SNF esaslı katkı kullanılan beton, genel olarak, aynı başlangıç çökme değerine sahip katkısız betona göre daha fazla çökme kaybı gösterir. Aynı başlangıç çökme değerine sahip karışımlardan düşük s/ç oranına sahip olan karışım daha fazla çökme kaybı gösterir (Collepari, 2005).

Çökme kaybını etkileyen faktörler olarak başlangıç çökme değeri, süperakışkanlaştırıcı ve çimentonun tipi ve miktarı, süperakışkanlaştırıcının eklenme



zamanı, sıcaklık, nem, karıştırma prosedürü ve karışımda bulunan diğer katkıların etkileşimi sayılabilir. Çökme kaybının gerçekleştiği zaman diliminde  $C_3A$  alçıtaşıyla reaksiyona girer. Oluşan hidrasyon ürünleri kristal yapıda gelişir.  $C_3A$  ve alçıtaşı arasındaki reaksiyonun miktarı ve hidrasyon ürünlerinin kristal yapıda olması, işlenebilirlik üzerinde çok önemli etkiye sahip olabilir (Ramachandran, 1995).

SA'ların yüksek dozajlarda, özellikle de üretici firmanın önerdiği dozajın üstünde, kullanılması durumunda çökme değerinde bir artış görülmeyebilir. İyi bir işlenebilme için gerekli katkı dozajı; çimento özellikleri, s/ç oranı, sıcaklık, ekleme zamanı ve karışım oranlarına bağlı olarak değişir (ACI 212.4R, 2004).

Guennewig (1988) ve Collepardi ve Corradi (1979), son yıllarda üretilen SA'ların çökme kaybını azalttığını ve katkının santralde eklenmesine olanak tanıdığını söylemişlerdir (ACI 212.4R, 2004).

Ravina ve Mor (1986), genel olarak katkının yüksek dozajda kullanılması durumunda çökme kaybının azaldığını söylemiştir. Ancak SA'lar nihai bir kullanım dozajına sahiptir ve çökme kaybını biraz daha azaltmak amacıyla bu dozajdan fazla kullanılmaları durumunda priz gecikme, ayrışma ve kanama gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Dolayısıyla SA'lar üreticinin önerdiği dozaj aralığında kullanılmalıdır (ACI 212.4R, 2004).

Betonun sıcaklığı da çökme kaybını etkileyen çok önemli bir faktördür. Sıcaklığın artmasıyla çökme kaybı da artar. SA'nın priz geciktirici özelliği olması durumunda ya da normal bir SA ile priz geciktirici bir katkının beton içerisinde beraber kullanılmasıyla bu etki azaltılabilir (ACI 212.4R, 2004).

Fujiu ve diğer. (1985) ve Fukuda ve diğer. (1990), suda çözünmeyen polimerik akışkanlaştırıcı geliştirmişlerdir (Ramachandran, 1995). Bu malzeme, başlangıçta suda çözünmüyor olmasına rağmen, araştırmacılar, çimento hidrasyonu sonucunda oluşan alkali ortamda bu malzemenin akışkanlaştırıcı etki yapan bir ürün meydana

getirdiğini söylemiştir. Gecikmiş olarak ortaya çıkan bu mekanizma, katkıının, betonun çökme değerini uzun süre korumasını sağlayabilmektedir.

Çökme kaybını kontrol etmek amacıyla çeşitli öneriler getirilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkıının şantiyede beton dökülmeden hemen önce katılmasıyla çökme kaybının hızlı gerçekleşmesinin önüne geçilebilir. Katkının normal dozun üstünde kullanılması da çökme kaybını geciktirebilir. Ancak bu durum erken dayanımın düşmesine neden olabilir (Collepari, 2005).

Belli zaman aralıklarında katkıının tekrar eklenmesiyle (re-dozlama) çökme kaybı azaltılabilir. Ancak bu durum pratikte yeterince kabul görmüş bir uygulama değildir ve kontrolü oldukça zordur (Collepari, 2005).

Collepari ve diğer. (1993), PC esaslı bir katkıının beton üzerindeki özelliklerini inceledikleri bir çalışmada, katkıının hem su azaltıcı hem de çökme kaybını azaltıcı bir davranış gösterdiğini belirtmiştir. Hem su azaltma hem de çökme kaybını azaltma konusunda PC esaslı katkıının SNF esaslı katkıya göre çok daha etkili olduğu belirtilmiştir (Collepari, 2005).

*3.2.5.1.3 Priz Süresi.* ASTM C494 standardı F tipi katkıları için (priz geciktirici etkisi olmayan), benzer çökme, hava içeriği ve sıcaklık değerine sahip kontrol karışımına göre, SA katılmış karışımın priz başlangıç süresinin, kontrol betonunun priz başlangıç süresinden en fazla 1 saat daha kısa ve yine en fazla 1,5 saat daha uzun olabileceğini söylemiştir. G tipi katkıları için ise (priz geciktirici etkisi olan), priz başlangıç süresinin, kontrol betonunun priz başlangıç süresinden en az 1 saat daha uzun ve yine en fazla 3,5 saat daha uzun olabileceği söylenmiştir (ACI 212.4R, 2004).

Genel olarak akışkanlaştırıcı katkıları, kontrol karışımına göre priz süresini uzatırlar. Bu durum katkıının varlığında ilk saatlerdeki hidrasyon oranının azalmasıyla açıklanmıştır (Ramachandran, 1995).

$C_3A$ , hidratasyonun erken zamanlarında ortama etrenjit kristallerinin oluşmasına neden olan  $Al(OH)_4^-$  iyonları bırakır. Yeni oluşmaya başlayan etrenjit kristalleri, SA moleküllerinin bir kısmını tüketir. Ortamda SA molekülü kalmadığında olağan etrenjit oluşumu tekrar başlar. Bununla birlikte betona aşırı miktarda SA katılırsa bunların tükenmesi için oldukça uzun zaman gerektiğinden, prizde ciddi gecikmeler gözlenebilir (Prince ve diğer., 2002).

*3.2.5.1.4 Hava Sürükleme.* Hava sürükleyici katkının kullanımıyla ortaya çıkan sürüklenmiş havanın miktarı SA'nın tipi ve kimyasal yapısına ve betonun karışım oranlarına bağlı olarak değişir. Birçok deney, hava sürüklenmiş betona SA katılmasıyla hava kabarcığı mesafesinin değiştiğini göstermiştir (ACI 212.4R, 2004).

*3.2.5.1.5 Ayırışma.* SA'ların su azaltıcı olarak kullanılması durumunda uygun karışım oranlarına sahip bir betonda ayırışma gözlenmez. Betonun akışkanlığını arttırmak amacıyla kullanılması durumunda ise önlem alınmadığı takdirde ayırışma görülebilir. Uygun olmayan karışım oranları ve yetersiz karıştırma nedeniyle lokal olarak ayırışmalar meydana gelebilir. Karışım oranlarının uygun olmaması, düşük çökme değerine sahip betonlarda ayırışma açısından pek önemli olmasa da, göreceli olarak yüksek çökme değerine sahip betonlarda önem kazanmaktadır. Karışımda daha küçük tane boyutundaki iri ve ince agrega kullanımı ayırışmayı önleyici bir tedbir olarak önerilmektedir (ACI 212.4R, 2004).

*3.2.5.1.6 Kanama.* Kanama, taze betondaki katı parçacıkların aşağıya, suyun ise yüzeye doğru hareket etmesiyle meydana gelir. SA'lar su azaltma amacıyla kullanıldıklarında, daha düşük su içeriğinden dolayı, kanama genel olarak azalır (ACI 212.4R, 2004).

*3.2.5.1.7 Pompalanabilme.* Genel olarak bir çok uygulamada pompa hattı içerisinde 3-5 cm. çökme kaybı meydana gelir. Karışım oranları, agrega porozitesi, sürüklenmiş hava içeriğinin azalması, iklim koşulları ve yetersiz pompalama teçhizatı gibi faktörler aşırı çökme kaybına neden olabilir. Pompalanabilmede zorluk meydana gelmişse, karışıma su eklemek doğru bir çözüm değildir. Bu durumda

betonun kalitesi düşeceği gibi aynı zamanda harç fazının seyrelmesi dolayısıyla, pompa basıncı, harcı iri agreganın önüne iter ve pompada tıkanma meydana gelir. Pompalanabilmeyi kolaylaştırmak için çimento ve ince agrega içeriğinde değişiklik yapılabilir ya da mineral katkı kullanılabilir. Ayrıca daha büyük ve güçlü pompa kullanılması da pompalanabilmeyi kolaylaştırır (ACI 212.4R, 2004).

Kasami ve diğer. (1979), SA kullanımının pompalama basıncını oldukça düşürdüğünü ve pompalamayı daha verimli hale getirdiğini bildirmiştir. Katkı kullanılmayan geleneksel betona göre pompa basıncında %35'e kadar azalma meydana gelebilir. Hafif beton için ise bu değer %10-20 civarındadır (ACI 212.4R, 2004).

### *3.2.5.2 Süperakışkanlaştırıcıların Sertleşmiş Haldeki Özellikler Üzerine Etkisi*

SA'lar sabit bir çökme değerinde, su azaltmak amacıyla kullanıldıklarında, s/ç oranını düşürdükleri için basınç dayanımını arttırlar (ACI 212.4R, 2004).

Betonun çekme dayanımı ve elastisite modülü de, basınç dayanımına benzer şekilde etkilenir. SA'lar, basınç dayanımı ile çekme dayanımı ve elastisite modülü arasındaki mevcut ilişkiyi değiştirici bir özellik göstermezler (ACI 212.4R, 2004).

Donatının betonla olan aderansı betonun basınç dayanımı, yerleşme (sıkışma) miktarı, kanama ve priz süresinden etkilenir. SA'ların su azaltıcı ya da akışkanlaştırıcı olarak kullanılması durumunda kontrol betonuyla benzer aderans dayanımı elde edilir. Akışkan betonda donatı etrafındaki yerleşme daha iyi sağlanır. Ancak düşük s/ç oranına sahip ya da aynı s/ç değerindeki daha akışkan hale gelmiş betonda, uygun vibrasyon yapılmadığı takdirde aderans dayanımında azalma meydana gelir (ACI 212.4R, 2004).

Hidratasyon ısısı nedeniyle artan beton sıcaklığı, hamur miktarı ve kompozisyonu değişmediği sürece SA kullanımından çok fazla etkilenmez. Ancak çimento tanelerinin, dağıtma etkisi nedeniyle artan etkinliği, hidratasyon ısısının en yüksek

değere ulaştığı noktada bir miktar ısı artışına neden olabilir. SA'ların çimentodan tasarruf etmek amacıyla kullanılması durumunda ise hidrasyon ısısı azalır (ACI 212.4R, 2004).

Whiting (1979) ve Gebler (1982), sabit bir s/ç oranı ve çimento içeriğinde, SA kullanımıyla kuruma büzülmesinde artış meydana gelebileceğini söylemiştir (ACI 212.4R, 2004).

Lukas (1981), sabit bir s/ç oranında, SA katılmış betonun, donma-çözülme etkilerine karşı, iyi sıkıştırılmış kontrol betonu kadar direnç gösterdiğini belirtmiştir. SA'lar s/ç oranını azaltmak amacıyla kullanıldığında donma-çözülme etkilerine karşı direnç daha da artar (ACI 212.4R, 2004). Lukas (1981) ve Collepardi ve Corradi (1980), SA kullanılan karışımların en az kontrol karışımı kadar klorür korozyonu ve sülfatlara karşı direnç gösterdiğini bildirmiştir (ACI 212.4R, 2004).

### ***3.2.6 Süperakışkanlaştırıcının Eklenme Metodu***

Süperakışkanlaştırıcının eklenme metodu, performansı etkileyen önemli bir parametredir. Agregası, çimento ve karıştırma suyunun yaklaşık %50'si 15-30 saniye karıştırıldıktan sonra, süperakışkanlaştırıcı katkı, karıştırma suyunun yaklaşık %25'i içerisinde çözündürülür ve karışıma eklenir. Belli bir süre sonra geriye kalan %25'lik su eklenir. Genel olarak ekleme metodu yukarıdaki sırayla gerçekleştirildiğinde iyi sonuç alınabilmektedir (Ramachandran, 1995).

## BÖLÜM DÖRT

### ÇİMENTO- SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICI KATKI UYUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Betonun kalitesi ve özelliklerini etkileyen faktörler arasında, çimento hamurunun akışkanlık özelliği önemli yer tutmaktadır. Daha iyi akışkanlık süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılar kullanılarak üretilen düşük su/çimento oranlarına sahip yüksek performanslı betonların başlangıçtaki yüksek işlenebilirlikleri, kısa süre sonra kaybolabilmektedir. Bir başka deyişle, hızlı çökme kaybı gösterebilmektedir. Bu durum, süperakışkanlaştırıcı ve çimentonun reolojik olarak uyumsuz olduğunu gösterir (Jiang ve diğer., 1999).

Çimento ve SA arasındaki uyum, bu iki malzemenin özelliklerinden kaynaklanan çeşitli parametrelerden etkilenmekte; bu parametreler, reolojik özellikleri önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Bu bölümde bu konu hakkında daha önceden yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

#### 4.1 Çimentodan Kaynaklanan Etkiler

Genel olarak,  $C_3A$  ve göreceli olarak daha az öneme sahip  $C_4AF$  miktarı, çimento inceliği ve sülfatların çözünebilirliği gibi faktörler, düşük s/ç oranına sahip yüksek performanslı betonların reolojik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler olarak bilinmektedir (Tagnit-Hamou ve Aïtcin, 1993). Bu faktörler ve bunların dışında uyumu etkileyen çimento kaynaklı diğer unsurlar, aşağıda ana hatlarıyla özetlenmiştir.

##### 4.1.1 Kimyasal Kompozisyon

Piyasada üretilen çimentolardaki  $C_3A$ , genel olarak kübik ve ortorombik yapının karışımı olarak bulunmaktadır. Kübik yapı ortorombik yapıya göre daha reaktiftir.

$C_3A$ 'nın kristal yapısı, süperakışkanlaştırıcının varlığında, özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda reolojik açıdan büyük önem taşımaktadır (Aİtcin, 2004). Kübik formda olan  $C_3A$ , sülfat iyonlarıyla hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve üzerinde oluşan etrenjit tabakası sonraki hidrasyon sürecini yavaşlatır. Böylece, çimento hidrasyonunun durgunluk devresinde çok fazla kıvam kaybı gerçekleşmeden betonun taşınması ve yerleşmesi mümkün olur. Ortorombik yapıda olan  $C_3A$  ise, kübik forma göre biraz daha yavaş bir tepkime gösterir ve sürekli devam eden iğne şekilli etrenjit oluşumuna neden olur (Aİtcin, 2004).

Kübik  $C_3A$  yapısı, ortorombik yapıya göre daha reaktif olmasına rağmen, özellikle SA varlığında kübik yapının  $SO_4^{2-}$  iyonlarıyla olan reaksiyonu daha iyi kontrol edilir (Aİtcin, 2004). Vernet ve Noworyta (1992), çimentodaki kübik  $C_3A$  yapısının fazla olması durumunda, reolojik özelliklerin daha kolay kontrol edilebileceğini söylemiştir (Aİtcin, 2004).

Genel olarak  $C_3A$  içeriğinin az olması, reoloji açısından istenen bir durumdur. Yüksek performanslı beton üretiminde  $C_3A$ 'nın olabildiğince az ve mümkünse kübik yapıda olması istenir.  $C_3A$  saf kübik yapıda değilse, en azından kübik yapının baskın olduğu kübik-ortorombik karışımı bir yapıya sahip çimento tercih edilmelidir (Aİtcin, 2004).

Sarkar ve Aimin (1992), kübik ve ortorombik yapının etrenjit gelişimine etkisini incelemiştir. SA'nın yokluğunda hidrasyonun 5. dakikasında kübik formdaki  $C_3A$  iğne şekilli etrenjit oluşumuna yol açarken, ortorombik yapıdaki etrenjit, uzun plaklar halinde oluşmuştur. 20. dakikada ise bu plakların yerini iğne şekilli etrenjit almıştır. SA'nın varlığında ise 25. dakikada kübik formdaki  $C_3A$ , etrenjite benzeyen çok çok kısa liflerden oluşan bir yapının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Araştırmacılar bu yapının reaksiyonları geciktirdiğini söylemiştir. Ortorombik  $C_3A$  ise 30. dakikaya kadar bal peteği görünümlü bir yapı oluşturmuştur (Ramachandran, 1995).

Çimento içerisinde hızlı reaksiyon gösteren ve önemli miktarda suyu tüketen iki faz, öğütme esnasında alçıtaşının su kaybı ile oluşan hemihidrat fazı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ve ara fazlardır ( $\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_4\text{AF}$ ) (Tagnit-Hamou ve Aïtcin, 1993).

SA'lar ve  $\text{C}_3\text{A}$  arasındaki etkileşimi ortaya koymak amacıyla farklı tekniklerle pek çok çalışma yapılmasına rağmen, etkileşimi kontrol eden temel prensipler net olarak anlaşılamamıştır. Prince ve diğer. (2002) yaptıkları çalışmada, SA moleküllerinin hidrate olmamış çimento fazlarının yanında, hidratlar tarafından da tutulduğunu belirtmiştir. Hidratlar üzerindeki bu tutunma, etrenjit gelişimini oldukça yavaşlatır, hatta durdurabilir. Başlangıçta mevcut olan SA moleküllerinin tükenmesiyle birlikte etrenjit yapısı tekrar normal olarak gelişmeye devam eder. SA'ların hidrate alüminat fazları üzerinde tutunmasıyla iki önemli olay gerçekleşir (Prince ve diğer., 2002):

- elektriksel yükü taşıyan parçacıkların birbirini itmesi sonucu topaklaşma önlenir.
- hamurun akışkanlığını ve dolayısıyla işlenebilirliği azaltan iğne formundaki uzun etrenjit yapısının oluşumu gecikir.

$\text{C}_3\text{A}$ 'nın reaksiyonuyla oluşan iğne formunda etrenjit yapı, ortamdaki su moleküllerini tüketir ve dolayısıyla çimento hamurunun işlenebilirliği azalır. SA'lar ilk anda oluşan etrenjit formlarının üzerinde tutunarak bunların iğnemsiz yapıya dönüşmelerini geciktirirler, böylece hamur daha uzun süre işlenebilir özellikte kalır. Fakat aşırı SA kullanılması, önemli derecede priz gecikmesine sebep olur (Prince ve diğer., 2002).

SA moleküllerinin stabil ve sürekli bir dağıtma etkisinin olabilmesi için, asıl olarak  $\text{C}_3\text{S}$  ve  $\text{C}_2\text{S}$  bileşenleri üzerinde tutunmaları gerekmektedir (Akman, 1999).

Bassant (1994), SA'nın varlığında, iğne şekilli etrenjit yerine, kübik forma yakın ve küçük boyutlarda masif etrenjit kristalleri oluştuğunu belirtmiştir (Prince ve diğer., 2003). Bu masif yapı, iğne şekilli yapıya göre akışkanlığa daha az zarar verir (Aïtcin ve diğer., 1994).



Ortamda  $SO_4^{2-}$  ve  $Ca^{+2}$  iyonlarının yetersiz olması durumunda etrenjit monosülfata dönüşür. Bu iyonların aşırı olması durumunda ise ikincil kalsiyum sülfat oluşur. Bu iki ürün akışkanlığı olumsuz yönde etkiler (Griesser, 2002).

$C_3A+C_4AF$  miktarı fazla olan çimentolarda, akışkanlaştırıcı katkının bu bileşenlere tutunması nedeniyle,  $C_3S$  ve  $C_2S$  bileşenleri üzerinde tutunan katkı miktarı göreceli olarak azalır ve böylece hamurun akışkanlık davranışı olumsuz etkilenir (Chandra ve Björnström, 2002a).

Chandra ve Björnström (2002a) tarafından yapılan çalışmada, beyaz çimento, düşük alkalili çimento ve normal çimentoya göre daha yüksek inceliğe sahip olmasına rağmen, hem lignosülfonat (LS) hem de SMF esaslı katkı ile kullanıldığında en yüksek işlenebilirliği vermiştir. Bu durum, inceliği daha yüksek olmasına rağmen, beyaz çimentonun daha düşük  $C_3A+C_4AF$  miktarına, daha düşük alkali miktarına ve daha yüksek sülfat içeriğine bağlanmıştır. Beyaz çimentonun  $C_3A+C_4AF$  ve alkali miktarının düşük olmasından ve daha yüksek oranda sülfat içermesinden dolayı, katkının daha yüksek oranda çözeltide kalması sayesinde akışkanlık artmıştır. Böyle bir durumda inceliğin etkisinin önemsiz hale geldiği bildirilmiştir.

Young (1982), çimento bileşenlerini bireysel olarak incelediği çalışmada  $C_3A$  ve alçıtaşı'ndan oluşan sistemde çökme değerinin yaklaşık 60 dakika boyunca korunduğunu, buna karşın  $C_3S$  fazının yaklaşık 30 dakika içerisinde hızlı bir çökme kaybı gösterdiğini söylemiştir (Ramachandran, 1995).

Boragafio ve Macias (1992), düşük  $C_3A$  içerikli (% 2.5), yüksek alkali içerikli (% 0.95  $Na_2O$ ) ve yüksek özgül yüzeye sahip ( $500 m^2/kg$ ) çimentolarla hazırladıkları karışımların reolojik özelliklerini kıyaslamıştır (Ramachandran, 1995). Çalışmada farklı miktarlarda LS, SNF ve SMF esaslı katkı kullanılmıştır. Bütün katkıların, özellikle de SNF ve SMF'in eşik kayma değerini azalttığı, ancak bu katkılara LS eklenmesiyle bu değer bir miktar arttığı görülmüştür. SA etkinliğinin, çimentodaki

$C_3A/CaSO_4$  oranına bağlı olduğu, bu oranın yüksek olmasının akışkanlığı azalttığı bildirilmiştir.

Uchikawa ve diğer. (1984), çimentodaki bileşenlerin hidrasyonunun, karışım suyundaki  $Ca^{+2}$ ,  $OH$  ve  $SO_4^{2-}$  iyonlarının konsantrasyonundan etkilendiğini söylemiştir. Bu iyonların konsantrasyonu, alkali sülfat, alçıtaşı, serbest kireç miktarları ve  $C_3S$  bileşeninin hidrasyon oranına bağlıdır. Hidrasyon özellikle kirece doygunluk oranından etkilenir.  $Ca^{+2}$ ,  $OH$  ve  $SO_4^{2-}$  iyonlarının yüksek konsantrasyonda olması durumunda oluşan küçük etrenjit kristalleri, reaksiyona girmemiş bileşenlerin üzerini kapatır ve hidrasyon hızı yavaşlar. Diğer taraftan düşük konsantrasyonda, yüksek miktarlarda iğne formunda etrenjit oluşumu gözlenir. Bileşenlerin hidrasyonu nedeniyle etrenjit oluşumu devam eder ve “yalancı priz” adı verilen durum ortaya çıkabilir (Chandra ve Björnström, 2002a).

S/ç oranı, boşluk çözeltisindeki iyon konsantrasyonunu kontrol eder. Düşük s/ç oranlarında  $C_3A$  ve  $C_4AF$  bileşenleri SA moleküllerini tutar ve çözeltideki SA miktarı azalır. Fakat s/ç oranının artmasıyla daha fazla  $C_3S$  hidrate olur ve ortama daha çok  $Ca^{+2}$  iyonu salınır. Böylece boşluk çözeltisindeki kirece doygunluk ve dolayısıyla akışkanlık artar (Chandra ve Björnström, 2002a).

Perenchio ve diğer. (1979),  $C_3A$  içeriği yüksek olan çimentoların çok daha fazla çökme kaybı gösterdiğini belirtmiştir (Chandra ve Björnström, 2002b). Düşük oranda  $C_3A$  içeren çimentolarda çökme kaybının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, düşük  $C_3A$  içeren çimento kullanımının genel olarak daha az çökme kaybı verdiği düşüncesinin her zaman doğru olmadığı vurgulanmıştır.

Mailvaganam (1979),  $C_3A$  içeriği %2.6 olan sülfata dayanıklı çimento ile yaptığı karışımdaki çökme kaybının, normal portland çimentoları ( $C_3A$  içeriği % 6.9-12.6) ile yaptığı karışımlardaki çökme kayıplarına nazaran biraz daha az olduğunu bildirmiştir (Chandra ve Björnström, 2002b). Bu sonuçlar, çökme kaybının alüminat fazları tarafından göreceli olarak daha fazla SA tutulması ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte çökme kaybının,  $C_3A$  içeriğinden daha çok, boşluk

çözeltisinin kimyasal yapısıyla daha yakın ilişkisi olduğunu belirten yayınlar da mevcuttur. Bonen ve Sarkar (1995), çökme kaybının  $C_3S$  bileşeninin hidrasyonu ile ilişkisi olduğunu; ve bu durumun, akışkanlığı olumsuz yönde etkileyen iğne formundaki yapıyı oluşturan etrenjit oluşumu ve ikincil etrenjit kristalizasyonu ile ilişkisi olmadığını söylemiştir (Chandra ve Björnström, 2002b). Ayrıca,  $C_3S/C_2S$  oranının yüksek olmasıyla akışkanlığın arttığı bildirilmiştir (Chandra ve Björnström, 2002b).

Young (1969, 1972, 1976) ve Ramachandran (1972b),  $C_3A/C_3S$  oranı azaldıkça, lignosülfonatların hidrasyonu geciktirme etkisinin arttığını belirtmiştir (Ramachandran, 1995).

Çimentodaki kromat fazının ( $Cr_2O_3$ ) işlenebilirlik üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu söylenmiştir. Araştırmacılar, kromatın sülfatın çözünürlüğü üzerinde etkisinin olabileceğini vurgulamıştır (Claisse ve diğer., 2001).

Başlangıçta düşük negatif Zeta potansiyel değerine sahip olan çimento tanesi, katkının çimento tanesi üzerinde tutunmasıyla daha yüksek bir potansiyel kazanır (Houst ve diğer., bt.b). Bu artışın çimentonun kimyasal kompozisyonuna da bağlı olduğu, yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır. Asakura ve diğer. (1992), SNF kullanarak yaptıkları deneylerde, çimentodaki  $C_3S/C_2S$  ve  $C_3A/C_4AF$  oranı arttıkça, Zeta potansiyelin azaldığını ve viskozitenin arttığını gözlemlemiştir (Ramachandran, 1995).

#### **4.1.2 İncelik**

SA katılarak hazırlanmış çimento hamurunun viskozitesi çimentonun inceliğine de bağlıdır. Yüksek inceliğe sahip olan çimentolarda yüksek viskozite gözlenir. Nawa ve Eguchi (1992) yaptıkları çalışmada, 11 mikrometreden küçük tane boyutuyla viskozite arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuştur (Ramachandran, 1995).

Hanna ve diğ. (1989), çimentonun inceliğindeki artışa bağlı olarak, aynı işlenebilmeyi sağlamak amacıyla daha fazla SA kullanılması gerektiğini bildirmiştir (Aitcin ve diğ.,1994).

Bonen ve Sarkar (1995), göreceli olarak düşük  $C_3A$  içeriği ve inceliğe sahip çimentoların daha iyi akışkanlık özelliği gösterdiğini söylemiştir (Griesser, 2002). Bununla birlikte inceliğin reolojik özellikler üzerindeki etkisi her zaman aynı şekilde ortaya çıkmayabilir. Çimentonun inceliği reaktiviteyi arttırmasına rağmen, çimento taneleri iyi bir tane dağılımına sahipse akışkanlıkta artış meydana gelebilir. Bu durum, boşluk doldurma etkisi sayesinde su ihtiyacının azalmasına bağlanmıştır (Griesser, 2002).

Çimento tanelerinin küreselliğinin, akışkanlık üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada araştırmacılar, göreceli olarak küresel forma daha yakın tanelere sahip çimentoyla hazırladıkları beton karışımlarında, sabit bir akışkanlık seviyesinde, kontrol karışımına göre %33 oranda daha az akışkanlaştırıcı katkı kullanmışlardır. Bu durum ise, göreceli olarak daha küresel tanelerden oluşan çimentonun, küresel form nedeniyle daha düşük yüzey alanına sahip taneler içermesi dolayısıyla daha az katkı gerektirmesi şeklinde açıklanmıştır (Tanaka ve diğ., 1998).

#### **4.1.3 Kalsiyum Sülfatın Miktarı ve Formu**

Karışımın viskozitesi, üretim esnasında çimentoya eklenen sülfatın tipine de bağlıdır. Sülfatlar dehidrat ( $alçıtaşı-CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), hemihidrat ( $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ ) ya da anhidrit ( $CaSO_4$ ) formunda olabilir (Ramachandran, 1995).

Mork (1994) ve Dodson ve Hayden (1990), klinker ve alçıtaşının öğütülmesi esnasında bağıl olarak ortaya çıkan yüksek sıcaklıkların, “alçıtaşı/hemihidrat” ya da “alçıtaşı/çözülebilir anhidrit” oranlarının azalmasına neden olduğunu söylemiştir. Bu oranlardaki azalışın mertebesini etkileyen faktörler de genel olarak kullanılan alçıtaşının kalitesi ve üretimden sonraki saklama ve nakliye koşullarıdır. Hemihidrat ve çözünebilir anhidritin çözünebilirliği, alçıtaşına göre yaklaşık 3 kat daha fazla

olduğu için (Tablo 4.1), söz konusu oranlarda kontrolsüz meydana gelen değişimler, kimyasal reaksiyonlarda da kontrolsüz değişiklikler yaratmakta, bu da taze betonun işlenebilme özelliklerini etkileyebilmektedir. Ayrıca bu değişiklikler, akışkanlaştırıcı katkıları ve çimento arasında uyumsuzluğa sebep olmakta, dolayısıyla yalancı ve ani prizlere yol açabilmektedir (Mork ve Gjoerv, 1997).

Tablo 4.1 Oda sıcaklığında farklı sülfat formlarının çözünme oranları (Kim, 2000)

<b>Kalsiyum sülfatın tipi</b>	<b>Çözünürlük (g/l)</b>
Dehidrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	2,1
Hemihidrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )	6,2-8,2
Doğal anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ )	2,7
Çözünür anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ )	6,3

Tagnit-Hamou ve diğer. (1992), düşük s/ç oranına sahip SA katkılı çimento hamurlarında, çimento-SA uyumsuzluğunun çimentodaki kalsiyum sülfat yetersizliğinin bir sonucu olduğunu ileri sürmüştür (Jiang ve diğer., 1999). Nawa ve diğer. (1989), sülfat miktarının hamurun viskozitesi üzerindeki etkisini incelemiştir (Ramachandran, 1995). Sülfatın varlığı viskoziteyi azaltmıştır. Bu durum sülfatın varlığı sebebiyle,  $\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_4\text{AF}$  bileşenlerinin yüzeyinde tutunan katkı miktarının düşük olmasına bağlanmıştır. Yazarlara göre, bu nedenden dolayı sülfatların varlığında silikat fazları daha iyi dağılır ve akışkanlık artar.

Tagnit-Hamou ve diğer. (1992), sülfatların reoloji üzerindeki etkisinin temel olarak, toplam  $\text{SO}_3$  miktarına bağlı olarak değil, sistemdeki  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonlarının çözünme oranına bağlı olarak ortaya çıktığını söylemiştir (Aİtcin ve diğer., 1994).

Süperakışkanlaştırıcıların çimento tanelerini dağıtma etkisi yanında, ayrıca, hidrasyon kinetiğini ve alçıtaşının çözünürlüğünü değiştirici bir rolü vardır (Tagnit-Hamou ve Aİtcin, 1993).

Dehidrat ve anhidrit suda hemen hemen aynı oranda çözünmelerine rağmen, çözünme hızları birbirinden farklıdır (Aİtcin, 2004). Öğütme esnasında ortam

sıcaklığının yaklaşık 110 °C'ye ulaşması nedeniyle, alçıtaşının bir kısmı su kaybederek hemihidrata dönüşür. Hemihidratın çözünme hızı ise alçıtaşından daha fazladır. Hamur, harç ya da betonun reolojik özelliklerini kontrol edebilmek için bazı durumlarda alçıtaşının hemihidrata dönüşmesi elverişli olabilir. Çünkü hemihidratın çözünme hızı alçıtaşından fazla olması nedeniyle, ilk zamanlardaki hidrasyon sürecinde etrenjit oluşumunu hızlandırır, buna karşın  $C_3AH_6$  oluşumu yavaşlar. Bununla birlikte aşırı miktarda alçıtaşı hemihidrata dönüşürse yalancı priz ortaya çıkabilir. Bu durumdan kaçınmak için öğütme esnasındaki sıcaklık sıkı kontrol altında tutulmalıdır (Aİtcin, 2004).

Diğer taraftan, çimento üreticileri, hemihidrat fazının çimento hamurunun işlenebilme özelliğini yok ettiğini söyleyerek, mümkünse ürünlerinde hiç hemihidrat bulunmamasını istemektedirler (Claisse ve diğer., 2001). Hatta bazı üreticilerin, sistemde hemihidrat kalmaması için öğütme öncesinde klinkere alçıtaşı yerine anhidrit ekledikleri belirtilmiştir. Anhidritin maliyetinin yüksek olması durumunda ise bunun yerine, sıcaklık kontrollü öğütme prosesiyle hemihidratın anhidrite dönüşmesi sağlanabilir (Claisse ve diğer., 2001).

Bazı durumlarda öğütme esnasındaki sıcaklığı sınırlamak amacıyla değirmenlere sprey şeklinde su sıkılır. Böylece yalancı prize neden olan hemihidratın bir kısmı tekrar alçıtaşına dönüşür. Genel olarak alçıtaşının %40-50 oranında hemihidrata dönüşmesi, optimum olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte bazı modern çimento fabrikalarında öğütme esnasında çok yüksek sıcaklıklar oluşmaz ve bu durumda alçıtaşı, yeterli miktarda hemihidrata dönüşmeyebilir (Aİtcin, 2004). Aşırı miktarda hemihidrat oluşumu engellenmek isteniyorsa, spreyle su sıkılmasının yanında, öğütmeyi kolaylaştırıcı katkıları kullanılarak, öğütme süresi ve dolayısıyla değirmendeki sıcaklık azaltılabilir. Bunun dışında, öğütme işleminde bir miktar alçı taşının yerine anhidrit ikame edilmesi de aşırı hemihidrat oluşmasını engelleyebilmektedir (Hills ve Tang, 2004).

Göreceli olarak yüksek su/bağlayıcı oranına sahip ( $s/b > 0,50$ ) karışımların reolojik özellikleri kalsiyum sülfatın türünden çok fazla etkilenmez. Ancak bu durum, düşük  $s/b$  oranına sahip karışımlar için geçerli değildir (Aİtcin, 2004).

Nawa ve diğer. (1992) yaptıkları bir çalışmada, SNF'in, farklı formlara sahip kalsiyum sülfat içeren çimentolar üzerindeki etkilerini incelemiş ve özellikle hemihidrat yapıdaki sülfat içeren çimentoyla hazırlanan karışımlarda, dehidrat ve anhidrit içeren karışımlara göre göreceli olarak çok daha yüksek viskozite gözlemlemiştir. Bu durum ise, sülfatın farklı formlarının su içerisinde farklı oranlarda çözünmesine bağlanmıştır (Ramachandran, 1995).

Nakajima ve Yamada (2004), SNF'in çimento tanelerini dağıtma performansının, temel olarak, hidrate tanelerin birim yüzey alanında tutunmuş olan katkı miktarına bağlı olduğunu söylemiş; hidratların miktarını ve çözeltideki  $SO_4^{2-}$  konsantrasyonunu etkileyen çimento karakteristiklerinin, katkının performansını belirleyen önemli unsurlar olduğunu belirtmiştir. Çoğunlukla hemihidrat içeren çimento kullanıldığında, çimento hamurunda, karıştırma işleminden hemen sonraki  $SO_4^{2-}$  konsantrasyonunun yüksek olduğu ve zaman geçtikçe hızlı bir şekilde azaldığı belirtilmiştir. Karıştırma işleminden hemen sonra  $SO_4^{2-}$  konsantrasyonunun yüksek olması sebebiyle çimento taneleri üzerine tutunan SNF miktarı sınırlı kalır. Ancak konsantrasyonun azalmasıyla tutunan SNF miktarı artar. Böyle bir durumda ise akışkanlık kaybı azalır. Dolayısıyla araştırmacılar, alçıtaşına kıyasla yüksek oranda hemihidrat içeren çimento kullanılması durumunda, akışkanlık kaybının daha az olacağını belirtmiştir.

Sandberg (bt), SA'ların, sülfatların çözünme oranını arttırdıklarından dolayı, genel olarak etrenjit oluşumunu hızlandırıcı bir etkiye sahip olduğunu söylemiştir (Mork ve Gjoerv, 1997). Hemihidrat formunda sülfatlar çok daha kolay çözülebildiği için, SA'ların varlığında daha fazla etrenjit oluşur. Bunun yanında SA'nın dağıtma etkisi sayesinde, çimento sistemindeki etkileşim yüzeyinin artması sebebiyle toplam reaktivite artar. Sonuç olarak artan etrenjit oluşumu taze betonda eşik kayma gerilmesi değerinin artmasına neden olur.

Claisse ve diğer. (2001), 14 farklı yöreye ait çimento ve 3 farklı kökendeki SA ile hazırladıkları hamur örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmalar neticesinde, sülfat morfolojisinin (alçıtaşı, hemihidrat ve anhidritin bağıl miktarlarının) işlenebilme özelliği üzerinde çok fazla etkisinin olmadığını, özgül yüzey alanının etkisinin ise oldukça önemli olduğunu öne sürmüştür. Buna karşın hemihidrat miktarının sadece akışkanlaştırıcı katkının kullanılmaması durumunda önem kazanacağı belirtilmiştir. Araştırmacılar literatürde verilen bilgilere paralel olarak, alüminat fazlarının oldukça etkili olduğunu ve genel olarak alümin içeriğinin azalmasıyla işlenebilmenin arttığını belirtmiştir.

Greszczyk ve Kucharska (1991), yüksek reaktivitede klinker (ortorombik morfolojiye sahip  $C_3A$  ve yüksek alkali miktarı) kullanarak yaptıkları çalışmada,  $C_3A$  ve alkali içeriğinin artmasıyla kayma gerilmesi değerlerinin arttığını öne sürmüşler, bunu da, alkalilerin  $C_3A$ 'nın reaktivitesini artırmış olması sebebiyle, prizi kontrol etmek amacıyla kullanılan alçıtaşının etkinliğinin azalmasına bağlamışlardır (Claisse ve diğer., 2001).

Nawa ve diğer. (1989), yüksek oranda alkali içeren SA katkılı çimento hamurlarında, hemihidrat yerine dehidrat kullanıldığında akışkanlığın arttığını söylemiştir. Bununla birlikte düşük alkalili çimento hamurlarında, hemihidrat ya da dehidrat kullanılmasıyla, akışkanlıktaki değişimin önemsiz mertebede olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar ayrıca, düşük alkali içeren karışımlarda anhidrit kullanımının hemihidrat ve dehidrat kullanımına göre daha az akışkanlık sağladığını; buna karşın yüksek alkali içeren karışımlarda, akışkanlığın hemihidrat ve dehidrat kullanılması durumunda elde edilen akışkanlık değerlerinin arasında olduğunu söylemiştir (Kim, 2000).

Ranc (1990), toplam kalsiyum sülfat miktarı sabit kalacak şekilde, farklı miktarlarda dehidrat, hemihidrat ve anhidrit karışımlarını klinkere eklemiş ve bunları aynı inceliğe gelinceye kadar öğütmüştür. SA'nın varlığında çimento hamurları içerisinde en iyi akışkanlık davranışının, hemihidratın çok az, dehidratın ise çok kullanılmasıyla elde edildiği bildirilmiştir (Kim, 2000).



Jolicoeur ve diğer. (1992), farklı kompozisyona sahip 18 çimentoyla yaptıkları çalışmada en iyi akışkanlık değerinin dehidrat/hemihidrat/anhidrit oranının 60/20/20 olması durumunda elde edildiğini, bu oranın 70/30/0 olması durumunda ise 1-2 saatlik periyotta akışkanlık kaybının çok düşük olduğunu bildirmiştir (Kim, 2000).

Rollet ve diğer. (1992), SA'nın varlığında, anhidritin çok yüksek oranda olması durumunda, aşırı çökme kaybının meydana geleceğini söylemiştir (Kim, 2000).

#### **4.1.4 Alkali Etkisi**

Alkalilerin işlenebilirlik üzerindeki etkilerine yönelik olarak yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Jawed ve Skalny (1978) tarafından yapılan araştırma, SA kullanılmadığı takdirde, yüksek oranda alkali içeren çimentoların genellikle daha kötü reolojik davranış sergilediğini göstermiştir.

Dodson (1990), Rollet ve diğer. (1992) ve Hanna (1992), azalan alkali içeriğinin süperakışkanlaştırıcı katkıli karışımların işlenebilirliğini arttırdığını bildirmiştir (Jiang, 1999).

Locher ve diğer. (1982), çözeltideki alkali içeriğinin artmasıyla C<sub>3</sub>A'nın çözünebilirliğinin ve dolayısıyla etrenjit oluşumunun arttığını bildirmiştir (Griesser, 2002).

Lignosülfonatların geciktirici özelliği çimentodaki alkali miktarına bağlıdır. Yüksek C<sub>3</sub>A ve yüksek alkali içeren çimentolarda lignosülfonatların su azaltma etkinlikleri daha azdır (Rixom, 1978). Ramachandran ve diğer. (1981a), çimentodaki alkalilerin, lignosülfonatların akışkanlaştırıcı etkinliğini yok ettiğini söylemiştir.

Jiang ve diğer. (1999), süperakışkanlaştırıcı katkı ile üretilmiş çimento hamurlarının akışkanlığını ve akışkanlık kaybını kontrol eden ana parametrenin, çözelti içerisine ilk zamanlarda geçen çözünebilen alkali miktarı olduğunu bildirmiştir. Başlangıç akışkanlığını artırma ve zamanla akışkanlık kaybını azaltma

bakımından optimum çözünebilen alkali içeriği, süperakışkanlaştırıcı dozajından ve çimento tipinden bağımsız olarak, %0.4-%0.5 Na<sub>2</sub>O eşdeğeri olarak bulunmuştur. Ayrıca, optimum çözünebilen alkali miktarına sahip olan çimentolarda, C<sub>3</sub>A içeriğinin akışkanlık kaybı üzerinde pratik olarak hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Odler ve Wonnemann (1983), SO<sub>3</sub>'ün yokluğunda, Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O'nun klinkerdeki C<sub>3</sub>A fazının içine girerek yapısını değiştirdiğini (kübik formdan ortorombik yapıya dönüştürdüğünü) söylemiştir. Ayrıca C<sub>3</sub>A'nın içine Na<sub>2</sub>O'nun girmesi durumunda hidrasyonun yavaşladığı, K<sub>2</sub>O girmesi durumunda ise hızlandığı belirtilmiştir.

Klinkerleşme sürecinde, yakıttan kaynaklanan sülfür (SO<sub>3</sub>) miktarına bağlı olarak, çimentodaki alkaliler, alkali sülfat (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.3K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) formunda olabilir ya da C<sub>3</sub>A ve C<sub>2</sub>S'in içinde hapsolmuş olarak bulunabilir. "Sülfür/toplam alkali" değeri, klinkerdeki toplam alkali sülfat miktarını gösterir. Klinker göreceli olarak yüksek miktarda SO<sub>3</sub> içeriyorsa, alkalilerin büyük çoğunluğu birkaç dakika içerisinde çözeltiye geçer. Düşük SO<sub>3</sub> içeren klinkerlerde ise Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O, C<sub>3</sub>A ve C<sub>2</sub>S fazlarının içine girer. Dolayısıyla benzer SO<sub>3</sub> ve alkali miktarına sahip çimentolarda çözünebilen alkali miktarı değişebilmektedir (Jiang ve diğer., 1999).

Portland çimentosu üretiminde, sülfür ve alkali arasındaki oran genel olarak klinkerin sülfürizasyon derecesi olarak ifade edilir (Denklem 4.1) (Aİtcin, 2004).

$$\text{Sülfürizasyon derecesi} = \frac{SO_3 * 100}{1,292Na_2O + 0,85K_2O} \quad (\text{Denklem 4.1})$$

Sülfürizasyon derecesi C<sub>3</sub>A'nın reaktivitesini ve oluşan etrenjitin tipini ve miktarını kontrol ettiği için, klinkerdeki önemli bir karakteristik olarak bilinir (Aİtcin, 2004).

Tagnit-Hamou ve diğer. (1992), Marsh hunisi deneyi ile yaptıkları bir çalışmada, klinkerin sülfürizasyon derecesinin çimento hamurunun reolojisini etkilediğini

söylemiş; sülfürizasyon derecesindeki artışın akışkanlık kaybını azalttığını ortaya koymuştur (Tagnit-Hamou ve Aïtcin, 1993).

Alkali sülfatlar ortamdaki  $SO_4^{-2}$  konsantrasyonunu hidrasyon sürecinin tamamında etkilemesine rağmen, kalsiyum sülfatın türü sadece başlangıç konsantrasyonunda etkilidir (Nakajima ve Yamada, 2004).

Klinkerdeki alkali sülfatlar, herhangi bir formdaki kalsiyum sülfattan daha hızlı çözünür (Tagnit-Hamou ve Aïtcin, 1993). Sülfatın farklı formlarının çözünürlükleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Sülfat formlarının çözünme oranları (Kim, 2000)

Sülfatın tipi	Çözünürlük (g/l)
Dehidrat ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )	2,1
Hemihidrat ( $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ )	6,2-8,2
Doğal anhidrit ( $CaSO_4$ )	2,7
Çözünür anhidrit ( $CaSO_4$ )	6,3
Arkanit ( $K_2SO_4$ )	120
Afitalit ( $Na_2SO_4 \cdot 3K_2SO_4$ )	120
Kalsiyum langbeinit ( $2CaSO_4 \cdot K_2SO_4$ )	6,3
Sinjenit ( $CaSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot H_2O$ )	2,5

Çimentodaki farklı sülfat formları (Tablo 4.2), çözelti içerisindeki  $SO_4^{-2}$  iyonlarına kaynak oluştururlar.  $SO_4^{-2}$  iyonu konsantrasyonu hidrasyonu doğrudan etkiler.  $SO_4^{-2}$  iyonlarının aşırı miktarda olması durumunda (alçı taşının çökmesi) yalancı priz, yetersiz olması durumunda ise ani priz ortaya çıkar. Nedeni tam olarak anlaşılamamışsa da, süperakışkanlaştırıcılar sülfat formlarının çözünürlüğünü etkilemektedir (Tagnit-Hamou ve Aïtcin, 1993).

Aïtcin (2004), yüksek performanslı beton üretiminde, çimentoda doğru miktarda  $SO_3$  bulunmasının, etrenjit oluşumunu hızlı ve etkili bir şekilde kontrol etmeye

yetmeyeceğini; aynı zamanda doğru miktarda çözünebilir sülfatların da sistemde var olması gerektiğini bildirmiştir.

Nawa ve diğer. (1989), SNF esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanıldığında, düşük oranda alkali içeren çimento hamurlarının reolojik özelliklerinin karışıma bir miktar alkali sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ilave edilerek geliştirilebildiğini söylemiştir (Jiang ve diğer., 1999). Nawa ve diğer. (1989), karışıma alkali sülfat eklenmesi durumunda, hızla çözünen alkali sülfat tarafından ortama salınan  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonlarının, hızlı bir şekilde  $\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_4\text{AF}$  üzerinde tutunduğunu söylemiştir (Aİtcin, 2004). Bu durumda SA moleküllerinin reaktif bileşenler üzerine tutunma oranı azalır. Dolayısıyla, çözelti içerisinde daha fazla SA molekülünün kalması sayesinde akışkanlık artar (Chandra ve Björnström, 2002).

Kim ve diğer. (2000), kalsiyum sülfatın, SNF moleküllerinin çimento taneleri üzerine tutunmasını, sodyum sülfata göre daha az engellediğini söylemiş, bu durumu ise, düşük s/ç (0,35) oranından dolayı göreceli olarak suyun daha az bulunmasına ve kalsiyum sülfatın göreceli olarak daha düşük olan çözünebilirliğine bağlamıştır.

#### ***4.1.5 Öğütmeyi Kolaylaştırıcı Katkı Maddelerinin Etkisi***

Houst ve diğer. (1999), klinkere öğütmeyi kolaylaştırmak için katılan katkıların SA'ların tutunma özelliğini değiştirdiğini, dolayısıyla işlenebilmede farklılıklar ortaya çıktığını belirtmiştir. Yapılan çalışmada, öğütmeyi kolaylaştırıcı katkının (trietanol amin asetat), çimento hamurunun eşik kayma gerilmesini %25 mertebesinde azalttığı belirtilmiştir (Flatt ve Houst, 2001).

#### **4.2 Süperakışkanlaştırıcıdan Kaynaklanan Etkiler**

Piyasada bulunan SA'ların katı madde oranı, yoğunluk, pH, sülfat ve klorür içeriği gibi özellikleri genel olarak tüketiciye sunulur. Ancak bunlar, ürünün performansı hakkında bilgi veren şeyler değildir (Aİtcin ve diğer., 1994). SA'nın etkinliğini belirleyen en önemli özellikler; bağlı sülfonat grubunun pozisyonu,

polimer zincirlerinin uzunluğu ve bunların çapraz bağlanmaları, artık sülfat miktarı ve nötralizasyon işleminde kullanılan counter ion tipi olarak sıralanmıştır (Tagnit-Hamou ve Aİtcin, 1993). Aşağıda SA'ların performansını etkileyen faktörler ana hatlarıyla açıklanmıştır.

#### **4.2.1 Katkı Kökeni, Moleküler Ağırlık, Sülfonasyon ve Polimerizasyon Derecesi**

Süperakışkanlaştırıcılar kökenleri dolayısıyla birbirlerinden farklı olabilecekleri gibi, aynı kökenli süperakışkanlaştırıcılar da, moleküler ağırlık ve kimyasal kompozisyonlarındaki değişkenlikler nedeniyle kendi içlerinde farklılıklar gösterebilir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların yorumlanmasında karşılaşılan en büyük problem, süperakışkanlaştırıcıların kimyasal yapıları ve özellikle de moleküler ağırlıkları hakkında yeterli bilginin mevcut olmamasıdır (Chandra ve Björnström, 2002a).

Malhotra ve diğer. (1978), çökme değerini 50 mm'den 260 mm'ye çıkarmak için gerekli katkı miktarlarının SNF için %0,4; SMF ve MLS için %0,6 olduğunu söylemiştir. Bu durum SNF'in diğer iki katkıya göre daha etkili olduğunu göstermektedir (Kim, 2000).

Aİtcin ve diğer. (1994), katkı viskozitesinin genel olarak, moleküler ağırlık hakkında fikir verdiğini söylemiştir. Araştırmacılar ayrıca, moleküler ağırlığın, katkının performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirtmiştir.

Süperakışkanlaştırıcının molekül ağırlığı, çimento hamurunun viskozitesini belirleyen önemli bir faktördür. Lignosülfonat molekülünün ortalama molekül ağırlığı yaklaşık olarak 20000-30000 olup, molekül ağırlığı dağılımı 100 ile 100000 arasında değişir (Rixom, 1978). SMF esaslı süperakışkanlaştırıcı katkıların molekül ağırlığı ise yaklaşık olarak 30000'dir (Ramachandran, 1995). Basile ve diğer. (1989) tarafından, SNF esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak yapılan bir çalışma, katkının molekül ağırlığının artması ile akışkanlığın arttığını; ancak bir noktadan sonra, moleküler ağırlığın artmasının viskozitede artış ile sonuçlandığını göstermiştir

(Ramachandran, 1995). Bu sonuç, Collepardi ve diğer. (1981) tarafından da doğrulanmıştır.

Biagini ve diğer. (1982), çok yüksek moleküler ağırlığa sahip (50000) polistiren esaslı katkının akışkanlığı azalttığını söylemiş; bu durumu, uzun tek bir polimer zincirinin farklı çimento taneleri üzerinde tutunup, oluşan köprü etkisi nedeniyle topaklaşmanın oluşması şeklinde açıklamıştır (Kim, 2000).

Sebok (1986), farklı moleküler ağırlıktaki SMF'in çimento taneleri üzerinde tutunma yeteneğinin benzer olduğunu söylemiştir. Ancak, Cunningham ve diğer. (1989), göreceli olarak yüksek moleküler ağırlık değerindeki SMF'in çimento taneleri üzerinde tutunduğunu, buna karşın düşük moleküler ağırlık değerlerinde (7000'den küçük) tutunmanın gerçekleşmediğini belirtmiştir (Kim, 2000).

Uchikawa ve diğer. (1994), PC esaslı katkının moleküler ağırlığındaki değişimin çimento hamuru üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacılar sabit bir s/ç değerinde, en iyi akışkanlık için optimum bir moleküler ağırlık değerinden söz etmiştir. S/ç oranının 0,5 olması durumunda PC-A katkısının (mol. ağı. 25000), PC-B (mol. ağı. 21900) ve PC-C (mol. ağı. 16000) katkısına göre daha yüksek akışkanlık sağladığı belirtilmiş ancak akışkanlıktaki farklılığın çok önemli mertebede olmadığı söylenmiştir. S/ç oranının 0,3 olması durumunda PC-B katkısı, 0,2 olması durumunda ise PC-C katkısı daha fazla akışkanlık sağlamıştır (Kim, 2000).

Rixom ve Waddicor (1981), hazırladığı çeşitli tipteki lignosülfonat esaslı sentetik süperakışkanlaştırıcıların, betonun çökme değeri ve su ihtiyacı üzerindeki etkisini incelemiştir (Ramachandran, 1995). Lignosülfonatın moleküler ağırlığındaki artışın betonun işlenebilirliğini arttırdığını, başlangıç prizini geciktirdiğini ve 1 günlük basınç dayanımını az miktarda azalttığını bulmuştur. Sülfonasyondaki artışın, işlenebilirliği veya sürüklenmiş hava miktarını etkilemediği, ancak priz süresini kısalttığı görülmüştür. Genellikle, lignosülfonatın artan şeker içeriği, çimento hamurunun daha uzun sürede priz almasına neden olmuştur.

Andersen ve diğer. (1988), sülfonat polistirenin molekül ağırlığının (4000-70000) çimento tanelerini dağıtabilme yeteneği üzerindeki etkisini incelemiştir. Katkının dağıtma kabiliyetinin moleküler ağırlığın artması ile arttığı, ancak, 40000'in üzerindeki moleküler ağırlık değerlerinde, dağıtma etkisinin sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Collepardi ve diğer. (1981), 20 SNF numunesini farklı polimerizasyon derecelerinde sentezlemiştir. Araştırmacılar, hem katkıının çimento taneleri üzerine tutunma oranının, hem de Zeta potansiyel değerinin, moleküler ağırlığın bir yere kadar artmasıyla arttığını söylemiştir. Ayrıca, harç dayanımının polimerizasyon derecesinin artması ile arttığı vurgulanmıştır (Ramachandran, 1995).

Ferrari ve diğer. (1986),  $C_3A$  bakımından zengin çimentolarda SNF esaslı süperakışkanlaştırıcıların en iyi akışkanlık etkisini, moleküler ağırlığın 6000-8000 arasında olduğu durumda gösterdiğini, ancak daha yüksek oranlarda etkinin azaldığını belirtmiştir.  $C_4AF$  bakımından zengin çimentolarda, daha yüksek molekül ağırlıklarında böyle bir azalma görülmemiştir (Ramachandran, 1995).

Iizuka ve diğer. (1985), çeşitli PC esaslı katkıların çökme ve çökme kaybı üzerindeki etkilerini incelediği bir çalışmada, katkıının çimento ağırlığının %0,12 oranında kullanılması durumunda başlangıç çökme değerinin oldukça arttığını, çökme kaybının ise göreceli olarak azaldığını belirtmiştir (Ramachandran, 1995). Bu özellikleri sağlayabilecek olan optimum moleküler ağırlık 10000 olarak bulunmuştur. Bu katkı, SNF esaslı süperakışkanlaştırıcıya göre yüksek çökme, çökme değerini uzun süre koruma ve düşük kuma gibi özellikler göstermesine rağmen, hazırlanan betonlarda priz süresi ve hava içeriğinin artmasına neden olmuştur.

Hsu ve diğer. (2000), kendi sentezledikleri sülfonat fenol, sülfonat formaldehit ve sülfonat sodyum bisülfid'in sülfonasyon derecesi ve ortalama moleküler ağırlıklarının işlenebilme üzerindeki etkisini incelemiştir. Sülfonasyon derecesi arttıkça akışkanlık artmış, sülfonasyon oranı kararlı hale geldikten sonra ise moleküler ağırlığın artışıyla karışımın akışkanlık performansı artmıştır. Ancak sülfonasyon derecesinin, göreceli olarak moleküler ağırlıktan daha önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Lee ve diğer. (1997), yaptıkları çalışmada, yeterli sülfone edilmemiş polimerlerin moleküler

ağırlığının artışıyla, akışkanlık ve dayanım özelliklerinde düşüş gözlemiştir (Hsu ve diğer., 2000).

Mouka ve diğer. (1993), polimerizasyon derecesi ile dayanım gelişimi arasındaki ilişkinin, polimerin tipine bağlı olarak değiştiğini söylemiştir. Suda çözünebilen 7 polimerin beton özellikleri üzerindeki etkisi üzerine yapılan çalışmada, düşük moleküler ağırlıklı polimerlerin çimento tanelerini dağıtmada daha etkili olduğu görülmüştür (Ramachandran, 1995).

Asidik sülfonat grubu ( $\text{HSO}_3$ ) naftalin molekülüne 2 farklı pozisyonda bağlanır. Saat 12 yönünde bağlanması durumunda “ $\alpha$ ”, saat 2 yönünde bağlanması durumunda ise “ $\beta$ ” pozisyonu olarak adlandırılır. Sülfonat grubunun  $\beta$  pozisyonu olarak bağlanması SA molekülünü daha verimli yapar (Aitcin, 2004).

#### **4.2.2 Counter-Ion (Karşıt İyon) Kökeni**

Katkı üretiminin nötrleştirme aşamasında kullanılan baz, katkının performansını etkileyebilmektedir.

Piotte (1993), counter-ion yapısının SNF’in performansına etkisini incelemiş ve magnezyumun kullanılması durumunda (Mg-SNF), reolojik davranışın çok kötü olduğunu söylemiştir. Ayrıca, Na-SNF, Mg-SNF’e göre çok daha iyi performans göstermesine karşın, PC esaslı SA’ların üretiminde sodyum ya da magnezyum kullanılmasının performansta bir değişiklik yaratmadığı bildirilmiştir. Ca-SNF ile hazırlanan karışımlar ise yüksek viskozite ve yüksek çökme kaybı göstermiştir (Flatt ve Houst, 2001).

Rixom ve Waddicor (1981), sodyum lignosülfonatların kalsiyum lignosülfonatlara kıyasla daha iyi bir akışkanlık sağladığını söylemiştir (Ramachandran, 1995).

Simard ve diğer. (1993), Na-SNF’in Ca-SNF’den daha etkili olduğunu söylemiştir (Kim, 2000).



### 4.2.3 Süperakışkanlaştırıcının Çimento Bileşenleri Üzerinde Tutunma Oranı

SA'ların etkinliği, bunların çözelti içerisindeki konsantrasyonuyla ilişkilidir. SA'nın çimento taneleri üzerinde şiddetli bir şekilde tutunması nedeniyle, hidratasyonun erken zamanlarında süperakışkanlaştırıcının konsantrasyonu önemli ölçüde azalır (Ramachandran, 1995).

Nawa ve Eguchi (1992) yaptıkları çalışmada, SA'nın yokluğunda  $C_3A$ 'nın ve  $C_3S$ 'in Zeta potansiyellerini sırasıyla 23mV ve -9mV olarak bulmuştur. Ortam kalsiyum sülfatla doygun hale getirildiğinde bu değerler sırasıyla 0 ve -12mV olarak bulunmuştur. Karışıma SA eklendiğinde, negatif yüklü SA polimerleri  $C_3A$  ve  $C_3S$  üzerinde tutunur. Ancak  $C_3S$ 'e göre daha az negatifliğe sahip olduğundan dolayı  $C_3A$  üzerindeki tutunma oranı çok daha fazladır. Dolayısıyla katkı molekülleri (özellikle SNF ve SMF) asıl olarak  $C_3A$  üzerinde tutunmaya eğilim gösterirler. Araştırmacılar aynı çalışmada, SNF'in  $C_3A$  üzerinde 280mg/g,  $C_4AF$  üzerinde 260 mg/g,  $C_3S$  üzerinde ise sadece 2mg/g katkı tutunduğunu bildirmiştir (Kim, 2000).

Bütün SA tipleri için,  $C_3A$  ve  $C_4AF$  bileşenleri üzerinde  $C_3S$  ve  $C_2S$  bileşenlerine göre çok daha fazla katkı tutunur. SA'nın yokluğunda  $C_3S$  ve  $C_2S$  bileşenleri negatif,  $C_3A$  ve  $C_4AF$  ise pozitif Zeta potansiyele sahiptir. Dolayısıyla zıt elektrostatik potansiyele sahip bu tanecikler arasında hızlı bir topaklaşma meydana gelebilir. Bununla birlikte SA kullanılması durumunda çimentodaki bu bileşenlerin hepsi negatif potansiyele sahip olur. Böylece, aynı yüklü tanelerin elektrostatik olarak birbirini itmesi sayesinde akışkanlık artar (Yoshioka ve diğer., 2002).

Suyla henüz temas etmemiş bir karışıma SMF eklendiğinde, hemen hemen tüm katkı birkaç dakika içinde tutunur. Tutunma hızı ve miktarı daha önceden suyla temas etmiş bir karışımda daha düşüktür. Tutunma oranı arttıkça Zeta potansiyeli de artış gösterir. Diğer bir deyişle itki kuvvetleri, tutunmanın artmasıyla artış gösterir (Ramachandran, 1984). Zeta potansiyel ve tutunma arasındaki korelasyonu inceleyen bir çalışmada, süperakışkanlaştırıcı konsantrasyonunun artmasıyla hem tutunmanın hem de Zeta potansiyel değerinin arttığı belirtilmiştir. Ayrıca tutunmanın miktarı ve

hızının katkının moleküler ağırlığına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmiş, moleküler ağırlığın artmasıyla tutunma miktarının artış gösterdiği söylenmiştir (Andersen ve diğer., 1988).

SA molekülleri sadece hidrate olmamış bileşenler üzerinde değil, aynı zamanda ilk anda hidrate olan kristal formlar üzerinde de tutunurlar. Başlangıçta bu ilk kristal formların oluşmasıyla etrenjit oluşumu durur. İğne formunda kristallerin oluşumundan ziyade amorf görünümlü hamur fazında büyüklü küçüklü etrenjit kümeleri belirir. Sistemde SA kalmadığında ise iğne formundaki, olağan etrenjit oluşumu tekrar başlar (Prince ve diğer., 2002).

Uchikawa (1994), SNF'in çimento bileşenleri ve hidratlar üzerine tutunma miktarını ölçmüştür. Karışıma 100 mg/g SNF eklendiğinde, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF ve etrenjit üzerinde tutunan katkı miktarları sırasıyla 94,3 mg/g, 91,5 mg/g ve 37,4 mg/g olarak bulunmuştur (Kim ve diğer., 2000).

Suzue ve diğer. (1981) yaptıkları çalışmada, alçıtaşının yokluğunda C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF üzerinde tutunan katkı miktarının, alçıtaşının kullanılması durumundaki tutunma miktarına göre yaklaşık 10 kat daha fazla olduğunu söylemiştir (Kim, 2000).

Katkı molekülleri, etrenjitin yanında C<sub>3</sub>A'nın diğer hidrate fazları (hekzagonal C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> ve C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>) üzerinde de tutunmaya eğilimlidir. Ancak hekzagonal yapı üzerindeki tutunma hızı C<sub>3</sub>A üzerinde tutunma hızına göre çok düşüktür (Ramachandran, 1995).

Perche (2004), yaptığı çalışmada ana zincirin ve yan zincirlerin uzun olmasının tutunmayı ve dolayısıyla akışkanlığı arttırdığını söylemiştir (Houst ve diğer., bt.a).

Katkının çimento taneleri üzerinde tutunma özelliği, çimentonun alkali içeriğinden önemli ölçüde etkilenir. Luke ve Aıtcin (1990), yaptıkları çalışmada C<sub>3</sub>A ve alçıtaşından oluşan sistemde 0,25 M KOH ve 0,025 M NaOH bulunması halinde, 5 dakika içerisinde, kontrol karışımına göre tutunma oranında % 50 azalma olduğunu

görmüştür. Bunun sebebi ise, alkalilerin hidratasyon ürünlerinin içine girerek tutunma karakteristiğini etkilemesi olarak açıklanmıştır (Ramachandran, 1995).

Yapılan çalışmalarda elde edilen en önemli bulgulardan birisi de, dağıtma yeteneğinin, katkının hidratlar üzerinde tutunması durumunda gerçekleşiyor olmasıdır. Çimentodaki bileşenler tarafından emilen katkı, dağıtma yeteneğine sahip değildir (Nakajima ve Yamada, 2004).

#### **4.2.4 Süperakışkanlaştırıcının Eklenme Zamanı**

Katkının, karışım suyu betona eklendikten birkaç dakika sonra ilave edilmesi durumunda çimento tanelerini dağıtma yeteneği artar (Ramachandran, 1995). Zakka ve diğer. (1989) ve Collepardi (1994), su ve çimentonun bir araya gelmesiyle, su moleküllerinin hızlı bir şekilde reaktif bileşenler tarafından tutulduğunu, bu bileşenler üzerinde ilk zamanlarda hidrat tabakası oluştuğunu söylemiştir. SA'nın gecikmeli olarak eklenmesi durumunda, bu hidrat tabakası sayesinde SA moleküllerinin reaktif bileşenler tarafından tutulma oranı azalır ve ortamda kalan yeterli miktardaki SA molekülleri,  $C_3S$  ve  $C_2S$  üzerine tutunarak bu bileşenlerin etkili bir şekilde dağılmasını sağlar. Araştırmacılar ayrıca, gecikmeli ekleme zamanının 5-15 dakika olduğunu söylemiştir (Aiad, 2003). Diğer bir çalışmada, Chiochio ve Paolini (1985), NSF ve MSF'in en uygun eklenme zamanının, durgunluk periyodunun başlangıcı olduğunu söylemiştir (Aiad, 2003). Bu sonuç, Hsu ve diğer. (1999) tarafından da doğrulanmıştır.

Aiad (2003), SA'nın en uygun eklenme zamanının su ve çimentonun temasından 10-15 dakika sonra olduğunu söylemiş, bu sürenin çimento ve SA tipinden bağımsız olduğunu bildirmiştir. Yapılan çalışmada SA'nın gecikmeli olarak eklenmesinin erken (15.dakika) ve ileri (120.dakika) zamanlarda kayma gerilmesini, eşik kayma gerilmesini ve plastik viskoziteyi azalttığı belirtilmiştir.

Uchikawa (1995), katkının ilk anda eklenmesi durumunda  $C_3S$  üzerinde tutunmuş olan katkı tabakasının kalınlığının 50 nm, arafazlar ( $C_3A$  ve  $C_4AF$ ) üzerindeki

tabakanın ise 300 nm civarında olduğunu söylemiştir. SA'nın gecikmeli eklenmesi durumunda bütün fazlar üzerindeki kalınlık yaklaşık olarak 20nm değerine düşmüştür (Griesser, 2002).

Hewlett (1979), SA katılmış bir karışımda, su ve çimentonun temasından 5-50 dakika sonraki periyotta aşırı çökme kaybının meydana geldiğini söylemiştir (Hsu ve diğer., 1999). Kasami ve diğer. (1979), SA'nın gecikmeli olarak eklenmesiyle çökme değerinin 1 saat boyunca sabit kaldığını bildirmiştir (Hsu ve diğer., 1999)

#### ***4.2.5 Sıcaklık***

Genel olarak sıcaklığın artmasıyla akışkanlık azalır ve çökme kaybı artar. Ancak bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Nawa ve diğer. (2000) sıcaklığın artışıyla akışkanlığın azaldığını belirtmiş; buna karşın, sıcaklıktaki artışın SA'nın tutunma oranını arttırması nedeniyle akışkanlıkta artma meydana gelebileceğini söylemiştir. Ancak, Flatt ve diğer. (1997) sıcaklığın artışıyla tutunma oranının artmasının tutarlı bir sonuç olmadığını bildirmiştir (Griesser, 2002).

## BÖLÜM BEŞ

### ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Hamur ve beton karışımlarının taze haldeki özelliklerini belirlemek üzere çok sayıda deney yöntemi geliştirilmiştir. Hamur karışımları için önerilen 2 farklı deney ise “Marsh hunisi” ve “mini çökme” deneyleridir. Aşağıda, bu çalışmada kullanılan bu iki deney yöntemi hakkında genel bilgiler verilmiştir.

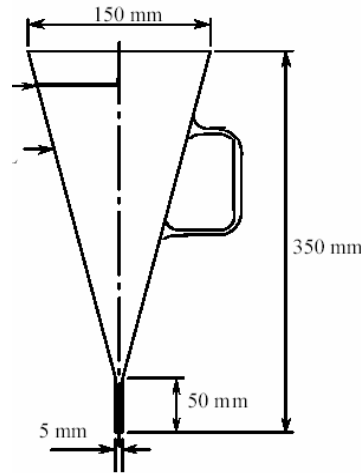
#### 5.1 Marsh Hunisi Deneyi

Bu deney yöntemi, hazırlanan hamur karışımının, ucunda küçük bir boşluk bırakılmış olan bir huni içerisine dökülmesi ve belirli hacimdeki hamurun bu huni içerisinden geçiş süresinin belirlenmesi ilkesine dayanır (AİTCİN, 2004).

Hazırlanan çimento hamurlarının bağıl akışkanlığını belirlemek amacıyla kullanılan bu deneyde, akış süresi ile akışkanlık arasında ters orantı vardır.

Nehdi (1998), yüksek karıştırma hızlarında, akış süresinin plastik viskoziteyle korelasyon gösterdiğini söylemiştir (Jiang, 2000). Katkı dozajının artırılmasıyla karışımın viskozitesinin ve akış süresinin azaldığı belirtilmiştir. Khayat ve Yahia (1998), yaptıkları çalışmada göreceli olarak yüksek deformasyon oranlarında ( $340 \text{ s}^{-1}$  ve  $510 \text{ s}^{-1}$ ), viskozitenin akış süresiyle oldukça iyi bir korelasyon gösterdiğini söylemiştir.

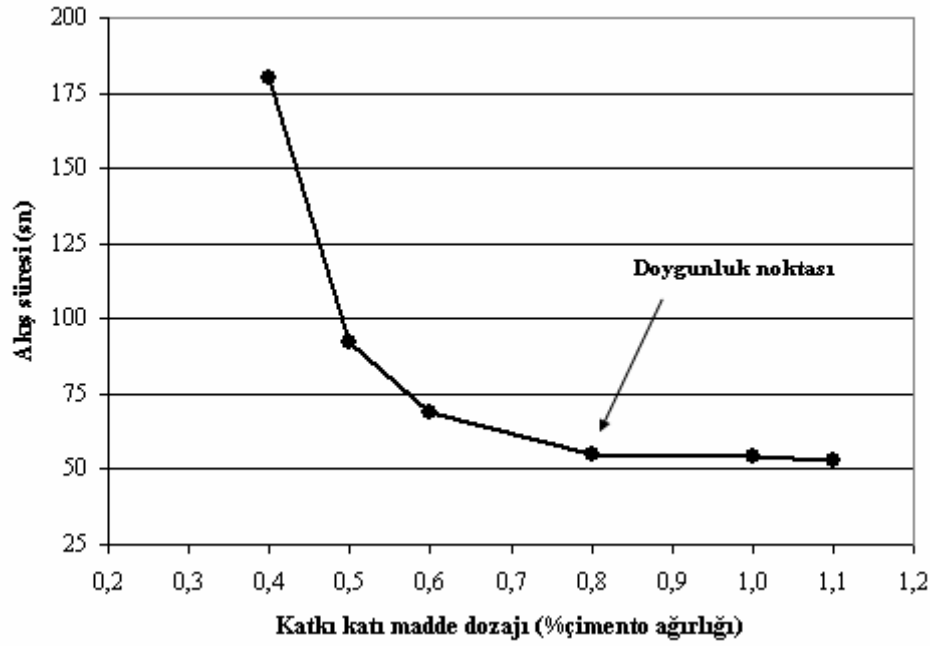
Marsh Hunisi farklı geometrilere olabilmektedir (AİTCİN, 2004). Bu çalışmada kullanılan huninin boyutları Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Marsh hunisi boyutları

Bu deney yönteminde, akış süresinin katkı dozajıyla değişimi incelenerek “doygunluk noktası” adı verilen bir kavram tanımlanır (Şekil 5.2). Buna göre, akışkanlaştırıcı katkı dozajının artırılmasıyla, akış süresinin ya da viskozitenin çok fazla azalmadığı katkı dozajına karşılık gelen nokta “doygunluk noktası” olarak adlandırılır (Aİtcin, 2004). Doygunluk noktasına karşılık gelen dozajdan daha fazla katkı kullanmanın herhangi bir yararı yoktur. Ekonomik dezavantajının yanında, bu dozajın üzerinde katkı kullanımı, ayrılmaya ve prizinin gecikmesine neden olabilmektedir (Aİtcin, 1994). Doygunluk noktası beton ve harç karışımlarında en iyi reolojik özellikleri sağlamak amacıyla yaklaşık bir katkı dozajı olarak öngörülebilir (Nkinamubanzi ve Fournier, 2003).

Marsh hunisi deneyinde belirlenen akış süresi ve doygunluk noktası değerleri, s/ç oranı ve karıştırma prosedüründen önemli ölçüde etkilenir. Araştırmacılar, s/ç oranının azalmasıyla, beklendiği üzere hem akış süresinin hem de doygunluk noktası değerinin arttığını belirtmiştir. Ayrıca, s/ç oranının artışıyla akışkanlığın arttığı belirtilmesine karşın, katkı dozajının artışıyla akışkanlığın her zaman artış göstermeyebileceği vurgulanmıştır (Agullo ve diğer., 1999). Yazarlar, toplam karıştırma süresi aynı kalmak koşuluyla, karışım bileşenlerini farklı karıştırma hızlarında, farklı sıralarda, farklı sürelerde karıştırmış ve akış süresinin 20 s ile 200 s arasında değiştiğini gözlemlemiştir (Agullo ve diğer., 1999).



Şekil 5.2. Doygunluk noktası

Baalbaki (1990), süre ölçümünün, karışım huniye döküldükten sonra parmağın huninin alt ucundan çekilmesiyle başladığını ve ölçekli kaptaki biriken hamurun 700 ml. seviyesine gelmesiyle sona erdiğini bildirmiştir (Nkinamubanzi ve Fournier, 2003). Huni içindeki hamur karışımı alt uca bir basınç yaratır, ancak deney başlatıldığında bu basınç, hamur kütlesinin zamanla azalmasıyla birlikte sürekli azalır. Bu da akış rejiminin değişmesine yol açarak deneysel çalışmayı sağlıklı kılar. Bu olumsuz etkiyi telafi edebilmek için daha önceki çalışmalarda, akış rejiminin çok fazla değişmediği ilk 700 ml'lik hamur hacminin akması için gereken süre, akış süresi olarak öngörülmüştür.

Marsh hunisi deneyinde, hazırlanan 1200 ml'lik hamurun 1000 ml'lik kısmı, çimento ya da katkının yetersiz performansı nedeniyle huniden akmadığı takdirde, deney geçersiz sayılmaktadır (Nkinamubanzi ve Fournier, 2003).

Pratik açıdan bakıldığında çok akışkan ya da çok viskoz karışımlarla çalışmak anlamlı olmayabilir. Çünkü böyle bir durumda uyumu etkileyen problemleri ortaya koymak zorlaşır. Aitein (2004), tecrübeleri ışığında s/ç oranının 0,35-0,40 olması durumunda deneyin yapılabileceğini söylemiştir. Bu oranın seçilmesindeki diğer bir

sebepten de, yüksek performanslı betonlarda düşük s/ç oranları kullanıldığı için, bu oranın, pratikte kullanılan betonu temsil eden bir oran olmasıdır (Jiang ve diğer, 2000). Roussel ve Le Roy (2005), karışımın viskozitesinin çok düşük olması durumunda, viskozite ve akış süresi arasında doğrusal bir ilişki kurulamayacağını; diğer taraftan, belirli bir eşik kayma gerilmesine sahip karışımlarda, karışımın ağırlığının huninin alt ucunda yaratacağı gerilmenin, bu gerilmeyi aşamayabileceği ve böyle bir durumda akışın gözlenemeyeceğini söylemiştir.

Marsh hunisi deneyinin uygulanma zamanları, literatürde karışım hazırlandıktan sonraki 5. dakika ve 60. dakika olarak belirtilmiştir (Aitcin, 2004).

Bu yöntemi öneren araştırmacı, karışımların hazırlanmasında mutfak tipi yüksek devirli karıştırıcı kullanmayı tercih etmiştir (Aitcin, 2004). Bu çalışmada da karıştırıcı içerisinde ani topaklanmayı önlemek amacıyla, ilk önce Hobart mikserde karıştırma yapılmış ve kıvam kazanan karışım daha sonra yüksek devirli karıştırıcıya konularak karışımlar hazırlanmıştır.

## 5.2 Mini Çökme Deneyi

Kantro (1980) tarafından geliştirilen mini çökme deneyinde, hazırlanan hamur karışımı, düzgün bir yüzeyin merkezine konulan, alt iç çapı 38,1 mm, üst iç çapı 19 mm ve yüksekliği 57,2 mm olan kesik konik biçimli bir aparatın içine doldurulur (Aitcin, 2004). Çökme aparatı düşey olarak yavaşça kaldırılır ve yayılmanın tamamlanması için bir süre (10-20 sn) beklenir. Daha sonra kumpas yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınır ve kaydedilir.

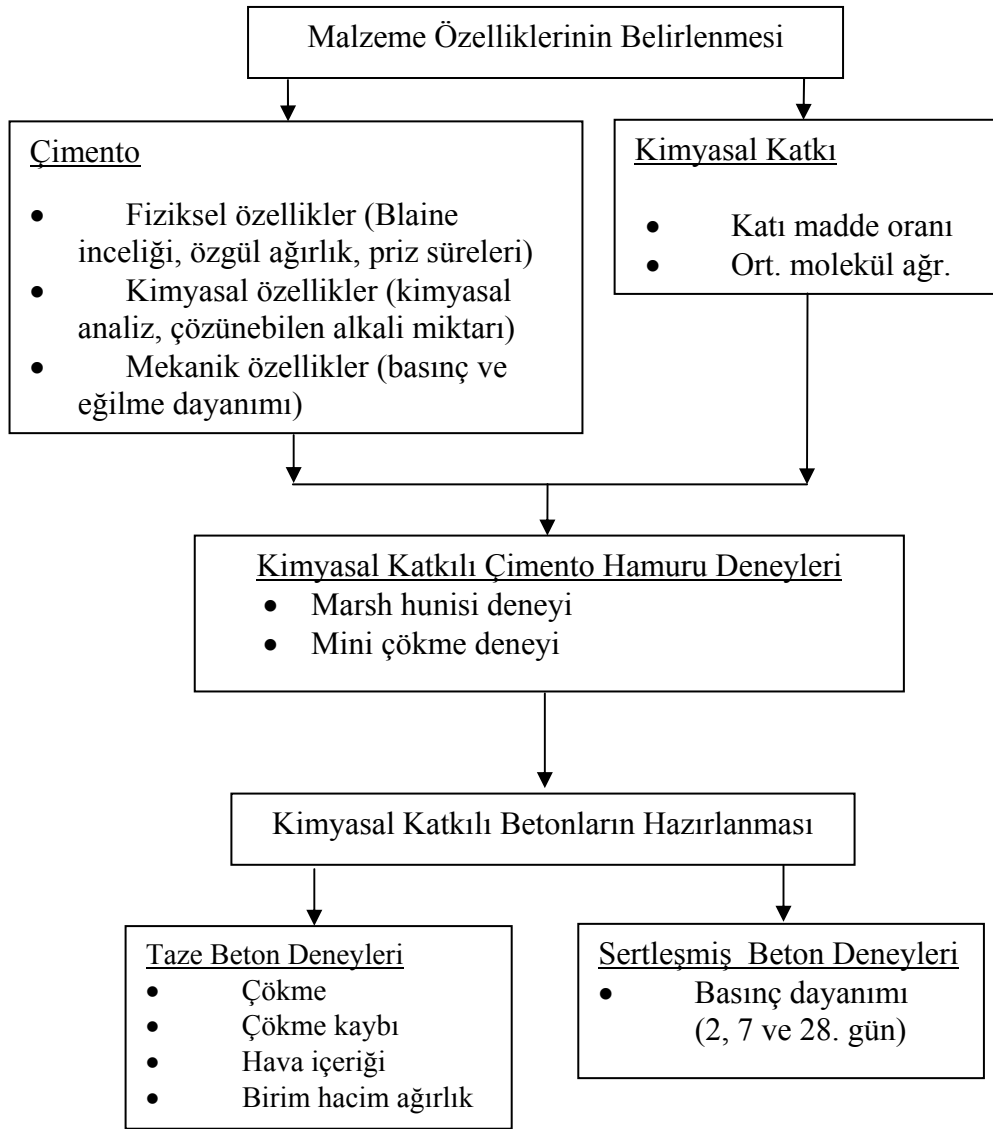
Nehdi (1998), düşük karıştırma hızlarında, yayılma değerlerinin eşik kayma gerilmesiyle korelasyon gösterdiğini söylemiştir (Jiang, 2000). Khayat ve Yahia (1998), yaptıkları çalışmada göreceli olarak düşük deformasyon oranlarında ( $5,1 \text{ s}^{-1}$ ), eşik kayma gerilmesinin yayılma değerleriyle oldukça iyi bir korelasyon gösterdiğini söylemiştir.



## BÖLÜM ALTI

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma iki aşamalı olarak yapılmıştır. Birinci aşamada, çimento hamuru üzerinde Marsh hunisi ve mini çökme deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise, seçilen bir kimyasal katkı kullanılarak beton karışımları hazırlanmış ve hamur deneyleri ile beton deneyleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneysel çalışmaya ait akış şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 Deneysel çalışma akış şeması

## 6.1 Malzeme Özellikleri

Çalışmada kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri aşağıda verilmiştir.

### 6.1.1 Çimento

Deneylerde kullanılan 18 adet CEM I 42,5, 1 adet SDÇ32,5, 1 adet BPC 42,5 tipi çimentoya ait kimyasal özellikler Tablo 6.1’de, fiziksel ve mekanik özellikler ise Tablo 6.2’de verilmiştir. Çimento içerisindeki çözünebilir alkali miktarı ASTM C114’e göre belirlenmiştir. Çözünebilir alkali miktarı, 250 ml su ve 25 gr çimento kullanılarak hazırlanan hamur örnekleri üzerinde 10. dakikada belirlenmiştir. Deneyler ÇİMENTAŞ ve TÇMB laboratuvarlarında yapılmıştır.

### 6.1.2 Kimyasal Katkı

Çalışma kapsamında, TS EN 934-2 standardına uygun, 4 farklı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Kullanılan tüm katkıları, naftalin sülfonat esaslı olup priz geciktirici özelliğe sahip değildir. Katkıların katı madde oranları ve ortalama moleküler ağırlıkları Tablo 6.3’te verilmiştir. Ortalama moleküler ağırlık deneyleri YKS firması laboratuvarlarında yapılmıştır.

### 6.1.3 Agregası

Bu çalışmada, agrega olarak 0-3, 0-5 ve 5-15 mm tane boyutlarında kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 6.4’te, elek analizi sonuçları ise Tablo 6.5’de verilmiştir.

Agregaların betonda kullanım oranı, agrega karışımının granülometrisinin, TS 706 standardında verilen incelik ve kabalık sınırlarının içinde kalacak ve ideal granülometri eğrisine mümkün olduğunca yakın olacak şekilde belirlenmiştir. Agregaların ağırlıkça betonda kullanım oranı 0-3, 0-5 ve 5-15 mm tane sınıflarındaki agregalar için sırasıyla, %25, %25 ve %50’dir. Agregası karışımının granülometri eğrisi, incelik, kalınlık ve ideal granülometri eğrileri ile birlikte Şekil 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Çimentoların kimyasal özellikleri

Bileşen	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç8	Ç9	Ç10*	Ç11	Ç12	Ç13	Ç14	Ç15	Ç16	Ç17	Ç18	Ç19	Ç20**
MgO (%)	1,09	1,14	1,13	2,81	1,97	1,4	1,6	1,8	2,36	1,08	1,14	2,55	2,1	2,16	1,14	1,07	2,13	1,08	1,43	1,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5,51	4,99	5,43	4,78	4,25	4,29	4,68	5,32	5,31	4,56	4,51	4,83	5,02	4,05	4,62	3,81	5,36	5,24	5,04	5,22
SiO <sub>2</sub> (%)	19,47	18,86	19,53	19,05	19,11	20,06	19,88	19,21	19,21	21,73	18,53	19,96	19,82	19,19	19,47	20,5	19,04	18,91	19,21	19,24
SO <sub>3</sub> (%)	2,41	2,81	2,2	2,05	2,19	1,91	2,61	1,92	3,14	2,73	2,18	2,4	1,74	2,38	2,17	1,8	2,28	2,26	2,67	2,75
Na <sub>2</sub> O (%)	0,34	0,3	0,35	0,43	0,23	0,25	0,37	0,45	0,26	0,48	0,36	0,88	0,2	0,24	0,33	0,18	0,38	0,51	0,27	0,41
K <sub>2</sub> O (%)	0,79	0,8	1,09	0,77	0,91	0,64	0,56	0,94	0,95	0,35	0,61	0,67	0,75	0,68	0,61	0,58	0,9	0,49	0,88	0,65
CaO (%)	62,78	63,26	61,01	62,85	62,45	63,34	63,63	62,83	60,81	64,06	62,7	61,69	63,47	64,01	63,63	64,57	62,72	63,47	62,67	62,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,28	3,65	3,04	3,1	3,49	4,52	3,03	3,03	2,97	0,63	4,07	3,87	3,34	3,23	3,32	3,73	2,97	3,3	3,42	5,07
Cl <sup>-</sup> (%)	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0,001	0	0,016	0	0	0	0	0	0	0	0,009
S. CaO (%)	0,97	0,97	1,97	2,27	1,75	1,8	0,96	2,19	1,65	1,45	1,16	0,91	0,91	1,16	1,9	1,36	1,1	1,1	1,09	1,98
Çözünen Na <sub>2</sub> O (%)	0,08	0,15	0,05	0,03	0,05	0,1	0,15	0,1	0,21	0,18	0,11	0,2	0,12	0,14	0,12	0,02	0,17	0,12	0,17	0,14
Çözünen K <sub>2</sub> O (%)	0,38	0,55	0,45	0,25	0,55	0,46	0,55	0,50	0,75	0,33	0,53	0,58	0,65	0,53	0,40	0,20	0,65	0,29	0,73	0,35
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,63	0,28	0,98	0,15	0,51	0,61	0,3	0,95	0,53	0,10	0,43	0,5	0,46	0,33	0,46	0,91	0,73	0,31	0,48	0,92
Kızdırma Kaybı (%)	3,72	2,71	4,63	2,56	3,72	2,14	2,25	2,85	3,15	2,82	4,74	1,44	2,23	2,73	3,62	2,15	2,77	3,33	2,54	2,71
Ölçülemeyen (%)	0,64	1,5	1,59	1,61	1,67	1,46	1,39	1,66	1,85	1,56	1,17	1,7	1,33	1,34	1,09	1,61	1,46	1,41	1,88	-
Kireç Doy. Faktörü	97,72	100,38	94,29	100,71	100,17	96,64	97,84	99,11	94,58	93,27	102,22	93,63	97,91	102,87	99,96	98,43	99,3	100,99	98,15	-
Toplam Katkı (%)	7,01	4,7	6,58	3,18	6,51	1,95	3,25	4,68	3,68	3,22	9,08	1,41	3,86	4,93	6,86	3,25	4,84	6,2	4,0	4,85
C <sub>1</sub> S (%)	56,46	63,5	44,81	59,5	62,01	57,37	60,79	55,33	46,03	50,41	67,38	50,94	60,6	71,42	61,32	65,47	59,42	63,82	58,35	50,72
C <sub>2</sub> S (%)	13,24	6,15	22,19	9,73	8,01	14,23	11,15	13,34	20,35	24,27	2,29	18,79	11,09	1,14	9,57	9,39	9,75	6,08	11,04	16,89
C <sub>3</sub> A (%)	10,74	7,06	9,24	7,41	5,36	3,73	7,27	8,96	9,04	11,03	5,07	6,24	8,19	5,27	6,63	3,77	9,18	8,29	7,57	5,26
C <sub>4</sub> AF (%)	6,95	11,1	9,25	9,43	10,63	13,74	9,23	9,22	9,03	1,91	12,38	11,77	10,1	9,81	10,09	11,36	9,03	10,04	10,41	15,43

\* BPÇ42,5

\*\* SDC32,5

Tablo 6.2 Çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri

	Özgül ağırlık	Blaine inceliği (cm <sup>2</sup> /g)	Eğilme dayanımı (MPa)		Basınç dayanımı (MPa)		Priz süreleri		
			2. gün	28. gün	2. gün	28. gün	Kıvam suyu (%)	Başl. (dk.)	Son (dk.)
Ç1	3,09	3500	7,0	12,6	26,8	49,3	27	125	245
Ç2	3,11	3680	7,8	12,4	30,9	54,9	28	135	220
Ç3	3,01	3230	6,5	12,5	24,2	48,7	32	175	275
Ç4	3,08	2820	7,8	11,9	26,8	50,3	32	170	305
Ç5	3,08	3280	7,0	12,7	29,0	50,7	30	230	325
Ç6	3,12	3550	8,0	12,8	29,1	57,0	28	210	295
Ç7	3,12	3560	7,9	13,7	29,8	57,4	28	130	210
Ç8	3,08	3860	8,3	12,9	32,7	51,1	31	115	165
Ç9	3,09	3950	8,4	12,6	31,1	50,8	28	145	235
Ç10*	3,05	4380	8,6	13,3	37,2	53,7	32	100	155
Ç11	3,11	3350	6,8	11,8	24,0	49,5	29	170	270
Ç12	3,16	3540	7,6	14,0	29,7	53,9	30	180	285
Ç13	3,17	3470	7,4	11,8	28,9	44,5	25	125	185
Ç14	3,12	3050	7,8	12,7	28,1	47,4	26	155	240
Ç15	3,11	3630	7,7	13,4	29,2	53,5	26	160	245
Ç16	3,14	3540	8,1	14,1	31,1	54,4	28	140	235
Ç17	3,12	3230	8,1	13,0	28,9	50,0	28	150	250
Ç18	3,1	3330	6,9	12,3	27,9	48,1	28	110	180
Ç19	3,13	3780	7,5	12,4	31,5	51,1	29	130	220
Ç20**	3,12	3790	8,1	12,3	31,1	53,7	29	105	195

\* BPÇ42,5

\*\* SDÇ32,5

Tablo 6.3 Kimyasal katkılara ait özellikler

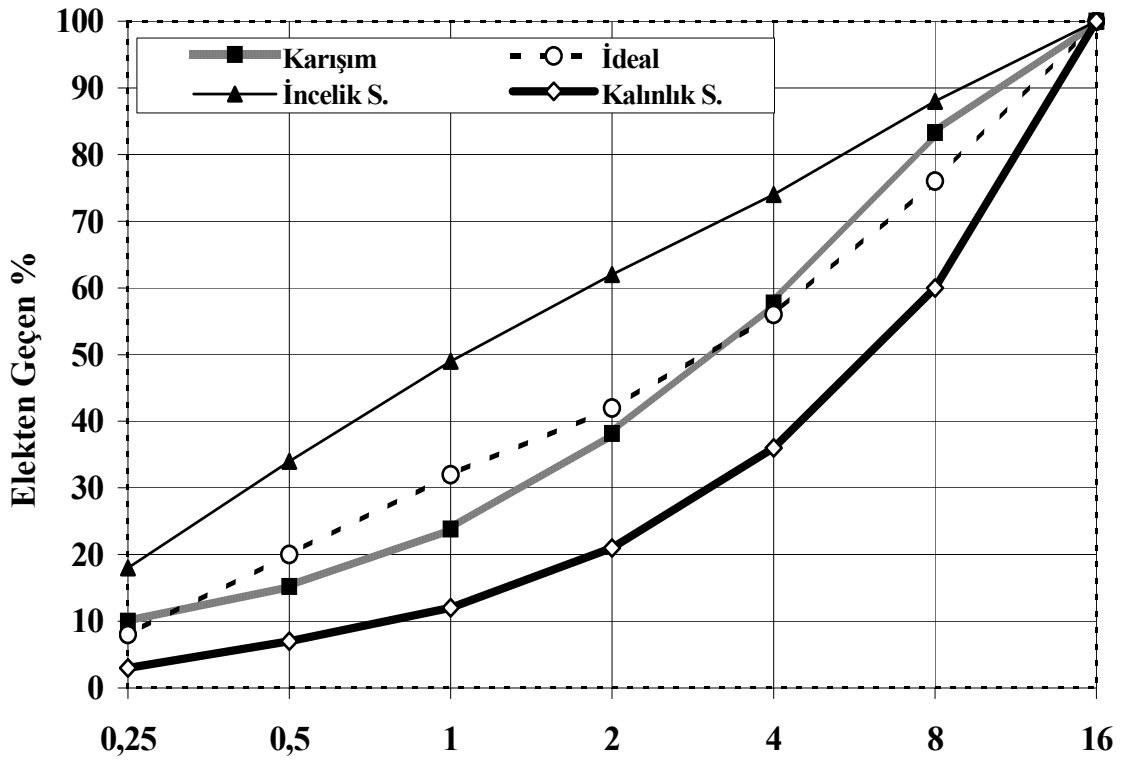
Katkı	S1	S2	S3	S4
Katı madde oranı (%)	41	41	41	39
Ort. moleküler ağırlık	5457	7354	9898	12807

Tablo 6.4 Agregaların Fiziksel Özellikleri

Özellik	Agrega tane sınıfı			
	0-3 mm	0-5 mm	5-15 mm	
Kuru özgül ağırlık	2.57	2.59	2.70	
Kuru yüzey doymun özgül ağırlık	2.62	2.62	2.71	
Su emme (%)	1.8	1.21	0.39	
Birim hacim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Sıkışık	1680	1640	1850
	Gevşek	1480	1460	1570

Tablo 6.5 Agregaların Elek Analizi

Elek açıklığı (mm)	Elekten geçen (%)		
	0-3 mm	0-5 mm	5-15 mm
16	100,0	100,0	100,0
8	100,0	100,0	66,6
4	99,5	94,0	18,6
2	72,5	70,4	4,9
1	42,6	48,1	2,3
0,5	25,4	32,2	1,6
0,25	16,0	21,5	1,3



Şekil 6.2 Granulometri sınırları ve karışıma ait granulometri eğrisi

## 6.2 Hamur Deneyleri

Süperakışkanlaştırıcı dozajı ve zamanın bir fonksiyonu olan çimento hamurunun reolojik davranışı, çökme ve çökme kaybı gibi taze betonla ilgili anahtar parametreler hakkında önemli fikir verir. Bu çalışmada hamur karışımlarına ait özellikler Marsh Hunisi ve Mini Çökme deneyleri ile belirlenmiştir. Aşağıda, bu deneylerde izlenen yöntem açıklanmıştır.

### 6.2.1 Deney Yöntemi

Tüm karışımlar s/ç oranı 0,35 olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneyler, sıcaklık kontrollü odada  $20\pm 1$  °C’de gerçekleştirilmiştir. Katkı, su ve çimento’nun sıcaklığının ortam sıcaklığında olması için, bu malzemeler sürekli olarak deneyin gerçekleştirildiği odada bekletilmiştir. Tüm karışımlarda s/ç oranını sabit tutmak için katkının içinde bulunan su da dikkate alınmıştır. Katkıdaki su miktarının dikkate alınmaması durumunda, farklı katı madde oranlarına sahip olan süperakışkanlaştırıcıların performansının kıyaslanmasında “s/ç” değerinde oluşabilecek hatayı ortadan kaldırmak için, süperakışkanlaştırıcı dozajı, çimento ağırlığının yüzdesi şeklinde “katı madde dozajı” olarak ifade edilmiş ve karışımlar buna göre hazırlanmıştır.

Hamur karışımları, Hobart mikser ve mutfak tipi yüksek devirli bir karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 6.3). Şekil 6.4’de ise Marsh Hunisi ve Mini Çökme aparatı görülmektedir.



Şekil 6.3 Hobart mikser ve mutfak tipi karıştırıcı



Şekil 6.4 Marsh hunisi ve mini çökme aparatı

Karışımların hazırlanmasında, öncelikle su ve katkı Hobart mikser içerisinde yavaş devirde 30 saniye karıştırılmış, daha sonra 90 saniye süresince çimento yavaş yavaş ilave edilmiştir. Mikser durdurulmadan, oluşan karışım 30 saniye daha yavaş devirde karıştırılmıştır. Mikser durdurulup, palet ve mikser kabı temizlendikten sonra yavaş devirde 30 saniye daha karıştırma yapılmıştır. Homojen hale gelen bu karışım daha sonra karıştırıcıya konularak en hızlı devirde 60 saniye karıştırılmıştır. Vakit kaybetmeden Marsh hunisine dökülen karışımlarda akış süresi belirlenmiştir. Yaklaşık 1,2 lt. olarak hazırlanan hamur karışımları, alt ucu parmakla kapatılmış olan huninin içine dökülmüş ve 700 ml.'lik hacim boşalana kadar geçen süre ölçülerek, 5. dakikadaki akış süresi olarak kaydedilmiştir. 700 ml'yi doldurduğu halde 1000 ml seviyesine gelmeyen karışımlarda akış süresi kaydedilmemiştir. Marsh hunisi deneyinden hemen sonra mevcut karışım plastik bir kaba alınmış ve bu karışımdan belli miktarda alınarak mini çökme deneyi yapılmıştır. Karışım, düz bir yüzeyin merkezine konulan çökme aparatının içine konulduktan sonra, aparat düşey olarak kaldırılmış ve yayılma tamamlanana kadar yaklaşık 15-20 sn. beklenmiştir. Daha sonra kumpas yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınıp başlangıç değeri (0.dakika) olarak kaydedilmiştir. İşlem tamamlandıktan sonra mini çökme deneyinde kullanılan malzeme plastik kaba tekrar konularak kapağı kapatılmıştır. 30 dakika sonra mini çökme deneyini yapmak üzere plastik kaptan alınan karışımı homojen hale getirmek için, Hobart mikserde 1 dakika yavaş devirde karıştırma yapılmıştır. Daha sonra mini çökme deneyi tekrar yapılmış, elde edilen değer 30. dakikadaki yayılma çapı olarak kaydedilmiş ve karışım tekrar

kapalı kap içine alınmıştır. 30 dakika daha beklendikten sonra karışımı homojen hale getirmek için yine Hobart mikserde 1 dakika yavaş devirde karıştırma yapılmıştır. Elde edilen karışım huninin içine boşaltılarak akış süresi ölçülmüş ve bu değer 60. dakikadaki akış süresi olarak kaydedilmiştir. Devamında tekrar mini çökme deneyi yapılmış ve bu değer de 60. dakikadaki yayılma çapı olarak kaydedilmiştir. Huni ve mini çökme aparatı deneyler yapıldıktan hemen sonra temizlenmiş ve her ölçüm zamanından önce nemli bir bezle nemlendirilmiştir.

Bu çalışmada sistematik deneylere S2 olarak adlandırılan katkıyla başlanmış ve bu katkıyla hazırlanan karışımlarda 90. dakika için de ölçüm yapılmıştır. Ancak verilerin değerlendirilmesi açısından 60. dakikada ölçülen değerlerin yeterli olduğu görülerek, diğer 3 katkı için 90. dakikada ölçüm yapılmamıştır.

### **6.3 Beton Deneyleri**

Beton deneyleri sadece S2 katkısı kullanılarak yapılmış, diğer 3 katkı ile yapılmamıştır. Hazırlanan beton karışımlarında taze halde çökme, çökme kaybı, hava içeriği ve birim hacim ağırlık (B.H.A); sertleşmiş halde ise farklı yaşlarda basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

#### **6.3.1 Deney Yöntemi**

Deneysel çalışmada çimento dozajı  $450 \text{ kg/m}^3$ , s/ç oranı ise 0,35 olarak sabit tutulmuştur. Tüm karışımlara, başlangıç çökme değerini  $190 \pm 10 \text{ mm}$ 'de sabit tutmak amacıyla, çimento ağırlığının %0,6-1,05'i oranında katı madde kullanacak şekilde süperakışkanlaştırıcı katkı katılmıştır. S2 katkısıyla hazırlanan hamur karışımlarından elde edilen veriler ışığında, söz konusu çökme değerini elde edebilmek için kullanılacak olan ilk katkı dozajı belirlenmiş, hedeflenen çökme değerinin elde edilememesi durumunda, karışımlar, katkı dozajı arttırılarak ya da azaltılarak yeniden hazırlanmış ve istenen çökme değerine ulaşıncaya kadar beton dökümlerine devam edilmiştir. Ç20 çimentosu (SDÇ 32,5) sistematik deneyler esnasında temin edilememiş olduğundan bu çimentoyla beton dökümü yapılamamıştır. Tüm deneyler  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  de yapılmıştır. Hazırlanan beton karışımlarının bileşimi Tablo 6.6'da verilmiştir.



Beton örnekleri, 100 dm<sup>3</sup> kapasiteli laboratuvar tipi yatay eksenli beton mikseri kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle agregalar mikser içinde kuru olarak karıştırılmış, daha sonra çimento ilave edilerek bir süre daha karıştırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra, katkıyla karıştırılmış olan su, mikser ilave edilerek yaklaşık olarak 3 dakika süreyle karıştırma işlemi yapılmıştır. Kalıplara alınan beton örnekleri vibrasyon masasında 20 saniye süreyle sarsma işlemi uygulanmıştır. Hazırlanan karışımların 2, 7 ve 28. günlerdeki basınç dayanımını belirlemek üzere her yaş için 100 mm ayrıtlı 3'er adet küp örnek alınmıştır. Örnekler, kırım gününe kadar 20 °C sıcaklığındaki kür havuzlarında bekletilmiştir.

Tablo 6.6 Beton karışım oranları

Kar. no	Çimento kodu	Katkı katı madde dozajı (% çimento ağırlığı)	s/ç oranı	Malzeme ağırlıkları ( kg/m <sup>3</sup> ) *				
				Çimento	Su	0-3	0-5	5-15
1	Ç1	0,9	0,35	450	158	451	451	902
2	Ç2	0,85						
3	Ç3	0,85						
4	Ç4	0,9						
5	Ç5	0,8						
6	Ç6	0,7						
7	Ç7	0,7						
8	Ç8	1,05						
9	Ç9	0,6						
10	Ç10	1,0						
11	Ç11	0,8						
12	Ç12	1,0						
13	Ç13	0,7						
14	Ç14	0,6						
15	Ç15	0,75						
16	Ç16	0,9						
17	Ç17	0,8						
18	Ç18	0,85						
19	Ç19	0,7						

\* Ölçülen B.H.A. değerleri karışım hesaplarında öngörülene yakın olduğu için karışım dizaynı düzeltilmeden verilmiştir.

## BÖLÜM YEDİ

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Başlangıç akışkanlığına etki eden önemli faktörlerden birisi de çimentonun inceliğidir. Bu çalışma kapsamında kullanılan çimentolar çok geniş bir aralıkta Blaine inceliğine (2820 ile 4380 cm<sup>2</sup>/g) sahiptir. Çimentonun inceliğinin hamur karışımının davranışını ne derece etkilediğini öğrenmek amacıyla, seçilen bazı çimentolar belli incelik seviyelerine kadar öğütülmüş ve bunlarla hazırlanan karışımlarda Marsh hunisi ve mini çökme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çalışmanın tamamından elde edilen verilerin değerlendirilmesinde izlenecek yöntemin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

#### 7.1 Çimento İnceliğinin Başlangıç Akışkanlığına Etkisi

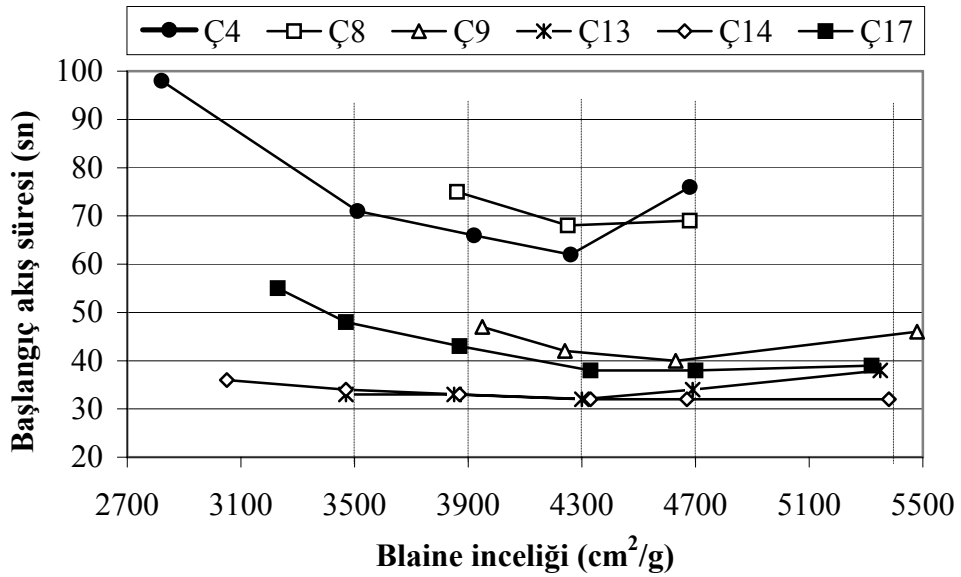
Marsh hunisi deneyinden elde edilen veriler ışığında (EK A,B,C,D), birbirlerinden oldukça farklı davranış sergileyen 6 çimento (Ç4, Ç8, Ç9, Ç13, Ç14, Ç17) seçilmiş ve farklı incelik seviyeleri elde edilecek şekilde öğütülmüştür (Tablo 7.1). Her bir incelik seviyesindeki çimentoyla, seçilen bir katkı dozajında (%0,8) hazırlanan hamur karışımlarında Marsh hunisi ve mini çökme deneyi yapılmıştır. Tüm deneylerde S2 katkısı kullanılmıştır.

Tablo 7.1 Çimentoların farklı seviyelerdeki Blaine incelik değerleri (cm<sup>2</sup>/g)

	<b>Kontrol</b>	<b>1. seviye</b>	<b>2. seviye</b>	<b>3. seviye</b>	<b>4. seviye</b>	<b>5. seviye</b>
<b>Ç4</b>	2820	3510	3920	4260	4680	5380
<b>Ç8</b>	3860	-	-	4250	4680	5340
<b>Ç9</b>	3950	-	-	4240	4630	5480
<b>Ç13</b>	3470	-	3850	4300	4690	5350
<b>Ç14</b>	3050	3470	3870	4330	4670	5380
<b>Ç17</b>	3230	3470	3870	4330	4700	5320

### 7.1.1 Marsh Hunisi Deney Sonuçları

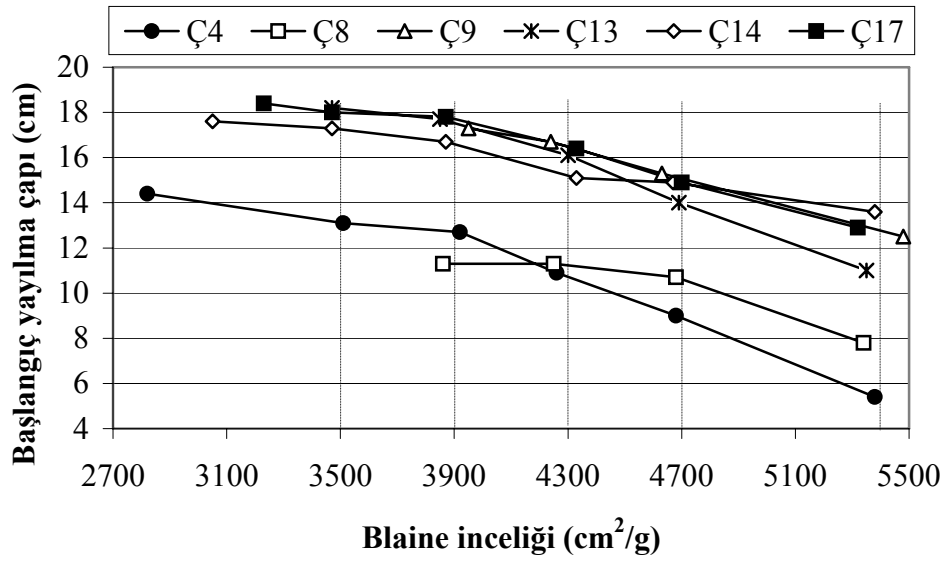
Şekil 7.1’de çimentonun inceliğine bağlı olarak akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi Ç4, Ç8, Ç9, Ç14 ve Ç17 çimentolarıyla hazırlanan karışımlarda belli bir incelik değerine ( $\sim 4300 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) kadar inceliğin artmasıyla akış sürelerinin azaldığı, dolayısıyla akışkanlığın arttığı görülmüştür. Ancak Ç14 çimentosuyla hazırlanan karışımın akış sürelerindeki azalış diğerleri kadar belirgin değildir. Ç13 çimentosu ile hazırlanan karışımda ise bu incelik değerine kadar akış süreleri hemen hemen sabit kalmıştır. Ç4 çimentosu ile hazırlanan karışımın  $4700 \text{ cm}^2/\text{g}$  değerinde akış süresi bir önceki incelik değerine göre artmış, Ç8 çimentosu için ise önemli bir değişiklik görülmemiştir. Buna karşın her iki çimento da yaklaşık  $5400 \text{ cm}^2/\text{g}$  incelikte akış göstermemiştir. İnceliğin yaklaşık  $5400 \text{ cm}^2/\text{g}$  değerine ulaşmasıyla Ç14 ve Ç17 çimentoları,  $4300 \text{ cm}^2/\text{g}$  değerindeki akış sürelerini korumuşlardır. Ç9 ve Ç13 çimentolarının ise akış süreleri bir miktar artmıştır.



Şekil 7.1 %0,8 katkı dozajında, çimento inceliğine bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi

### 7.1.2 Mini Çökme Deneyi Sonuçları

Şekil 7.2’de çimentonun inceliğine bağlı olarak yayılma çaplarının değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi bütün çimentolarda inceliğin artmasıyla genel olarak yayılma çaplarında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 7.2 %0,8 katkı dozajında, çimento inceliğine bağlı olarak başlangıç yayılma çaplarının değişimi

### 7.1.3 Sonuç

Hem Marsh hunisi, hem de mini çökme deneyi sonuçları, inceliğin genel olarak akışkanlık davranışını etkilediğini göstermektedir. Mini çökme deneyinde inceliğin artmasıyla yayılma çapları azalmıştır. Genel bir kanı olarak inceliğin artmasının akışkanlığı olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Mini çökme deneyi sonuçları bu görüşü destekler niteliktedir. Ancak Marsh hunisi deneyi sonuçlarına bakıldığında, genel kanının aksine inceliğin belli bir değere kadar ( $\sim 4300 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) artmasıyla akışkanlıkta artış görülmüş, sonraki incelik değerlerinde ise genel olarak akışkanlık azalmaya başlamıştır.

Göreceli olarak daha düşük deformasyon hızlarında hazırlanan beton karışımlarında, kullanılan çimentonun inceliğinin artmasıyla çökme değerinde azalma beklenebilir. Mini çökme deneyi betonda uygulanan çökme deneyinin küçük bir modeli gibi düşünüldüğünde, sonuçlar bu beklentiye destekler nitelikte ortaya çıkmıştır. Ancak Marsh hunisi deneyi, mini çökme deneyine göre daha dinamik bir deneydir ve ileriki bölümlerde de anlatılacağı üzere mini çökme deneyi verileriyle korelasyon göstermemektedir. Dolayısıyla mini çökme deneylerinde sürekli azalan

akışkanlık özelliğinin Marsh hunisi deneyi sonuçlarıyla örtüşmesini beklemek doğru olmayabilir.

Çalışmada Marsh hunisi ve mini çökme deneyleri eş zamanlı uygulanmıştır. Dolayısıyla mini çökme deneyinden (statik yöntem) elde edilen sonuçlar beklenildiği gibi olmasına rağmen, Marsh hunisi deneyinde belli bir incelik değerine kadar, hemen hemen tüm çimentolarla hazırlanan karışımların akışkanlık değerlerinde artış görülmesinin, söz konusu yöntemin farklılığından (dinamik yöntem) kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak yine de mini çökme deneyini göz önüne almadan, Marsh hunisi deneyinde, inceliğin belli bir seviyeye kadar artmasıyla akışkanlığın neden arttığı sorusunun yanıtı aranmalıdır.

Sonuç olarak, Marsh hunisi ve mini çökme deneyi sonuçlarına bakıldığında inceliğin akışkanlık davranışını etkilediği görülmektedir.

## **7.2 Çimento Kompozisyonunun Başlangıç Akışkanlığına Etkisi**

Çimentonun inceliğinin karışımın davranışını etkilediği bilindiğine göre, çalışmada kullanılan farklı incelikteki çimentoların birlikte değerlendirilmesi yanıltıcı sonuçlar verecektir. Dolayısıyla çimentolar içinden belli seçimler yapılarak değerlendirme yapılmalıdır.

Başlangıç akışkanlığına etki eden bileşenin belirlenebilmesi amacıyla, çalışma kapsamında kullanılan 20 adet çimentodan, incelikleri belirli bir değer aralığında olan çimentolarla iki grup oluşturulmuştur. Blaine inceliği 3230 ile 3500 cm<sup>2</sup>/g arasında olan 7 çimento (Ç1, Ç3, Ç5, Ç11, Ç13, Ç17, Ç18-Grup I) ve 3540 ile 3790 cm<sup>2</sup>/g arasında olan 8 çimento (Ç2, Ç6, Ç7, Ç12, Ç15, Ç16, Ç19, Ç20-Grup II) kullanılarak oluşturulan bu iki grupta, inceliğin en alt ve en üst değerleri arasında ortalama 250 cm<sup>2</sup>/g fark vardır. İncelik aralığı oldukça daraltılmış olan bu iki grubun değerlendirilmesiyle, tüm çimentoların değerlendirilmesi durumunda ortaya çıkabilecek yanıltıcı sonuçların önüne geçilmiştir.

Gruplar oluşturulurken Ç4 çimentosu inceliğinin çok düşük olması nedeniyle; Ç14 çimentosu kimyasal kompozisyonunun incelenen diğer çimentolardan çok farklı olması ( $C_3S$  miktarı çok yüksek,  $C_2S$  miktarı çok düşük) ve aynı zamanda inceliğinin düşük olması nedeniyle; Ç8, Ç9 ve özellikle Ç10 çimentoları ise inceliklerinin yüksek olması nedeniyle bu sınıflandırmanın dışında tutulmuştur.

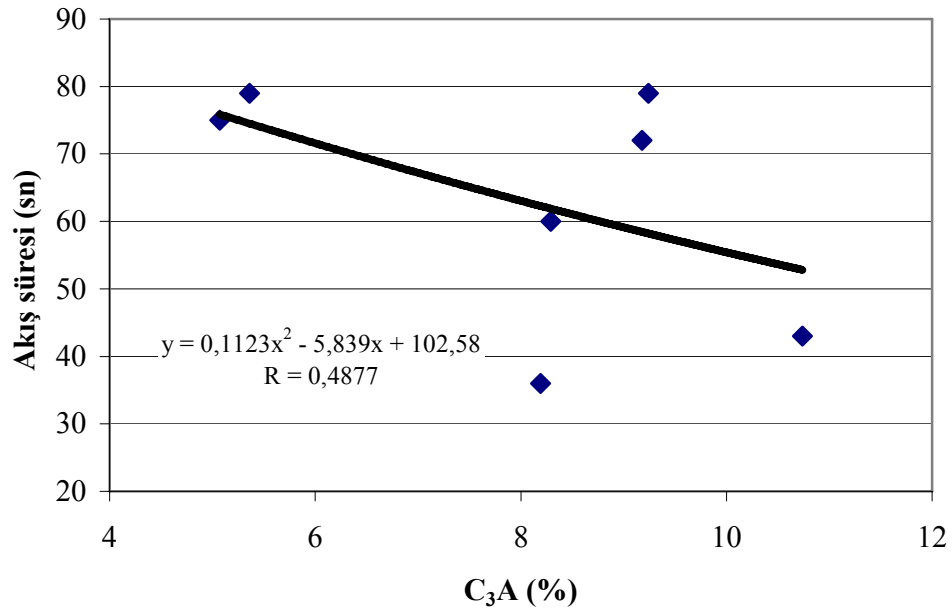
Bu iki grup için, günümüze kadar yapılan çalışmalarda, araştırmacıların başlangıç akışkanlığına etki eden baskın faktör olduğunu ileri sürdüğü birtakım bileşenler/bileşen oranları ( $Na_2O_{eşd.}$ ,  $C_3S/C_2S$  oranı,  $SO_3$  miktarı,  $C_3A$  miktarı vb.) ve başlangıç akışkanlığına etki edebileceği düşünülen bileşenler arasındaki ilişkiler regresyon analizi ile incelenmiştir.

Regresyon analizi sadece Marsh hunisi deneyi verileriyle yapılmıştır. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere Marsh hunisi deneyinden elde edilen akış süreleri süperakışkanlaştırıcının dozajına bağlı olarak değişmektedir. Düşük dozajlarda bazı çimentolarla hazırlanan karışımlarda akış görülmediğinden; yüksek dozajlarda ise doygunluk noktasına ulaşmış olan çimentolarla deney yapılmadığından veri sayısı göreceli olarak az olmaktadır. Bu durum dikkate alınarak, regresyon analizinde kullanılacak olan akış sürelerinin, “%0,8” katkı dozajının kullanılmasıyla elde edilen akış süreleri olmasına karar verilmiştir.

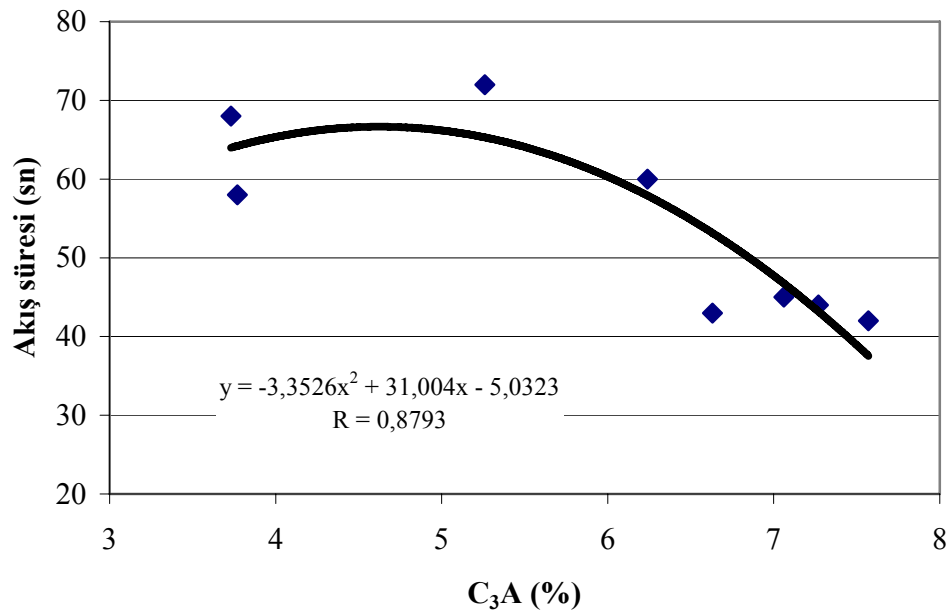
GrupI ve GrupII için ilk olarak S1 katkısı ile hazırlanan karışımlarda ilişki araştırılmış, daha sonra, ilişki olduğu belirlenen bileşenler için diğer 3 katkıyla hazırlanan karışımlardaki ilişki verilmiştir.

Başlangıç akış süresi üzerinde etkili olan baskın bileşen, Grup I ve Grup II için benzer eğilim göstermeli ve her iki grubun da regresyon katsayısı yüksek olmalıdır.

Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’de Grup I ve Grup II için  $C_3A$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Grup I için regresyon katsayısı bir miktar düşük olmasına rağmen  $C_3A$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi iki grup için birbirine yakın gibi gözükmektedir.  $C_3A$  miktarının artması (%5’in üzerinde), akış süresinin azalmasıyla, bir başka deyişle akışkanlığın artması ile sonuçlanmıştır.

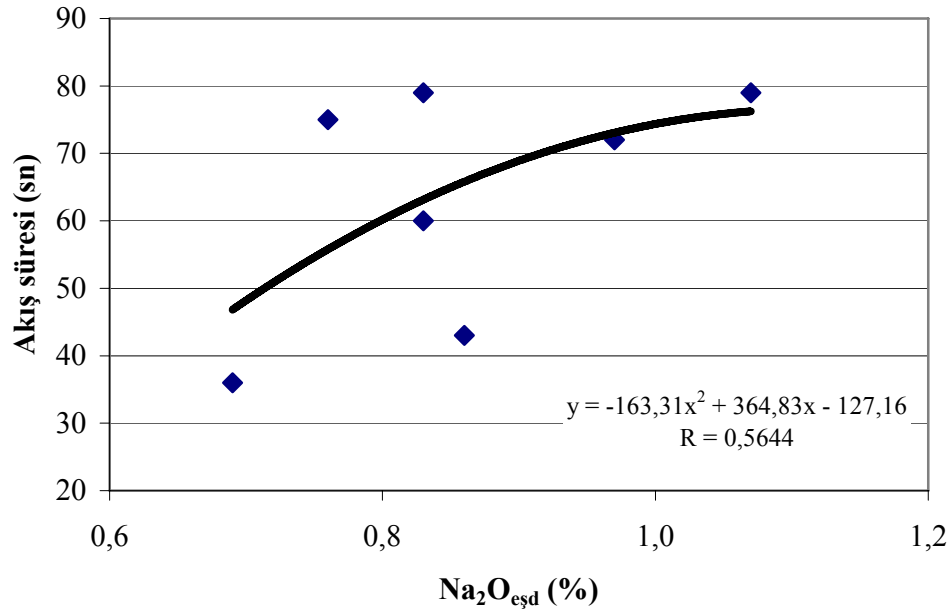


Şekil 7.3 Akış süresi-C<sub>3</sub>A ilişkisi (Grup I-S1)

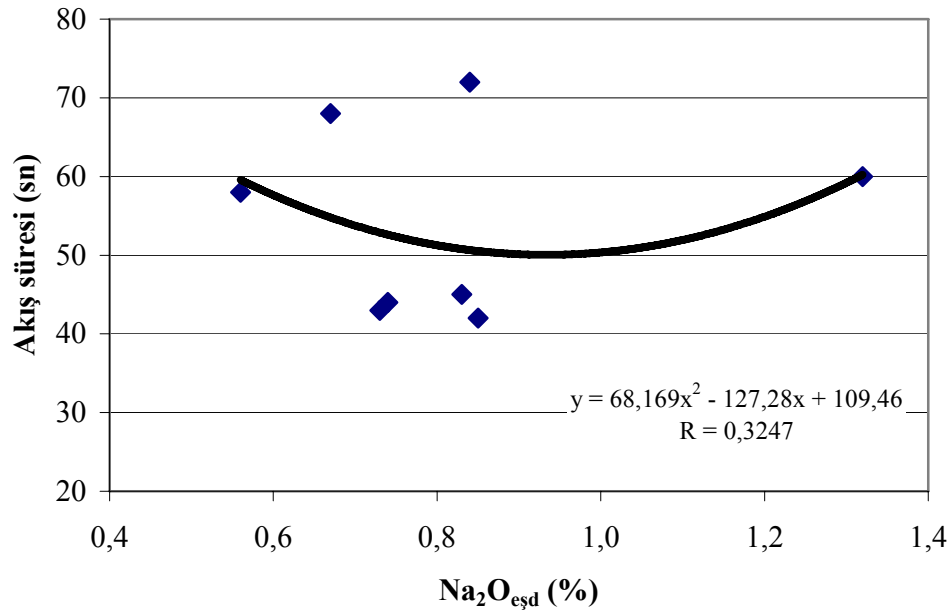


Şekil 7.4 Akış süresi-C<sub>3</sub>A ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da Grup I ve Grup II için  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  ( $\text{Na}_2\text{O}+0,658*\text{K}_2\text{O}$ ) miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Regresyon katsayılarının düşük olması ve başlangıç akış süresi ile  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  miktarının değişim eğiliminin Grup I ve Grup II için birbirinden farklı olması nedeniyle,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  miktarının başlangıç akış süresini etkileyen bir parametre olduğu düşünülmemektedir.



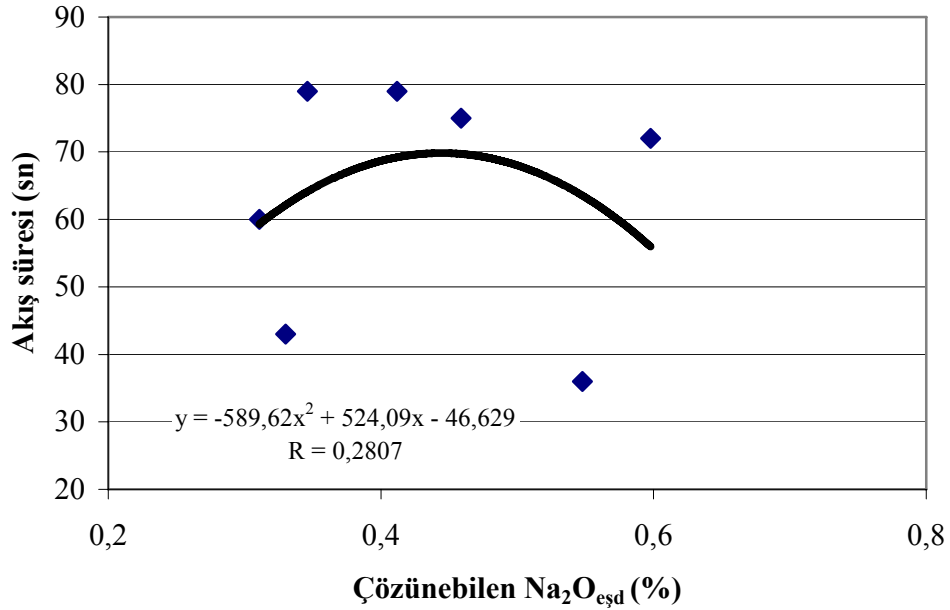
Şekil 7.5 Akış süresi- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  ilişkisi (Grup I-S1)



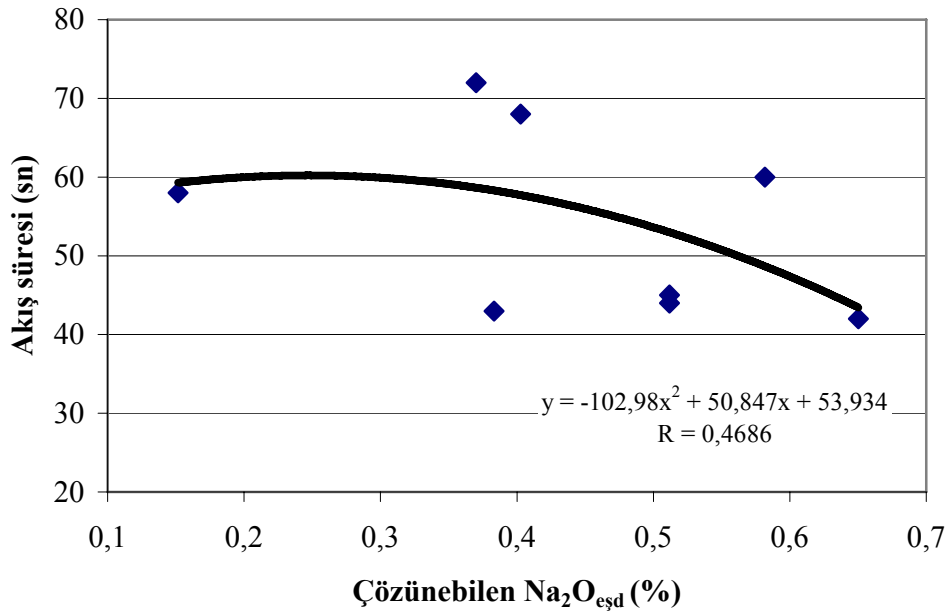
Şekil 7.6 Akış süresi- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  ilişkisi (Grup II-S1)



Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de Grup I ve Grup II için çözünebilir  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Regresyon katsayılarının düşük olması ve başlangıç akış süresi ile çözünebilir  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  miktarının değişim eğiliminin Grup I ve Grup II için birbirinden farklı olması nedeniyle çözünebilir  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  miktarının başlangıç akış süresini etkileyen bir parametre olmadığı düşünülmektedir.

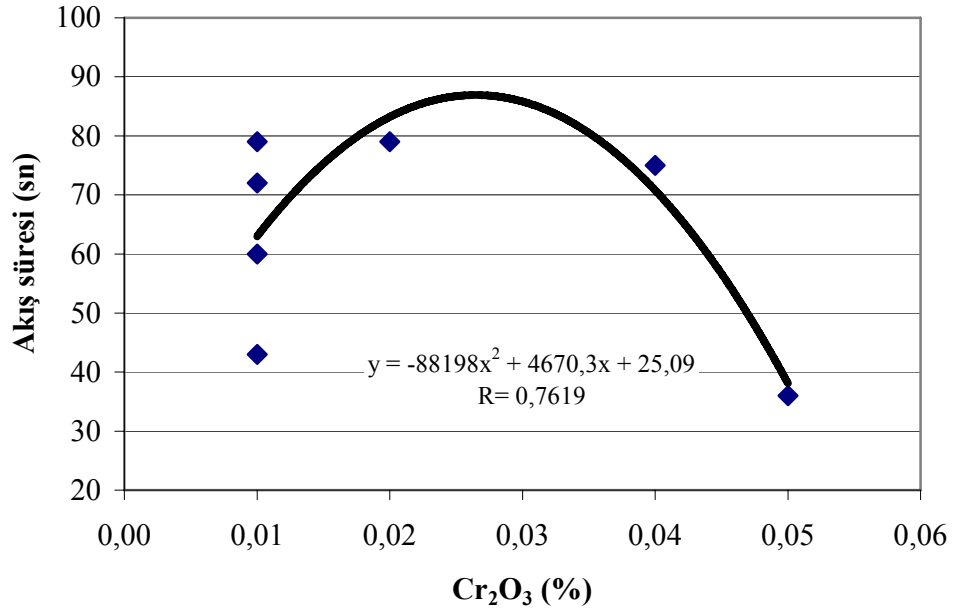


Şekil 7.7 Akış süresi-çözünebilir  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  ilişkisi (Grup I-S1)

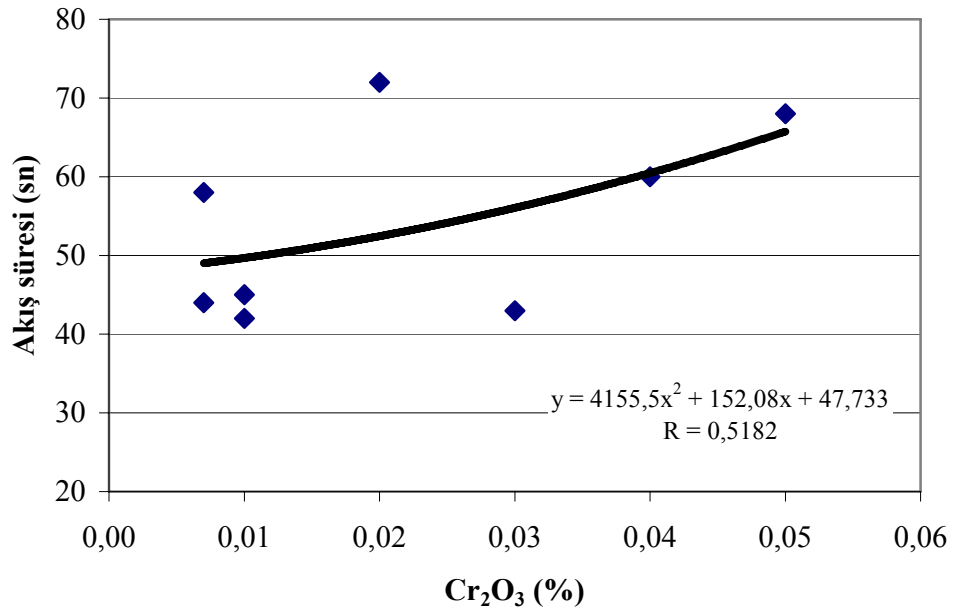


Şekil 7.8 Akış süresi-çözünebilir  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.9 ve Şekil 7.10’da Grup I ve Grup II için  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Başlangıç akış süresi ile  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  miktarının değişim eğiliminin Grup I ve Grup II için birbirinden farklı olması nedeniyle  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  miktarının başlangıç akış süresini etkileyen bir parametre olmadığı düşünülmektedir.

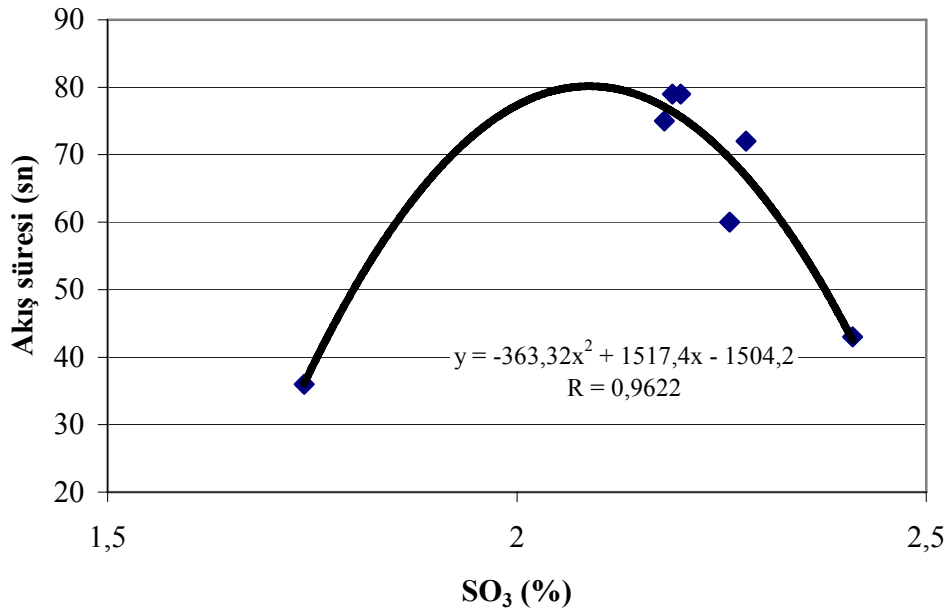


Şekil 7.9 Akış süresi- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ilişkisi (Grup I-S1)

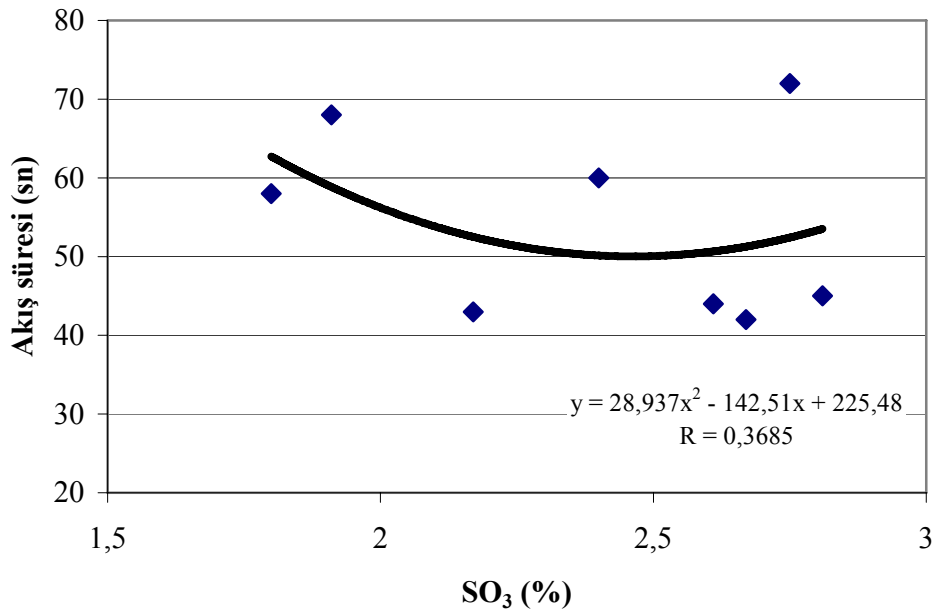


Şekil 7.10 Akış süresi- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de Grup I ve Grup II için  $SO_3$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, Grup I için regresyon katsayısı oldukça yüksektir. Fakat, Grup II için regresyon katsayısı oldukça düşüktür. Ayrıca, Grup I ve Grup II benzer eğilimde değildir. Bu nedenle,  $SO_3$  oranı ile başlangıç akış süresi arasında bir ilişki olmadığı düşünülmektedir.

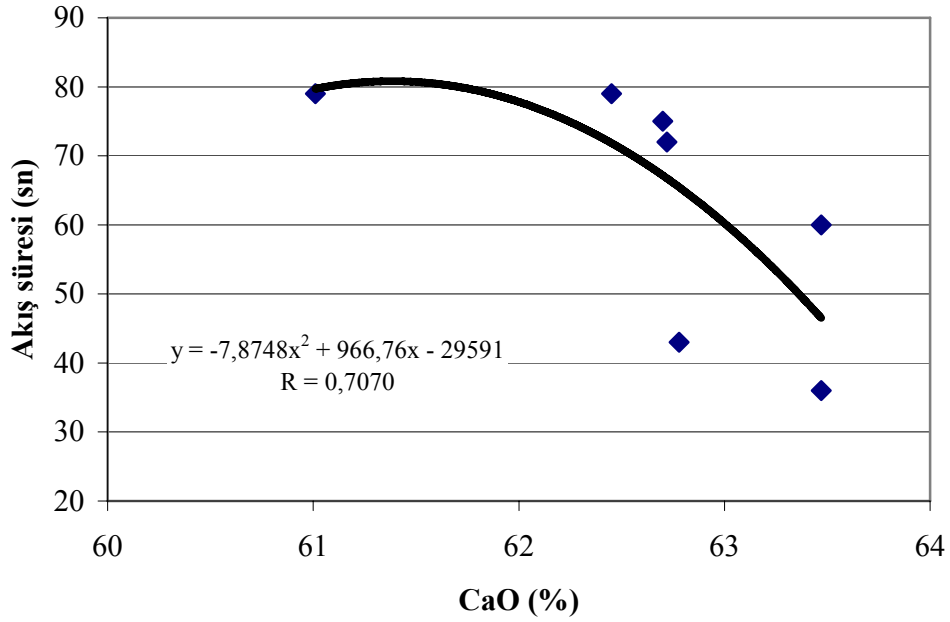


Şekil 7.11 Akış süresi- $SO_3$  ilişkisi (Grup I-S1)

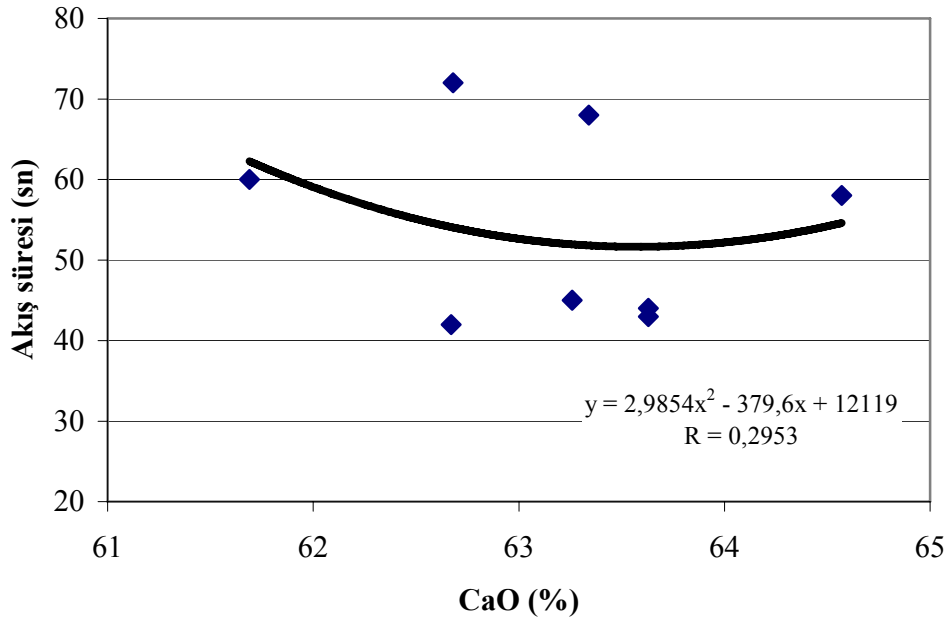


Şekil 7.12 Akış süresi- $SO_3$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de Grup I ve Grup II için CaO miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, Grup I için regresyon katsayısı yüksek olmasına rağmen, Grup II için regresyon katsayısı oldukça düşüktür. Ayrıca, Grup I ve Grup II benzer eğilimde değildir. Bu durum, CaO oranı ile başlangıç akış süresi arasında bir ilişki olmadığını göstermektedir.

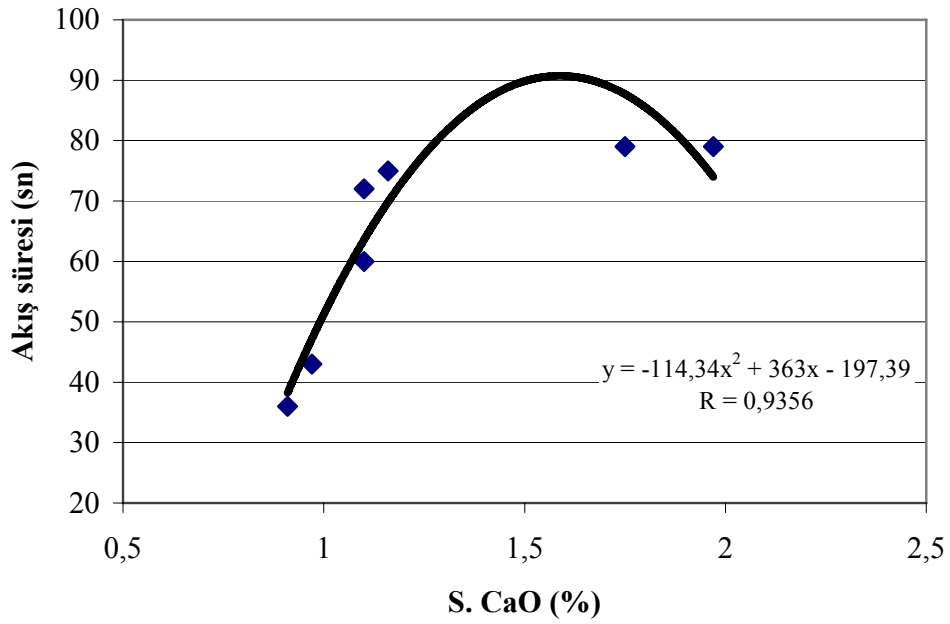


Şekil 7.13 Akış süresi-CaO ilişkisi (Grup I-S1)

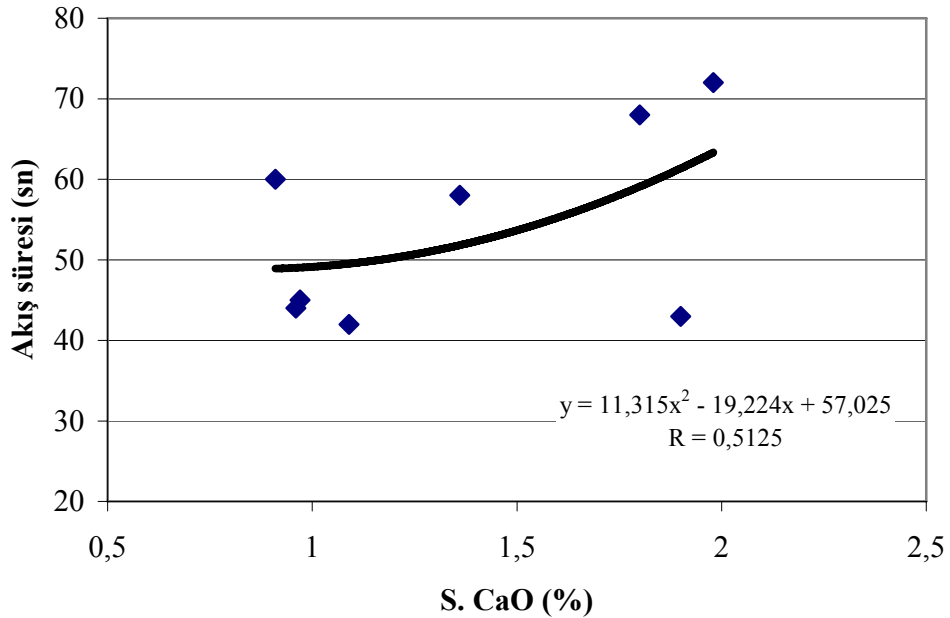


Şekil 7.14 Akış süresi-CaO ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da serbest CaO miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, Grup I için regresyon katsayısı oldukça yüksek olmasına rağmen, Grup II için regresyon katsayısı düşüktür. Ayrıca, Grup I ve Grup II benzer eğilimde değildir. Bu nedenle, serbest CaO oranı ile başlangıç akış süresi arasında bir ilişki olmadığı anlaşılmaktadır.

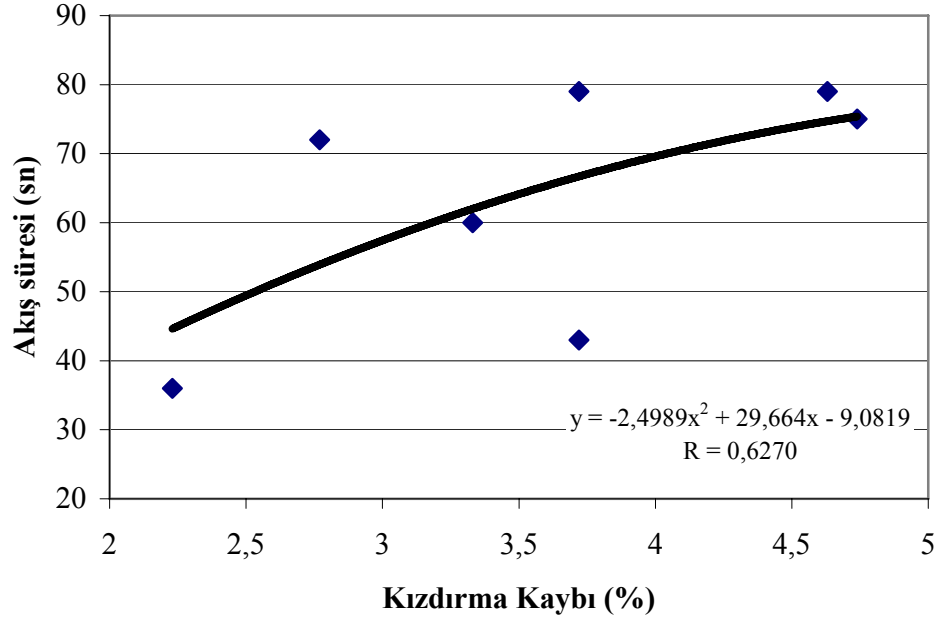


Şekil 7.15 Akış süresi-serbest CaO ilişkisi (Grup I-S1)

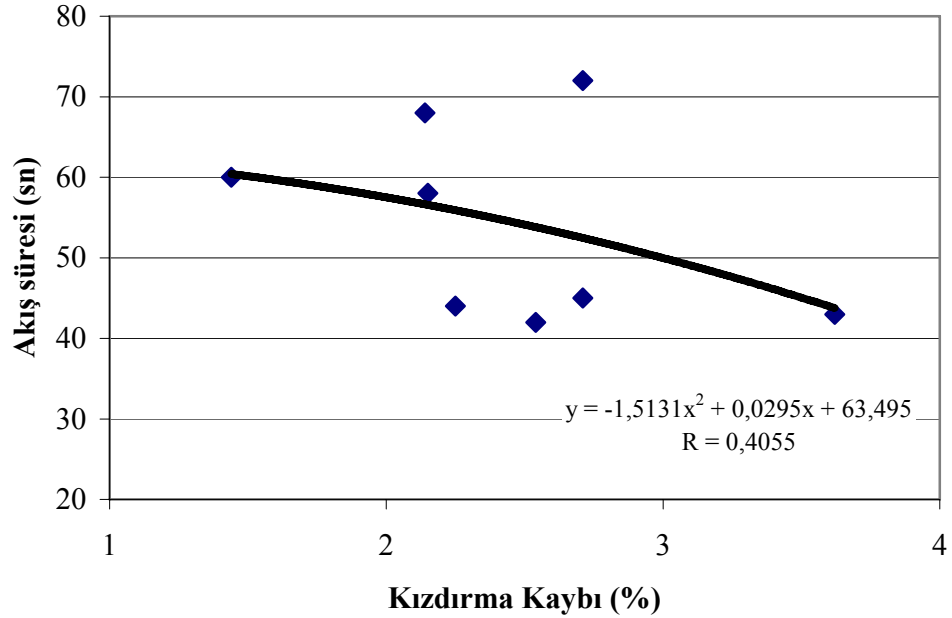


Şekil 7.16 Akış süresi-serbest CaO ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.17 ve Şekil 7.18'de Grup I ve Grup II için kızdırma kaybına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Her iki grup için de regresyon katsayısı çok yüksek değildir. Ayrıca, birbirine ters eğilim göstermektedir. Bu nedenle, kızdırma kaybı ile başlangıç akış süresi arasında bir ilişki yoktur.

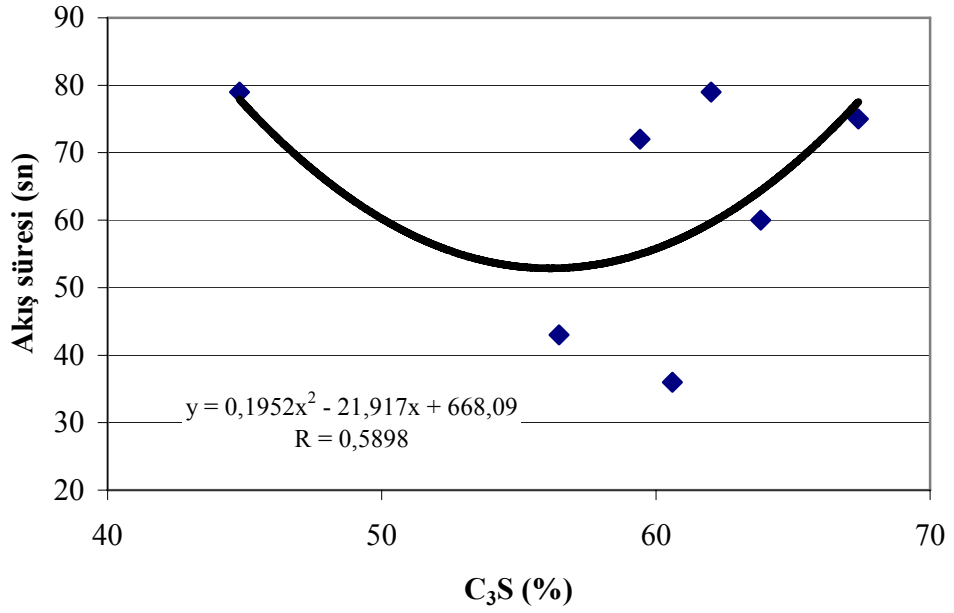


Şekil 7.17 Akış süresi-kızdırma kaybı ilişkisi (Grup I-S1)

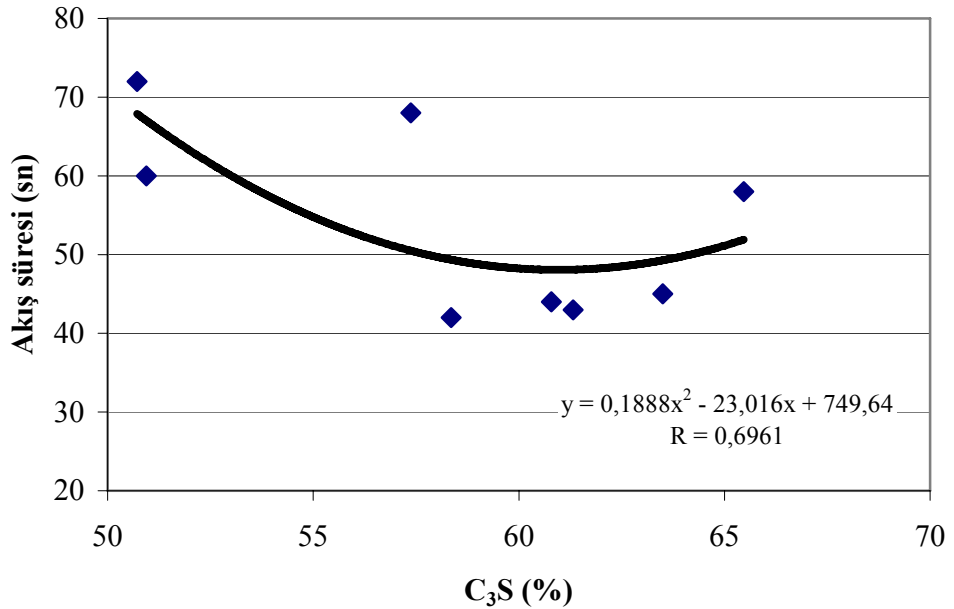


Şekil 7.18 Akış süresi-kızdırma kaybı ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.19 ve Şekil 7.20’de Grup I ve Grup II için  $C_3S$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Her iki grup için de regresyon katsayısı orta seviyelerde olmasına rağmen, Grup I için %55’in üzerindeki  $C_3S$  miktarı için akış süresi artarken, Grup II’de değişmemektedir. Bu nedenle,  $C_3S$  miktarı ile başlangıç akış süresi arasında kuvvetli bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır.

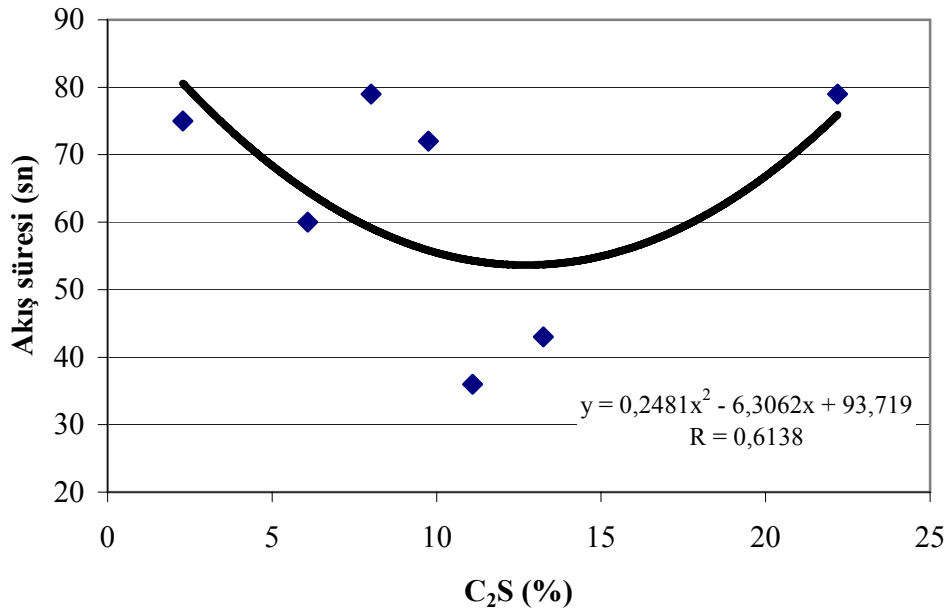


Şekil 7.19 Akış süresi- $C_3S$  ilişkisi (Grup I-S1)

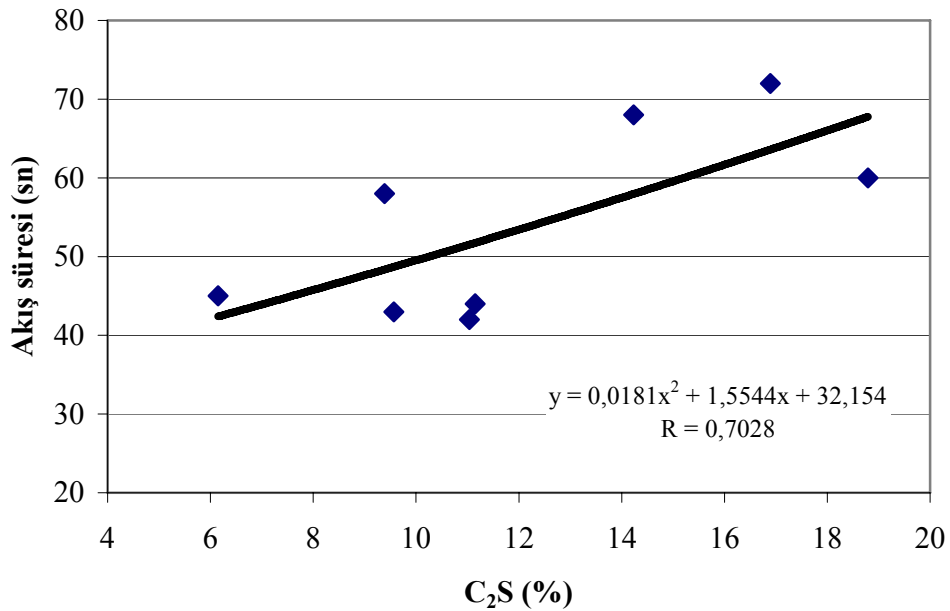


Şekil 7.20 Akış süresi- $C_3S$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.21 ve Şekil 7.22’de Grup I ve Grup II için  $C_2S$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi,  $C_2S$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi, iki grup için birbirinden oldukça farklıdır. Bu nedenle,  $C_2S$  miktarı ile başlangıç akış süresi arasında kuvvetli bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır.



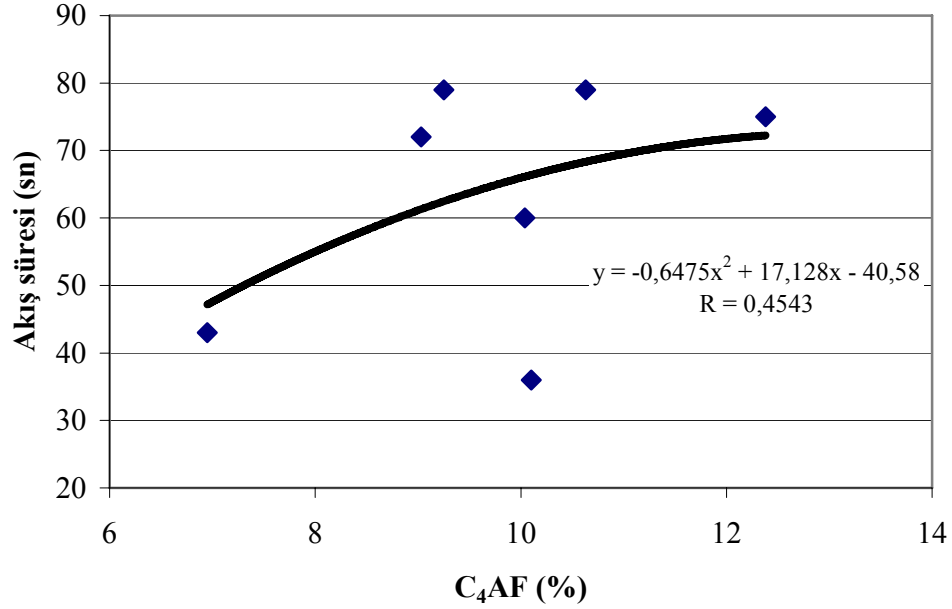
Şekil 7.21 Akış süresi- $C_2S$  ilişkisi (Grup I-S1)



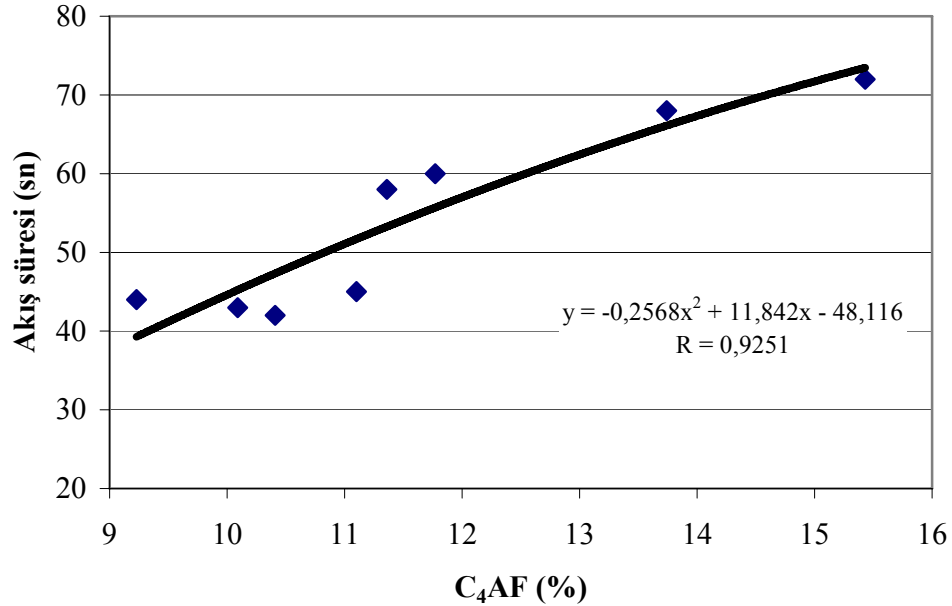
Şekil 7.22 Akış süresi- $C_2S$  ilişkisi (Grup II-S1)



Şekil 7.23 ve Şekil 7.24’de Grup I ve Grup II için  $C_4AF$  miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Grup I için regresyon katsayısı bir miktar düşük olmasına rağmen, Grup II’de de olduğu gibi  $C_4AF$  miktarının artması ile akış süresinde artma eğilimi vardır.

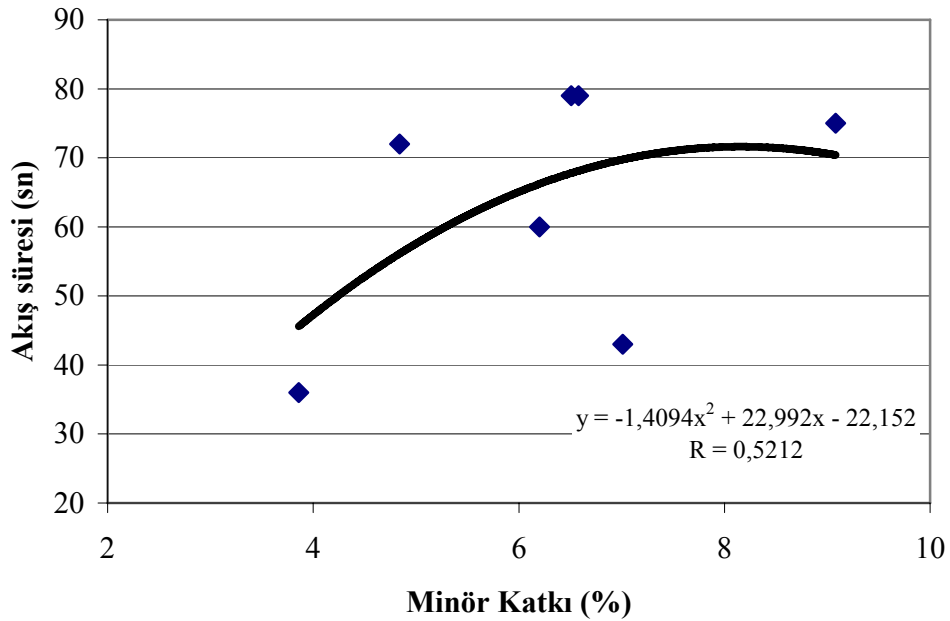


Şekil 7.23 Akış süresi- $C_4AF$  ilişkisi (Grup I-S1)

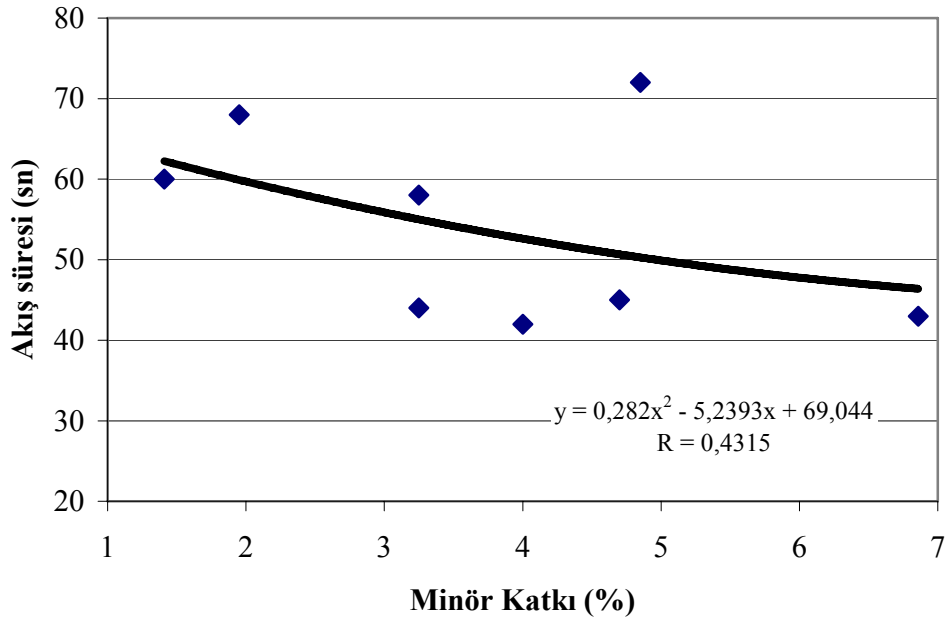


Şekil 7.24 Akış süresi- $C_4AF$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da Grup I ve Grup II için çimento üretiminde kullanılan minör katkı miktarına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Regresyon katsayılarının yüksek olmamasının yanında akış süresi ile minör katkı miktarının değişim eğilimi iki grup için birbirinden farklıdır. Bu nedenle, minör katkı miktarının başlangıç akış süresi üzerinde etkili bir parametre olmadığı anlaşılmaktadır.

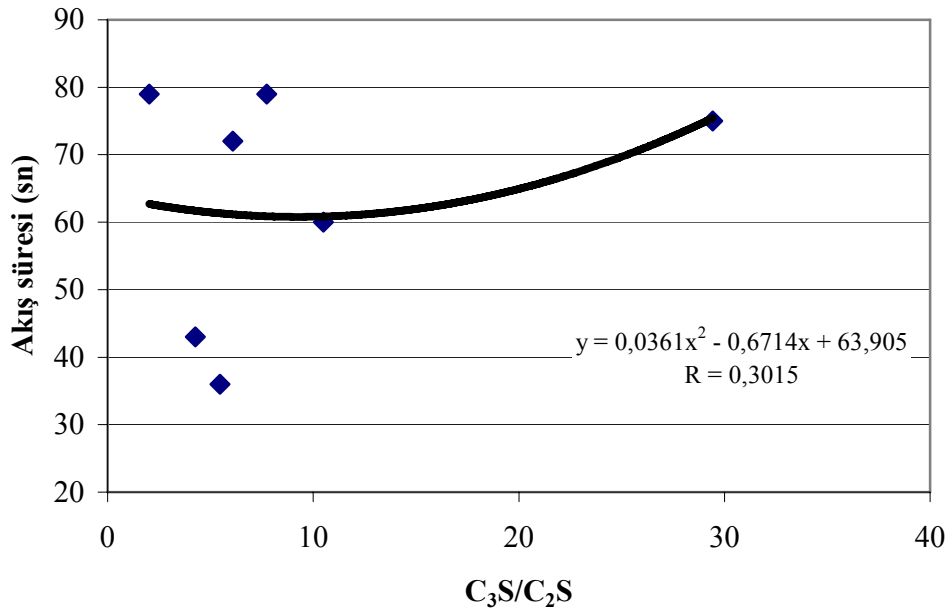


Şekil 7.25 Akış süresi-minör katkı ilişkisi (Grup I-S1)

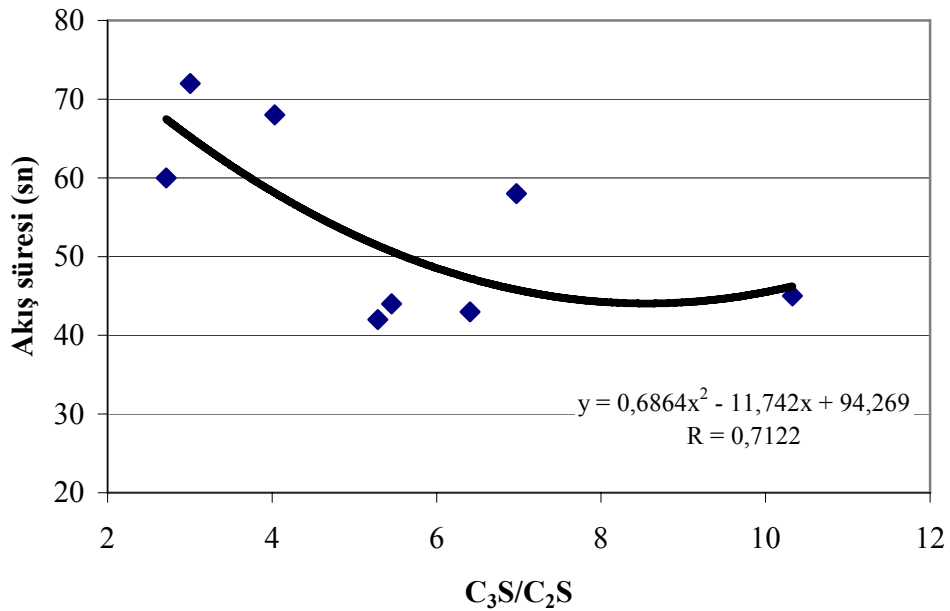


Şekil 7.26 Akış süresi-minör katkı ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’de Grup I ve Grup II için  $C_3S/C_2S$  oranına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Grup I için regresyon katsayısı oldukça düşük olup, başlangıç akış süresi ile  $C_3S/C_2S$  oranının değişim eğilimi Grup I ve Grup II için birbirinden önemli ölçüde farklıdır. Bu nedenle,  $C_3S/C_2S$  oranı başlangıç akış süresini etkileyen bir parametre olarak görülmemektedir.

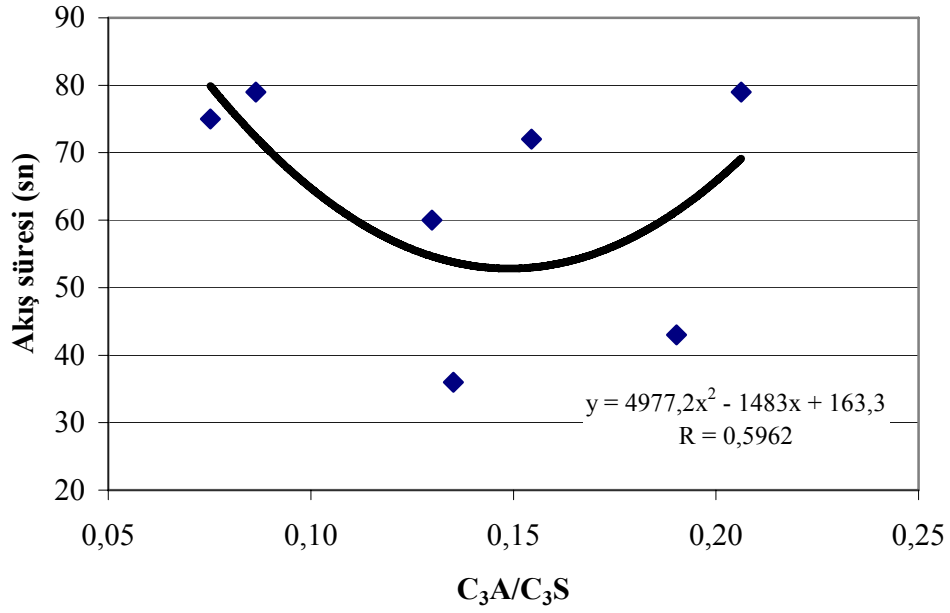


Şekil 7.27 Akış süresi- $C_3S/C_2S$  ilişkisi (Grup I-S1)

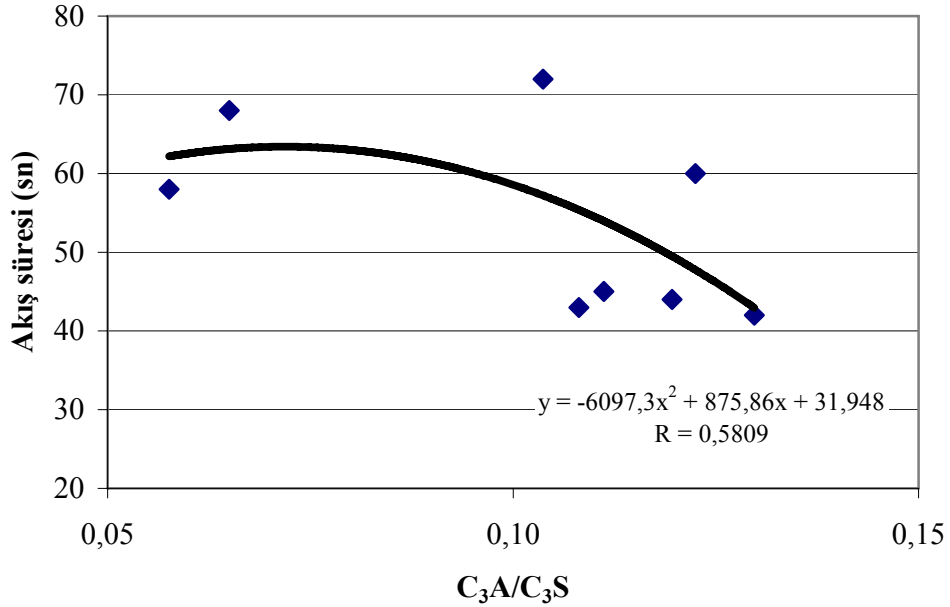


Şekil 7.28 Akış süresi- $C_3S/C_2S$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da Grup I ve Grup II için  $C_3A/C_3S$  oranına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Grup I ve Grup II için başlangıç akış süresi ile  $C_3A/C_3S$  oranının değişim eğilimi birbirinden önemli ölçüde farklıdır. Bu nedenle, başlangıç akış süresinin  $C_3A/C_3S$  oranından bağımsız olduğu düşünülmektedir.

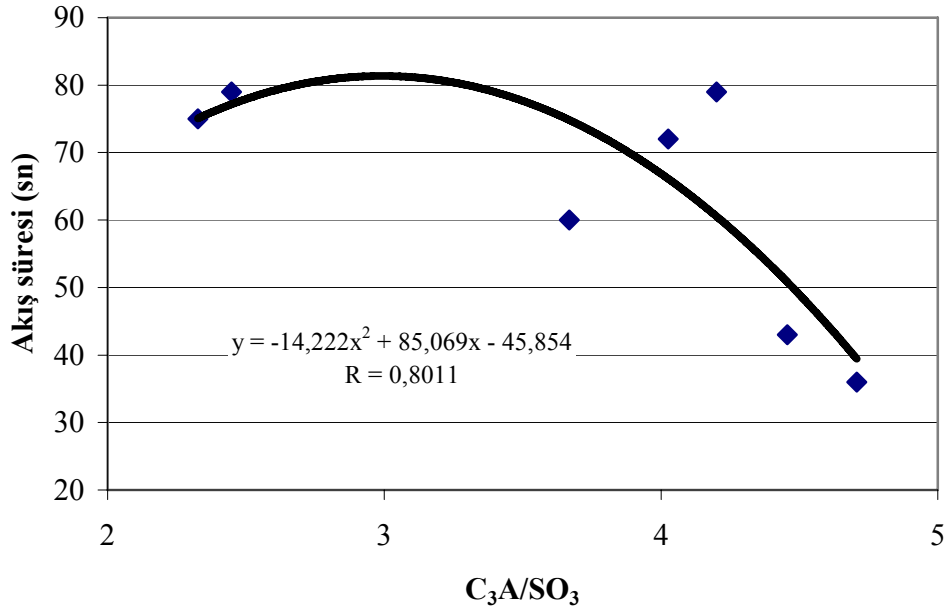


Şekil 7.29 Akış süresi- $C_3A/C_3S$  ilişkisi (Grup I-S1)

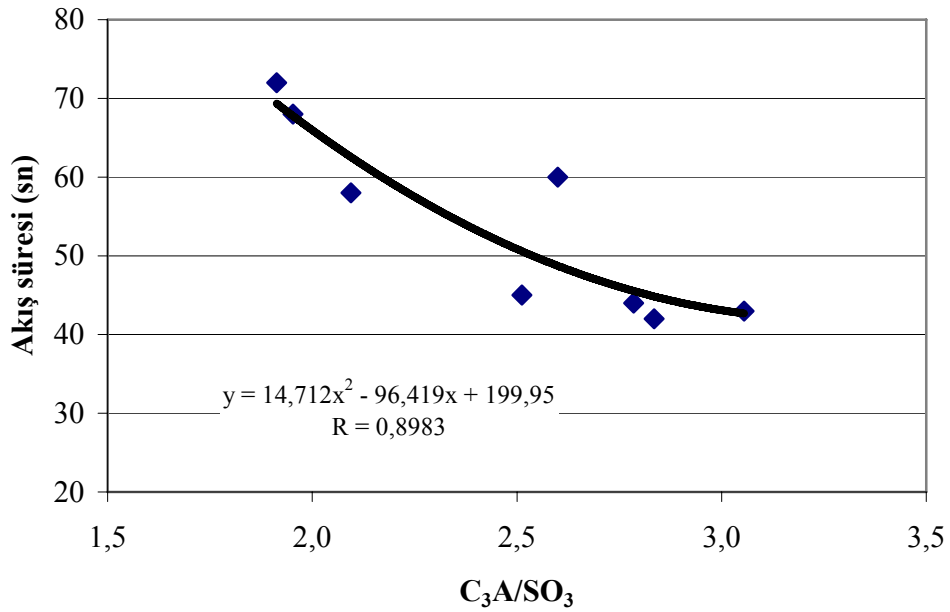


Şekil 7.30 Akış süresi- $C_3A/C_3S$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.31 ve Şekil 7.32’de Grup I ve Grup II için  $C_3A/SO_3$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Her iki grup için de başlangıç akış süresi ile  $C_3A/SO_3$  oranının değişimi arasındaki ilişkinin regresyon katsayısı oldukça yüksektir. Fakat, Grup I için  $C_3A/SO_3$  oranının 2.5 ile 4.0 arasında değişimi başlangıç akış süresini etkilemiyor gibi görülmektedir. Bununla birlikte, Grup II’de  $C_3A/SO_3$  oranının artması başlangıç akışkanlığını azaltmıştır. Bu eğilim farkı,  $C_3A/SO_3$  oranının başlangıç akışkanlığı üzerindeki etkisinin çok fazla olmadığına işaret etmektedir.

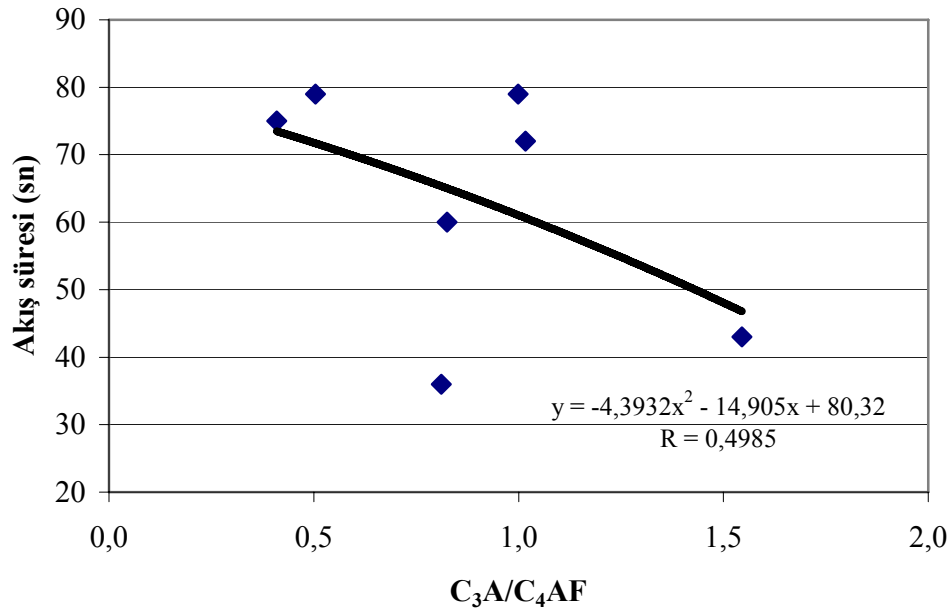


Şekil 7.31 Akış süresi- $C_3A/SO_3$  ilişkisi (Grup I-S1)

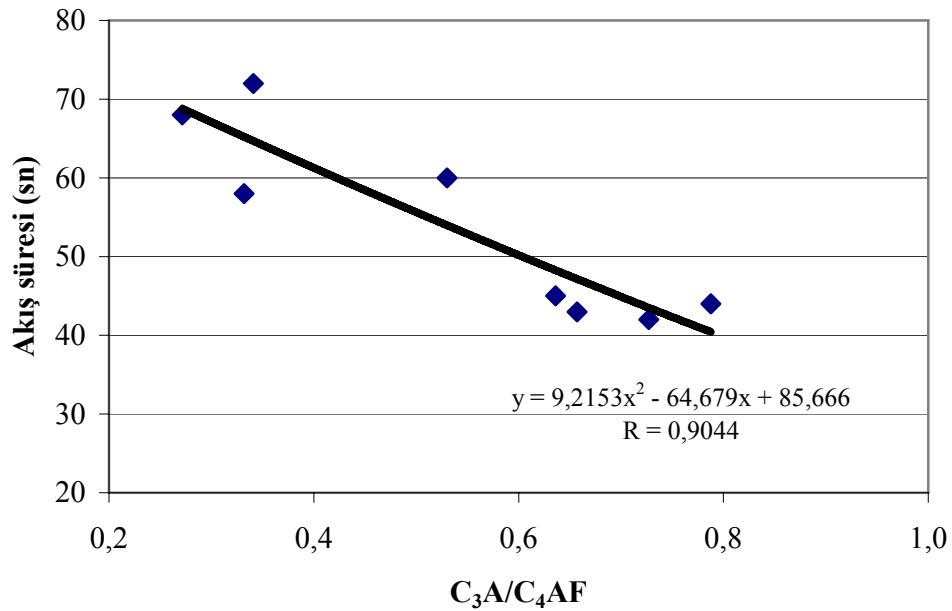


Şekil 7.32 Akış süresi- $C_3A/SO_3$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.33 ve Şekil 7.34’de Grup I ve Grup II için  $C_3A/C_4AF$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, başlangıç akış süresi  $C_3A/C_4AF$  oranının artması ile doğrusala yakın bir eğimle azalmıştır. Bununla birlikte, aynı  $C_3A/C_4AF$  oranında akış süresi önemli ölçüde değişim göstermektedir. Bu nedenle, tam bir ilişkinin varlığından söz etmek pek mümkün değildir.

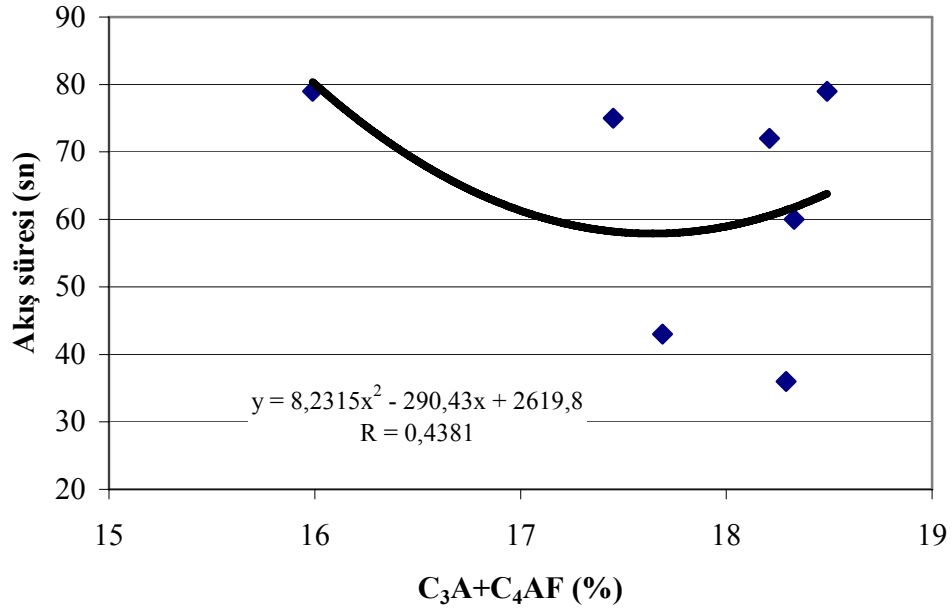


Şekil 7.33 Akış süresi- $C_3A/C_4AF$  ilişkisi (Grup I-S1)

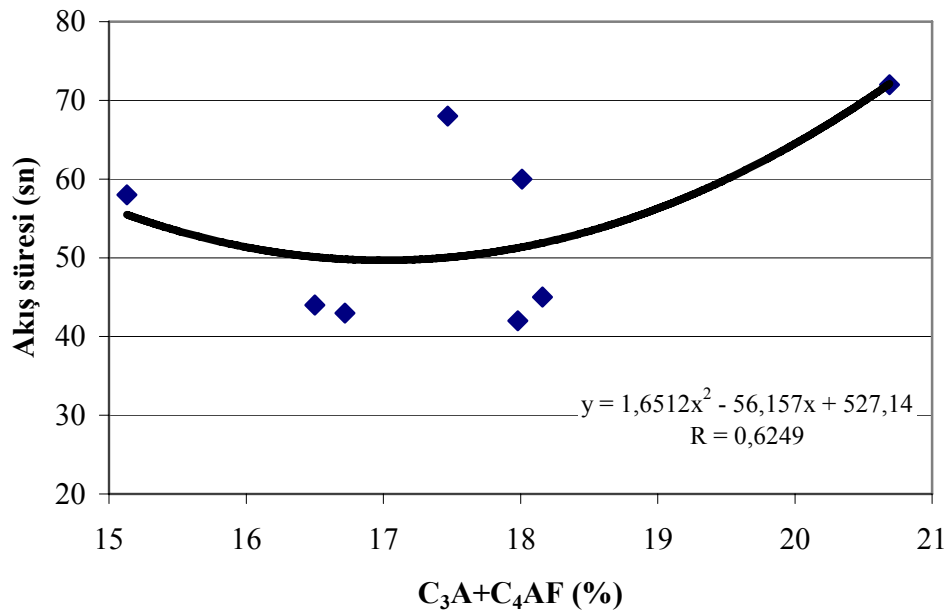


Şekil 7.34 Akış süresi- $C_3A/C_4AF$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.35 ve Şekil 7.36'da Grup I ve Grup II için  $C_3A+C_4AF$  toplamına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, benzer  $C_3A+C_4AF$  toplamına sahip çimentolar çok farklı sürelerde akmıştır. Örneğin, Grup I'de  $C_3A+C_4AF$  toplamı yaklaşık olarak 18.3 olan çimentolarla hazırlanan hamurlar, 35 ile 79 saniye arasında akış süreleri vermiştir. Bu nedenle,  $C_3A+C_4AF$  toplamının başlangıç akışkanlığına katkısının olmadığı sanılmaktadır.

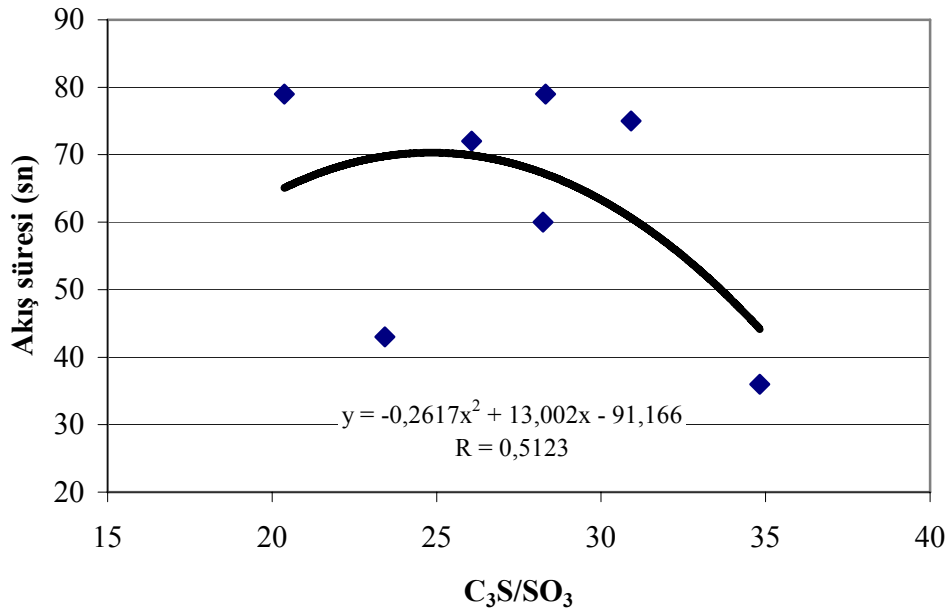


Şekil 7.35 Akış süresi- $C_3A+C_4AF$  ilişkisi (Grup I-S1)

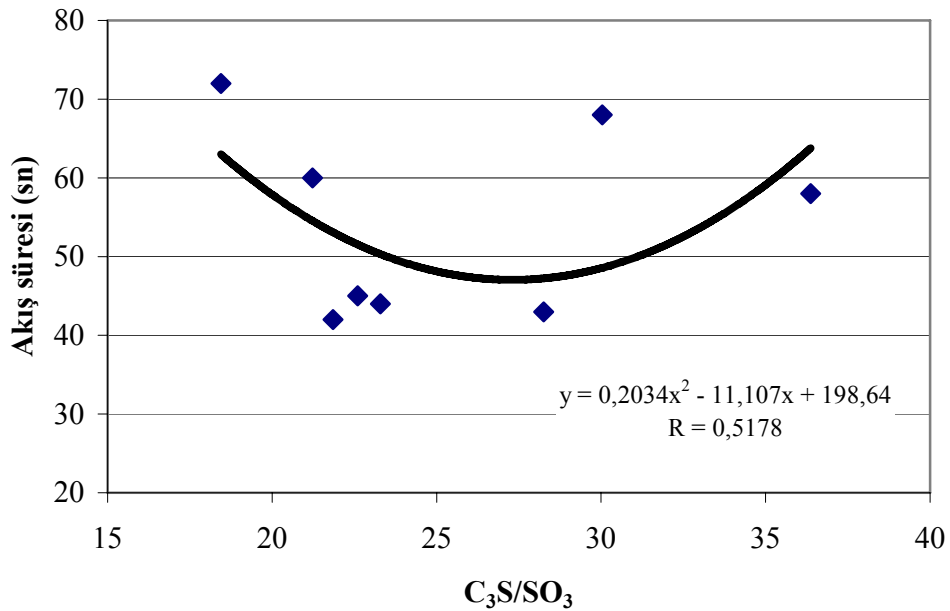


Şekil 7.36 Akış süresi- $C_3A+C_4AF$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.37 ve Şekil 7.38’de Grup I ve Grup II için  $C_3S/SO_3$  oranına bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, Grup I ve Grup II için başlangıç akış süresi ile  $C_3S/SO_3$  oranının değişim eğilimi birbirinden önemli ölçüde farklıdır. Ayrıca, her iki grup için de regresyon katsayısı düşüktür. Bu nedenle, başlangıç akış süresinin  $C_3S/SO_3$  oranından bağımsız olduğu düşünülmektedir.



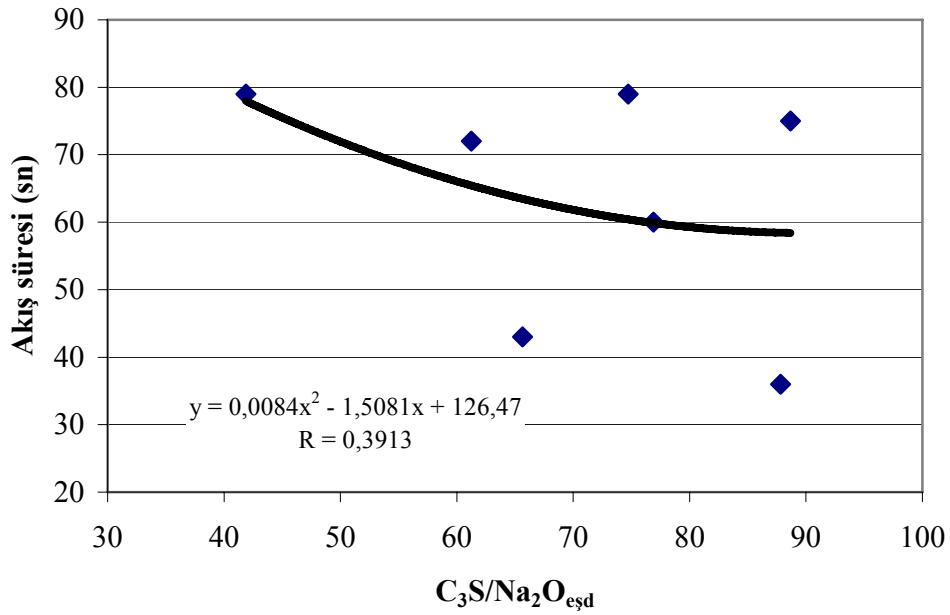
Şekil 7.37 Akış süresi- $C_3S/SO_3$  ilişkisi (Grup I-S1)



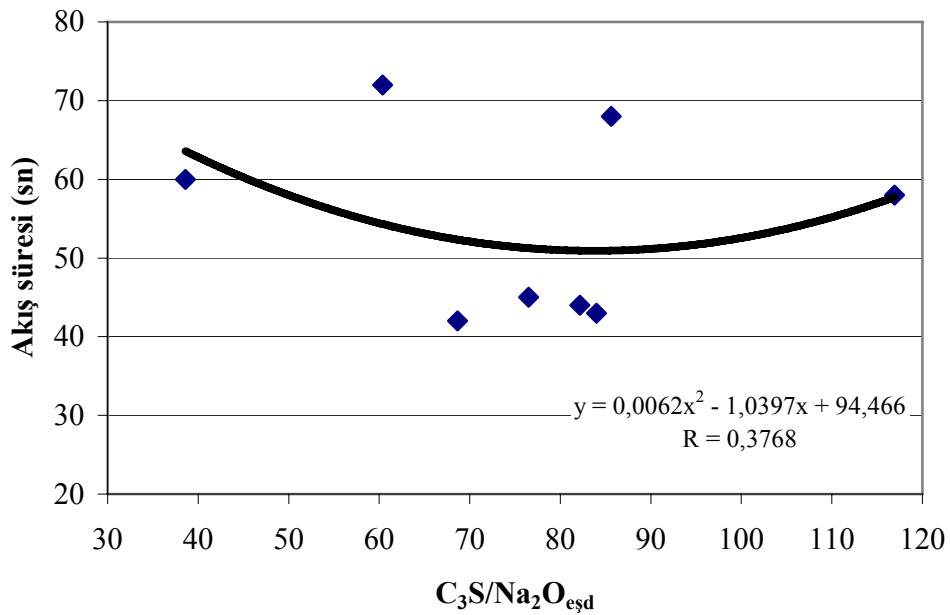
Şekil 7.38 Akış süresi- $C_3S/SO_3$  ilişkisi (Grup II-S1)



Şekil 7.39 ve Şekil 7.40’da Grup I ve Grup II için  $C_3S/Na_2O_{eşd.}$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, Grup I ve Grup II için başlangıç akış süresi ile  $C_3S/Na_2O_{eşd.}$  oranının değişimi arasındaki ilişkinin regresyon katsayısı oldukça düşüktür. Bu durum başlangıç akış süresinin  $C_3S/Na_2O_{eşd.}$  oranından bağımsız olduğunu göstermektedir.

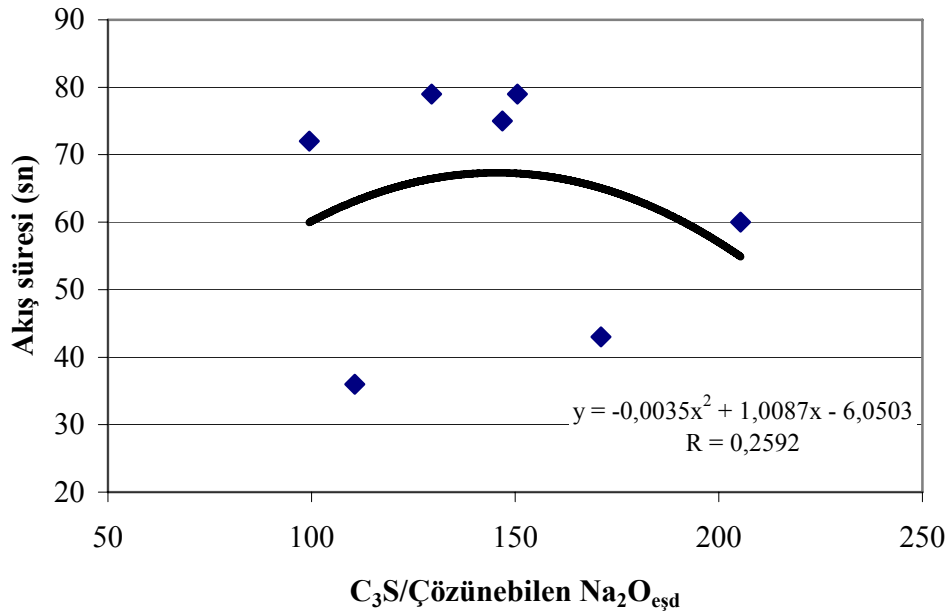


Şekil 7.39 Akış süresi- $C_3S/Na_2O_{eşd.}$  ilişkisi (Grup I-S1)

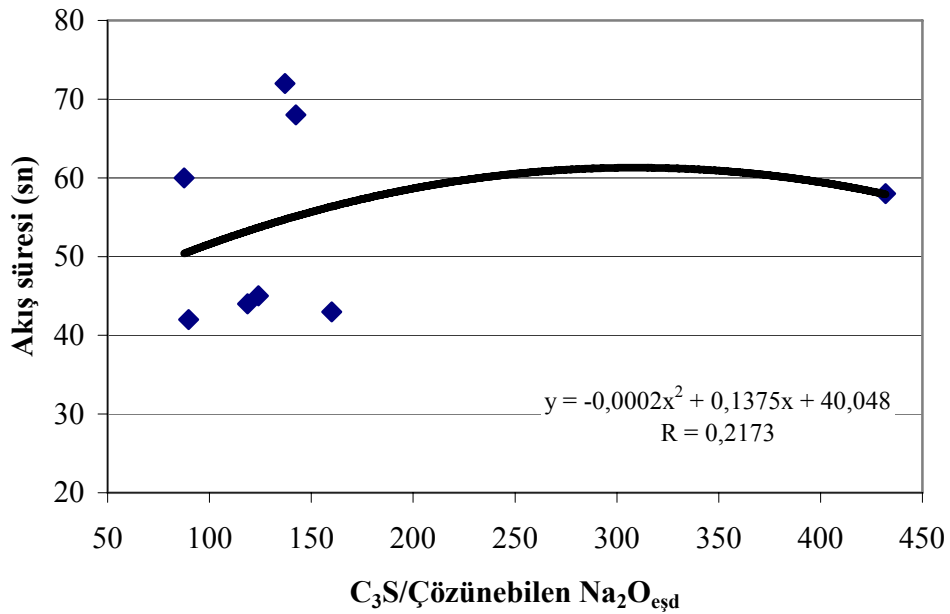


Şekil 7.40 Akış süresi- $C_3S/Na_2O_{eşd.}$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.41 ve Şekil 7.42’de Grup I ve Grup II için  $C_3S$ /çözünebilen  $Na_2O_{eşd.}$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Her iki grup için de başlangıç akış süresi ile  $C_3S$ /Çözünebilen  $Na_2O_{eşd.}$  oranının değişimi arasındaki ilişkinin regresyon katsayısı oldukça düşüktür. Bu durum, başlangıç akış süresinin  $C_3S$ /çözünebilen  $Na_2O_{eşd.}$  oranından bağımsız olduğunu göstermektedir.

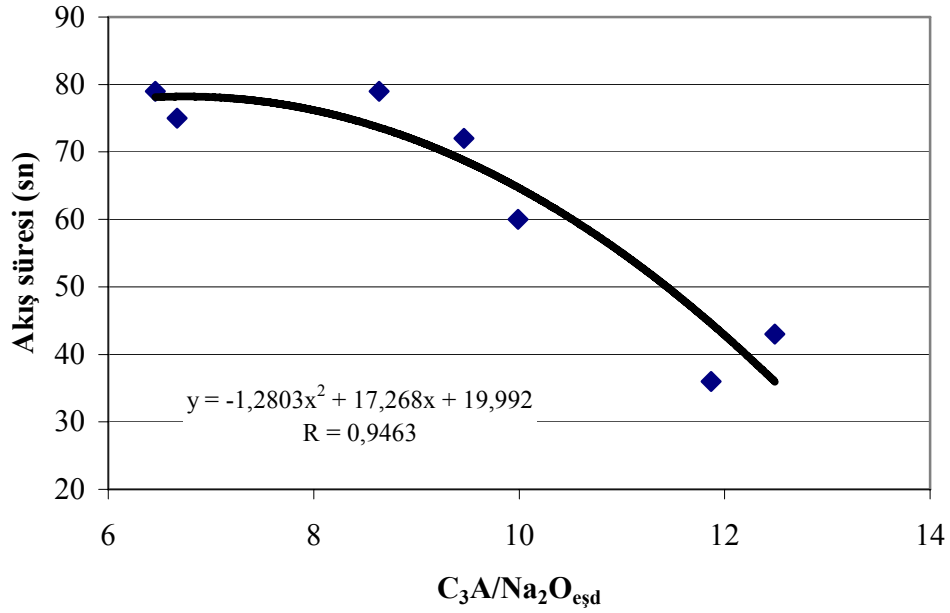


Şekil 7.41 Akış süresi-  $C_3S$ /Çözünebilen  $Na_2O_{eşd.}$  ilişkisi (Grup I-S1)

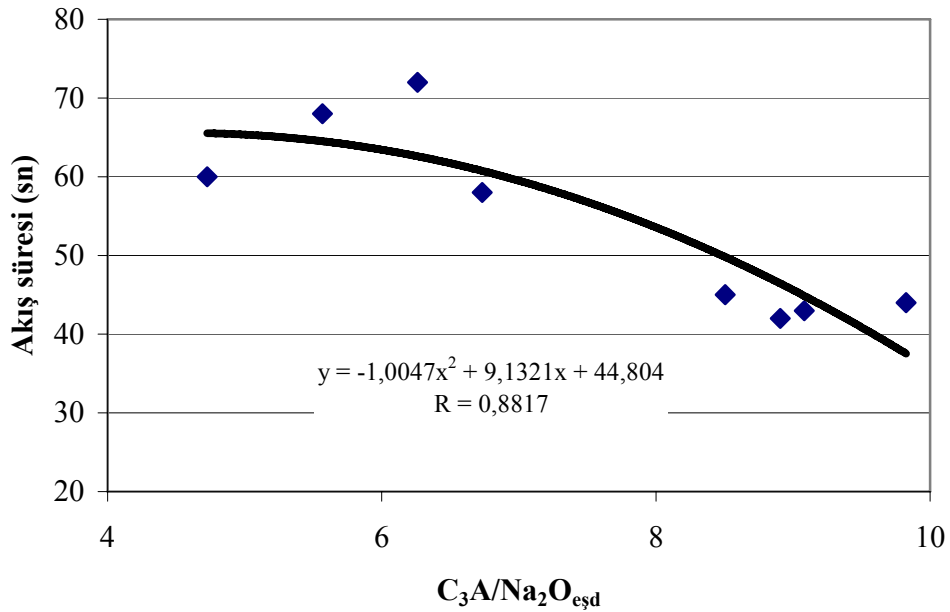


Şekil 7.42 Akış süresi- $C_3S$ /Çözünebilen  $Na_2O_{eşd.}$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.43 ve Şekil 7.44’de Grup I ve Grup II için  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Her iki grup için de başlangıç akış süresi ile  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  oranının değişimi arasındaki ilişkinin regresyon katsayısı oldukça yüksektir. Ayrıca, her iki grupta da  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  oranının artması ile akış süresi doğrusala yakın bir eğimle azalmaktadır. Bu güçlü ilişki başlangıç akışkanlığını etkileyen ana parametrenin  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  oranı olduğuna işaret etmektedir.

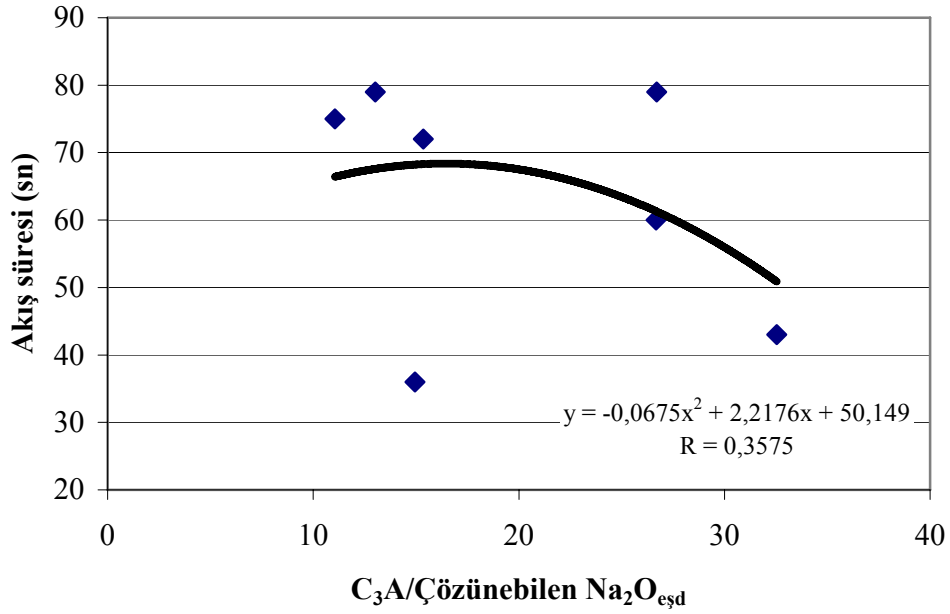


Şekil 7.43 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{eşd}$  ilişkisi (Grup I-S1)

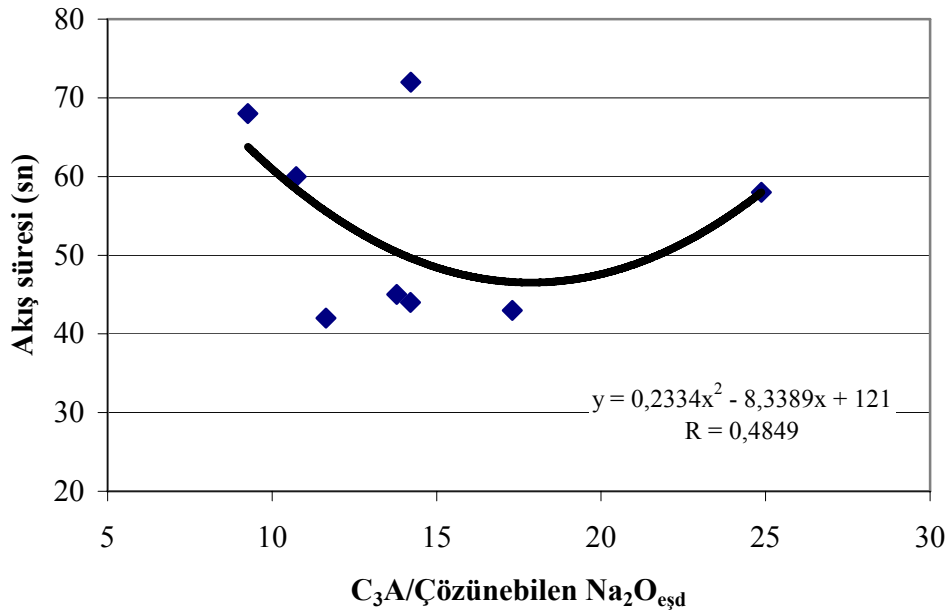


Şekil 7.44 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{eşd}$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.45 ve Şekil 7.46'da Grup I ve Grup II için  $C_3A$ /çözünebilir  $Na_2O_{eşd.}$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Her iki grup için de başlangıç akış süresi ile  $C_3A$ /çözünebilir  $Na_2O_{eşd.}$  oranının değişimi arasındaki ilişkinin regresyon katsayısı oldukça düşüktür. Ayrıca,  $C_3A$ /çözünebilir  $Na_2O_{eşd.}$  oranı ile akış süresinin değişim eğilimi iki grup için birbirinden farklı karakterdedir. Bu durum, başlangıç akışkanlığının  $C_3A$ /çözünebilir  $Na_2O_{eşd.}$  oranından bağımsız olarak değiştiğini göstermektedir.

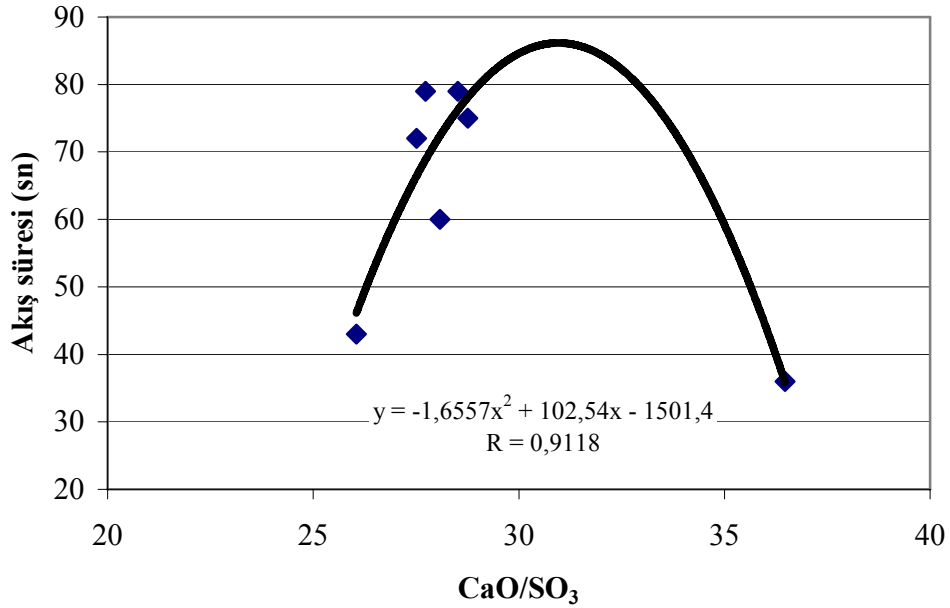


Şekil 7.45 Akış süresi- $C_3A$ /Çözünebilir  $Na_2O_{eşd}$  ilişkisi (Grup I-S1)

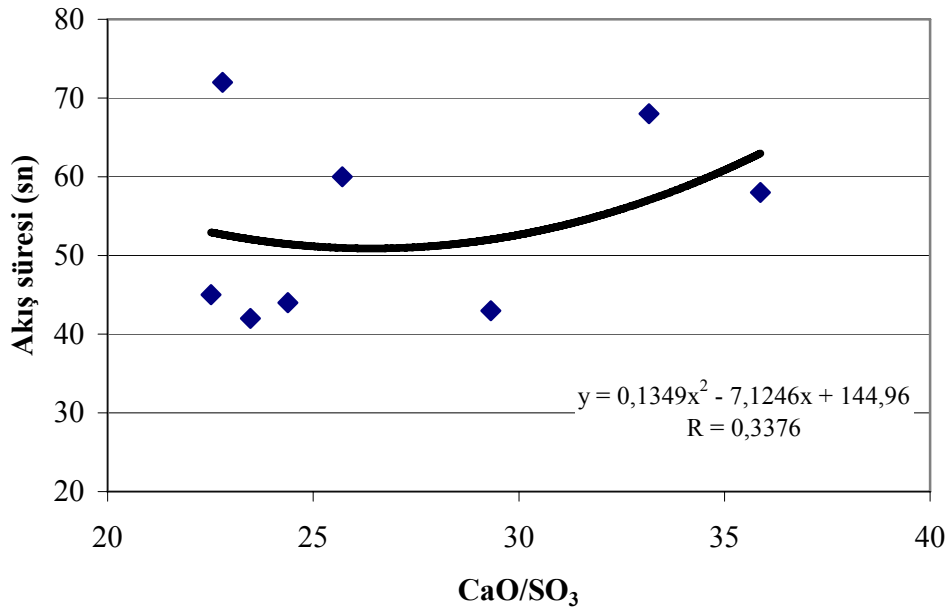


Şekil 7.46 Akış süresi- $C_3A$ /Çözünebilir  $Na_2O_{eşd}$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.47 ve Şekil 7.48'de Grup I ve Grup II için CaO/SO<sub>3</sub> oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Grup II için başlangıç akış süresi ile CaO/SO<sub>3</sub> oranının değişimi arasındaki ilişkinin regresyon katsayısı oldukça düşüktür. Ayrıca, CaO/SO<sub>3</sub> oranı ile akış süresinin değişim eğilimi iki grup için birbirinden farklı karakterdedir. Bu durum, başlangıç akışkanlığının CaO/SO<sub>3</sub> oranından bağımsız olarak değiştiğine işaret etmektedir

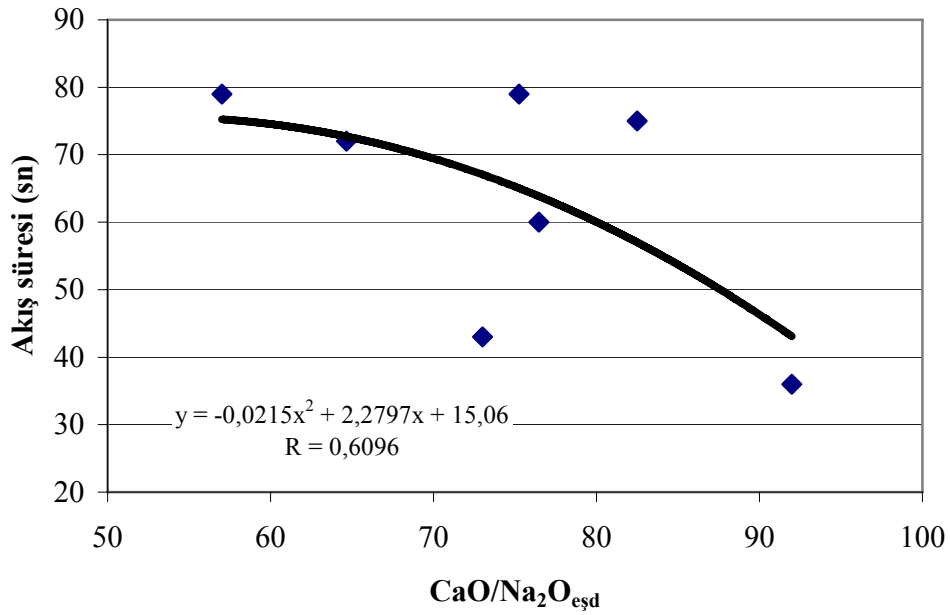


Şekil 7.47 Akış süresi-CaO/SO<sub>3</sub> ilişkisi (Grup I-S1)

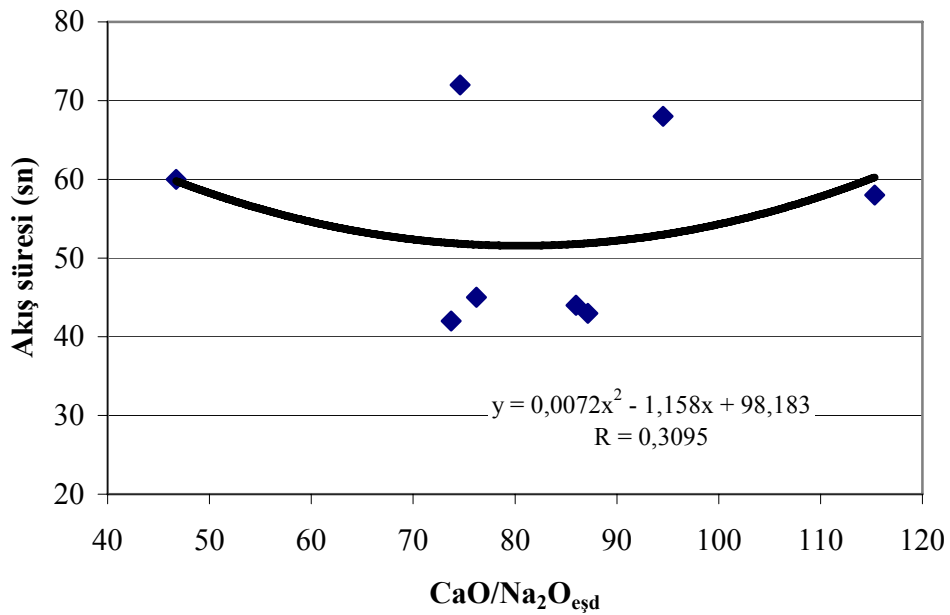


Şekil 7.48 Akış süresi-CaO/SO<sub>3</sub> ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.49 ve Şekil 7.50’de Grup I ve Grup II için  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Regresyon katsayısının Grup II için düşük olması ve akış süresinin  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  oranı ile değişiminin iki grup için birbirinden farklı karakterde olması, başlangıç akışkanlığının  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$  oranından bağımsız olduğunu göstermektedir.

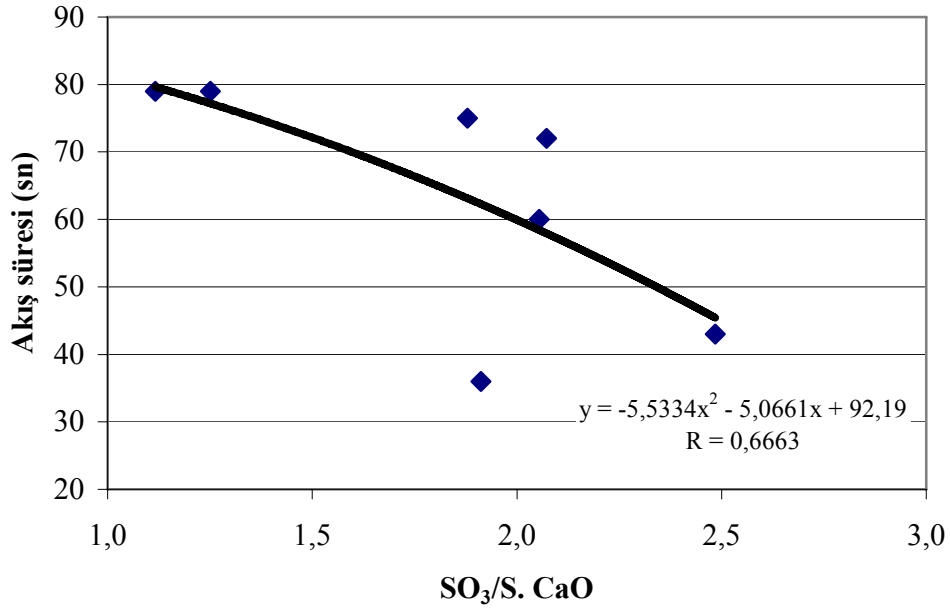


Şekil 7.49 Akış süresi- $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  ilişkisi (Grup I-S1)

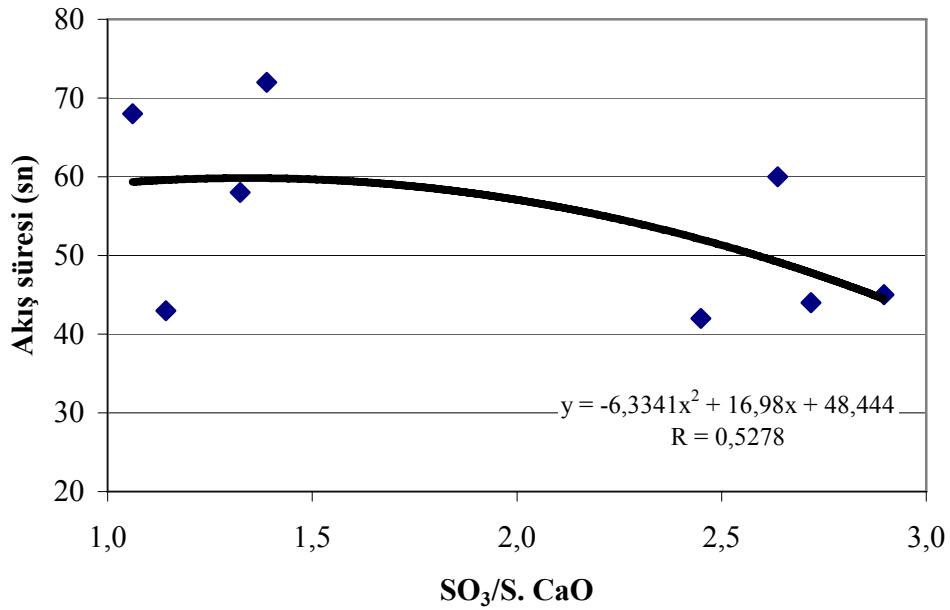


Şekil 7.50 Akış süresi- $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.51 ve Şekil 7.52’de Grup I ve Grup II için SO<sub>3</sub>/serbest CaO oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. İki grup için de başlangıç akış süresinin SO<sub>3</sub>/serbest CaO oranının artışı ile azaldığı görülse de, ikinci grupta bu eğilim birinci gruptaki kadar kuvvetli değildir. Bu nedenle, SO<sub>3</sub>/serbest CaO oranının artmasının, doğrudan başlangıç akışkanlığı üzerinde etkili olamayacağı kanısına varılmıştır.

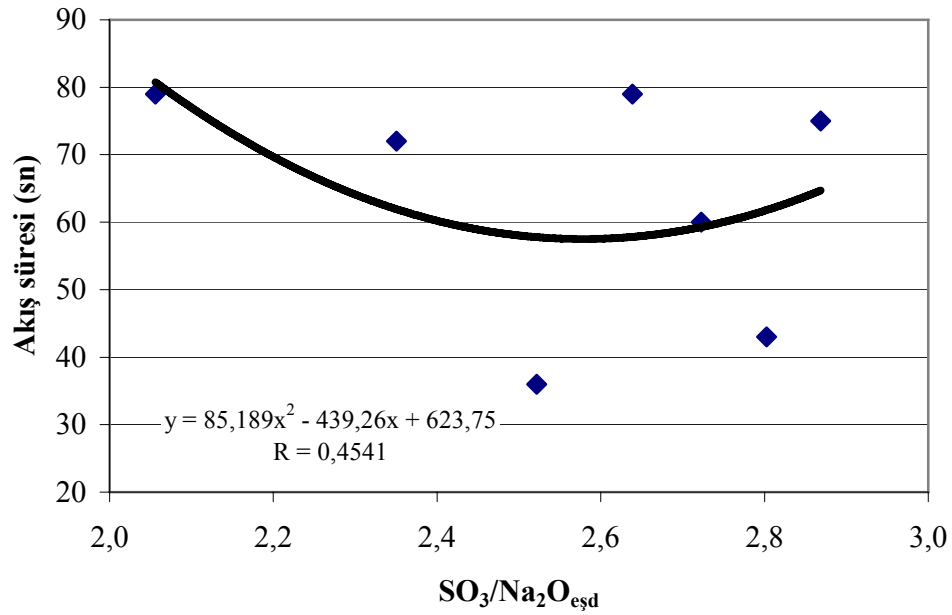


Şekil 7.51 Akış süresi-SO<sub>3</sub>/S. CaO ilişkisi (Grup I-S1)

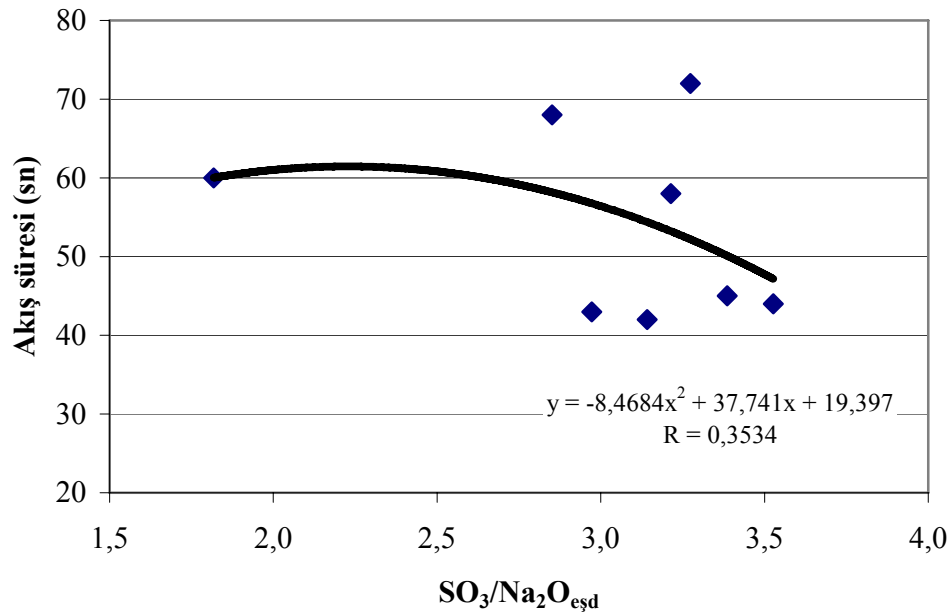


Şekil 7.52 Akış süresi-SO<sub>3</sub>/S. CaO ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.53 ve Şekil 7.54’de Grup I ve Grup II için  $\text{SO}_3/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Başlangıç akış süresinin  $\text{SO}_3/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  oranı ile değişim şekli iki grupta birbirinden farklı olup, regresyon katsayıları düşüktür. Bu nedenle,  $\text{SO}_3/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  oranının başlangıç akışkanlığı üzerinde etkili bir parametre olmadığı sanılmaktadır.



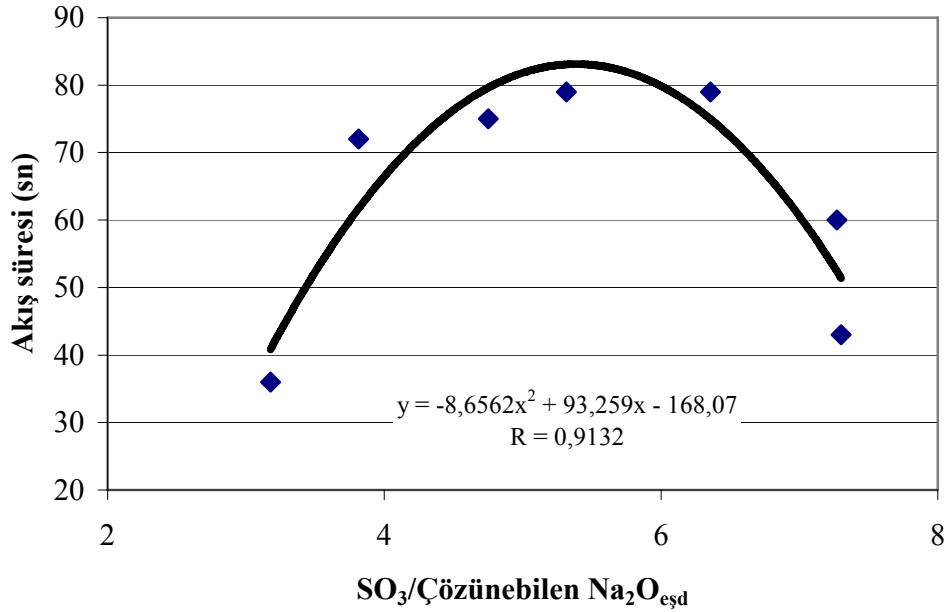
Şekil 7.53 Akış süresi- $\text{SO}_3/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  ilişkisi (Grup I-S1)



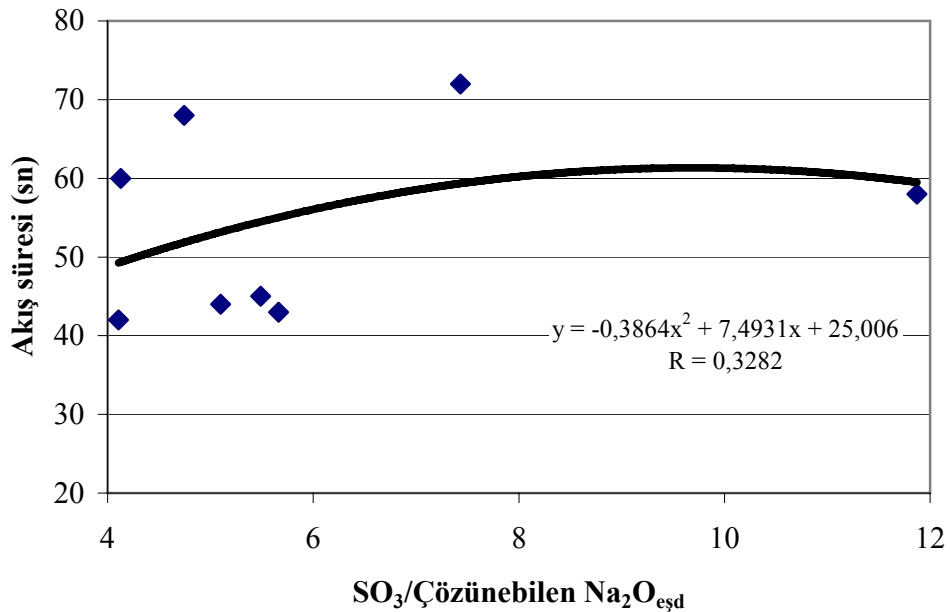
Şekil 7.54 Akış süresi- $\text{SO}_3/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  ilişkisi (Grup II-S1)



Şekil 7.55 ve Şekil 7.56’da Grup I ve Grup II için  $\text{SO}_3/\text{çözünebilen Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Grup II için başlangıç akış süresi ile  $\text{SO}_3/\text{çözünebilen Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  oranının değişimi arasındaki ilişkinin regresyon katsayısı oldukça düşüktür. Ayrıca,  $\text{SO}_3/\text{çözünebilen Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  oranı ile akış süresinin değişim eğilimi iki grup için birbirinden farklı karakterdedir. Bu durum, başlangıç akışkanlığının  $\text{SO}_3/\text{çözünebilen Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  oranından bağımsız olarak değiştiğine işaret etmektedir.

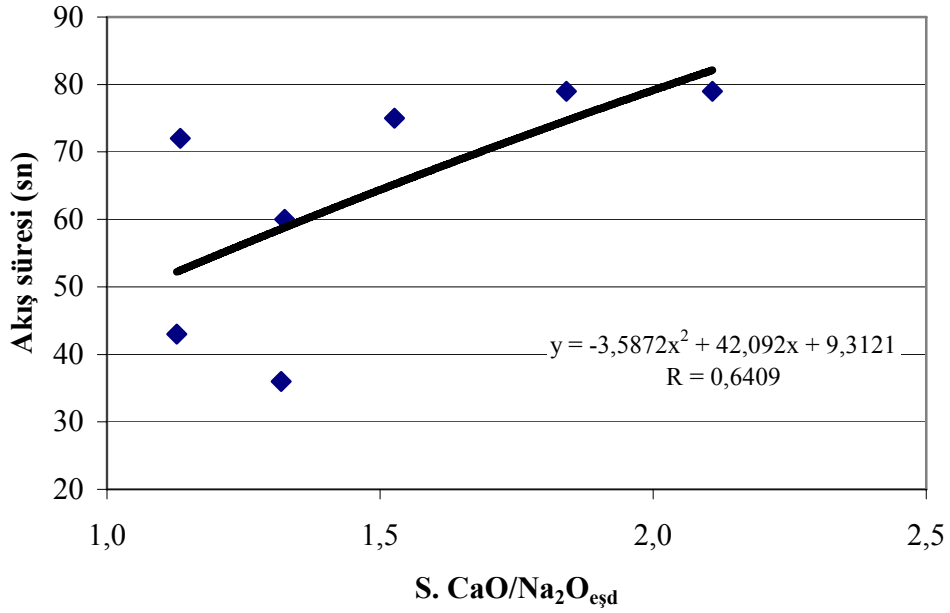


Şekil 7.55 Akış süresi- $\text{SO}_3/\text{Çözünebilen Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  ilişkisi (Grup I-S1)

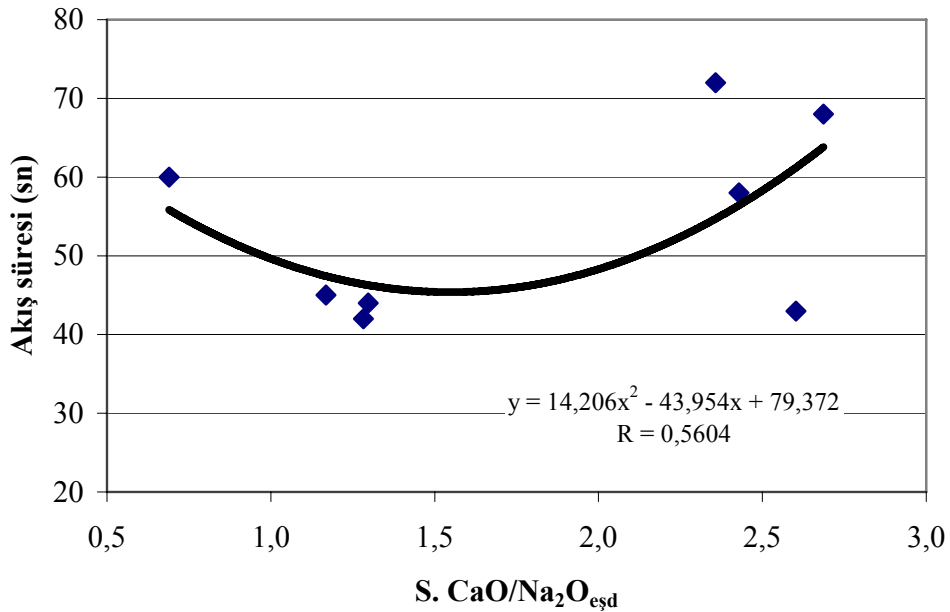


Şekil 7.56 Akış süresi- $\text{SO}_3/\text{Çözünebilen Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.57 ve Şekil 7.58’de Grup I ve Grup II için serbest CaO/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, benzer serbest CaO/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> oranına sahip çimentolar çok farklı akış sürelerinde akmıştır. Ayrıca, serbest CaO/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> oranına bağlı olarak akış süresinin değişim eğilimi iki grup için birbirinden farklı karakterdedir. Bu durum, başlangıç akışkanlığının serbest CaO/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> oranından bağımsız olduğunu göstermektedir.

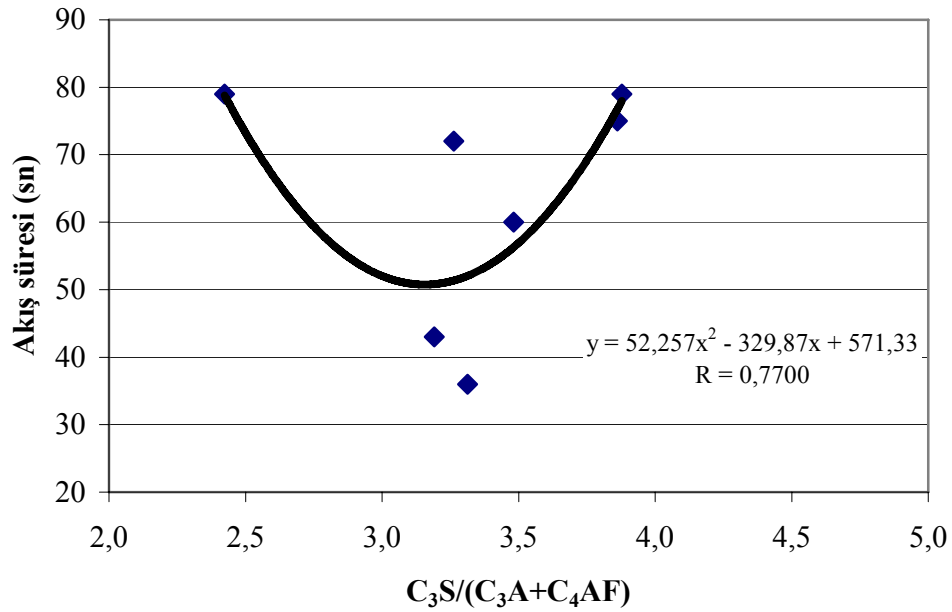


Şekil 7.57 Akış süresi-S. CaO/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> ilişkisi (Grup I-S1)

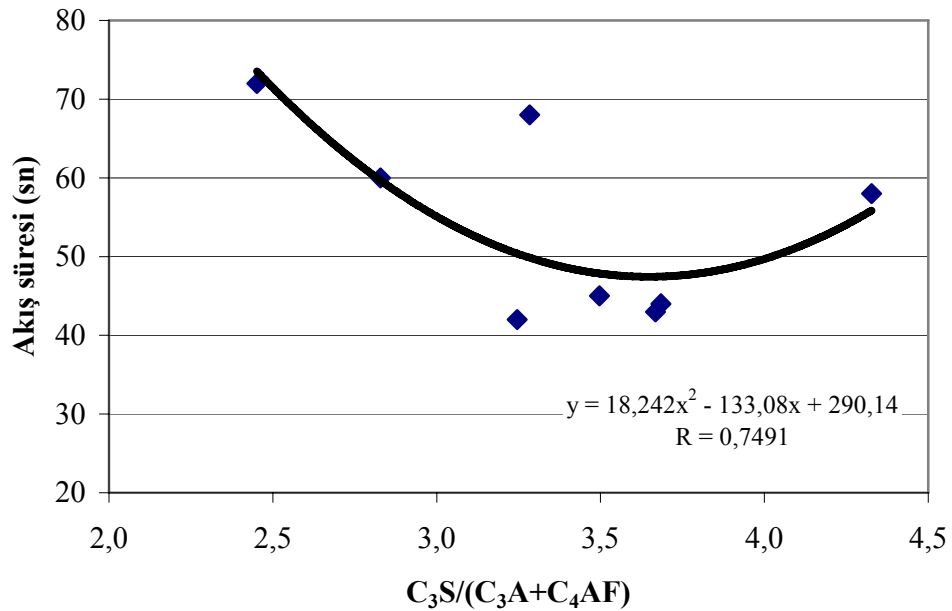


Şekil 7.58 Akış süresi-S. CaO/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.59 ve Şekil 7.60'da Grup I ve Grup II için  $C_3S/(C_3A+C_4AF)$  oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi,  $C_3S/(C_3A+C_4AF)$  oranına bağlı olarak akış süresinin değişim eğilimi iki grup için birbirinden farklı karakterdedir. Bu durum, başlangıç akışkanlığının  $C_3S/(C_3A+C_4AF)$  oranıyla ilişki göstermediğini yansıtmaktadır.

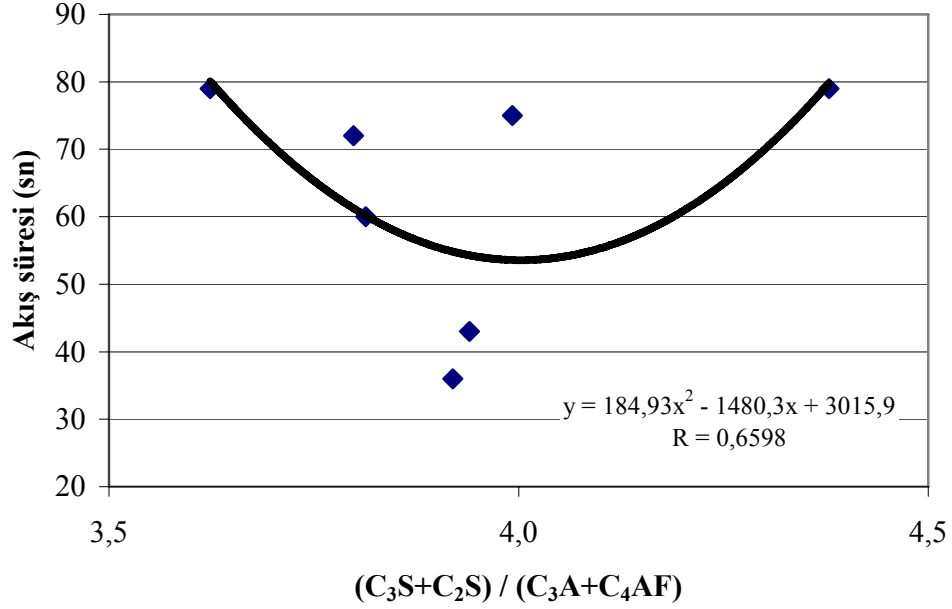


Şekil 7.59 Akış süresi- $C_3S/(C_3A+C_4AF)$  ilişkisi (Grup I-S1)

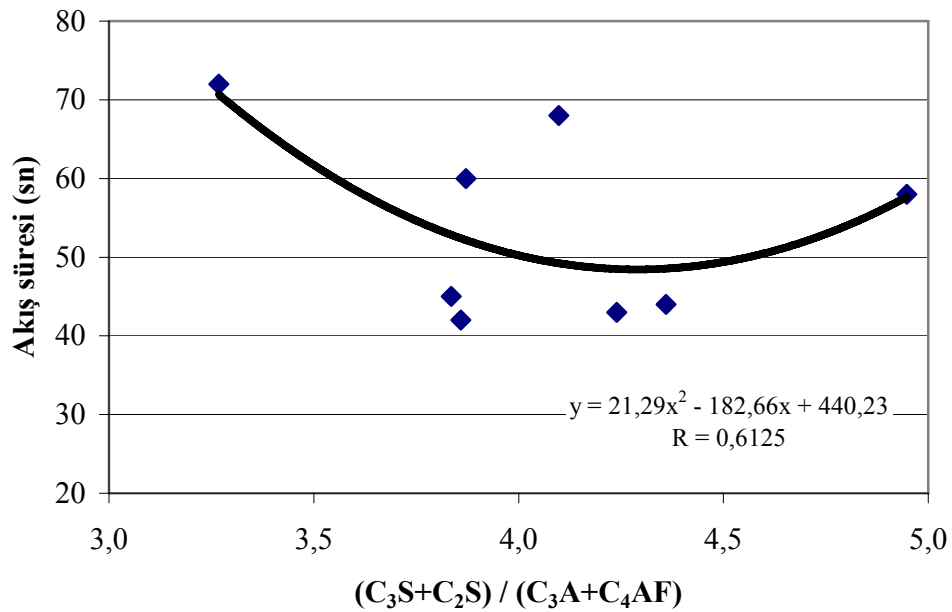


Şekil 7.60 Akış süresi- $C_3S/(C_3A+C_4AF)$  ilişkisi (Grup II-S1)

Şekil 7.61 ve Şekil 7.62’de Grup I ve Grup II için silikat/alüminat oranına bağlı olarak başlangıç akış süresinin değişimi verilmiştir. Değişim eğiliminin farklı olması silikat/alüminat oranıyla akış süresinin bir korelasyon göstermediğine işaret eder.



Şekil 7.61 Akış süresi- $(C_3S+C_2S)/(C_3A+C_4AF)$  ilişkisi (Grup I-S1)

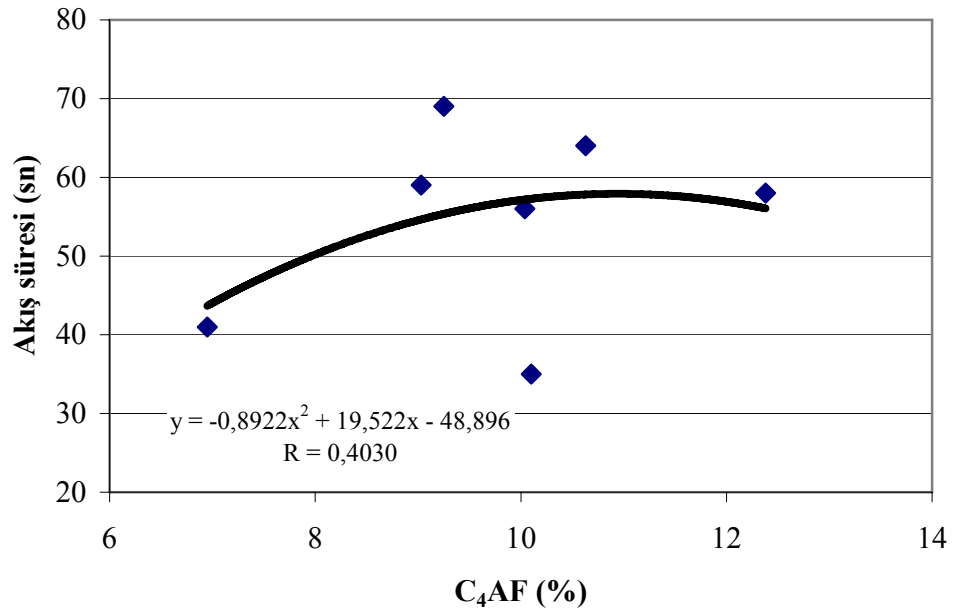


Şekil 7.62 Akış süresi- $(C_3S+C_2S)/(C_3A+C_4AF)$  ilişkisi (Grup II-S1)

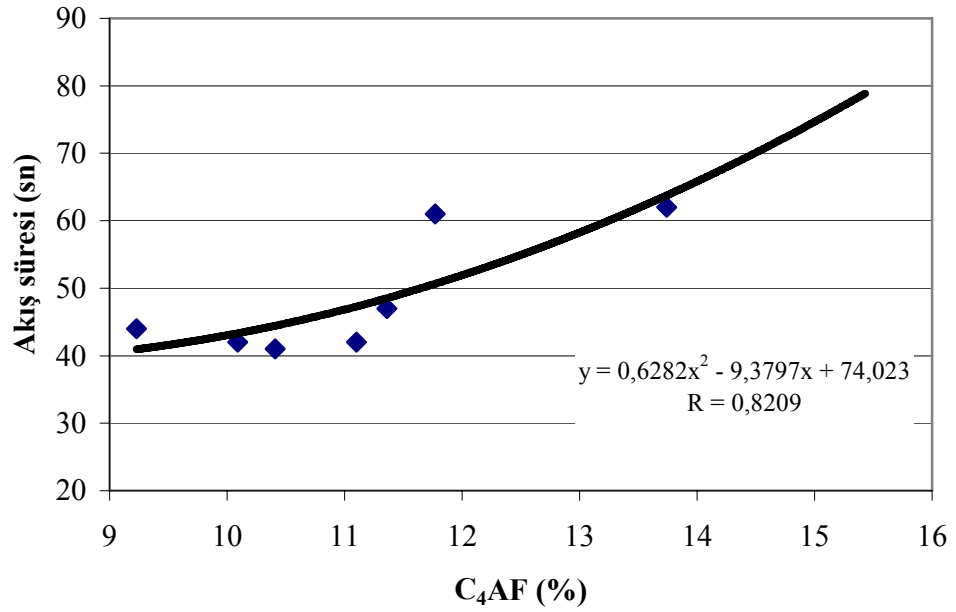
Tüm veriler değerlendirildiğinde, başlangıç akışkanlığının  $C_4AF$ ,  $C_3A/C_4AF$  ve  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  ile korelasyon gösterdiği görülmüştür. Ancak  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  oranının akış süresiyle gösterdiği korelasyon diğerlerine göre daha yüksektir. Önceki araştırmalarda  $C_3A/C_4AF$  oranının artmasıyla viskozitenin arttığı söylenmiştir. Ancak bu çalışmada bu söylemin tersi yönünde sonuç elde edilmiştir.  $C_3A/C_4AF$  oranının artışı akış süresinin azalması, diğer bir deyişle akışkanlığın artması ile sonuçlanmıştır.  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  ve  $C_4AF$  bileşenlerinin bireysel olarak davranışı etkilemesi konusunda ise geçmiş araştırmalarda kayda değer bir bilgi yoktur. Bu çalışmada  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  oranının artışı akış süresinin azalmasına;  $C_4AF$  oranının artışı ise akış süresinin artışına yol açmıştır.

S1 katkısı ile hazırlanmış karışımlardan elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle ortaya konulan bu sonuçlar diğer katkıları için de doğrulanmalıdır. İlişki belirlenen bu bileşenlerin akış süresiyle gösterdiği korelasyonlar S2, S3 ve S4 katkıları için aşağıda verilmiştir. Kullanılan veriler daha önceden de ifade edildiği gibi %0,8 dozaja karşılık gelen akış süreleridir.

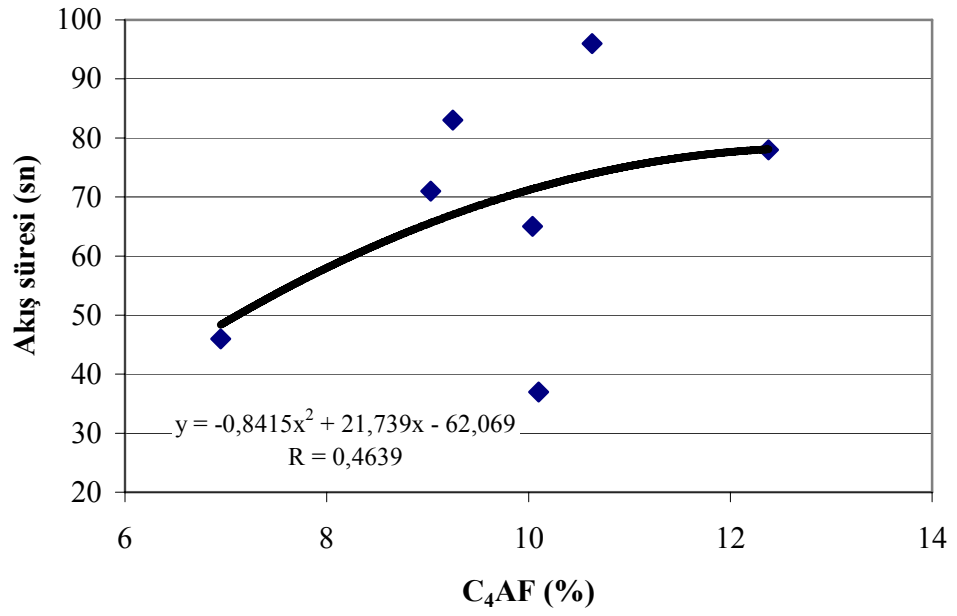
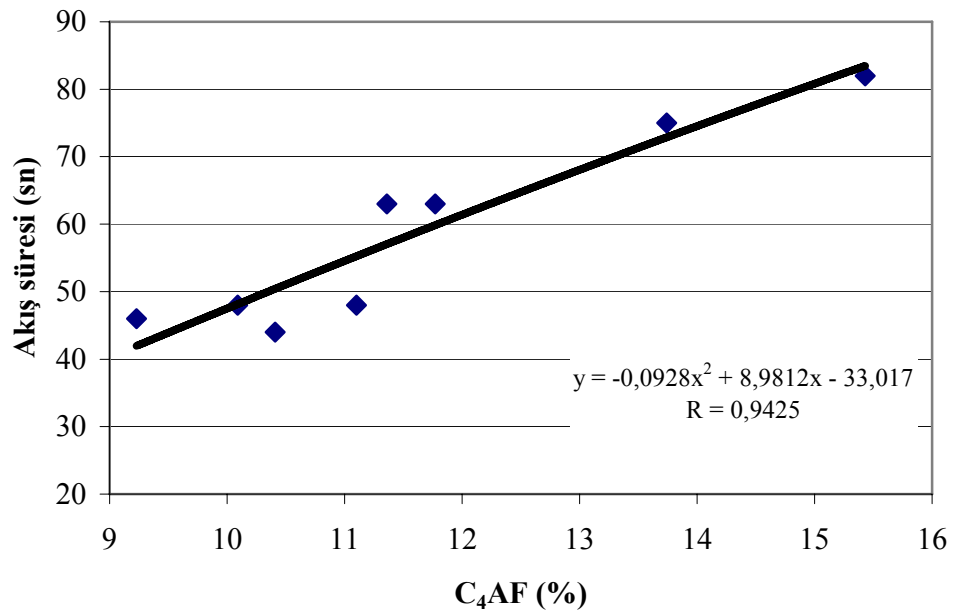
Şekil 7.63-7.68'de I. ve II. Grup çimentolarla S2, S3 ve S4 katkılarının kullanımı durumunda  $C_4AF$  oranına bağlı olarak akış süresinin değişimi görülmektedir. Her üç katkıda da özellikle I. Grup çimentolarla hazırlanan karışımlarda korelasyon daha düşük olmasına karşın genel olarak S1 katkısında olduğu gibi, S2, S3 ve S4 katkılarında da  $C_4AF$  oranının artışı akış süresinin artmasına yol açmıştır.

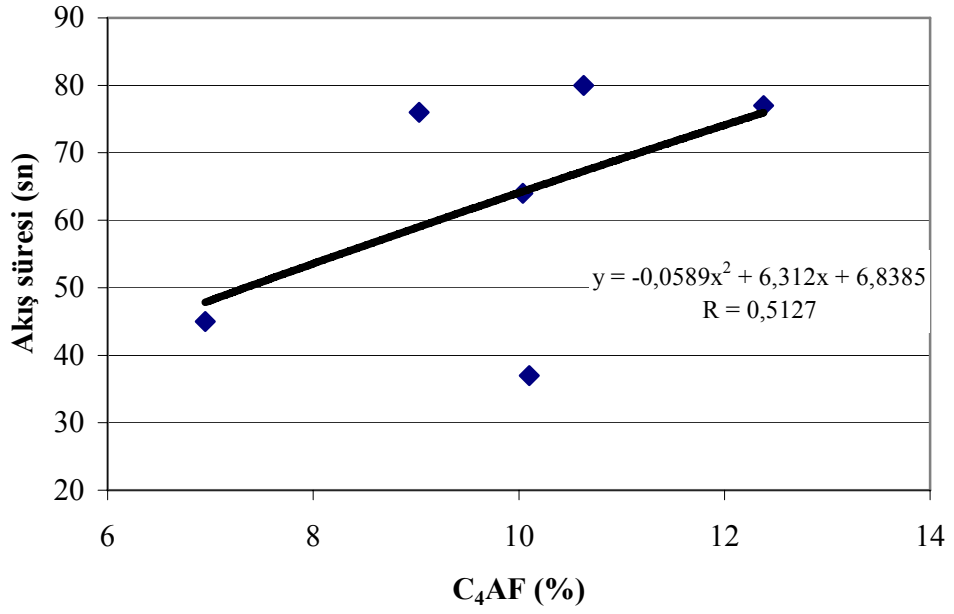
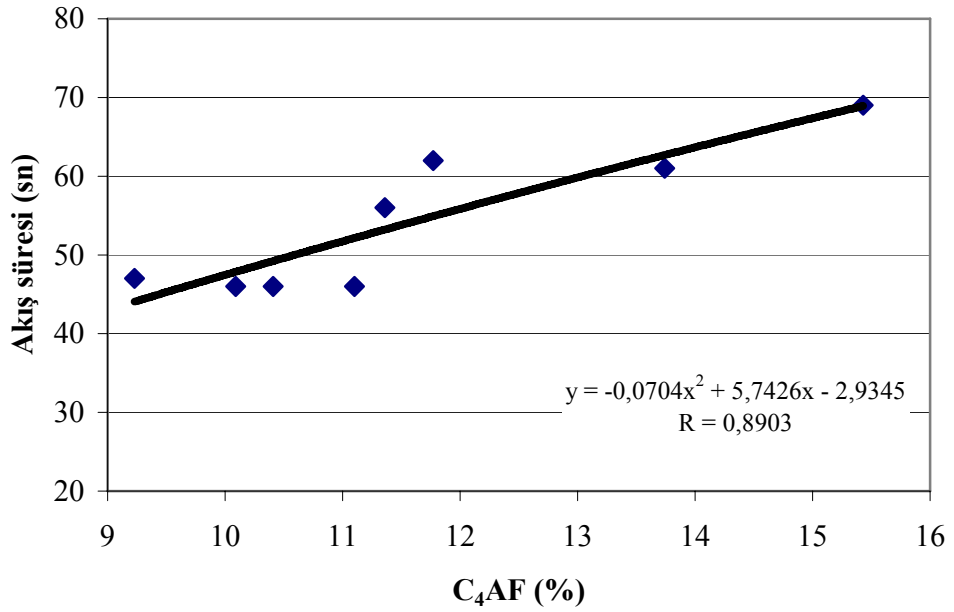


Şekil 7.63 Akış süresi-C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup I-S2)



Şekil 7.64 Akış süresi-C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup II-S2)

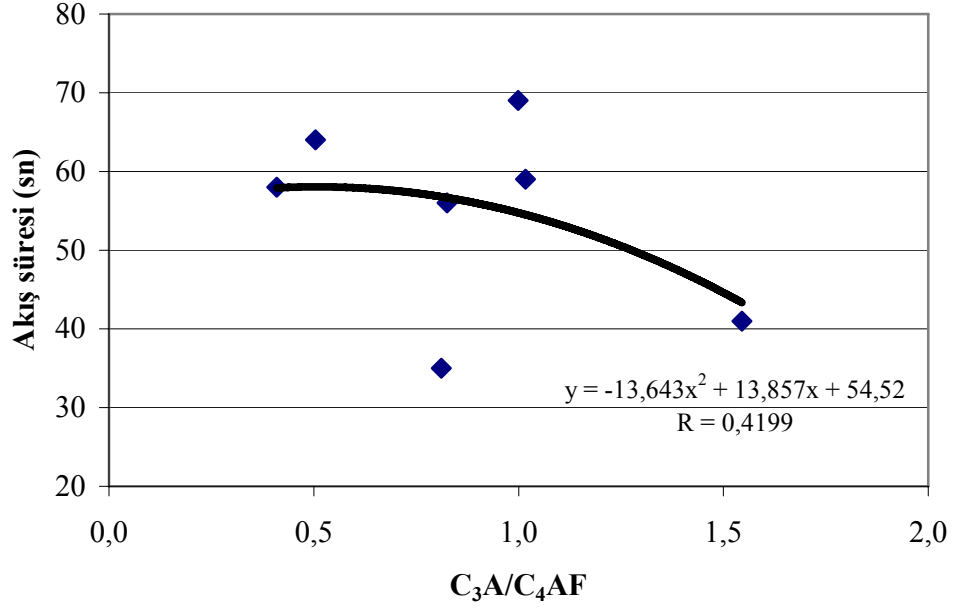
Şekil 7.65 Akış süresi-C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup I-S3)Şekil 7.66 Akış süresi-C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup II-S3)

Şekil 7.67 Akış süresi-C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup I-S4)Şekil 7.68 Akış süresi-C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup II-S4)

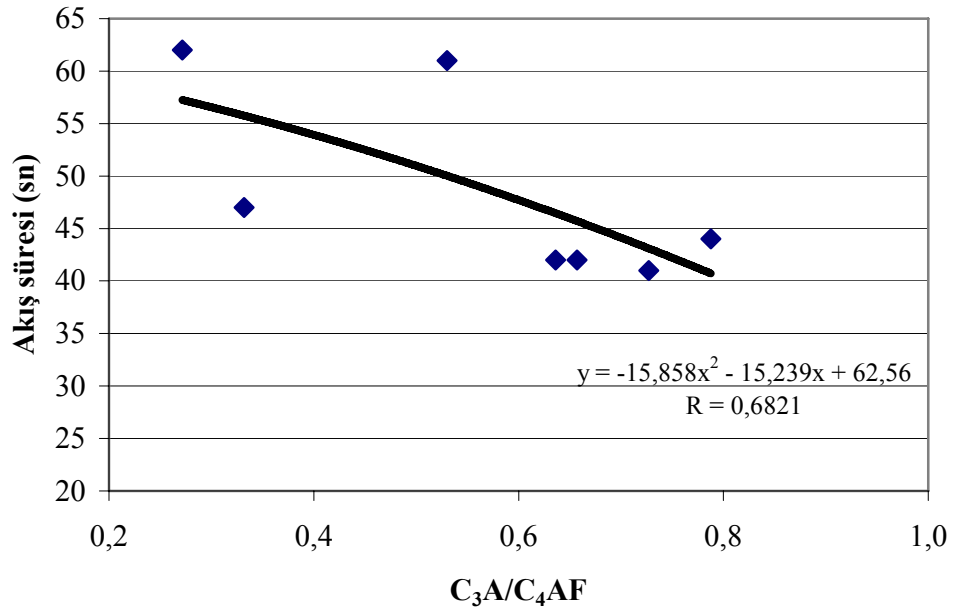
Şekil 7.69-7.74'de I. ve II. Grup çimentolarla S2, S3 ve S4 katkılarının kullanımı durumunda C<sub>3</sub>A/C<sub>4</sub>AF oranına bağlı olarak akış süresinin değişimi görülmektedir. Her üç katkıda da özellikle I. Grup çimentolarla hazırlanan karışımlarda korelasyon daha



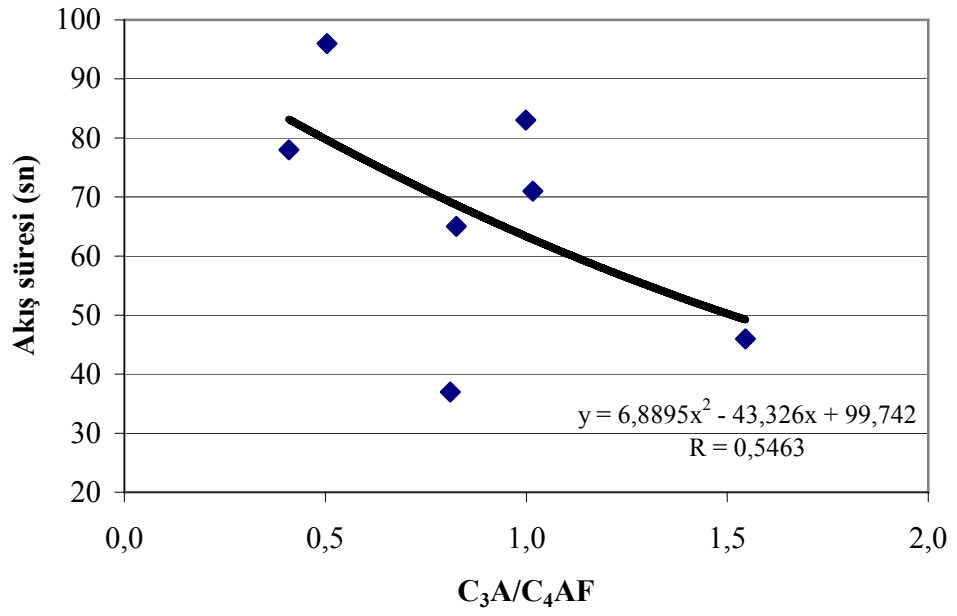
düşük olmasına karşın genel olarak S1 katkısında olduğu gibi, S2, S3 ve S4 katkılarında da  $C_3A/C_4AF$  oranının artışı akış süresinin azalmasına yol açmıştır.



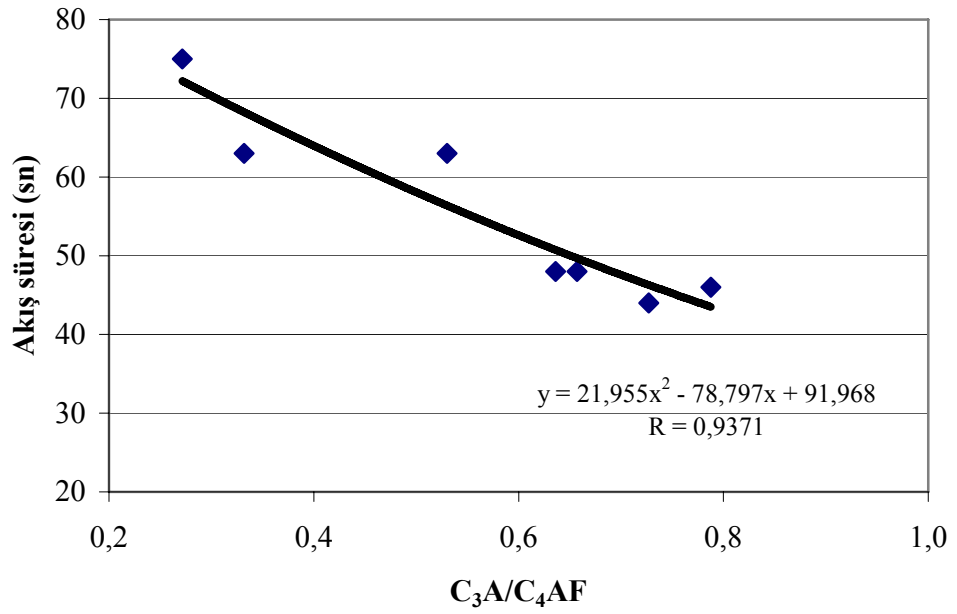
Şekil 7.69 Akış süresi- $C_3A/C_4AF$  ilişkisi (Grup I-S2)



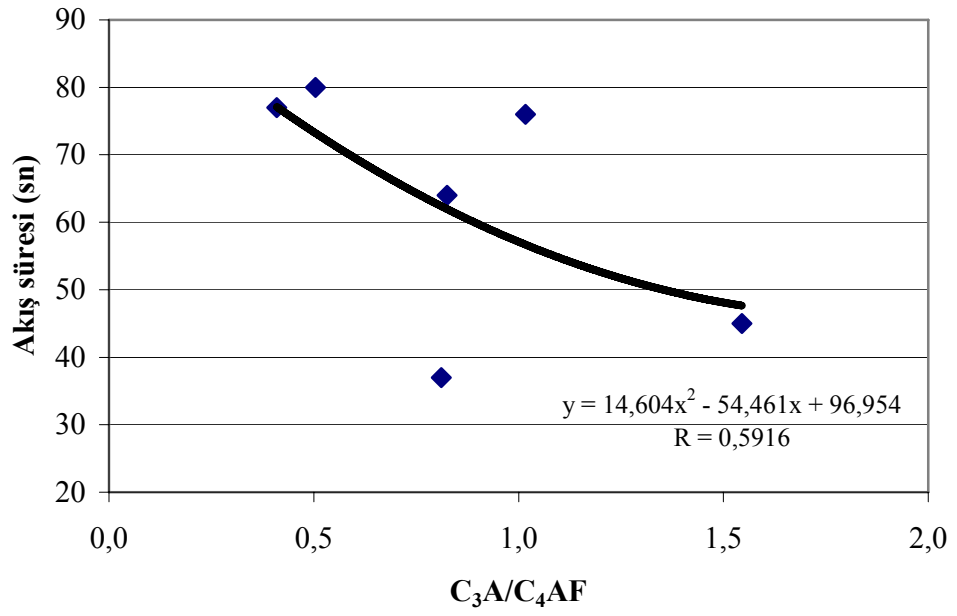
Şekil 7.70 Akış süresi- $C_3A/C_4AF$  ilişkisi (Grup II-S2)



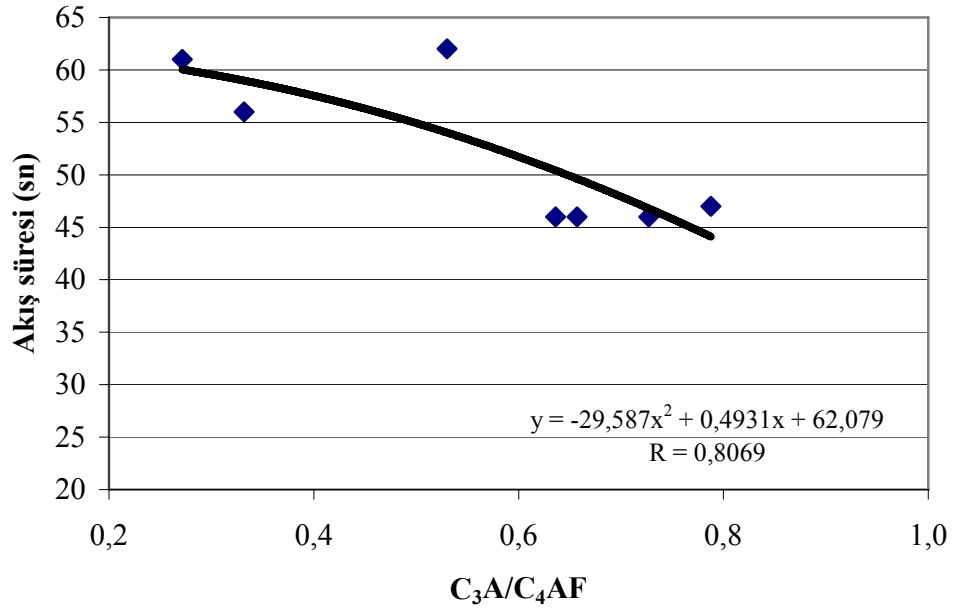
Şekil 7.71 Akış süresi-C<sub>3</sub>A/C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup I-S3)



Şekil 7.72 Akış süresi-C<sub>3</sub>A/C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup II-S3)



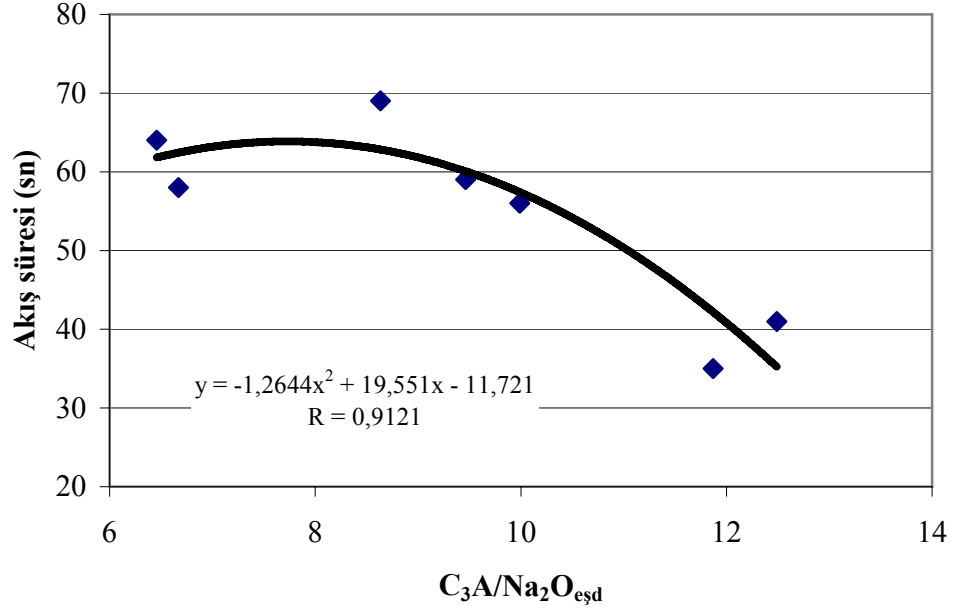
Şekil 7.73 Akış süresi-C<sub>3</sub>A/C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup I-S4)



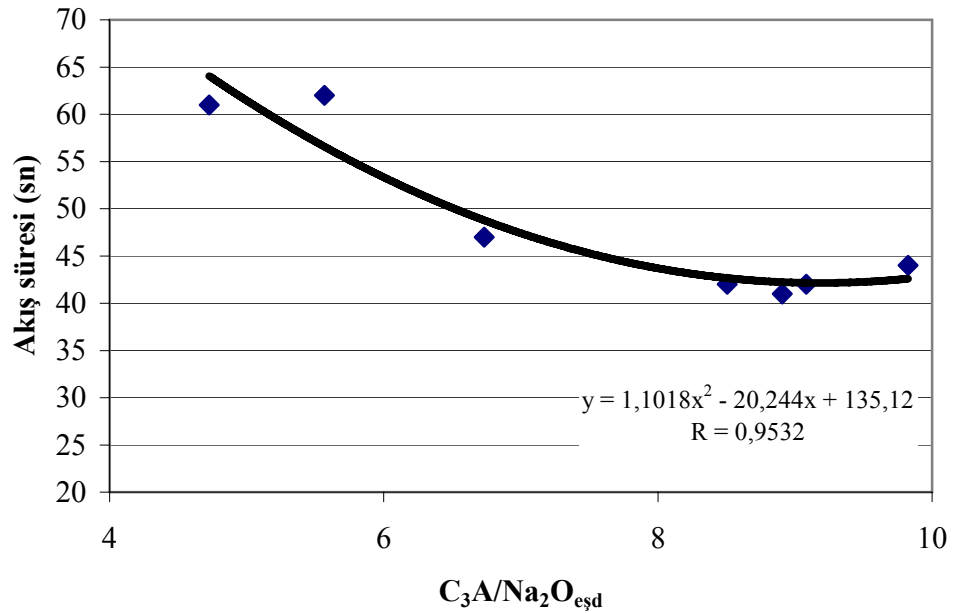
Şekil 7.74 Akış süresi-C<sub>3</sub>A/C<sub>4</sub>AF ilişkisi (Grup II-S4)

Şekil 7.75-7.80'de I. ve II. Grup çimentolarla S2, S3 ve S4 katkılarının kullanımı durumunda C<sub>3</sub>A/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> oranına bağlı olarak akış süresinin değişimi görülmektedir. S1 katkısında olduğu gibi, S2, S3 ve S4 katkılarında da C<sub>3</sub>A/Na<sub>2</sub>O<sub>eşd.</sub> oranının artışı

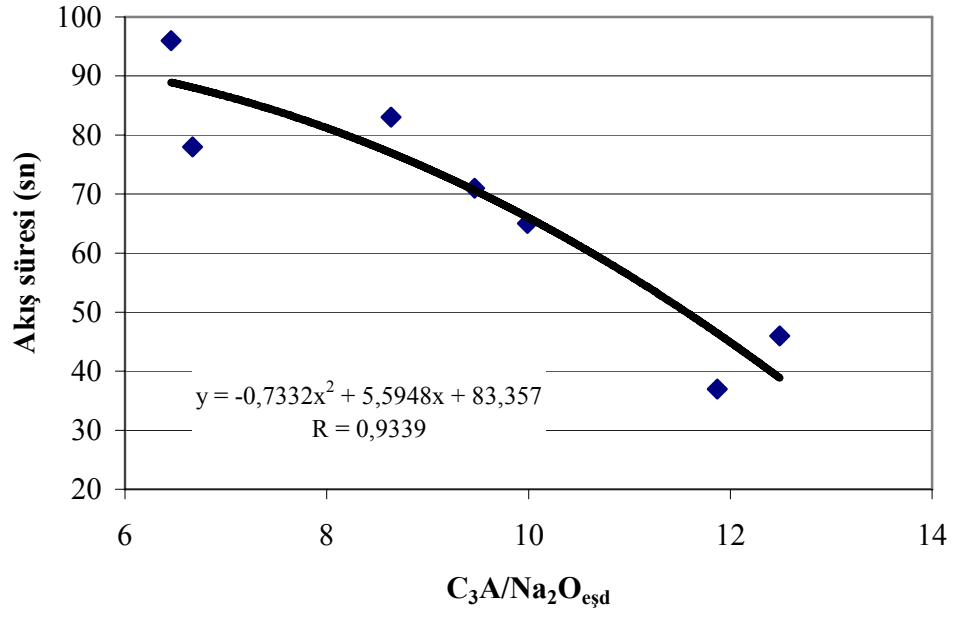
akış süresinin azalmasına yol açmıştır. Diğer bileşenlerden farklı olarak, her iki grupta da tüm katkılar, bu bileşen için yüksek korelasyon göstermiştir.



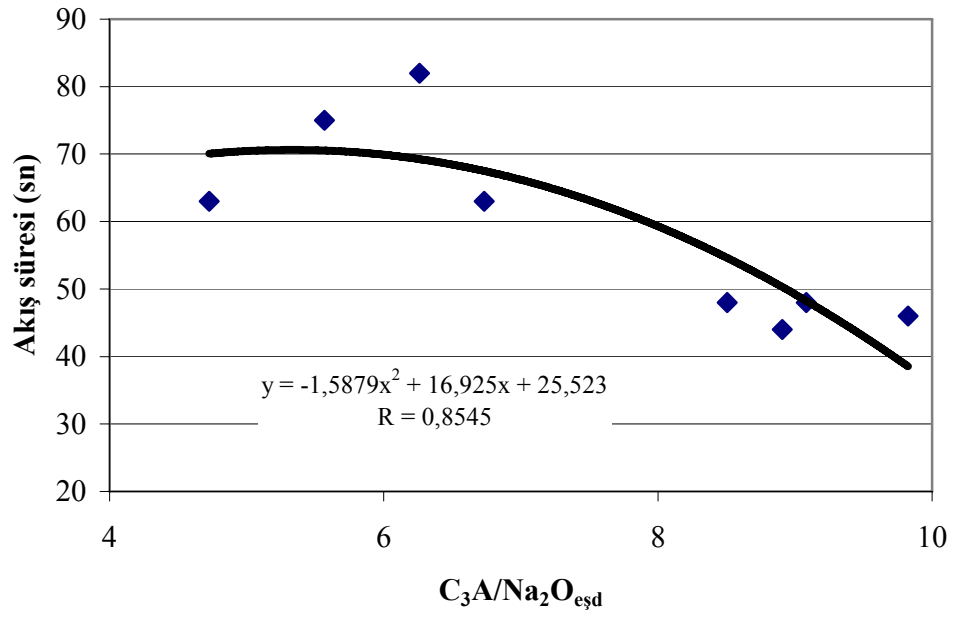
Şekil 7.75 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{esd}$  ilişkisi (Grup I-S2)



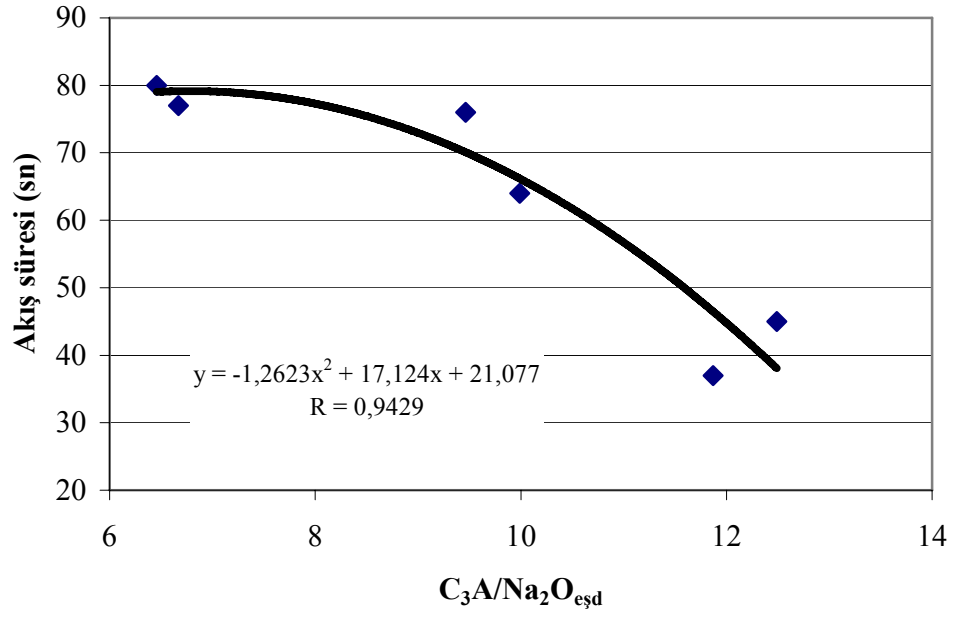
Şekil 7.76 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{esd}$  ilişkisi (Grup II-S2)



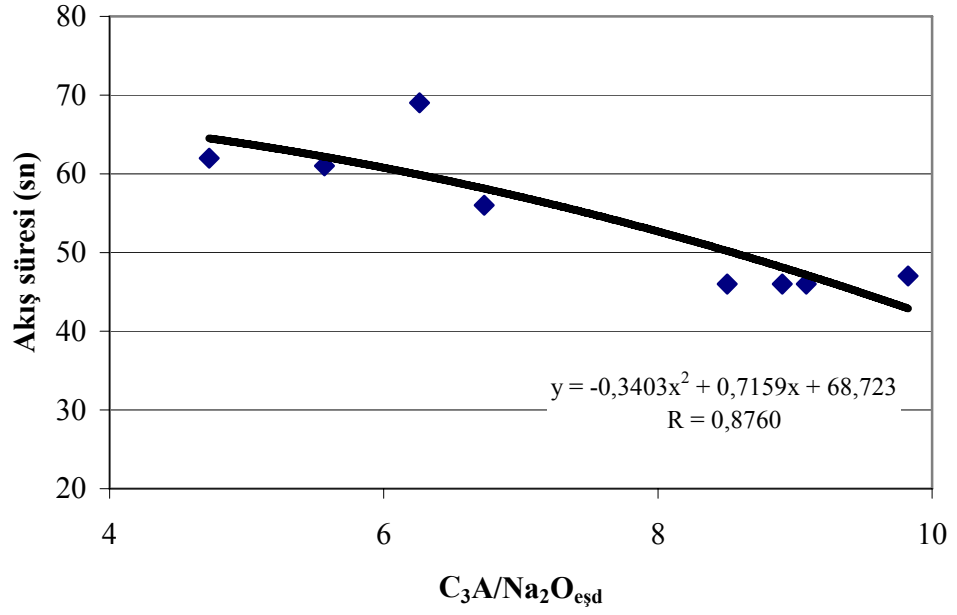
Şekil 7.77 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{esd}$  ilişkisi (Grup I-S3)



Şekil 7.78 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{esd}$  ilişkisi (Grup II-S3)



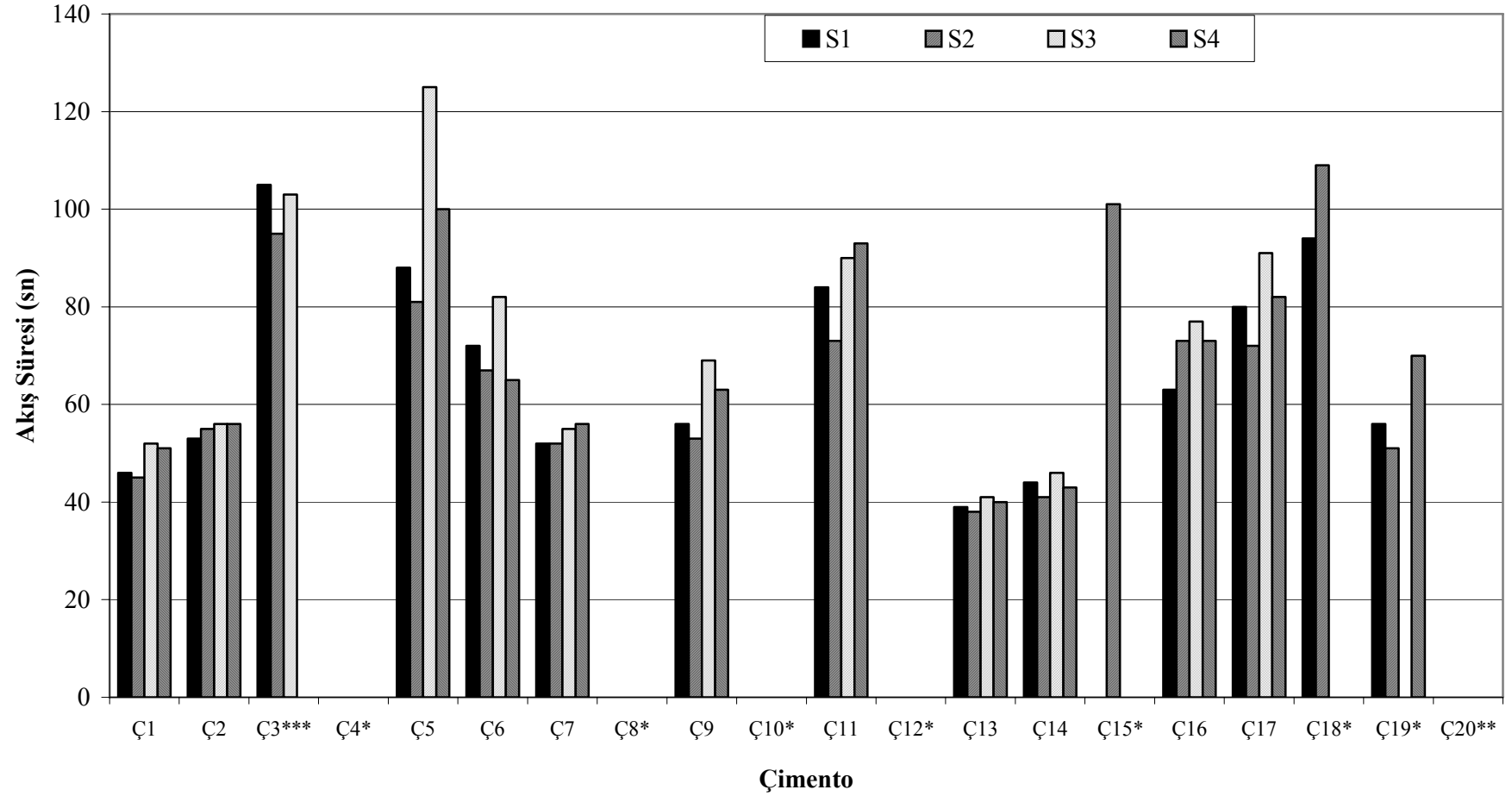
Şekil 7.79 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{esd}$  ilişkisi (Grup I-S4)



Şekil 7.80 Akış süresi- $C_3A/Na_2O_{esd}$  ilişkisi (Grup II-S4)

### 7.3 Kullanılan Katkının Başlangıç Akışkanlığına Etkisi

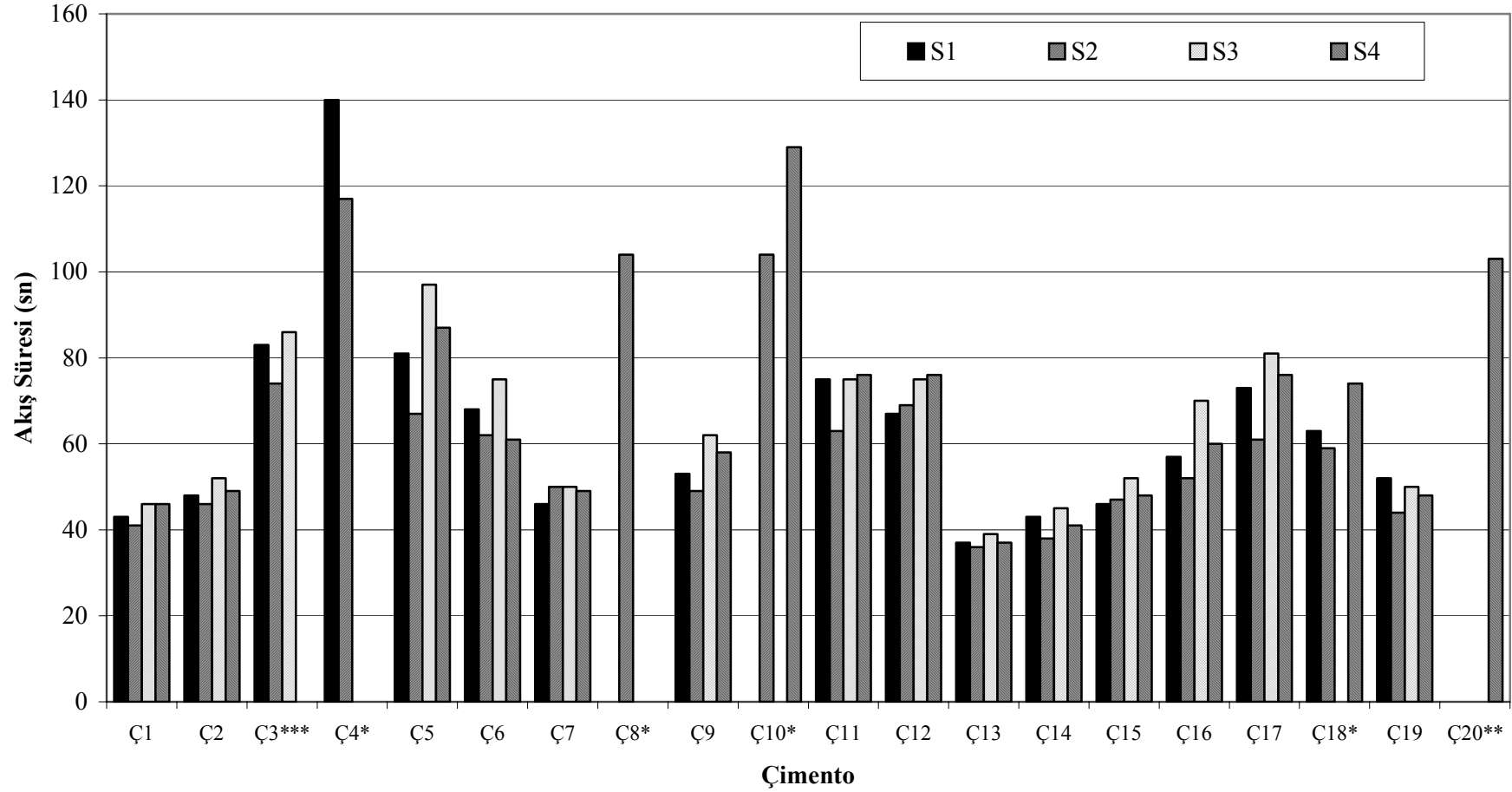
Çalışma kapsamında kullanılan tüm kimyasal katkılar naftalin esaslı olmasına rağmen, farklı firmalar tarafından üretildiğinden, ortalama moleküler ağırlığı, counter-ion kökeni, sülfonasyon derecesi gibi özellikleri birbirinden önemli farklılıklar gösterebilir. Bu özellikler önceki bölümlerde anlatıldığı gibi katkının performansını etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, kullanılan katkıların yalnız ortalama moleküler ağırlığı belirlenebilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 7.81-7.83'de görüldüğü gibi, başlangıç akışkanlığının katkı özelliklerinden hemen hemen bağımsız olduğu ve başlangıç akışkanlığını etkileyen baskın faktörün çimento kompozisyonu olduğu görülmüştür. Şekil 7.81, 7.82 ve 7.83, sırasıyla %0.4, %0.6 ve %0.8 katkı dozajlarında başlangıç akışkanlığının çimento tipine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Her üç şekilde de görüldüğü gibi, sabit katkı dozajında ve sabit bir çimento dikkate alındığında, akış süreleri, katkıya bağlı olarak çok dar bir aralıkta değişmekte, buna karşın aynı dozajda farklı çimentolar göz önüne alındığında, akış süreleri göreceli olarak birbirinden oldukça farklılık göstermektedir. Örneğin %0.6 katkı dozajında Ç12 ve Ç13 çimentolarına bireysel olarak bakıldığında, akış süreleri katkı tipine bağlı olarak çok dar bir aralıkta değişmesine karşın (Ç12 için 67-76 sn, Ç13 için 36-39 sn), görüldüğü üzere bu iki çimento birbirine göre değerlendirildiğinde akış sürelerinde çok net bir fark vardır. Bu durum diğer katkı dozajlarında da rahatlıkla görülebilir. Ç12 ve Ç13 için geçerli olan bu durum, diğer çimentolar dikkate alındığında da geçerli olmaktadır. Her üç katkı dozajında da, her bir çimento kendi içinde farklı katkı ile çok yakın akış süreleri verirken, akış sürelerinin çimento tipine göre net farklılıklar göstermesi, başlangıç akışkanlığının büyük ölçüde çimento özelliklerine bağlı olduğunu, dolayısıyla katkı özelliklerinden hemen hemen bağımsız olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.81 %0,4 katkı dozajında, kullanılan çimento ve süperakışkanlaştırıcıya bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi

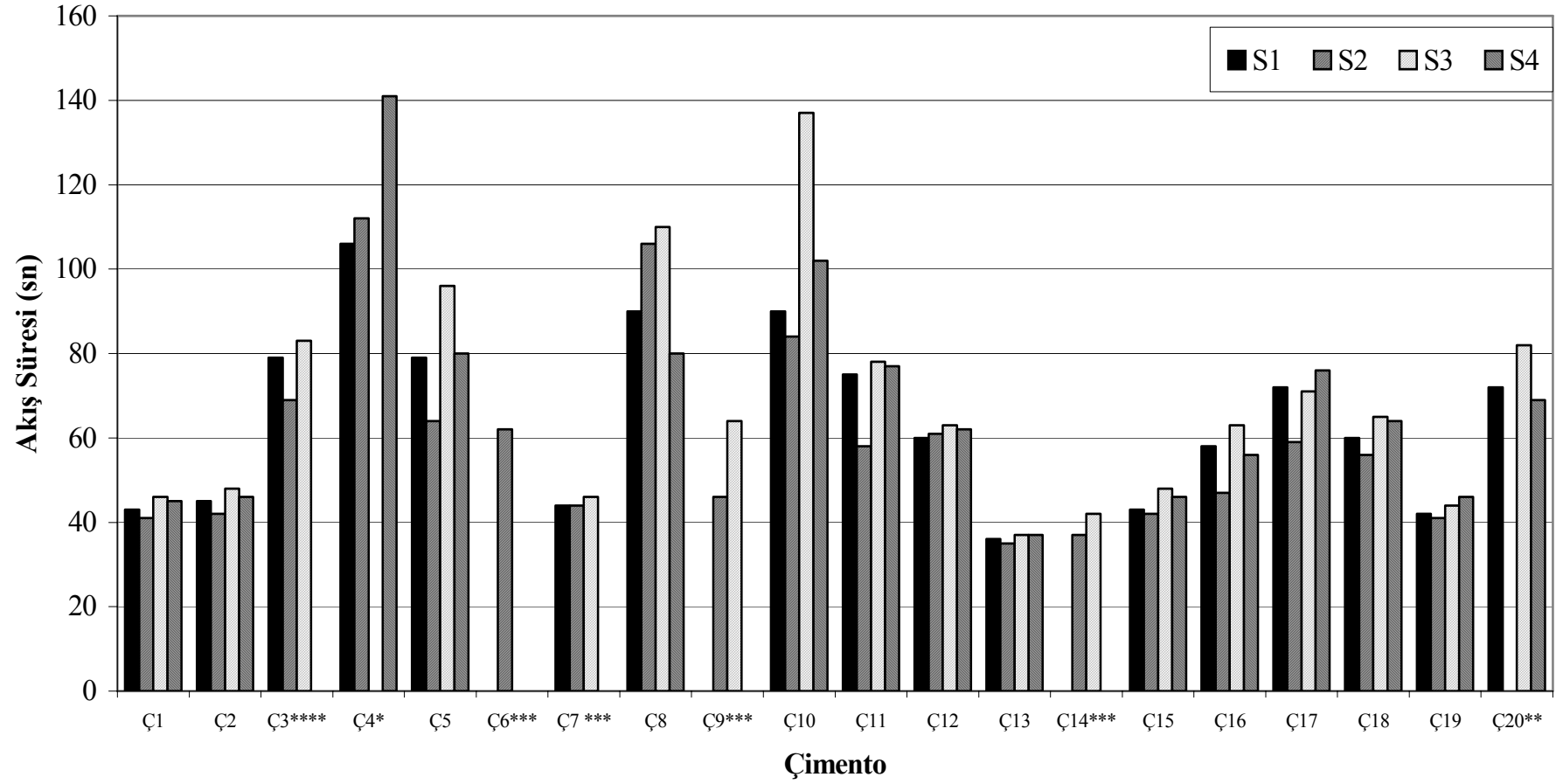
\*Huninin tıkanmasından dolayı ilgili katkılarda akış görülmedi. \*\* S2 katkısı için deney yapılmadı, ilgili katkılarda akış görülmedi. \*\*\*S4 katkısı için deney yapılmadı.





Şekil 7.82 %0,6 katkı dozajında, kullanılan çimento ve süperakışkanlaştırıcıya bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi

\*Huninin tıkanmasından dolayı ilgili katkılarda akış görülmedi. \*\* S2 katkısı için deney yapılmadı, ilgili katkılarda akış görülmedi. \*\*\*S4 katkısı için deney yapılmadı.



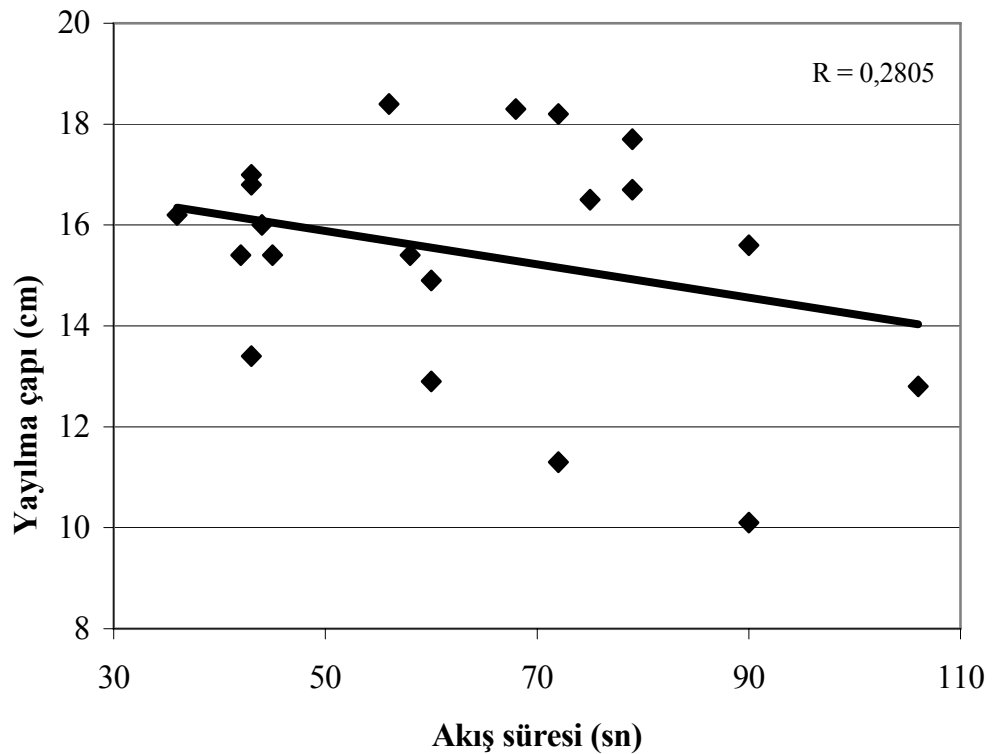
Şekil 7.83 %0,8 katkı dozajında kullanılan çimento ve süperakışkanlaştırıcıya bağlı olarak başlangıç akış sürelerinin değişimi

\*Hununin tıkanmasından dolayı ilgili katkılarda akış görülmedi. \*\* S2 katkısı için deney yapılmadı. \*\*\*İlgili katkıların daha düşük dozajlarında doygunluk noktası elde edildiğinden dolayı %0,8 dozajında deney yapılmadı. \*\*\*\* S4 katkısı için deney yapılmadı

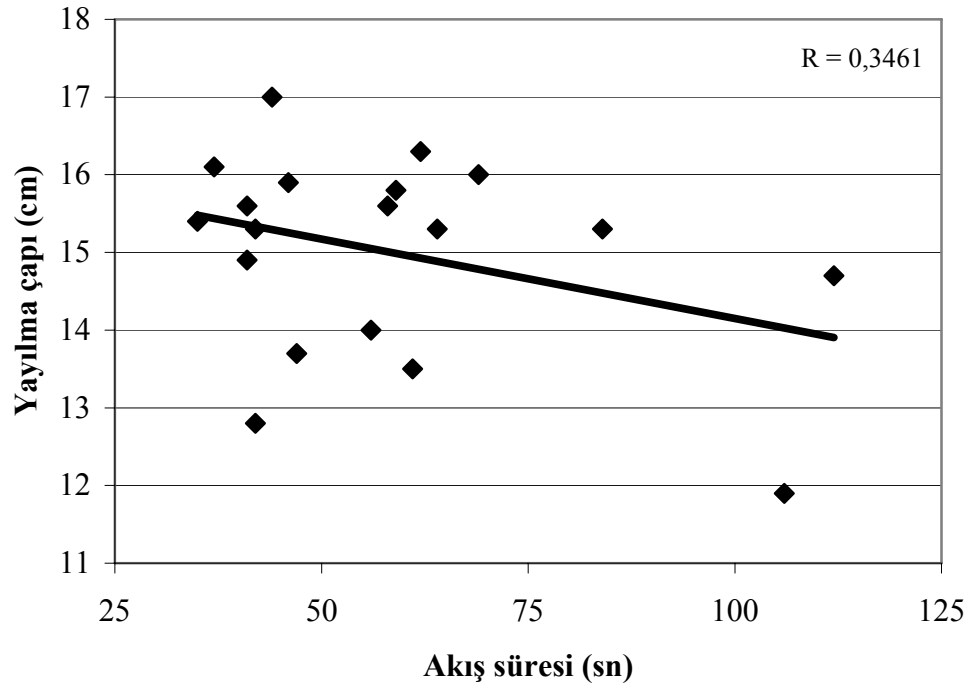
#### 7.4 Başlangıç Akışkanlığı Açısından Marsh Hunisi Verilerinin Mini Çökme Verileriyle Uyumu

5. bölümde açıklandığı gibi, Marsh hunisi deneyi, karışımın viskozitesi hakkında fikir vermektedir. Mini çökme deneyi ise karışımın eşik kayma gerilmesi hakkında fikir veren bir deneydir.

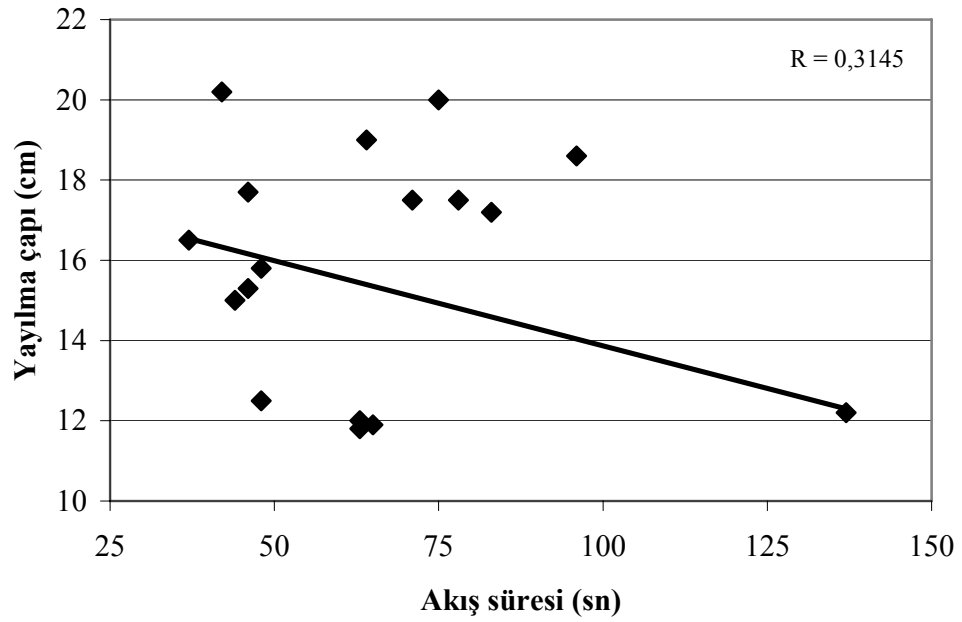
Şekil 7.84-7.87, S1, S2, S3 ve S4 katkılarıyla %0.8 katkı dozajında hazırlanan çimento hamurlarında, Marsh hunisi başlangıç akış sürelerinin mini çökme deneyi başlangıç yayılma çapları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Beklendiği gibi, tüm katkılarda akış süresinin artması, yayılma değerinin azalması ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, bu iki deney yöntemi yukarıda da belirtildiği gibi farklı işlenebilirlik parametrelerini ölçtüğü için veriler arasındaki korelasyon düşük mertebededir.



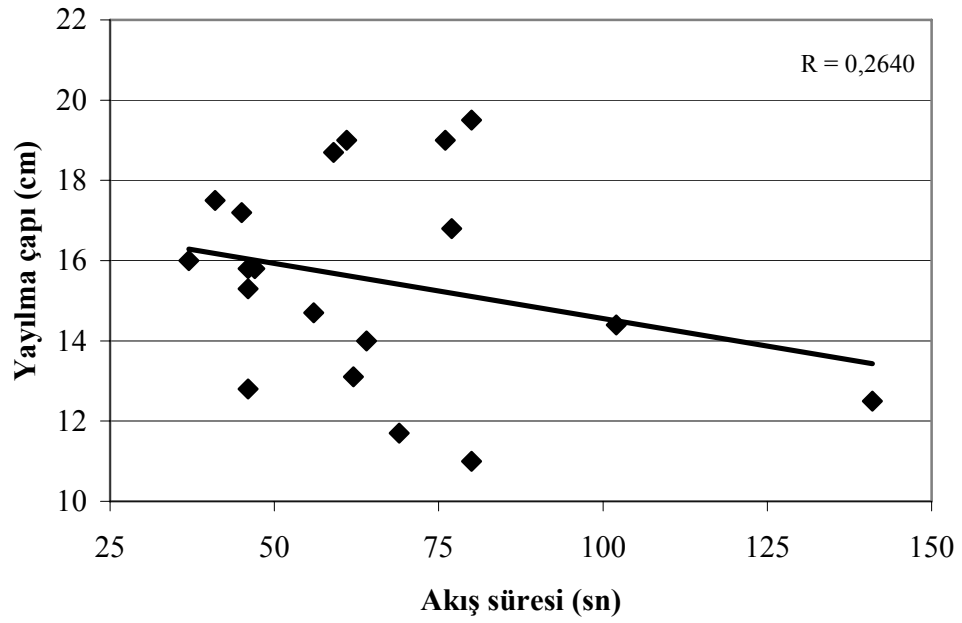
Şekil 7.84 S1 katkısı için başlangıç yayılma çapı-başlangıç akış süresi ilişkisi



Şekil 7.85 S2 katkısı için başlangıç yayılma çapı-başlangıç akış süresi ilişkisi



Şekil 7.86 S3 katkısı için başlangıç yayılma çapı-başlangıç akış süresi ilişkisi



Şekil 7.87 S4 katkısı için başlangıç yayılma çapı-başlangıç akış süresi ilişkisi

### 7.5 Çimento Kompozisyonunun Kıvam Kayıpları Üzerindeki Etkisi

Bölüm 7.2’de, başlangıç akışkanlığı, inceliğin etkisi dikkate alınarak oluşturulmuş olan gruplar üzerinde yapılan regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Ancak kıvam kayıpları üzerindeki etki bu şekilde incelenmemiştir. Söz konusu gruplara bakıldığında çimentoların incelikleri belirli bir aralıkta olmasına rağmen, bu aralıktaki çimentoların (Ç1, Ç3, Ç5, Ç11, Ç13, Ç17, Ç18-Grup I) %0,8 dozajındaki başlangıç akışkanlıkları birbirinden farklıdır (Tablo 7.2). Genel kanı olarak kıvam kaybını etkileyen faktörlerden birisinin de başlangıç akışkanlık değeri olduğu bilinmektedir (bkz. Bölüm 3.2.5). Dolayısıyla, belli incelik aralıklarında olmalarına rağmen, bu çimentolarla kıvam kaybı açısından bir grup değerlendirilmesi yapılması hatalı olacaktır. Grup I için söz konusu olan durum Grup II (Ç2, Ç6, Ç7, Ç12, Ç15, Ç16, Ç19, Ç20) için de geçerlidir (Tablo 7.2).

Tablo 7.2 Katkı tipine ve kullanılan çimentoya bağlı olarak doygunluk noktalarının ve %0.8 katkı dozajında akış sürelerinin değişimi

Çimento	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	S1				S2				S3				S4			
		Doygunluk noktası (katı madde dozajı- % çimento ağırlığı)		%0.8 katkı dozajında akış süresi (sn)		Doygunluk noktası (katı madde dozajı- % çimento ağırlığı)		%0.8 katkı dozajında akış süresi (sn)		Doygunluk noktası (katı madde dozajı- % çimento ağırlığı)		%0.8 katkı dozajında akış süresi (sn)		Doygunluk noktası (katı madde dozajı- % çimento ağırlığı)		%0.8 katkı dozajında akış süresi (sn)	
		5. dak.	60. dak.	5. dak.	60. dak.	5. dak.	60. dak.	5. dak.	60. dak.	5. dak.	60. dak.	5. dak.	60. dak.	5. dak.	60. dak.	5. dak.	60. dak.
Ç1	3500	0.4	0.5-0.6	43	67	0.4	0.6	41	60	0.4	0.8	46	84	0.4	0.6-0.7	45	77
Ç2	3680	0.4	0.7	45	81	0.6	0.8	42	62	0.4	0.9-1.0	48	168	0.4	0.7	46	83
Ç3	3230	0.6	0.6	79	95	0.6	0.6-0.8	69	88	0.6	0.6	83	126	**	**	**	**
Ç4	2820	0.7	>1.0	106	200	>1.2	0.8	112	163	1.0	>1.2	akmadı	akmadı	>1.0	>1.0	141	akmadı
Ç5	3280	0.4	0.6-0.7	79	133	0.6	0.7	64	101	0.6	0.8-0.9	96	163	0.6	0.7	80	142
Ç6	3550	0.4	0.5-0.6	68*	92*	0.4	0.5	62	81	0.4	0.6	75*	107*	0.4	0.4-0.5	61*	86*
Ç7	3560	0.4	0.6	44	60	0.4	0.5-0.6	44	59	0.4	0.8	46	84	0.4	0.6	47*	70*
Ç8	3860	1.0	1.1	90	akmadı	1.0	>1.2	106	akmadı	1.0	1.0	110	akmadı	0.8	1.0	80	akmadı
Ç9	3950	0.4	0.5	56*	74*	0.4	0.6	46	69	0.4	0.6	64	90	0.4	0.5	59*	85*
Ç10	4380	0.8	0.9-1.0	90	138	1.0	1.0	84	136	>1.2	>1.2	137	200	0.9	0.9	102	176
Ç11	3350	0.4	0.6-0.7	75	115	0.5-0.6	0.6	58	85	0.6	0.7-0.8	78	123	0.6	0.6	77	124
Ç12	3540	0.6	0.8-0.9	60	126	0.6-0.7	0.8	61	88	0.8	>1.2	63	akmadı	0.8	0.8	62	127
Ç13	3470	0.4	0.7	36	60	0.4	0.6	35	49	0.4	>1.1	37	akmadı	0.4	0.9	37	84
Ç14	3050	0.2	0.5	43*	65*	0.4	0.5	37	48	0.2	0.6-0.7	42	79	0.2	0.5	41*	61*
Ç15	3630	0.5	0.6	43	52	0.6	0.6	42	50	0.5	0.7-0.8	48	80	0.5	0.7	46	58
Ç16	3540	0.4	0.8	58	134	0.6	0.6	47	72	0.9	0.9	63	200	0.6	0.8-0.9	56	136
Ç17	3230	0.4	0.6	72	120	0.4-0.5	0.6	59	90	0.7	0.8-0.9	71	115	0.4	0.6	76	126
Ç18	3330	0.6	0.6	60	72	0.6	0.7-0.8	56	66	0.8	0.8	65	87	0.7	0.7	64	78
Ç19	3780	0.4	0.8	42	72	0.4	0.7-0.8	41	51	0.6	1.1-1.2	44	akmadı	0.6	0.6-0.7	46	78
Ç20	3790	0.8	0.9	72	118	**	**	**	**	>1.2	1.0-1.2	82	akmadı	0.7-0.8	0.8	69	90

\* İlgili katkıların daha düşük dozajlarında doygunluk noktası elde edildiğinden dolayı %0,8 dozajında deney yapılmadı (Akış süresinin sabit hale geldiği bir önceki dozaja ait değerler alındı)

\*\*Deney yapılmadı

Marsh hunisi akış sürelerinin değişimi S1, S2, S3 ve S4 katkıları için sırası ile EK A, EK B, EK C ve EK D’de verilmiştir. Marsh hunisi deneyinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile her katkı için 5. ve 60. dakikalardaki doygunluk noktaları belirlenmiştir. Doygunluk noktaları ve seçilen bir katkı dozajı (%0.8) için 5. ve 60. dakikadaki akış süreleri Tablo 7.2’de verilmiştir. Kıvam kayıpları açısından çimentoların nasıl davranış gösterdiği bu tablodan görülebilmektedir.

Etkinin belirlenebilmesi amacıyla, doygunluk noktası ve sabit katkı dozajındaki (%0.8) Marsh hunisi akış değerleri kullanılarak, yaklaşık olarak aynı inceliğe sahip çimentolarla, Tablo 7.3, Tablo 7.4, Tablo 7.5, Tablo 7.6 ve Tablo 7.7’de verilen gruplar oluşturulmuştur.

Tablo 7.3’de verilen çimentolardan Ç1 ve Ç13 çimentoları kıvam kaybı açısından göreceli olarak iyi davranış sergilerken, Ç12 ve Ç16 çimentoları kötü davranış göstermiştir. Bu nedenle, çimento-katkı uyumu açısından olumlu ya da olumsuz etkisi olduğu düşünülen bileşenlerin aşağıda verilen üç koşulu sağlaması gerekmektedir:

- miktarları Ç1 ve Ç13 çimentolarında birbirine yakın olmalı,
- miktarları Ç12 ve Ç16 çimentolarında birbirine yakın olmalı,
- Ç1 ve Ç13 çimentolarındaki ilgili bileşen miktarları Ç12 ve Ç16 çimentolarındaki bileşen miktarlarından farklı olmalıdır.

Tablo 7.3’de verilen bileşenler incelendiğinde bu üç koşulun  $C_3A(\%)$ ,  $C_3A/SO_3$  ve  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  için tam olarak,  $C_4AF(\%)$  ve  $C_3S/C_3A$  için ise kısmen sağlandığı görülmektedir. Buna göre,  $C_3A$  içeriği,  $C_3A/SO_3$  oranı ve  $C_3A/Na_2O_{eşd}$  yüksek,  $C_4AF$  içeriği ve  $C_3S/C_3A$  oranı düşük olan çimentoların kıvam kaybının diğer çimentolara kıyasla daha az olduğu anlaşılmaktadır. Perenchio ve diğer. (1979) tarafından  $C_3A$  içeriği yüksek çimentoların daha fazla akışkanlık kaybettiği belirtilmiştir. Ancak, bu çalışmada  $C_3A$  içeriği yüksek çimentoların daha az akışkanlık kaybettiği görülmüştür. Bu nedenle, çökme kaybının, tek başına  $C_3A$  içeriğinden etkilenmediği söylenebilir.

Tablo 7.3 Ç1, Ç13, Ç12 ve Ç16 çimentolarının kıvam kaybı açısından değerlendirilmesi

Bileşen	Ç1	Ç13	Ç12	Ç16	İlişki
Blaine İnceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3500	3470	3540	3540	--
Davranış	İyi	İyi	Kötü	Kötü	--
SO <sub>3</sub> (%)	2,41	1,74	2,40	1,80	-
CaO (%)	62,78	63,47	61,69	64,57	-
S. CaO (%)	0,97	0,91	0,91	1,36	-
Kızdırma Kaybı (%)	3,72	2,23	1,44	2,15	-
C <sub>3</sub> S (%)	56,46	60,6	50,94	65,47	-
C <sub>2</sub> S (%)	13,24	11,09	18,79	9,39	-
C <sub>3</sub> A (%)	10,74	8,19	6,24	3,77	+
C <sub>4</sub> AF (%)	6,95	10,10	11,77	11,36	±
Katkı (%)	7,01	3,86	1,41	3,25	-
Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub> (%)	0,86	0,69	1,32	0,56	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,01	0,05	0,04	0,007	-
Çözünebilen Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub> (%)	0,33	0,55	0,58	0,15	-
C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S	4,26	5,46	2,71	6,97	-
C <sub>3</sub> S/C <sub>3</sub> A	5,26	7,40	8,16	17,37	±
C <sub>3</sub> S/SO <sub>3</sub>	23,43	34,83	21,23	36,37	-
C <sub>3</sub> S/Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub>	65,65	87,83	38,59	116,91	-
C <sub>3</sub> S/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub>	171,07	110,64	87,58	431,86	-
C <sub>3</sub> A/SO <sub>3</sub>	4,46	4,71	2,60	2,09	+
C <sub>3</sub> A/Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub>	12,49	11,87	4,73	6,73	+
C <sub>3</sub> A/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub>	32,54	14,95	10,73	24,87	-
CaO/SO <sub>3</sub>	26,05	36,48	25,70	35,87	-
CaO/Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub>	73,00	91,99	46,73	115,30	-
SO <sub>3</sub> /S. CaO	2,48	1,91	2,64	1,32	-
SO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	2,80	2,52	1,82	3,21	-
SO <sub>3</sub> / Çözünebilen Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub>	7,30	3,18	4,13	11,87	-
S. CaO/Na <sub>2</sub> O <sub>eşdeğeri</sub>	1,13	1,32	0,69	2,43	-
C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF (%)	17,69	18,29	18,01	15,13	-
C <sub>3</sub> S / (C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	3,19	3,31	2,83	4,33	-
(C <sub>3</sub> S+C <sub>2</sub> S)/(C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	3,94	3,92	3,87	4,95	-



Tablo 7.4’de verilen çimentolardan Ç9 çimentosu kıvam kaybı açısından iyi davranış sergilerken Ç8 çimentosu kötü davranış göstermiştir. Tablo 7.3’de bulunan ilişkiler Tablo 7.4’deki Ç8 ve Ç9 çimentoları için kontrol edildiğinde,  $C_3A/SO_3$  oranı Ç8 çimentosuna kıyasla daha düşük olan Ç9 çimentosunun daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Bu durum, daha önce bulunan ilişki ile tamamıyla terstir. Ayrıca, Ç8 ve Ç9 çimentolarının  $C_3A$  içeriği,  $C_4AF$  içeriği ve  $C_3S/C_3A$  oranı birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle, kıvam kaybını etkileyen baskın ögenin bu bileşenler olduğu düşünülmemektedir. Bununla birlikte, Tablo 7.3’deki verilerin değerlendirilmesi sonucunda bulunan ilişkilerden sadece  $C_3A/Na_2O$  eşdeğeri için bulunan ilişki, Ç8 ve Ç9 çimentoları için de geçerliliğini korumuştur. Bunun dışında, Jiang ve diğer. (1999)’nin, akışkanlık kaybını azaltma bakımından optimum çözünebilen alkali eşdeğeri içeriğinin süperakışkanlaştırıcı dozajından ve çimento tipinden bağımsız olarak, %0.4-%0.5 olduğunu söylemesine rağmen, Tablo 7.4’den görüleceği üzere Ç8 çimentosunun çözünebilen  $Na_2O_{eşdeğeri}$  %0.43 olduğu halde, daha fazla akışkanlık kaybı göstermiştir.

Tablo 7.5’de, benzer davranışlar gösteren Ç5 ve Ç11 çimentoları için de yukarıda söz edilen durum geçerliliğini korumuştur. Kıvam kaybı açısından birbirine yakın davranış sergileyen bu iki çimento için  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  oranları birbirine oldukça yakındır. Benzer davranışlar sergileyen bir diğer çimento grubu Tablo 7.6’da bileşen miktarları verilen Ç2, Ç7, Ç15 ve Ç19 çimentolarından oluşan gruptur. Bu çimentolar için de  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  oranları birbirine oldukça yakın olup 8,51 ile 9,82 aralığında değişmektedir.

Tablo 7.7’de  $C_3S$  oranı diğer çimentolara kıyasla yüksek,  $C_2S$  oranı ise oldukça düşük olan Ç14 çimentosunun, Ç4 çimentosu ile kıyaslaması verilmiştir. Bu iki çimentonun  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  birbirine oldukça yakın olmasına rağmen kıvam kaybı açısından davranışları oldukça farklıdır. Bu durumun Ç14 çimentosunun diğer çimentolardan çok farklı bir kimyasal kompozisyona sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre kıvam kaybı açısından baskın ögenin  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  oranı olduğu görülmüştür. Bu oranının göreceli olarak yüksek değerler almasıyla kıvam kayıplarının azaldığı görülmüştür.

Tablo 7.4 Ç8 ve Ç9 çimentolarının kıvam kaybı açısından değerlendirilmesi

Bileşen	Ç9	Ç8	İlişki
Blaine İnceliği ( $cm^2/g$ )	3950	3860	--
Davranış	iyi	kötü	--
SO <sub>3</sub> (%)	3,14	1,92	
CaO (%)	60,81	62,83	
S. CaO (%)	1,65	2,19	
Kızdırma Kaybı (%)	3,15	2,85	
C <sub>3</sub> S (%)	46,03	55,33	
C <sub>2</sub> S (%)	20,35	13,34	
C <sub>3</sub> A (%)	9,04	8,96	-
C <sub>4</sub> AF (%)	9,03	9,22	-
Katkı (%)	3,68	4,68	
Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,89	1,07	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,03	0,007	
Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,70	0,43	
C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S	2,26	4,15	
C <sub>3</sub> S/C <sub>3</sub> A	5,09	6,18	-
C <sub>3</sub> S/SO <sub>3</sub>	14,66	28,82	
C <sub>3</sub> S/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	51,72	51,71	
C <sub>3</sub> S/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	65,43	128,97	
C <sub>3</sub> A/SO <sub>3</sub>	2,88	4,67	-
C <sub>3</sub> A/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	10,16	8,37	+
C <sub>3</sub> A/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	12,85	20,89	
CaO/SO <sub>3</sub>	19,37	32,72	
CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	68,33	58,72	
SO <sub>3</sub> /S. CaO	1,90	0,88	
SO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	3,53	1,79	
SO <sub>3</sub> / Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	4,46	4,48	
S. CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	1,85	2,05	
C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF	18,07	18,18	
C <sub>3</sub> S /(C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	2,55	3,04	
(C <sub>3</sub> S+C <sub>2</sub> S)/(C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	3,67	3,78	

Tablo 7.5 Ç5 ve Ç11 çimentolarının kıvam kaybı açısından değerlendirilmesi

Bileşen	Ç5	Ç11	İlişki
Blaine İnceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3280	3350	--
Davranış	Benzer	Benzer	--
SO <sub>3</sub> (%)	2,19	2,18	
CaO (%)	62,45	62,70	
S. CaO (%)	1,75	1,16	
Kızdırma Kaybı (%)	3,72	4,74	
C <sub>3</sub> S (%)	62,01	67,38	
C <sub>2</sub> S (%)	8,01	2,29	
C <sub>3</sub> A (%)	5,36	5,07	
C <sub>4</sub> AF (%)	10,63	12,38	
Katkı (%)	6,51	9,08	
Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,83	0,76	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,02	0,04	
Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,41	0,46	
C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S	7,74	29,42	
C <sub>3</sub> S/C <sub>3</sub> A	11,57	13,29	
C <sub>3</sub> S/SO <sub>3</sub>	28,32	30,91	
C <sub>3</sub> S/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	74,71	88,66	
C <sub>3</sub> S/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	150,55	146,88	
C <sub>3</sub> A/SO <sub>3</sub>	2,45	2,33	
C <sub>3</sub> A/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	6,46	6,67	+
C <sub>3</sub> A/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	13,01	11,05	
CaO/SO <sub>3</sub>	28,52	28,76	
CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	75,24	82,50	
SO <sub>3</sub> /S. CaO	1,25	1,88	
SO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	2,64	2,87	
SO <sub>3</sub> / Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	5,32	4,75	
S. CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	2,11	1,53	
C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF	15,99	17,45	
C <sub>3</sub> S /(C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	3,88	3,86	
(C <sub>3</sub> S+C <sub>2</sub> S)/(C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	4,38	3,99	

Tablo 7.6 Ç2, Ç7, Ç15 ve Ç19 çimentolarının kıvam kaybı açısından değerlendirilmesi

Bileşen	Ç2	Ç7	Ç15	Ç19	İlişki
Blaine İnceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3680	3560	3630	3780	--
Davranış	Benzer	Benzer	Benzer	Benzer	--
SO <sub>3</sub> (%)	2,81	2,61	2,17	2,67	
CaO (%)	63,26	63,63	63,63	62,67	
S. CaO (%)	0,97	0,96	1,90	1,09	
Kızdırma Kaybı (%)	2,71	2,25	3,62	2,54	
C <sub>3</sub> S (%)	63,50	60,79	61,32	58,35	
C <sub>2</sub> S (%)	6,15	11,15	9,57	11,04	
C <sub>3</sub> A (%)	7,06	7,27	6,63	7,57	
C <sub>4</sub> AF (%)	11,10	9,23	10,09	10,41	
Katkı (%)	4,70	3,25	6,86	4,00	
Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,83	0,74	0,73	0,85	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,01	0,007	0,03	0,01	
Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,51	0,51	0,38	0,65	
C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S	10,33	5,45	6,41	5,29	
C <sub>3</sub> S/C <sub>3</sub> A	8,99	8,36	9,25	7,71	
C <sub>3</sub> S/SO <sub>3</sub>	22,60	23,29	28,26	21,85	
C <sub>3</sub> S/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	76,51	82,15	84,00	68,65	
C <sub>3</sub> S/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	124,05	118,75	160,02	89,72	
C <sub>3</sub> A/SO <sub>3</sub>	2,51	2,79	3,06	2,84	
C <sub>3</sub> A/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	8,51	9,82	9,08	8,91	+
C <sub>3</sub> A/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	13,79	14,20	17,30	11,64	
CaO/SO <sub>3</sub>	22,51	24,38	29,32	23,47	
CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	76,22	85,99	87,16	73,73	
SO <sub>3</sub> /S. CaO	2,90	2,72	1,14	2,45	
SO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	3,39	3,53	2,97	3,14	
SO <sub>3</sub> /Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	5,49	5,10	5,66	4,11	
S. CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	1,17	1,30	2,60	1,28	
C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF	18,16	16,50	16,72	17,98	
C <sub>3</sub> S/(C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	3,50	3,68	3,67	3,25	
(C <sub>3</sub> S+C <sub>2</sub> S)/(C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	3,84	4,36	4,24	3,86	

Tablo 7.7 Ç4 ve Ç14 çimentolarının kıvam kaybı açısından değerlendirilmesi

Bileşen	Ç4	Ç14	İlişki
Blaine İnceliği ( $cm^2/g$ )	2820	3050	--
Davranış	Kötü	İyi	--
SO <sub>3</sub> (%)	2,05	2,38	
CaO (%)	62,85	64,01	
S. CaO (%)	2,27	1,16	
Kızdırma Kaybı (%)	2,56	2,73	
C <sub>3</sub> S (%)	59,50	71,42	
C <sub>2</sub> S (%)	9,73	1,14	
C <sub>3</sub> A (%)	7,41	5,27	
C <sub>4</sub> AF (%)	9,43	9,81	
Katkı (%)	3,18	4,93	
Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,94	0,69	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,02	0,04	
Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri (%)	0,19	0,49	
C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S	6,12	62,65	
C <sub>3</sub> S/C <sub>3</sub> A	8,03	13,55	
C <sub>3</sub> S/SO <sub>3</sub>	29,02	30,01	
C <sub>3</sub> S/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	63,30	103,51	
C <sub>3</sub> S/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	305,91	146,13	
C <sub>3</sub> A/SO <sub>3</sub>	3,61	2,21	
C <sub>3</sub> A/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	7,88	7,64	-
C <sub>3</sub> A/Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	38,10	10,78	
CaO/SO <sub>3</sub>	30,66	26,89	
CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	66,86	92,77	
SO <sub>3</sub> /S. CaO	0,90	2,05	
SO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	2,18	3,45	
SO <sub>3</sub> / Çözünebilen Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	10,54	4,87	
S. CaO/Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	2,41	1,68	
C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF	16,84	15,08	
C <sub>3</sub> S / (C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF)	3,53	4,74	

## 7.6 Kullanılan Katkının Kıvam Kaybına Etkisi

Kullanılan katkıya bağlı olarak hazırlanan çimento hamurlarının kıvam kaybı incelendiğinde, S3 katkısının diğer katkılardan farklı davrandığı ve bu katkı kullanılarak hazırlanan bazı çimentoların daha fazla kıvam kaybı gösterdiği görülmüştür (Bkz. EK C içerisinde Ç2, Ç7, Ç12, Ç15 ve Ç19). S3 katkısının moleküler ağırlığı diğer katkıların moleküler ağırlıklarının arasında bir değer olduğu için davranış hakkında net bir yorum yapılamamıştır. Ayrıca bu durumun, katkının moleküler ağırlığının yanında, sülfonasyon derecesi ve counter-ion kökeni gibi özellikleri ile de ilgili olabileceği düşünülmektedir.

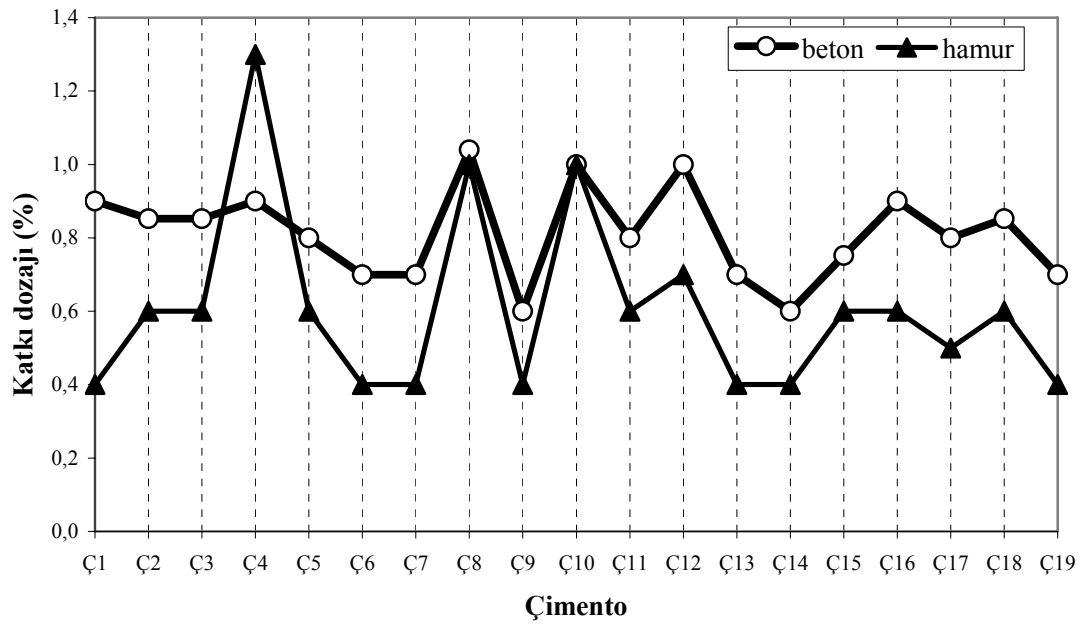
## 7.7 Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Hazırlanan beton karışımlarının 10, 30, 60 ve 90. dakikalardaki çökme deneyleri Tablo 7.8’de verilmiştir. Beton karışımları S2 katkısı ile hazırlanmış olup, çimento hamuru üzerinde deney yapılan çimentolardan Ç20 çimentosu beton deneyleri yapıldığı esnada henüz temin edilememiş olduğu için bu çimento ile deney yapılamamıştır.

Tablo 7.8 Hazırlanan beton karışımlarının çökme değerleri, kullanılan katkı miktarları, birim hacim ağırlıkları ve hava içerikleri

Kar. No	Çimento kodu	Çökme değerleri (mm)				Katkı (%)	B.H.A. (kg/m <sup>3</sup> )	Hava (%)
		10. dak.	30. dak.	60. dak.	90. dak.			
1	Ç1	190	120	100	65	0,90	2357	4,0
2	Ç2	180	165	105	70	0,85	2386	4,1
3	Ç3	185	155	90	60	0,85	2407	3,2
4	Ç4	190	75	55	25	0,90	2381	3,0
5	Ç5	190	75	50	30	0,80	2343	3,9
6	Ç6	185	160	135	75	0,70	2421	2,5
7	Ç7	195	150	110	65	0,70	2386	4,1
8	Ç8	200	165	100	75	1,05	2386	3,4
9	Ç9	185	80	30	0	0,60	2384	3,0
10	Ç10	185	85	60	40	1,00	2429	2,9
11	Ç11	180	85	55	40	0,80	2393	3,9
12	Ç12	185	155	100	60	1,00	2364	5,1
13	Ç13	180	80	60	35	0,70	2371	4,1
14	Ç14	195	155	60	45	0,60	2364	3,5
15	Ç15	185	165	155	110	0,75	2336	5,9
16	Ç16	190	75	50	30	0,90	2364	4,5
17	Ç17	190	160	70	60	0,80	2407	3,2
18	Ç18	180	150	75	60	0,85	2379	3,1
19	Ç19	180	60	50	25	0,70	2400	4,0

Katkı dozajı, beton karışımlarında  $190 \pm 10$  mm çökme elde edecek şekilde ayarlanmıştır. Kullanılan katkı dozajları, yine S2 katkısı ile hazırlanan çimento hamuru üzerinde 5. dakikada Marsh hunisi deneyiyle belirlenen doygunluk noktaları ile oldukça ilişkilidir. Şekil 7.88’de çimento hamuru üzerinde belirlenen 5. dakikadaki doygunluk noktası ve betonda  $190 \pm 10$  mm başlangıç çökme değeri elde edebilmek için gerekli katkı dozajlarının, kullanılan çimentoya bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, betonda kullanılan katkı miktarı ile çimento hamurunun doygunluk noktasının, çimentoya bağlı olarak gösterdiği eğilim hemen hemen aynıdır. Marsh hunisi deneyinde, daha düşük katkı dozajında doygunluk noktasına erişen çimentolar için, beton karışımlarında da daha düşük dozajlarda katkı kullanılarak söz konusu çökme değerine ulaşılmıştır. Grafiğe bakıldığında çimento kaynaklı uyum problemi, hem hamurda hem de betonda kendini göstermiştir. Bu grafik, hamur deneyleri ve beton deneyleri arasında başlangıç akışkanlığı açısından oldukça iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



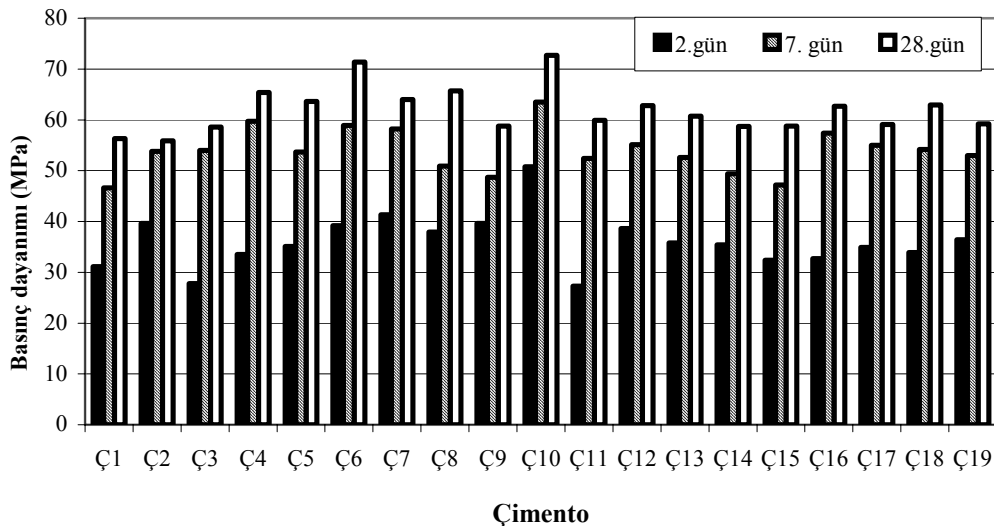
Şekil 7.88 Çimento hamuru ve betonda kullanılan katkı dozajlarının kullanılan çimentoya bağlı olarak değişimi (S2 katkısı)

Çökme kaybı açısından ise hamur ve beton örnekleri arasında çok yakın bir ilgi görülmemiştir. Tablo 7.2 (S2 katkısı) ve Tablo 7.8’e bakıldığında Ç7, Ç14, Ç15 ve Ç18 çimentolarının hem beton hem de hamur karışımlarında kıvam kaybı açısından

çok iyi davranış gösterdiği görülmektedir. Ç4, Ç5, Ç10 ve Ç16 çimentoları ise hem hamur hem de beton karışımlarında çok kötü davranış göstermiştir. Ancak hamur karışımlarında kötü davranış gösterdiği halde, betonda iyi davranan çimentolar olduğu gibi (örneğin Ç8), bunun tam tersi yönünde davranış gösteren çimentolar da bulunmaktadır (örneğin Ç19). Dolayısıyla hamur ve beton deneyleri arasında kıyam kaybı açısından net bir ilişkinin bulunması söz konusu değildir. Ancak kısmen de olsa bir ilişkinin varlığından söz edilebilir.

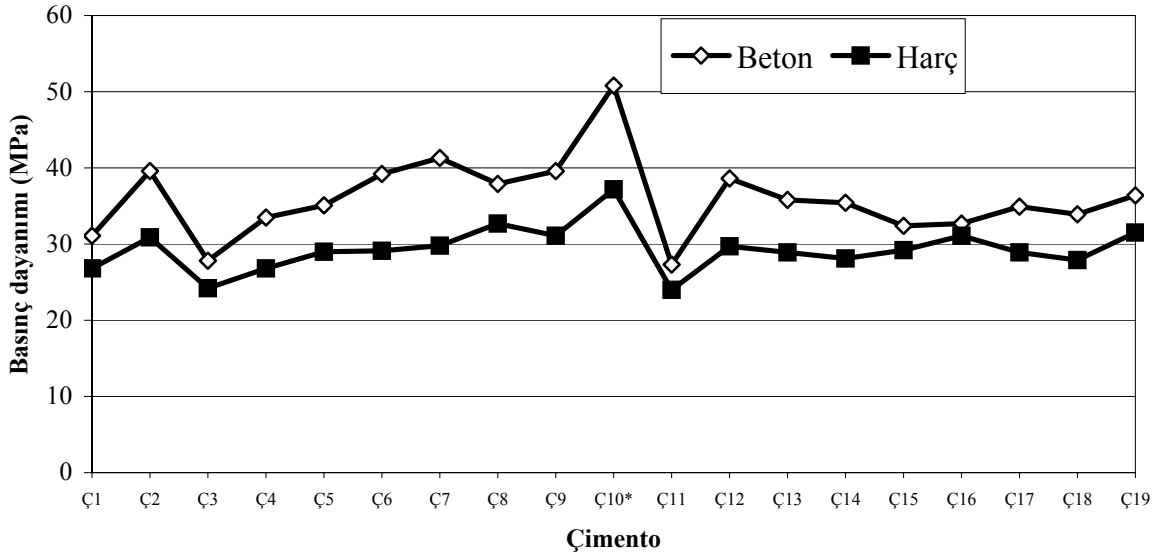
Sertleşmiş beton örnekleri üzerinde, 2, 7 ve 28. günlerde basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ortalama basınç dayanımlarının çimentoya bağlı olarak değişimi Şekil 7.89’da verilmiştir. Görüldüğü gibi, 2 günlük basınç dayanımları kullanılan çimentoya bağlı olarak oldukça değişkenlik göstermektedir. İnceliği diğer çimentolara kıyasla oldukça yüksek olan, Beyaz çimentoda (Ç10), 2. günde 50 MPa’ın üzerinde basınç dayanımı elde edilmiştir.

Beton karışımları s/ç:0,35 olacak şekilde hazırlanmıştır. Çimentonun mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla hazırlanan harç karışımları ise s/ç:0,5 olacak şekilde hazırlanmıştır. Her iki deneyde de tek değişken çimentodur. Şekil 7.90 ve 7.91’de 2 ve 28. günlerde beton ve harç karışımlarının çimentoya bağlı olarak basınç dayanımının değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi 2. günde beton ve harç örnekleri benzer eğilim gösterirken, 28. günde bu eğilim biraz farklılaşmıştır.

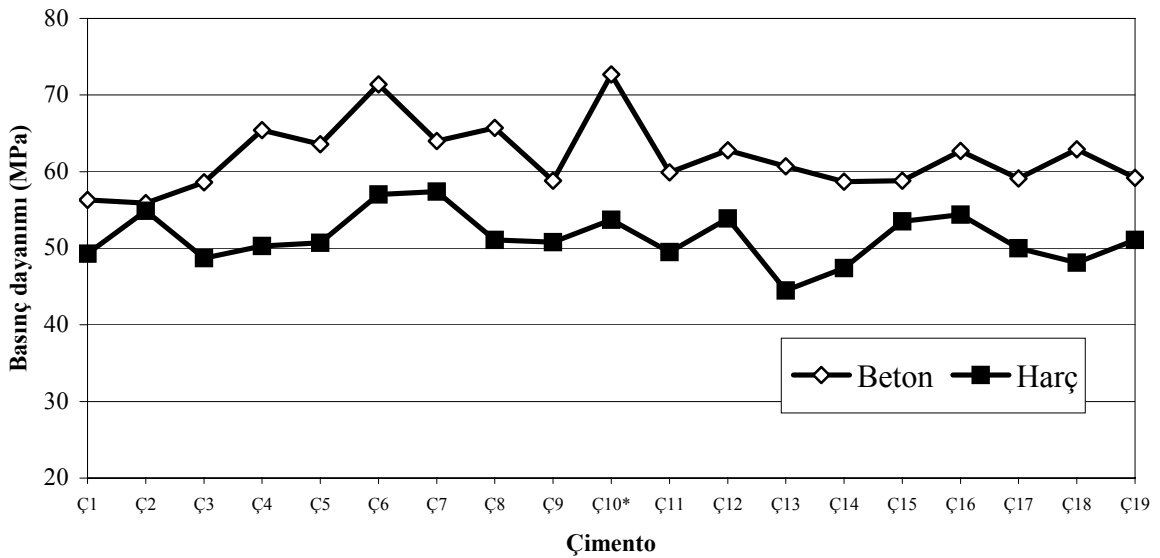


Şekil 7.89 Betonda basınç dayanımlarının kullanılan çimentoya bağlı olarak değişimi (S2 katkısı)





Şekil 7.90 2 günlük beton ve harç dayanımları arasındaki ilişki

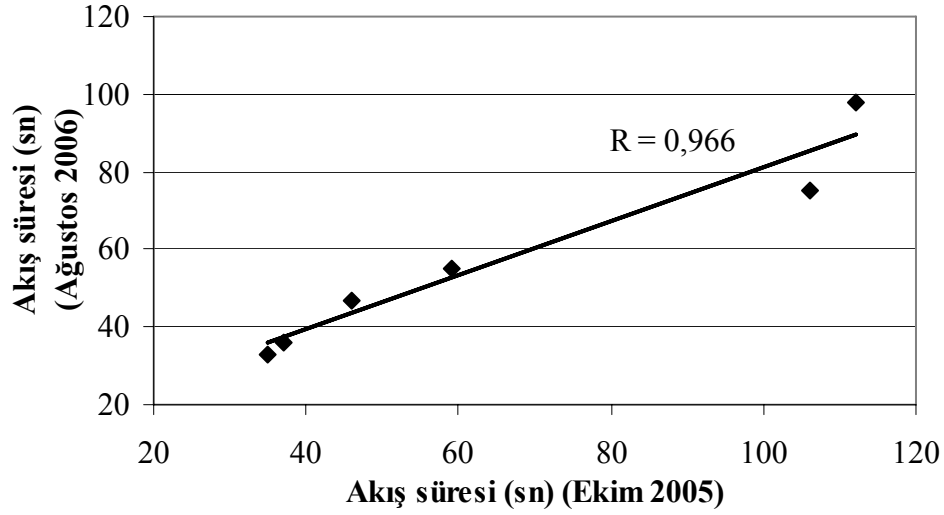


Şekil 7.91 28 günlük beton ve harç dayanımları arasındaki ilişki

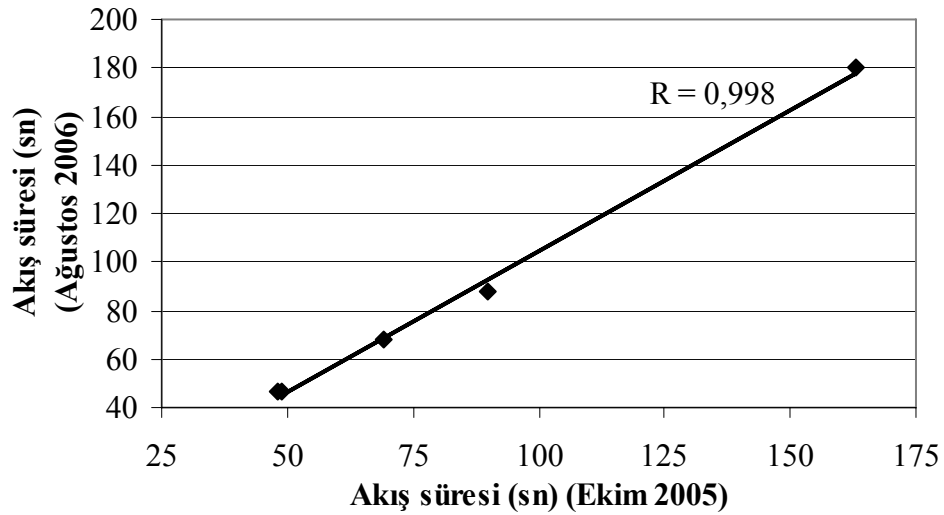
### 7.8 Marsh Hunisi ve Mini Çökme Deneyi İçin Farklı Zamanlarda Yapılan Ölçümlerin Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında uygulanan Marsh hunisi ve mini çökme deneylerinden elde edilen verilerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, seçilen bazı çimentolar üzerinde tekrar deney yapılmıştır. Tekrarlanan deneylerde kullanılan malzeme ve oranları, ve ortam koşulları önceden yapılan deneylerle tamamen aynıdır. Bu amaçla Ç4, Ç8, Ç9, Ç13, Ç14 ve Ç17 çimentoları için, S2 katkısıyla %0,8 katkı dozajında,

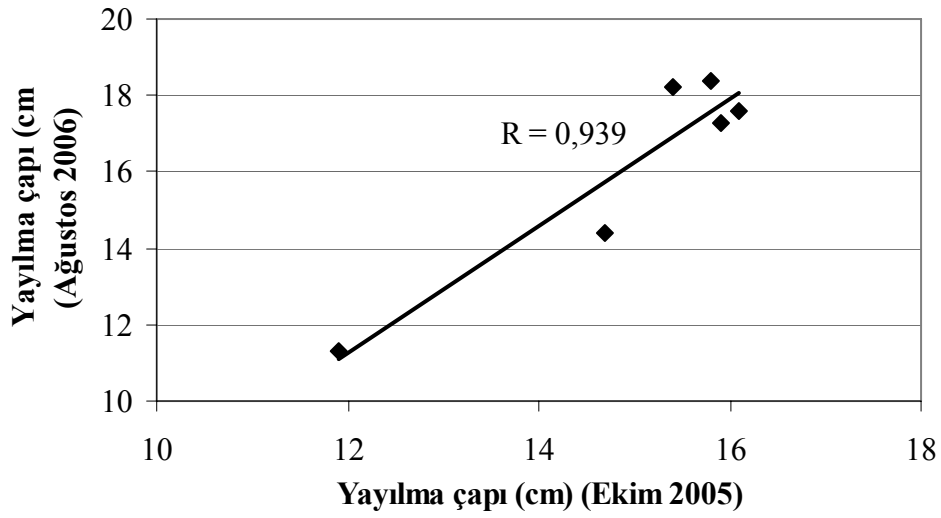
Ekim 2005 ve Ağustos 2006 tarihlerinde yapılan deneylerden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Şekil 7.92-7.96'ya bakıldığında her iki tarihte elde edilen verilerin birbiriyle çok yüksek korelasyon gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla çalışmanın tamamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçların güvenilir olduğu söylenebilir.



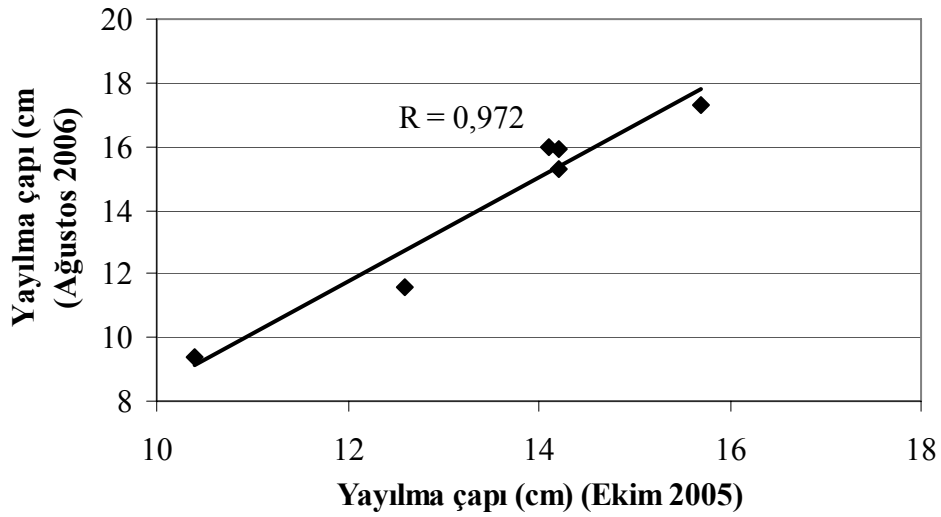
Şekil 7.92 5. dakikadaki ölçümlere ait akış süreleri arasındaki ilişki



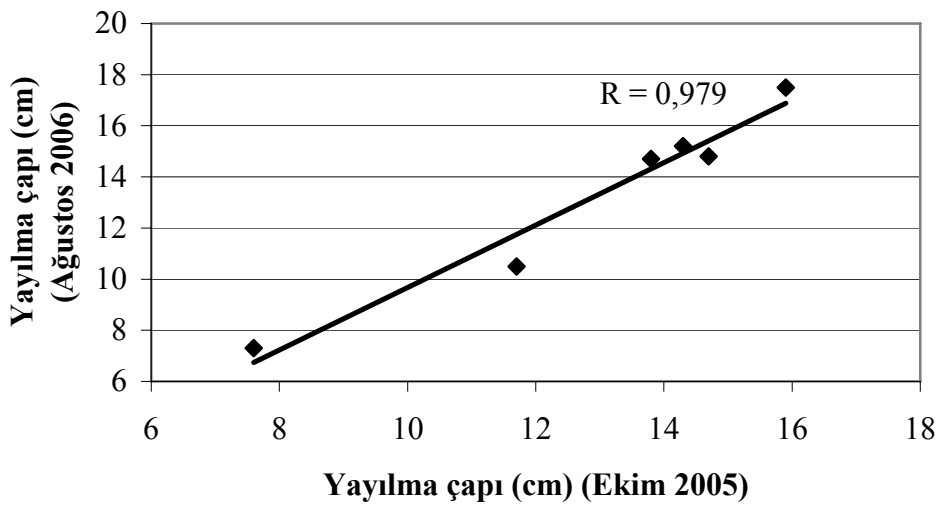
Şekil 7.93 60. dakikadaki ölçümlere ait akış süreleri arasındaki ilişki



Şekil 7.94 5. dakikadaki ölçümlere ait yayılma çapları arasındaki ilişki



Şekil 7.95 30. dakikadaki ölçümlere ait yayılma çapları arasındaki ilişki



Şekil 7.96 60. dakikadaki ölçümlere ait yayılma çapları arasındaki ilişki

## BÖLÜM SEKİZ

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, naftalin sülfonat esaslı kimyasal katkıların çimento ile uyumu incelenmiştir. Farklı firmalarca üretilmiş 4 adet naftalin sülfonat esaslı kimyasal katkı ve farklı kimyasal kompozisyona sahip 20 çimento kullanılmıştır. Kimyasal katkı-çimento uyumu, çimento hamuru üzerinde Marsh hunisi ve mini çökme deneyleri ile, beton üzerinde ise çökme deneyleri yapılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Çimento hamuru üzerinde yapılan deneyler, başlangıç akışkanlığının çimentonun  $C_4AF$  miktarı ve  $C_3A/Na_2O_{esd}$  oranı ile yüksek dereceden korelasyona sahip olduğunu göstermiştir.  $C_4AF$  oranının artışı akış sürelerinin artmasına yol açarken,  $C_3A/Na_2O_{esd}$  oranının artışı akış süresinin azalması ile sonuçlanmıştır.
- Başlangıç akışkanlığı (viskozitesi) kullanılan katkı özelliklerinden önemli derecede bağımsızdır. Diğer bir deyişle, başlangıç akışkanlığını etkileyen baskın faktör çimento karakteristikleridir.
- Kıvam kaybının kullanılan katkının özelliklerinden etkilendiği görülmüştür. İncelenen katkılardan S1, S2 ve S4 benzer oranda kıvam kayıplarına sebep olurken, S3 katkısı bu katkılara göre kıvam kaybını biraz daha arttırmıştır. Katkılarının davranışındaki bu farklılıkların, ortalama moleküler ağırlık, sülfonasyon derecesi ve counter-ion kökeni gibi özelliklerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.
- Çimento hamurunun viskozitesi ile ilişkili olan Marsh hunisi deneyi, eşik kayma gerilmesi ile ilişkili olan mini çökme deneyiyle çok yüksek derecede korelasyon göstermemiştir. Ancak, bu iki deneye ait veriler arasında anlamlı bir ilişki vardır.
- Çimento hamuru üzerinde yapılan Marsh hunisi deneylerinden elde edilen sonuçlarla beton deneylerinden elde edilen veriler arasında başlangıç akışkanlığı açısından oldukça iyi bir ilişki mevcuttur. Bu nedenle, betona kıyasla daha pratik

ve hassas olan Marsh hunisi deneyi, daha az iş gücü, malzeme ve zaman harcanarak, kimyasal katkı ve çimentolu sistemlerle ilgili araştırmalarda beton deneylerinin yerine kullanılabilir.

- Elde edilen sonuçlara göre kıvam kaybı açısından baskın ögenin  $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$  oranı olduğu görülmüştür. Bu oranın göreceli olarak yüksek değerler almasıyla kıvam kayıpları azalmıştır.
- Kıvam kaybı açısından hamur ve beton deneyleri sonuçları arasında net bir ilişki yoktur. Ancak veriler arasında tam bir bağımsızlık da söz konusu değildir. Kısmen de olsa bir ilişkinin varlığından söz edilebilir.
- İnceliğin artması yayılma çaplarını azaltmış, akış sürelerini ise belli bir incelik değerine kadar azaltmış, yani akışkanlığı arttırmıştır.
- Etki mekanizması naftalin esaslı katkılara göre farklı olan polikarboksilat esaslı katkılarla benzer bir çalışma yapılabilir.
- Klinkere ayrı ayrı dehidrat, hemihidrat ya da anhidrit eklenerek sülfat formlarının akışkanlık davranışını nasıl etkilediği; yine, bunlarla üretilen çimentolarla hazırlanan karışımlara  $Na_2SO_4$  ilave edilmesiyle davranışın nasıl etkilendiği araştırılabilir. Ancak  $Na_2SO_4$  ilavesi yapılması durumunda dayanım ve dayanıklılık özellikleri de ayrıca araştırılmalıdır.
- Katkı karakteristiklerinin özellikle de moleküler ağırlığın belirlenmesi, ileride bu konuyla ilgili yapılabilecek çalışmalardan elde edilecek sonuçların değerlendirilmesinde önemli rol oynayabilir.
- Marsh hunisi ve mini çökme deneyleri farklı deformasyon oranları için yapılarak, viskozite ve eşik kayma gerilmesinin deformasyon oranıyla değişimi incelenebilir.
- Marsh hunisi ve mini çökme deneyi sonuçları reometre deneyleri ile kıyaslanarak, bu deneylerin viskozite ve eşik kayma gerilmesini ne ölçüde yansıttıkları araştırılabilir.
- Buna benzer bir çalışma yapılacaksa, uyumsuzluğa neden olan parametrelerin araştırılmasında, araştırmacının çimento özelliklerine odaklanması tavsiye edilebilir.

## KAYNAKLAR

- ACI Committee 212.4R. (2004). *Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete*.
- Agullo, L., Toralles-Carbonari, B., Gettu, R. & Aguado, A. (1999). *Fluidity of Cement Pastes with Mineral Admixtures and Superplasticizer-A Study Based on the Marsh Cone Test*, *Materials and Structures*, 32, pp. 479-485.
- Aiad, I. (2003). *Influence of Time Addition of Superplasticizers on the Rheological Properties of Fresh Cement Pastes*, *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1229-1234.
- Aİtcin, P.-C. & Neville, A. (1993). *High Performance Concrete Demystified*, *Concrete International*, January, pp. 21-26.
- Aİtcin, P.-C., Jolicoeur, C. & MacGregor, G. J. (1994). *Superplasticizers : How They Work and Why They Occasionally Don't*, *Concrete International*, May, pp. 45-52.
- Aİtcin, P.-C. (2004). *High Performance Concrete*, E&FN SPON, New York.
- Akman, S. (1999). *Yüksek Performanslı Betonların Taze Haldeki Özellikleri Üzerine Katkı Maddelerinin Etkisi*, (Mutlu, M., çev., bt), *Role of Admixtures on High Performance Concrete*, RILEM Symposium, Mexico.
- Andersen, P. J., Roy, D. M. & Gaidis, J. M. (1988). *The Effect of Superplasticizer Molecular Weight on Its Adsorption and Dispersion of Cement*, *Cement and Concrete Research*, 18, pp. 980-986.
- Anonim. (bt). *Zeta Potential: A Complete Course in 5 Minutes*.

- Asakura, E., Yoshida, H. & Nakae, H. (1992). *Influence of Superplasticizer on Fluidity of Fresh Cement Paste with Different Clinker Phase Composition*, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, IV, pp.570-576.
- Baalbaki, M. (1990). *Façon Pratique D'évaluer le Dosage en Superplastifiant: La Détermination du Point de Saturation*, Séminaire sur les Superplastifiants, Centre Interuniversitaire sur le Béton, Université de Sherbrooke, pp. 69-70.
- Banfill, P. F. (1979). *Discussion of Paper by Daimon, M. and Roy, D. M. (1978). Rheological Properties of Cement Mixes*, *Cement and Concrete Research*, 8, pp. 753-764, *Cement and Concrete Research*, 9, pp. 795-796.
- Basile, F., Biagini, S., Ferrari, G. & Colleparidi, M. (1989). *Influence of Different Sulfonated Polymers on the Fluidity of Cement Paste*, ACI SP-119, pp. 209-220.
- Bassant, J.-B. (1994). *Nouvelles Methodes d'étude de la Formulation D'hydrates des Ciments. Applications Analyse de L'effet D'adjuvants Organiques*, PhD Thesis, No. 156, Université de Franche Comte, France.
- Biagini, S., Ferrari, G., Maniscalco, V., Casolaro, M., Tanzi, M. C. & Rusconi, L. (1982). *Sulfonated Polystyrene as Superplasticizer*, II. *Cemento*, 79, pp.345-354.
- Bonen, D. & Sarkar, S. L. (1995). *The Superplasticizer Adsorption Capacity of Cement Pastes, Pore Solution Composition, and Parameters Affecting Flow Loss*, *Cement and Concrete Research*, 25, pp. 1423-1434.
- Boragafio, J. R. & Macias, A. (1992). *Rheological Properties of Cement Mixes Containing Different Organic Dispersants*, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, IV, pp. 557-563.

- Chandra, S. & Björnström, J. (2002a). *Influence of Cement and Superplasticizers Type and Dosage on the Fluidity of Cement Mortars-Part I*, Cement and Concrete Research, 32, pp.1605–1611.
- Chandra, S. & Björnström, J. (2002b). *Influence of Superplasticizer Type and Dosage on the Slump Loss of Portland Cement Mortars-Part II*, Cement and Concrete Research, 32, pp. 1613-1619.
- Chiocchio, G. & Paolini, A. E. (1985). *Optimum Time for Adding Superplasticizer to Portland Cement Paste*, Cement and Concrete Research, 15, pp. 901– 908.
- Claisse, P. A., Lorimer, P. & Al Omari, M. (2001). *Workability of Cement Pastes*, ACI Materials Journal, 98, pp. 476-482.
- Colleparidi, M. & Corradi, M. (1979). *Influence of Naphthalene-Sulfonated Polymer Based Superplasticizers on the Strength of Ordinary and Lightweight Concretes*, ACI SP-62, pp. 315-336.
- Colleparidi, M. & Corradi, M. (1980). *Low Slump Loss Superplasticized Concrete*, Transportation Research Record Publication 720, Transportation Research Board, pp. 26-31.
- Colleparidi, M., Corradi, M., & Valenti, M. (1981). *Influence of Polymerization of Sulfonated Naphthalene Condensate and Its Interaction with Cement*, ACI SP-68 pp. 485-498.
- Colleparidi M. (1993). *The World of Chemical Admixtures in Concrete*, Proceedings of the Congress of Our World in Concrete and Structures, Singapore, pp. 63-72.
- Colleparidi M., Coppola L., Cerulli T., Ferrari G., Pistolesi C., Zaffaroni P. & Quek F. (1993). *Zero Slump Loss Superplasticized Concrete*, Proceedings of the Congress of Our World in Concrete and Structures, Singapore, pp. 73-80.



- Collepari, M. (2005). *Admixtures-Enhancing Concrete Performance*, 6th International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities, Dundee.
- Cunningham, J. C., Dury, B. L. & Gregory, T. (1989). *Adsorption Characteristics of Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensates by High Performance Size Exclusion Chromatography*, Cement and Concrete Research, 19, pp. 919-928.
- Dodson, V. H. & Hayden, T. D. (1989). *Another Look at the Portland Cement/Chemical Admixture Incompatibility Problem*, Cement, Concrete and Aggregates, 11, pp. 52-56.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*, METU Press, Ankara.
- Erdoğdu, S. (2000). *Compatibility of Superplasticizers with Cements Different in Composition*, Cement and Concrete Research, 30, pp. 767-773.
- Ferrari, G., Basile, F., Dal Bo, A. & Mantoni, A. (1986). *The Influence of Molecular Weight of Beta Naphthalene Sulfonate-Based Polymers on the Rheological Properties of Cement Mixes*, II. Cemento, 83, pp. 445-454.
- Ferraris, C. (1999) *Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report*, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 5, (104), pp. 461-478.
- Ferraris, C., Karthik, H. O. & Russell, H. (2001). *The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete*, Cement and Concrete Research, 31, pp. 245-255.

- Flatt, R. J. (1997). *Interaction of Superplasticizers with Model Powders in a High Alkaline Medium*, 5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Rome, pp. 743-762.
- Flatt, R. J. & Houst, Y. F. (2001). *A Simplified View on Chemical Effects Perturbing the Action of Superplasticizers*, Cement and Concrete Research, 31, pp.1169-1176.
- Fujiu, A., Tanaka, H. & Iizuka, M. (1985). *Slump Control by Reactive Polymer Dispersant*, Rev. 39th General Meeting, Cement Asscn, Japan, pp. 72-73.
- Fukuda, M., Mizunuma, T., Izumi, T., Iizuka, M. & Hisaka, M. (1990). *Slump Control and Properties of Concrete with a New Superplasticizer*, RILEM Conference on Admixtures for Concrete, Barcelona, pp. 10-19.
- Gebler, S. H. (1982). *Effects of High-Range Water Reducers on the Properties of Freshly Mixed and Hardened Flowing Concrete*, Research and Development Bulletin RD081-01T, Portland Cement Association, Skokie.
- Griesser, A. (2002). *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures*, Thesis of Doctor of Philosophy, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- Grzeszczyk, S. & Kucharska, L. (1991). *The Influence of Chemical Composition of Cement on the Rheological Properties*, Rheology of Fresh Cement and Concrete, pp. 27-36.
- Grzeszczyk, S. (1994). *Distribution of Potassium in Clinker Phases*, Silicate Industries, 61, pp. 241-246.
- Guenewig, T., (1988). *Cost-Effective Use of Superplasticizers*, Concrete International, March, pp. 31-34.

- Hackley, A. V. & Ferraris, C. F. (2001). *Guide to Rheological Nomenclature: Measurements in Ceramic Particulate Systems*, NIST Special Publication, No: 946, National Institute of Standards and Technology.
- Hanna, E., Luke, K., Perraton, D. & Aïtcin, P.-C. (1989). *Rheological Behavior of Portland Cement in the Presence of Superplasticizer*, ACI SP-119, pp. 171-188.
- Hanna, E. (1992). Master's Thesis, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- Hewlett, P. C. (1979). *Experiences in the Use of Superplasticizers in England*, ACI SP-62, pp.101-122.
- Hills, L. & Tang, F. (2004). *Manufacturing Solutions for Concrete Performance*, 46th Cement Industry Technical Conference, USA.
- Houst, Y. F., Flatt, R. J., Bowen, P, Hofmann, H., Widmer, J., Sulser, U., Maeder, U. & Burge, T. A. (1999). *Influence of Superplasticizer Adsorption on the Rheology of Cement Pastes*, Proceedings of the International RILEM Conference on the Role of Admixtures in High Performance Concrete, France, pp. 387–402.
- Houst, Y. F., Bowen, P. & Perche, F. (bt.a). *Towards Tailored Superplasticizers*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Laboratoire de Technologie des Poudres, Switzerland.
- Houst, Y. F., Bowen, P. & Siebold, A. (bt.b). *Some Basic Aspects of the Interaction Cement-Superplasticizers*, Swiss Federal Institute of Materials Science, Switzerland.

- Hsu, K.-C., Chiu, J.-J., Chen, S.-D. & Tseng, Y.-C. (1999). *Effect of Addition Time of a Superplasticizer on Cement Adsorption and on Concrete Workability*, Cement and Concrete Composites, 21, pp. 425-430.
- Hsu, K.-C., Chen, S.-D. & Su, N. (2000). *Water-Soluble Sulfonated Phenolic Resins. III. Effects of Degree of Sulfonation and Molecular Weight on Concrete Workability*, Journal of Applied Polymer Science, 76, pp. 1762-1766.
- Huynh, T. (1996). *La Compatibilite Ciment-Adjuvant. Etude Bibliographique*, Bulletin des Laboratoire des Ponts et Chaussees, No. 206, November-December, pp. 63-74.
- Iizuka, M., Fujiu, A. & Yamamuna, M. (1985). *Molecular Structures and Properties of a Newly Developed Polycarboxylic Acid Type Superplasticizer*, Rev. 39th General Meeting, Cement Asscn, Japan, pp. 78-79.
- Jawed, I. & Skalny, J. (1978). *Alkalies in Cement: A Review II. Effects of Alkalies on Hydration and Performance of Portland Cement*, Cement and Concrete Research, 8, pp. 37-51.
- Jiang, S., Kim, B.-G. & Aïtcin, P.-C. (1999). *Importance of Adequate Soluble Alkali Content to Ensure Cement/Superplasticizer Compatibility*, Cement and Concrete Research, 29, pp. 71-78.
- Jiang, S., Kim, B.-G. & Aïtcin, P.-C. (2000). *A Practical Method to Solve Slump Loss Problem in PNS Superplasticized High-Performance Concrete*, Cement, Concrete and Aggregates, 22, pp. 10-15.
- Jolicoeur, C., Simard, M., Aïtcin, P.-C. & Baalbaki, M. (1992). *Cement-Superplasticizer Compatibility in High Performance Concrete: The Role of Sulfates*, Proceedings of 4th Semiannual Meeting of the Network of Centres of Excellence on High Performance Concrete, Toronto, pp. 9-27.

- Kantro, D. L. (1980). *Influence of Water Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test*, Cement, Concrete and Aggregates, 2, pp. 95-102.
- Kasami, H., Ikeda, T. & Yamane, S. (1979). *On Workability and Pumpability of Superplasticized Concrete Experience in Japan*, ACI SP-62, pp. 67-85.
- Khayat, K. H. & Yahia, A. (1998). *Simple Field Tests to Characterize Fluidity and Washout Resistance of Structural Cement Grout*, Cement, Concrete, and Aggregates, 20, pp. 145–156.
- Kim, B.-G. (2000). *Compatibility Between Cements and Superplasticizers in High Performance Concrete: Influence of Alkali Content in Cement and of the Molecular Weight of PNS on the Properties of Cement Pastes and Concretes*, Thesis of Doctor of Philosophy, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- Kim, B.-G., Jiang, S., Jolicoeur, C. & Aïtcin, P.-C. (2000). *The Adsorption Behavior of PNS Superplasticizer and Its Relation to Fluidity of Cement Paste*, Cement and Concrete Research, 30, pp. 887-893.
- Lahalih, S. H., Absi-Halabi, H. & Ali, M. A. (1988). *Effect of Polymerization Conditions of Sulfonated-Melamine Formaldehyde Superplasticizers on Concrete*, Cement and Concrete Research, 18, pp. 513-531.
- Lee, Y. F., Chen, S. D. & Hsu, K. C. (1997). *Supplementary Papers of 5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, 97.
- Locher, F. W. (1982). *Erstarren von Zement. Teil III: Einfluss der Klinkerherstellung*, Zement-Kalk-Gips, 35, (12), pp. 669-676.

- Lukas, W. (1981). *Chloride Penetration in Standard Concrete, Water-Reduced Concrete, and Superplasticized Concrete*, ACI SP-68, pp. 253-267.
- Luke, K. & Aïtcin, P.-C. (1990). *Effect of Superplasticizer on Ettringite Formation*, Advances in Cementitious Materials, Amer. Ceram. Soc., 16, pp.1042-1122.
- Mailvaganam N. P. (1979). *Slump Loss in Flowing Concrete*, ACI SP-62, pp. 389-403.
- Malhotra, V. M. & Malanka, D. (1978). Performance of Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada.
- Miller, F. M. & Tang, F. J. (1996). *The Distribution of Sulfur in Present-Dry Clinkers of Variable Sulfur Content*. Cement and Concrete Research, 26, pp. 1821-1829.
- Mork, H. J. (1994). *Effect of Gypsum-Hemihydrate Ratio in the Cement on the Rheological Properties of Fresh Concrete*, Norwegian University of Science and Technology, Dr Ing Dissertation.
- Mork, H. J. & Gjoerv, E. O. (1997). *Effect of Gypsum-Hemihydrate Ratio in Cement on Rheological Properties of Fresh Concrete*, ACI Materials Journal, pp. 142-146.
- Mouka, M., Youn, D. & Hassanali, M. (1993). *Effects of Degree of Polymerization of Water Soluble Polymers on Concrete Properties*, Cement and Concrete Research, 23, pp. 122-130.
- Nakajima, Y. & Yamada, K. (2004). *The Effect of the Kind of Calcium Sulfate in Cements on the Dispersing Ability of Poly  $\beta$ -Naphthalene Sulfonate Condensate Superplasticizer*, Cement and Concrete Research, 34, pp. 839-844.

- Nawa, T., Eguchi, H. & Fukaya, Y. (1989). *Effect of Alkali Sulfate on the Rheological Behavior of Cement Paste Containing Superplasticizer*, ACI SP-119, pp. 405-424.
- Nawa, T. & Eguchi, H. (1992). *Effect of Cement Characteristics on the Fluidity of Cement Pastes Containing an Organic Admixtures*, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, IV, pp.597-603.
- Nawa, T., Ichiboji, H. & Kinoshita, M. (2000). *Influence of Temperature on Fluidity of Cement Paste Containing Superplasticizer with Polyethylene Oxide Graft Chains*,. 6th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, pp. 195-210.
- Nehdi, M. (1998). *Microfiller Effect on Rheology, Microstructure and Mechanical Properties of High Performance Concrete*, Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Canada.
- Nkinamubanzi, P. C. & Fournier, B. (2003). *Evaluation of the Potential Use of the Superplasticizer Alphasith FT30LV with Canadian Cements*, Materials Technology Laboratory, Report MTL, 44(CF).
- Odler, I. & Wonnemann, R. (1983). *Effect of Alkalis on Portland Cement Hydration: I. Alkali Oxides Incorporated into the Crystalline Lattice of Clinker Minerals*, Cement and Concrete Research, 13, pp. 477-482.
- Perenchio, W. F., Whiting, D.A. & Kantro, D.L. (1979). *Water Reduction, Slump Loss and Entrained Air Void Systems as Influenced by Superplasticizers*, ACI SP-62, pp. 137-156.
- Piotte, M. (1993). *Caractérisation du Polynaphtalènesulfonate: Influence de son Contre-ion et de sa Masse Moléculaire sur son Interaction Avec le Ciment*, Thesis, University of Sherbrooke, Canada.

- Prince, W., Edwards-Lajnef, M. & Aïtcin, P.-C. (2002). *Interaction Between Ettringite and a Polynaphthalene Sulfonate Superplasticizer in a Cementitious Paste*, Cement and Concrete Research, 32, pp. 79-85,.
- Prince, W., Espagne, M. & Aïtcin, P.-C. (2003). *Ettringite Formation: A Crucial Step in Cement Superplasticizer Compatibility*, Cement and Concrete Research, 33, pp. 635-641.
- Ramachandran, V. S. (1972a). *Elucidation of the Role of Chemical Admixtures in Hydrating Cements by DTA Technique*, Thermochemica Acta, 3, pp. 343-366.
- Ramachandran, V. S. (1972b). *Interaction of Calcium Lignosulphonate with Tricalcium Silicate, Hydrated Tricalcium Silicate and Calcium Hydroxide*, Cement and Concrete Research, 2, pp.179-194.
- Ramachandran, V. S., Feldman, R. E. & Beaudoin, J. J. (1981a). *Concrete Sci., Treatise on Current Res.*, Heyden & Son Ltd., London.
- Ramachandran, V. S. (1981b). *Influence of Superplasticizers on the Hydration of Cement*, III Int. Cong. on Polymers in Concrete, Koriyama, Japan, pp. 1071-1081.
- Ramachandran, V. S. (1984). *Concrete Admixtures Handbook*, Noyes Publications, New Jersey.
- Ramachandran, V.S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook*, Noyes Publications, New Jersey.
- Ranc, R. (1990). *Interactions Entre les Reducteur D'eau-Plastifiants et les Ciments*, Ciments, Betons, Ptatres, Chaux, 782, pp. 19-21.



- Ravina, D. & Mor, A. (1986). *Effects of Superplasticizers*, Concrete International, July, pp. 53-55.
- Regourd, M. (1978). *Cristallisation et Reactivite de'l Aluminate Tricalcique dans les Ciments Portland*, II. Cemento, 3, 323-335.
- Rixom, M. R. (1978). *Chemical Admixtures for Concrete*, E&FN SPON, London.
- Rixom, R. & Waddicor, J. (1981). *Role of Lignosulfonates as Superplasticizers*, ACI SP-68, pp. 359-379.
- Rollet, M., Levy, C. & Cavailles, R. (1992). *Evaulation of Compatible Superplasticizer for the Production of High-Strength Concrete*, Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol V, pp. 115-121.
- Roussel, N. & Le Roy, R. (2005). *The Marsh Cone: A Test or a Rheological Apparatus?*, Cement and Concrete Research, 35, pp. 823-830.
- Sakai, E. & Daimon, M. (1997). *Dispersion Mechanisms of Alite Stabilized by Superplasticizers Containing Polyethylene Oxide Graft Chains*, ACI SP-173, pp. 187-202.
- Sandberg, P. (bt). Cementa AB,
- Sarkar, S. L. & Aimin, X. (1992). *Preliminary Study of Very Early Hydration of Superplasticized C<sub>3</sub>A+Gypsum by Environmental SEM*, Cement and Concrete Research, 22, pp. 605-608.
- Sebok, T. (1986). *The Effects of the Molar Parameters of Sulfonated Melamine and Formaldehyde Polycondensates on Mortar Properties*, Proceedings 8th Inter. Cong. Chem. Cement, Theme 2, Vol.3, pp. 34-39.

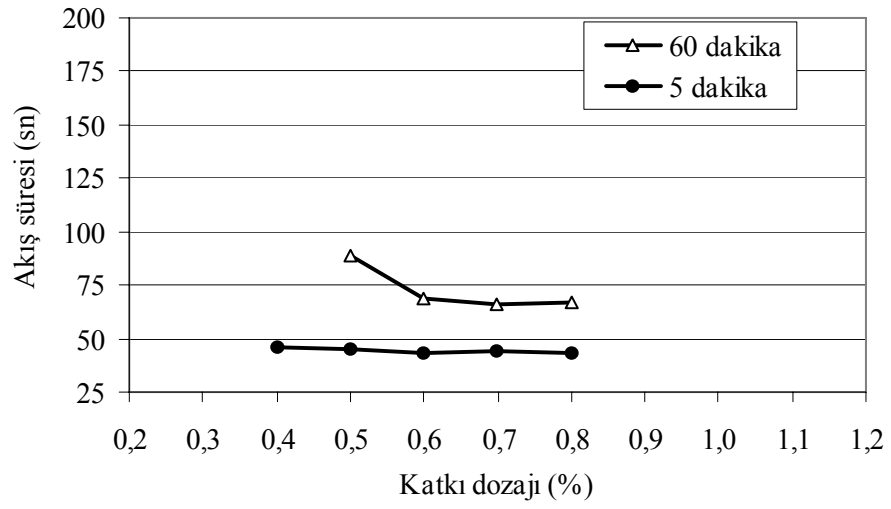
- Simard, M.-A., Nkinamubanzi, P.-C., Jolicoeur, C., Perraton, D. & Aïtcin, P.-C. (1993). *Calorimetry, Rheology and Compressive Strength of Superplasticized Cement Pastes*, Cement and Concrete Research, 23, pp. 939-950.
- Suzue, S., Okada, E. & Hattori, K. (1981). *Adsorption Behaviors of Superplasticizers on Cements*, 35th Annual Proceedings of Cement Association of Japan, pp. 202-205.
- Tagnit-Hamou, A., Baalbaki, M. & Aïtcin, P.-C. (1992). *Calcium Optimization in Low Water/Cement Ratio Concretes for Rheological Purposes*, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, V, pp. 21-25.
- Tagnit-Hamou, A. & Aïtcin, P.-C. (1993). *Cement and Superplasticizer Compatibility*, World Cement, May, pp. 38-42.
- Tanaka, I., Suzuki, N., Ono, Y. & Koishi, M. (1998). *Fluidity of Spherical Cement and Mechanism for Creating High Fluidity*, Cement and Concrete Research, 28, pp. 63-74.
- Uchikawa, H., Uchida, S., Ogawa, K., & Hanehara, S. (1984). *Influence of  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaSO}_4$  on the Initial Hydration of Clinker with Different Burning Temperature*, Cement and Concrete Research, 14, pp. 645-656.
- Uchikawa, H. (1994). *Hydration of Cement and Structure Formation and Properties of Cement Paste in the Presence of Organic Admixture*, Importance of Recent Microstructural Developments in Cement and Concrete, Sherbrooke, Canada.
- Uchikawa, H. (1995). *Hydration of Cement and Structure Formation and Properties of Cement Paste in the Presence of Organic Admixture*. Journal of Research of the Chichibu Onda Cement Corporation, 46, (129), pp. 1-53.

- Vernet, C. & Noworyta, G. (1992). *Reactivity Test For Fine Silicas and Pozzolonic Mineral Additives*, Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of cement, New delhi, Vol III, pp. 79-85.
- Whiting, D. (1979). *Effects of High-Range Water Reducers on Some Properties of Fresh and Hardened Concretes*, Research and Development Bulletin RD061.01T, Portland Cement Association, Skokie, 15 pp.
- Wong, G. S., Alexander, M. A., Haskins, R., Poole, T., Malone, P. G. & Wakeley, L. (2001). *Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report*, USAE Research and Development Center.
- Yoshioka, K., Tazawa, E., Kawai, K. & Enohata, T. (2002). *Adsorption Characteristics of Superplasticizers on Cement Component Minerals*, Cement and Concrete Research, 32, pp. 1507-1513.
- Young, J. F. (1969). *Influence of Tricalcium Aluminate on the Hydration of Calcium Silicates*, Journ. of Amer. Ceramic Soc., 52, pp. 44-46.
- Young, J. F. (1972). *A Review of the Mechanism of Set Retardation in Portland Cement Pastes Containing Organic Admixtures*, Cement and Concrete Research, 2, pp. 415-433.
- Young, J. F. (1976). *Reaction Mechanism of Organic Admixtures with Hydrating Cement Compounds*, Transportation Res. Record, 564, pp. 1-9.
- Young, J. F. (1982). *Slump Loss in Retempering of Superplasticized Concrete*, Final Report, University of Illinois, UILU-ENG-82-201.5, p. 23.
- Zakka, Z., Carrasquillo, R. L. & Farbiarz, J. (1989). *Variables Affecting the Plastic and Hardened Properties of Superplasticized Concrete*, ACI SP-119, pp. 180–197.

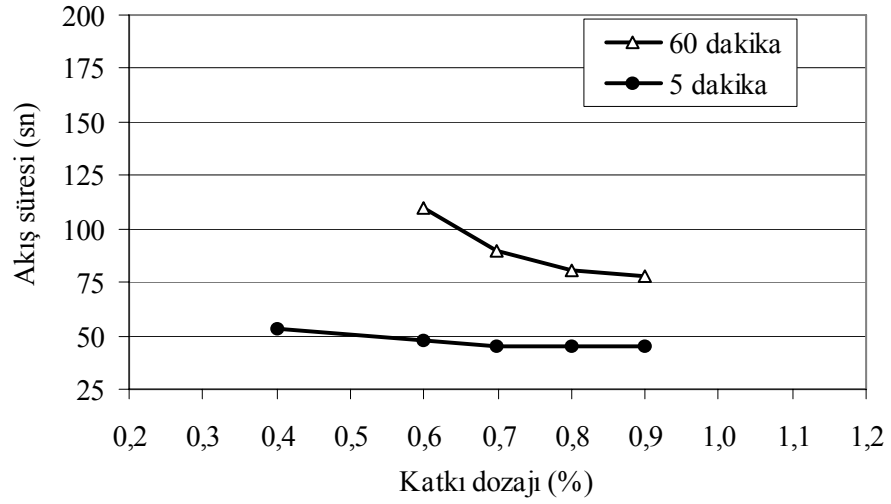
EKLER

## EK A

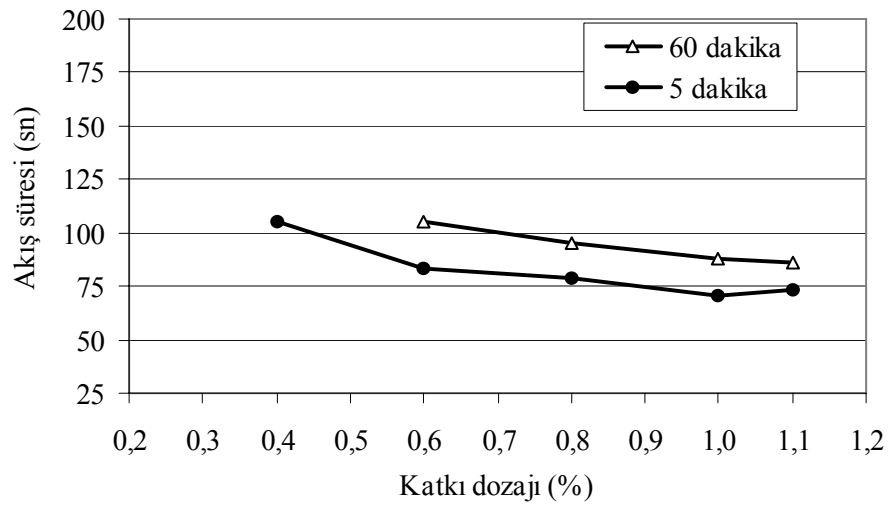
### S1 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARININ AKIŞ SÜRELERİ



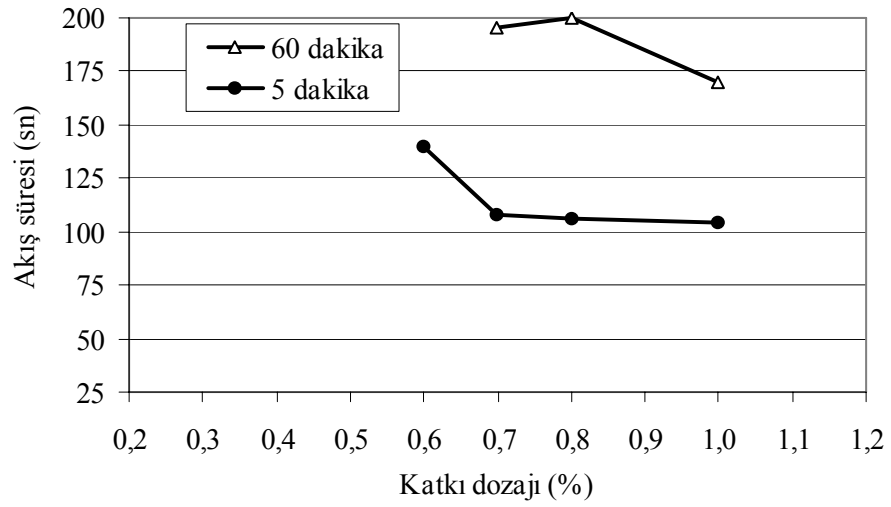
Şekil A.1 Ç1 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



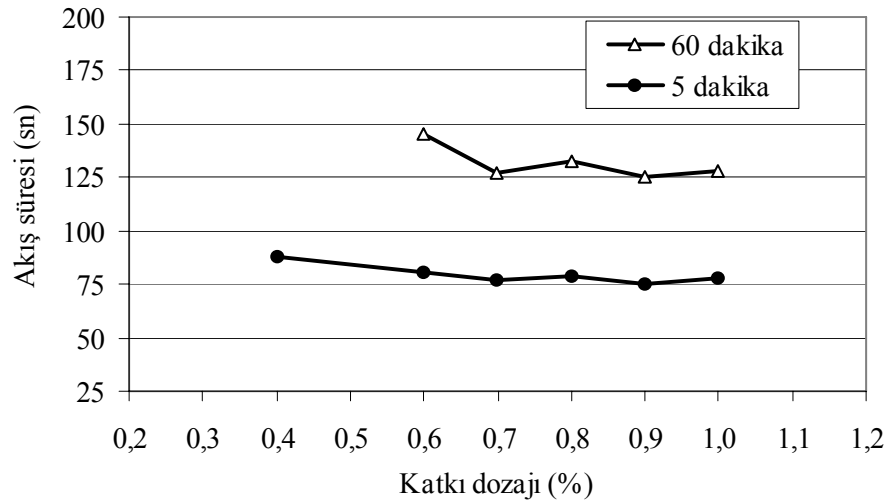
Şekil A.2 Ç2 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



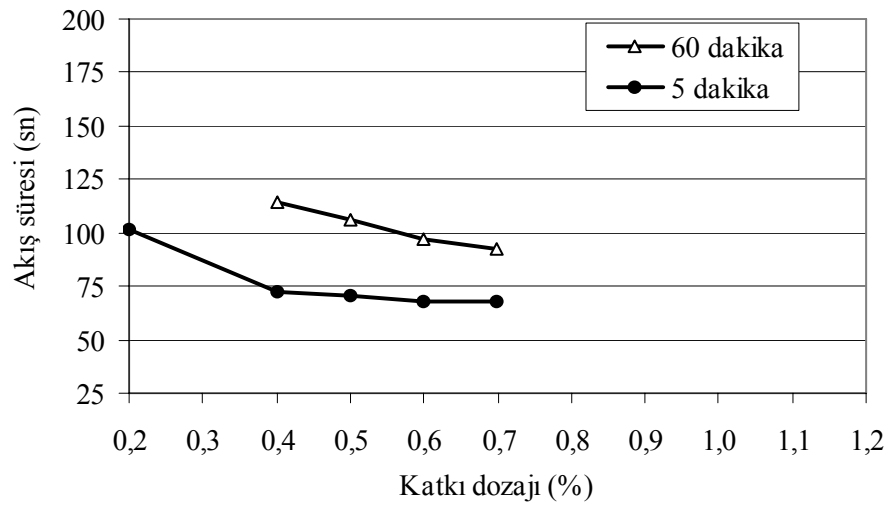
Şekil A.3 Ç3 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



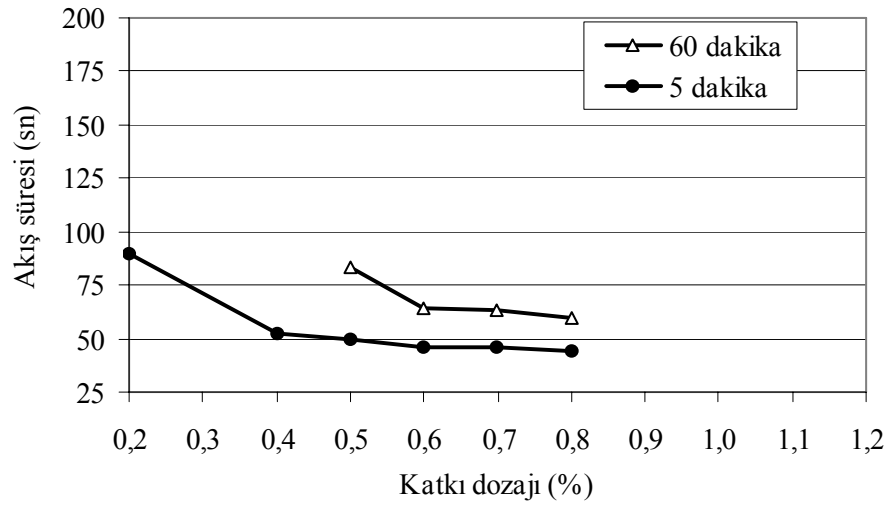
Şekil A.4 Ç4 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



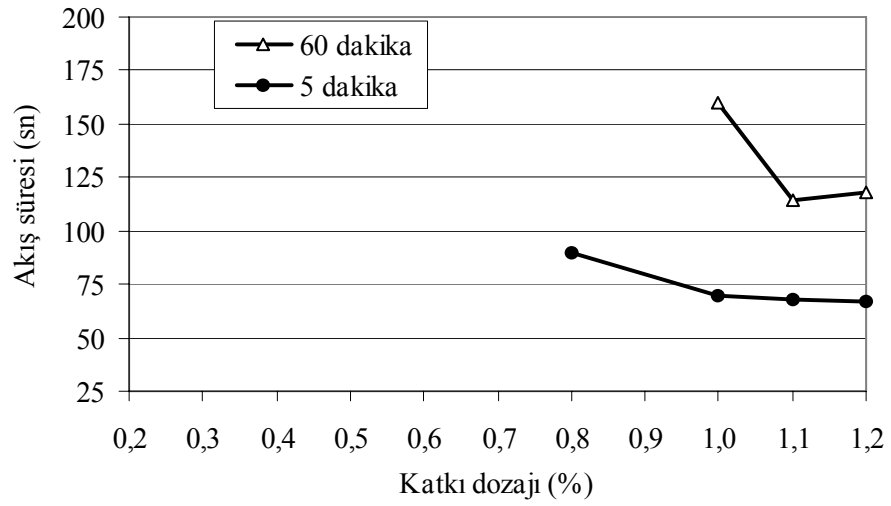
Şekil A.5 Ç5 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



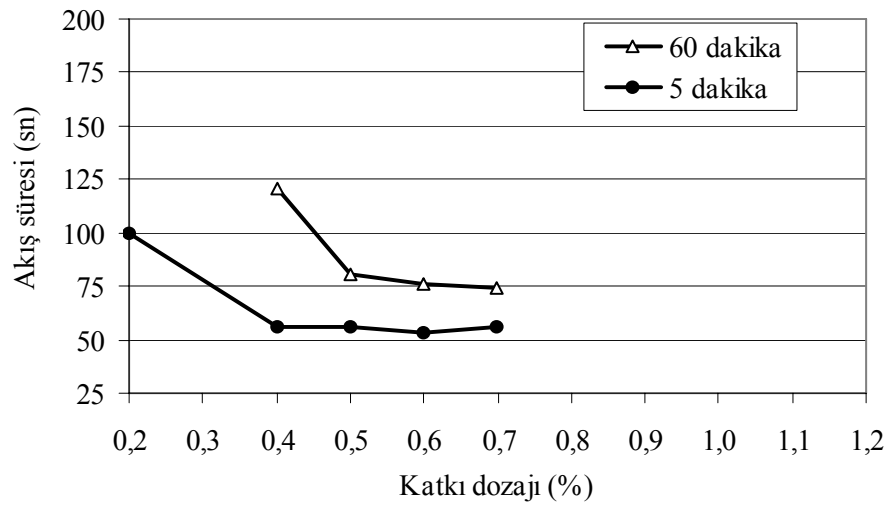
Şekil A.6 Ç6 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil A.7 Ç7 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

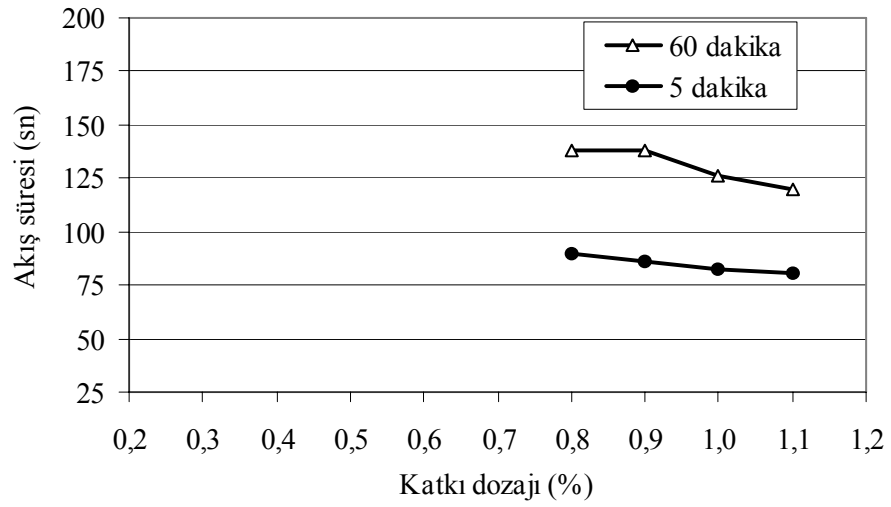


Şekil A.8 Ç8 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

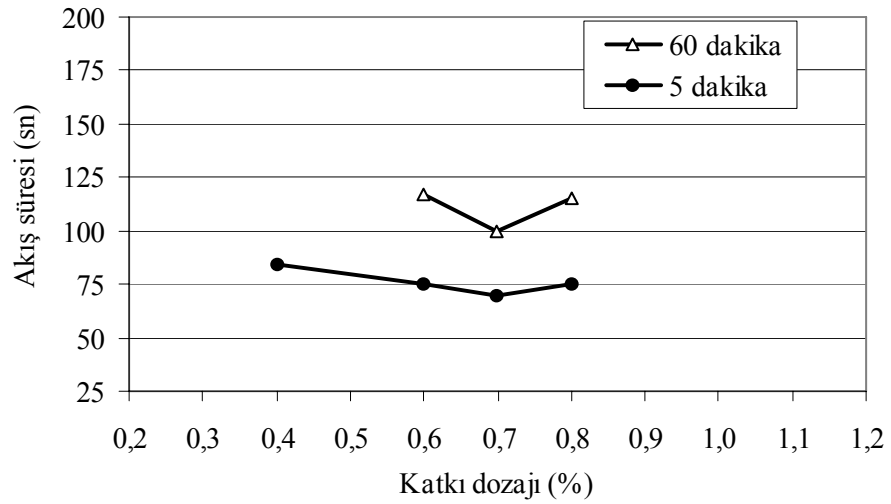


Şekil A.9 Ç9 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

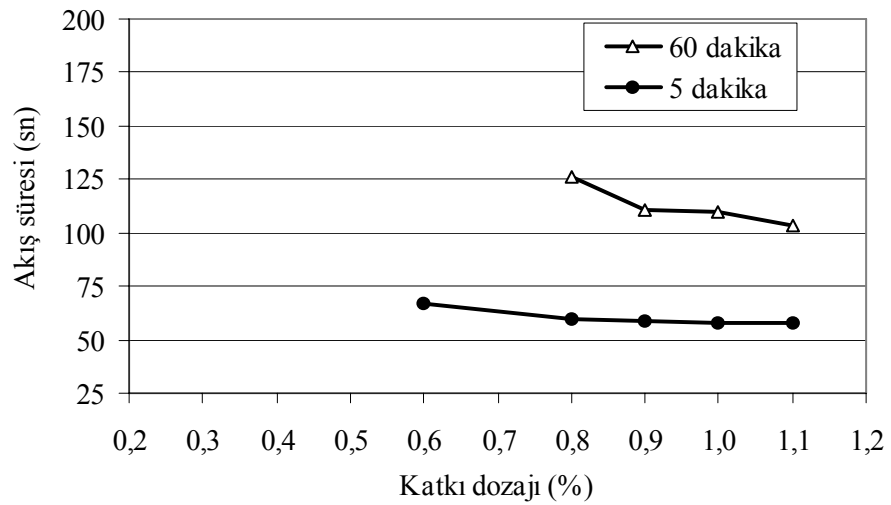




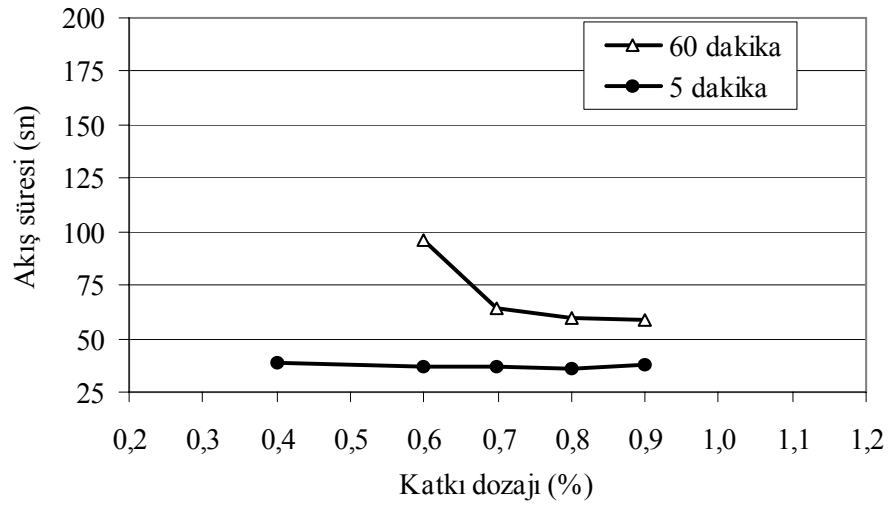
Şekil A.10 Ç10 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



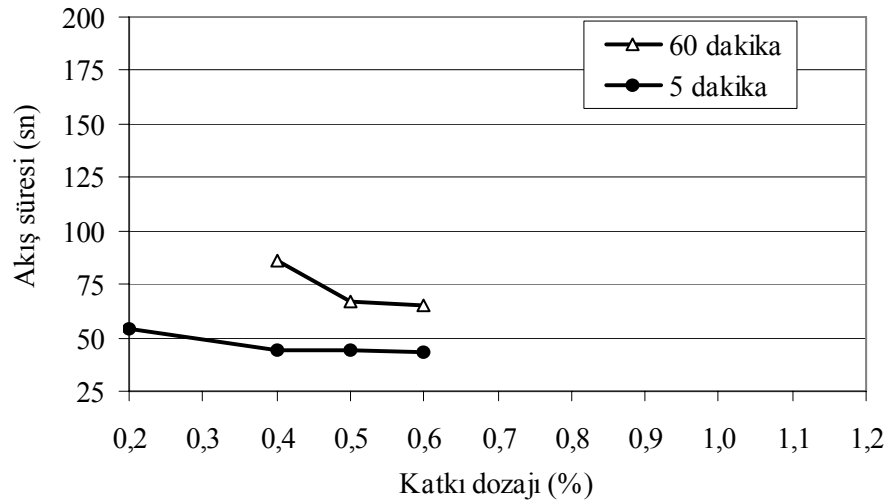
Şekil A.11 Ç11 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



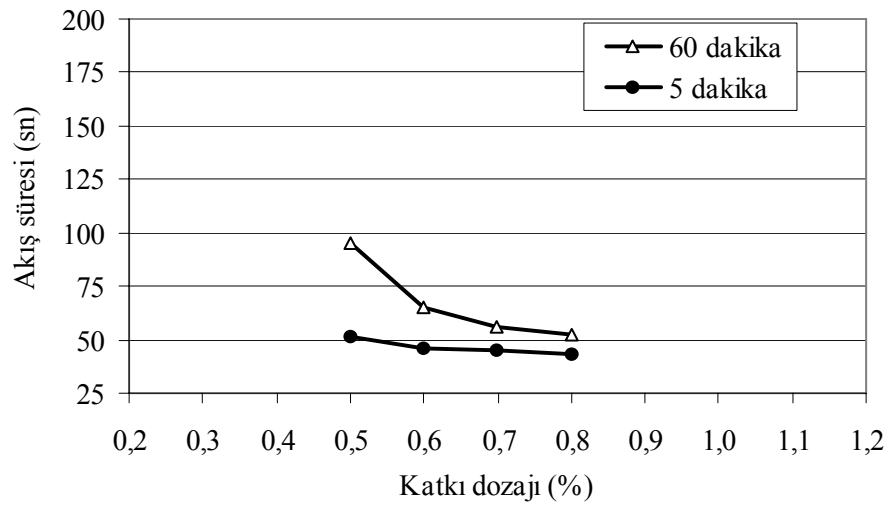
Şekil A.12 Ç12 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



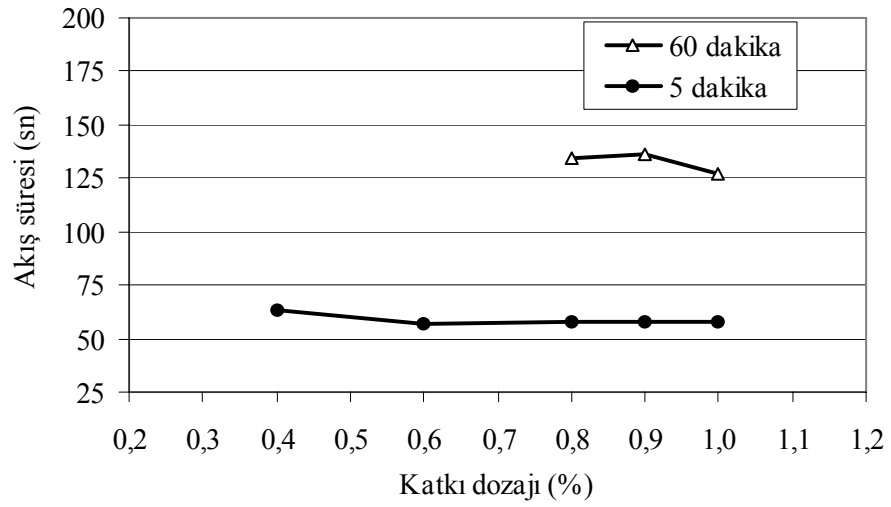
Şekil A.13 Ç13 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



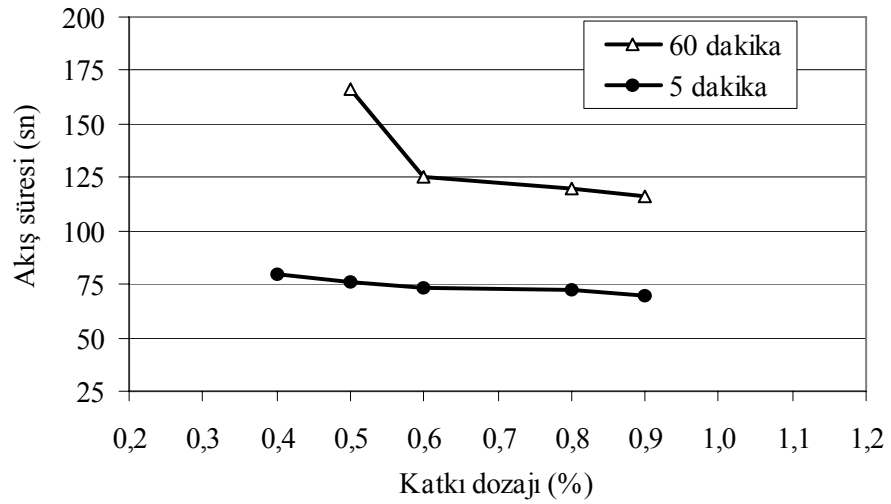
Şekil A.14 Ç14 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



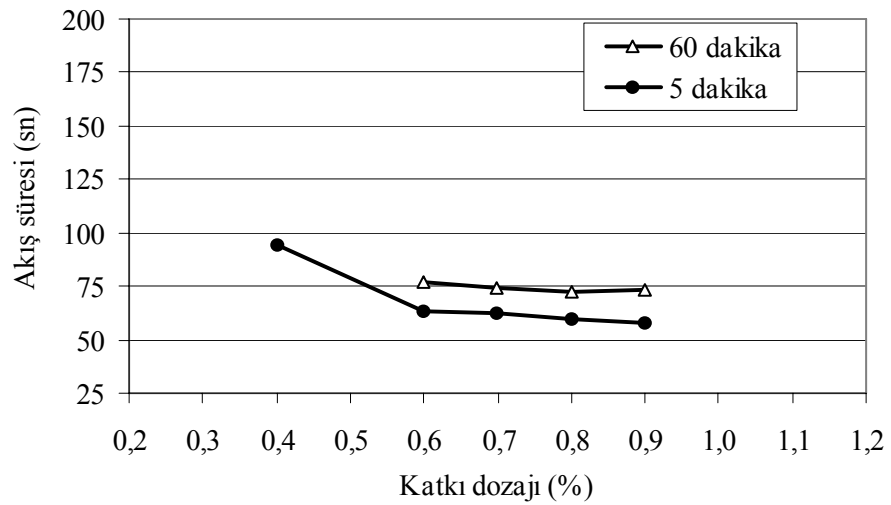
Şekil A.15 Ç15 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



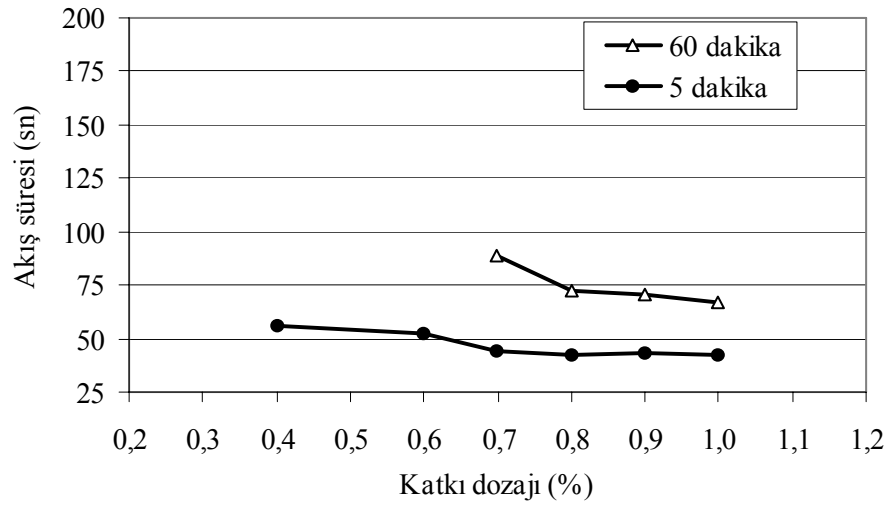
Şekil A.16 Ç16 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



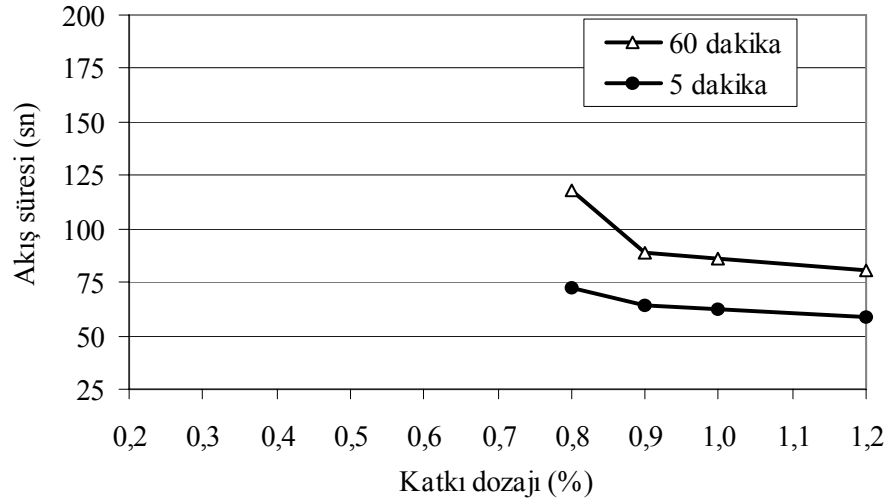
Şekil A.17 Ç17 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil A.18 Ç18 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



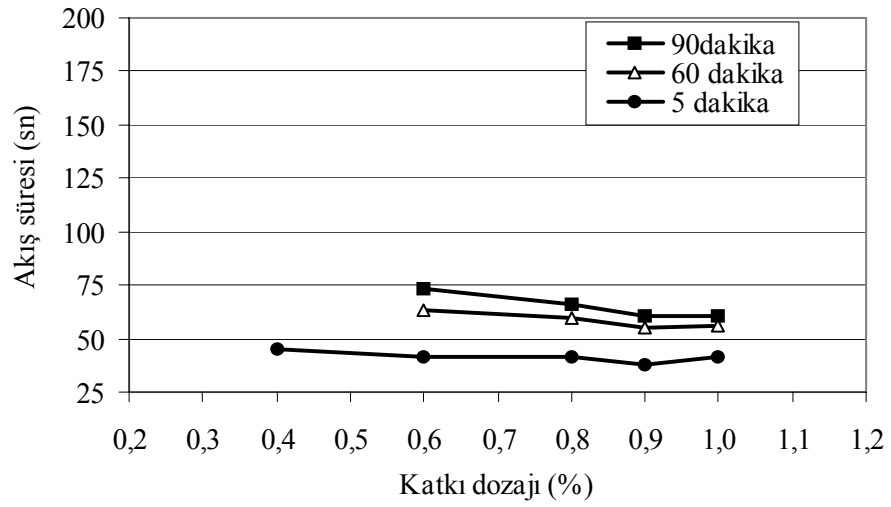
Şekil A.19 Ç19 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



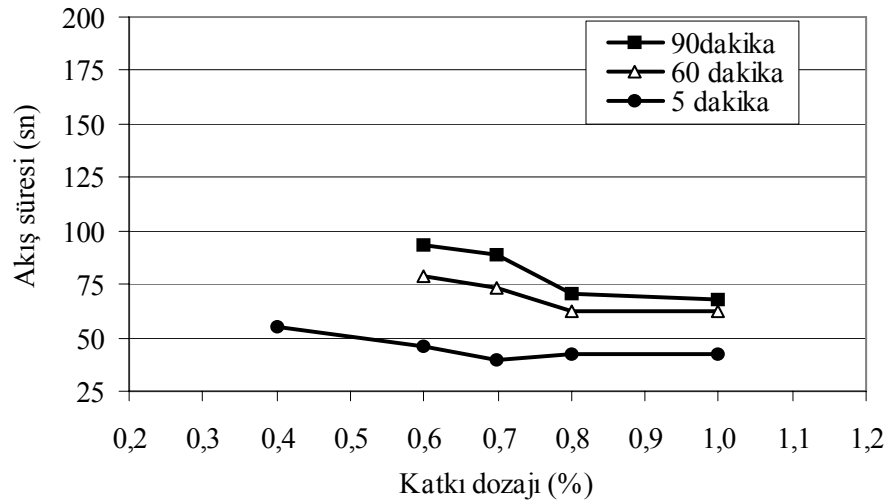
Şekil A.20 Ç20 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

## **EK B**

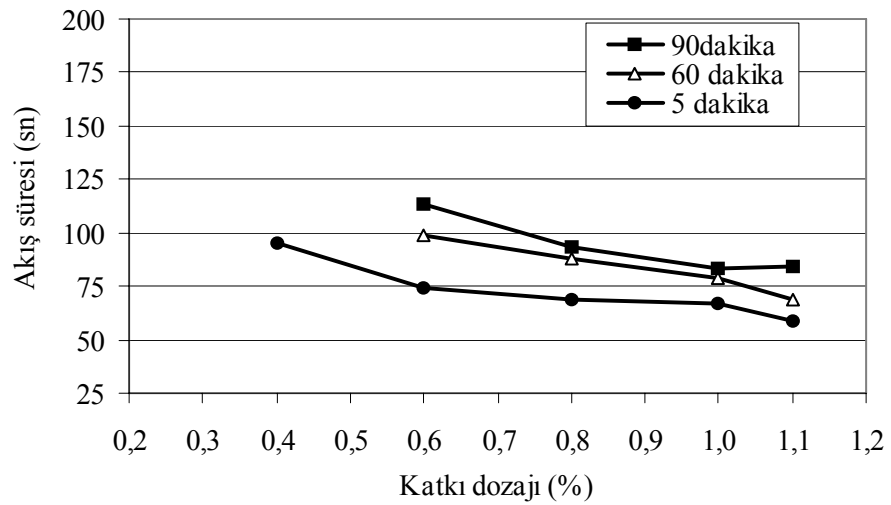
### **S2 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARININ AKIŞ SÜRELERİ**



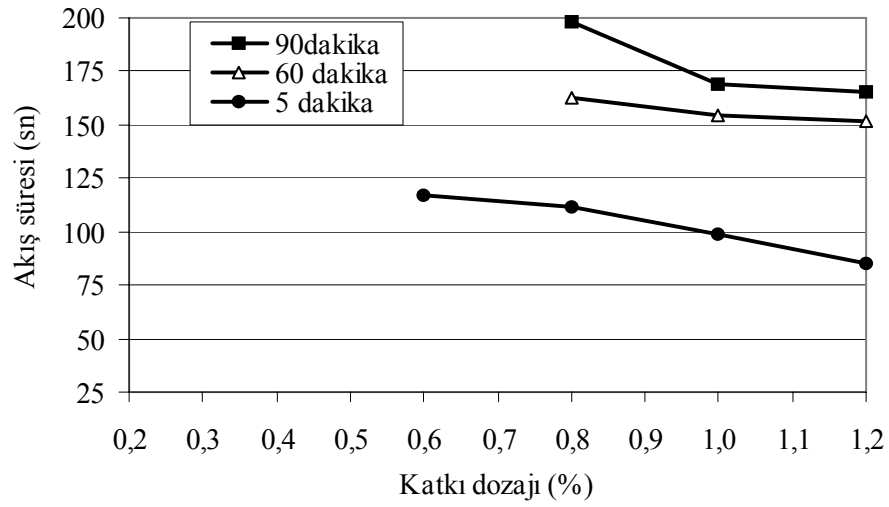
Şekil B.1 Ç1 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



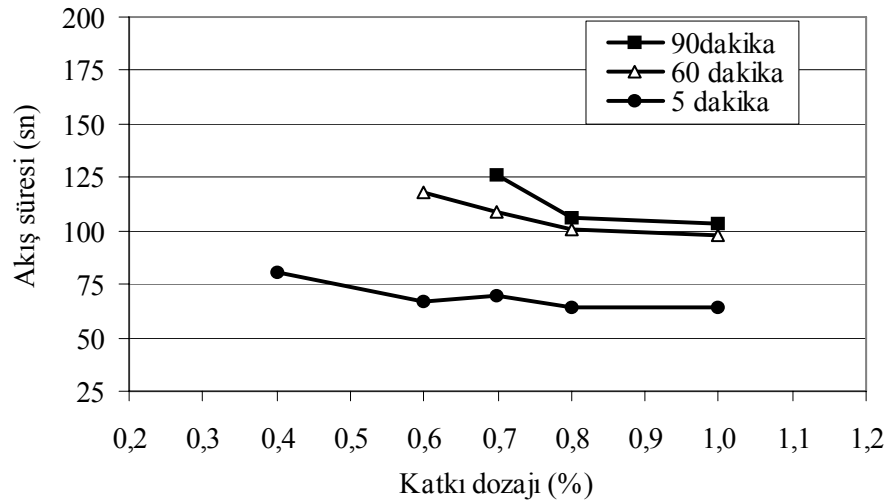
Şekil B.2 Ç2 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



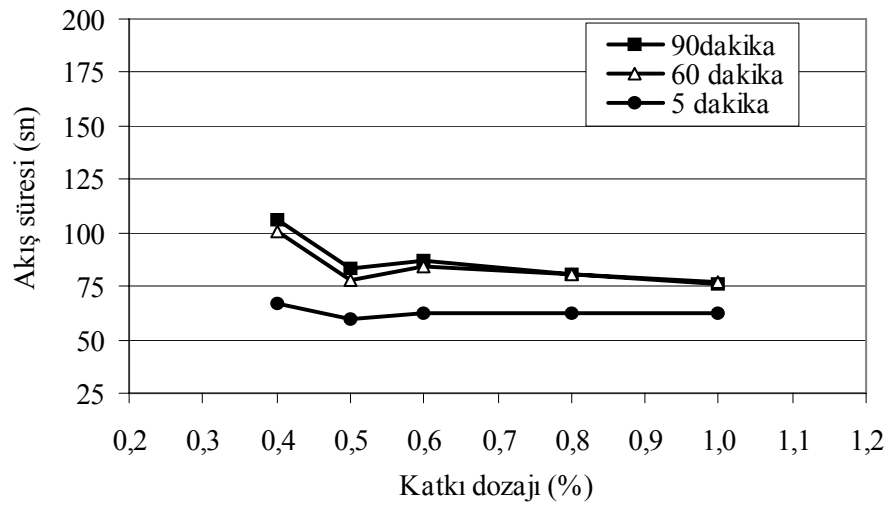
Şekil B.3 Ç3 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



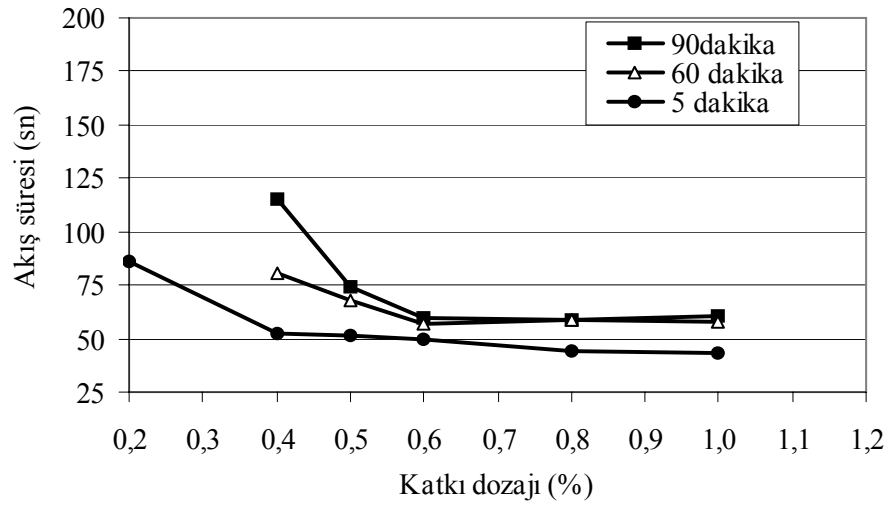
Şekil B.4 Ç4 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



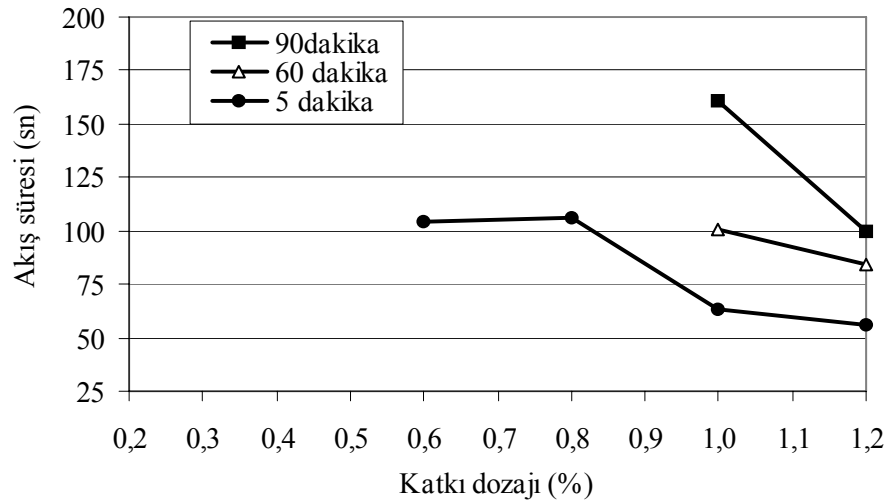
Şekil B.5 Ç5 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



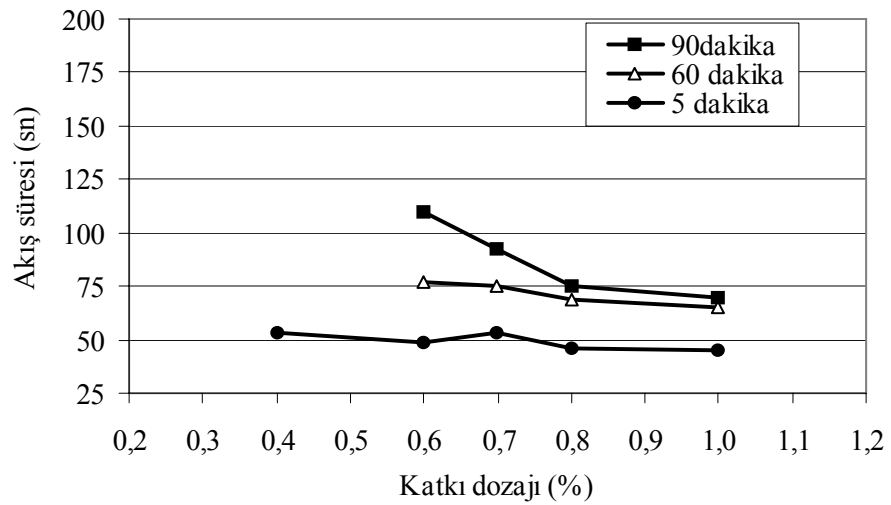
Şekil B.6 Ç6 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil B.7 Ç7 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

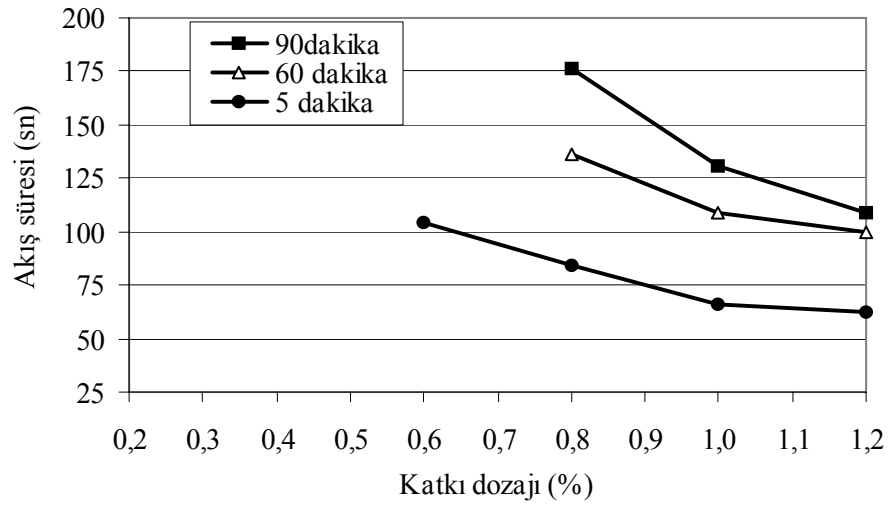


Şekil B.8 Ç8 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

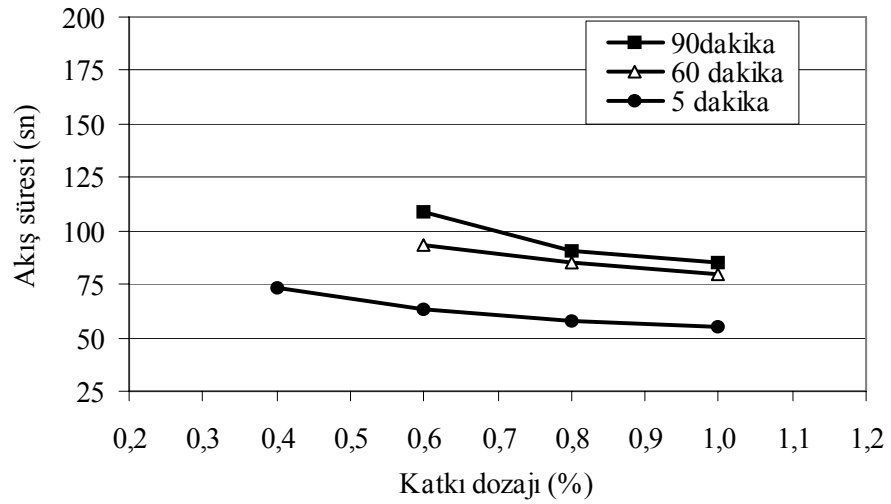


Şekil B.9 Ç9 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

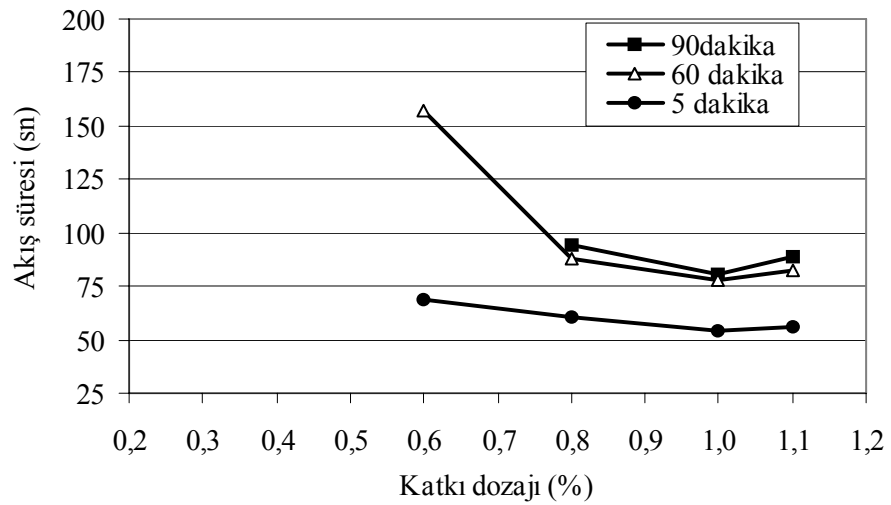




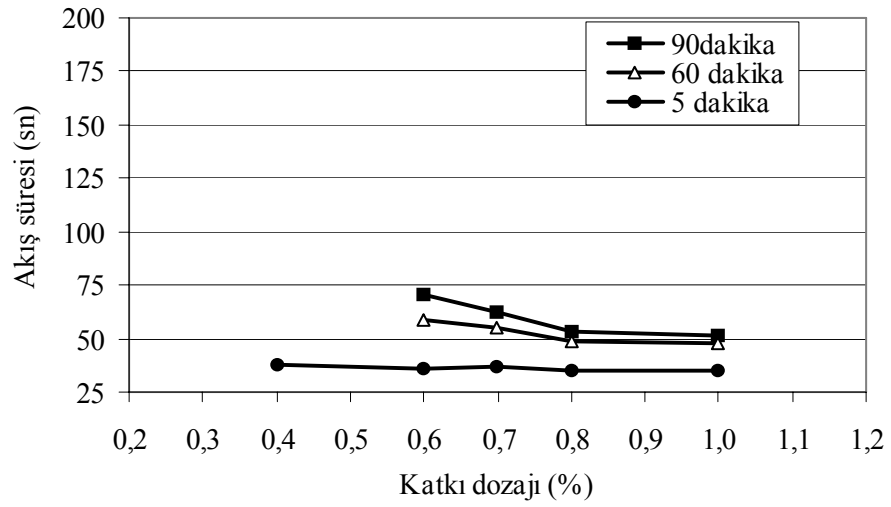
Şekil B.10 Ç10 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



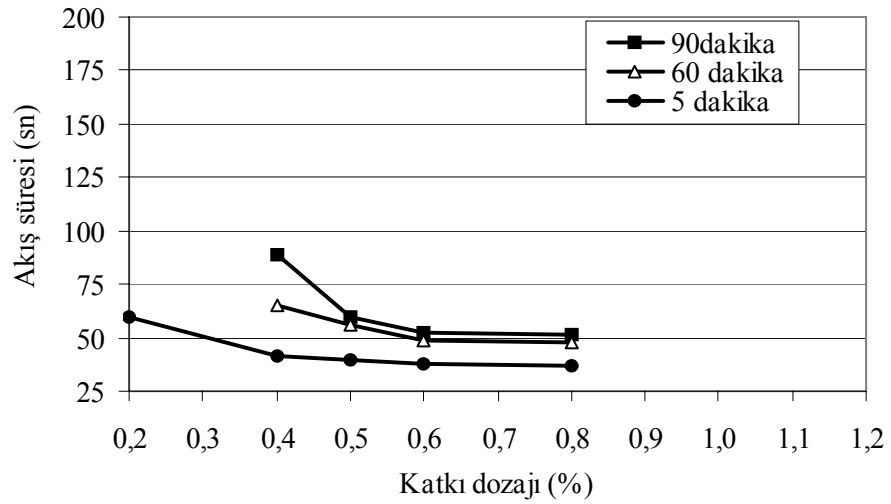
Şekil B.11 Ç11 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



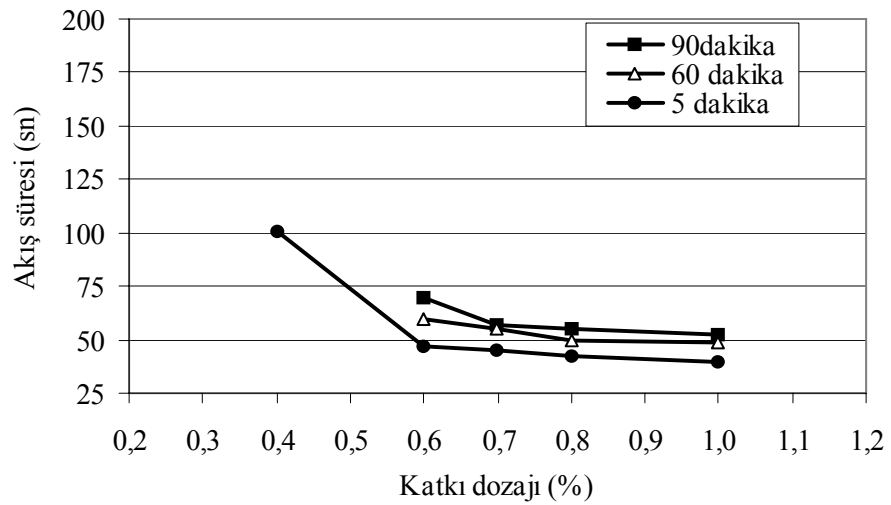
Şekil B.12 Ç12 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



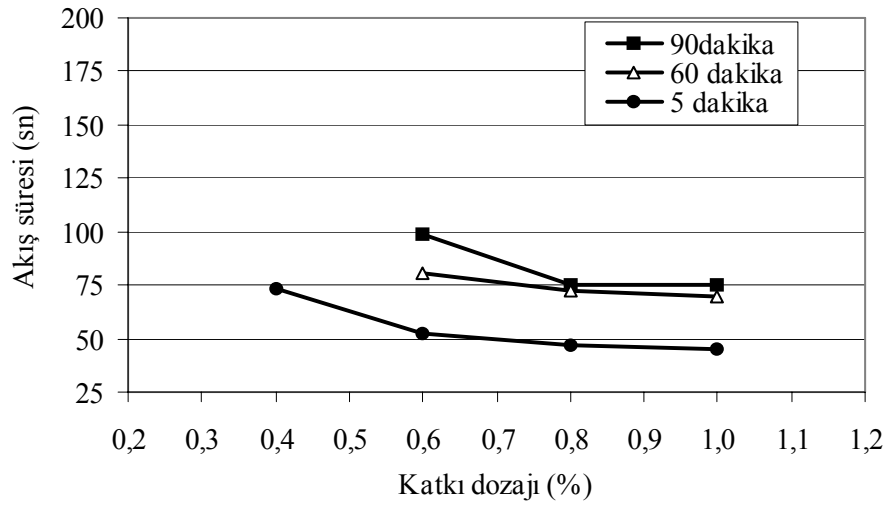
Şekil B.13 Ç13 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



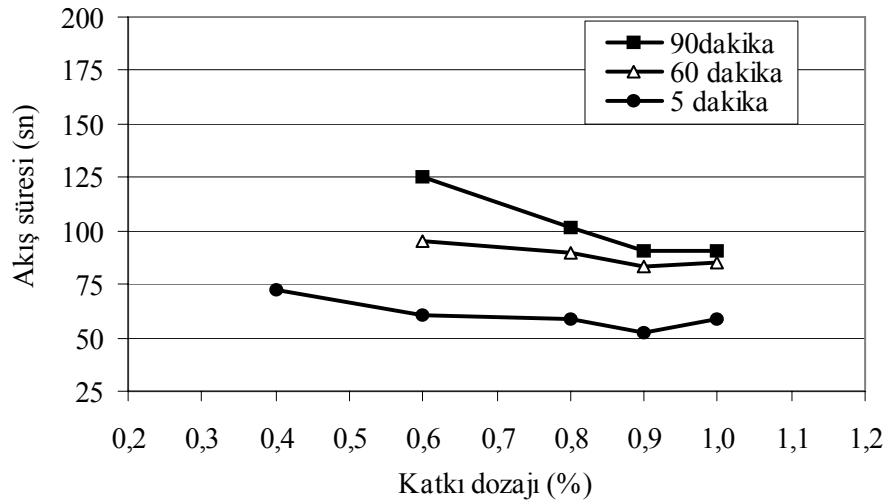
Şekil B.14 Ç14 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



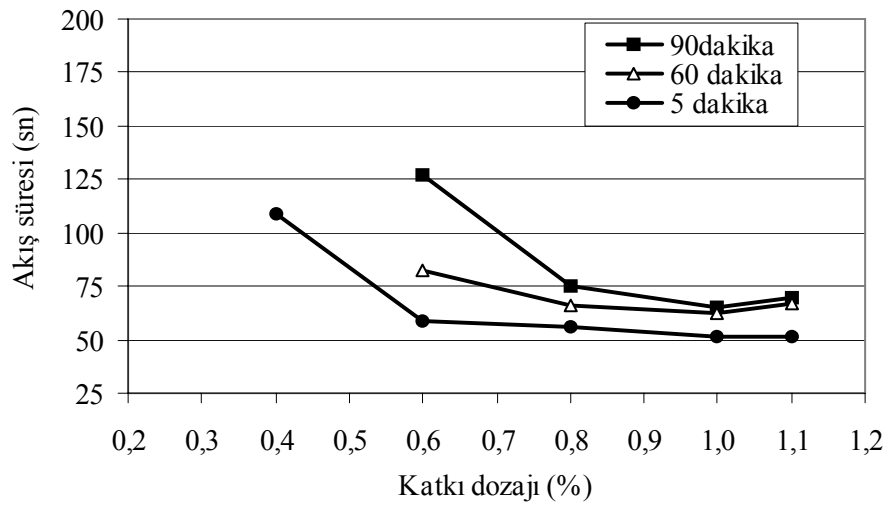
Şekil B.15 Ç15 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



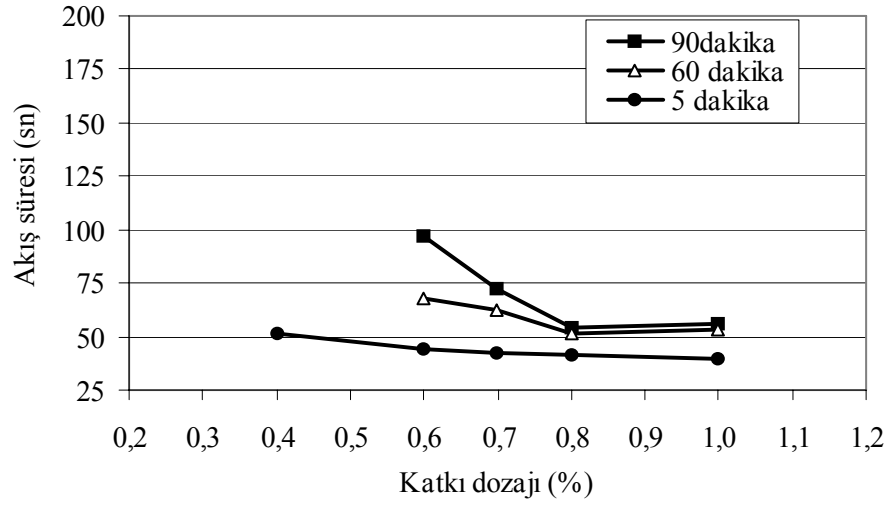
Şekil B.16 Ç16 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil B.17 Ç17 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil B.18 Ç18 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

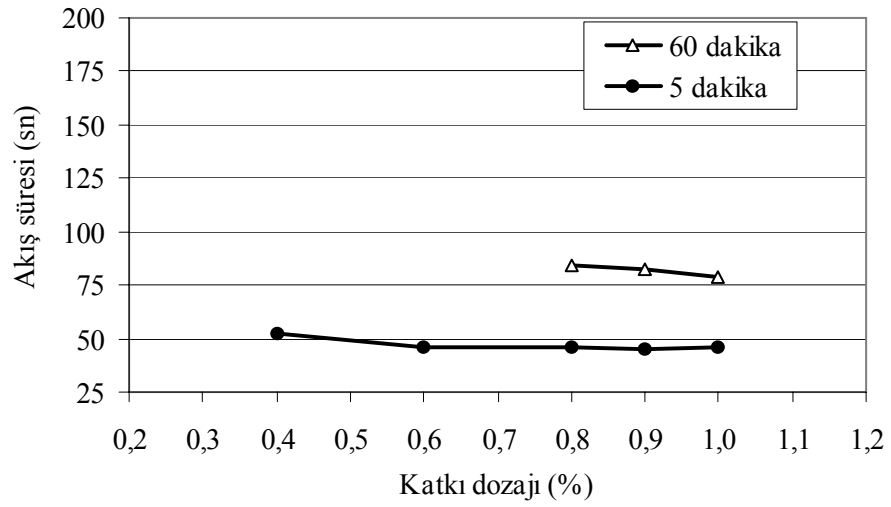


Şekil B.19 Ç19 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

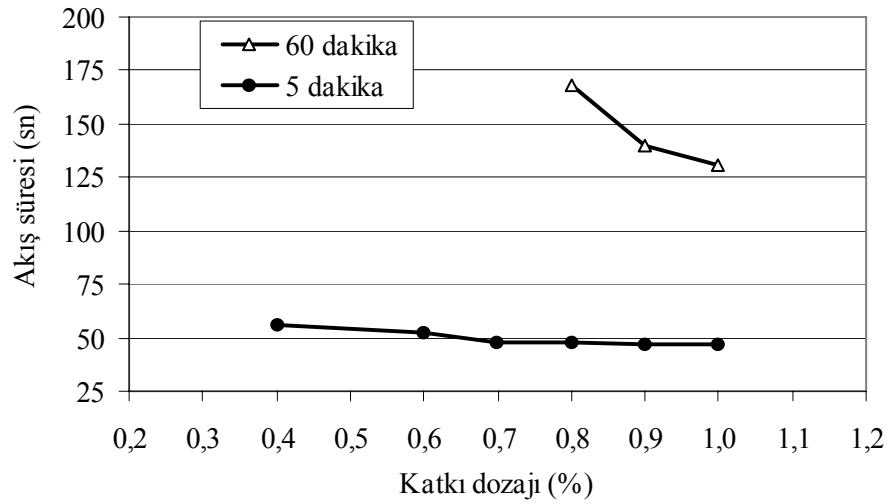
\*Malzeme yetersizliğinden dolayı S2 katkısı ve Ç20 çimentosu ile karışım hazırlanamamıştır.

## **EK C**

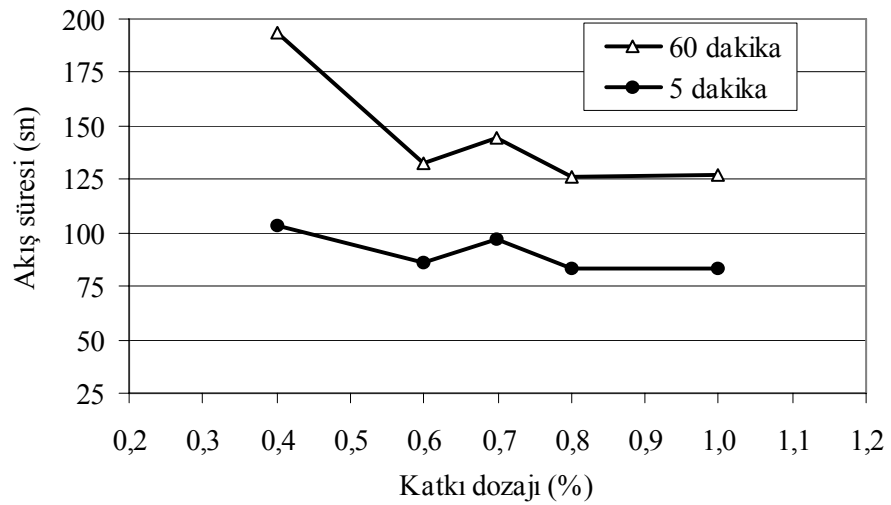
### **S3 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARININ AKIŞ SÜRELERİ**



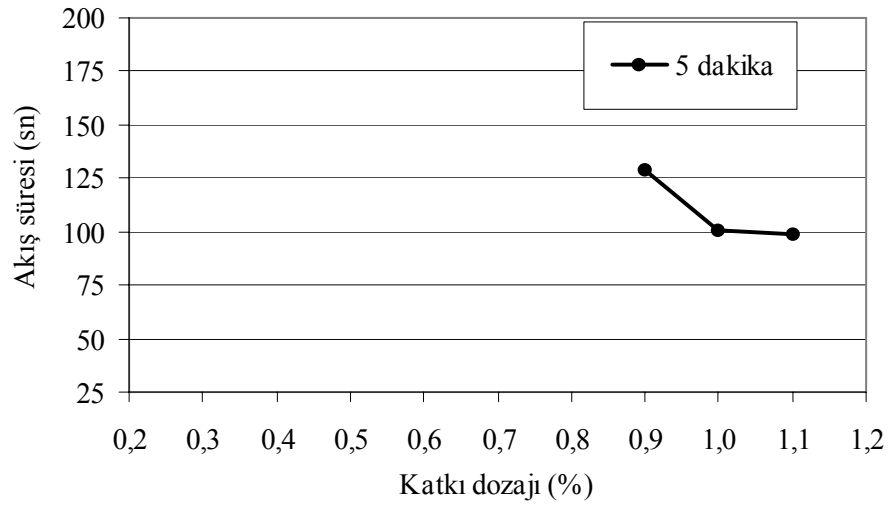
Şekil C.1 Ç1 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



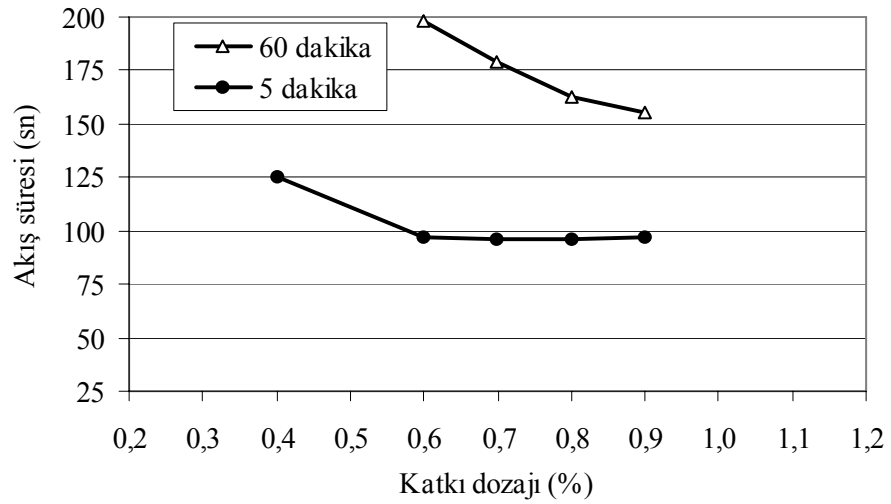
Şekil C.2 Ç2 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



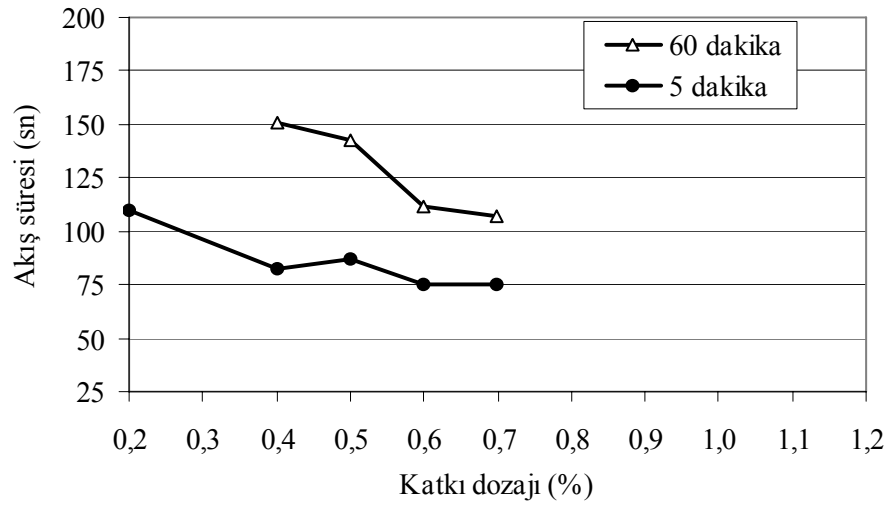
Şekil C.3 Ç3 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



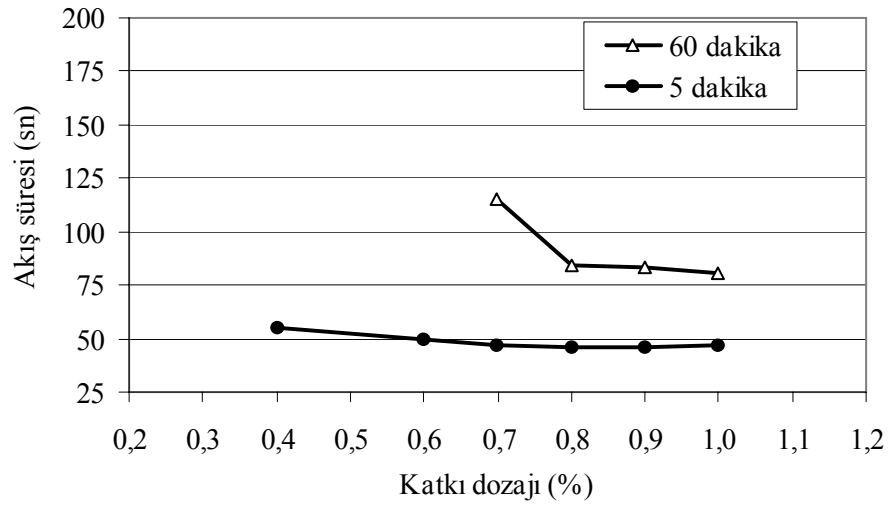
Şekil C.4 Ç4 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



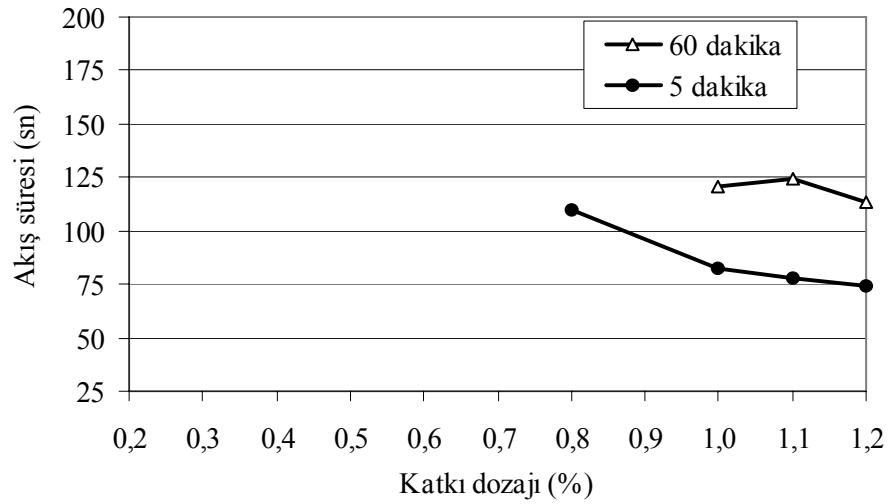
Şekil C.5 Ç5 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



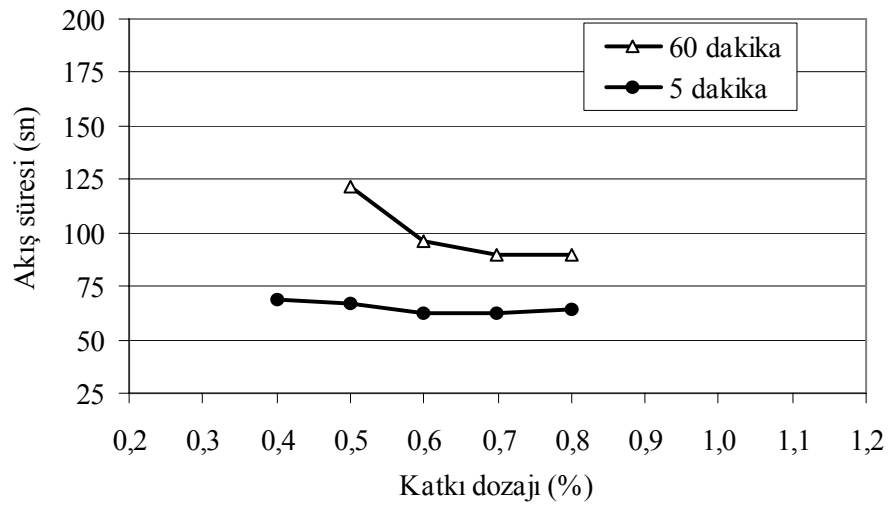
Şekil C.6 Ç6 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil C.7 Ç7 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

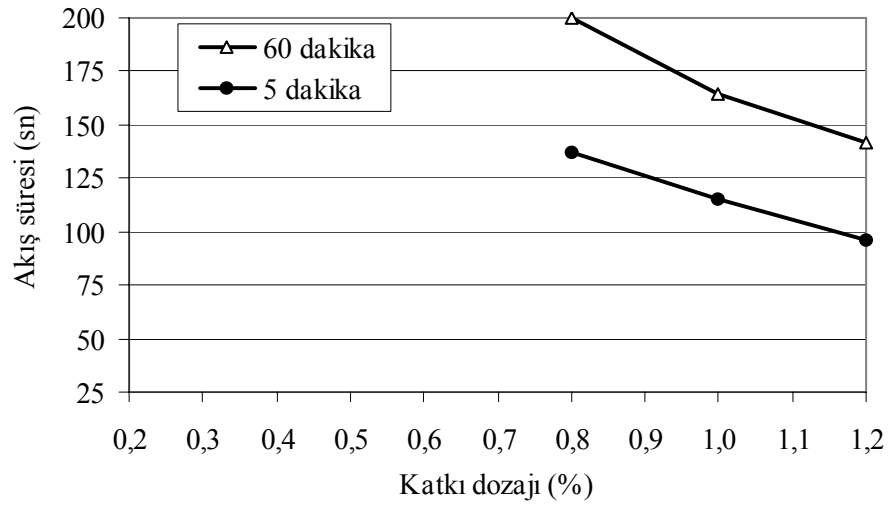


Şekil C.8 Ç8 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

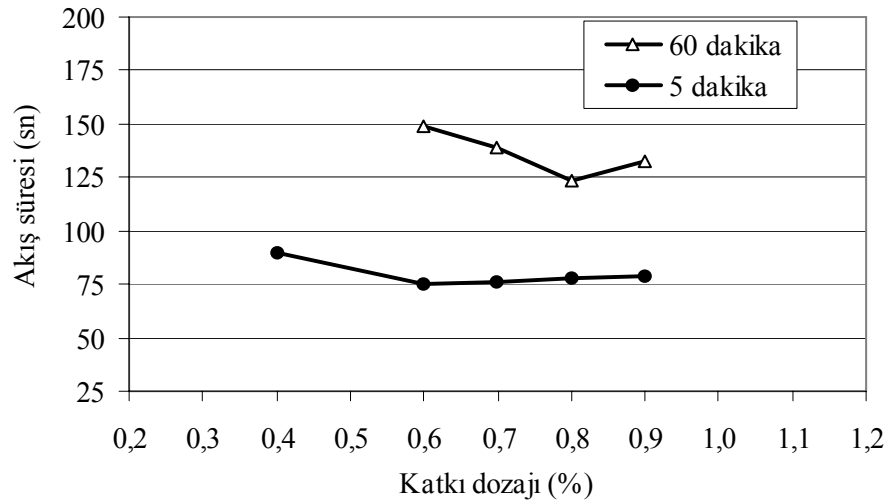


Şekil C.9 Ç9 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

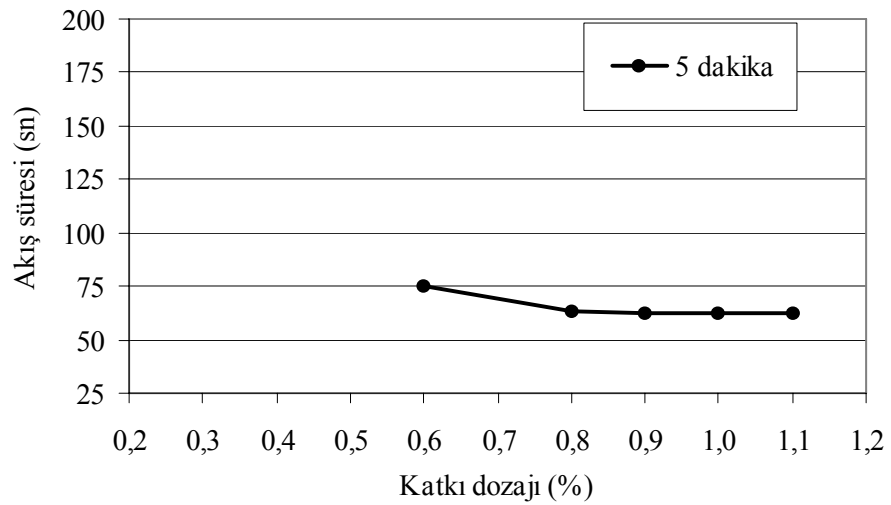




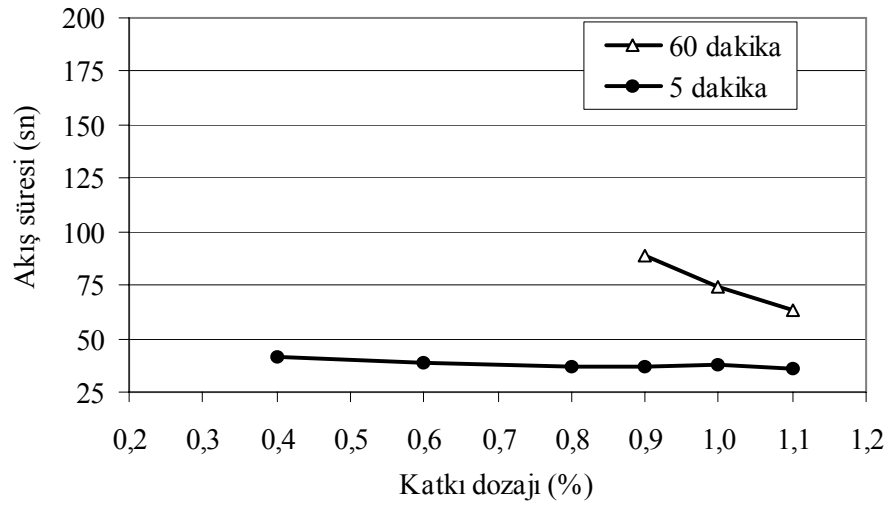
Şekil C.10 Ç10 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



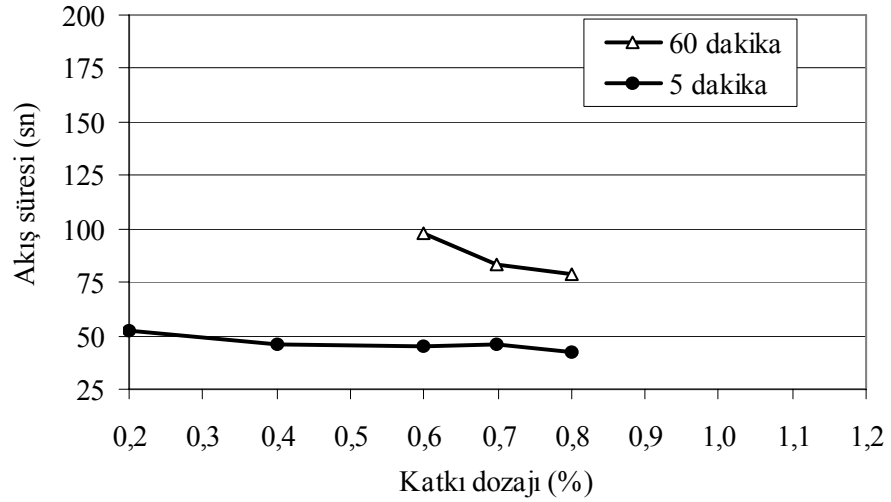
Şekil C.11 Ç11 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



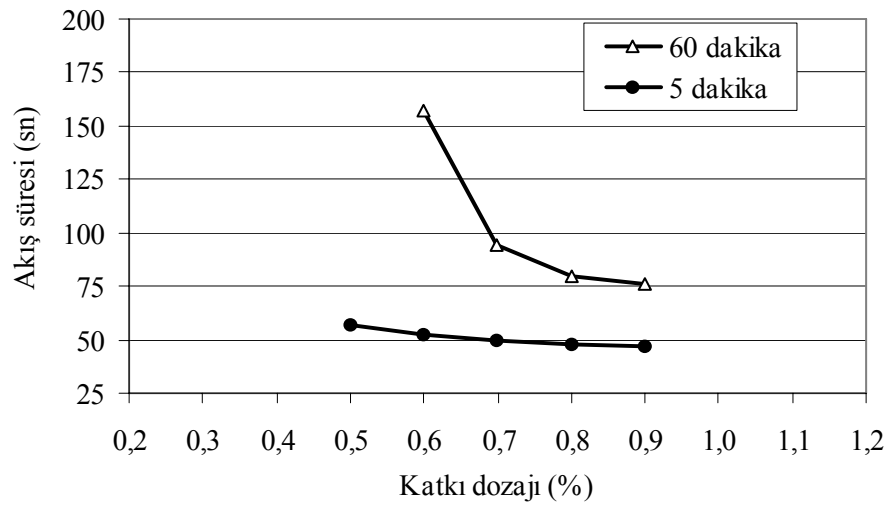
Şekil C.12 Ç12 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



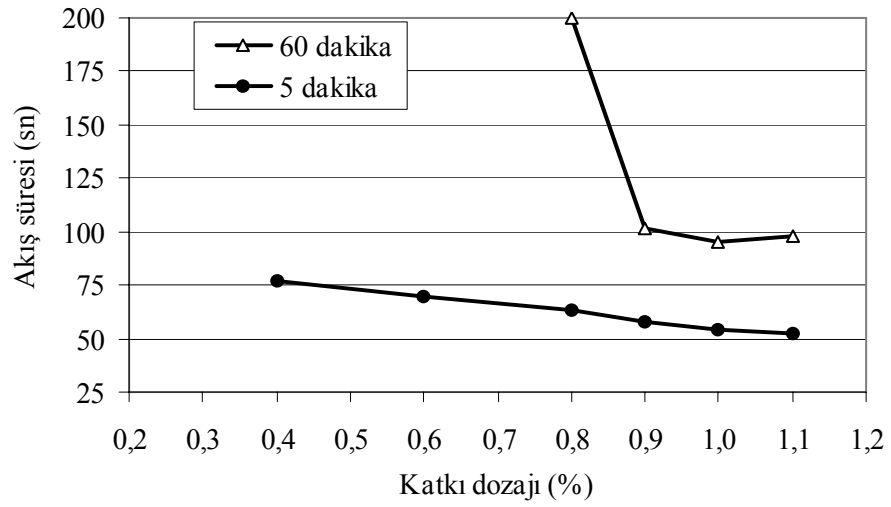
Şekil C.13 Ç13 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



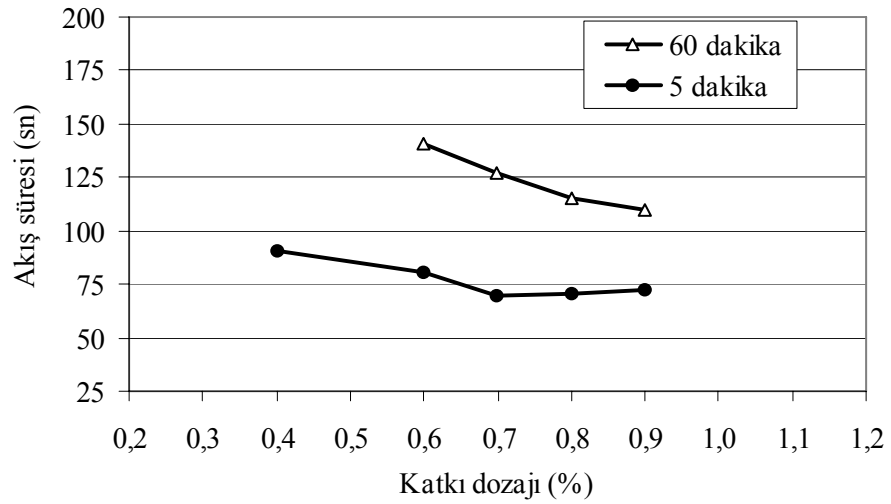
Şekil C.14 Ç14 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



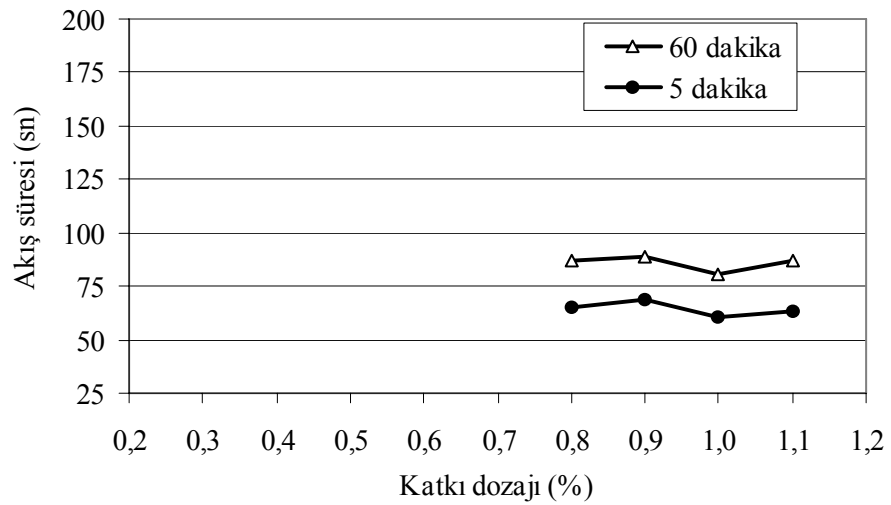
Şekil C.15 Ç15 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



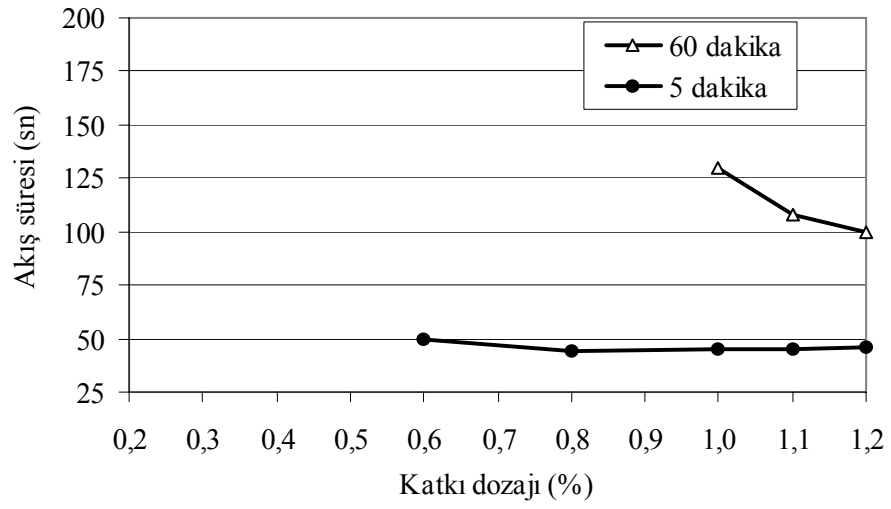
Şekil C.16 Ç16 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



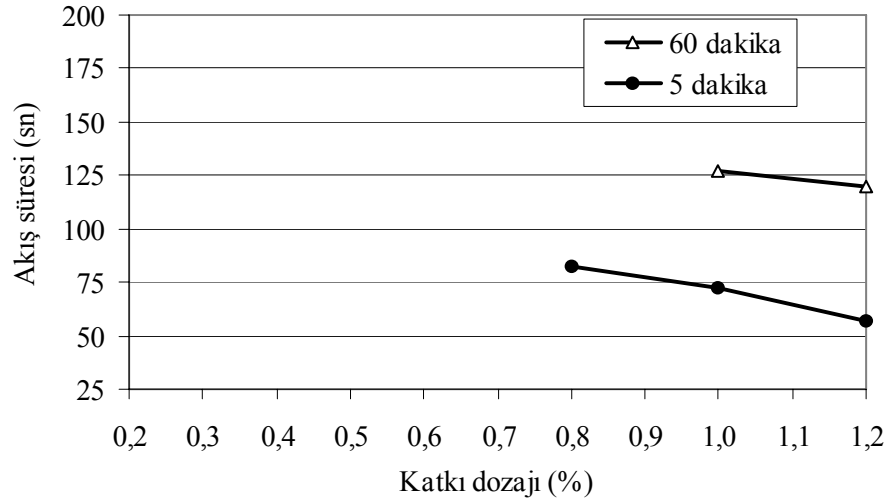
Şekil C.17 Ç17 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil C.18 Ç18 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



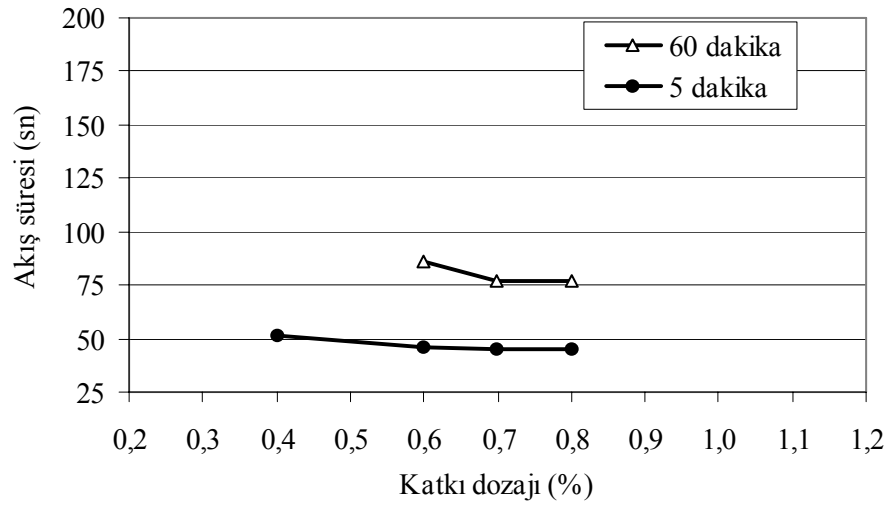
Şekil C.19 Ç19 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



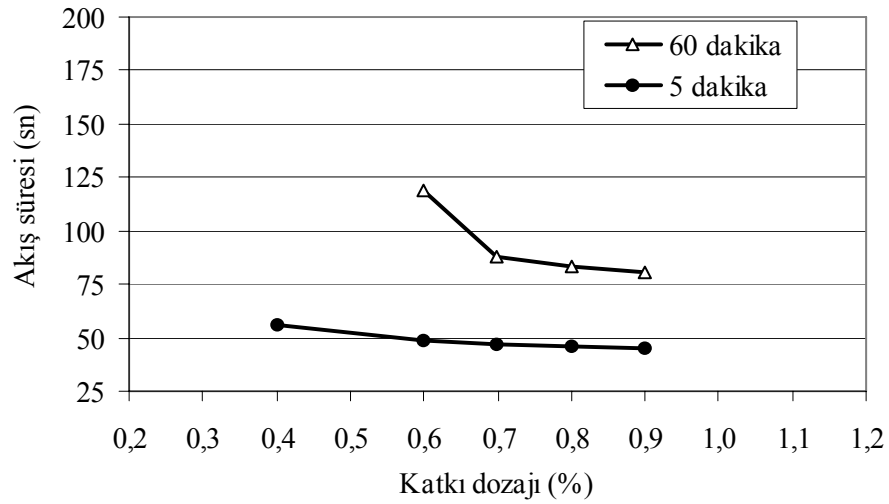
Şekil C.20 Ç20 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

## EK D

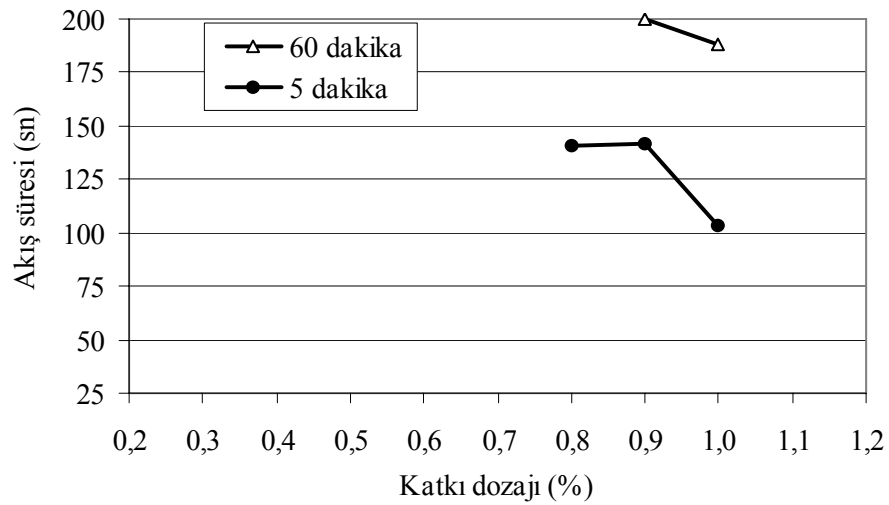
### **S4 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARININ AKIŞ SÜRELERİ**



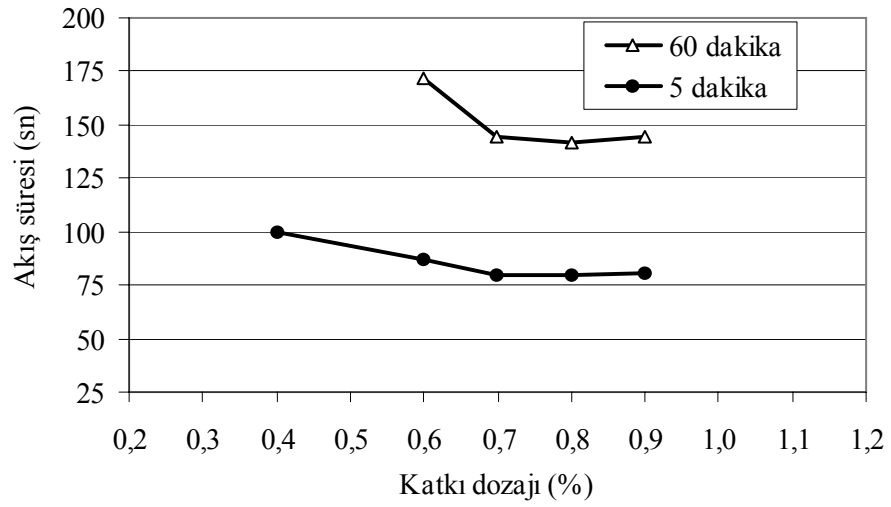
Şekil D.1 Ç1 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



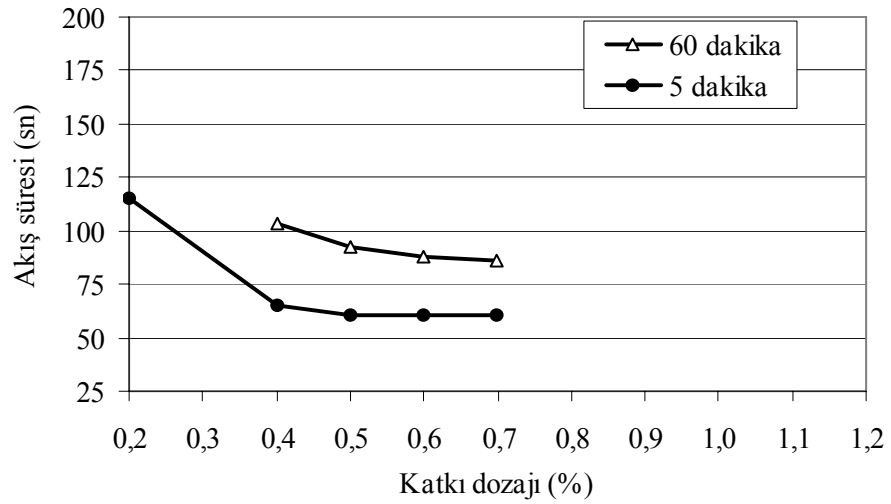
Şekil D.2 Ç2 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



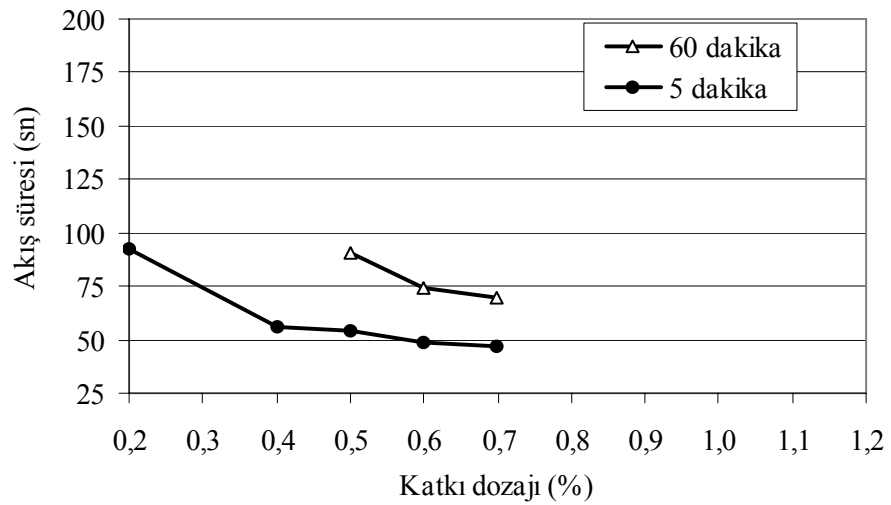
Şekil D.3 Ç4 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



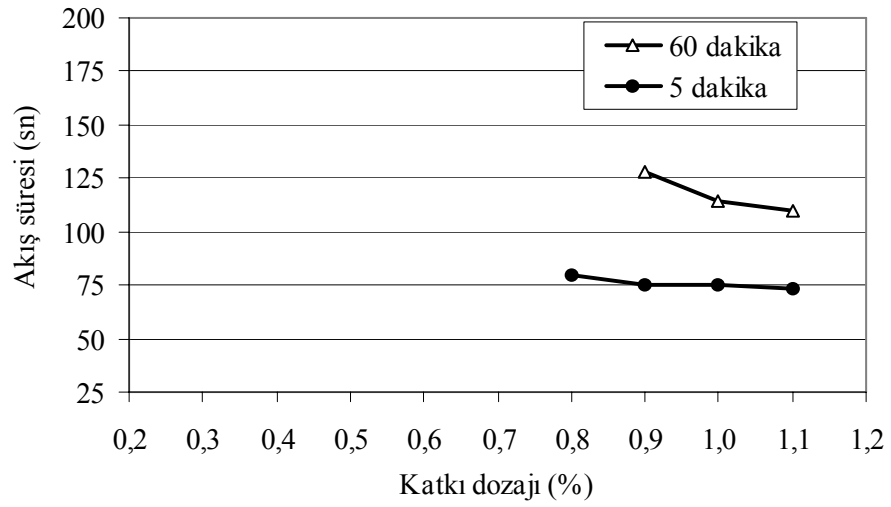
Şekil D.4 Ç5 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



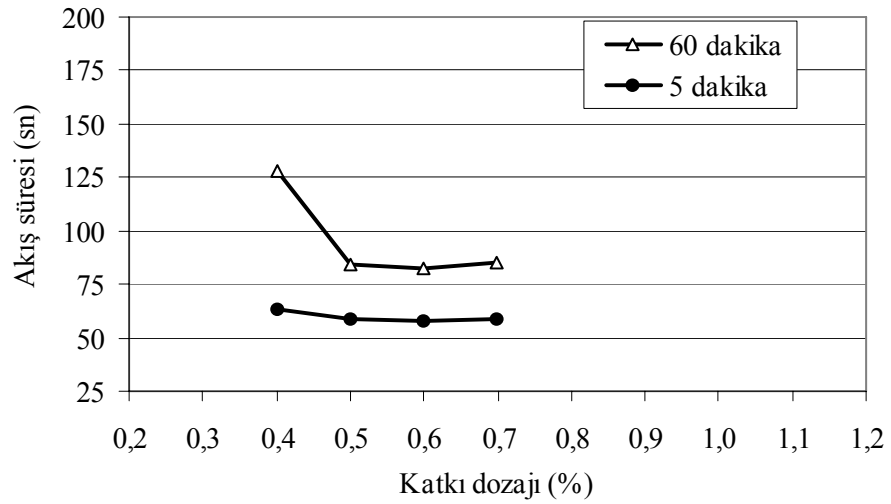
Şekil D.5 Ç6 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



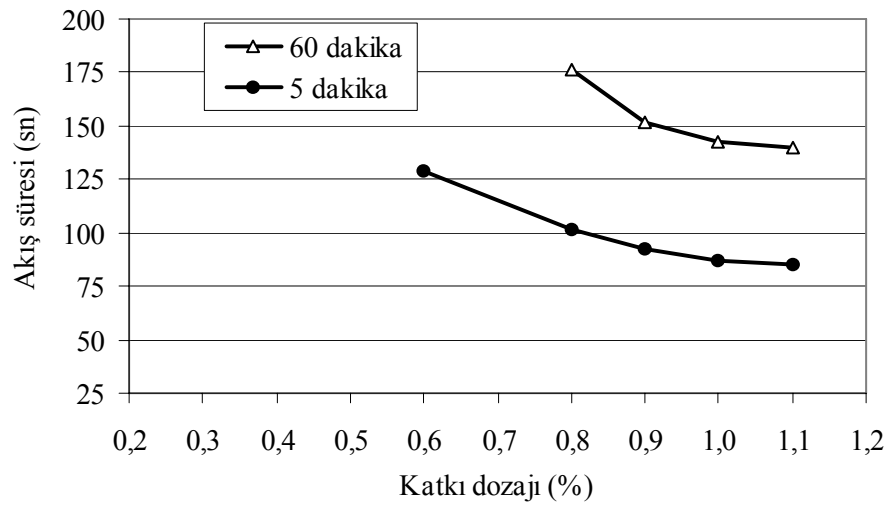
Şekil D.6 Ç7 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil D.7 Ç8 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

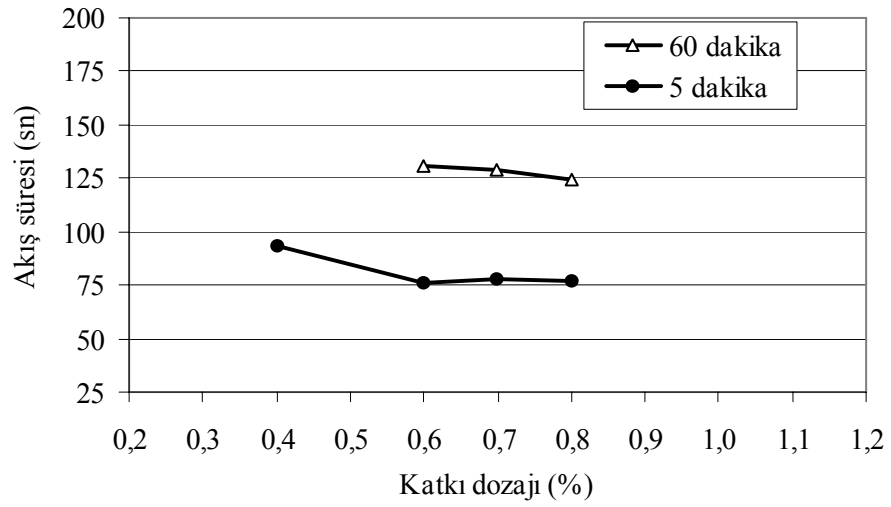


Şekil D.8 Ç9 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

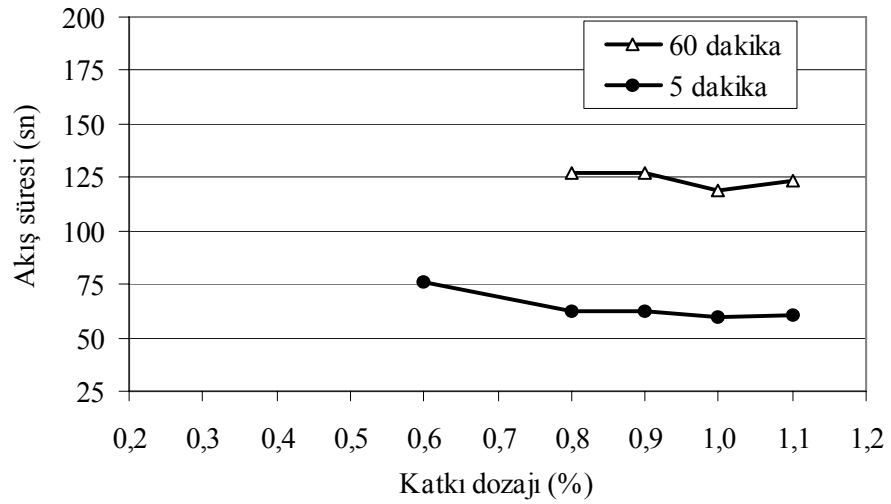


Şekil D.9 Ç10 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

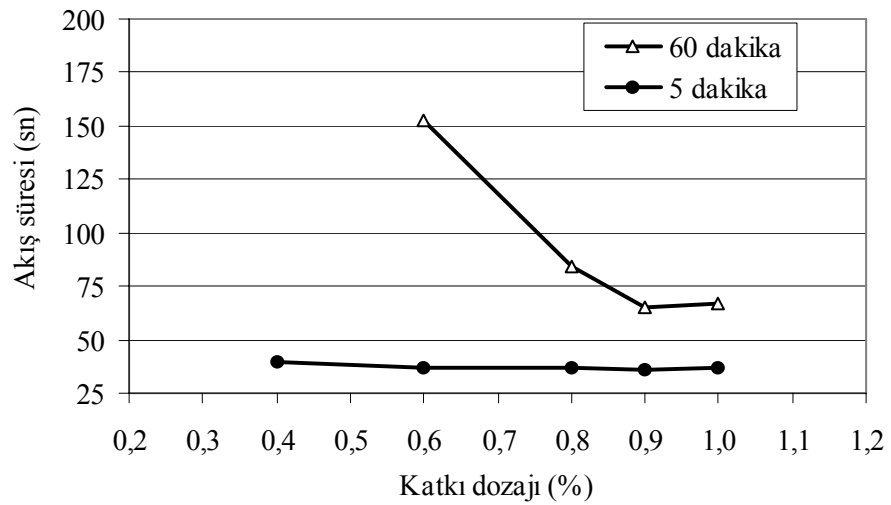




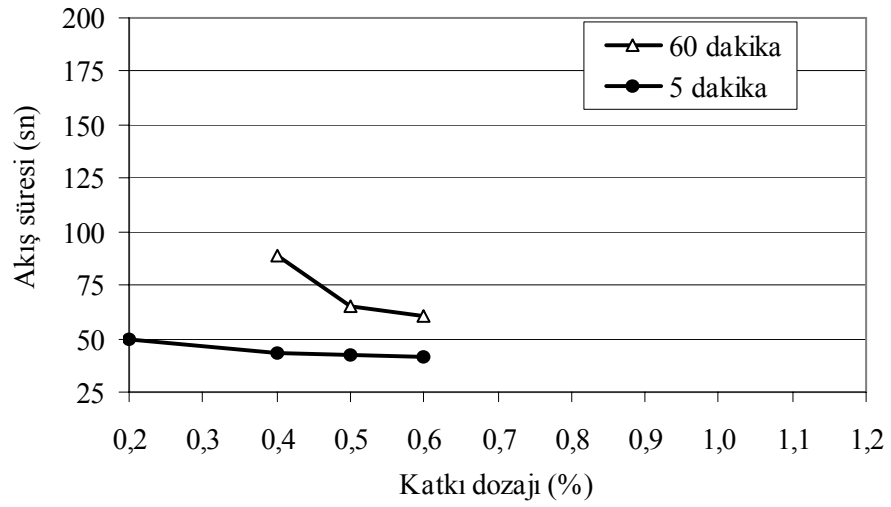
Şekil D.10 Ç11 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



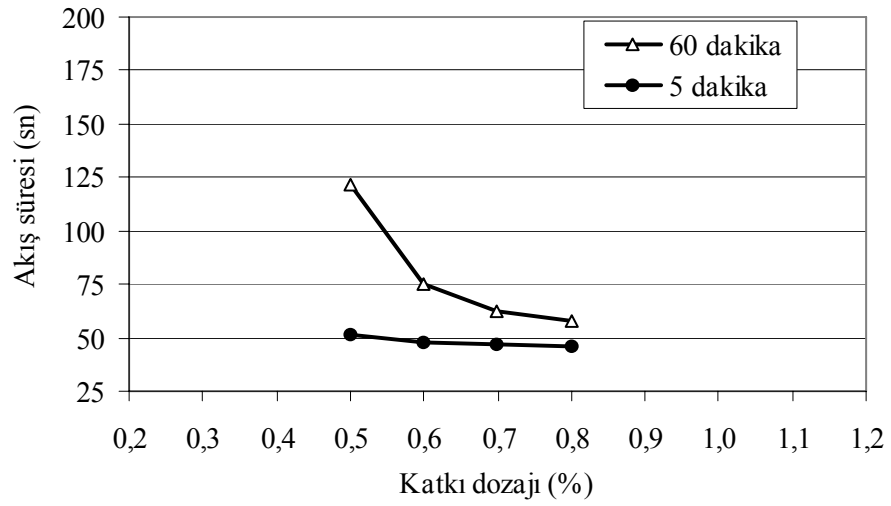
Şekil D.11 Ç12 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



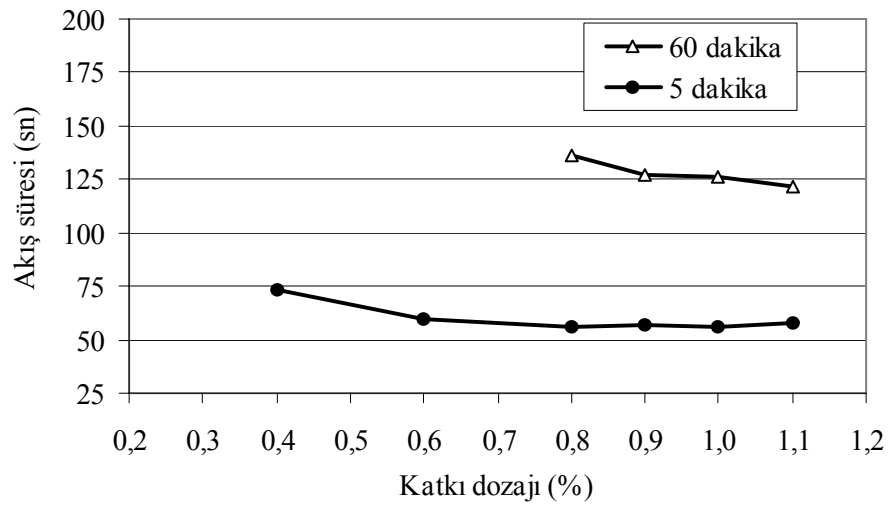
Şekil D.12 Ç13 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



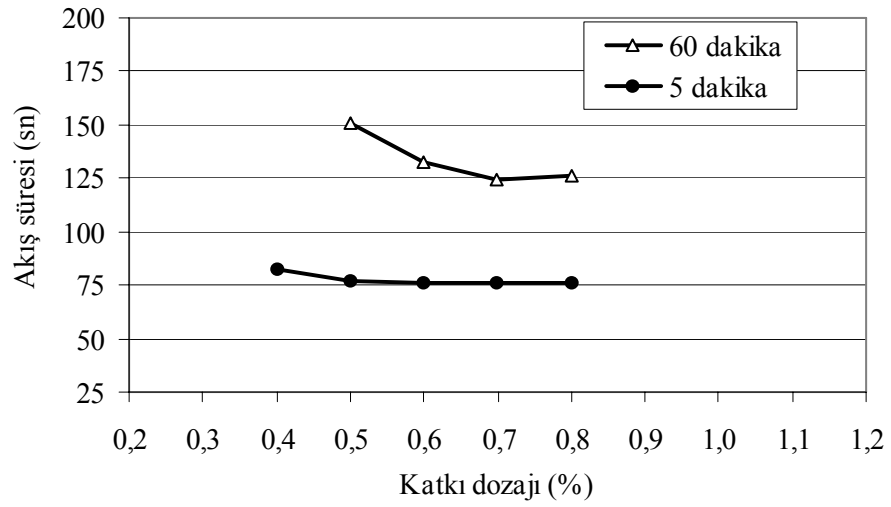
Şekil D.13 Ç14 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



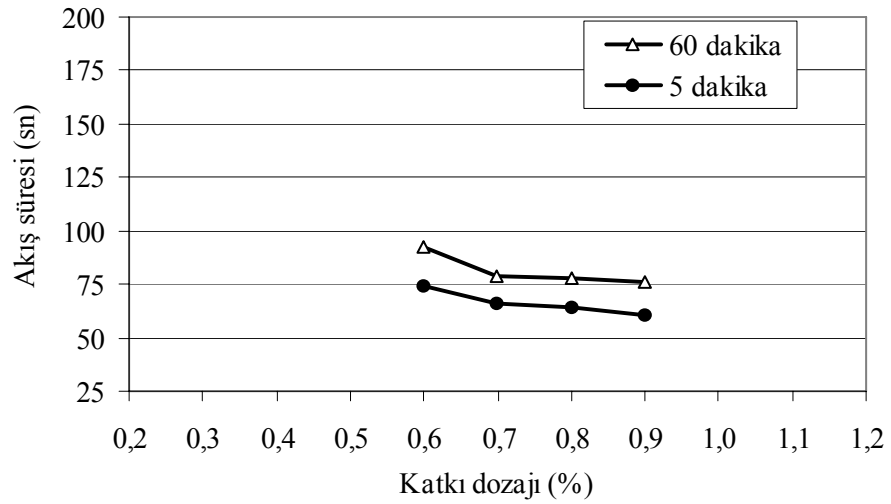
Şekil D.14 Ç15 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



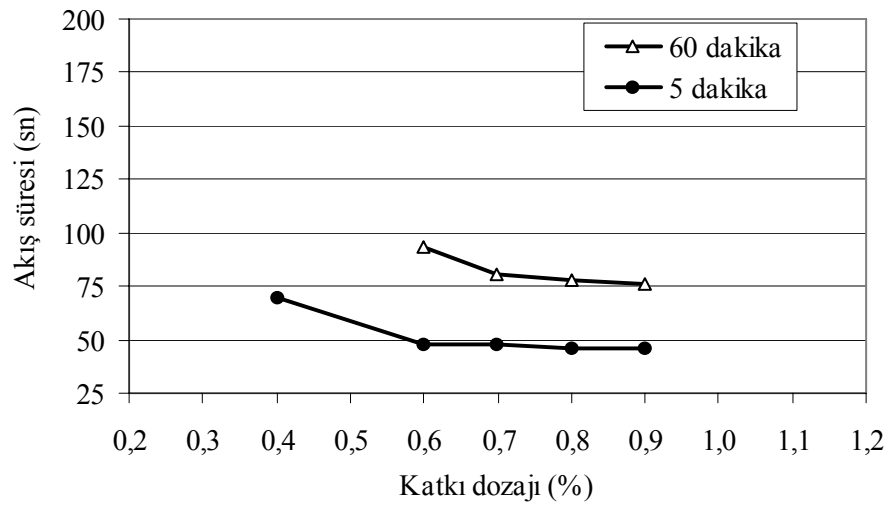
Şekil D.15 Ç16 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



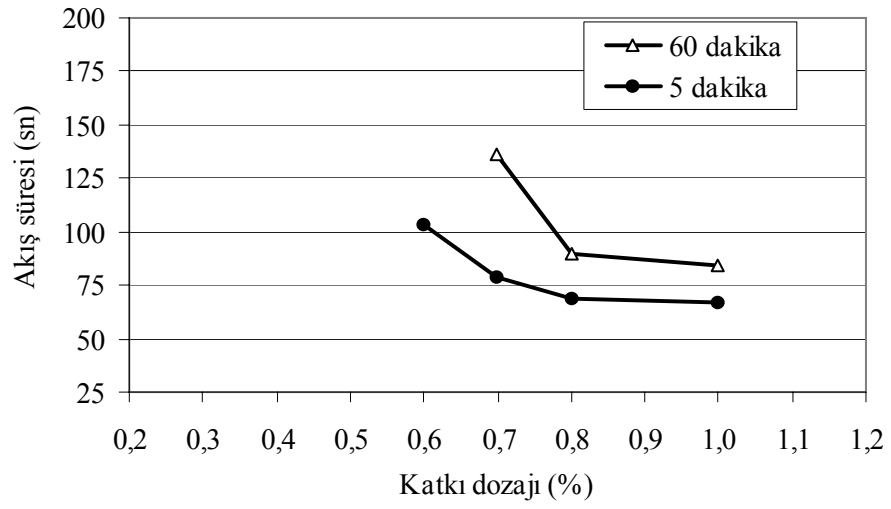
Şekil D.16 Ç17 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil D.17 Ç18 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi



Şekil D.18 Ç19 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

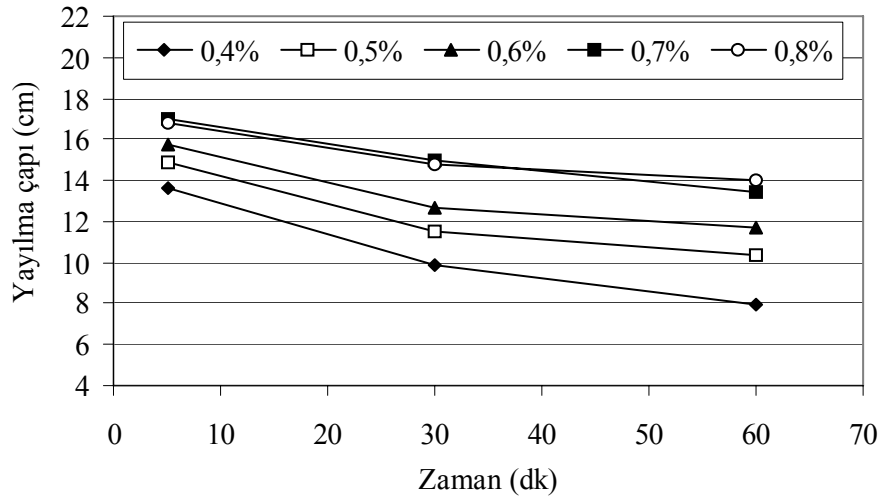


Şekil D.19 Ç20 çimentosu için katkı dozajına bağlı olarak akış süresinin değişimi

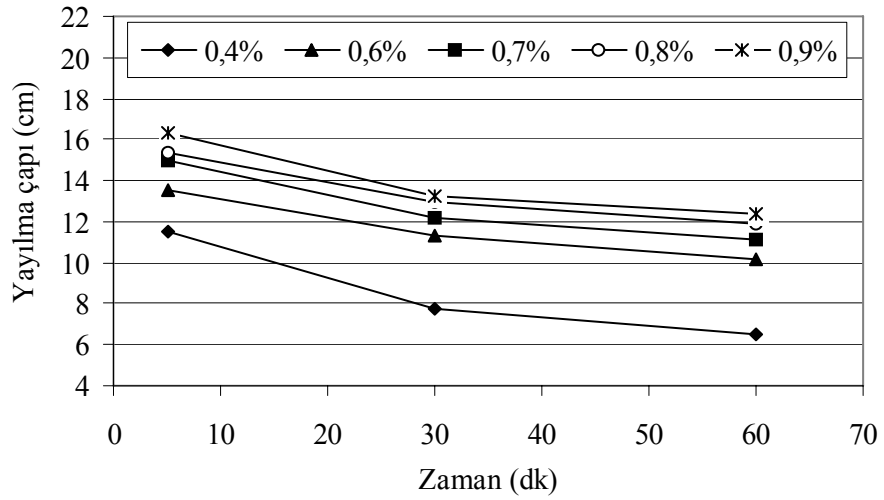
\*S4 katkısı ve Ç3 çimentosu ile hazırlanan karışımda deneysel hata oluştuğu için gösterilmemiştir.

**EK E**

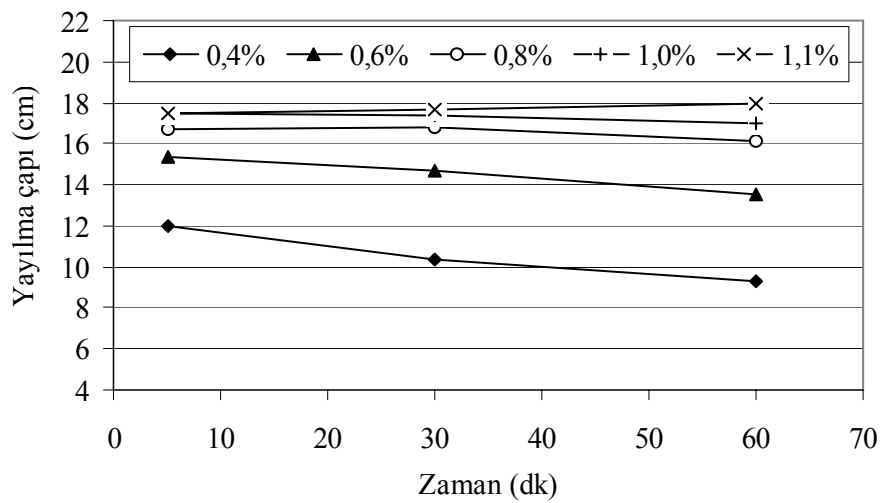
**S1 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARINA AİT MİNİ  
ÇÖKME (YAYILMA) DEĞERLERİ**



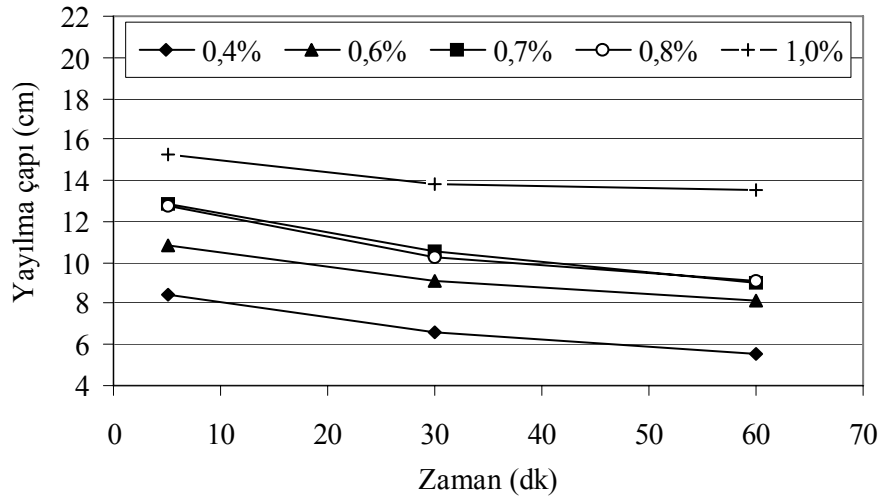
Şekil E.1 Ç1 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



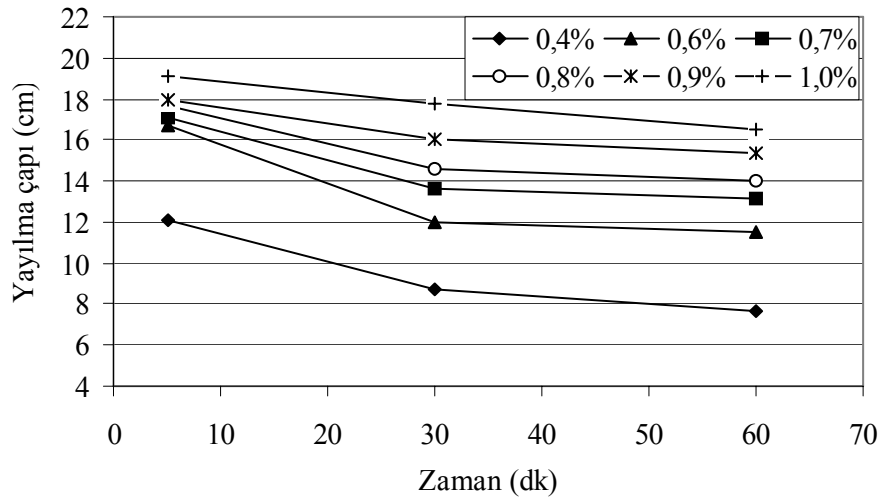
Şekil E.2 Ç2 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



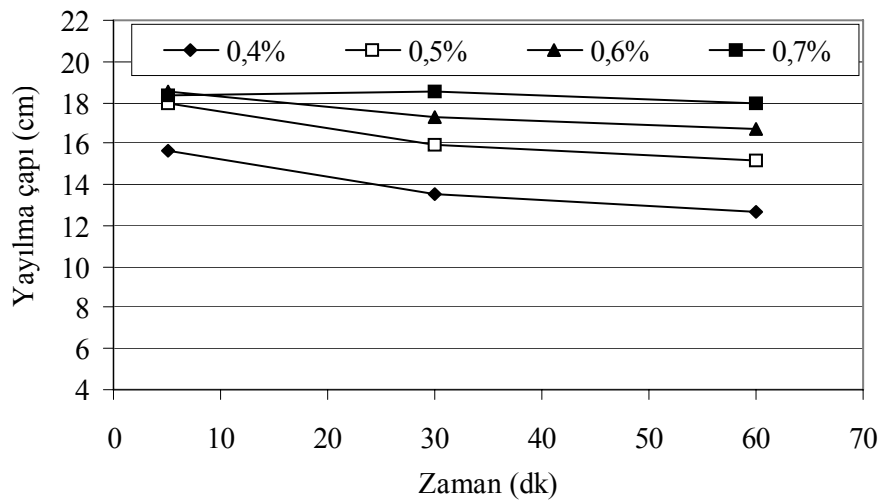
Şekil E.3 Ç3 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



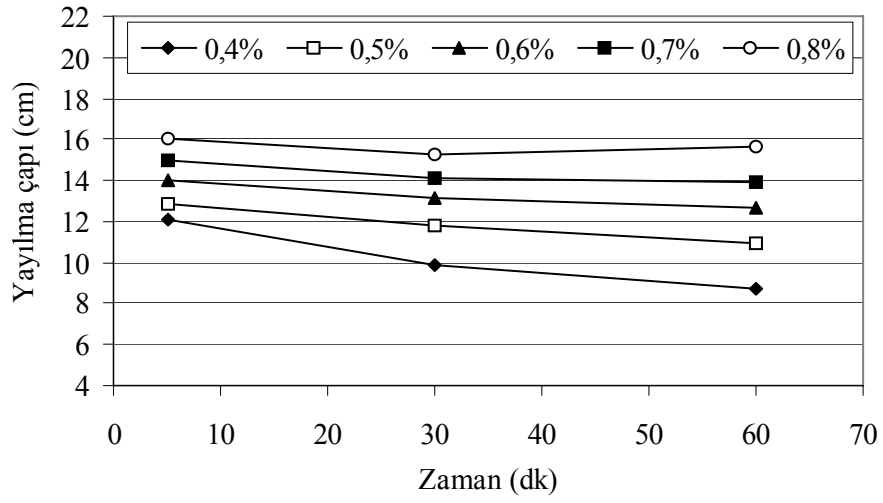
Şekil E.4 Ç4 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



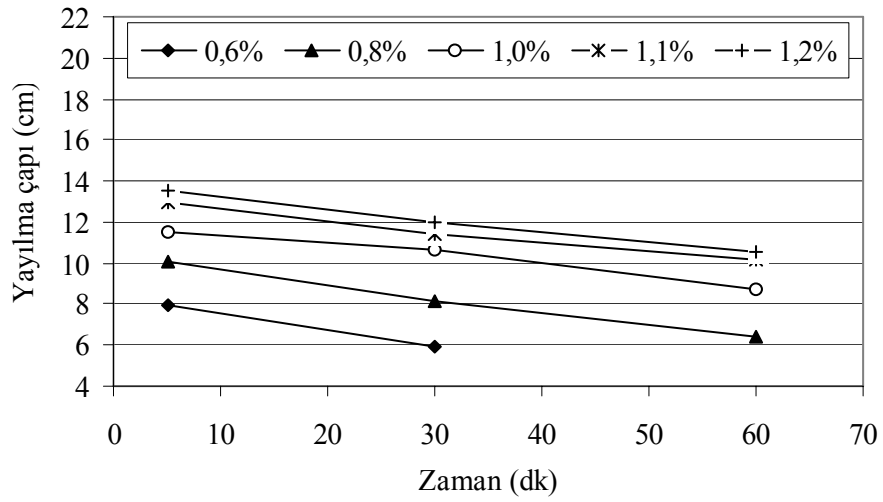
Şekil E.5 Ç5 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



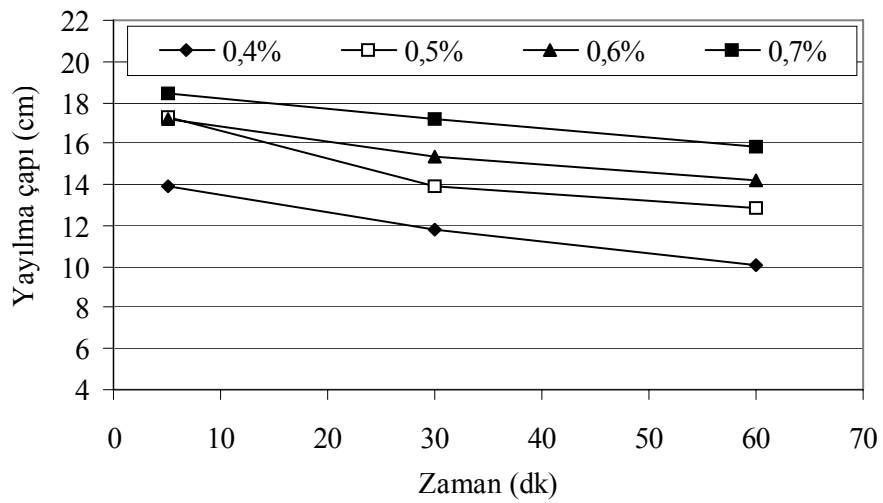
Şekil E.6 Ç6 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil E.7 Ç7 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

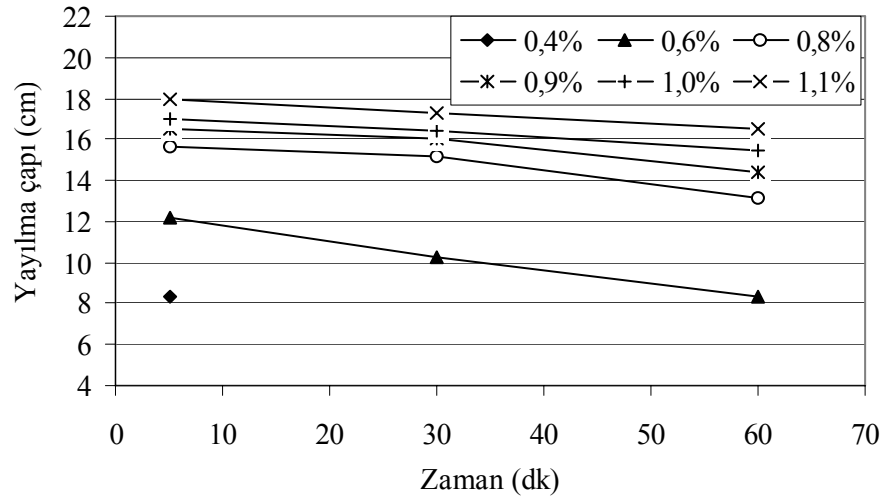


Şekil E.8 Ç8 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

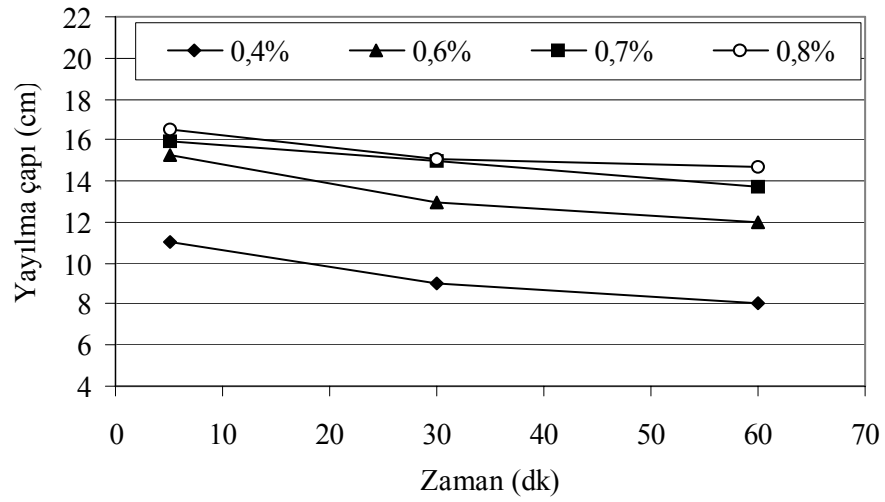


Şekil E.9 Ç9 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

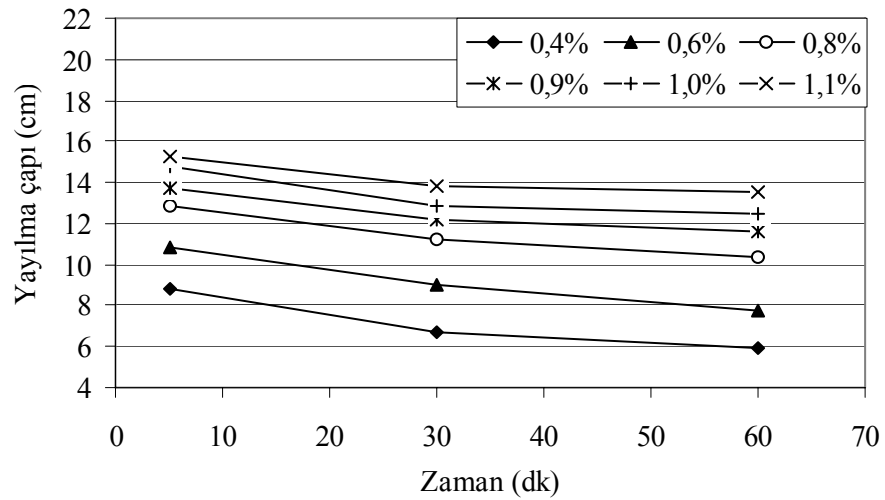




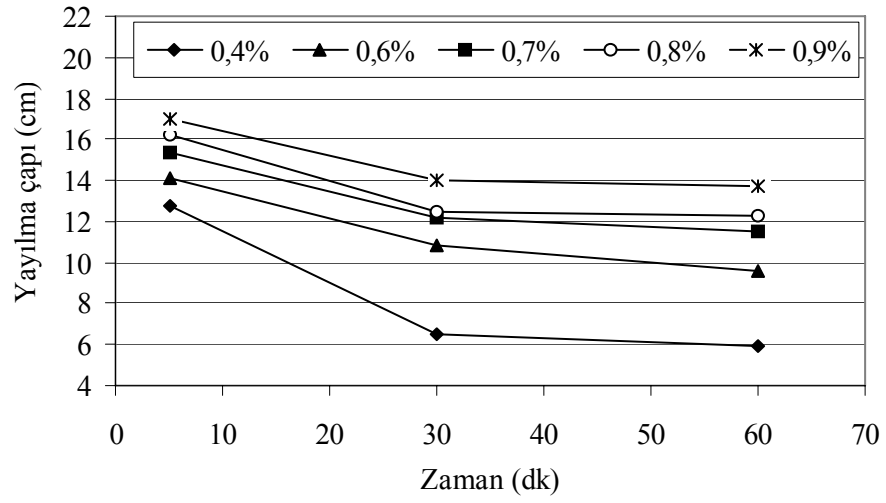
Şekil E.10 Ç10 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



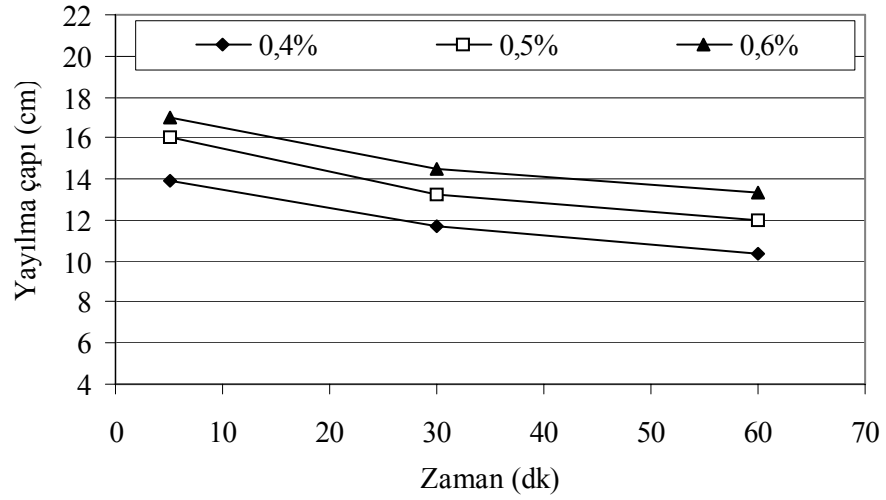
Şekil E.11 Ç11 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



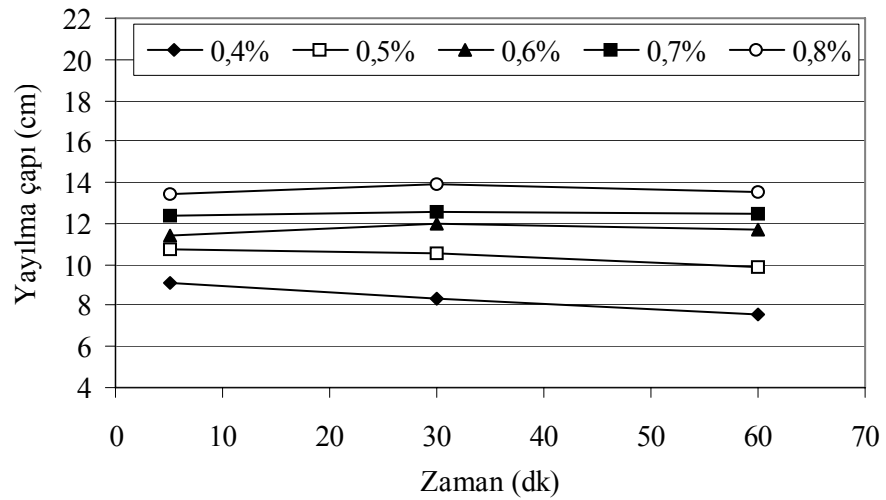
Şekil E.12 Ç12 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



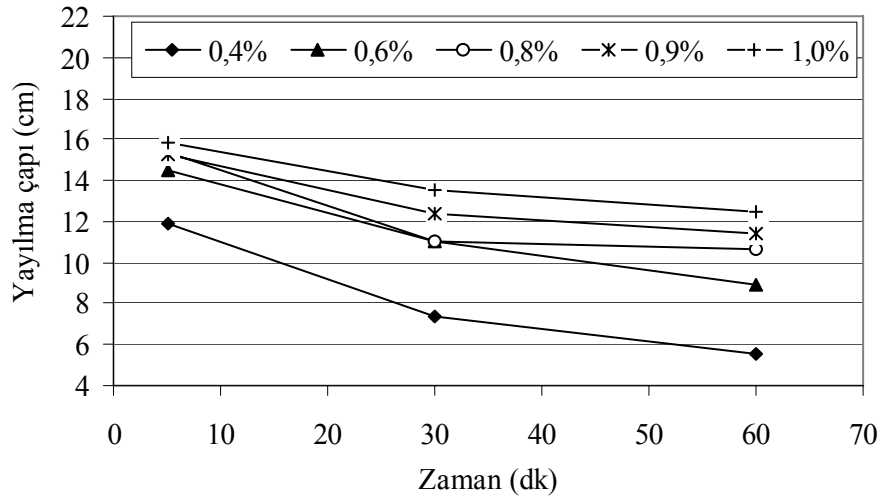
Şekil E.13 Ç13 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



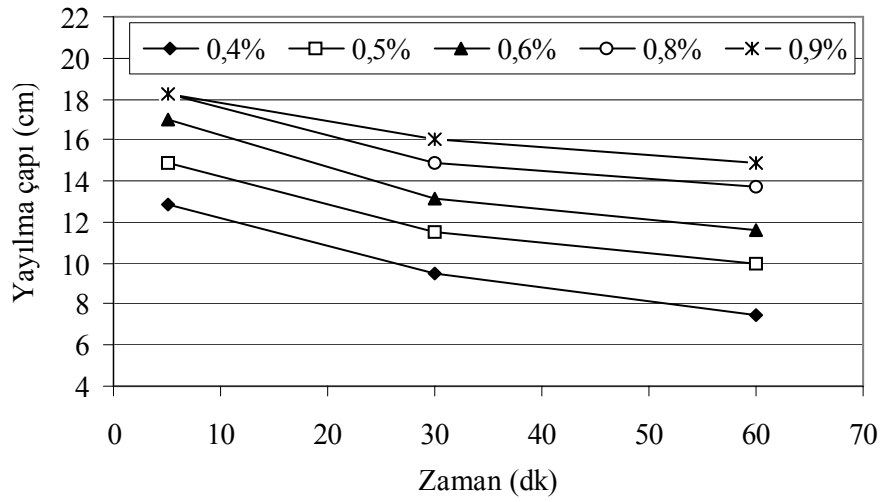
Şekil E.14 Ç14 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



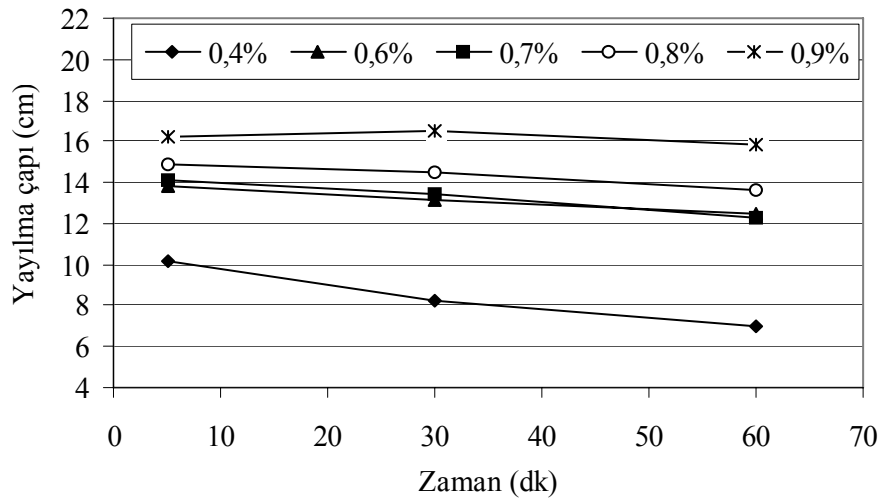
Şekil E.15 Ç15 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



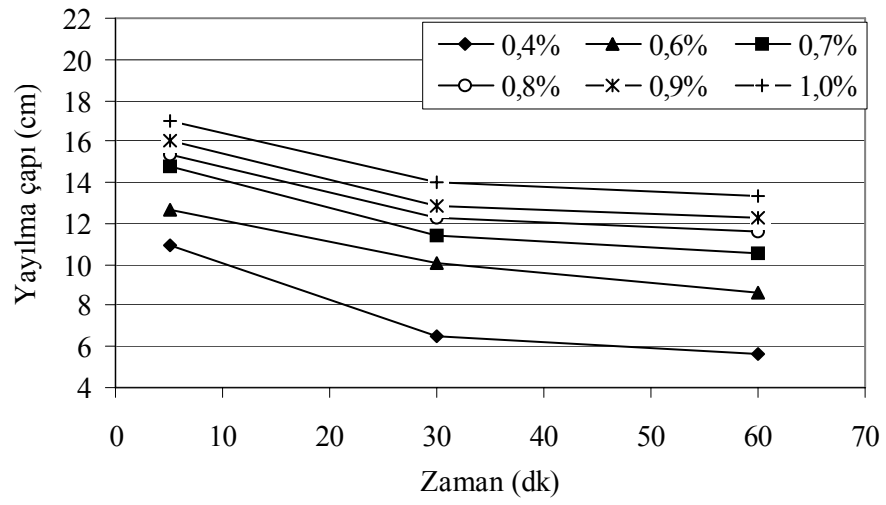
Şekil E.16 Ç16 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



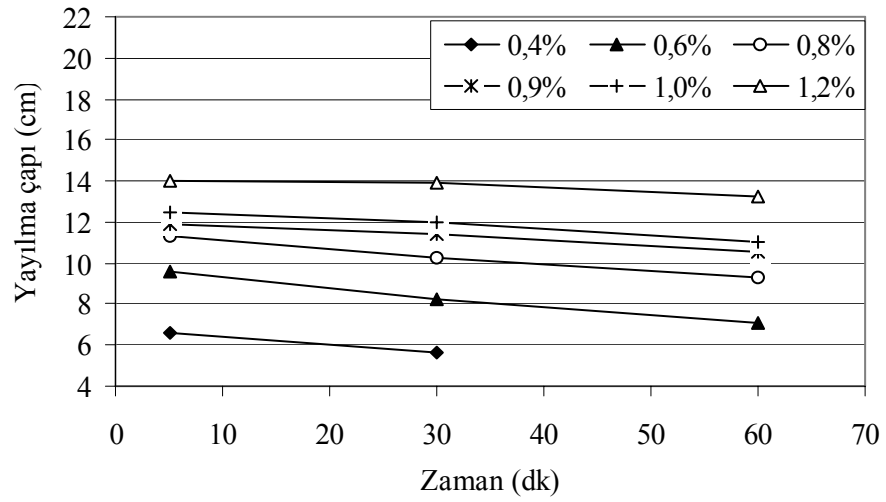
Şekil E.17 Ç17 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil E.18 Ç18 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

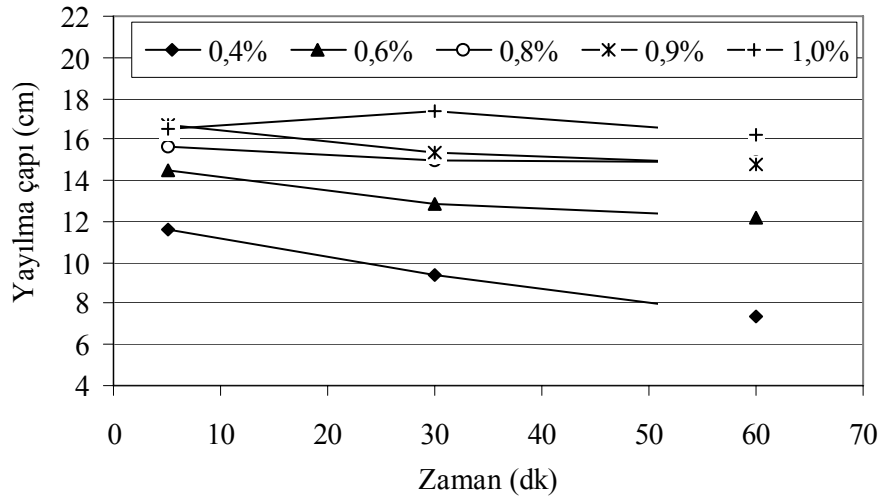


Şekil E.19 Ç19 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

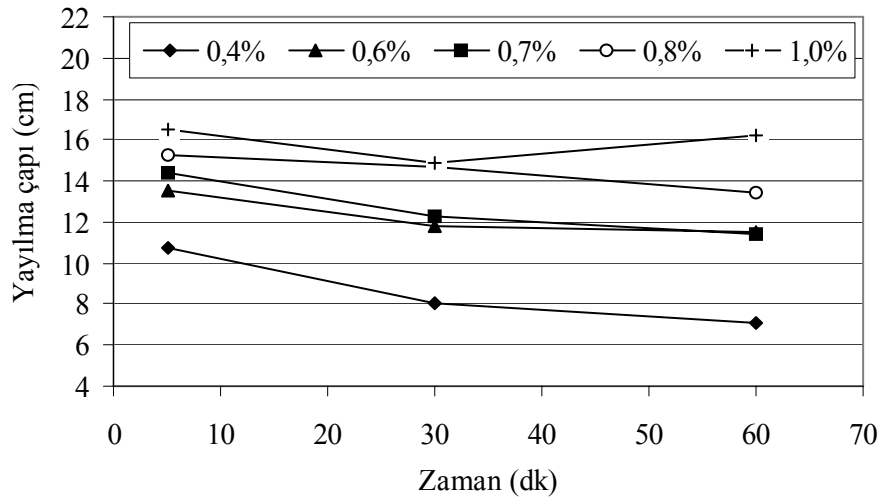


Şekil E.20 Ç20 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

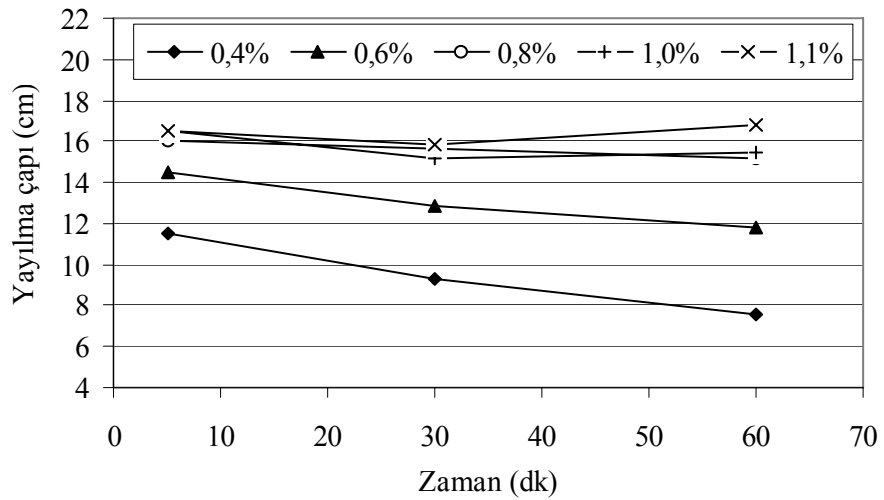
**EK F****S2 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARINA AİT MİNİ  
ÇÖKME (YAYILMA) DEĞERLERİ**



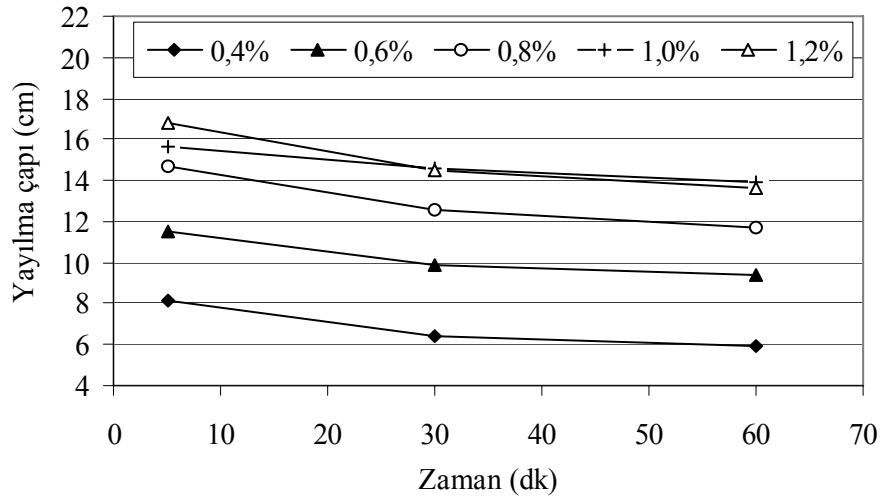
Şekil F.1 Ç1 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



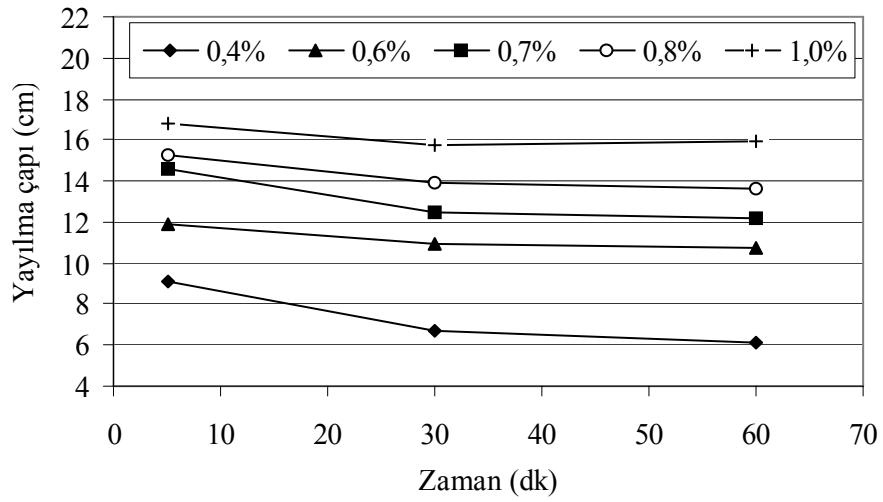
Şekil F.2 Ç2 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



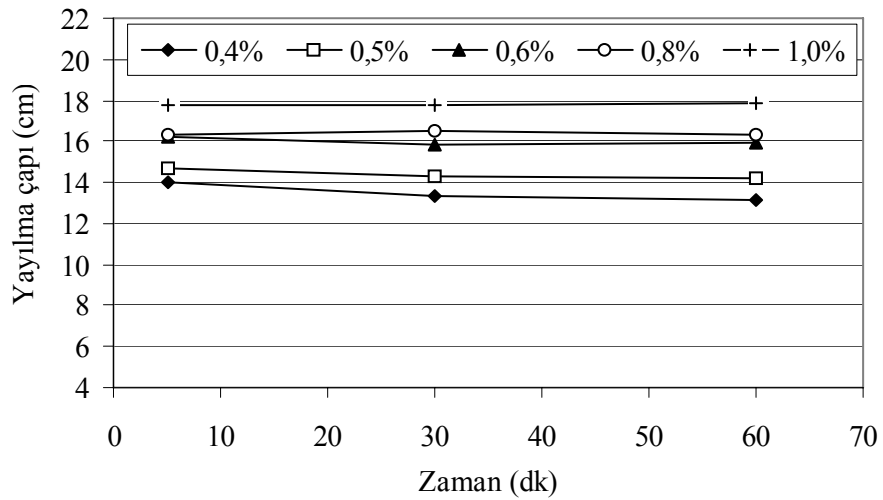
Şekil F.3 Ç3 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



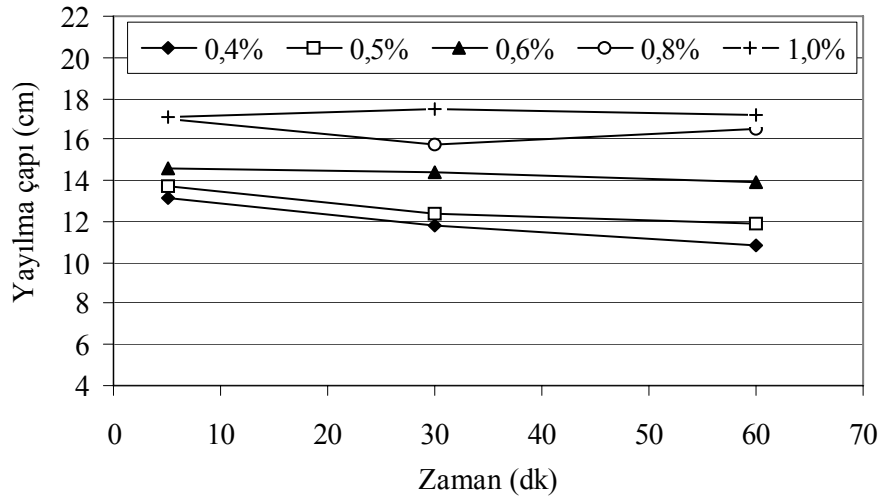
Şekil F.4 Ç4 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



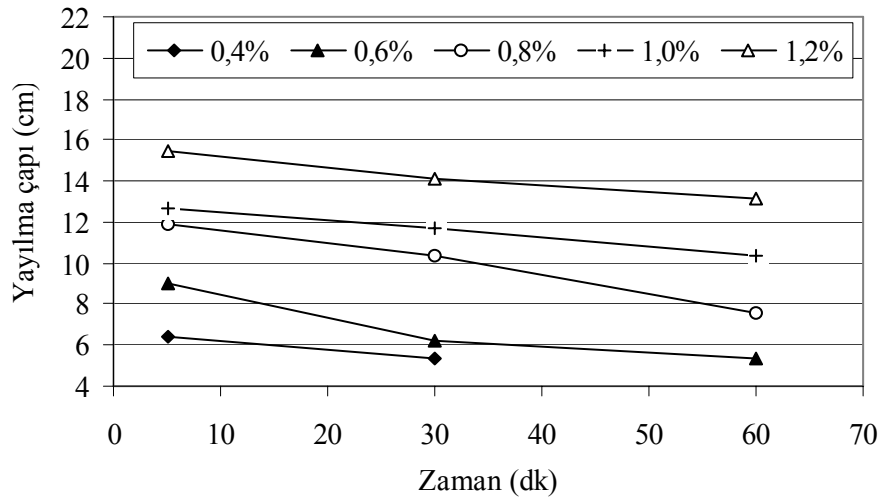
Şekil F.5 Ç5 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



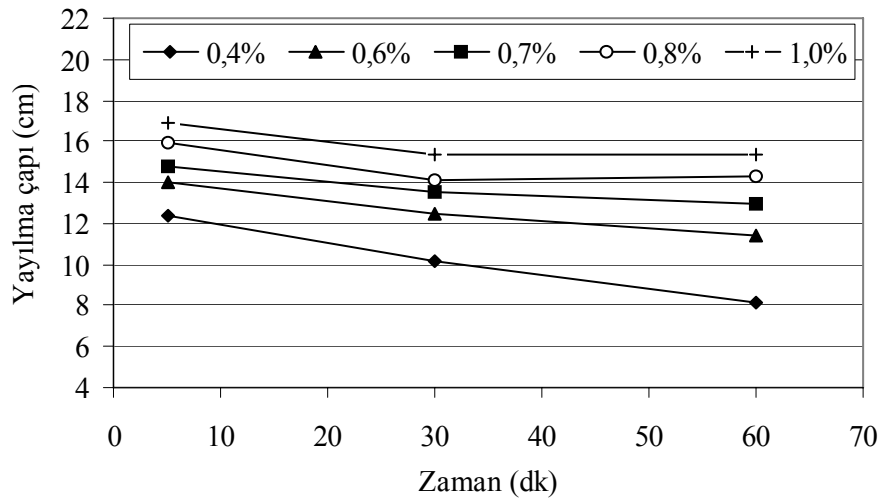
Şekil F.6 Ç6 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil F.7 Ç7 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

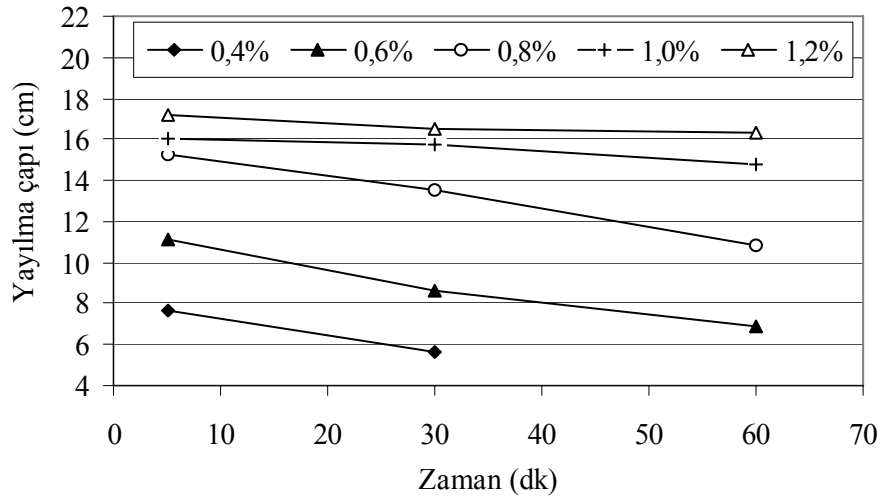


Şekil F.8 Ç8 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

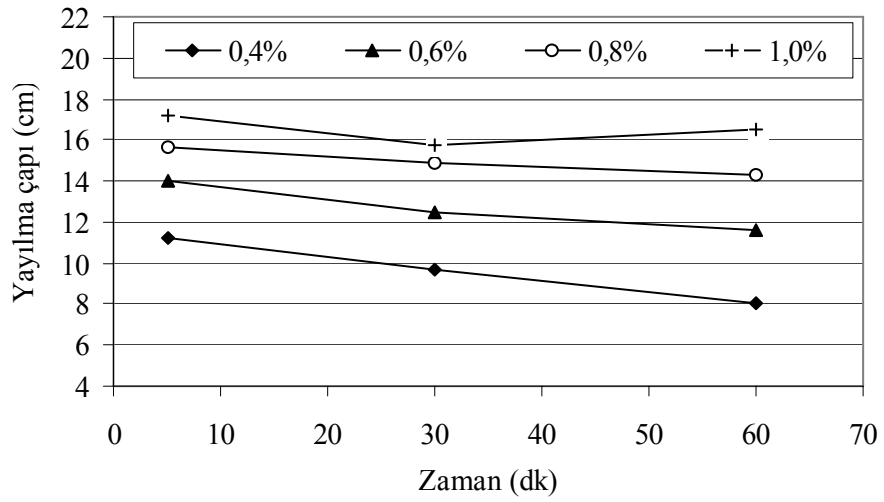


Şekil F.9 Ç9 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

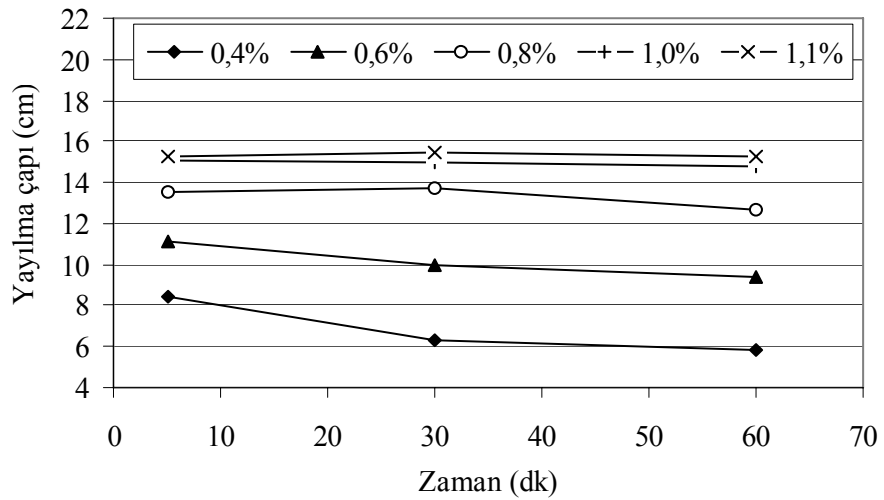




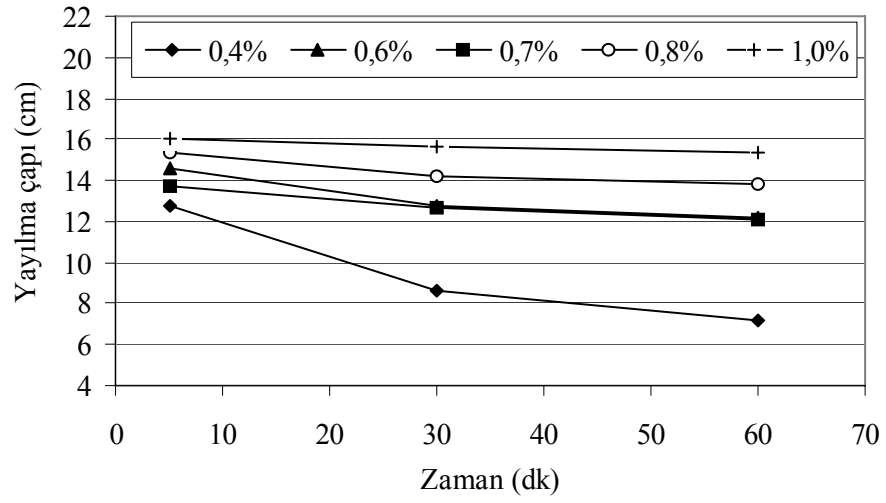
Şekil F.10 Ç10 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



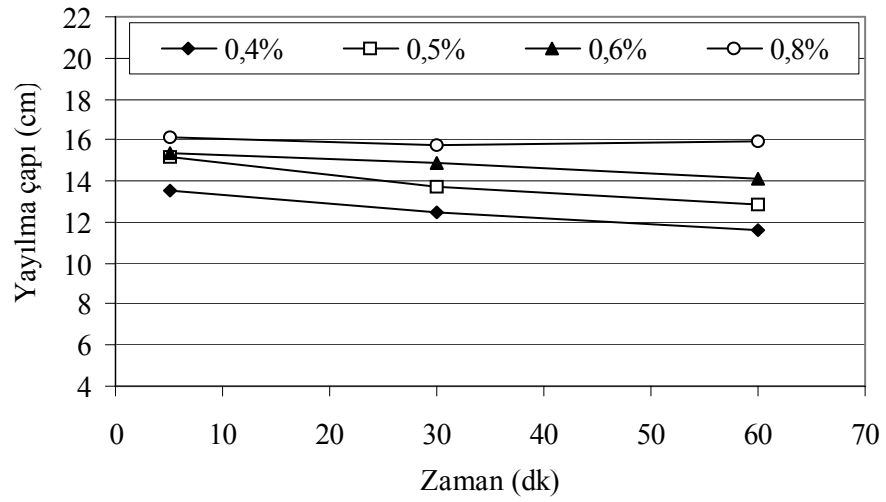
Şekil F.11 Ç11 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



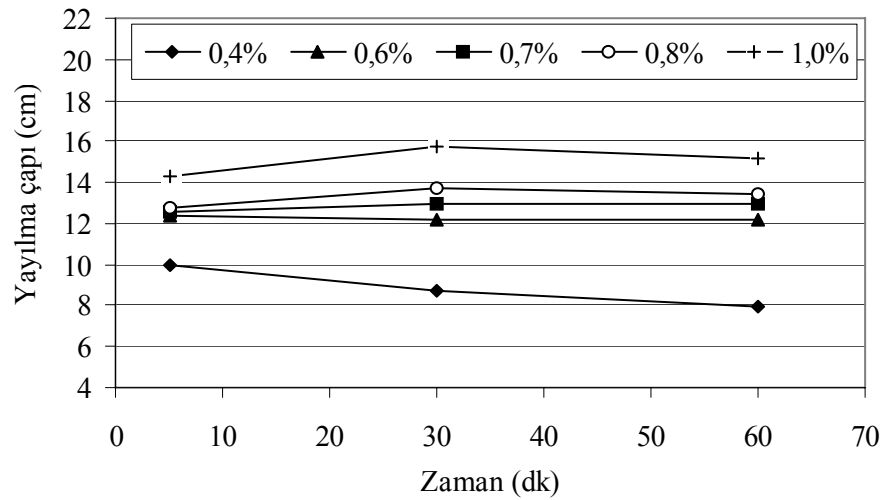
Şekil F.12 Ç12 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



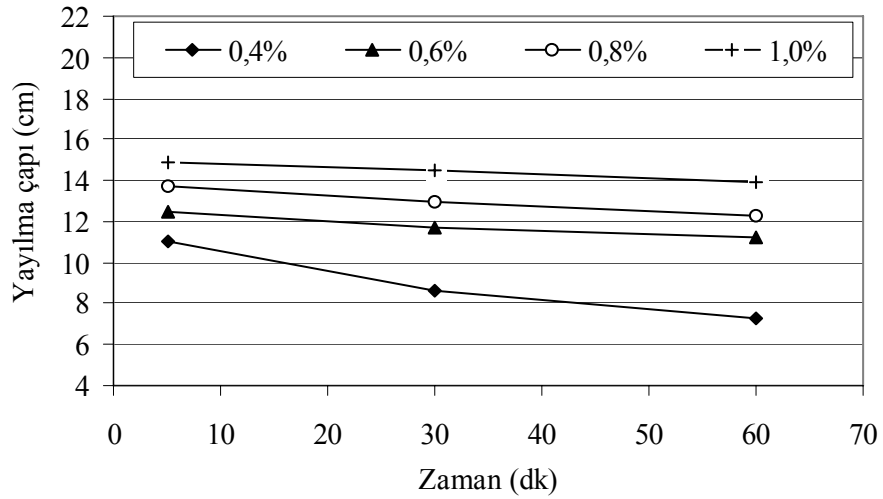
Şekil F.13 Ç13 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



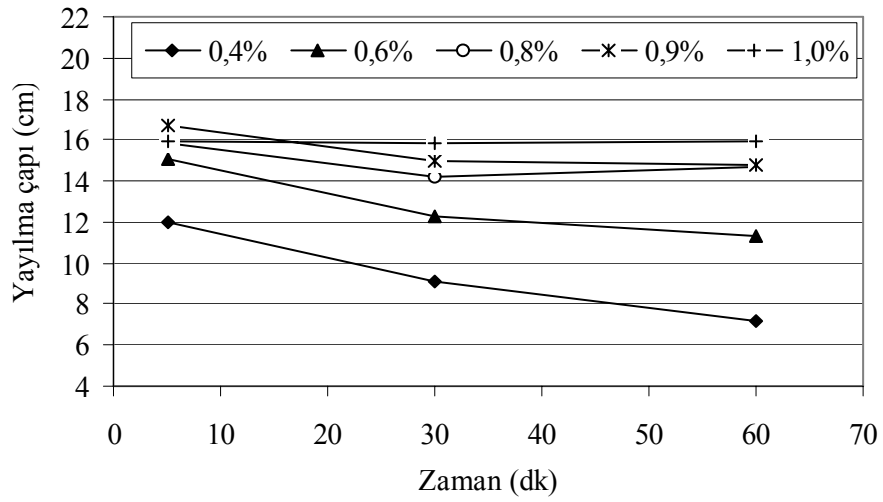
Şekil F.14 Ç14 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



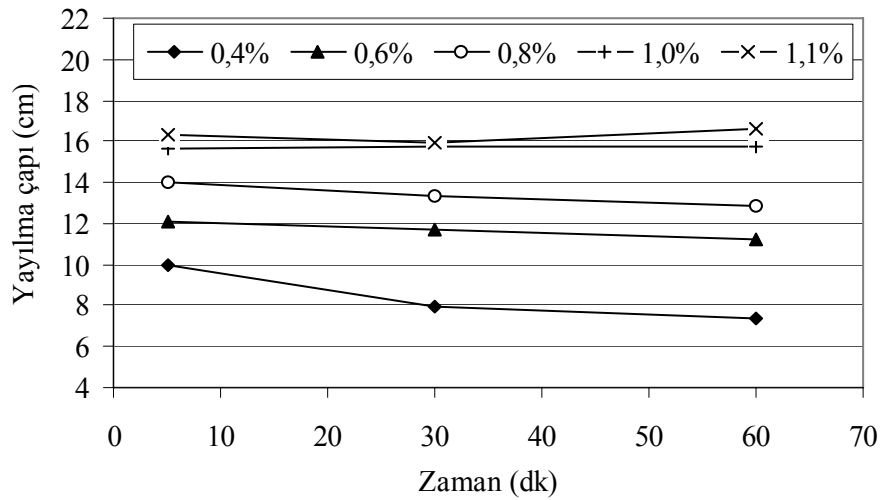
Şekil F.15 Ç15 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



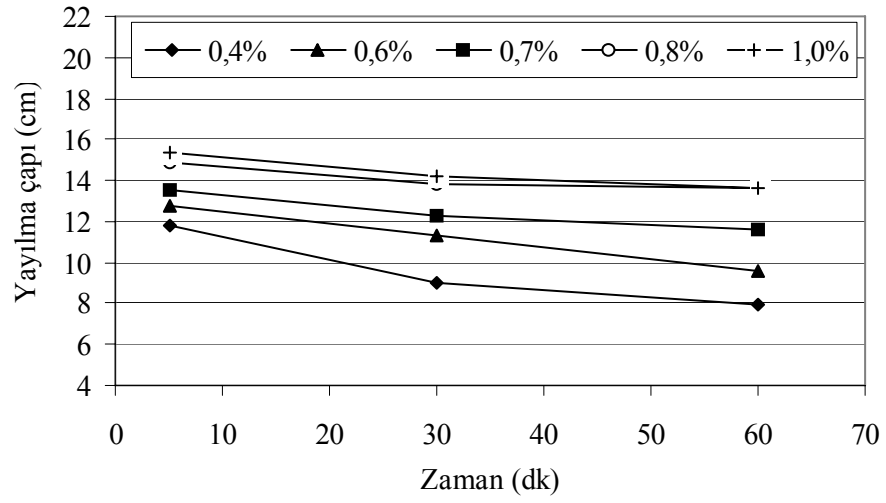
Şekil F.16 Ç16 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil F.17 Ç17 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil F.18 Ç18 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

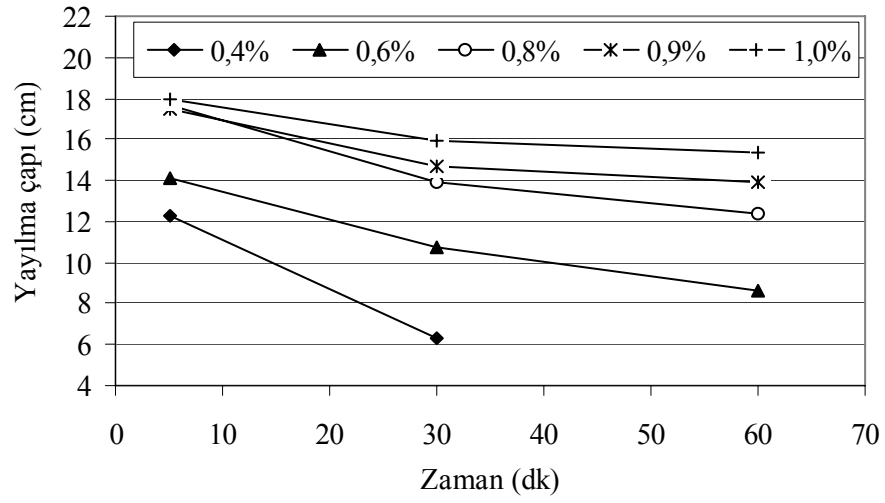


Şekil F.19 Ç19 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

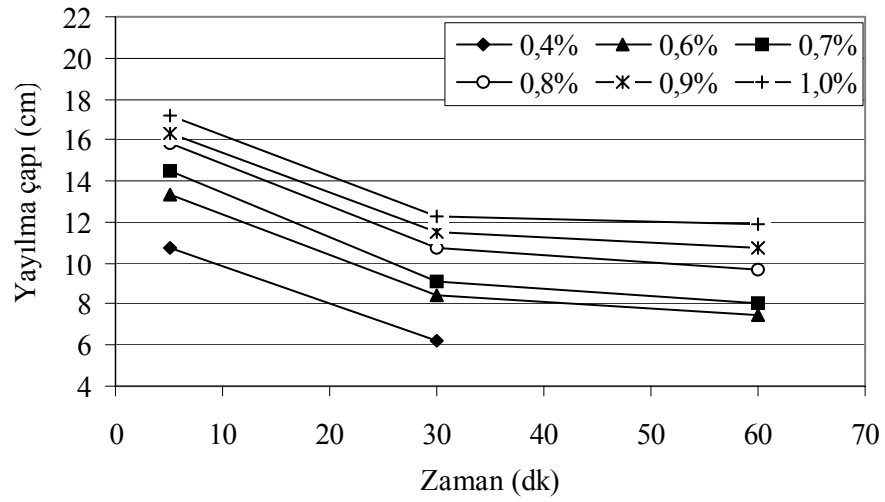
\*Malzeme yetersizliğinden dolayı S2 katkısı ve Ç20 çimentosu ile karışım hazırlanamamıştır.

## EK G

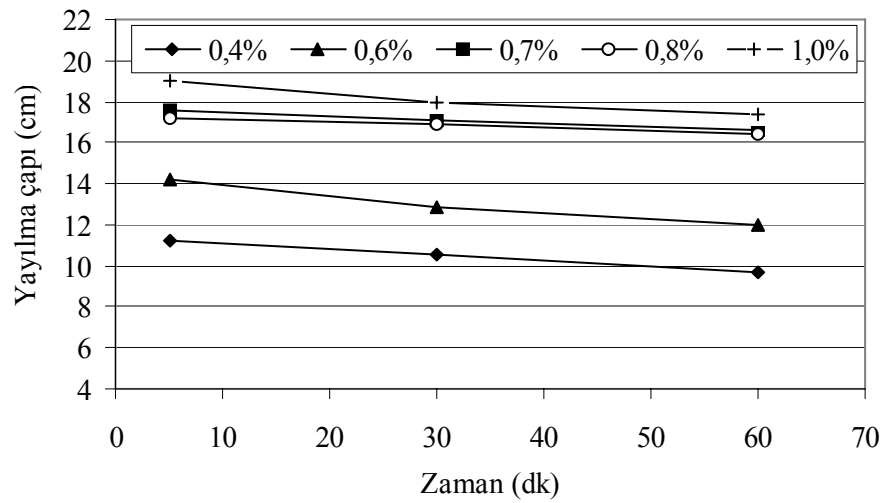
**S3 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARINA AİT MİNİ  
ÇÖKME (YAYILMA) DEĞERLERİ**



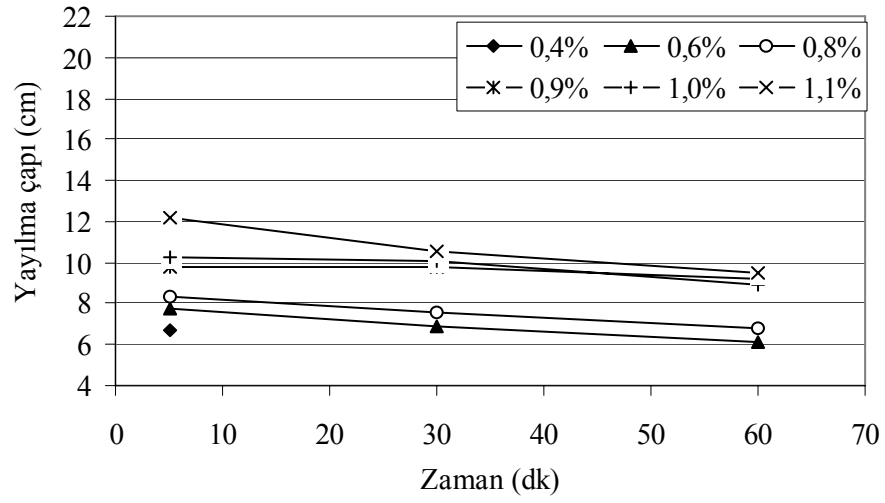
Şekil G.1 Ç1 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



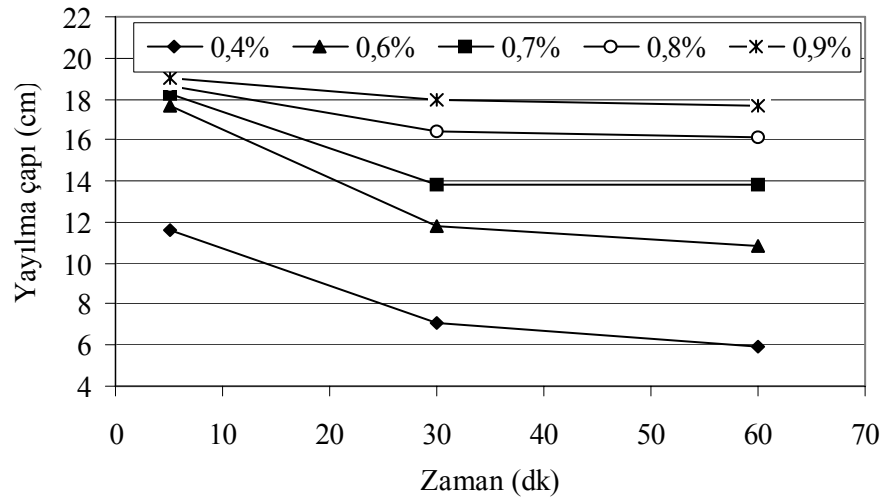
Şekil G.2 Ç2 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



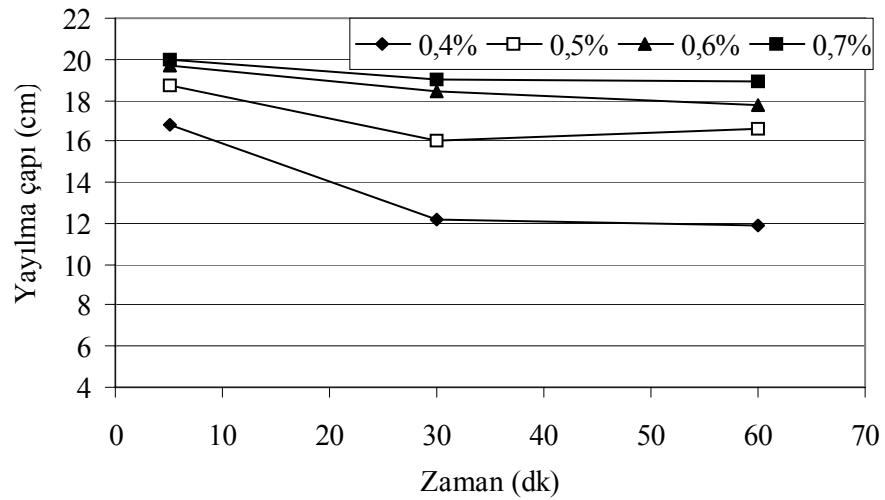
Şekil G.3 Ç3 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



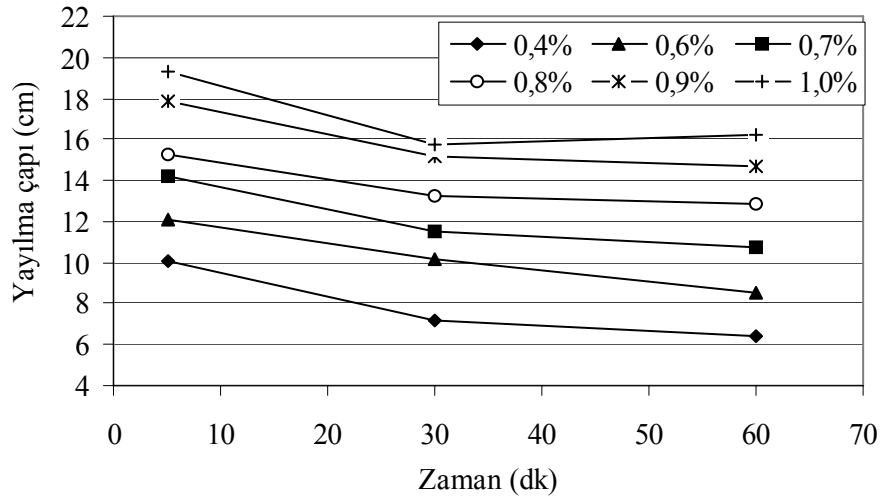
Şekil G.4 Ç4 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



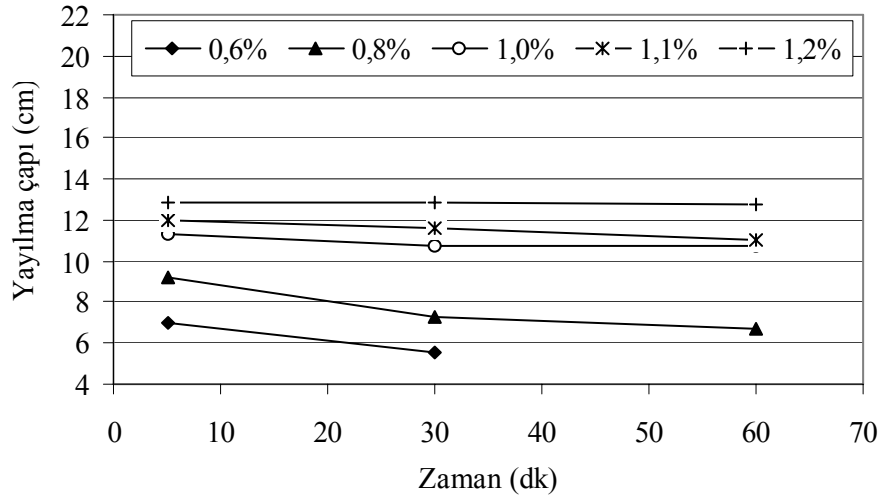
Şekil G.5 Ç5 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



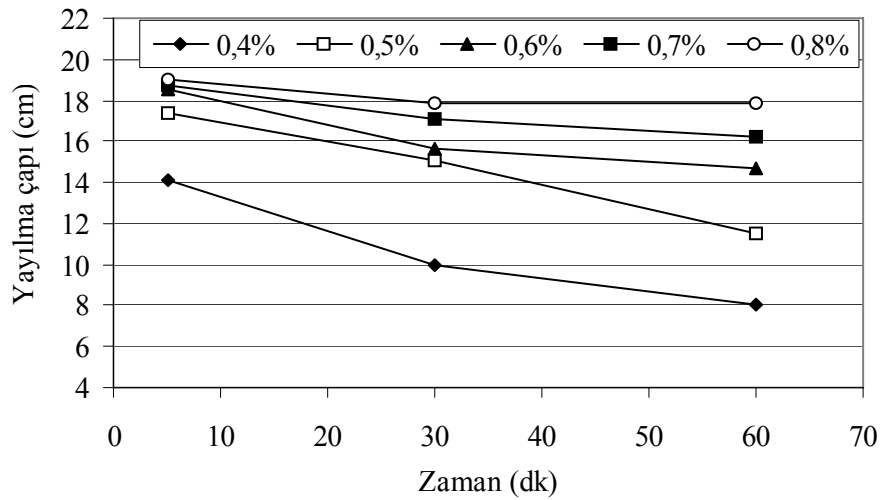
Şekil G.6 Ç6 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil G.7 Ç7 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

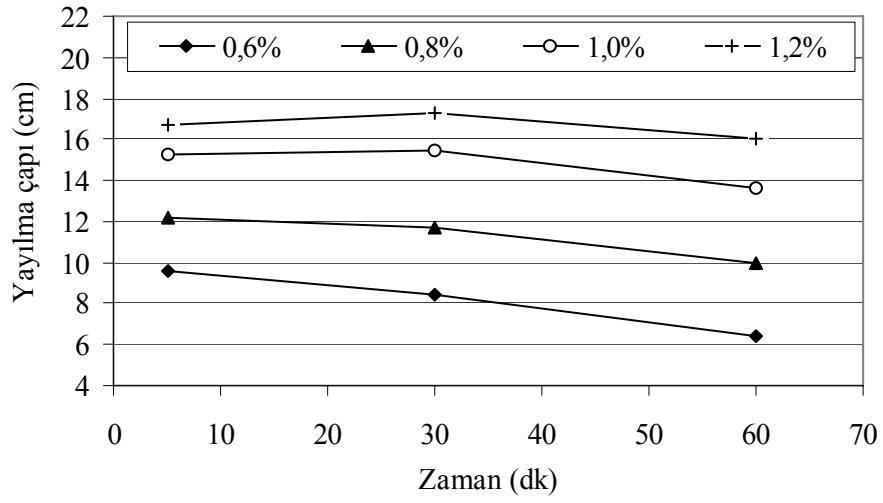


Şekil G.8 Ç8 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

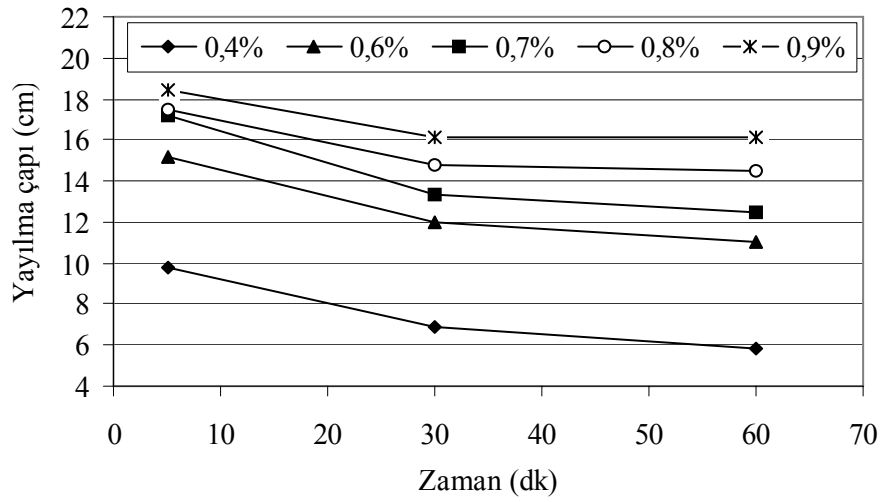


Şekil G.9 Ç9 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

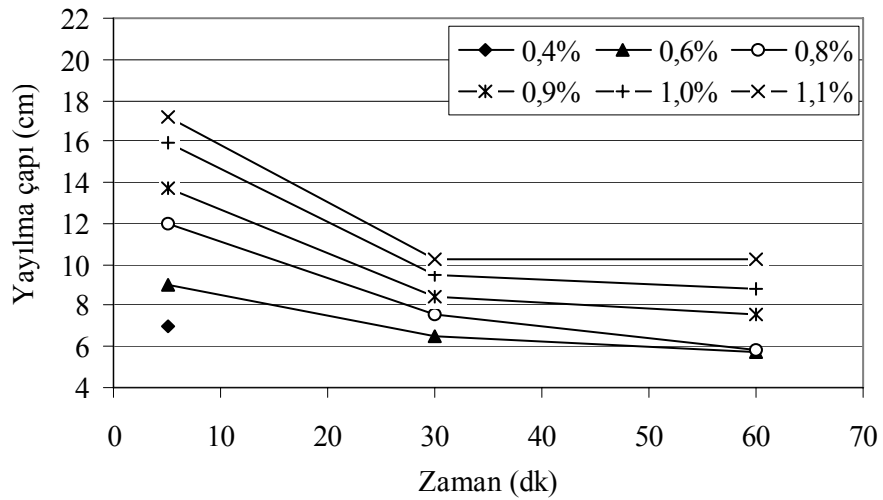




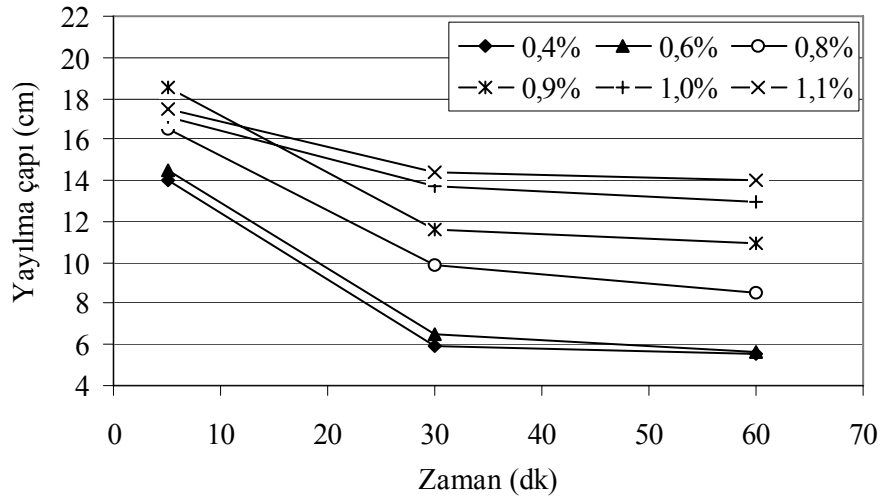
Şekil G.10 Ç10 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



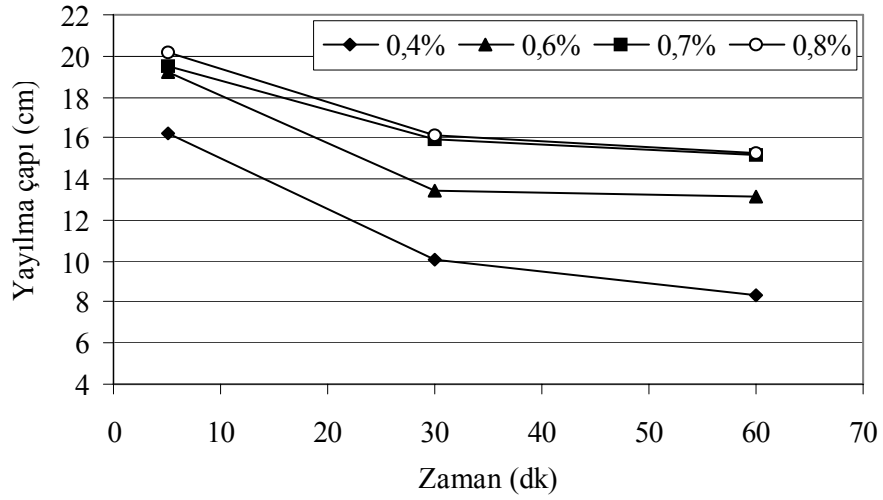
Şekil G.11 Ç11 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



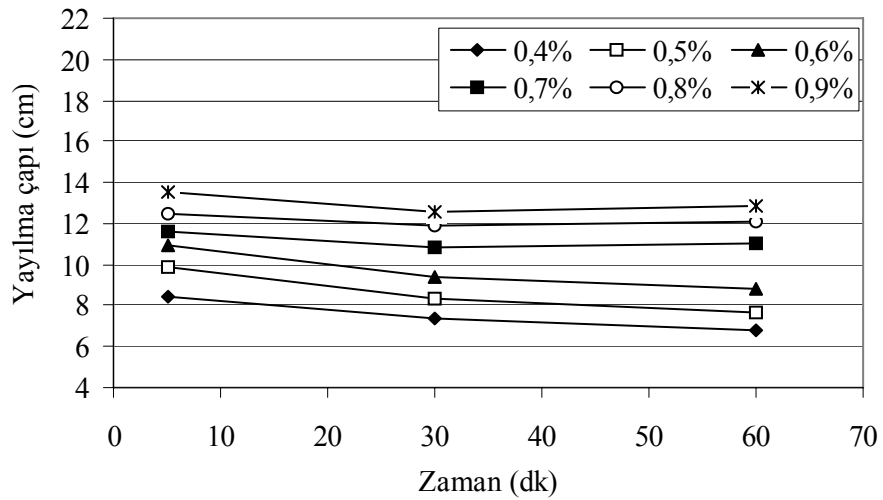
Şekil G.12 Ç12 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



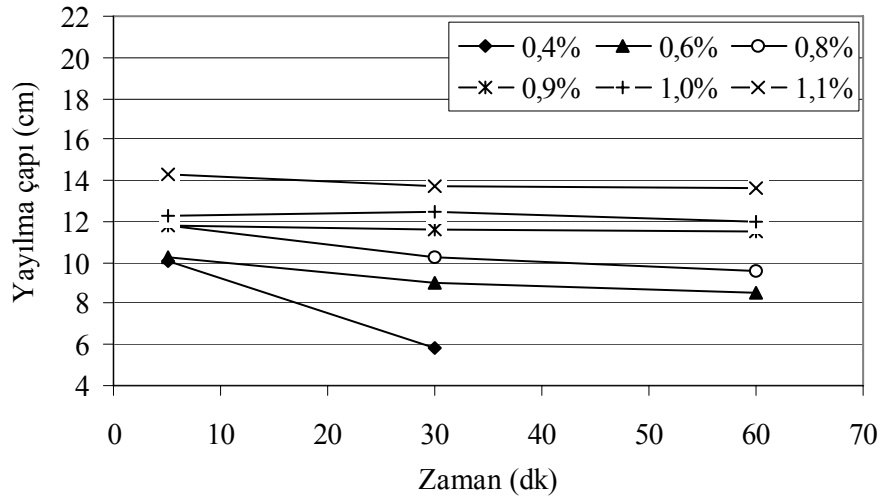
Şekil G.13 Ç13 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



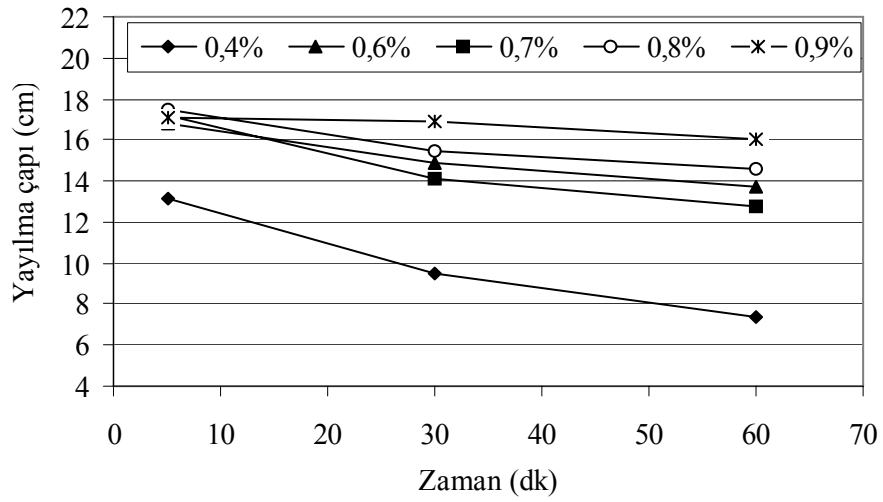
Şekil G.14 Ç14 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



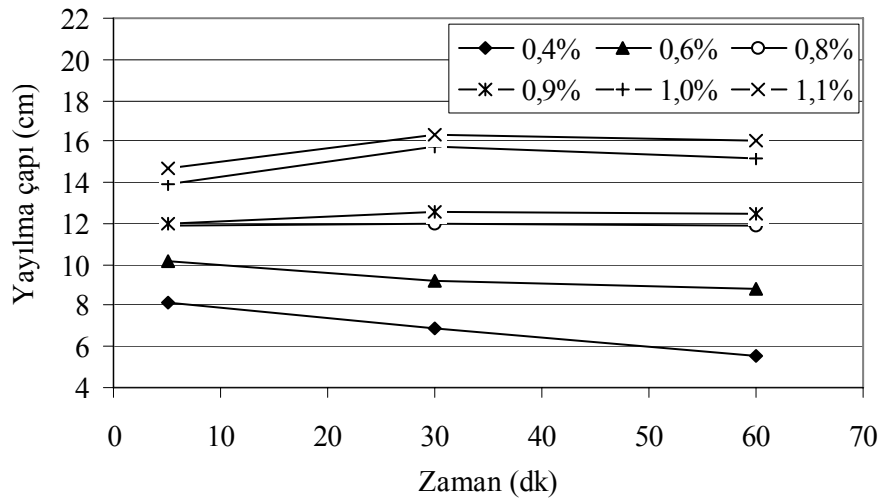
Şekil G.15 Ç15 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



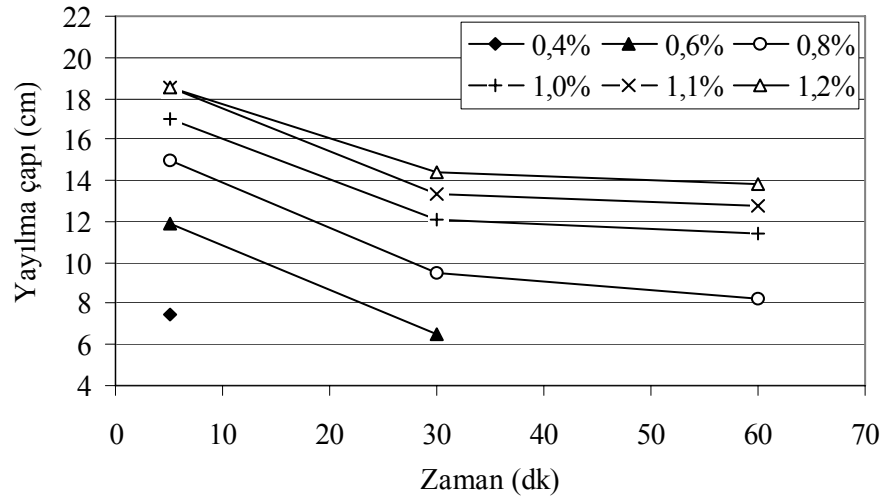
Şekil G.16 Ç16 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



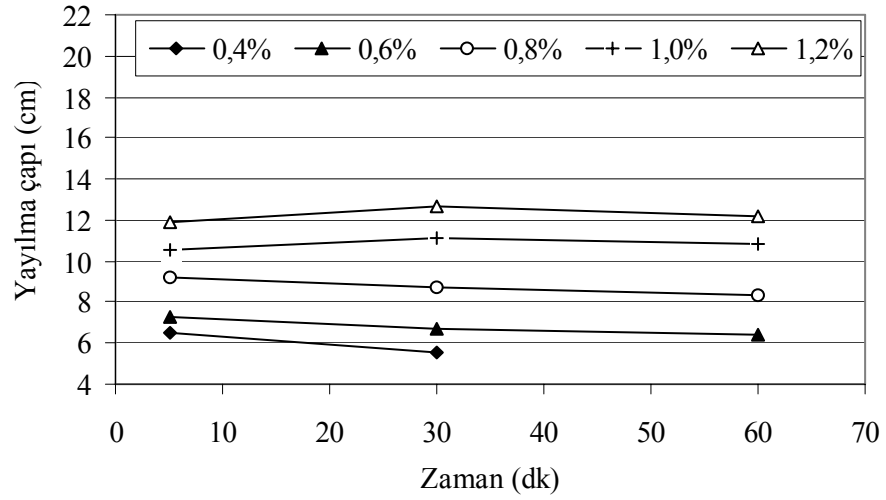
Şekil G.17 Ç17 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil G.18 Ç18 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



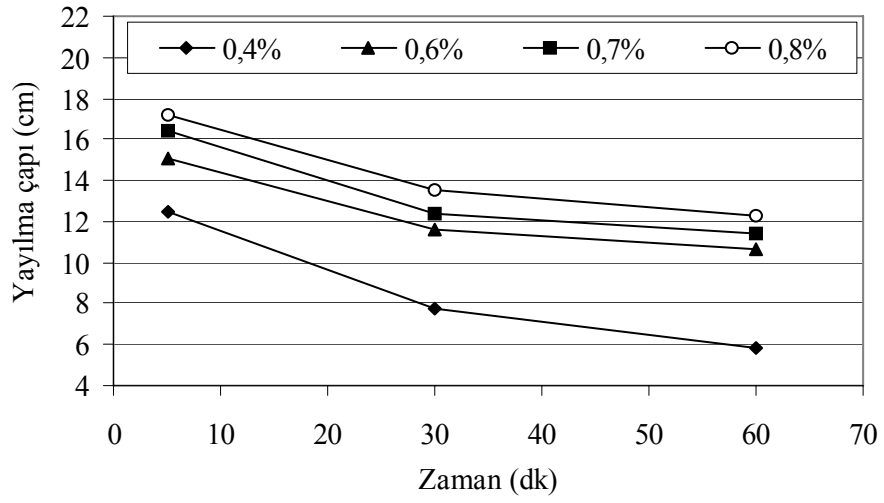
Şekil G.19 Ç19 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



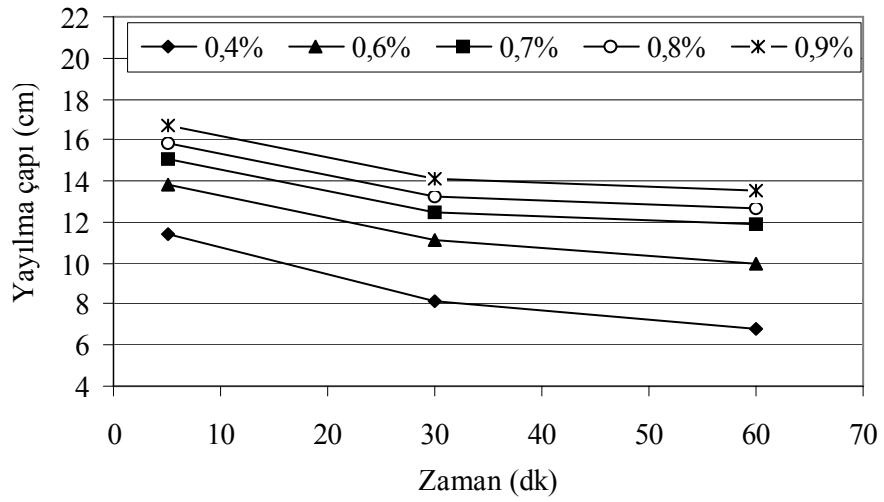
Şekil G.20 Ç20 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

## EK H

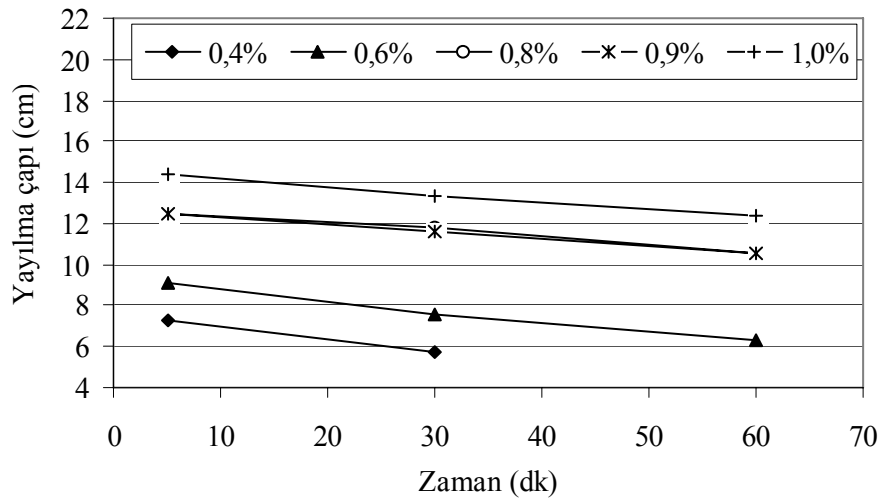
**S4 KATKISI İLE HAZIRLANAN HAMUR KARIŞIMLARINA AİT MİNİ  
ÇÖKME (YAYILMA) DEĞERLERİ**



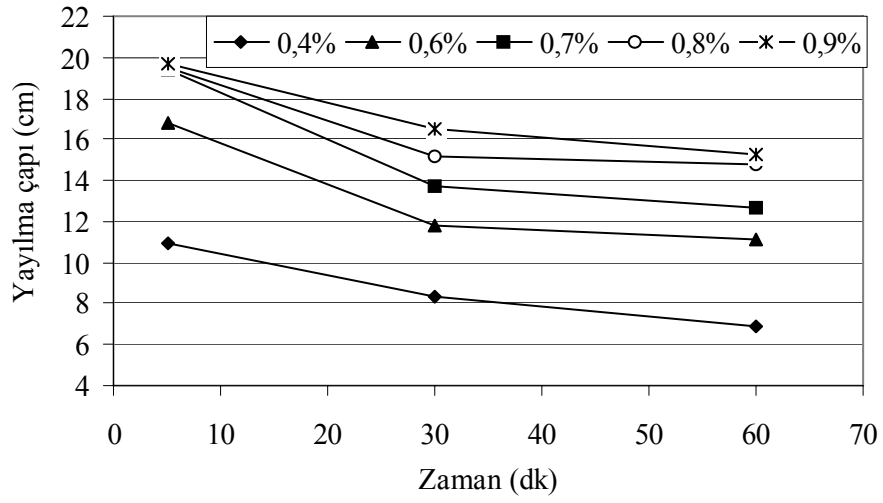
Şekil H.1 Ç1 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



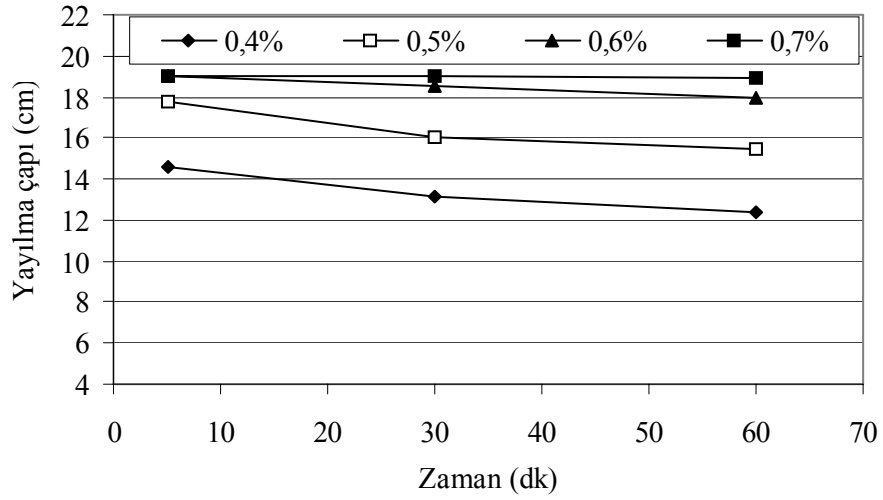
Şekil H.2 Ç2 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



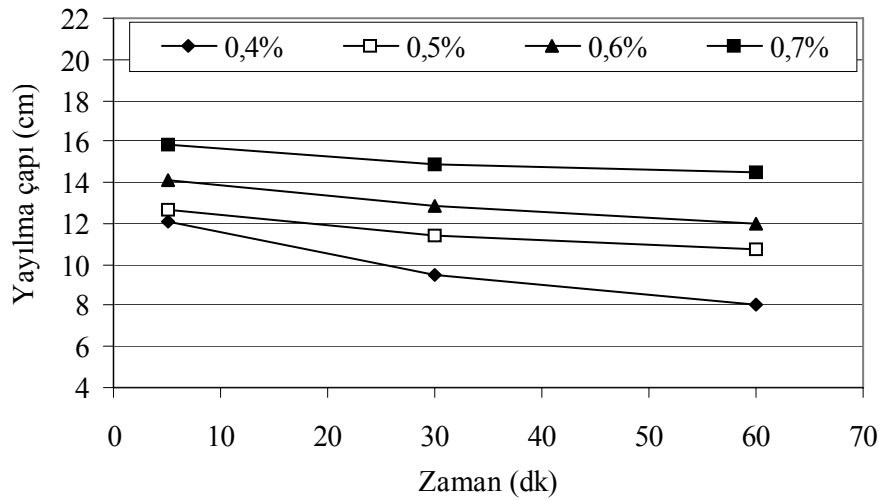
Şekil H.3 Ç4 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



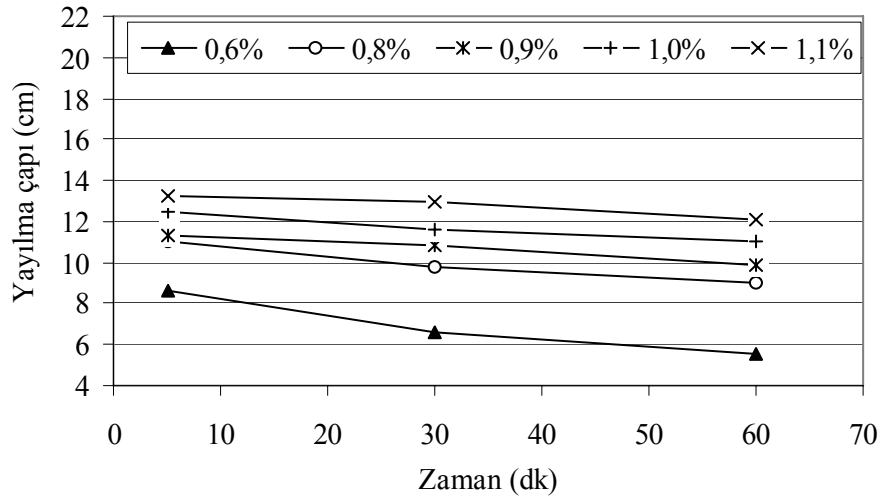
Şekil H.4 Ç5 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



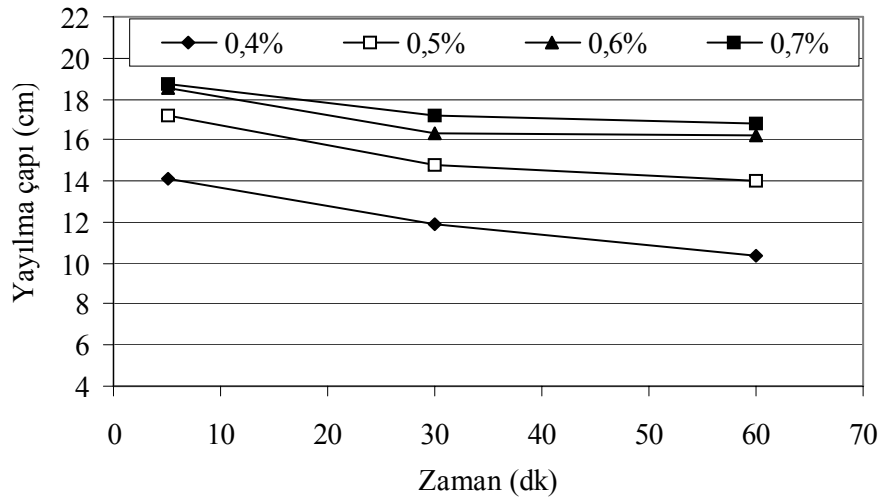
Şekil H.5 Ç6 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



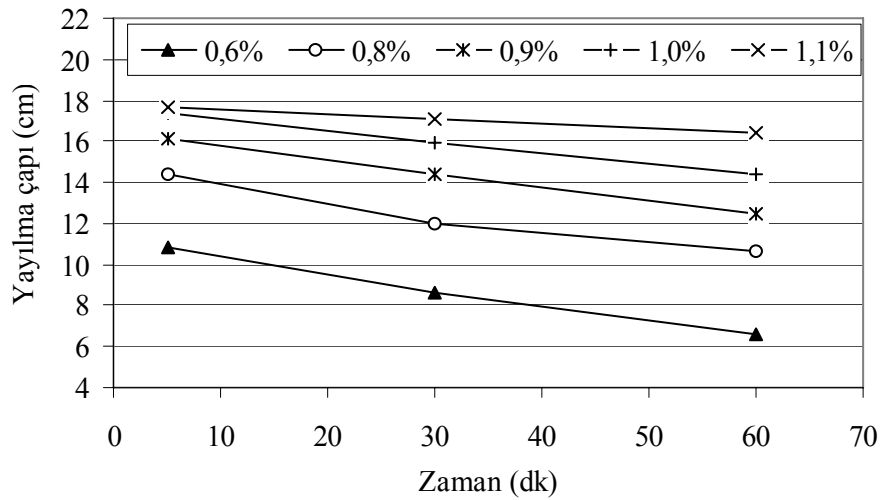
Şekil H.6 Ç7 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil H.7 Ç8 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

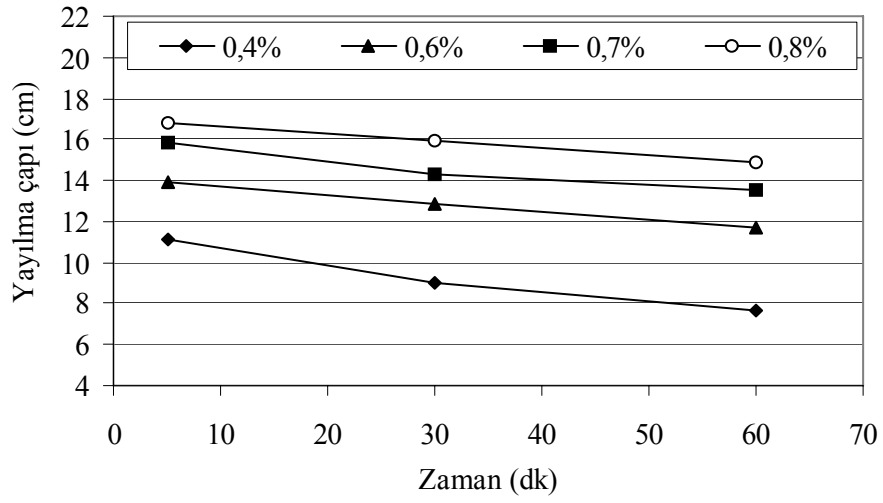


Şekil H.8 Ç9 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

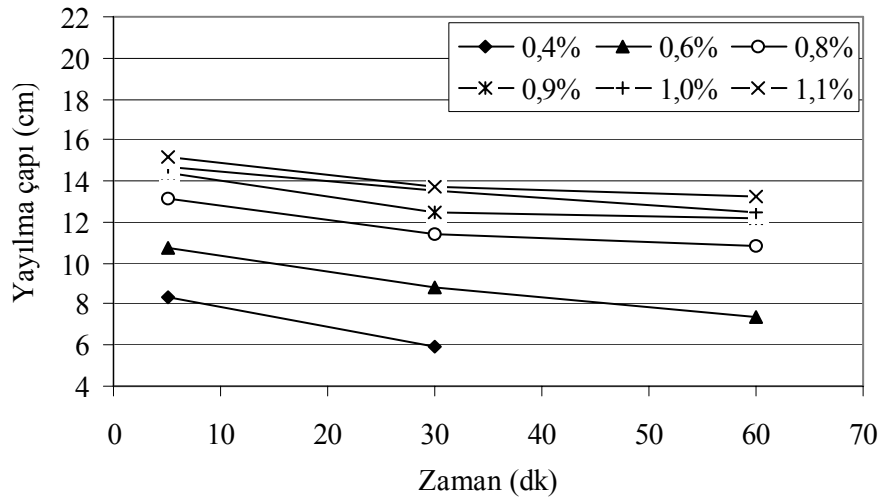


Şekil H.9 Ç10 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

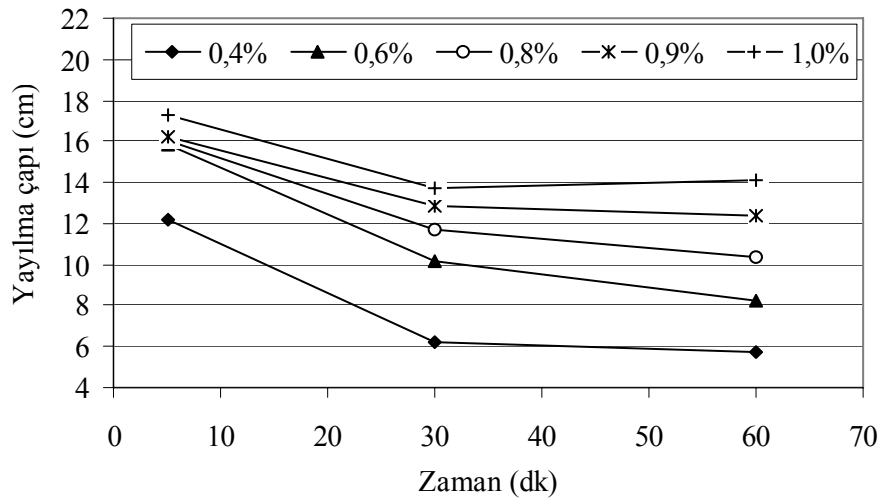




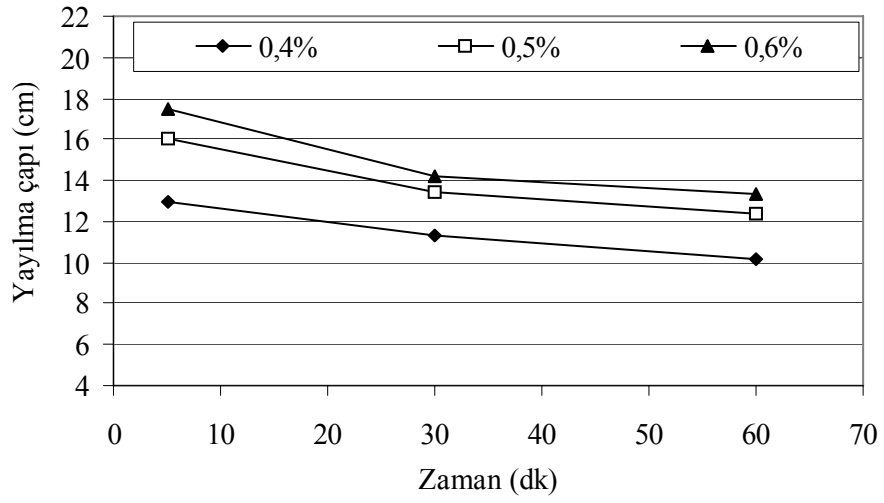
Şekil H.10 Ç11 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



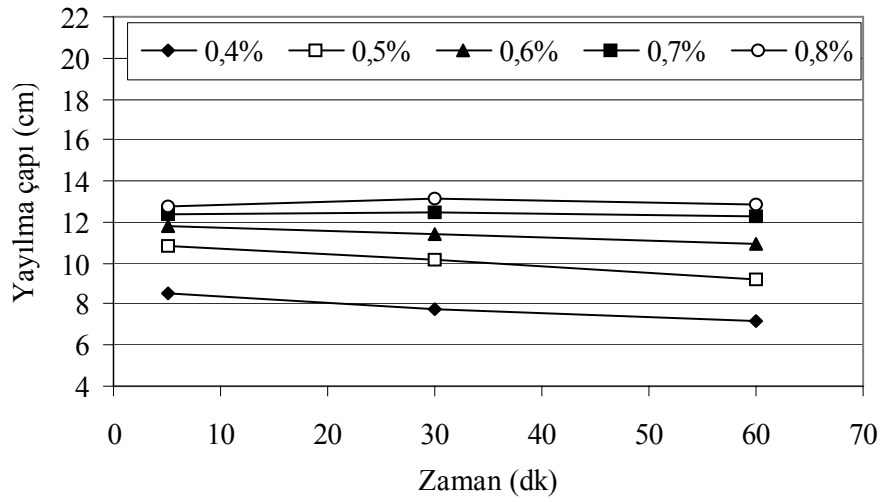
Şekil H.11 Ç12 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



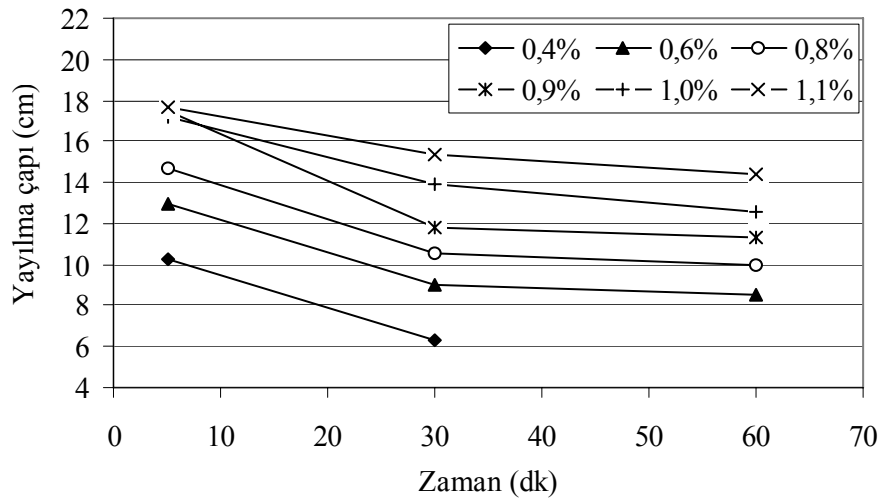
Şekil H.12 Ç13 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



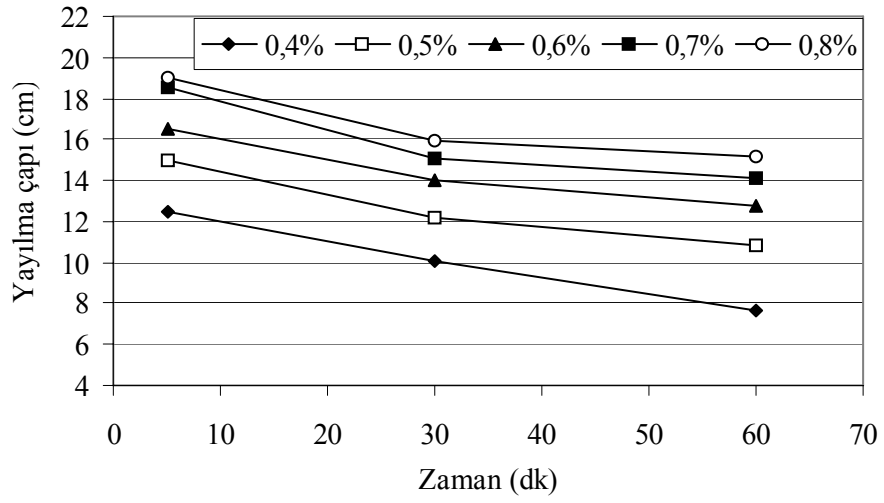
Şekil H.13 Ç14 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



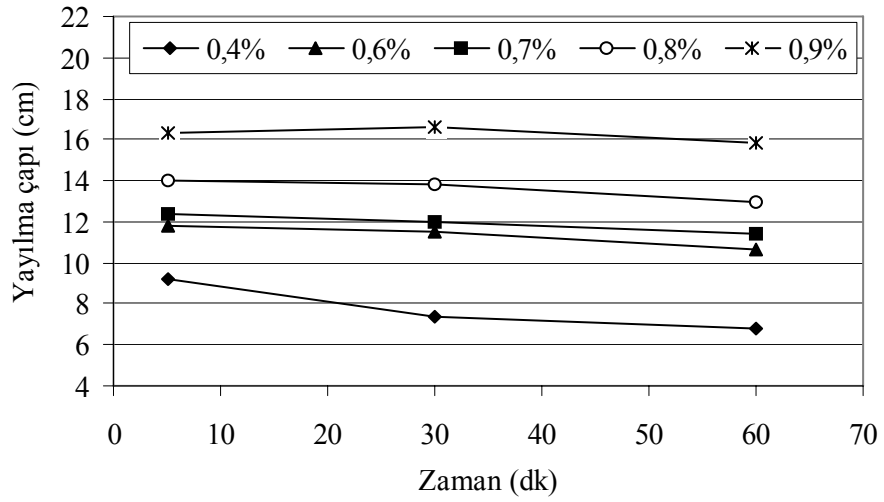
Şekil H.14 Ç15 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



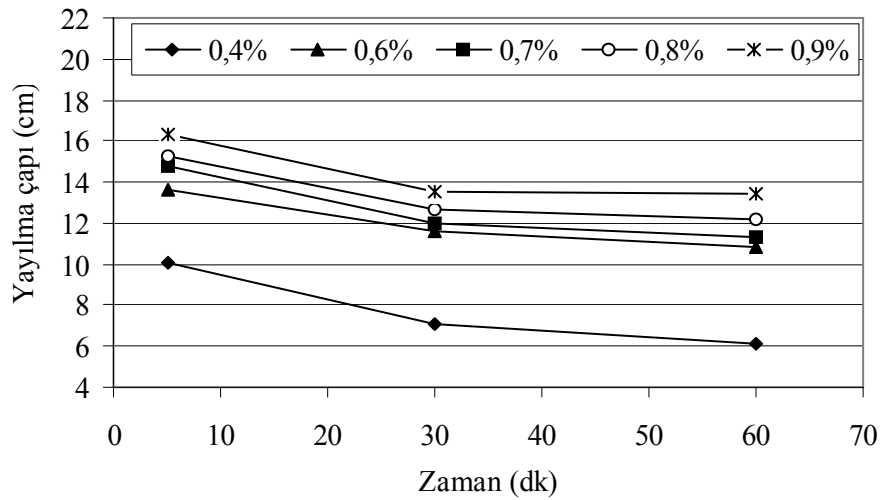
Şekil H.15 Ç16 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



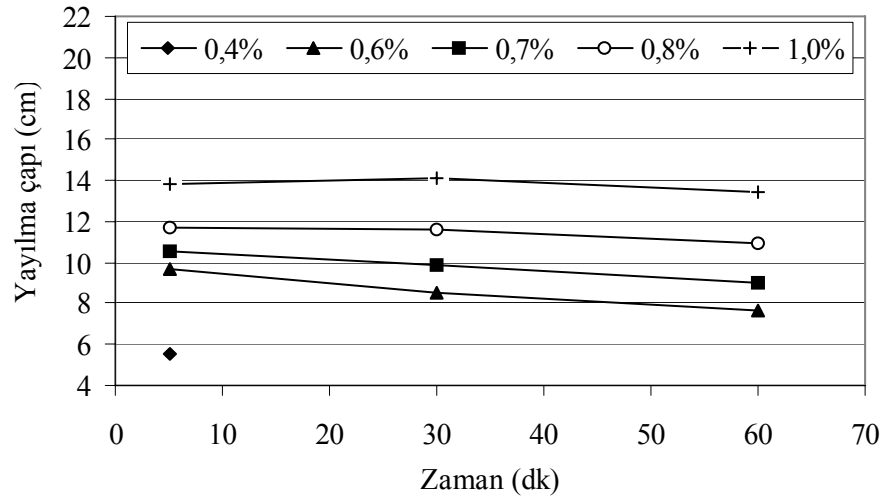
Şekil H.16 Ç17 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil H.17 Ç18 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil H.18 Ç19 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi



Şekil H.19 Ç20 çimentosu için zamana bağlı olarak yayılma çapının değişimi

\*S4 katkısı ve Ç3 çimentosu ile hazırlanan karışımda deneysel hata olduğu için gösterilmemiştir.