

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KIVAM KORUMA PERFORMANSI AÇISINDAN
KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSUNUN
AKIŞKANLAŞTIRICI KİMYASAL KATKILARLA
UYUMUNUN İNCELENMESİ**

Şebnem ALPASLAN

Ekim, 2019

İZMİR

**KIVAM KORUMA PERFORMANSI AÇISINDAN
KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSUNUN
AKIŞKANLAŞTIRICI KİMYASAL KATKILARLA
UYUMUNUN İNCELENMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı

Şebnem ALPASLAN

Ekim, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ŞEBNEM ALPASLAN, tarafından **PROF. DR. KAMİLE TOSUN FELEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan “**KIVAM KORUMA PERFORMANSI AÇISINDAN KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSUNUN AKIŞKANLAŞTIRICI KİMYASAL KATKILARLA UYUMUNUN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU

Yönetici



Prof. Dr. Remzi YALICI

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanması süresince değerli bilgi ve önerileriyle beni sürekli destekleyen, çalışmam için beni azmettiren, başarılı bir kadın akademisyen olarak bana ilham veren, sonsuz saygı ve sevgi duyduğum tez danışmanım Prof. Dr. Kamile Tosun Felekoğlu'na,

Reoloji konusundaki engin bilgi ve tecrübesiyle tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, fikirleriyle ufkumu açan, her zaman sabır ve anlayışla beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Burak Felekoğlu'na,

Polikarboksilat kökenli süperakışkanlaştırıcı katkıların temin edilmesine ve gerekli teknik bilgilere ulaşmama yardımcı olan Chryso firması satış ve pazarlama müdürü Sn. Tolga Ilıca'ya,

Katkıların FTIR analizlerindeki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Aylin Zıylan'a,

Çalıştığım süre boyunca derslere katılmam için bana izin ve destek veren Skala Yapı Denetim yöneticisi Sn. Barbaros Çeliker'e,

Hayatımın her alanında olduğu gibi yüksek lisans eğitimimde ve tez sürecimde de benden desteklerini, sonsuz sevgi ve anlayışlarını esirgemeyen canım annem Muazzez Alpaslan'a, canım babam Nihat Alpaslan'a ve küçük kardeşim Oğuzhan Alpaslan'a, sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Şebnem ALPASLAN

KIVAM KORUMA PERFORMANSI AÇISINDAN KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSUNUN AKIŞKANLAŞTIRICI KİMYASAL KATKILARLA UYUMUNUN İNCELENMESİ

ÖZ

Kalsiyum alüminat çimentosu; normal Portland çimentosuna kıyasla hızlı dayanım kazanma, aşınma direnci, yüksek sıcaklıklara karşı direnç, kimyasal, biyolojik etmenlere dayanım ve asit dayanımı gibi üstün özelliklere sahiptir. Yaygın olarak kullanılmamasının en önemli nedenlerinden birisi geçirdiği dönüşüm reaksiyonlarıdır. Ancak literatürde belirtildiği gibi, su/çimento oranı 0,4'ün altındaki değerlere indirilirse dönüşüm reaksiyonlarının zararlı etkilerinin önüne büyük ölçüde geçilmektedir. Bununla birlikte, düşük su/çimento oranlarının kullanılması ile kıvam ve kıvam koruma problemleriyle karşılaşılabilir. Bu problemlerin önüne geçmek adına, kalsiyum alüminat çimentosunun süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanılması gerekir.

Tez kapsamında, farklı polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı katkıların kalsiyum alüminat çimentosunun kıvam ve kıvam koruma performansına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak, katkılı ve katkısız çimento hamurlarına kıvam testi uygulanmıştır. Reometrede çalışmaya uygun kıvamdaki çimento hamurlarına uygulanan akma protokolü, zamana bağlı olarak, su ile çimento karıştıktan hemen sonra ve ardından 30 dakika, 60 dakika ve 90 dakika sonunda tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda, katkısız halde reometrede çalışamayacak kadar kuru kıvamda olan su/çimento oranlarında, polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla çalışılabilir bir kıvam elde edildiği ve bu kıvamın uzun süre korunduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Kalsiyum alüminat çimentosu, polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı, kıvam, kıvam koruma, reoloji

INVESTIGATION OF COMPATIBILITY OF CALCIUM ALUMINATE CEMENT WITH PLASTICIZING CHEMICAL ADMIXTURES FROM THE VIEW POINT OF CONSISTENCY RETAINING PERFORMANCE

ABSTRACT

Calcium aluminate cement has superior properties such as fast strength gain, abrasion resistance, resistance to high temperatures and chemical, biological and acid resistance compared to ordinary Portland cement. One of the most important reasons why it is not widely used is its conversion reactions. However, as mentioned in the literature, the harmful effects of conversion reactions are highly prevented with water/cement ratios below 0.4. Nevertheless, utilisation of low water/cement ratios results in both consistency and consistency retaining problems. In order to avoid these problems, calcium aluminate cement should be used with superplasticizer admixtures.

In this study, the effects of different polycarboxylate based superplasticizer admixtures on the consistency and consistency retention performance of calcium aluminate cement were investigated. In this context, firstly, consistency test was applied to cement paste with and without admixtures. The flow protocol applied to the cement paste which is suitable for working in rheometer, depending on the time, immediately after mixing the cement with water and then at the end of 30 minutes, 60 minutes and 90 minutes. As a result of the experiments, it was revealed that a workable consistency was obtained by using polycarboxylate based superplasticizer admixtures at water/cement ratios which were too dry to be able to work in the rheometer without admixtures and this consistency was maintained for a long time.

Keywords: Calcium aluminate cement, polycarboxylate based superplasticizers, consistency, consistency retaining, rheology

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	2
BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Tanımı ve Tarihçesi.....	4
2.1.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri	5
2.1.2 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Faz Bileşimi	7
2.1.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	9
2.1.4 Kalsiyum Alüminat Çimentosu Taze ve Sertleşmiş Betonunun Özellikleri	10
2.1.4.1 Priz Süresi	10
2.1.4.2 Reaksiyon Hızı ve Isı Değişimi	10
2.1.4.3 Sülfat Atağına Karşı Direnç	11
2.1.4.4 Asit Dayanımı	12
2.1.4.5 Yüksek Sıcaklıklara Karşı Direnç.....	12
2.1.5 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Hidratasyon Mekanizması	13

2.1.6 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Dönüşüm Mekanizması	15
2.1.7 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Güvenli Kullanımı	18
2.1.8 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kullanım Alanları	20
2.2 Kimyasal Katkılar.....	22
2.2.1 Süperakışkanlaştırıcılar (Yüksek Oranda Su Azaltıcılar).....	24
2.2.1.1 Polikarboksilat Bazlı Yeni Nesil Süperakışkanlaştırıcılar (PCE)....	26
2.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Çeşitli Kimyasal Katkılarla Uyumu	29
2.3.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Polikarboksilat Bazlı Süperakışkanlaştırıcı Katkılarla Uyumu.....	31
2.4 Taze Çimento Hamuru Reolojisi	34
2.4.1 Statik Eşik Kayma Gerilmesi.....	34
2.4.2 Dinamik Eşik Kayma Gerilmesi.....	35
2.4.3 Nihai Viskozite	36
2.4.4 Akma Eğrileri	36
2.4.5 Herschel Bulkley Modeli.....	37
2.4.6 Tiksotropik ve Antitiksotropik (Reopektik) Davranış	38
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
3.1 Kullanılan Malzemeler	43
3.1.1 Çimento.....	43
3.1.2 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	44
3.1.2.1 Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Analizi.....	45
3.2 Kıvam Testi	47
3.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	48
3.3.1 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Reometre Sistemi.....	48

3.3.1.1 Çeperlerde Ayrışma ile Kayma Etkisi (Wall Slip Effect).....	50
3.3.2 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Sistemi	50
3.3.2.1 Oluşturulan Akma Eğrileri.....	51
3.3.3 Reolojik İncelemeler için Hazırlanan Karışımlar	53
3.3.4 Reolojik Özellikleri Ölçülemeyen Karışımlar	55

BÖLÜM DÖRT - DENEYESEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ ... 57

4.1 Sabit Kıvamda Katkılı ve Katkısız Kalsiyum Alüminat Çimentosu Hamuru Örneklerinin Reolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	57
4.2 Sabit Su/Çimento Oranında Katkılı ve Katkısız Kalsiyum Alüminat Çimentosu Hamuru Örneklerinin Reolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması	66
4.2.1 Akma Eğrileri Yardımı ile Histerezis Alanlarının Tespiti.....	74
4.3 Kullanılan Polikarboksilat Bazlı Katkıların Performans Kıyaslaması	80
4.3.1 Kullanılan Polikarboksilat Bazlı Katkıların Performans Kıyaslaması Sonuçları.....	83
4.4 Kalsiyum Alüminat Çimentosu ve Normal Portland Çimentosu Hamuru Örneklerinin Reolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	84

BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR 89

KAYNAKLAR 93

EKLER 102

EK 1: FTIR Analiz Sonuçları	102
-----------------------------------	-----

EK 2: Akma Eğrisi Grafikleri	105
EK 3: Katkılı ve Katkısız Karışımların Kayma Gerilmesi ve Viskozite Değerleri	122



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kalsiyum alüminat çimentoları ve normal Portland çimentolarının bileşim aralığı	6
Şekil 2.2 Normal Portland çimentosu – ISIDAÇ40 basınç dayanımı gelişimi	10
Şekil 2.3 Normal Portland ve kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon ürünlerinin birikimi	11
Şekil 2.4 KAÇ hamurunun hidratasyon süreci.....	14
Şekil 2.5 C_3AH_6 kristalinin morfolojisi	16
Şekil 2.6 Su/çimento $\sim 0,4$ ve çimento içeriği 400 kg/m^3 olan kalsiyum alüminat çimentosu betonunun dayanım gelişimi	17
Şekil 2.7 27 yaşındaki kalsiyum alüminat çimentosu betonunun geri saçılımlı elektron görüntüsü.....	18
Şekil 2.8 Halifax limanı rıhtımı, Nova Scotia, Kanada.....	20
Şekil 2.9 Saint-Lucien Köprüsü, Tunus	20
Şekil 2.10 MPEG ve VPEG tipi polikarboksilat süperakışkanlaştırıcıların kimyasal yapısı	27
Şekil 2.11 Polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı ve çimento tanecikleri üzerindeki sterik itki etkisi.....	28
Şekil 2.12 (a) Portland çimentolarında (ilmek biçimi) ve (b) kalsiyum alüminat çimentolarında (tren biçimi) PCE katkı adsorpsiyonu ve biçimi	33
Şekil 2.13 Dinamik EKG tespit yöntemi.....	35
Şekil 2.14 Nihai viskozite tespit yöntemi	36
Şekil 2.15 Temel akış ilişkileri.....	37
Şekil 2.16 Tikotropik ve reopektik akışkanların akış özellikleri.....	39
Şekil 3.1 Deney akış şeması.....	41
Şekil 3.2 A, B, C, D ve E katkılarının FTIR analiz sonuçları	46

Şekil 3.3 Vicat kıvam ölçüm cihazıyla yapılan deney örnekleri.....	48
Şekil 3.4 Anton Paar - Physica MCR 51 reometre sistemi	49
Şekil 3.5 ST24-2D/2V/2V-30 kanatlı sonda uçlu mil.....	49
Şekil 3.6 Deneylerde kullanılan akma protokolü	52
Şekil 3.7 Reometre ilk an (a) ve 30 (b), 60 (c), 90 (d) dakika deneyleri	55
Şekil 4.1 İlk an ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – s/ç grafiği	58
Şekil 4.2 30. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – s/ç grafiği	59
Şekil 4.3 60. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – s/ç grafiği	59
Şekil 4.4 90. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – s/ç grafiği	60
Şekil 4.5 İlk an ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların viskozite – s/ç grafiği.....	63
Şekil 4.6 30. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların viskozite – s/ç grafiği	63
Şekil 4.7 60. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların viskozite – s/ç grafiği	64
Şekil 4.8 90. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların viskozite – s/ç grafiği	64
Şekil 4.9 0,19 s/ç oranında A katkılı karışımın dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	67
Şekil 4.10 0,19 s/ç oranında B katkılı karışımın dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği	67
Şekil 4.11 0,19 s/ç oranında C katkılı karışımın dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği	68

Şekil 4.12 0,19 s/ç oranında A, B, C katkılı karışımların viskozite – zaman grafiği	68
Şekil 4.13 0,21 s/ç oranında katkısız ve A katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	69
Şekil 4.14 0,21 s/ç oranında katkısız ve B katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	69
Şekil 4.15 0,21 s/ç oranında katkısız ve C katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	70
Şekil 4.16 0,21 s/ç oranında katkısız ve D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	70
Şekil 4.17 0,21 s/ç oranında katkısız ve A,B,C,D katkılı karışımların viskozite – zaman grafiği	71
Şekil 4.18 0,23 s/ç oranında katkısız ve A katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	72
Şekil 4.19 0,23 s/ç oranında katkısız ve B katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	72
Şekil 4.20 0,23 s/ç oranında katkısız ve C katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	73
Şekil 4.21 0,23 s/ç oranında katkısız ve D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği.....	73
Şekil 4.22 0,23 s/ç oranında katkısız ve A,B,C,D katkılı karışımların viskozite – zaman grafiği	74
Şekil 4.23 Histerezis alanı türleri; a) Toparlanma (anti-tiksotropi), b) Yumuşama (tiksotropi), c) Karma davranış.....	75
Şekil 4.24 0,19 s/ç oranındaki karışımların histerezis alanları.....	76
Şekil 4.25 0,21 s/ç oranındaki karışımların histerezis alanları.....	77
Şekil 4.26 0,23 s/ç oranındaki karışımların histerezis alanları.....	78

Şekil 4.27 0,25 s/ç katkısız kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği	85
Şekil 4.28 0,25 s/ç katkısız kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının viskozite – zaman grafiği	86
Şekil 4.29 0,23 s/ç ve sabit kıvamda A katkılı kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği	87
Şekil 4.30 0,23 s/ç ve sabit kıvamda A katkılı kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının viskozite – zaman grafiği.....	87

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Kalsiyum alüminat çimentosunun kimyasal bileşimi	6
Tablo 2.2 Kalsiyum alüminat çimentosu türlerinin bileşim aralıkları	7
Tablo 2.3 Normal Portland çimentosu – kalsiyum alüminat çimentosu ana fazlar	8
Tablo 2.4 Kalsiyum alüminat çimentosu ana fazlar	8
Tablo 2.5 ISIDAÇ 40 esaslı karoların ısı dayanımlarının Portland Çimento esaslı karolar ile karşılaştırılması	13
Tablo 2.6 Kalsiyum alümina hidratlarının yoğunluk ve bağıl su oranları	16
Tablo 3.1 Vicat kıvam cihazıyla denenen örnekler	42
Tablo 3.2 Reometrede çalışılan örnekler	42
Tablo 3.3 ISIDAÇ40 çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	43
Tablo 3.4 Normal Portland çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	44
Tablo 3.5 Süperakışkanlaştırıcı katkı özellikleri	45
Tablo 3.6 Katkısız kalsiyum alüminat çimentosu Vicat kıvam testi sonuçları	53
Tablo 4.1 Çimento hamuru karışımlarının histerezis alanları (Pa/s)	79
Tablo 4.2 Ortalama dinamik EKG'ler ile elde edilen sonuçlar	80
Tablo 4.3 Viskoziteler ile elde edilen sonuçlar	81
Tablo 4.4 Çıkış eğrilerinden elde edilen dinamik EKG'ler ile elde edilen sonuçlar	81
Tablo 4.5 İniş eğrilerinden elde edilen dinamik EKG'ler ile elde edilen sonuçlar	81
Tablo 4.6 Histerezis alanları ile elde edilen sonuçlar	81
Tablo 4.7 Ortalama dinamik EKG'lerin normalize edilmiş sonuçları	82
Tablo 4.8 Çıkış eğrileri dinamik EKG'lerinin normalize edilmiş sonuçları	82
Tablo 4.9 İniş eğrileri dinamik EKG'lerinin normalize edilmiş sonuçları	82
Tablo 4.10 Viskozitelerin normalize edilmiş sonuçları	82
Tablo 4.11 Histerezis alanlarının normalize edilmiş sonuçları	83

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Normal Portland çimentosu (PÇ) geçmişten bugüne en yaygın kullanım alanına sahip çimento türü olmasına rağmen bazı uygulamalarda ve koşullarda yetersiz kalmaktadır. Günümüzde normal Portland çimentosuna alternatif olarak çeşitli çimento türleri kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ), normal Portland çimentosunun yetersiz kaldığı, yüksek erken dayanım gerektiren yol uygulamaları, yüksek aşınma direnci gerektiren endüstriyel zemin uygulamaları, yüksek sıcaklık direnci gerektiren refrakter uygulamaları, yüksek kimyasal, biyolojik etmenlere dayanım ve yüksek asit dayanımı gerektiren kanalizasyon elemanları v.b gibi alanlarda, üstün performans göstermektedir. Ancak, kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon sürecinde; altıgen yarı kararlı hidratlar, kararlı kübik hidratlara dönüşür. Kararlı kübik hidratlar, yarı kararlı hidratlardan daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve bu da porozitenin artmasına neden olur. Bu dönüşüm reaksiyonları sonucunda dayanım kayıpları yaşanır. Buna çözüm olarak, Scrivener ve Capmas (1998), yapısal betonda, uzun vadede iyi dayanıklılık sağlamak için toplam su/çimento (s/ç) oranının 0,4'ün altında olması gerektiğine değinmişlerdir. Scrivener (2003b) ise, sahada, kalsiyum alüminat çimentosu betonunun kullanımının şimdiye kadar iki zorluğa maruz kaldığını belirtmiştir; düşük s/ç oranlarında yerleştirilebilir beton elde etmenin zorluğu ve beton mikserlerinde hızlı sertleşme ile uzun taşıma süreleri arasındaki uyumsuzluk. Düşük s/ç oranlarında kalsiyum alüminat çimentosunda kıvam ve kıvam koruma problemleriyle karşılaşılması adına, akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılması gerekmektedir. Tez kapsamında polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı katkılarla kalsiyum alüminat çimentosunun kıvam koruma performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Sunulan literatür bölümünde, ilk olarak kalsiyum alüminat çimentosunun tanımı ve tarihçesi, kimyasal ve mineralojik özellikleri, faz bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri, taze ve sertleşmiş haldeki betonun özellikleri, hidratasyon ve dönüşüm

mekanizması, güvenli kullanımı, kullanım alanları, literatür bilgileri ışığında değerlendirilmiş ve bir literatür özeti oluşturulmuştur. İkinci bölümde, kalsiyum alüminat çimentosu, kimyasal katkıları ile kullanılacağı için, kimyasal katkıları üzerine bir literatür çalışması ve kimyasal katkıların gruplandırılması yapılmıştır. Bunlardan, tez konusunda üzerinde durulacak olan polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcılarla ilgili literatür bilgileri sunulmuştur. Üçüncü bölümde, kalsiyum alüminat çimentosu ile bu tür süperakışkanlaştırıcı katkıların birlikte kullanımı ve diğer katkılarıyla uyumu hakkında bilgiler sunulmuş, bunlarla ilgili literatür özeti derlenmiştir. Son bölümde ise reolojik parametreler hakkında literatür bilgileri sunulmuştur.

Yapılan ön çalışmalarda, ilk olarak reometre kanatlı sonda uçlu mili (*vane*) seçmek ve reometrenin çalışma prensibini kavramak adına farklı sonda ucu, deformasyon hızı ve akma protokolündeki farklı zaman aralıklarıyla, normal Portland çimentosu ile dökümler yapılmıştır. Sonraki aşamada, kalsiyum alüminat çimentosu için 6 farklı s/ç oranında dökümler yapılmış, elde edilen sonuçlar doğrultusunda çalışılacak s/ç oranları 0,19, 0,21 ve 0,23 olarak belirlenmiştir. Katkılı karışımlar için 5 farklı polikarboksilat bazlı katkı temin edilmiş, kalsiyum alüminat çimentosu ile uyumlu olanlarla reometre deneyleri yapılmıştır. Tüm karışımlara reometre deneyleri yapılmadan önce kıvam testi uygulanmış ve bir sabit kıvam aralığı belirlenmiştir.

Ön deneyler sonrasında uygulanan deney programı ise 4 bölüm halinde sunulmuştur. İlk bölümde sabit kıvamdaki ve ikinci bölümde sabit s/ç oranındaki katkılı ve katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamuru örnekleri karşılaştırılmıştır. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan katkıların ham ve normalize edilmiş reolojik verileri yardımıyla performans kıyaslaması yapılmıştır. Son bölümde ise kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu hamurlarının katkılı ve katkısız örnekleri karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Tanımı ve Tarihçesi

Kalsiyum alüminat çimentosu terimi, ana bileşenleri olarak monokalsiyum alüminat (CA) mevcudiyeti ile karakterize edilen bir dizi inorganik bağlayıcı içerir. Kalsiyum alüminat çimentosunun kimyasal bileşimi geniş bir aralıkta değişebilir, Al_2O_3 içeriği %40 ile %80 arasındadır. Normal Portland çimentosundan farklı olarak trikalsiyum silikat (C_3S) içermez, ancak sınırlı miktarda dikalsiyum silikat (C_2S) içerebilir. Kalsiyum alüminat çimentosu ayrıca alüminli çimento (AC) veya yüksek alümina çimentosu (HAC) olarak da adlandırılır. Ciment Fondu ve SECAR ticari isimleri de yaygın olarak kullanılmaktadır (Odler, 2000).

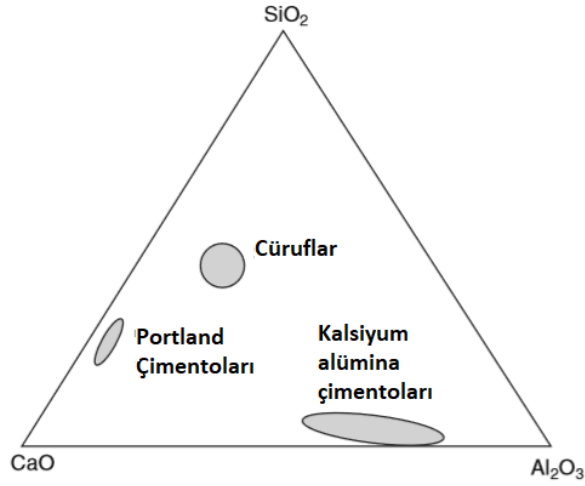
Kalsiyum alüminat çimentoları kireçtaşı ve düşük silika boksitlerden üretilirler. Geliştirilmelerinin temel nedeni normal Portland çimentosuna kıyasla sülfat saldırılarına daha dirençli olacak yeni çimentoların bulunması ihtiyacının artmasıdır (Scheinherrová ve Trník, 2017). Kalsiyum alüminat çimentosunun endüstriyel gelişimi esas olarak, Bied'in Fransa, Le Teil'deki J. & A. Pavin de Lafarge firmasının laboratuvarlarındaki çalışmaları ile başlamıştır. Bu çalışmanın ortaya çıkmasının başlıca sebebi, Fransa'daki büyük miktarlarda sülfat, özellikle alçıtaşı ve anhidrit içeren yerlerde harç ve betonların hızla bozulması ve parçalanması ile ortaya çıkan problemlerdir. 1840'larda Vicat, silika+alümina ve kireç+magnezya içeriğinin sülfat direnci sağlayabileceğini önermiştir. Bu hipotezle Bied, yüksek alümina içeren çimentoların gelişimine odaklanmıştır. 1908'de bu çalışma, boksit veya düşük silika içerikli diğer alümin ve demir içerikli malzemelerin kireçtaşı ile birlikte kaynaştığı bir üretim sürecinin patentlenmesiyle sonuçlanmıştır. Elde edilen çimento sadece istenen sülfat direnci özelliklerine sahip olmakla kalmayıp, aynı zamanda normal Portland çimentosundan çok daha hızlı sertleşmiştir. Çimentonun ilk kullanımı hızlı sertleşme potansiyelinden yararlanılarak, 1. Dünya savaşı sırasında gerçekleşmiş ve sülfat direncinden dolayı, Paris-Lyon-Marsilya demiryollarında, yoğun bir anhidrit

kütlesinden geçen bir tünelin yeniden yapımında kullanılmıştır (Scrivener ve Capmas, 1998).

Kalsiyum alüminat çimentosu, en çok kullanılan özel çimento türü olmasına rağmen, dünya çapında yıllık üretimi Portland çimentosunun binde birinden azdır (Scrivener, 2003b). Bu kadar az kullanılmasının en büyük sebeplerinden birisi geçirdiği dönüşüm reaksiyonunun yarattığı güvensizliktir. Hidratasyon sürecinde meydana gelen dönüşüm reaksiyonları sonucunda porozite artar ve dayanım düşer. Dönüşüm reaksiyonunun yanlış anlaşılması ve etkisinin öngörülememesi geçmişte bir miktar hasara yol açmıştır (Bizzozero, 2014). Ancak, Mangabhai (1990), kalsiyum alüminat çimentosunun yapı malzemesi olarak kullanılmaması için hiç bir geçerli sebep olmadığını ortaya koymuştur. Kalsiyum alüminat çimentosu betonunun uzun vadeli özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, yapıların uzun vadede dönüşüm yoluyla başa çıkacak şekilde tasarlandığını göstermiştir, böylece kalsiyum alüminat çimentosu güvenle kullanılabilir (Bensted, 2002).

2.1.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Kalsiyum alüminat çimentosu üretiminde ana hammadde kireçtaşı ve boksittir (Scrivener ve Capmas, 1998). Normal Portland çimentosu gibi kalsiyum alüminat çimentosu da, kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir oksitlerini içerir. Bununla birlikte, bunların bileşimi Şekil 2.1’de görüldüğü gibi oldukça farklıdır. Bu, CaO-SiO₂-Al₂O₃ sistemi içerisinde, normal Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufunun bileşim bölgeleri ile birlikte, yaklaşık olarak kalsiyum alüminat çimentolarının bileşim bölgesini göstermektedir (Scrivener, 2003a).



Şekil 2.1 Kalsiyum alüminat çimentoları ve normal Portland çimentolarının bileşim aralığı (Scrivener, 2003a)

Normal Portland çimentosundan farklı olarak, kalsiyum alüminat çimentosunun en yüksek orandaki ana bileşeni alüminyum oksittir (Al_2O_3). Sonra sırasıyla, kalsiyum oksit (CaO), demir oksit (Fe_2O_3), silisyum oksit (SiO_2), magnezyum oksit (MgO) ve kükürt trioksit (SO_3) gelmektedir. Normal Portland çimentosunda ise ana bileşenler sırasıyla CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO ve SO_3 'tür. Tablo 2.1'de kalsiyum alüminat çimentosunun oksit yüzdeleri verilmiştir. Tablo 2.2'de ise farklı kalsiyum alüminat çimentosu sınıflarının oksit yüzdeleri sunulmuştur.

Tablo 2.1 Kalsiyum alüminat çimentosunun kimyasal bileşimi (Kırca, 2006)

Oksitler	%
Al_2O_3	38-82
CaO	18-40
Fe_2O_3	0,3-18
SiO_2	0,5-6
TiO_2	0,1-4
MgO	0,2-1,5
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	0,4-7
SO_3	0,2-0,4

Tablo 2.2 Kalsiyum alüminat çimentosu türlerinin bileşim aralıkları (Scrivener ve Capmas, 1998)

Sınıf	Renk	Al ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	SiO ₂ (%)	MgO(%)
Standart düşük alümina	Gri	36-42	36-42	3-8	~1
Düşük alümina, düşük demir	Gri-beyaz	48-60	36-42	3-8	~0,1
Orta alümina	Beyaz	65-75	25-35	<0,5	~0,1
Yüksek alümina	Beyaz	≥80	<20	<0,2	~0,1

Tez kapsamında kullanılan ISIDAÇ40 çimentosu Tablo 2.2'ye göre standart düşük alümina sınıfına girmektedir.

2.1.2 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Faz Bileşimi

Normal Portland çimentosundaki ana fazlardan (C₃S, C₂S, C₃A ve C₄AF) farklı olarak kalsiyum alüminat çimentosundaki ana fazlar monokalsiyum alüminat (CA), dikalsiyum alüminosilikat (C₂AS, gehlenit), dodekakalsiyum heptaalüminat (C₁₂A₇, mayenit) ve tetrakalsiyum alüminoferrit (C₄AF, ferrit)'tir (Barborak, 2010 ve Guirado ve Galí, 2006). Normal Portland çimentosunun ana fazlarının kalsiyum alüminat çimentosu ile karşılaştırılması Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Faz gruplarının karmaşıklığı ve değişkenliği sebebiyle, kalsiyum alüminat çimentosunun potansiyel faz bileşimini hesaplamak için normal Portland çimentosunda kullanılan Bogue hesaplamasının genel kabul görmüş bir karşılığı yoktur (Scrivener ve Capmas, 1998). X ışını kırınımı ve optik mikroskop kalsiyum alüminat çimentosunda bulunan ana fazları belirlemek için kullanılan temel tekniklerdir (Bensted, 2002).

Guirado ve Galí (2006), yaptıkları çalışmada 20 farklı kalsiyum alüminat çimentosu örneğinin faz analizini yapmışlardır. Elde edilen faz yüzdeleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Normal Portland çimentosu – kalsiyum alüminat çimentosu ana fazlar (Barborak, 2010)

Faz	Portland Çimentosu (%)	Kalsiyum Alüminat Çimentosu (%)
C_3S	50-70	0
C_2S	15-30	<10
C_3A	5-10	0
C_4AF	5-15	10-40
CA	0	40-50

Tablo 2.4 Kalsiyum alüminat çimentosu ana fazlar (Guirado ve Galí, 2006)

Faz	Ağırlıkça %
CA	40-70
C_2AS	0-20
$C_{12}A_7$	0-10
C_4AF	10-30

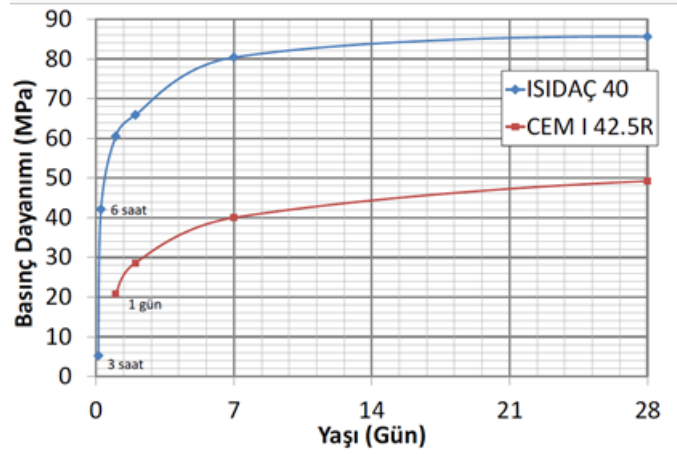
Tüm kalsiyum alüminat çimentolarında ana hidrolik faz olarak monokalsiyum alüminat ($Ca.Al_2O_3$, CA) %40'tan daha fazla bulunur (Scrivener ve Capmas, 1998). Bu faz, suyla hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve kalsiyum alüminat çimentolarında dayanım gelişiminden sorumludur (Swift, 2013). Hidrate olmuş kalsiyum alüminat çimentosunun erken mukavemetini sağlar (Klaus, Buhr, Schmidtmeier ve Kuiper, 2015). Dikalsiyum alüminosilikat ($2CaO.Al_2O_3.SiO_2$, C_2AS , gehlenit) C_2S 'ye benzer şekilde davranır, hidrasyonu yavaşır ve ileri yaş dayanımına katkıda bulunur (Robson, 1962). Dodekakalsiyum heptaalüminat ($12CaO.7Al_2O_3$, $C_{12}A_7$, mayenit) yaygındır, fakat çoğu durumda kalsiyum alüminat çimentolarının sadece küçük bir bileşenidir. Kübik formdadır (Odler, 2000). Hızlı bir şekilde priz alır ancak dayanıma hiçbir katkı sağlamaz, bu nedenle küçük miktarlar haricinde kalsiyum alüminat çimentosunda çok istenen bir bileşen olarak kabul edilmez (Robson, 1962). Tetrakalsiyum alüminoferrit ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, C_4AF , ferrit) priz süresi üzerinde ve dayanım kazanmada çok az veya hiç bir etkiye sahip değildir (Idrees, Sonyal ve Ekinçioğlu, 2019).

2.1.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Standart kalsiyum alüminat çimento sınıfları için özgül ağırlıklar 3200-3250 kg/m³'tür. Özgül ağırlık demir içeriğiyle doğru orantılıdır, demir içeriği arttıkça özgül ağırlık artar. Özgül yüzey alanları ise 250-400 m²/kg'dır (Scrivener ve Capmas, 1998). Özgül ağırlıkları normal Portland çimentosuna kıyasla yüksektir.

Bensted (2002)'e göre iki ana kalsiyum alüminat çimentosu vardır. Birincisi, koyu gri veya siyah renkte olan ve geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilen, ikicisi ise beyaz renkte olan ve öncelikle yüksek sıcaklıkta refrakter amaçlı ve bazen de dekoratif amaçlı kullanılabilen kalsiyum alüminat çimentosudur. Ng (2012)'ye göre bu iki tip, ana çimento davranışlarında genel olarak benzerdir. Beyaz kalsiyum alüminat çimentosu (>ağırlıkça %70 alümina), daha fazla alümina içeriğine sahiptir ve koyu gri/siyah kalsiyum alüminat çimentosu daha fazla demir fazı içerir. Beyaz kalsiyum alüminat çimentosu genellikle düşük demir yüzdesi bulunan kalsine edilmiş alümina ile sönmemiş kireç (CaO) veya yüksek saflıkta kireçtaşı ile sinterlenerek yapılır. Ticari olarak üretilen beyaz kalsiyum alüminat çimentolarının çoğu CA (ana bileşen) ve C₁₂A₇ (mayenit) içerir.

Kalsiyum alüminat çimentolarında, bir günde elde edilen basınç dayanımı, normal Portland çimentosunun 28 günlük basınç dayanımından fazladır (Bensted, 2002). Şekil 2.2'de Portland çimentosu ve ISIDAÇ40 tipi kalsiyum alüminat çimentosunun basınç dayanımı gelişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.2 Normal Portland çimentosu – ISIDAÇ40 basınç dayanımı gelişimi (Yaman, 2015)

2.1.4 Kalsiyum Alüminat Çimentosu Taze ve Sertleşmiş Betonunun Özellikleri

2.1.4.1 Priz Süresi

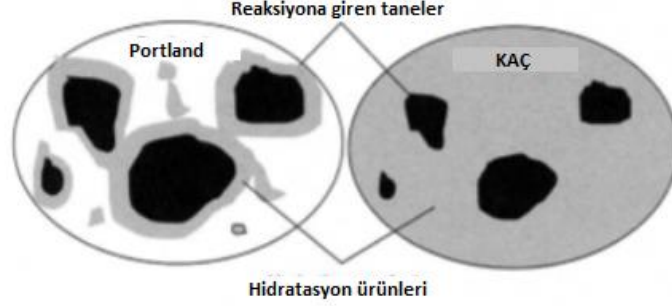
Kalsiyum alüminat çimentosunun hızlı prizinden $C_{12}A_7$, CaO, C_3A fazları, ortalama priz süresinden CA fazı ve yavaş prizinden ise CA_2 ve C_4AF fazları sorumludur.

Priz süresi genellikle $0^\circ C$ ile yaklaşık $20^\circ C$ arasında kısalmır, sonra $28-30^\circ C$ 'deki priz süresi, $20^\circ C$ 'dekinin 8 katı kadar olabilir. $30^\circ C$ 'nin üstünde ise, yine çok hızlı şekilde kısalmır. Hidratasyonun başlangıç periyodunun uzunluğu, çözeltideki C/A oranı ile azalır. Saf CA tarafından belirlenen 1.06'ya kadar olan oranlar için, priz 6-12 saat kadar olabilir, ancak 1.20'nin üzerindeki oranlarda, hemen priz oluşabilir (Taylor, 1990).

2.1.4.2 Reaksiyon Hızı ve Isı Değişimi

Hidratasyonun başlangıç periyodunun sonunda hızlı reaksiyon meydana gelir. Normal Portland çimentosunda, ana hidratasyon ürünü, hidrate çimento tanelerinin etrafında depolanır, böylece ilk birkaç saat sonra reaksiyon hızı dereceli olarak

yavaşlar. Kalsiyum alüminat çimentolarında, aksine, hidratasyon ürünleri boşluk boyunca biriktirilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Normal Portland ve kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon ürünlerinin birikimi (Scrivener, 2003a)

Hızlı reaksiyonun bir başka sonucu da hidratasyon ısısının nispeten kısa bir sürede gelişmesidir. Bu kendi kendine ısınma etkileri, kalsiyum alüminat çimentosu betonu üzerindeki dayanım gelişimi için çok önemlidir. Bu yüksek sıcaklık artışlarına rağmen, kalsiyum alüminat çimentosu betonları termal çatlamaya aşırı duyarlı görünmemektedir. Bunun nedeni, sünmenin dönüşüm reaksiyonu ile hafifletilmesi ve termal olarak uyarılmış gerilmelerin gevşetilmesi olabilir. Hızlı sıcaklık artışının önemli bir sonucu, yüzeyin kurumasını ve dehidratasyonunu önlemek için betonu ıslak tutma ihtiyacıdır. Büyük hacimli işler için, kalıpları mümkün olduğunca erken çıkarmak (yaklaşık 6 saat) ve yüzeye su püskürtülmesi önerilir. Bu kendiliğinden ısınmanın bir avantajı da, betonun hidratasyon başlamadan önce donmasına izin verilmemesi koşuluyla, çok soğuk havalarda ve aslında sıfırın altındaki sıcaklıklarda beton dökülmeye devam edilebilmesidir (Scrivener, 2003a).

2.1.4.3 Sülfat Atağına Karşı Direnç

Bied (1909), kalsiyum alumina bazlı çimentoların, normal Portland çimentosu gibi kalsiyum silikat bazlı çimentolardan daha iyi sülfat direncine sahip olduğunu savunmuştur (Mangabhai, 1990). Kalsiyum alüminat çimentosu betonları 80 yılı aşkın bir süredir sülfatlı sulara maruz kalan alanlarda kullanılmaktadır. Bu süre zarfında, bu

malzemenin hem yapılardaki hem de uzun vadeli saha denemelerindeki performansıyla ilgili sürekli olarak iyi raporlar sunulmuştur. Normal Portland çimentosunun aksine, sodyum sülfat çözeltilerinin kalsiyum alüminat çimentosu betonları için magnezyum sülfat çözeltilerinden daha agresif olabileceği öne sürülmüştür (Scrivener ve Capmas, 1998).

2.1.4.4 Asit Dayanımı

Portland çimentoları, yapılarında bulunan silikatların, pH değerinin 7'nin altına düşmesi durumunda çözünmeye başlamaları sebebiyle, asidik ortama dayanıksızdır. Kalsiyum alüminat çimentoları ise sahip olduğu alüminat fazları ile düşük pH'larda bile yüksek asit dayanımı gösterirler ve minimum kütle kaybına uğrarlar (ÇİMSA, b.t.).

Kalsiyum alüminat çimentolarının iyi performansının anahtarı hidratların, özellikle alümina hidratın doğasında yatmaktadır (normal kristalimsi alümina hidrat formu jipsettir, AH_3 'tür, fakat bu faz genellikle kalsiyum alüminat çimento hamurlarında zayıf kristallidir, bu nedenle genel alümina hidrat terimi tercih edilir). Alümina hidrat, yaklaşık 3 veya 4 pH'a kadar kararlıdır ve diğer hidratların kalsiyum bileşeninin çözünmesi, bu fazın daha çok oluşmasına yol açar, bu da boşlukları doldurur, betonu daha fazla saldırıdan korur ve genellikle daha az agregaya kaybıyla daha pürüzsüz bir yüzey sağlar (Scrivener, Cabiron ve Letourneux, 1999).

2.1.4.5 Yüksek Sıcaklıklara Karşı Direnç

Kalsiyum alüminat çimentosu hamurunun termal genleşmesi normal Portland çimentosuna göre daha düşüktür. Dikkatli agregaya seçimi ile yangına maruz kalabilen kalsiyum alüminat çimentosu betonları yapılabilir (Scrivener ve Capmas, 1998). Tablo 2.5'te ISIDAÇ40 tipi kalsiyum alüminat çimentosunun sıcaklık ile değişen basınç dayanımlarının Portland çimentosuyla karşılaştırılması sunulmuştur.

Tablo 2.5 ISIDAÇ 40 esaslı karoların ısı dayanımlarının Portland Çimento esaslı karolar ile karşılaştırılması (ÇİMSA, b.t.)

Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Klinker Agregalı Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Şamot Agregalı Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Şamot Agregalı Karışım	Portland Çimentosu ve Kalker Agregalı Karışım
400°C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	37,2	29,7	39,2	35,5
600°C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	43,8	41,3	46,9	24,8
800°C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	59,5	45,3	56,7	0
1100°C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	32,4	25,1	30,2	0

2.1.5 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Hidratasyon Mekanizması

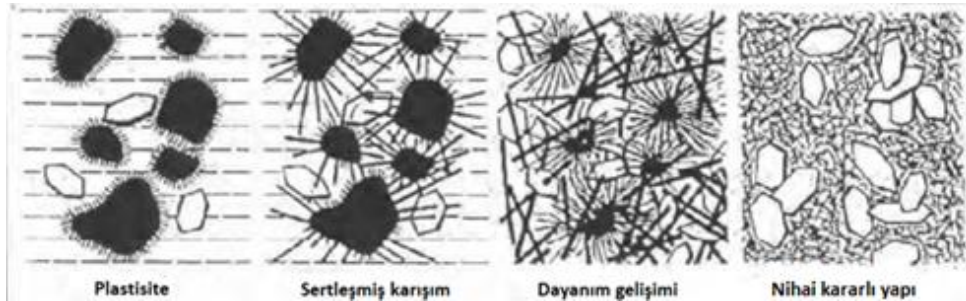
Kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon süreci normal Portland çimentosundan farklıdır. Genel olarak, normal Portland çimentosu hidratasyonunun %60-80'i, 28 gün içinde gerçekleşir ve hidratasyon 28 gün sonra yavaş yavaş devam eder. Bununla birlikte, kalsiyum alüminat çimentosundaki hidratasyonun çoğu, sadece ilk 24 saat içinde gerçekleşir (Kan, Pei ve Cheng, 2017). Normal Portland çimentosu, kalsiyum ve silisyum oksitleri ile C_2S ve C_3S fazlarını oluşturarak, su ile tepkimeye girdiğinde C-S-H ve C-H hidratlarının elde edilmesini sağlar. Kalsiyum alüminat çimentosu, kalsiyum ve alüminyum oksitleri ile monokalsiyum alüminat (CA) oluşturarak, su ile tepkimeye girdiğinde kalsiyum alüminat hidratları oluşturur (Sucu ve Delibaş, 2015).

Su ile temas halindeki anhidrit fazlar, iyon vermek için çözelti içinde çözünür. Örneğin, kalsiyum alüminat çimentosunun ana fazı monokalsiyum alüminat (CA),

suda Ca^{+2} ve $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ iyonlarının oluşmasına yol açar. Hidratların çökmesi ve büyümesi çözelti yoluyla gerçekleşir (Bizzozero, 2014). Bunu, kalsiyum alüminat hidrat kristallerinin ve jipsetin (AH_3) çekirdeklenme ve çökmesi izler. Bu hidrat kristalleri, bir jel tabakası oluşturarak reaksiyona girmemiş klinker yüzeyine yakın çökmeye başlar. Bu tabaka suya geçirgendir. Bu nedenle, alttaki klinker tanelerinin daha fazla hidratasyonu, çözülme ve hidratasyon için yeterli su olduğu sürece sürekli bir işlem olarak kolayca gerçekleştirilir. İlk aşamalarda, hidratasyon kristalleri reaksiyona girmemiş taneleri kaplayan bir jel tabakası oluşturur. Karışım hala plastiktir. Reaksiyonlar sonucu kristal oluşumundaki ilerlemeye bağlı olarak, çimento taneleri arasında bazı bağlar meydana gelmekte ve karışımın sertleşmesi ile sonuçlanmaktadır. Hidratasyon daha da ilerlerken, karışım güçlenerek sertleşir (Garsel, 1996).

Tepkime hızı sadece reaktanlardan biri (çimento veya su) tükendiğinde veya hidratların çökmesini sağlayan boş alan olmadığı zaman yavaşlar. Bu olay çimento hamurunun, harç veya betonun prizine neden olur (Bizzozero, 2014).

Kalsiyum alüminat çimentosunun düşük sıcaklıklardaki ($<27^\circ\text{C}$) hidratasyon ürünleri CAH_{10} , C_2AH_8 ve AH_3 'tür (Kırca, 2006). Şekil 2.4'te kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon süreci şematize edilmiştir.



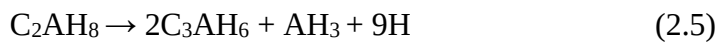
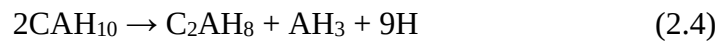
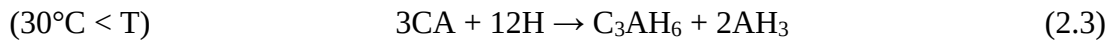
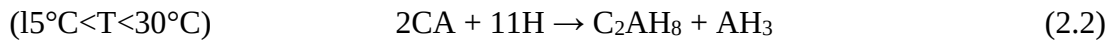
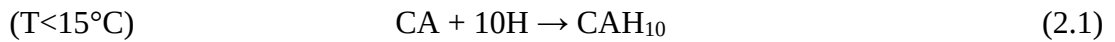
Şekil 2.4 KAÇ hamurunun hidratasyon süreci (Garsel, 1996)

Şematize edilen hidratasyon sürecinde;

- 1) Çimento taneciklerinin yüzeylerinde ilk kristaller oluşur. Karışım hala bu noktada plastisite gösterir, ancak başlangıçtaki akış özelliklerini kaybetmiştir.
- 2) Sürekli çözünme/çökelme ilerlemesiyle birlikte kristaller daha da büyür, birbirleriyle bağlanır. Bireysel tane hareketi durdurulur, karışım sertleşir ve priz alır.
- 3) Hidratasyon işlemi devam ettikçe, gittikçe daha fazla kristal gelişir ve büyür, birbiriyle iç içe geçerek yapıya dayanım kazandırır.
- 4) Su tamamen kullanıldığında ve kararlı kristal fazları geliştiğinde nihai kararlı yapıya ulaşılır (Garsel, 1996).

2.1.6 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Dönüşüm Mekanizması

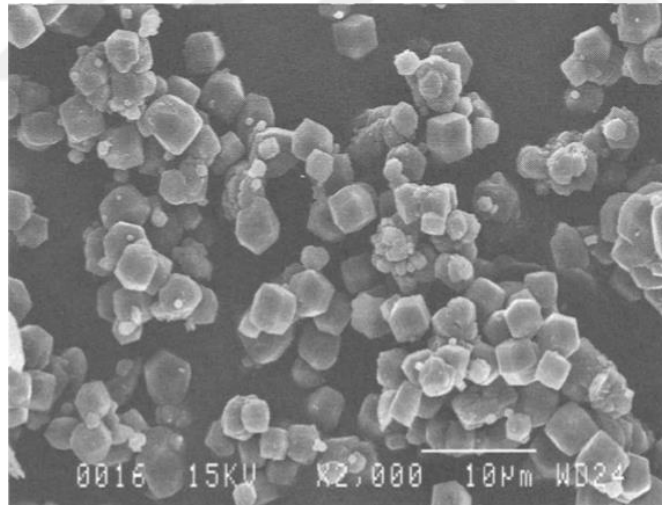
Hidratasyon süreci boyunca yarı kararlı CAH_{10} , C_2AH_8 ve kararlı C_3AH_6 kalsiyum alümina hidratları oluşur. Altıgen yarı kararlı hidratlar, kararlı kübik hidratlara dönüşür. Kararlı kübik hidrat CAH_{10} , C_2AH_8 'den daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve bu da porozitenin artmasına neden olur. Porozitenin artması ve bunun mukavemet ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkisi, malzeme tasarımı için dikkate alınmalıdır. Monokalsiyum alüminatın $15^{\circ}C$ 'nin altındaki hidratasyonu, yarı kararlı CAH_{10} 'un oluşmasına neden olur. Scrivener ve Capmas (1998), dönüşüm reaksiyonlarını formül 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 ve 2.5'teki gibi açıklamışlardır.



Tablo 2.6 Kalsiyum alümina hidratlarının yoğunluk ve bağıl su oranları

	Yoğunluk (kg/m ³)	Bağıl su (%)
CAH ₁₀	1720	53
C ₂ AH ₈	1750	40
C ₃ AH ₆	2520	28
AH ₃	2400	35

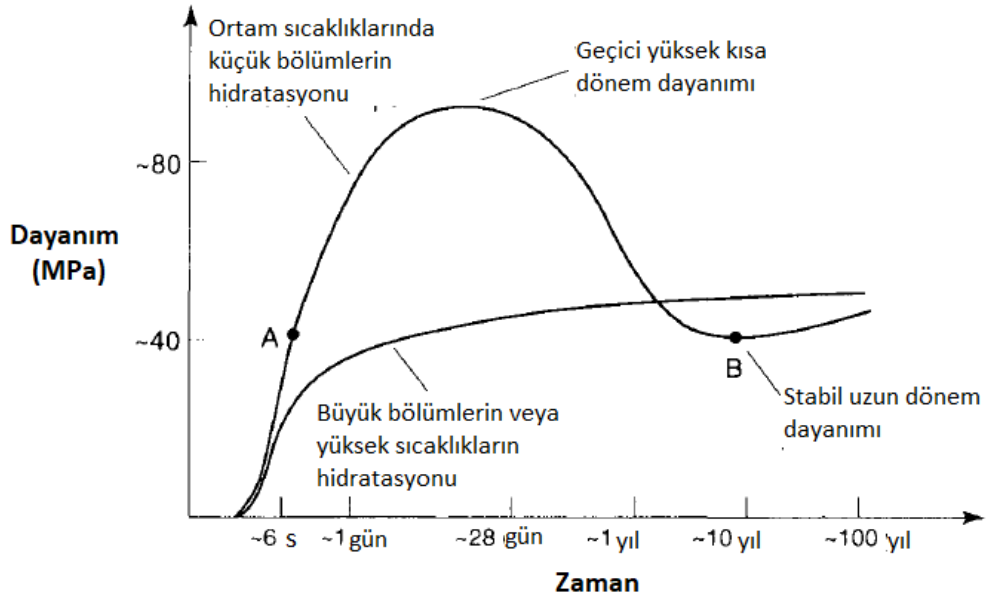
Tabloda 2.6’da görüldüğü üzere hidratlar arasında en yüksek yoğunluğa sahip hidrat C₃AH₆’dır. Tüm sıcaklıklarda en kararlı hidratlar, kübik kristal ve zayıf kristalin yapıları olan C₃AH₆ ve AH₃’tür (Scheinherrová ve Trnák, 2017). Şekil 2.5’te C₃AH₆ kristalinin morfolojisi gösterilmiştir. Bu resimdeki kristaller, yüksek s/ç oranına sahiptir, bu yüzden oldukça büyüktür. Dönüşüm sırasında normal hamurlarda oluşturulanlar tipik olarak bir mikron boyutundan daha küçüktür (Scrivener, 2003a)



Şekil 2.5 C₃AH₆ kristalinin morfolojisi (Scrivener, 2003a)

Kalsiyum alüminat çimentosunun uzun süreli dayanımı, kararlı hidratların (C₃AH₆ ve AH₃) oluşumuyla gelişir. Hidratasyon, ortam sıcaklıklarında küçük bölümlerde gerçekleştiğinde, bu kararlı hidratların oluşumu, yarı kararlı hidratların (CAH₁₀ ve C₂AH₈) oluşumundan önce gelir. Yarı kararlı hidratlar, yüksek oranda su ve düşük

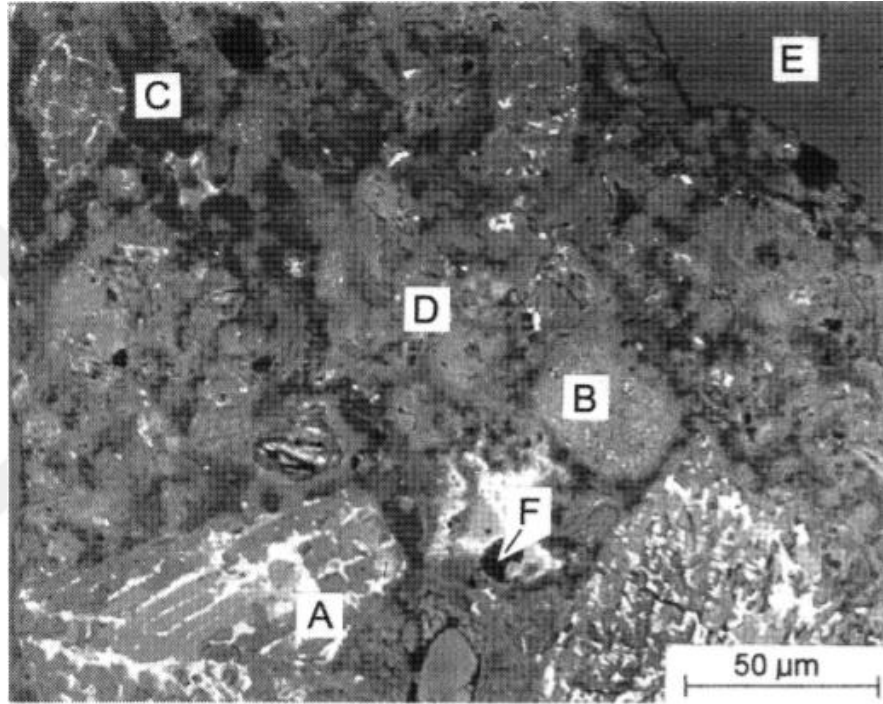
yoğunluklara sahip olduklarından, orijinal olarak su ile kaplı olan alanı hızla doldururlar ve erken dayanım sağlarlar. Bu erken dayanımlar, kararlı hidratların asıl oluşumundan önce geçici olarak kabul edilmelidir. Düşük yoğunluklu yarı kararlı hidratların, daha yüksek bir yoğunluğa sahip kararlı hidratlara dönüşmesi sırasında, porozitede bir artış ve mukavemette bir azalma olur. Aynı zamanda su açığa çıkar. İlk s/ç oranı düşük tutulursa, ilk yarı kararlı hidratların oluşumundan sonra hidrate olmamış çimento kalacaktır. Bu hidrate olmamış çimento, dönüşüm reaksiyonu sırasında salınan suyla reaksiyona girmektedir, bu da mukavemette bir artışa yol açar (Scrivener ve Capmas, 1998). Şekil 2.6'da kalsiyum alüminat çimentosu betonunun zamana bağlı dayanım gelişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2.6 Su/çimento ~ 0,4 ve çimento içeriği 400 kg/m³ olan kalsiyum alüminat çimentosu betonunun dayanım gelişimi (Kurdowski, 2014)

Dönüşüm oranı zamana bağlıdır ve tam dönüşüm, özellikle 20°C'nin altındaki sıcaklıklarda birkaç yıl sürebilir. Ayrıca, kürlenme sıcaklığı arttıkça, dönüşüm daha hızlı gerçekleşir, kararsız CAH₁₀ ve C₂AH₈'in C₃AH₆'ya dönüştürülmesiyle dönüşüm doğrudan güçlenir (Kırca, 2006). Şekil 2.7'de 27 yaşındaki kalsiyum alüminat çimentosu betonunun geri saçılımlı elektron görüntüsü verilmiştir. Su/çimento oranı

0,32'dir. Dış yüzeyin 10 mm altındaki derinlikte, A: büyük ölçüde tepkimeye girmemiş çimento tanesini (esas olarak CA (orta koyu) ve ferrit (açık) içeren), B: neredeyse tamamen reaksiyona girmiş bir çimento tanesini, C: AH_3 'ü, D: tanımlanmamış ürünleri (muhtemelen esas olarak mikrometre seviyesinde veya altında karışmış C_3AH_6 ve AH_3 'ten oluşur), E: agregayı ve F: bir gözenağı gösterir (Taylor, 1990).



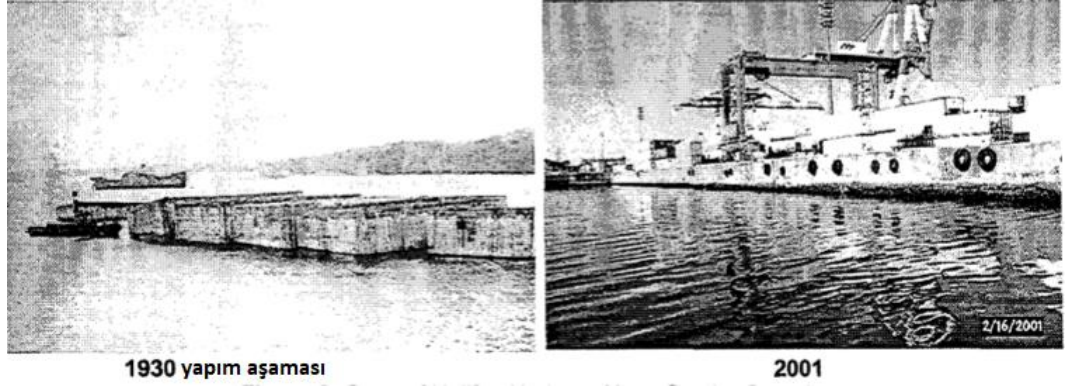
Şekil 2.7 27 yaşındaki kalsiyum alüminat çimentosu betonunun geri saçılımlı elektron görüntüsü (Taylor, 1990)

2.1.7 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Güvenli Kullanımı

Dönüşüm reaksiyonunun yanlış anlaşılması ve etkisinin öngörülememesi geçmişte hasarlara yol açmıştır (Bizzozero, 2014).

İnşaat mühendislerinin temel endişesi olan ‘dönüşüm’ reaksiyonuna genellikle dayanım azalması, artan porozite ve geçirgenlik eşlik etmektedir. Dönüşüm oranı çok çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; sıcaklık (sıcaklığın yükselmesiyle daha hızlı dönüşüm), nem (bağıl nemin doygunluğun altına düşmesiyle daha yavaş dönüşüm), s/ç oranı (yüksek s/ç oranı yüksek dönüşüm hızı), agrega seçimi, çimentonun mineralojik bileşimidir (düşük alkali daha yavaş dönüşüm). Bu dönüşüm reaksiyonu, yüksek sıcaklıkta kütleme (<50°C) ile hızlandırılabilir. Etkisi, hidrat takımını değiştiren cüruf veya kireçtaşı gibi tamamlayıcı çimentolu malzemelerin eklenmesiyle de azaltılabilir (Bensted, 2002).

1950’li ve 60’lı yıllarda İngiltere’de ön gerilmeli kirişlerde kalsiyum alüminat çimentosu betonu kullanılmıştır. O zamanlar dönüşümün kaçınılmazlığı konusu pek anlaşılamamıştır. Su/çimento oranlarının 0,4’ün altında tutulmasına yönelik önerilere rağmen, eklenen suyun kontrolü bazı durumlarda yetersiz kalmış ve bazı betonlarda daha yüksek oranlar kullanılmıştır. 1973-74 döneminde üç çökme meydana gelmiştir. İki durumda kirişlerin duvarlara bağlantısının zayıf tasarımı ve detaylandırılması ve üçüncüde ise sülfat saldırısı gibi çeşitli nedenler tespit edilmiştir. Bununla birlikte, dönüşümden kaynaklanan dayanım kaybının, bunlara katkıda bulunan bir neden olabileceği görülmüştür. Bu olaylara rağmen, 40 ila 70 yıl sonra dayanıklılık problemleri yaşamadan İngiltere’de kalsiyum alüminat çimentosu betonu içeren yaklaşık 50.000 bina mevcuttur. Dayanıklılığa iyi bir örnek Halifax limanındaki rıhtımlardan biridir (Şekil 2.8). Bu liman, 1930/31’de inşa edilmiştir ve hala faaliyet göstermektedir (Scrivener, 2003b).



Şekil 2.8 Halifax limanı rıhtımı, Nova Scotia, Kanada (Scrivener, 2003b)

Şekil 2.9’da kalsiyum alüminat çimentosuyla yapılmış ilk yapılardan biri olan Saint Lucien köprüsü görülmektedir.



Şekil 2.9 Saint-Lucien Köprüsü, Tunus (Robson, 1959)

2.1.8 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kullanım Alanları

1) Beton uygulamaları:

- Hızlı priz, yüksek erken dayanım gerektiren uygulamalarda ve soğuk havada yapılan uygulamalarda (yollar, havaalanları, tamir harçları vb.) kullanılır (Yaman, 2015). Yüksek reaksiyon hızı ve dolayısıyla ısı üretimi

nedeniyle, kalsiyum alüminat çimentosu aynı zamanda düşük sıcaklıkta (-10°C'ye kadar) kullanım için; soğuk hava depolarındaki onarımlar veya soğuk iklimlerde kış inşaatları için de uygundur (Ng, 2012).

- Yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalarda (endüstriyel zeminler, yollar vb.) kullanılır (Yaman, 2015).
- Yüksek kimyasal, biyolojik etmenlere dayanım ve asit dayanımı gerektiren uygulamalarda (beton borular, kanalizasyon elemanları, endüstriyel zeminler, sülfat içeren zeminler vb.) kullanılır (Yaman, 2015). Ayrıca, döşeme ürünleri (döküm ev döşemeleri gibi), kimyasal dirençli harçlar ve betonlar, genleşen harçlar, zemin şapları, lağım uygulamaları, koruyucu kaplamalar, fayans yapıştırıcılar, harç ve inşaat kimya ürünleri vb. nispeten yüksek mukavemetler elde edebilen hızlı sertleşen karışımlar üretmek için sıklıkla normal Portland çimentosu ile birlikte, bazen sönmüş kireçle veya alçı taşı eklenmesiyle birlikte kullanılır (Ng, 2012).
- Yüksek darbe direnci gerektiren uygulamalarda (balistik amaçlı yapılar vb.) kullanılır (Yaman, 2015).

2) Refrakter uygulamaları:

- Yüksek alüminalı çimentolar kullanılarak üretilen refrakter tuğlalar ve dökümlerde kullanılır (Yaman, 2015). Kalsiyum alüminat çimentosunun ana uygulama alanı, monolitik refrakterlerde bağlayıcı olarak kullanılmasıdır. Uygun refrakter agregalarla birlikte kullanıldığında, kalsiyum alüminat çimentosu, çelik ve diğer "ısı kullanılan" endüstrilerde yaygın olarak kullanılan refrakter dökümleri oluşturmak için kullanılabilir. Genel olarak, boksitten yapılmış kalsiyum alüminat çimentosu, 1350°C sıcaklığa kadar kullanılabilir. Demir içeriği düşük, ancak alümin içeriği yüksek olan beyaz kalsiyum alüminat çimentosu, 2000°C'ye kadar sıcaklıklara dayanabilen dökümler yapmak için kullanılabilir. Bu refrakter dökümlerin termal şoka karşı iyi bir dirence sahip olduğu bilinmektedir (Ng, 2012).

3) Yapı kimyasalları uygulamaları:

- Çimento esaslı toz malzemeler
- Üçlü bağlayıcı sistemleri (KAÇ + PÇ + alçı)
- Dolgu malzemeleri (kalsit vb.)
- Kimyasal katkıları (sitrik asit, akışkanlaştırıcılar) (Yaman, 2015)

2.2 Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkıları, günümüzde beton tasarımı için çok önemlidir (Flatt ve Schober, 2012). Katkı maddeleri, karışımın hemen ardından ıslak haldeki ya da karışım sertleştikten sonraki özelliklerini değiştirmek için, karıştırma sırasında betona, harca ya da hamura ilave edilen kimyasallardır. Tek başına veya birkaç kimyasal maddenin karışımı olabilirler ve toz halinde temin edilebilirler ancak çoğu sıvı çözeltilerdir, çünkü bu formda betona eklenmesi ve sonra beton içinde dağılması daha kolaydır (Scrivener, 2003a). İşlenebilirlik, pompalanabilirlik, priz özellikleri, mekanik performans, donma çözünme direnci ve büzülme gibi dayanıklılık özellikleri başta olmak üzere betonun yapı özelliklerini geliştirmek için çeşitli türleri kullanılır. Ayrıca, yüksek akıcılığa sahip beton, yüksek dayanımlı beton, su altı betonu ve püskürtme beton gibi özel betonların üretimini ve yapımını sağlarlar (Plank, Sakai, Miao, Yu ve Hong, 2015).

Taze ve sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirmek için üretilmiş birçok kimyasal katkı türü vardır. Kanada Çimento Birliği (Canadian Cement Association) tarafından yayınlanan Beton Katkılarının Tasarımı'nda (Design of Concrete Mixtures, 2011) katkıların listesi şu şekildedir: hızlandırıcılar, hava engelleyiciler (air-detainers), hava sürükleyici katkıları, alkali-agrega reaktivite inhibitörleri, yıkanma karşıtı katkıları, aderans arttırıcı katkıları, renklendirici katkıları, korozyon inhibitörleri, su geçirimsizlik katkıları, köpük yapıcı maddeler, mantar önleyici kimyasallar, antiseptikler, böcek ilaçları, gaz oluşturmaları, derz katkıları, hidrasyon kontrol katkıları, , geçirimsizlik katkıları, geciktiriciler, rötre azaltıcılar, süperakışkanlaştırıcılar, süperakışkanlaştırıcı ve geciktiriciler, su azaltıcı katkıları, su azaltıcı ve hızlandırıcılar, su azaltıcı ve

geciktiriciler, yüksek oranda su azaltıcılar ve orta derece su azaltıcılar (Aİtcin ve Eberhardt, 2016).

Mindess, Darwin ve Young (2003), katkı terminolojisini karmaşık olarak tanıtmışlardır ve beton katkı maddelerinin dört farklı kategoride sınıflandırılmasını önermişlerdir:

- 1) Öncelikle betonun donma direncini iyileştirmek için eklenen hava sürükleyici katkıları (ASTM C260)
- 2) Öncelikle taze betonun prizini ve erken sertleşmesini kontrol etmek veya su gereksinimlerini azaltmak için eklenen suda çözünen bileşikler olan kimyasal katkıları (ASTM C494 ve BS 5075)
- 3) Dayanıklılığını arttırmak veya ek çimento özellikleri sağlamak için betona toz malzeme halinde ilave edilmiş mineral katkıları (cürufur ve puzolanlar önemli mineral katkı kategorileridir)
- 4) Diğer kategorilerden birine girmeyen ve birçoğu özel uygulamalar için geliştirilmiş olan tüm malzemeleri içeren çeşitli katkıları

Kimyasal katkı maddeleri genel tanım olarak karışımdaki çimentoya %5'ten daha az ilave edilir, ancak katkıların çoğu %2'den az kullanılır ve kullanılan tipik aralık %0,3-1,5'tir (Scrivener, 2003a). Bir katkının performansı; katkının türüne, dozajına ve bileşimine, çimentonun özgül yüzey alanına, agrega tipine ve miktarına, su ilavesinin sırasına, katkıların uyumluluğuna, su/çimento oranı ve kürlenme sıcaklığına ve koşullarına bağlıdır (Bedard ve Mailvaganam, 2005).

Geçmişte çalışmaların çoğu, işçilerin işgücüne yönelik, asgari düzeyde teknolojik yatırım veya becerilerle betonun özelliklerini iyileştirmeye odaklanmıştır. İşçilerin betonu çok daha az suyla yerleştirmesini ve işlemlerini ve böylece daha yüksek mukavemetli kürlenmiş beton üretmesini sağlamak için akışkanlaştırıcılar olarak adlandırılan su azaltıcılar geliştirilmiştir. Bundan sonra, düşük su içeren betonun plastisitesini, betonun mukavemetini veya dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemeden,

daha yüksek noktalara pompalanmasına izin veren bir kıvama getirecek şekilde ayarlamak için süperakışkanlaştırıcılar olarak yüksek oranda su azaltıcılar geliştirilmiştir (Whitney, 2008).

2.2.1 Süperakışkanlaştırıcılar (Yüksek Oranda Su Azaltıcılar)

Süperakışkanlaştırıcılar, çok daha fazla su azaltılmasını veya alternatif olarak dahil oldukları betonun yüksek oranda işlenebilirliğini sağlayan malzemelerden formüle edilen özel bir su azaltıcı katkı kategorisidir (Rixom ve Mailvaganam, 1999). Yüksek oranda su azaltıcılar, çimento taneciklerini su azaltıcı katkılarla benzer şekilde ancak çok daha verimli şekilde defloke eder ve dağıtır (Whitney, 2008). Normal su azaltıcı katkıları betonun su ihtiyacının %10-15 civarında düşürürken, süperakışkanlaştırıcılar %30 düşürme özelliğine sahiptirler (Ramachandran, 1996). Yani işlenebilirliği iyileştirmede su azaltıcı katılardan üstün performans sergilerler. Su azaltıcı katkıların hala kullanılma sebebi ise maliyetlerinin süperakışkanlaştırıcı katılardan daha düşük olmasıdır.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılan betonlar daha işlenebilir ve yerleştirilmesi daha kolaydır; düşük s/ç oranları nedeniyle daha iyi mekanik davranışa sahiptirler ve çimento içeriği optimize edilebildiği için daha ucuzdurlar (Puertas, Santos, Palacios ve Martinez-Ramirez, 2005).

Süperakışkanlaştırıcılar 3 farklı şekilde kullanılabilir;

- 1) Belirli bir işlenebilirlikte su azaltma amacıyla kullanıldığında, sertleşmiş betonun özelliklerini geliştirir ve özellikle, hem kapiler porozite hem de geçirgenlikteki azalma nedeniyle mukavemeti ve dayanıklılığı artırır.
- 2) Hem su hem de çimento azaltmak amacıyla kullanılırsa, betonun süperakışkanlaştırıcı ile işlenebilirliği ve mukavemeti, katkısız kontrol betonunkine aynıdır. Bu durumda çimento dozajı azalacağı için hidrasyon ısısında da düşüş sağlanır.

- 3) Son olarak, süperakışkanlaştırıcı su ve çimento içeriğini değiştirmeden eklenirse, beton işlenebilirliği artar (Collepari, 2005).

Süperakışkanlaştırıcıların su-çimento sistemi üzerindeki bazı önemli etkileri şu şekildedir;

- Süperakışkanlaştırıcılar, çimento hamurlarının hem akma değerini hem de plastik viskozitesini azaltır.
- Çimento, süperakışkanlaştırıcı ilavesi üzerine azalan ve sonunda negatif olan pozitif bir zeta potansiyeline sahiptir.
- Adsorbe olan süperakışkanlaştırıcı miktarı çimento tipine, çimento inceliğine ve C_3S/C_2S ve C_3A/C_4AF oranına bağlıdır.

Süperakışkanlaştırıcıların taze beton üzerindeki bazı önemli etkileri şu şekildedir;

- Süperakışkanlaştırıcı ile çok fazla işlenebilir beton üretmek istendiğinde, kontrol betonundan daha fazla hava sürüklenebilir.
- Süperakışkanlaştırıcılar işlenebilirliği yüksek derecede arttırabilirler ya da aynı işlenebilirlikte s/ç oranını düşürebilirler.
- Süperakışkanlaştırıcı ilavesiyle ilk ve son priz süreleri artış gösterebilir.

Süperakışkanlaştırıcıların sertleşmiş beton üzerindeki bazı önemli etkileri şu şekildedir;

- Süperakışkanlaştırıcılar karışımdaki su miktarını azaltmak için kullanıldıklarında betonun basınç dayanımını yükseltebilirler.
- Süperakışkanlaştırıcılı betonun büzülme ve sünme davranışı katkısız betona benzerdir.
- Süperakışkanlaştırıcılı betonun sülfat direnci katkısız betona benzerdir (Rixom ve Mailvaganam, 1999). Ancak su azaltma amacıyla kullanıldığında sülfat direncini arttırırlar.

Süperakışkanlaştırıcı taze betonun reolojik özellikleri, çimentonun türü, kimyasal ve faz bileşimi ve inceliği, süperakışkanlaştırıcının kimyasal özellikleri, dozajı ve eklenme metodu, betonun s/ç oranı ve sıcaklık gibi birçok faktörden etkilenir (Golaszewski ve Szwabowski, 2004).

Süperakışkanlaştırıcı dozajının belirlenmesi, maliyet, taze betonun reolojisi ve erken yaşlarda mekanik özellikler üzerinde etkisi olan, nispeten karmaşık bir konudur. En uygun dozaj, doygunluk noktasına büyük ölçüde bağlıdır (Gagné, Boisvert ve Pigeon, 1996). Bu dozaj genellikle %0,8 ila 1,2 arasındadır ve süperakışkanlaştırıcı türü ve kalitesinden, çimentonun inceliğinden, C₃A içeriğinden, sülfatların türünden ve içeriğinden ve kullanılan karıştırıcının hız ve kesme etkisinden etkilenir (Baalbaki, 1990).

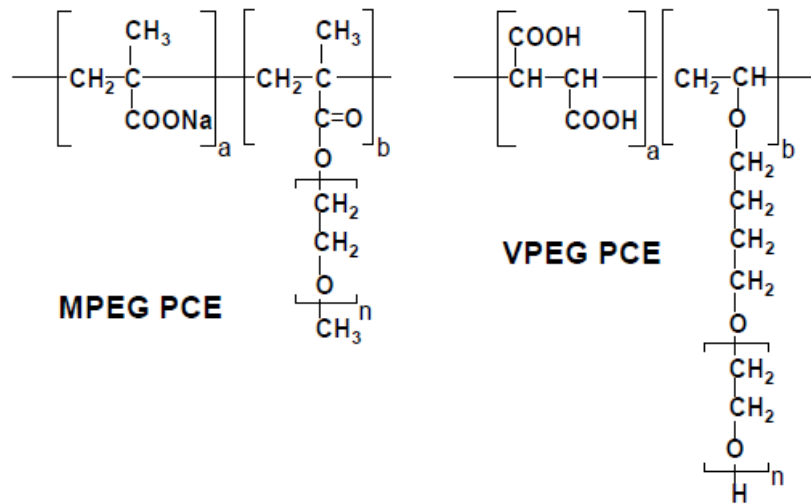
İlk nesil süperakışkanlaştırıcılar linyosülfonat bazlı hava sürükleyici su azaltıcı maddeler olmuştur. Bunu, β -naftalin sülfonat bazlı ürünlerden oluşan ikinci nesil süperakışkanlaştırıcılar takip etmiştir. En yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar ise, günümüzde kullanılan ana süperakışkanlaştırıcılar olan polikarboksilat bazlı ürünler, muhteşem özellikler sağlayan çok karmaşık moleküllerden oluşturulmuştur (Kovler ve Roussel, 2011). Geliştirilen ilk nesil katkılarda çökme kaybı sorunu yaşanmıştır. Bu çökme kaybını azaltmak için 2. nesil katkılar üretilmiştir. Acak bu katkılar da bu sorunun üstesinden tamamen gelememişlerdir. Bu yüzden 3. nesil olan polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcılar geliştirilmiştir.

Tez kapsamında 3. nesil polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcılar kullanılmıştır.

2.2.1.1 Polikarboksilat Bazlı Yeni Nesil Süperakışkanlaştırıcılar (PCE)

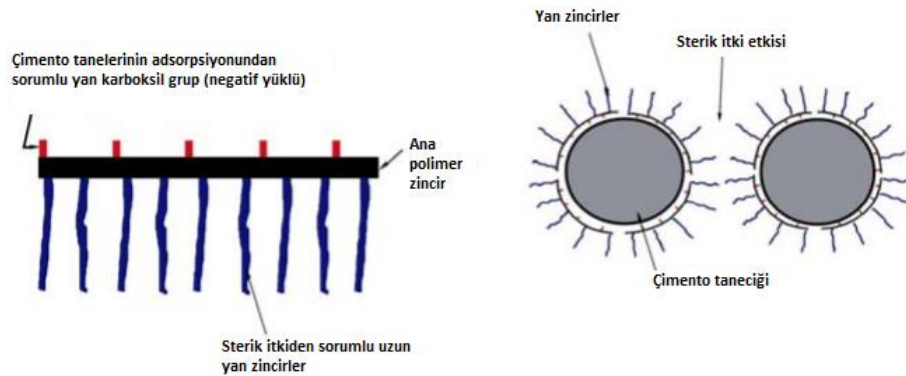
Yeni geliştirilen polikarboksilik asit bazlı katkılar, az miktarda katkıyla bile yüksek akışkanlığa ve düşük s/ç oranlarında bile düşük viskoziteye ve yüksek çökme

korumasına sahip beton üretilmesini sağlarlar (Hanehara ve Yamada, 1999). PCE katkı maddelerinin kullanılması su içeriğini %40'a kadar azaltmayı mümkün kılar, işlenebilir, yüksek performanslı ve dolayısıyla çok dayanıklı betonlar üretilebilir (Puertas ve diğer., 2005). Polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcılar, hidrofil (adsorbe edici) omurgaya ve hidrofob (adsorbe edici olmayan) yan zincirlere sahip tarak tipi kopolimerlerinden oluşurlar (Flatt, Schobar, Raphael, Plasard ve Lesniewska, 2008). Negatif polikarboksilat omurga zincirleri, pozitif yüklü çimento parçacıkları ile etkileşime girerken, poli etilen oksit (PEO) yan zincirleri, sterik itki yaratır, bu da çimento parçacıklarının dağılmasına yol açar (Giraudeau, Lacailleirrie ve Souguir, 2009). Piyasada, MPEG tipi (Metoksipolietilen glikol), APEG tipi (Allileter glikol), VPEG tipi (Vinil eter polietilen glikol), IPEG tipi (Izopreniloksi glikol), XPEG tipi (Allilpoliethanoksi eter glikol) ve PAAM tipi (poliamit amin) polikarboksilat bazlı katkıları bulunmaktadır (Ng, 2012). Tez kapsamında MPEG ve VPEG kökenli kimyasal katkıları kullanılmıştır. Katkıların kimyasal yapısı Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10 MPEG ve VPEG tipi polikarboksilat süperakışkanlaştırıcıların kimyasal yapısı (Ng, 2012)

Plank, Pöllmann, Zouaoui, Andres ve Schaefer (2008)'a göre süperakışkanlaştırıcıların yapısındaki değişiklikler, yani hidrofobik metoksil grubunun ($-O-CH_3$), yan zincirlerdeki hidrofilik hidroksil ($-OH$) veya oksietilen ($-O-CH_2CH_2-$) gruplarıyla değiştirilmesi, omurganın ve yan zincirlerinin çimento taneciklerinin yüzeyine aynı anda adsorpsiyonuna bağlı olarak bir süperakışkanlaştırıcının sterik etkisini artırabilir. Hidrofilik zincirler, özellikle polioksietilen olanlar, sulu ortamda hidratasyona uğrarlar, bu nedenle eter gruplarındaki oksijen atomları ve su molekülleri içindeki hidrojen atomları arasında hidrojen bağları oluşur, böylece süperakışkanlaştırıcı zincirlerinin uzunluğunu, hacmini ve uzamsal düzenini değiştirir (Janowska-Renkas, 2013). Şekil 2.11'de polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı ve çimento tanecikleri üzerindeki sterik itki etkisinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.11 Polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı ve çimento tanecikleri üzerindeki sterik itki etkisi (Collepardi, 2005)

Polikarboksilatların performansını belirleyen ana faktörler şunlardır:

- Omurga uzunluğu
- Omurga kimyasal yapısı (akrilik, metakrilik, maleik vs.)
- Yan zincirlerin uzunluğu
- Yan zincirlerin kimyasal yapısı (PEG, polipropilen oksit, vb.)
- Yan zincirlerin omurga boyunca dağılımı (rastgele, gradyan)

- Anyonik yük yoğunluğu
- Omurga işlevleri ve yan zincir arasındaki bağlantı (ester, eter, amid vb.) (Gelardi, 2017)

Yamada, Takahashi, Hanehara, ve Matsuhisa (2000), yaptıkları çalışmada şu sonuçlara varmıştır:

- Daha uzun PEO yan zincirleri aynı dozajda daha fazla akışkanlık, zamanla daha büyük bir akışkanlık düşüşü ve daha kısa priz süresi sağlamıştır.
- Daha kısa bir omurga zinciri uzunluğu aynı dozajda daha fazla akışkanlık ve biraz daha uzun bir priz süresi sağlamıştır. Zamanla akışkanlık kaybını çok fazla etkilememiştir.
- Polimerlerde daha yüksek bir sülfonik grup içeriği, aynı dozajda daha yüksek akışkanlık vermiştir.
- Çimento hamurunun priz süresi, çimento hamurunun sulu fazındaki iyonik fonksiyonel grup konsantrasyonuna bağlıdır.
- Süperakışkanlaştırıcılar her zaman akma gerilmesini önemli ölçüde azaltır. Ancak plastik viskoziteyi, yüksek s/ç oranlarında önemli ölçüde azaltmış, daha düşük s/ç oranlarında ise daha az miktarda azaltmıştır.

PCE, değiştirilmesi ve uyarlanması kolay bir kimyasal yapıya sahiptir; yani, belirli müşteri ihtiyaçlarına göre kolayca uyarlanabilirler. Bu, yaygın kullanılmalarının bir nedenidir. PCE kullanımının diğer faktörleri, agregaları değiştirmedeki güçlük ve ilgili maliyetler nedeniyle çimento iyileştirmedeki sınırlamalardır (Sakai, Ishida ve Ohta, 2006). Betonda, yeni katkıların, yeni çimentolardan daha önemli bir rol oynadığı sıklıkla vurgulanmaktadır (Uchikawa, 1995).

2.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Çeşitli Kimyasal Katkılarla Uyumu

Çimento ve katkı uyumu önem verilmesi gereken bir konudur, her katkı her çimento türüyle uyum sağlayamaz ve sertleşme, büyük oranda çökme kaybı gibi akışkanlık

problemleri ortaya çıkar. Hanehara ve Yamada (1999), yaptıkları deneyde farklı çimento türlerine farklı katkı türleri ekleyerek karışımların akışkanlık oranlarını kıyaslamışlardır. Örneğin, çimento-A'ya naftalin bazlı katkı ilave edilerek hazırlanan çimento hamuru düşük akışkanlık gösterse de, polikarboksilik asit bazlı katkı kullanılarak hazırlanan karışım, en yüksek akışkanlığı göstermiştir. Bu nedenle, bir tip çimentoya farklı katkılar eklenerek hazırlanan çimento hamurunun akışkanlığı katkı tipine göre değişirken, aynı katkı maddesini farklı çimentolara ekleyerek hazırlananların akışkanlığının çimentoya göre değiştiğini, bunun çimento ile katkı arasındaki uyum sorunlarına bir örnek olduğunu savunmuşlardır. Katkı ilavesinin çimento hidratasyon reaksiyonu üzerindeki etkisinin neden olduğu problemler ve katkının çimento taneciklerine adsorpsiyonundan kaynaklanan problemler olmak üzere, uyum sorunlarını kabaca iki gruba ayırmışlardır.

Kalsiyum alüminat çimentosunun çeşitli kimyasal katkılarla uyumu maddeler halinde özetlenmiştir.

- Az miktar kalsiyum sülfat ilavesi (%0,25), prizi geciktirir, ancak %1'lik ilaveyle son priz süresi 30 dakikanın altına düşer.
- Kalsiyum sülfatın hemihidrat formu (alçı) priz hızlanmasında en etkili formdur, anhidrit formu ise priz alma süresinde küçük bir etkiye sahiptir.
- Şeker varlığı, normal Portland çimentosunda olduğu gibi, priz almayı ve sertleşmeyi tamamen engelleyebilir, %1 ilaveyle prizi bir gün veya daha fazla geciktirilebilir.
- Lityum tuzları en çok kullanılan ve en etkili hızlandırıcılardır. Az bir miktar ilaveyle (~%0,1) birkaç dakikada priz elde edilebilir.
- Normal Portland çimentosu üzerinde güçlü bir hızlandırıcı etkiye sahip olan kalsiyum klorür, kalsiyum alüminat çimentosu için güçlü bir geciktirici olup, bu bileşiğin kullanılması önerilmez.
- Sodyum sitrat ve glukonat su azaltıcı etkiye sahiptir. Linyosülfonatlar uzun zamandır kullanılmaktadır ama bunlar aynı zamanda geciktiricilerdir.

- Melamin ve naftalin formaldehit gibi süperakışkanlaştırıcılar, etkileri çok kısa sürdüğünden, kalsiyum alüminat çimentosu betonu için kullanımları sınırlıdır (Scrivener ve Capmas,1998).
- Normal Portland çimentosu için süperakışkanlaştırıcılar, naftalin formaldehit sülfonatları (SNFC) ve melamin formaldehit sülfonatları (SMFC), kalsiyum alüminat çimentosunda akışkanlaştırıcı gibi davranırlar (Bensted, 2002).
- Melamin formaldehit sülfonat içeren hamurlar genellikle o kadar hızlı sertleşir ki, bu karışımın herhangi bir pratik kullanımı mümkün değildir (Banfill ve Gilt, 1993).

Akma gerilmesi ince parçacıklar arasındaki etkileşimle geliştiğinden, kimyasal katkıların etkilerini incelemek için beton üzerinde çalışmak yerine genellikle çimento hamuru kullanılır (Giraudeau ve diğer., 2009).

2.3.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Polikarboksilat Bazlı Süperakışkanlaştırıcı Katkılarla Uyumu

Yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar, kalsiyum alüminat çimentosu bazlı malzemelerin uzun vadeli performansına yardımcı olabilmek, işlenebilirliği geliştirmek ve s/ç oranını (ve çimento içeriğini) düşürmek için yeni olanaklar sunmaktadır (Fryda, Gachet, Bost ve Scrivener, 2000). Kalsiyum alüminat çimentosu sistemlerinde PCE katkı maddesi davranışı yeterince çalışılmamıştır ve literatürde bu güne kadar bildirilen sonuçlar çelişkilidir. PÇ-PCE uyumunu etkileyen faktörler iyi tanımlanmış olsa da, hamur, harç ve beton reolojisi açısından KAÇ-PCE uyumunu çok az çalışma ele almıştır (Alonso, Palacios ve Puertas, 2013).

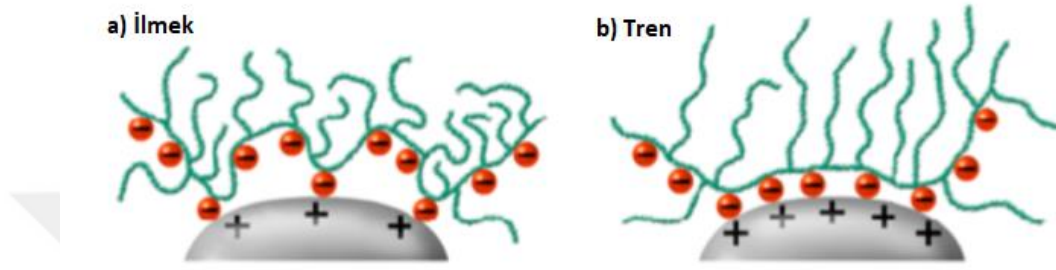
Scrivener (2003a), polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcıların kalsiyum alüminat çimentolarında oldukça etkili olduğunu, ancak aşırı gecikmeyi önlemek için dozajın dikkatlice kontrol edilmesi gerektiğine değinmişlerdir. Ve 0,35 civarında bir serbest s/ç’de, 2 saatten daha fazla bir süre boyunca akıcı beton elde etmenin mümkün

olduğunu savunmuşlardır. Ukrainczyk, Sipusic ve Vrbos (2014), PCE vasıtasıyla işlenebilirlik korunurken s/ç oranının düşürülmesinin, kalsiyum alüminat çimentosu esaslı yüksek performanslı bir malzeme oluşturduğunu ve küçük bir PCE ilavesi ile hidrasyonun yüksek oranda geciktirilmesini, polimerin ana zincirine bağlanan uzun yan zincirlerin sterik etkisiyle ilgili olduğunu savunmuşlardır. Yoshioka, Sakai, Daimon ve Kitahara (1997)'ya göre de PCE omurgasının elektrostatik etkisinin yanı sıra, omurgaya bağlı uzun yan zincirler, çimento parçacıklarının ayrılma ve dağılma kabiliyetini arttıran fiziksel bir bariyer sağlayan sterik itki temelli ilave bir etki oluşturur. Sterik itki, PCE tarafından çimento hamuru dağılımında elektriksel itmeye kıyasla baskın bir rol oynar.

Kalsiyum alüminat çimentosunun etkili bir şekilde dispersiyonu için, daha az iyonik olan kopolimerlere kıyasla daha fazla anyonik olan polimerlerden daha yüksek dozajda kullanmak gereklidir. Bu bulgu, daha fazla anyonik polimerin genellikle çimentoyu daha etkili bir şekilde disperse ettiği normal Portland çimentosunda gözlemlenenlerin tersidir. Etkili dispersiyon için gerekli olan kopolimer miktarındaki gidişat, normal Portland çimentosundaki gibi değildir. Normal Portland çimentosunda yeterli miktarda çözünmüş sülfat iyonları mevcut olduğunda etrenjit (Aft) ve monosülfat (Afm) erken hidrasyon sırasında hızla oluşur. Bu Aft ve AFm fazlarının kararlılığı, interkolasyonu elverişsiz kılar, böylece PCE'leri dispersiyon etkisi için bırakır. Diğer yandan bir kalsiyum alüminat çimentosu sisteminde, interkolasyonu bozabilecek hiç sülfat yoktur ve katmanlı alüminat fazı C_2AH_8 'in erken hidrasyon sırasında hızlı bir şekilde oluşumu PCE'lerin tüketimini artırır. Polimer ne kadar anyonik olursa tüketim oranı o kadar yüksek olur (Ng ve Plank, 2011). Bu süreci Ng (2012) şöyle açıklamıştır; oda sıcaklığında hidrasyon sırasında, katmanlı kalsiyum alüminat hidratlar oluşabilir. Buna karşılık, anyonik PCE süperakışkanlaştırıcılar ara tabaka bölgelerine girebilir ve PCE'leri çimento parçacıklarının etkili bir şekilde dağılması için kullanılamaz hale getirebilir.

Kalsiyum alüminat çimentosu süspansiyonlarının, normal Portland çimentosu süspansiyonlarının zeta potansiyelinden daha pozitif bir zeta potansiyeline sahiptir. Bu

daha pozitif zeta potansiyeli, katkının (C/E oranından bağımsız olarak) kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu tanecikleri üzerindeki adsorpsiyon biçimi farklılıklarını açıklar (Alonso ve diğer., 2013). Şekil 2.12’de normal Portland çimentosunda ve kalsiyum alüminat çimentosunda oluşan farklı adsorpsiyon biçimleri görülmektedir.



Şekil 2.12 (a) Portland çimentolarında (ilmek biçimi) ve (b) kalsiyum alüminat çimentolarında (tren biçimi) PCE katkı adsorpsiyonu ve biçimi (Alonso ve diğer., 2013)

Alonso ve diğer. (2013), yaptıkları çalışmada, PCE katkı maddelerinin kalsiyum alüminat çimentosu hidrasyonunu geciktirdiğini ve bu etkinin katkının karboksilat/ester oranından bağımsız olduğunu savunmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, normal Portland çimentosu ve kalsiyum alüminat çimentosu hamurlarında PCE katkılarının varlığının, oluşan hidratların yapısını değiştirmediğini kanıtlamıştır. Ancak, kalsiyum alüminat çimentosu hamurlarında PCE katkısının mevcudiyeti, üretilen hidratların miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, hidrat miktarı aynı andaki katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamurlarına kıyasla %45 daha düşüktür.

Tüm çalışmalar özetlenecek olursa;

- PCE’nin düşük dozajları kalsiyum alüminat çimentolarında önemli akışkanlaştırıcı özellik gösterir.
- Normal Portland çimentosunun aksine en düşük iyonik yüke sahip katkıları kalsiyum alüminat çimentosunda en yüksek akışkanlığı göstermiştir.

- Daha fazla anyonik polimerlerin, daha az anyonik polimerlere kıyasla daha iyi interkolasyonu, interkolasyon eğiliminin yüke bağlı olduğunu göstermiştir.
- Kalsiyum alüminat çimentolarında PCE katkısında oluşan tren tipi yapı, yüzeyi tamamen kaplamak için gerekli katkı miktarını azaltarak daha iyi adsorpsiyon sağlar.
- PCE içerdiği karboksilat/ester (C/E) oranından bağımsız olarak, kalsiyum alüminat çimentosu hidrasyonunu ertelemektedir.
- Kalsiyum alüminat çimentolarının akışkanlaştırılması sırasında, PCE'nin seçilmesinin ana kriterinin, yük yoğunluğu ile yan zincir uzunluğu arasındaki dengeden kaynaklanan bir etki olan interkolasyonun önlenmesi olduğunu göstermektedir (Ng ve Plank, 2011).

2.4 Taze Çimento Hamuru Reolojisi

Taze çimento hamurunun reolojisini kontrol eden faktörler: (i) çimento tanecikleri arasındaki taneler arası etkileşimlerin doğası; (ii) tanecik dizilimini etkileyen tane büyüklüğü dağılımı ve konsantrasyonu; ve (iii) hidrasyon ürünlerinin oluşumudur (Yoshioka ve diğer., 1997).

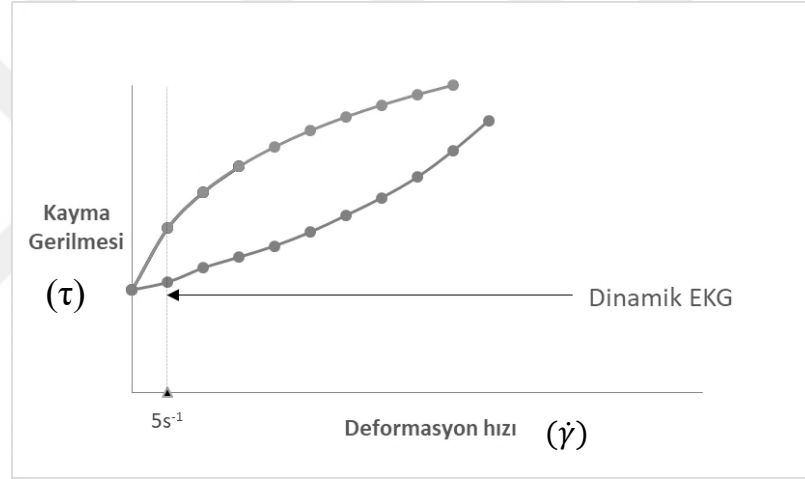
2.4.1 Statik Eşik Kayma Gerilmesi

Statik eşik kayma gerilmesi, durgun halden, akışı başlatmak için gerekli olan minimum kayma gerilmesidir. Sabit ve çok düşük deformasyon hızlarında zamana bağlı kayma gerilmesi değerinin ölçülmesiyle bulunur. Genellikle dinamik kayma gerilmesinden daha yüksek değerdedir. Dinamik kayma gerilmesinden daha yüksek olmasının nedeni, statik kayma gerilmesinin bozulmamış, iyi bağlanmış bir mikro yapıya, dinamik kayma gerilmesi ise parçalanmış bir mikro yapıya karşılık gelmesidir. Karıştırma geçmişine bağlıdır, malzeme tekrar karıştırılıp bekletilirse, farklı statik eşik kayma gerilmesi değerlerine ulaşılır.

2.4.2 Dinamik Eşik Kayma Gerilmesi

Dinamik eşik kayma gerilmesi tiksotropik yapı bozulduktan sonra akışı korumak için gerekli olan minimum kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir. Akma eğrisi yardımıyla bulunabilir. Kayma geçmişinden etkilenmez.

Deneylerde dinamik EKG değerleri, uygulanan akma protokolünün ikinci çıkış ve iniş eğrilerinin y eksenine çok yaklaştığı $5s^{-1}$ deformasyon hızı noktasındaki değerleri alınarak hesaplanmıştır. Dinamik EKG tespit yöntemi Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

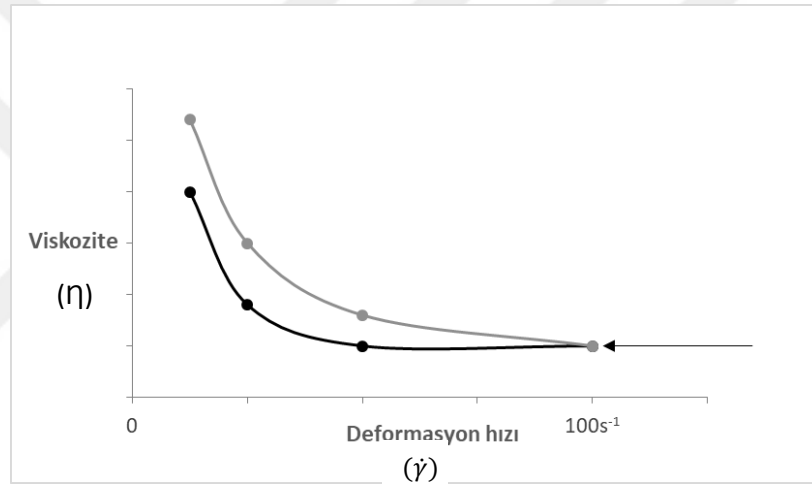


Şekil 2.13 Dinamik EKG tespit yöntemi

Bir sıvının kayma sonrası akışını nasıl durdurduyuyla ilgileniyorsak dinamik kayma gerilmesi etkindir. Diğer taraftan, akışkanın ilk etapta hareket etmesini sağlamak için ne kadar zorlamak gerektiğiyle ilgileniyorsak statik kayma gerilmesi etkindir.

2.4.3 Nihai Viskozite

Viskozite bir akışkanın, akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanabilir. Viskozite–deformasyon hızı grafiklerinde belli bir deformasyon hızından sonra viskozite değerinin büyük ölçüde sabitlendiği gözlenmiştir. Her karışımın çıkış ve iniş eğrilerinden $100s^{-1}$ deformasyon hızında okunan değerler birbirine çok yakın olduğu için çıkış ve iniş değerleri olarak ayırmaya gerek duyulmamış, değerlerin ortalaması nihai viskozite değeri olarak belirlenmiştir. Nihai viskozite tespit yöntemi Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



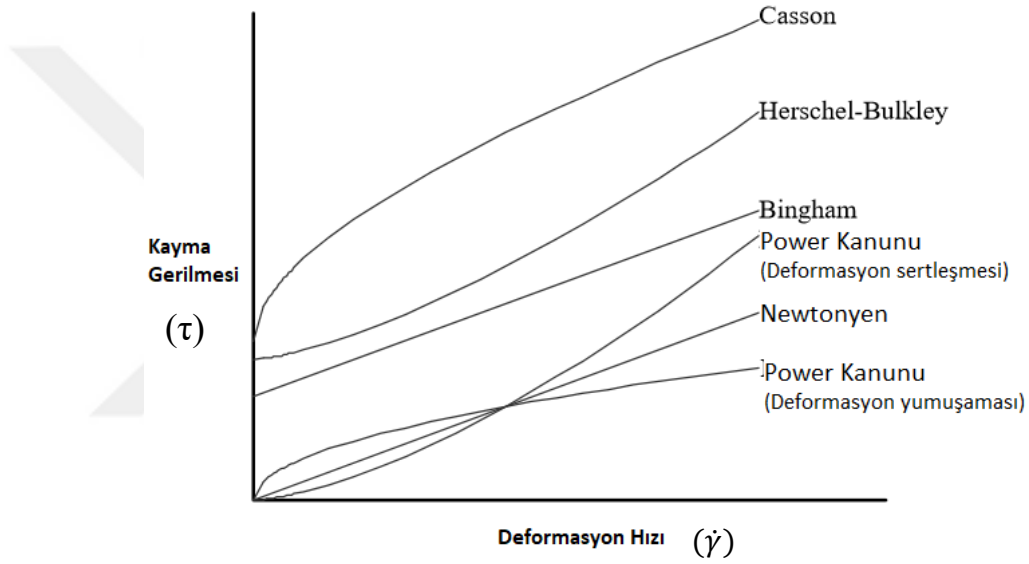
Şekil 2.14 Nihai viskozite tespit yöntemi

2.4.4 Akma Eğrileri

Akma eğrisi, kayma gerilmesi ve deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi temsil eder. Deformasyon hızı kontrollü sistemde, sonda ucunun çimento hamuru karışımı içinde istenilen hızda dönmesi için gerekli kuvvet ölçülmektedir. Ve sonda ucunun dönme merkezine göre momenti hesaplanmaktadır. Ulaşılan bu ham verilerden dönme hızı deformasyon hızına, moment de kayma gerilmesi değerlerine dönüştürülmektedir.

2.4.5 Herschel Bulkley Modeli

Bir malzemenin reolojisinin ölçülmesinde, kayma gerilmesi ve deformasyon hızı üzerindeki akış özelliklerini bilmek önemlidir. Kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki, grafik olarak bir akış eğrisinde gösterilir. Akış eğrilerini idealleştirmek için çeşitli modeller (veya yapısal denklemler) geliştirilmiştir. Beton ile ilgili en yaygın temel ilişkilerden altısı Şekil 2.15'te gösterilmektedir (Koehler ve Fowler, 2004).



Şekil 2.15 Temel akış ilişkileri (Koehler ve Fowler, 2004)

Herschel-Bulkley modeli esas olarak Bingham denklemi ile Power kanunu denklemini birleştirerek hem akma gerilmesini hem de doğrusal olmayan bir akış ilişkisini temsil eder. Analiz sonucu her model için eğrinin y-eksenini kestiği nokta dinamik eşik kayma gerilmesi ($\tau_{0,dinamik}$) olarak tanımlanmıştır (Felekoğlu, 2009).

$$\tau = \tau_{0,dinamik} + b \dot{\gamma}^p \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'da, τ : Belli bir deformasyon hızındaki kayma gerilmesi (Pa), τ_0 : Dinamik EKG (Pa), $\dot{\gamma}$: Deformasyon hızı (1/s), b ve p: model katsayılarıdır. Model katsayılarından p, karışımların viskozitesinin deformasyon hızından nasıl etkilendiğini

göstermektedir. $p > 1$ olması durumunda deformasyon sertleşmesi, $p < 1$ olması durumunda ise deformasyon yumuşaması davranışı baskındır. $p = 1$ durumunda ise viskozite deformasyon hızından bağımsız olarak sabit bir değer almaktadır. Bu durumdaki karışım, Bingham modeline uymakta olup, karışımın sabit olan viskozitesi plastik viskozite (μ) olarak adlandırılmaktadır. Ancak çoğunlukla viskozite, deformasyon hızı ile değişmektedir. Herschel Bulkley modelinde deformasyon hızının sonsuz değerinde, viskozitenin sabitlendiği (η_{inf}) kabulü ile plastik viskozite, denklem 2.7'deki gibi tanımlanır (Felekoğlu, 2009):

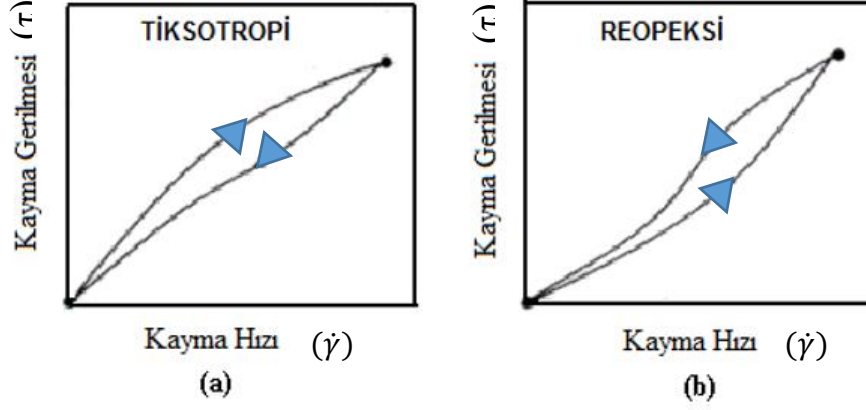
$$\eta_{inf} = \mu = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \quad (2.7)$$

2.4.6 Tiksotropik ve Antitiksotropik (Reopektik) Davranış

Sabit kayma oranında tiksotropik sıvıların viskozitesinde azalma olur. Benzer olarak, aynı etki ölçülen kayma gerilmesinin azalması olarak görülür. Kayma gerilmesi, aynı kayma hızında zamanla küçülür. Kayma deformasyon hızı sıfıra geldiğinde malzeme toparlanmaya başlar. Histerezis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları çakışır. Belirli bir süre sonra aynı sonuçlar tekrar edilebilir. Tiksotropik malzemenin akış davranışı zamana bağlıdır; kayma süresince, sabit kayma oranında viskozite azalır, kayma durdurulduğunda yavaş yavaş toparlanır. Kayma deformasyon hızının artması veya azalması çoğu kez farklı kayma gerilmelerine neden olur ve diyagramda histerezis çevrimi olarak gösterilir. Histerezis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları tam olarak çakışmıyorsa yani kayma deformasyon hızı sıfır olduğunda malzeme toparlanamıyorsa malzeme reopektiktir. Kayma gerilmesi kaldırıldığı zaman yavaş yavaş toparlanmayı takip eden sabit deformasyon hızı altında viskozite artar. Çimento hamuru ve harcı reopektik (tiksotropik olmayan, anti tiksotropi) davranış gösterir (Özel, 2012).

Tiksotropik davranış döngü testi ile gözlemlenebilir. Bu yöntemde kayma hızı sıfırdan maksimum değere kadar sürekli olarak arttırılmaktadır ve bu maksimum değere gelindiğinde tekrar sıfıra kadar sürekli olarak azaltılmaktadır. İlk test sırasında

akışkan yapısında oluşan bozulmadan dolayı akış eğrisinde Şekil 2.16 (a)'da görüldüğü gibi bir histerezis karakteristiği gözlenir. Reopektik akışkanlar Şekil 2.16 (b)'de gösterildiği gibi sabit sıcaklık ve sabit kayma hızlarında zamanla geri dönüşü olan bir kayma gerilmesi artışı gösterirler (Önder, 2008).



Şekil 2.16 Tiksotropik ve reopektik akışkanların akış özellikleri (Önder, 2008)

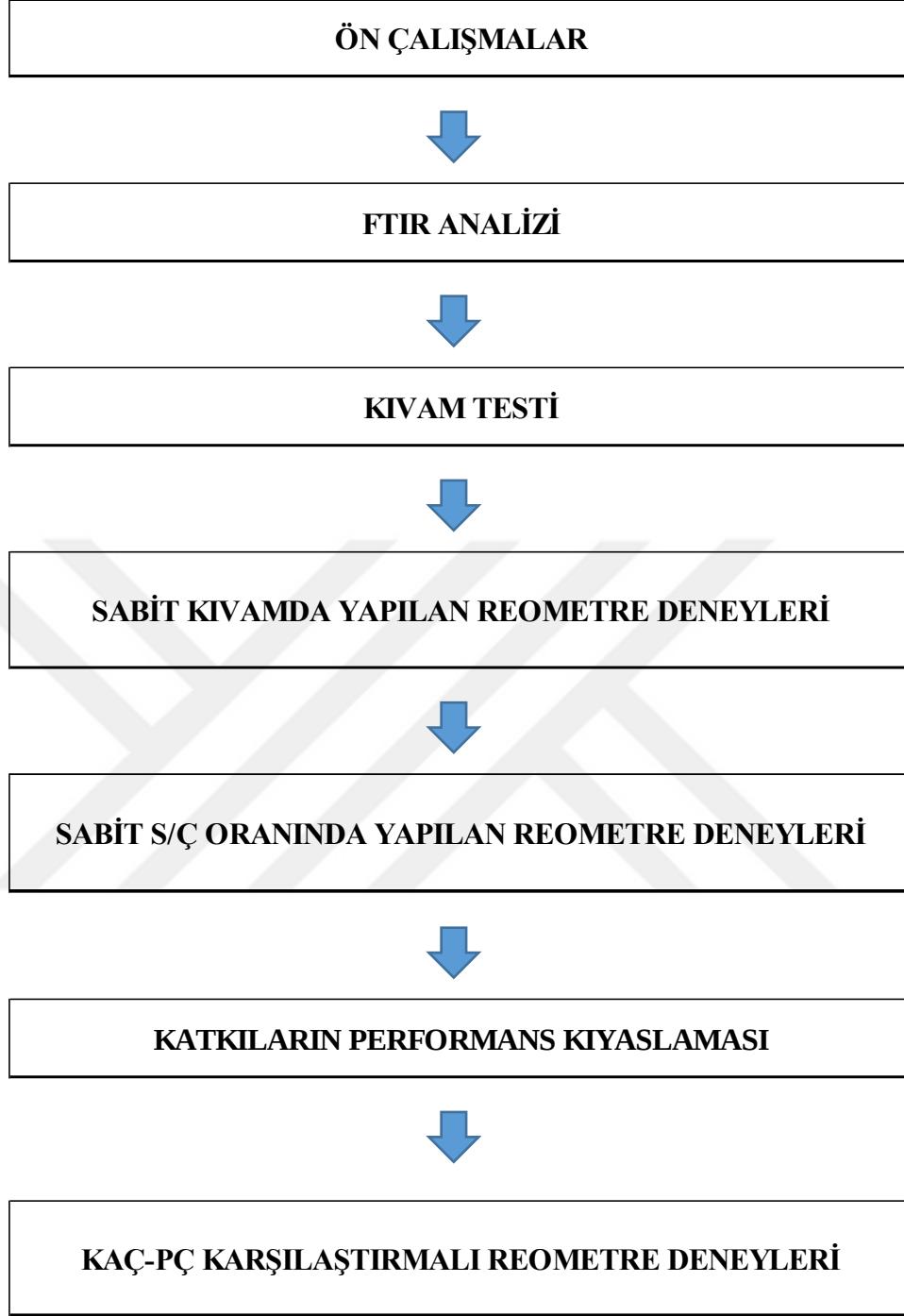
Tüm tiksotropik malzemeler için, yukarı eğrisi aşağı eğrisinin üzerinde olacaktır. Buna karşı, aşağı eğrisi, anti tiksotropik malzemeler için yukarı eğrisinin üzerinde olacaktır (Koehler ve Fowler, 2004).

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda, ilk olarak kanatlı sonda uçlu mili (*vane*) seçmek ve reometrenin çalışma prensibini kavramak adına farklı başlık, deformasyon hızı ve akma protokolündeki farklı zaman aralıklarıyla normal Portland çimentosu ile ön deneyler yapılmış ve literatür bilgileri ışığında en uygun sonda ucu olarak ST24-2D/2V/2V-30, deformasyon hızı olarak 100s^{-1} ve aralık olarak ise 30s seçilmiştir. Sonraki aşamada, kalsiyum alüminat çimentosu için 6 farklı s/ç oranında dökümler yapılmış, çalışılacak s/ç oranları 0,19, 0,21 ve 0,23 olarak belirlenmiştir. Tüm karışımlara reometre testi yapılmadan önce kıvam testi uygulanmış ve bir sabit kıvam aralığı belirlenmiştir. Katkılı karışımlar için 5 farklı polikarboksilat bazlı katkı temin edilmiş, sonra kalsiyum alüminat çimentosu ile uyumlu olanlarla kapasitesi tanımlı bir reometre yardımıyla, reometrenin kapasitesine uygun olan karışımların reolojik özellikleri incelenmiştir. Reometre sonuçları yardımıyla ham veriler Herschel Bulkley modeli ile modellenip akma eğrileri elde edilmiş, bu eğrilerden dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri elde edilmiştir. Kıvam koruma performansının incelenmesi adına deneyler ilk anda yapıldıktan sonra 30 dak., 60 dak. ve 90 dak. sonunda ölçümler tekrarlanmıştır.

Deney akış şeması Şekil 3.1’de sunulmuştur. Tüm yapılan dökümler Tablo 3.1’de verilmiş, reometrede çalışılan örnekler ise Tablo 3.2’de sunulmuştur. Parantez içinde ‘... dk X’ olarak verilenler, yapılamayan deneyleri temsil etmektedir. Çalışmaya uygun örneklerle reometrede 59 adet deney yapılmıştır.



Şekil 3.1 Deney akış şeması

Tablo 3.1 Vicat kıvam cihazıyla denenen örnekler

S/Ç	Katkısız PÇ	Katkısız KAÇ	A Katkısı (PÇ)	A Katkısı (KAÇ)	B Katkısı (KAÇ)	C Katkısı (KAÇ)	D Katkısı (KAÇ)	E Katkısı (KAÇ)	Dozaj
DENEMELER									
0,19								KUSTU	0,10%
0,20							12 mm	KUSTU	0,10%
0,20							9 mm		0,13%
0,20							KUSTU		0,15%
0,22							KUSTU		0,18%
0,22							KUSTU		0,30%
0,22							KUSTU		1,00%
SABİT DOZAJ									
0,2				KUSTU	2 mm				0,10%
0,19					5 mm	1,5 mm	KURU		0,10%
0,18				2 mm			KURU	KURU	0,10%
0,17				KURU					0,10%
0,16							KURU		0,10%
SABİT S/Ç									
0,19				29 mm					0,06%
0,19				3 mm		13 mm		KURU	0,07%
0,19				0 mm		8 mm		KUSTU	0,09%
0,19						3 mm			0,10%
0,19							13 mm		0,13%
0,19							7 mm		0,14%
0,19							0 mm		0,16%
0,21				3 mm				KURU	0,04%
0,21					7 mm	5 mm		KUSTU	0,06%
0,21					2 mm		4 mm		0,07%
0,23				3 mm	4 mm	3 mm			0,03%
0,23					2 mm		3 mm		0,04%
0,23			6 mm						0,36%
0,19		KURU							0,00%
0,21		32 mm							0,00%
0,22		28 mm							0,00%
0,23	30 mm	16 mm							0,00%
0,24		4 mm							0,00%
0,25	21 mm	0 mm							0,00%

Tablo 3.2 Reometrede çalışılan örnekler

S/Ç	Katkısız PÇ	Katkısız KAÇ	A KATKISI (PÇ)	A KATKISI (KAÇ)	B KATKISI (KAÇ)	C KATKISI (KAÇ)	D KATKISI (KAÇ)	E KATKISI (KAÇ)	DOZAJ
0,19		Kuru (İlk an,30,60,90 dk X)		3 mm (60,90 dk X)				KURU	0,07%
0,19								KUSTU	0,09%
0,19					5 mm (60,90 dk X)	3 mm (90 dk X)			0,10%
0,19							7 mm (İlk an,30,60,90 dk X)		0,14%
0,21		32 mm (90 dk X)		3 mm				KURU	0,04%
0,21					7 mm	5 mm		KUSTU	0,06%
0,21							4 mm		0,07%
0,23		16 mm		3 mm	4 mm	3 mm			0,03%
0,23							3 mm		0,04%
0,23			6 mm (30,60,90 dk X)						0,36%
0,24		4 mm							0,00%
0,25	21 mm	0 mm							0,00%

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Çimento

Deneylerde kullanılacak çimento hamuru karışımlarında kalsiyum alüminat çimentosu olarak ÇimSA çimento fabrikasından temin edilen ISIDAÇ40 çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 ISIDAÇ40 çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler	Çimento Değerleri (%)	Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
SiO ₂	3,60	Özgöl Ağırlık		3,25
Al ₂ O ₃	39,80	Özgöl Yüzey (Blaine)	cm ² /g	3000
Fe ₂ O ₃	17,05	Priz Başlangıcı	Dakika	280
CaO	36,20	Priz Sonu	Dakika	295
MgO	0,65	Kıvam suyu	%	23,1
SO ₃	0,04	Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	mm	1,0
Kızdırma Kaybı	0,30	0,045 mm Elek Bakiyesi	%	23,0
Na ₂ O (eşdeğeri)	0,16	0,090 mm Elek Bakiyesi	%	6,5
Klorür (Cl ⁻)	0,009	6 Saat Basınç Dayanımı	MPa	47,0
S (Sülfür)	0,01	24 Saat Basınç Dayanımı	MPa	70,0

Karşılaştırmalı deneyler için ise Çimentaş çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5R tipi normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Normal Portland çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler	Çimento Değerleri (%)	Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
SiO ₂	20,40	Özgül Ağırlık		3,15
Al ₂ O ₃	4,82	Özgül Yüzey (Blaine)	cm ² /gr	3350
Fe ₂ O ₃	2,95	Priz Başlangıcı	Dakika	145
CaO	63,86	Priz Sonu	Dakika	280
MgO	1,52	Vicat Kıvam Suyu	%	27
SO ₃	2,05	Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	mm	0,5
Na ₂ O	0,32	28 Gün Basınç Dayanımı	MPa	49,3
K ₂ O	0,77			
Kızdırma Kaybı	3,70			
C ₃ S	62,49			
C ₂ S	11,34			
C ₃ A	7,78			
C ₄ AF	8,98			

3.1.2 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı olarak Chryso firmasından temin edilen 5 farklı yeni nesil polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Katkılar A, B, C, D, E katkısı olarak kodlanmıştır. Firma, A, B, C ve D katkısının VPEG kökenli, E katkısının MPEG kökenli olduğunu beyan etmiştir. Piyasada, MPEG tipi (Metoksipolietilen glikol), APEG tipi (Allileter glikol), VPEG tipi (Vinil eter polietilen glikol), IPEG tipi (Izopreniloksi glikol), XPEG tipi (Allilpoliethanoksi eter glikol) ve PAAM tipi (Poliamit amin) polikarboksilat bazlı katkılar bulunmaktadır (Ng, 2012). Süperakışkanlaştırıcı katkıların özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Süperakışkanlaştırıcı katkı özellikleri

	Yoğunluk (g/cm ³)	pH	Klorür içeriği
A Katkısı	1,090±0,02	3,50±1	<%0,1
B Katkısı	1,070±0,02	4,00±1	<%0,1
C Katkısı	1,085±0,02	4,00±1	<%0,1
D Katkısı	1,040±0,02	3,50±1	<%0,1
E Katkısı	1,055±0,02	4,50±1	<%0,1

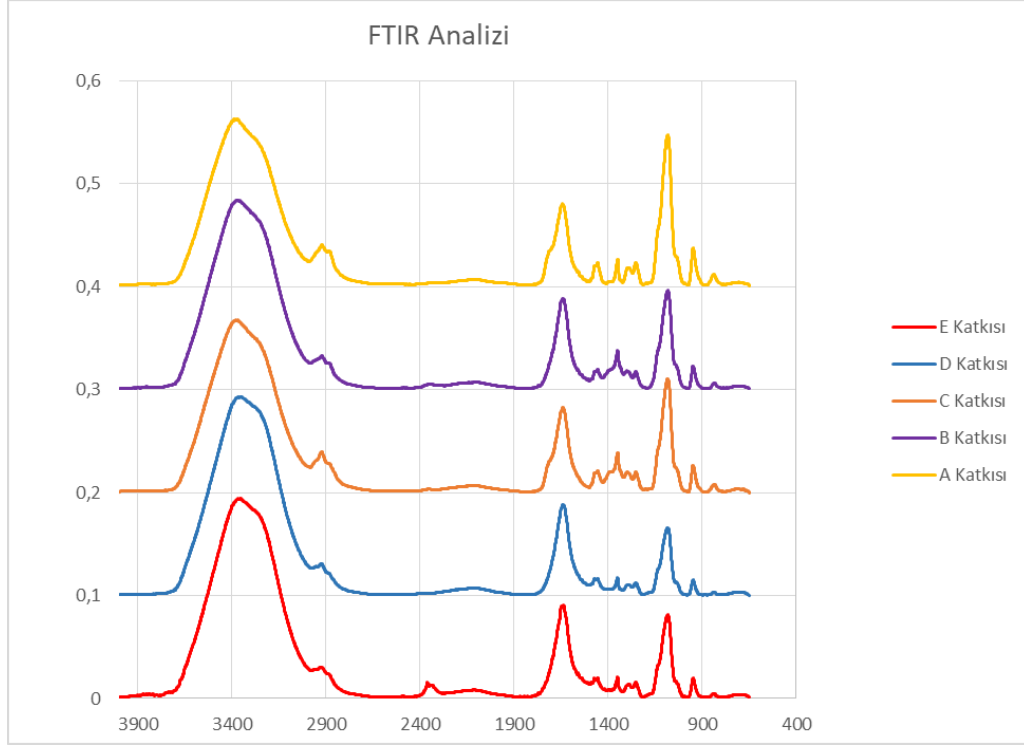
Katkıların kimyasal özelliklerini incelemek adına Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizi yapılmıştır.

3.1.2.1 Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Analizi

FTIR analiz yönteminde, test örneklerini taramak ve kimyasal özellikleri gözlemlemek için kızılötesi ışık kullanılır. FTIR cihazı bir örneğe yaklaşık 10000 ila 100 cm⁻¹ arasında kızılötesi radyasyon gönderir, bir kısım radyasyon emilir ve bir miktarı içinden geçer. Emilen radyasyon, numune molekülleri tarafından rotasyonel ve/veya titreşimsel enerjiye dönüştürülür. Dedektördeki son sinyal, numunenin moleküler parmak izini temsil eden, tipik olarak 4000 cm⁻¹ ila 400 cm⁻¹ arasında bir spektrum olarak sunulur. Her bir molekül veya kimyasal yapı, benzersiz bir spektral parmak izi üreterek FTIR analizini kimyasal tanımlama için harika bir araç haline getirir (FTIR Analysis, b.t.).

Bu yöntem ile, moleküler bağ karakterizasyonu yapılarak; katı, sıvı, gaz veya çözelti halindeki organik veya inorganik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri ve yapının aromatik yada alifatik olup olmadığı belirlenebilir. Ayrıca biyokimyasal olarak; karbonhidrat, fosfolipit, aminoasit ve proteinlerin yapı analizlerinde belirleyicidir (IR Spektroskopisi, b.t.).

Katkıların FTIR analiz grafiklerindeki spektrum, 4000 cm^{-1} ila 650 cm^{-1} arasında tutulmuştur. Tüm katkıların FTIR analiz sonuçları EK 1’de sunulmuştur. Şekil 3.2’de ise tüm katkıların FTIR analiz sonuçları aynı grafikte verilmiştir.



Şekil 3.2 A, B, C, D ve E katkılarının FTIR analiz sonuçları

Kızılötesi dalga boyları açısından bakıldığında tüm katkıları aynı dalga boylarında pikler vermektedirler, karakterizasyonları benzerdir. Sadece E katkısında farklı bir pik görülmüş, bu pikin katkı köken farklılığından (MPEG–VPEG) kaynaklandığı düşünülmüştür. Ancak piklerin şiddetlerinde, A katkısının 1083 cm^{-1} 'deki dalga boyunda, diğer katkılara kıyasla eter varlığı daha fazladır. A katkısını diğer katkılara kıyasla daha iyi sonuç vermesi eter varlığının fazla olmasına bağlanabilir. Çünkü, literatür taraması bölümünün polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcılar kısmında değinildiği üzere, polioksietilen zincirler, sulu ortamda hidrasyona uğrarlar, bu nedenle eter gruplarındaki oksijen atomları ve su molekülleri içindeki hidrojen atomları arasında hidrojen bağları oluşur, böylece süperakışkanlaştırıcı zincirlerinin

uzunluğu, hacmi ve uzamsal düzeni değişir. Yani daha fazla eter grubu daha fazla su ile birlikte daha fazla hidrojen bağı oluşturur ve katkının zincir uzunluğunu değiştirerek, imento hamurunu disperse etmede daha etkili olmasını sağlar.

3.2 Kıvam Testi

İşlenebilirlik, imento hamuru içinde herhangi bir şekilde dağılmış agregaya sahip her trl taze beton ve harç karışımlarının değerlendirilmesinde kullanılırken, kıvam terimine agrega bulundurmayan, imento ve su ile meydana gelmiş çimentonun yorumlanmasında ihtiyaç duyulmuştur (İşsever, 2002).

Farklı s/ oranındaki ve farklı katkı dozajlar kullanılarak üretilen hamurları kıyaslamak adına, hamur karışımlarına TSE EN 196-3 standart kıvam tayini uygulanmıştır.

Deney için Vicat cihazına takılan sonda, taban plakasının üzerine kadar indirilir ve taksimatlı gösterge üzerinde sıfır okunacak şekilde ayarlanır. Sonra sonda yukarı kaldırılarak duruş konumuna alınır. Hamurun seviyesi ayarlandıktan sonra, hemen Vicat kalıbı ve taban plakası Vicat cihazına yerleştirilir ve sondanın pozisyonuna göre merkezlenir. Sonda hamura temas edinceye kadar yavaşça indirilir. Hareket eden parçaların hızla inmesini önlemek için sonda bu durumda 1-2 saniye tutulur. Sonra hareket eden parçalar çabuk şekilde serbest bırakılır ve sondanın kendi ağırlığı ile düşey olarak hamurun merkezine girmesi sağlanır. Sondanın serbest bırakılması sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından 4 dakika sonra olmalıdır. Sondanın batması tamamlandıktan sonra veya sondanın serbest bırakılmasından 30 saniye sonra, (hangisi önce ise) okuma yapılır. Sondanın alt yüzü ile taban plakası arasındaki mesafeyi veren değer okunur ve bu değer, çimentonun kütlesi cinsinden yüzde olarak ifade edilmek suretiyle, hamurun su muhtevası ile birlikte kaydedilir. Sonda her batırılışında temizlenir. Deney, değerlişik miktarlarda su içeren hamurlarla, sonda ve taban arasındaki

mesafe 6 ± 1 mm oluncaya kadar tekrar edilir. Standart kıvama gelen hamurun su miktarı %0,5'lik doğrulukla standart kıvam için gerekli su miktarı olarak kaydedilir.

Standart kıvam olarak kabul edilen 6 ± 1 mm'nin katkılarla tam olarak elde edilmesi mümkün olmadığından, deneylerde, kıvam 3-7 mm arasına sabitlenmiştir. Katkısız ve katkılı çimento hamuru karışımlarının kıvam sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.3'te Vicat kıvam ölçüm cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Vicat kıvam ölçüm cihazıyla yapılan deney örnekleri (Kişisel arşiv, 2019)

3.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.3.1 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Reometre Sistemi

Tez kapsamında Anton Paar-Physica MCR51 reometresi kullanılarak ölçümler yapılmıştır (Şekil 3.4). Bağlanılan bilgisayardaki Rheoplus programıyla çalışan bu sistemde silindirik bir kap, 9 çeşit kanatlı sonda uçlu mil ve deney sıcaklığını belirleyen bir su banyosu bulunmaktadır. Su banyosu her deneyin sabit sıcaklıkta yapılabilmesi için Rheoplus programıyla 20°C 'ye programlanmıştır. En uygun sonda ucunu seçmek

için n çalışmalar yapılmış ve ST24-2D/2V/2V-30 sonda ucu seçilmiştir (şekil 3.5). Başlığın limit değerleri, maksimum deformasyon hızı 3000 1/s ve maksimum kayma gerilmesi 17250 Pa'dır. Kanatlı sonda uçlu mil seçilmesinin sebebi çeperlerde ayrışma ile kayma etkisini (*Wall Slip Effect*) en aza indirmektedir.



şekil 3.4 Anton Paar - Physica MCR 51 reometre sistemi (Kişisel arşiv, 2019)



şekil 3.5 ST24-2D/2V/2V-30 kanatlı sonda uçlu mil (Kişisel arşiv, 2019)

3.3.1.1 Çeperlerde Ayırışma ile Kayma Etkisi (Wall Slip Effect)

Kayma (*slip*), duvarlarda esas olarak tanecik içermeyen, bağlayıcı yönden zengin, düşük viskoziteli bir katman oluşmasıyla açıklanmaktadır (Gupta, 2011)

Test sırasında, çimento taneciklerinin silindirin pürüzsüz duvarlarından uzağa kayması nedeniyle sıvı bir tabaka oluşur. Su bakımından zengin bu katmanın gelişimi, kayganlaştırıcı bir etki üreterek akışı kolaylaştırır ve asıl malzemeyi temsil etmez. Kayma, hem statik hem de dinamik etkilerin sonucudur. Statik etkiler, çimento taneciklerinin fiziksel olarak silindir duvarının yanındaki alanı boşaltmasıyla oluşur. Dinamik etkiler ise, moment uygulandığında tanecikleri duvardan uzağa hareket ettiren hidrodinamik kuvvetlerden kaynaklanır (Saak, Jennings ve Shah, 2001).

Kanatlı sonda uçlu mil geometrisinin avantajı, malzemenin akması, yine malzemenin kendi içinde gerçekleştiği için sınırdaki kayma akışıyla ilgili sorunlar ve hataların ortadan kalkmasıdır.

3.3.2 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Sistemi

Deneyler, sabit deformasyon hızında yani deformasyon hızı kontrollü ölçüm sistemi kullanılarak yapılmıştır. Reometre bu modda ham veriler olarak dönme hızı ve moment ölçmektedir. Silindirik kabın içinde dönen sonda ucunun dönme hızı Rheoplus programı yardımıyla deformasyon hızına, ölçülen moment değeri ise kayma gerilmesine dönüştürülür. Karışımların, eşik kayma gerilmesi, viskozite, tiksotropi, psödoplastik ve dilatant davranış gibi reolojik özelliklerini ölçebilmek için kayma gerilmesi–deformasyon hızı, anlık viskozite–deformasyon hızı, kayma gerilmesi–zaman, viskozite–zaman grafikleri çizilir.

Deformasyon hızı kontrollü ölçüm yöntemleri ile;

- Zamana bağlı olarak, sabit deformasyon hızında viskozitedeki değişim,
- Sıcaklığa bağlı olarak, sabit deformasyon hızında viskozitedeki değişim,
- Artan ve azalan deformasyon hızında akma eğrisi çıkarılması, eşik kayma gerilmesi ve viskozitedeki değişim, ölçülebilir.

Gerilme kontrollü mod ise reometrenin sunduğu ikinci bir moddur. Bu modda reometre başlığının karışım içinde sabit bir moment yani sabit bir gerilme oluşturarak dönmesi için gerekli olan deformasyon miktarı ölçülmektedir.

Kayma gerilmesi kontrollü ölçüm yöntemleri ile;

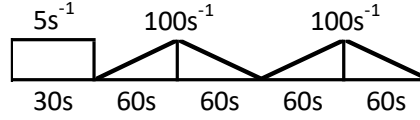
- Zamana bağlı olarak, sabit kayma gerilmesinde viskozitedeki değişim,
- Sıcaklığa bağlı olarak, sabit kayma gerilmesinde viskozitedeki değişim,
- Zamana bağlı olarak artan gerilme değerinde viskozite değişimi,
- Sünme ve geri dönüş özellikleri, ölçülebilir.

3.3.2.1 Oluşturulan Akma Eğrileri

Akma eğrisi, kayma gerilmesi ve deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi temsil eder. Deformasyon hızı kontrollü sistemde, sonda ucunun çimento hamuru karışımı içinde istenilen hızda dönmesi için gerekli kuvvet ölçülmektedir. Ve başlığın dönme merkezine göre momenti hesaplanmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar incelendikten sonra, deneylere uygun bir akma protokolü oluşturulmuş ve deformasyon hızı 0'dan $100s^{-1}$ 'e kademeli olarak arttırılıp azaltılarak çıkış ve iniş akma eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3.6). Çimento hamur karışımının hazırlanmasından reometreye yerleştirilmesi arasındaki gerilme geçmişini silmek için, sonda ucu çimento hamuru içinde ilk olarak $5s^{-1}$ sabit bir deformasyon hızında 30 saniye döndürülmüştür. Daha sonra, iki set halinde, deformasyon hızı $1s^{-1}$ 'den $100s^{-1}$

¹'e 60 saniyede çıkıp, tekrar 60 saniyede 100s^{-1} 'den 1s^{-1} hızına inmiştir, toplam deney süresi 4 dakika 30 saniye sürmüştür. Çıkış ve iniş aralıklarında yirmişer adet veri toplanmıştır. Deney toplamda 4 buçuk dakika sürmüş ve 81 veri toplanmıştır.



Şekil 3.6 Deneylerde kullanılan akma protokolü

Çimento hamur karışımlarının reolojik özelliklerini incelemek adına grafiklerde, y ekseninde kayma gerilmesi (Pa) veya anlık viskozite (Pa.s), x ekseninde deformasyon hızı ($1/\text{s}$) değerleri yer almaktadır. Grafikler, en yüksek kayma gerilmesi olarak 5000 Pa'a, en yüksek viskozite değeri olarak ise 250 Pa.s'ye sabitlenmiştir. Deformasyon hızı sabit 100s^{-1} 'dir. Grafiklerde karo olarak gösterilen noktalar viskozite değerlerini, üçgen olarak gösterilen noktalar kayma gerilmesi değerlerini gösterirken, bu noktalar üzerinden geçen eğriler Herschel Bulkley modelini göstermektedir. Grafiklerdeki mavi değerler ilk an, kırmızı değerler 30. dak., yeşil değerler 60. dak. ve sarı değerler 90. dak. değerlerini göstermektedirler. Grafiklerde çıkış ve iniş olmak üzere iki eğri bulunmaktadır. Çıkış eğrisinde deformasyon hızı artmakta, iniş eğrisinde azalmaktadır. Akma eğrisi grafikleri Ek 2'de sunulmuştur.

0,19 s/ç oranı hariç bütün çimento hamuru karışımlarında deformasyon hızı arttıkça nihai viskozite azalmıştır. Ve neredeyse bütün bu karışımlarda grafik yataylaşıp, sabitlenmektedir. Böylece bulunan bu değerler karışımların plastik viskozitesi olarak kabul edilmiştir. 0,19 s/ç oranındaki çimento hamuru karışımlarında görülen deformasyon hızı artışı ile viskozitenin artması süper akışkanlaştırıcı katkı dozajına bağlanabilir.

3.3.3 Reolojik İncelemeler için Hazırlanan Karışımlar

Katkılı ve katkısız hamurlar Hobart mikseri yardımıyla hazırlanmıştır. Karışımlar öncelikle mikserde 30 saniye yavaş devirde (62 devir/dakika) karıştırılır. Karışmamış hamur kalmaması için mikser durdurulup kaptaki hamur bir kaşık yardımıyla alt-üst edilir. Sonra, mikser çalıştırılıp 30 saniye daha yavaş devirde karıştırılır. Son olarak 2 dakika hızlı devirde (125 devir/dakika) karıştırılarak, karışımın hazırlanması toplam 3 dakika sürer. Katkılı çimento hamuru karışımlarına eklenen katkıları gecikmeli olarak ilave edilmiştir. Öncelikle suyun 2/3'ü katkısız olarak eklenip 30 saniye yavaş devirde karıştırılıp, sonra suyun geri kalan kısmı olan 1/3'üne katkı eklenip karışıma ilave edilmiş ve karıştırma prosedürüne devam edilmiştir.

Çalışılacak s/ç oranlarını belirlemek adına, 6 farklı s/ç oranında katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamur karışımlarına Vicat cihazı ile kıvam testi uygulanmıştır. Elde edilen kıvam testi sonuçları Tablo 3.6'da gösterilmektedir. Tabloda görüldüğü üzere 0,24 s/ç oranında, katkısız olarak, işlenebilir kabul ettiğimiz 4 mm'ye ulaşılmıştır. Ve böylece deneyler için 0,24 s/ç oranının altına düşülerek 3 farklı s/ç oranı, 0,19, 0,21 ve 0,23 seçilmiştir. Çimento dozajı 1400 gramda sabit tutulmuştur, su ilavesi 0,19 s/ç oranı için 266 gram, 0,21 s/ç oranı için 294 gram, 0,23 s/ç oranı için ise 322 gramdır.

Tablo 3.6 Katkısız kalsiyum alüminat çimentosu Vicat kıvam testi sonuçları

S/Ç Oranı	Vicat Kıvam Testi (mm)
0,25	0
0,24	4
0,23	16
0,22	28
0,21	32
0,19	Kuru

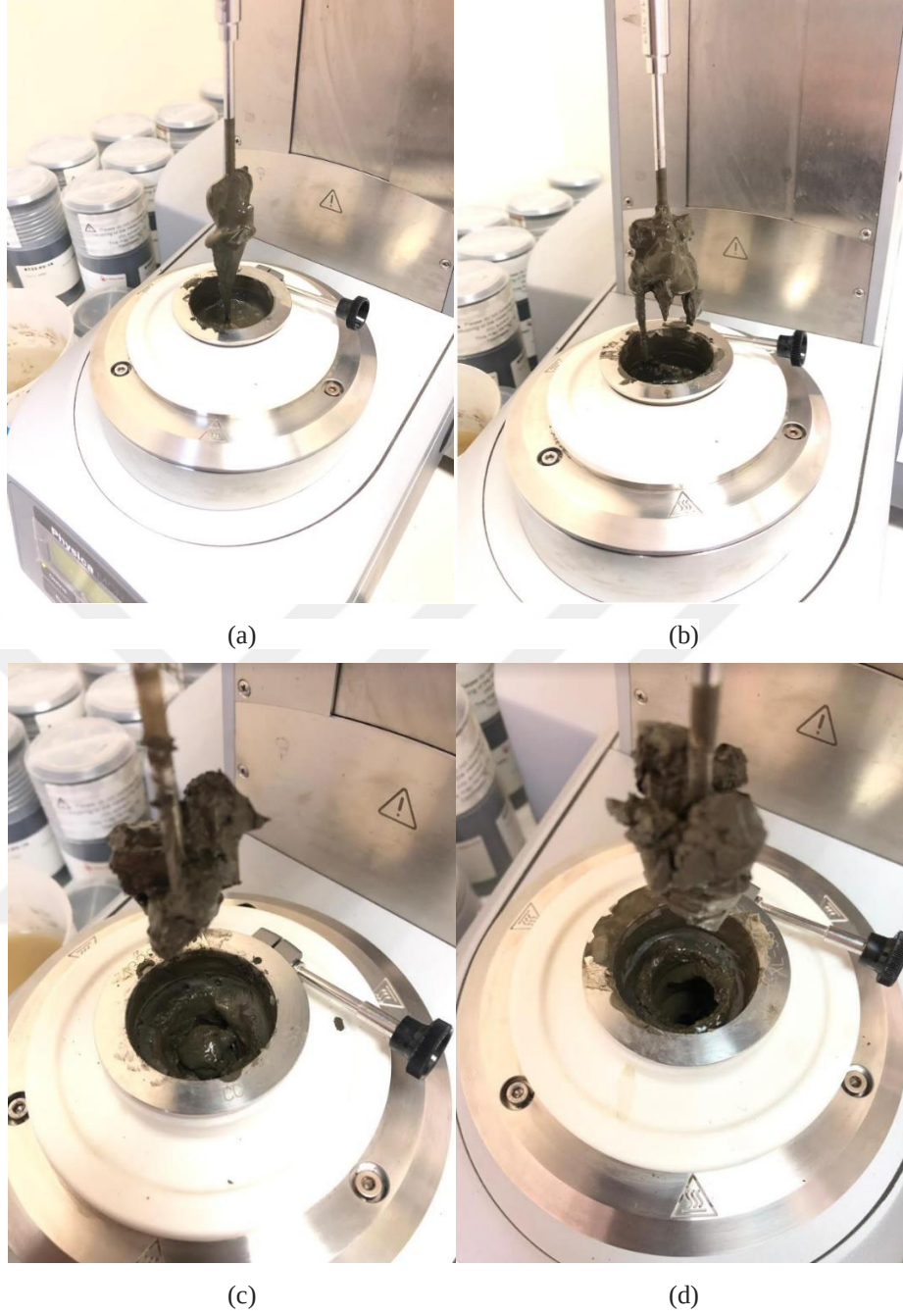
Karşılaştırmalı deneylerde, normal Portland çimentosu ile kalsiyum alüminat çimentosunu incelemek adına ilk olarak 0,25 s/ç oranında, katkısız normal Portland çimentosu ile katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamuru karışımlarının kayma

gerilmesi ve viskozite değerleri karşılaştırılmıştır. Ardından kalsiyum alüminat çimentosunda en etkili katkı olan A katkısı ile 0,23 s/ç oranında her iki çimento hamuru karışımına reometre deneyleri yapılmıştır.

Reometre testleri için ilk an ve sonra aynı çimento hamuru karışımı için 30 dak., 60 dak. ve 90 dak. geçtikten sonra deneyler yapılmıştır. Böylece kalsiyum alüminat çimentosunun kıvam ve kıvam koruma performansı incelenmiştir. Burada “ilk an” olarak bahsedilen zaman çimento hamuru hazırlanıp reometreye yerleştirildikten sonraki süredir.

Katkı dozajları, 3-7 mm kıvam standartını yakalayacak şekilde çimento kütlesi cinsinden %0,14 ile %0,03 arasında değişmektedir. Kıvamı yakalamak için s/ç oranı sabit tutulup, katkı dozajları arttırılıp azaltılarak tarama yapılmıştır. Reometrede çalışılan katkılı ve katkısız çimento hamuru karışımları Tablo 3.2’de verilmiştir.

şekil 3.7’de reometre testlerindeki; (a): İlk andaki kalsiyum alüminat çimentosu hamuru örneğinin durumunu göstermektedir, örnek akışkan kıvamdadır, (b): 30 dakika sonraki, (c): 60 dakika sonraki ve (d): 90 dakika sonraki durumu göstermektedir. Çimento hamuru örneğinin giderek katılaştığı sonda ucunda topaklaşan hamur miktarından anlaşılmaktadır. Katılaşma davranışının gözlemlenebildiği bir diğer husus ise, sonda ucu silindirik kaptaki hamurdan çıktıktan sonra, kabın içindeki hamurda oluşan boşluğun kapanıp kapanmamasıdır. İlk anda (a) bu boşluk hemen kapanırken, 90 dakika sonunda (d) boşluğun kapanmadığı görölmektedir.



Şekil 3.7 Reometre ilk an (a) ve 30 (b), 60 (c), 90 (d) dakika deneyleri (Kişisel arşiv, 2019)

3.3.4 Reolojik Özellikleri Ölçülemeyen Karışımlar

E katkısı ile farklı s/ç oranlarında, farklı dozajlarda karışımlar hazırlanmış ancak reometre haznesinde stabil kalacak bir hamur üretilememiştir. Örneğin 0,19 s/ç oranında %0,07 E katkısı ilavesiyle hamur karışımı çok kuru kıvamda ve reometre haznesine yerleşemeyecek katılıkta iken, %0,09 katkı ilavesiyle hazırlanan karışım

katkıyı kusmuştur. E katkısının kalsiyum alüminat çimentosu ile uyumsuz olduğu kanaatine varılmıştır.

Katkısız 0,19 s/ç oranındaki çimento hamuru reometreye giremeyecek kadar kuruyken, yine 0,19 s/ç oranında, %0,14 D katkılı vicat kıvam testi sonucu 7 mm olan, işlenebilir olarak kabul ettiğimiz çimento hamuru karışımına da reometre sonda ucu girememiştir. Ayrıca, sonda ucu, katkısız 0,21 s/ç oranındaki çimento hamuru karışımının 90. dak. örneğine, 0,19 s/ç %0,07 A katkılı karışımın 60 ve 90. dak. örneklerine, 0,19 s/ç %0,1 B katkılı karışımın 60 ve 90. dak. örneklerine ve 0,19 s/ç %0,1 C katkılı karışımın 90. dak. örneğine girememiştir.

Bu durum katkılı karışımların sadece 0,19 s/ç oranında gözlemlenmiştir. Katkılı 0,21 ve 0,23 s/ç, katkısız 0,23 s/ç oranındaki çimento hamuru karışımlarında böyle bir sorunla karşılaşılmamıştır.

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

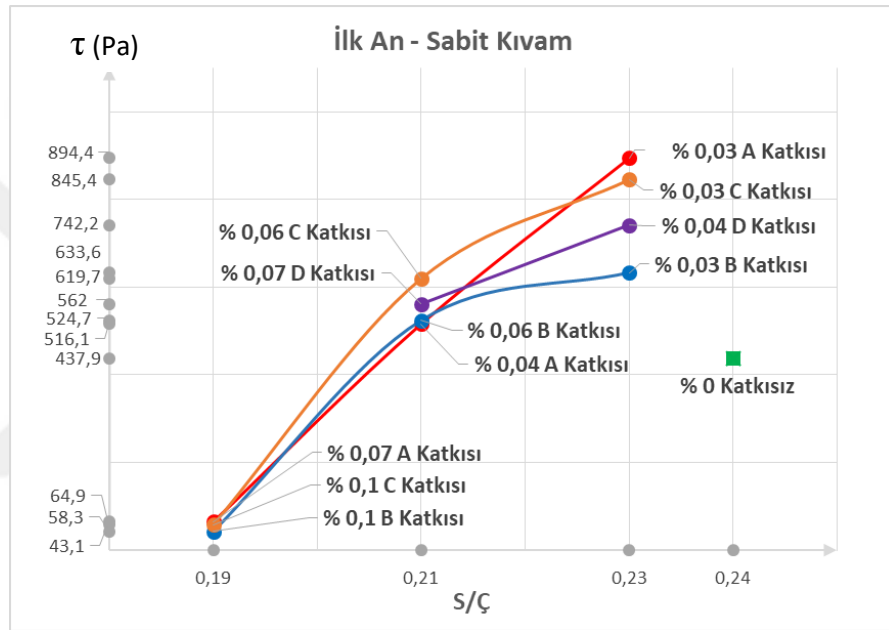
Deneysel çalışmaların sonuçları dört bölümde sunulmuştur. İlk bölümde, katkılı ve katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamuru örneklerinin reolojik özellikleri belirlenen bir ‘sabit kıvamda’ zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde, katkılı ve katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamuru örneklerinin reolojik özellikleri ‘sabit su/çimento oranında’ zamana bağlı olarak çıkış ve iniş eğrileri ayrı ayrı verilerek karşılaştırılmıştır. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan katkıların ham ve normalize edilmiş reolojik verileri yardımıyla performans kıyaslaması yapılmıştır. Son bölümde ise, sabit su/çimento oranındaki katkısız kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu hamuru örneklerinin ve yine sabit su/çimento oranında ve sabit kıvamda, kalsiyum alüminat çimentosu için en etkili katkı olan A katkısıyla her iki çimento hamuru örneklerinin reolojik özellikleri zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

4.1 Sabit Kıvamda Katkılı ve Katkısız Kalsiyum Alüminat Çimentosu Hamuru Örneklerinin Reolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması

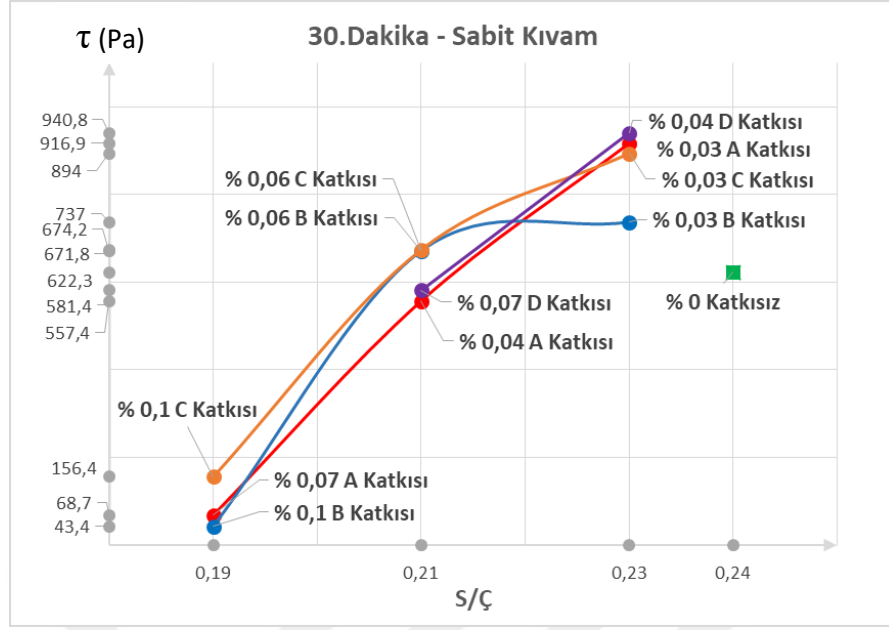
Bu bölümde sabit kıvam olarak belirlenen 3-7 mm aralığındaki, farklı s/ç oranında katkılı ve katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamur karışımları kıyaslanmıştır. Katkılı karışımlarda 0,19, 0,21 ve 0,23 s/ç oranında 4 farklı katkı kullanılarak elde edilen örneklerin ve katkısız karışımda ise 0,24 s/ç oranındaki örneğin dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri grafiklerde verilmiştir. Grafiklerin üzerinde sabit kıvama ulaşmak için kullanılan katkı dozajları çimento ağırlığının yüzdesi cinsinden verilmiştir. Grafikler ilk an, 30. dak., 60. dak. ve 90. dak. olmak üzere dört ayrı şekilde sunulmuştur.

Bu bölümde dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri, uygulanan akma protokolünün ikinci çıkış ve iniş eğrilerinin y eksenine çok yaklaştığı $5s^{-1}$ deformasyon hızı noktasındaki değerlerin ‘ortalaması’ alınarak hesaplanmıştır.

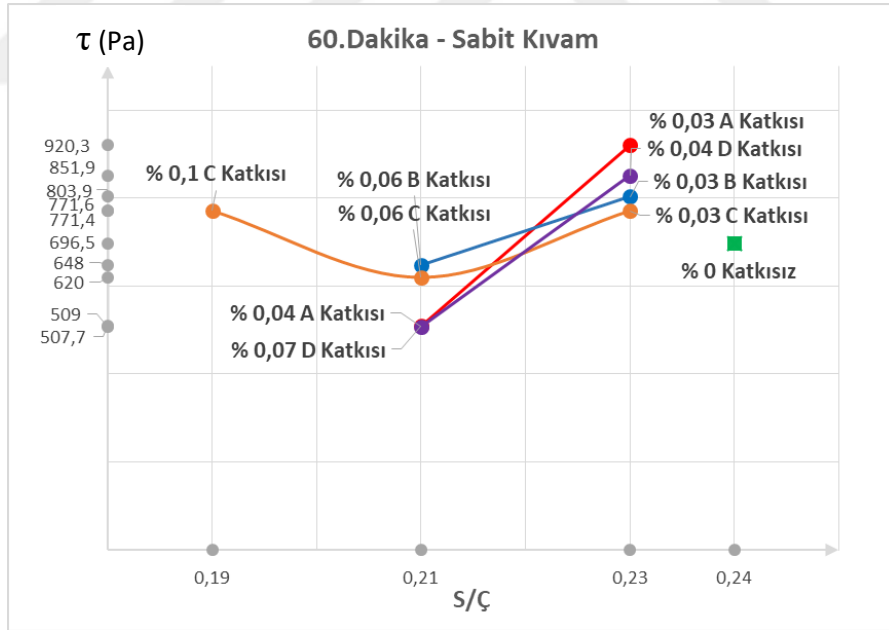
Katkılı ve katkısız karışımların kayma gerilmesi ve viskozite grafikleri Ek 3’te sunulmuştur.



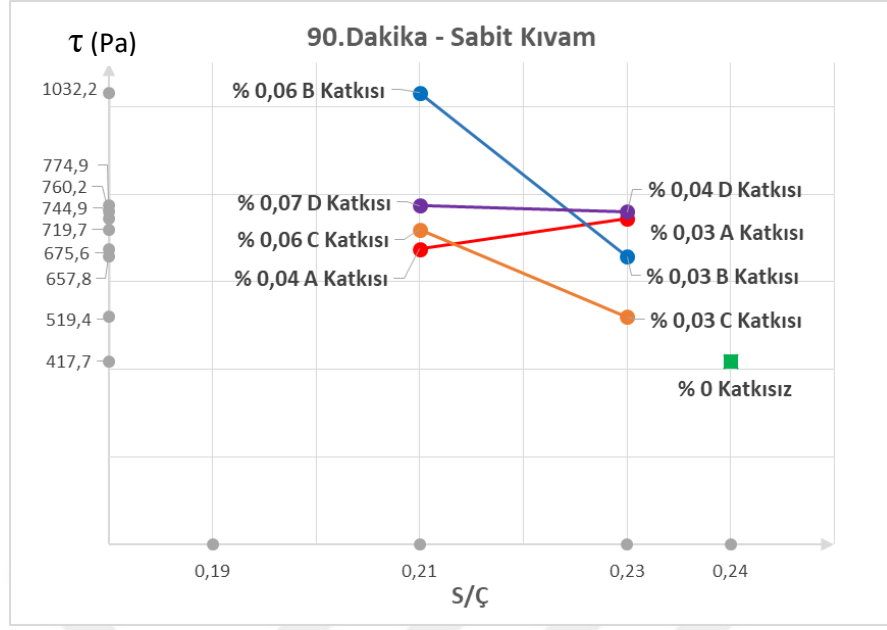
Şekil 4.1 İlk an ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – s/ç grafiği



Şekil 4.2 30. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – $s/\dot{\gamma}$ grafiği



Şekil 4.3 60. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – $s/\dot{\gamma}$ grafiği



Şekil 4.4 90. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – s/ç grafiği

A, B, C ve D katkılarının kalsiyum alüminat çimentosu hamurlarında s/ç oranı ve katkı dozajına bağlı dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri ilk an, 30., 60. ve 90. dakika için sırasıyla Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'teki grafiklerle sunulmuştur. Eşik kayma gerilmesi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde kıvam koruma açısından en etkili katkı A katkısı olmuştur. A katkısı daha düşük s/ç oranında diğer katkılara kıyasla EKG'yi düşürmede daha etkili olmuştur. Bu sonuçlarla A katkısının diğer katkılardan daha az iyonik olduğu düşünülebilir. Çünkü, daha az iyonik katkılar kalsiyum alüminat çimentosunu daha iyi disperse etmektedirler.

Katkısız çimento hamurlarında vicat kıvam değerleri 0,21 s/ç oranı için 32 mm, 0,23 s/ç oranı için 16 mm'dir. Bu yüzden grafiklerde katkılı karışımlarla kıyaslayabilmek adına katkısız hamur için sabit kıvam olarak belirlenen 3-7 mm aralığında olan, 0,24 s/ç oranındaki katkısız hamurun değerleri verilmiştir.

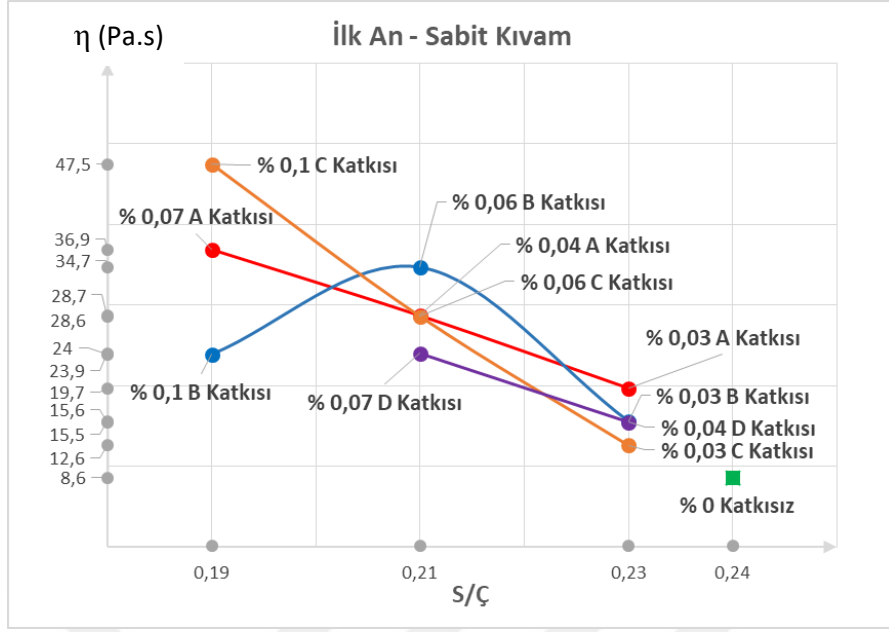
Normal koşullarda s/ç oranı arttıkça eşik kayma gerilmesi değerlerinin azalması beklenir. Ancak, çimento hamurlarına ilave edilen polikarboksilat esaslı katkılar eşik kayma gerilmelerini düşük s/ç oranlarında daha çok azaltmıştır. Bunun sebebi kullanılan dozaj miktarının s/ç oranı azaldıkça artmasıdır.

Çimento hamurlarının dinamik EKG değerleri 43-1033 Pa aralığında olup, zamanla artma eğilimindedir. İlk an ve 30 dakika sonraki eşik kayma gerilmesi değerleri 0,19 s/ç oranında, nispeten yüksek oranda katkı içeren hamurlar için incelendiğinde A, B katkılarının eşik kayma gerilmesi değerlerinin hemen hemen korunduğu, C katkısının ise belirgin bir artış gösterdiği görölmektedir. D katkısıyla 0,19 s/ç oranında sabit kıvama ulaşılsa da reometre haznesine yerleşemeyecek katılıkta olduğu için ölçüm alınamamıştır. Diğer taraftan katkı dozajının daha düşük olduğu 0,21 ve 0,23 s/ç oranında EKG değerlerinin A ve C katkıları için hafif, B ve D katkıları için daha belirgin bir artma eğiliminde olduğu görölmektedir. Bu durumda çimento tanelerinin yüzeyini kaplayan katkıların işlevini yitirmeye başladığı düşünölebilir. Boşluk suyunda ilave katkı miktarı az olduğu için (düşük dozaj) taneler arası etkileşim artmaktadır. 0,19 s/ç oranında görölen EKG değerlerinin korunması boşluk suyunda bulunan serbest katkı miktarının yüksek olmasına bağlanabilir.

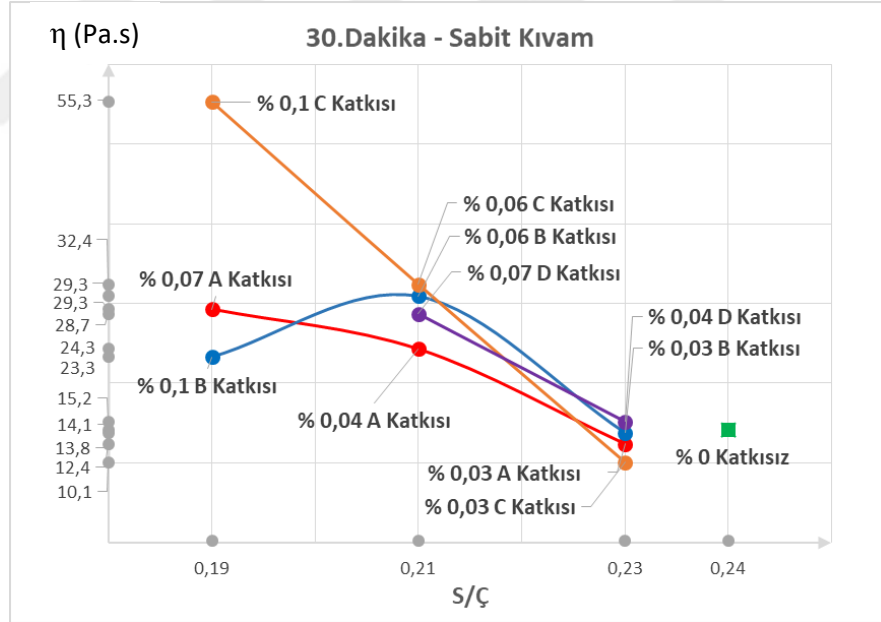
şekil 4.3'te 60. dakikadaki durum görölmektedir. En düşük s/ç oranlı seri olan 0,19 s/ç için hem A hem de B katkısıyla 60. dakika sonunda katılaşma olmuş ve reometreden ölçüm alınamayacak şekilde kıvam kaybı meydana gelmiştir. C katkısında ise 60 dakika sonunda bile ölçüm alınabilmektedir ancak EKG değeri 156,4 Pa'dan 771,6 Pa'ya çıkmıştır. Çok düşük s/ç oranında yüksek oranda katkı kullanılsa da belli süre sonra boşluk suyundaki serbest katkının tükendiği ve yoğun hidrasyon ürünlerinin hızlı bir priz başlangıcına yol açtığı söylenebilir. Ya da katmanlı alüminat fazı C_2AH_8 'in erken hidrasyon sırasında hızlı bir şekilde oluşumu katkının tüketimini arttırmış olabilir. Göreceli olarak daha az katkı içeren ancak daha yüksek s/ç oranına sahip hamurlarda (0,21 ve 0,23 s/ç) 60. dakikada halen ölçüm alınabilmektedir. 0,21 s/ç oranında bütün katkıları için EKG değerleri 30. dakikaya kıyasla azalmıştır.

90.dakikadaki durum Şekil 4.4'te görüldüğü üzere en yüksek s/ç oranı ile hazırlanan katkısız çimento hamuru (0,24) için ilginç bir sonuca işaret etmektedir. İlk an 438 Pa olan EKG değeri, 30. dakikada 622 ve 60. dakikada 697 Pa'a yükselirken, 90. dakikada 418 Pa değerine geri dönmüştür. Benzer geri dönüşler 0,21 ve 0,23 s/ç oranındaki katkılı hamurlarda da gözlenmiştir. Bu durum tam olarak boşluk suyuna salınan iyon konsantrasyonlarındaki değişimlerden veya hidrasyon ürünlerinin mekanik çarpma etkisiyle stabilitesini kaybetmesiyle ilişkili olabilir. Daha net bir değerlendirme için ilave karakterizasyon deneylerine ihtiyaç vardır. Reometrede 90. dakika sonunda bile çalışılabilen en düşük s/ç oranında (0,21) ise EKG değerleri düzenli olarak artmaya devam etmektedir. Ancak A katkısı 90 dakika sonunda kıvam korumada diğer katkılara göre çok daha etkili olmuştur. A, B, C ve D katkılı hamurların başlangıçtaki EKG değerleri sırasıyla 516,1 Pa, 524,7 Pa, 619,7 Pa ve 562 Pa (Şekil 4.1) 90 dakika sonunda sırasıyla 675,6 Pa, 1032,2 Pa, 719,7 Pa ve 774,9 Pa değerlerine ulaşmıştır (Şekil 4.4). Bu durum en hızlı kıvam kaybının B katkısında yaşandığını göstermektedir. Üstelik B katkısı aynı s/ç oranında A katkısından %50 daha fazla kullanılmasına rağmen daha çok kıvam kaybetmiştir.

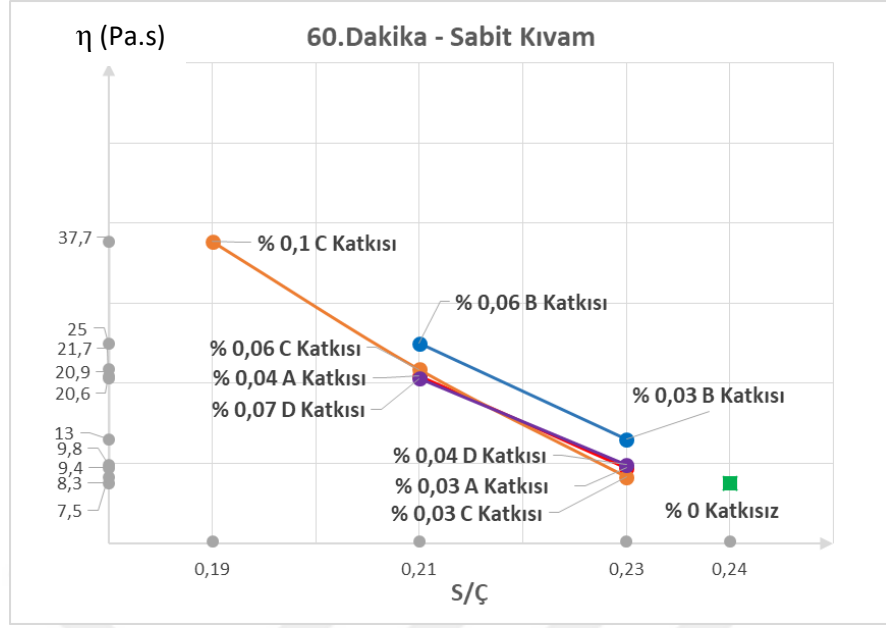
Elde edilen sonuçlarla; katkı kökeni olarak benzer gruba dahil olan katkıların performanslarının molekül yapılarındaki olası farklılıklardan (ana zincir-yan zincir uzunlukları, molekül ağırlığı vb.) etkilenebileceğini göstermektedir.



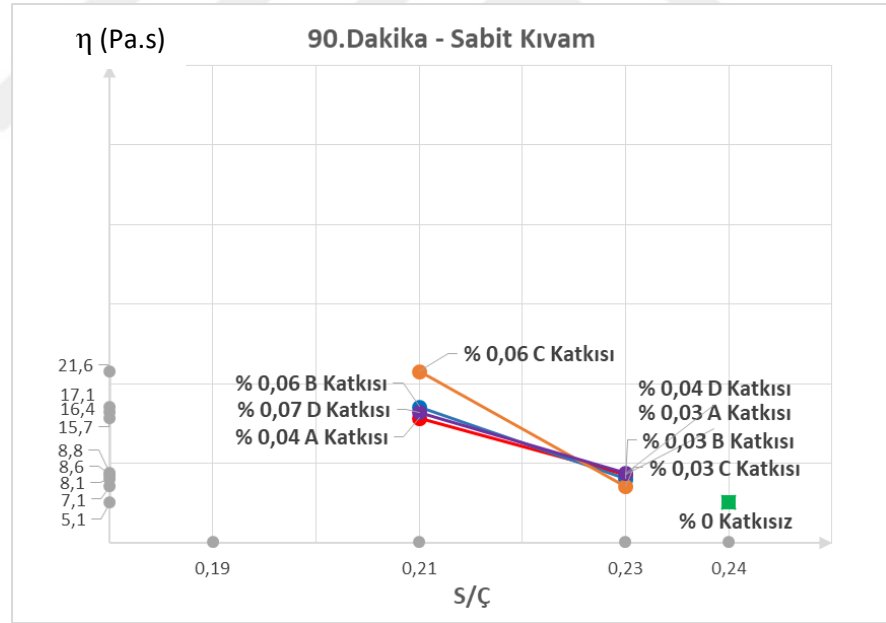
Şekil 4.5 İlk an ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların viskozite – s/ç grafiği



Şekil 4.6 30. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkılı karışımların viskozite – s/ç grafiği



Şekil 4.7 60. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkıları karışımlarının viskozite – s/ç grafiği



Şekil 4.8 90. dakika ve sabit kıvamda katkısız ve A, B, C, D katkıları karışımlarının viskozite – s/ç grafiği

A, B, C ve D katkılarının kalsiyum alüminat çimentosu hamurlarında s/ç oranı ve katkı dozajına bağlı nihai viskozite değerleri ilk an, 30., 60. ve 90. dakika için sırasıyla Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'deki grafiklerle sunulmuştur.

Çimento hamurlarının nihai viskozite değerleri 5-56 Pa.s aralığındadır. Nihai viskozite sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde akışkanlık geliştirme açısından en etkili katkı A katkısı olmuştur. Ancak zamana bağlı olarak nihai viskozitede düşüş eğilimlerine daha çok rastlanmıştır. Katkı içermeyen s/ç oranı 0,24 olan referans hamurda zamanla nihai viskozite değeri ilk anda 8,6 Pa.s, 30. Dakikada 14,1 Pa ve 60. Dakikada 7,5 Pa.s değeri alırken, 90. dakikada belirgin bir düşüşle 5,1 Pa.s değerine inmiştir (Şekil 4.8). Karma suyunun çok olması kalsiyum alüminat çimentosu hamurunun kıvam korumanın ötesinde işlenebilirlik kazanmasına yol açmaktadır. Bu durumun boşluk suyu kimyasal kompozisyonundaki değişimlerle ilgisi olabilir.

A ve B katkı dozajlarının arttırılıp s/ç oranının 0,19'a indirildiği durumda her iki katkı da ilk 30 dakikada viskozitenin düşmesine neden olmuştur. Zamanla taneler arasındaki etkileşimin azalması 60. dakikada aniden bir katılaşma ile ortadan kalkmaktadır. Bu dakikadan sonra her iki katkı ile 0,19 s/ç oranında ölçüm alınamamıştır. C katkısında ise 30 dakikada viskozitede artış görülmektedir. İlk 30 dakikada viskoziteyi azaltmada A katkısı diğer katılardan daha etkindir.

Göreceli olarak orta seviyede s/ç oranında (0,21 ve 0,23) yapılan incelemelerde zamana bağlı olarak viskozite değerlerinde sürekli bir düşüş eğilimi gözlenmiştir. Çoğunlukla A katkısı viskoziteyi azaltmada daha etkili olmuştur. Yüksek deformasyon hızlarında örselenen hamurda, çimento taneleri arasındaki etkileşim azalmakta ve ölçülen nihai viskozite değerleri de buna paralel olarak düşmektedir. Viskozite değeri hızlı azalmayan karışımlarda sakızlanma, ağdalanma davranışı daha belirgin olmaktadır. Bu davranış en çok ilk 30 dakikada düşük s/ç oranlı karışımlarda gözlenmiştir.

4.2 Sabit Su/Çimento Oranında Katkılı ve Katkısız Kalsiyum Alüminat Çimentosu Hamuru Örneklerinin Reolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması

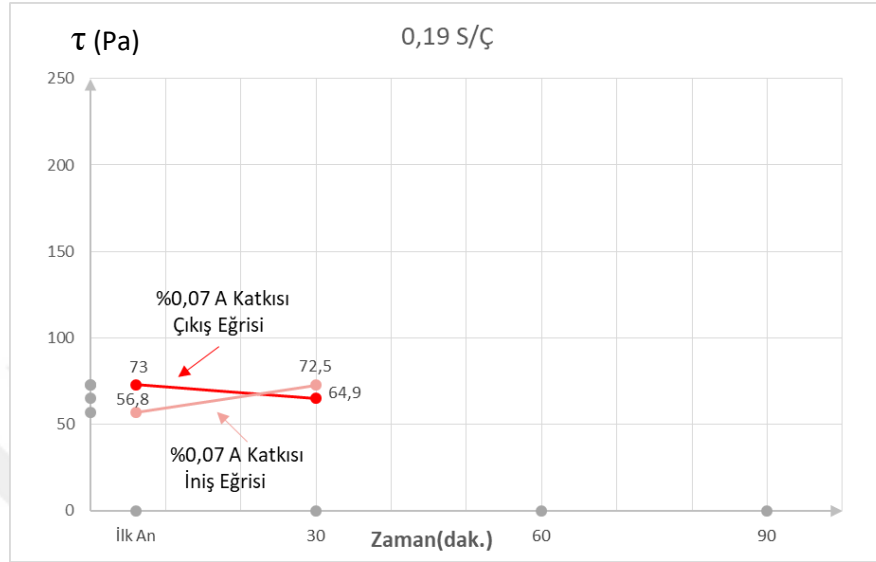
Bu bölümde sabit s/ç oranında katkılı ve katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamur karışımları kıyaslanmıştır. Katkılı karışımlar 0,19, 0,21 ve 0,23 s/ç oranında 4 farklı katkı kullanılarak elde edilen örneklerin ve katkısız karışım olarak ise yine 0,19, 0,21 ve 0,23 s/ç oranındaki örneklerin dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri grafiklerde verilmiştir. Grafikler tüm katkıları için ayrı ayrı sunulmuştur.

İlk bölümden farklı olarak bu bölümde dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri, uygulanan akma protokolünün ikinci çıkış ve iniş eğrilerinin y eksenine çok yaklaştığı $5s^{-1}$ deformasyon hızı noktasındaki değerleri ayrı biçimde, çıkış ve iniş eğrisi olarak verilmiştir.

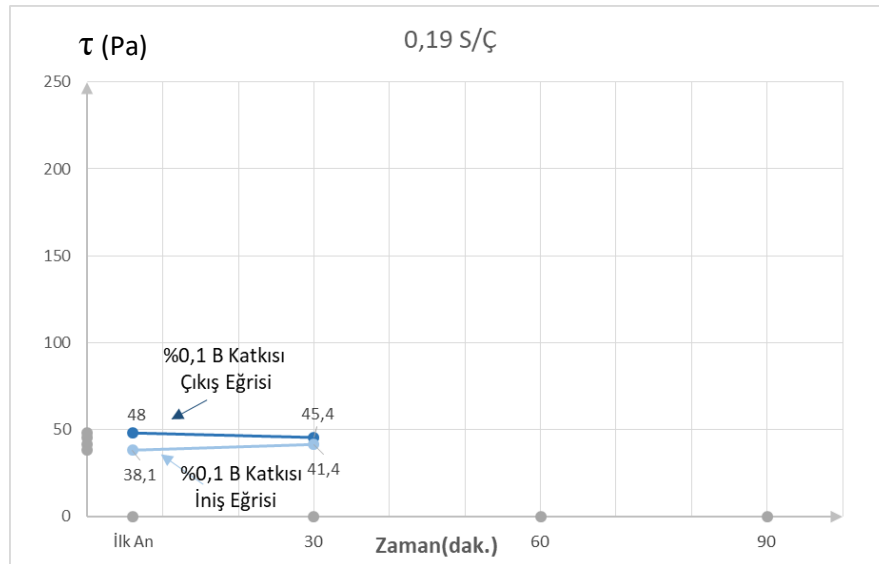
Ölçüm tekniğinde kullanılan akma protokolündeki hangi aralıkta çalışıldığı reolojik parametrelerin elde edilmesinde çok önemli bir etkene sahiptir. Çıkış eğrileri kullanılırsa zamana bağlı olarak EKG değerleri artmakta yani kıvam kaybı yaşanmaktadır, iniş eğrileri kullanılırsa EKG değerleri azaldığı için kıvam kaybı yaşanmamış gibi görünmektedir. Çıkış ve iniş eğrilerinin EKG değerlerinin ortalaması alındığında kıvam kaybı yaşandığı görülmektedir. Bu durumda ortalama almak daha gerçekçidir. Kıvam kaybının gerçekleşip gerçekleşmediğini sayısallaştırmak istendiğinde ortalama almak daha makuldür. Ancak bu bölümde çıkış ve iniş eğrisi olarak eğrilerin ayrı verilmesinin sebebi, tiksotropi açısından değerlendirme yapabilmektir. Sadece EKG ve viskozite değerlerini vermek yerine, tiksotropi değerlendirilmesiyle daha kapsamlı bilgiler sunulmuştur.

0,19 s/ç oranında katkısız kalsiyum alüminat çimentosu hamuru reometre haznesine giremeyecek kurulukta olduğu için ölçüm yapılamamıştır. Aynı durum %0,14 D katkılı kalsiyum alüminat çimentosu hamuru örneğinde de görülmüştür. Bu nedenle

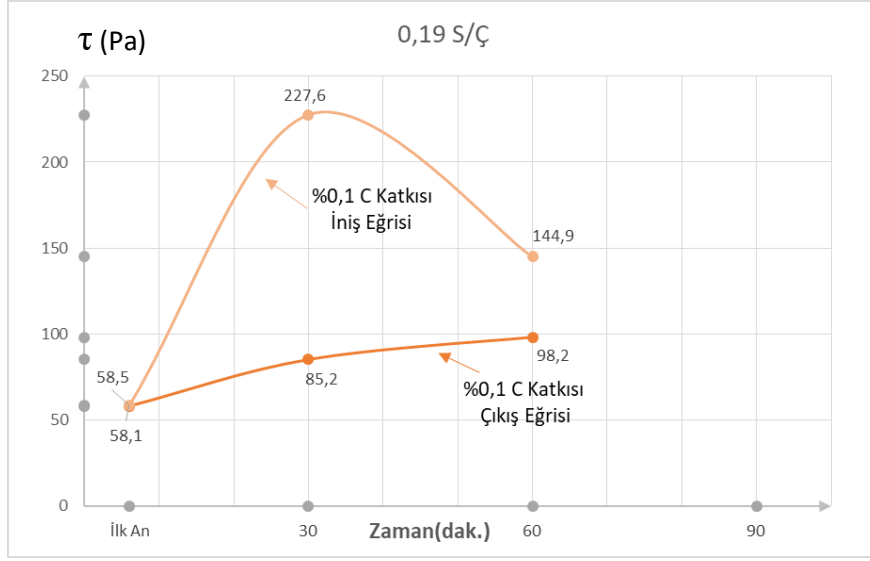
ilk aşamada A, B ve C katkılarının zamana bağlı dinamik eşik kayma gerilmelerinin çıkış ve iniş eğrileri ve nihai viskozite değerleri tek başına verilmiştir.



Şekil 4.9 0,19 s/ç oranında A katkılı karışımın dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği

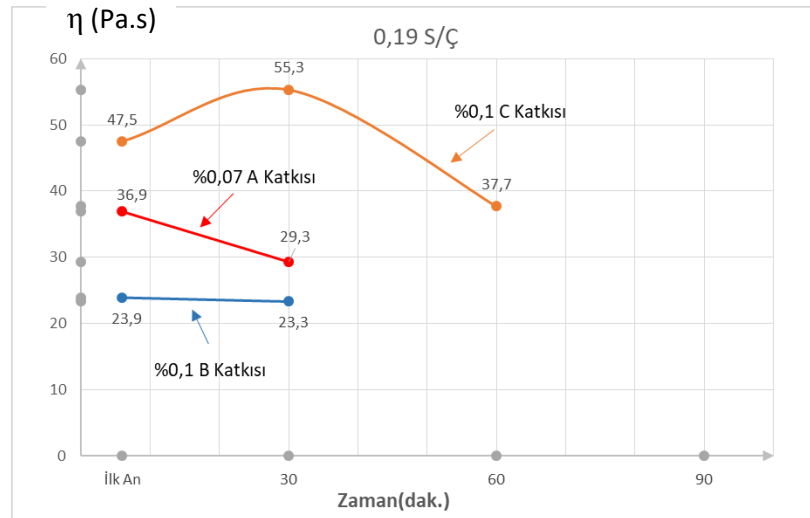


Şekil 4.10 0,19 s/ç oranında B katkılı karışımın dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



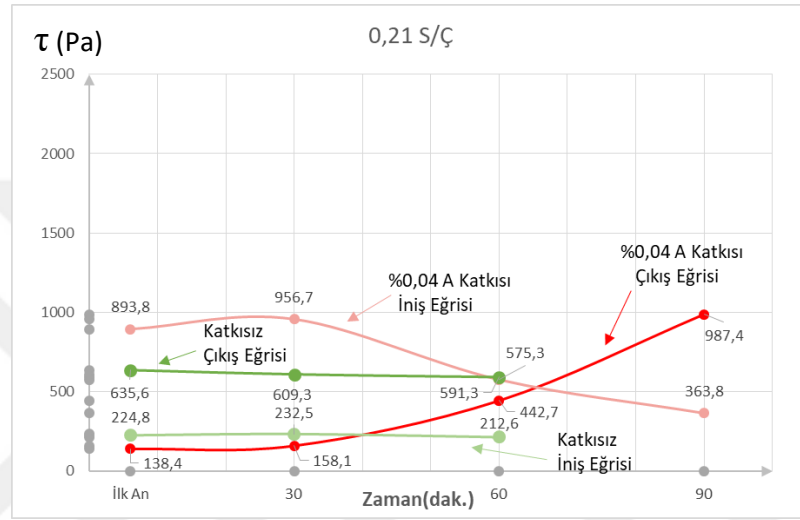
Şekil 4.11 0,19 s/ç oranında C katkılı karışımın dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği

0,19 s/ç oranında 60. dakikada sadece C katkısıyla ölçüm alınabildiğinden, C katkısının bu s/ç oranı için, A ve B katkısından daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. A ve B katkılarında çıkış ve iniş eğrilerinin başlangıç ve bitiş noktaları aynı yerde kesmemekte ancak büyük farklar oluşmamaktadır. C katkısında ise ilk anda oluşmayan bu fark, 30 ve 60. dakikadan sonra açılmıştır, bu farkın düşük deformasyon hızlarında meydana gelen yeniden kümelenmelerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

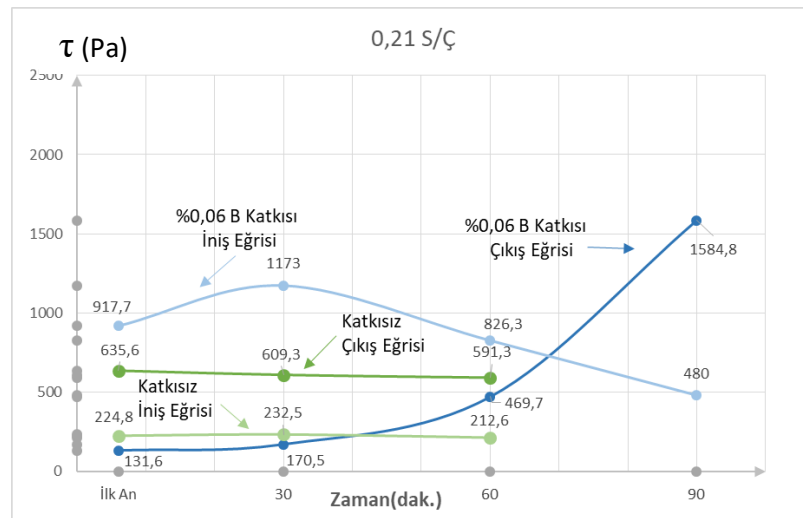


Şekil 4.12 0,19 s/ç oranında A, B, C katkılı karışımların viskozite – zaman grafiği

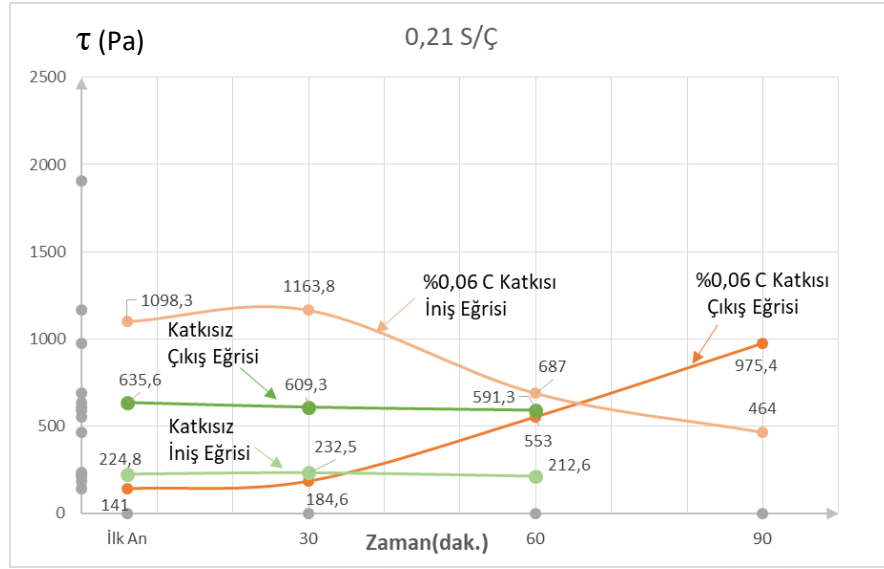
Üç katkı için de ilk an ve 30. dakika değerleri kıyaslandığında, A ve B katkısında viskozite değerleri düşmüş, C katkısında ise yükselmiştir. Ancak C katkısında 60 dakika sonunda viskozite 55,3 Pa.s’den 37,7 Pa.s’ ye düşmüştür. A ve B katkılı karışım tiksotropik davranış gösterirken, C katkısı ilk 30 dakikada reopektik, daha sonra tiksotropik davranış sergilemiştir. Viskozite-zaman grafiğinden 0,19 s/ç oranında C katkısının, A ve B katkısından daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.



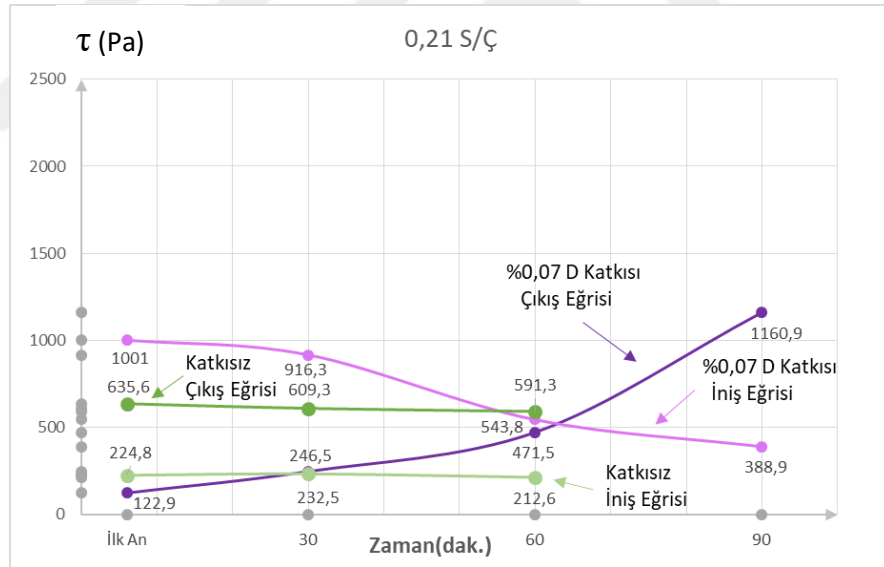
Şekil 4.13 0,21 s/ç oranında katkısız ve A katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



Şekil 4.14 0,21 s/ç oranında katkısız ve B katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



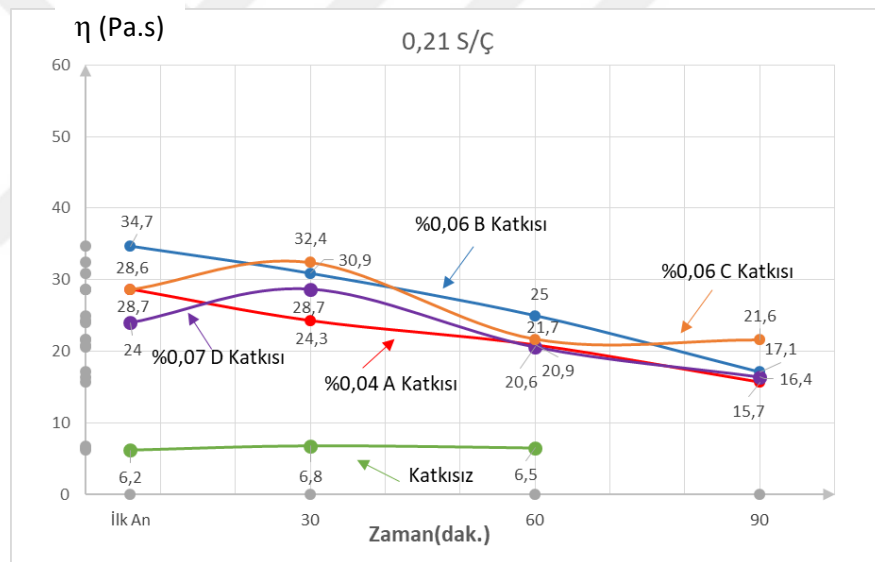
Şekil 4.15 0,21 s/ç oranında katkısız ve C katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



Şekil 4.16 0,21 s/ç oranında katkısız ve D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği

0,21 s/ç oranındaki grafikler incelendiğinde, katkısız karışımın iniş ve çıkış eğrileri arasında bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Katkılı karışımlar negatif tiksotropiye başlayıp pozitif tiksotropiye geçerken (60. dakikadan sonra), katkısız karışım hep

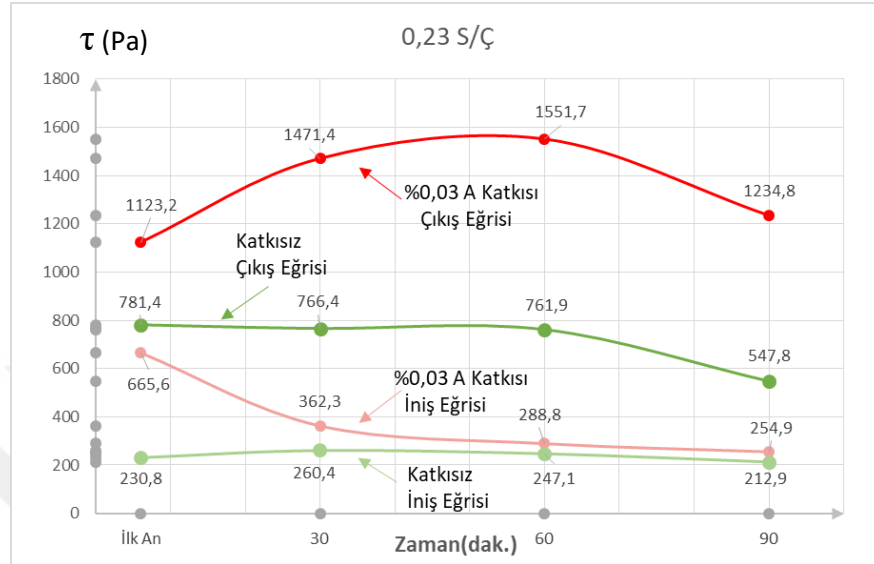
pozitif tiksotropi göstermiş, değişmemiştir. Tüm katkılı karışımlarda aynı davranış biçimi görüldüğü grafiklerden okunmaktadır. Katkısız karışıma kıyasla tüm katkılı karışımlarda ilk anda ve 30. dakikada çıkış eğrisi değerleri daha düşük, iniş eğrisi değerleri daha yüksektir. Yani kullanılan polikarboksilat bazlı katkılar düşük deformasyon hızlarında çimento taneciklerinin, katkısız karışıma kıyasla daha çok kümelenmesine yol açmaktadır. 60. dakikada tüm katkılarda çıkış eğrisinin başlangıç noktası ve iniş eğrisinin bitiş noktası çok yakın değerler almaktadır. 90. dakikada ise çıkış eğrisi ile iniş eğrisi yer değiştirmiş, çıkış eğrisi, iniş eğrisinin üzerinde kalmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosu katkısız halde 0,21 s/ç oranında yapısal yumuşama davranışı gösterirken, karışıma katkı ilave edildiğinde ilk 60 dakika yapısal toparlanma, 60 dakikadan sonra ise yapısal yumuşama davranışı göstermiştir.



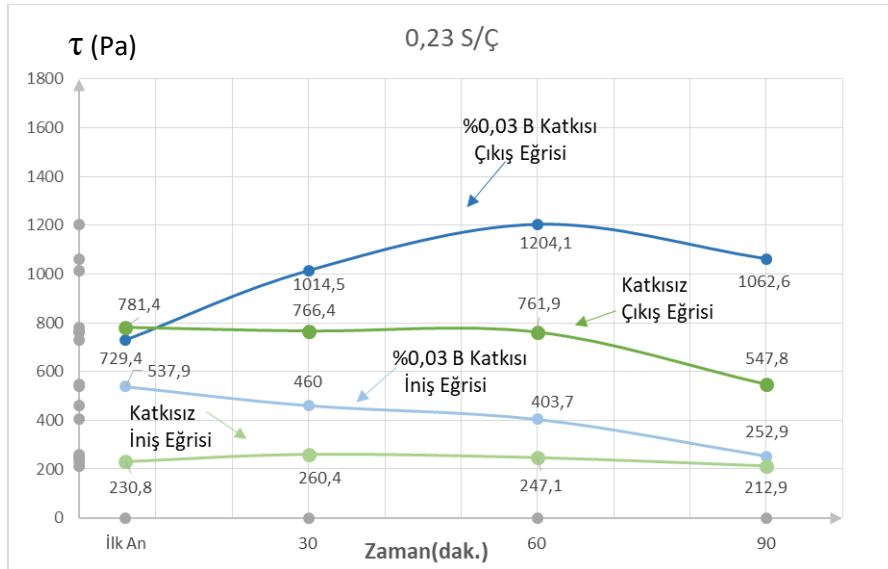
Şekil 4.17 0,21 s/ç oranında katkısız ve A,B,C,D katkılı karışımların viskozite – zaman grafiği

Katkılar arasında viskozite açısından net bir fark yoktur ve net bir trend çıkarmak mümkün değildir. Çünkü, 100 s^{-1} gibi yüksek deformasyon hızlarında taneler arası bağların etkisi çok azalır, hidrodinamik ve kolloidal etkiler zayıflar. Viskoziteler arası net bir fark olmadığından, viskoziteden ziyade EKG ile çalışmak farkları görmek adına daha faydalıdır. Katkısız karışımın viskozitesinin katkılı karışımlardan düşük olma sebebi ise yüksek deformasyon hızlarına rağmen PCE katkılarının yüksek yapışkanlık

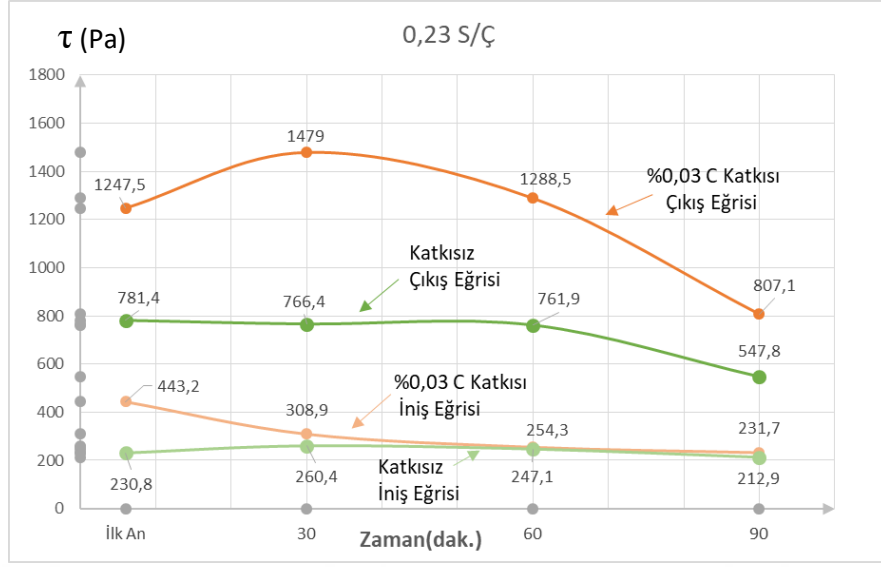
özelliği göstermesidir. Katkılı karışımların viskozitelerinin katkısız karışıma kıyasla yüksek olması ayrışma direncini arttırdığından iyi bir özelliktir.



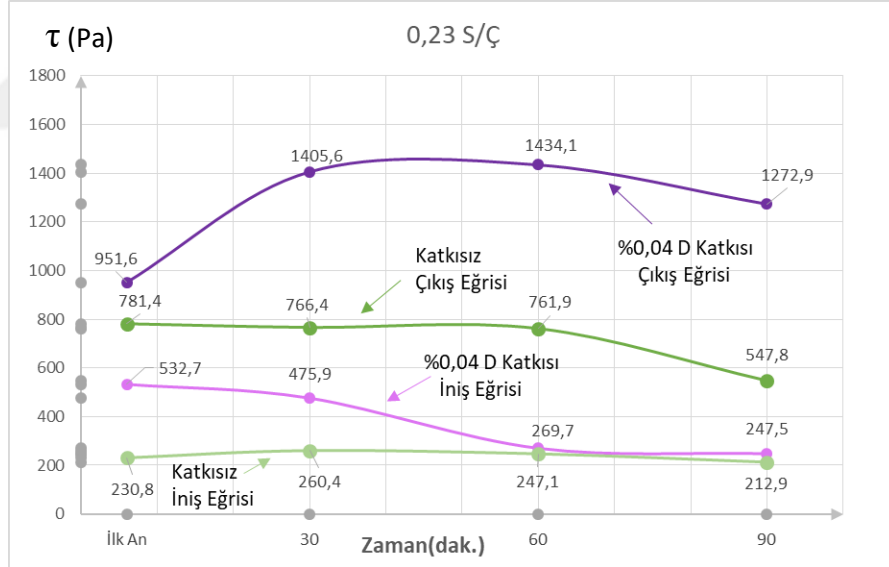
Şekil 4.18 0,23 s/ç oranında katkısız ve A katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



Şekil 4.19 0,23 s/ç oranında katkısız ve B katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



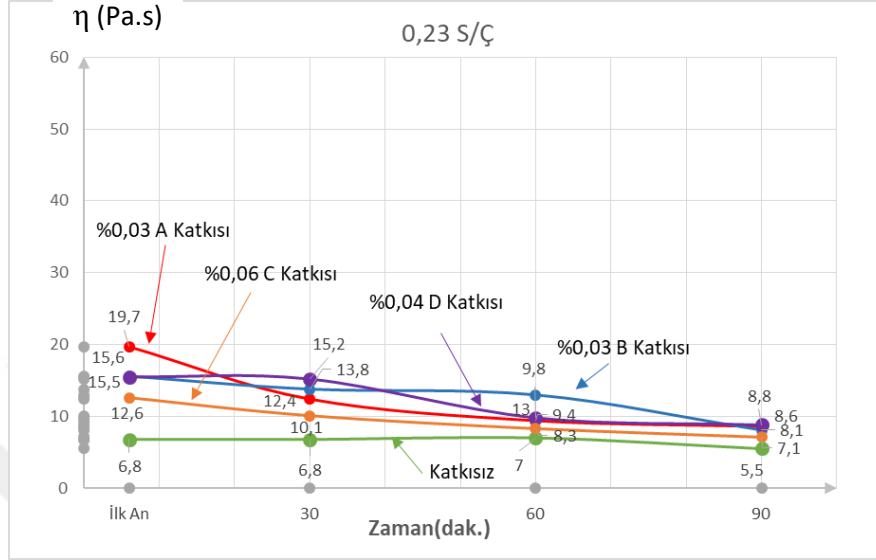
Şekil 4.20 0,23 s/ç oranında katkısız ve C katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



Şekil 4.21 0,23 s/ç oranında katkısız ve D katkılı karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği

0,23 s/ç oranında su artışıyla birlikte sistemdeki taneler arasındaki su miktarı artınca, 0,19 ve 0,21 s/ç oranında görülen taneler arası kohezyon, etkileşim azalmıştır. Çıkış eğrisi ve iniş eğrisinin arası açılmış, 0,21 s/ç oranında görülen iniş ve çıkış

eğrilerinin iç içe geçmesi ortadan kalkmıştır. Sistemdeki su artınca, katkılı karışımın davranışı katkısız karışıma benzemeye başlamıştır.



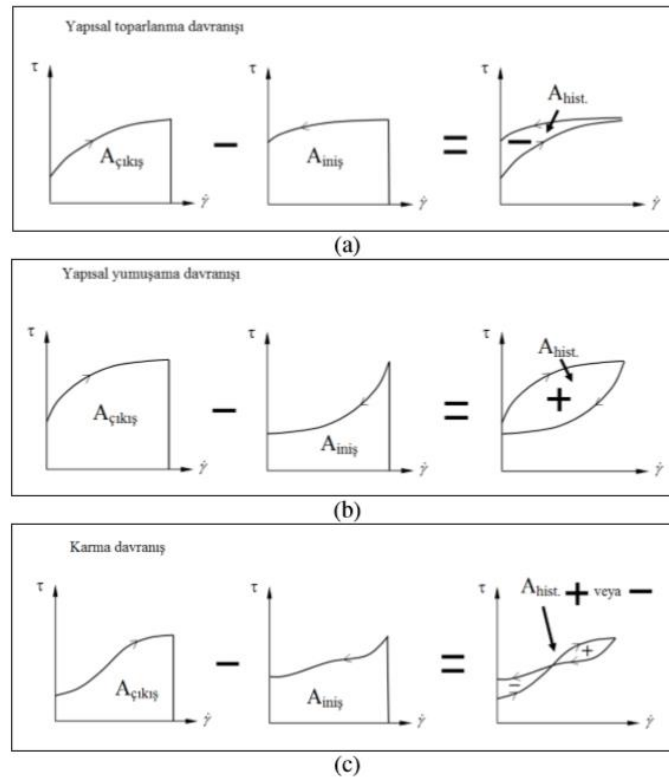
Şekil 4.22 0,23 s/ç oranında katkısız ve A,B,C,D katkılı karışımların viskozite – zaman grafiği

Su/çimento oranının artışıyla viskozite değerlerinin de düştüğü, katkısız karışıma çok yaklaştığı görülmektedir.

4.2.1 Akma Eğrileri Yardımı ile Histerezis Alanlarının Tespiti

Histerezis alanı malzemelerin deformasyon hızı değişimi karşısında yapısal olarak yumuşama (structural breakdown) veya toparlanma (structural recovery) özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Üç farklı türü vardır; toparlanma (anti-tiksotropi), yumuşama (tikotropi) ve karma davranış. Deformasyon hızı artışının gerçekleştiği çıkış eğrisi, deformasyon hızı azalışının gerçekleştiği iniş eğrisinin altında kalıyorsa, çıkış eğrisi ile iniş eğrisi altında kalan alanlar arasındaki fark negatiftir ve bu davranışa yapısal toparlanma (structural recovery) (Şekil 4.23a) adı verilmektedir. Bu davranışta tanelerin tekrar kümelenmesine yol açan bağlar oluşur. Yapısal yumuşama (structural breakdown) davranışında ise çıkış eğrisi üstte ve iniş eğrisi altta olup, alanlar arası fark

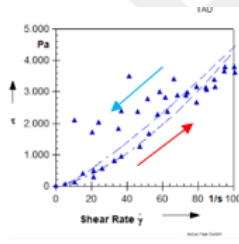
pozitifdir (Şekil 4.23b). Bu davranışta taneler arası bağlar kopar ve tiksotropik malzemelerde daha belirgin olarak görülür. Karma davranışta ise, eğrilerin birbiri içine geçmesi nedeniyle eğrilerin altında kalan alanlar arasındaki fark pozitif veya negatif olabilir (Şekil 4.23c). Karma davranışta birkaç kez iç içe geçme, önce çok yüksek kayma gerilmesi değerinden başlama gibi alternatif durumlara da rastlanabilmektedir. Histerezis alanlarında gözlenen diğer bir durum da, çıkış eğrisinin başlangıç noktası ile iniş eğrisinin bitiş noktasının aynı yerde olmamasıdır. Wallevik (2005), bu duruma pek çok karışımında rastlamış olup, farklılığın kaynağının karıştırma nedeniyle içyapıda meydana gelen geri dönüşümsüz ayrışmalar veya sonrasında düşük deformasyon hızlarında meydana gelen yeniden kümelenmeler olduğunu belirtmektedir (Felekoğlu, 2009).



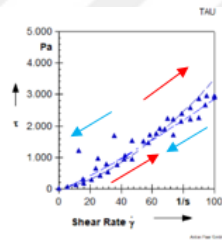
Şekil 4.23 Histerezis alanı türleri; a) Toparlanma (anti-tiksotropi), b) Yumuşama (tikstropi), c) Karma davranış (Felekoğlu, 2009)

Bu bölümde kayma gerilmesi–deformasyon hızı grafiklerinin çıkış ve iniş bölgelerinin arasında kalan alanlar kullanılarak histerezis alanları hesaplanmıştır. 0,19, 0,21 ve 0,23 s/ç oranındaki katkılı ve katkısız karışımların 0, 30, 60 ve 90 dakikadaki histerezis alanları Şekil 4.24, 4.25 ve 4.26’da verilmiştir.

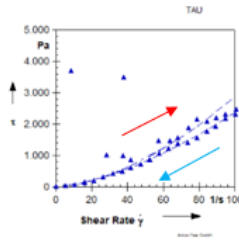
Verilen grafiklerde çıkış eğrisi kırmızı ok ile, iniş eğrisi ise mavi ok ile gösterilmektedir. Kırmızı okun, mavi okun altında kaldığı durumlar negatif histerezis alanlarını, üstünde kaldığı durumlar ise pozitif histerezis alanlarını göstermektedir. Grafiklerde bazı karışımlarda iniş ve çıkış eğrilerinin birbirini bir veya birden fazla kestiği durumlara rastlanmıştır, bu karma davranışı göstermek adına grafik alanlarının işaret değiştirdiği kısımlara tekrar oklar koyulmuştur.



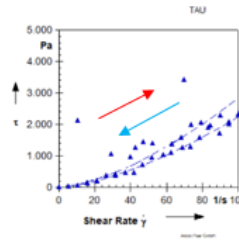
%0,07 A katkısı ilk an



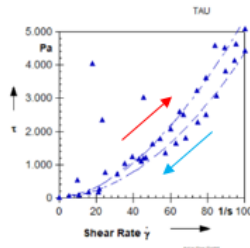
%0,07 A katkısı 30 dak.



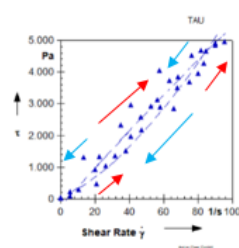
%0,1 B katkısı ilk an



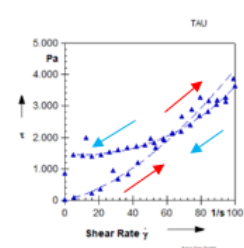
%0,1 B katkısı 30 dak.



%0,1 C katkısı ilk an

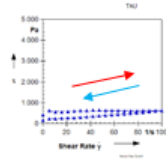


%0,1 C katkısı 30 dak.

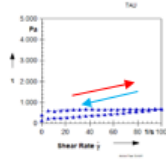


%0,1 C katkısı 60 dak.

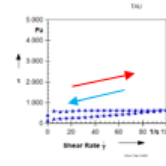
Şekil 4.24 0,19 s/ç oranındaki karışımların histerezis alanları



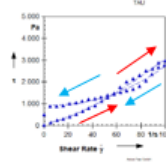
Katkısız ilk an



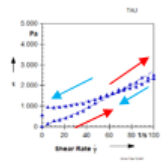
Katkısız 30 dak.



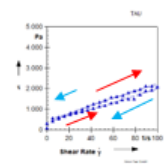
Katkısız 60 dak.



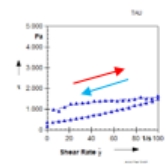
%0,04 A katkısı ilk an



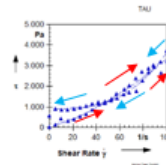
%0,04 A katkısı 30 dak.



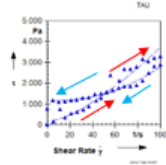
%0,04 A katkısı 60 dak.



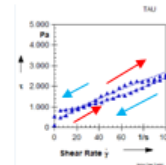
%0,04 A katkısı 90 dak.



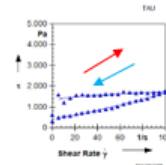
%0,06 B katkısı ilk an



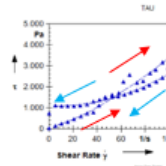
%0,06 B katkısı 30 dak.



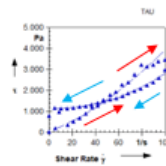
%0,06 B katkısı 60 dak.



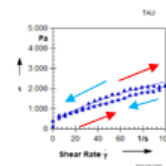
%0,06 B katkısı 90 dak.



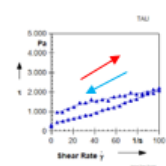
%0,06 C katkısı ilk an



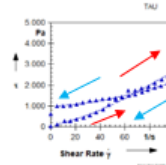
%0,06 C katkısı 30 dak.



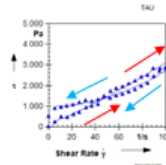
%0,06 C katkısı 60 dak.



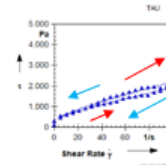
%0,06 C katkısı 90 dak.



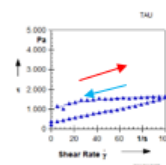
%0,07 D katkısı ilk an



%0,07 D katkısı 30 dak.

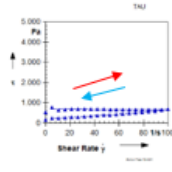


%0,07 D katkısı 60 dak.

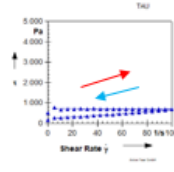


%0,07 D katkısı 90 dak.

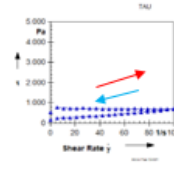
Şekil 4.25 0,21 s/ç oranındaki karışımların histerezis alanları



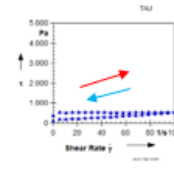
Katkısız ilk an



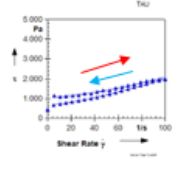
Katkısız 30 dak.



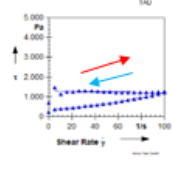
Katkısız 60 dak.



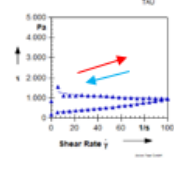
Katkısız 90 dak.



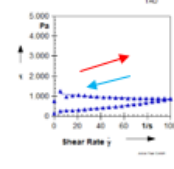
%0,03 A katkısı ilk an



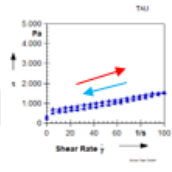
%0,03 A katkısı 30 dak.



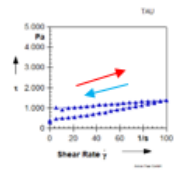
%0,03 A katkısı 60 dak.



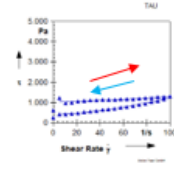
%0,03 A katkısı 90 dak.



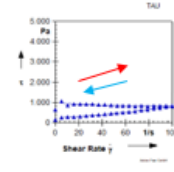
%0,03 B katkısı ilk an



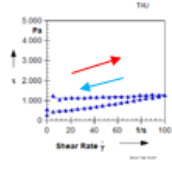
%0,03 B katkısı 30 dak.



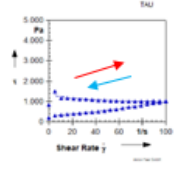
%0,03 B katkısı 60 dak.



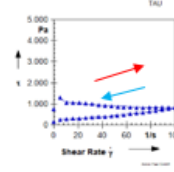
%0,03 B katkısı 90 dak.



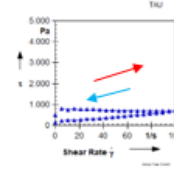
%0,03 C katkısı ilk an



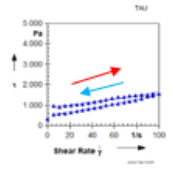
%0,03 C katkısı 30 dak.



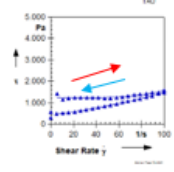
%0,03 C katkısı 60 dak.



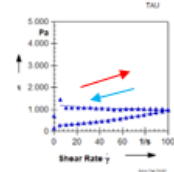
%0,03 C katkısı 90 dak.



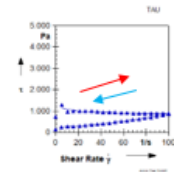
%0,04 D katkısı ilk an



%0,04 D katkısı 30 dak.



%0,04 D katkısı 60 dak.



%0,04 D katkısı 90 dak.

Şekil 4.26 0,23 s/ç oranındaki karışımların histerezis alanları

Tablo 4.1 Çimento hamuru karışımlarının histerezis alanları (Pa/s)

Karışım	Zaman			
	İlk an	30 dak.	60 dak.	90 dak.
0,19 s/ç %0,07 A	-4446	-28233	X	X
0,19 s/ç %0,1 B	76469	51099	X	X
0,19 s/ç %0,1 C	65330	179981	-24870	X
0,21 Katkısız	22136	23261	22147	X
0,21 %0,04 A	-14538	19596	15014	49638
0,21 %0,06 B	-14707	3117	14562	58659
0,21 %0,06 C	-4138	11922	18795	43044
0,21 %0,07 D	-23635	-2766	15939	53993
0,23 Katkısız	26408	25964	27846	19898
0,23 %0,03 A	22224	54582	52160	45726
0,23 %0,03 B	14631	30589	41302	38910
0,23 %0,03 C	38791	48368	45197	30825
0,23 %0,04 D	26365	39502	49831	45744

Tablo 4.1’de çimento hamuru karışımlarının histerezis alanları verilmiştir. Tüm s/ç oranlarında karışımlar genellikle pozitif histerezis alanı yani yapısal yumuşama davranışı göstermişlerdir. Deformasyon hızı artışının görüldüğü çıkış eğrisinin, deformasyon hızı azalışının görüldüğü iniş eğrisinin üstünde kalması, karışımların reometre sonda ucuna uyguladıkları kayma gerilmelerinin düşmesiyle açıklanabilir. Bu sonuçla kalsiyum alüminat çimentosunun tiksotropik özellik gösterdiği söylenebilir. Kıvam performansı göz önüne alındığında, karışımın küçük histerezis alanları vermesi beklenir. 0,19 s/ç oranında A ve C katkısı ile hazırlanan çimento hamuru karışımı histerezis alanını ilk 30 dakikada arttırırken, B katkısıyla hazırlanan karışım düşürmüştür. Ancak ilk an ve 30. dakika değerlerine bakıldığında en küçük histerezis alanına sahip olan karışım A katkısıyla elde edilmiştir. 0,21 s/ç oranında katkısız çimento hamur karışımının 60 dakika sonunda histerezis alanı hafif de olsa büyümüştür. Katkılı karışımlarda da 90 dakika sonunda alanın büyüdüğü görülmektedir. İlk an ve 90. dakika için C katkısı kullanılan karışımın histerezis alanı en küçüktür. 0,23 s/ç oranında katkısız çimento hamur karışımının 90 dakika sonunda histerezis alanı küçülmüştür. Çimento hamuru kıvam kazanmıştır. Katkılı karışımlarda ise, 90 dakika sonunda A, B ve D katkılı karışımların histerezis alanları büyürken C

katkısıyla elde edilen karışımınki küçülmüştür. İlk an değerleri incelendiğinde en küçük alana sahip karışım B katkısıyla, 90 dakikda değerleri incelendiğinde en küçük alana sahip karışım C katkısıyla elde edilmiştir.

4.3 Kullanılan Polikarboksilat Bazlı Katkıların Performans Kıyaslaması

Deneylerde kullanılan katkıların performans kıyaslamasını yapmak adına, ilk olarak ham veriler yardımıyla, bölüm 4.1’de verilen ortalama dinamik EKG ve viskozite değerleri kullanılarak bulunan en iyi performansı gösteren katkılar, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te verilmiştir. Sonra, bölüm 4.2’deki, çıkış ve iniş akma eğrileriyle elde edilen dinamik EKG değerleri kullanılarak bulunan en iyi performanslı katkılar Tablo 4.4 ve 4.5’te verilmiştir. Histeresiz alanları kullanılarak elde edilen en iyi performanslı katkılar ise Tablo 4.6’da verilmiştir.

Ham veriler yardımıyla elde edilen katkı performansları sabit kıvam için geçerlidir. Katkı dozajları değişken olduğu için katkıların performansını tam olarak yansıtmaz. Bunun için değerlerin normalize edilmesi yoluna gidilmiştir. Bütün katkıların %0,1 dozajda olması durumunda elde edilecek dinamik EKG ve viskozite değerleri yeniden hesaplanmıştır. Normalize edilmiş veriler yardımıyla bulunan en iyi performansı gösteren katkılar ise Tablo 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. Normalize edilmiş sonuçlarda kırmızı ile belirtilen katkılar, ham veriler ile elde edilen sonuçlardan farklı olan katkılarını göstermektedir.

Tablo 4.2 Ortalama dinamik EKG’ler ile elde edilen sonuçlar

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	A	B
30 dak	B	A	B
60 dak	C	A - D	C
90 dak	X	A	C

Tablo 4.3 Viskoziteler ile elde edilen sonuçlar

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	D	C
30 dak	B	A	C
60 dak	C	D	C
90 dak	X	A	C

Tablo 4.4 Çıkış eğrilerinden elde edilen dinamik EKG'ler ile elde edilen sonuçlar

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	D	B
30 dak	B	A	B
60 dak	C	A	B
90 dak	X	C	C

Tablo 4.5 İniş eğrilerinden elde edilen dinamik EKG'ler ile elde edilen sonuçlar

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	A	C
30 dak	B	D	C
60 dak	C	D	C
90 dak	X	A	C

Tablo 4.6 Histerezis alanları ile elde edilen sonuçlar

	0,19	0,21	0,23
İlk an	A	C	B
30 dak	A	D	B
60 dak	C	B	B
90 dak	X	C	C

Tablo 4.7 Ortalama dinamik EKG'lerin normalize edilmiş sonuçları

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	A	B
30 dak	B	A	B
60 dak	C	A	C
90 dak	X	A	C

Tablo 4.8 Çıkış eğrileri dinamik EKG'lerinin normalize edilmiş sonuçları

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	A	B
30 dak	A - D	A	B
60 dak	C	A	B
90 dak	X	A	C

Tablo 4.9 İniş eğrileri dinamik EKG'lerinin normalize edilmiş sonuçları

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	A	C
30 dak	B	A	C
60 dak	C	A	C
90 dak	X	A	C

Tablo 4.10 Viskozitelerin normalize edilmiş sonuçları

	0,19	0,21	0,23
İlk an	B	A	C
30 dak	A	A	A
60 dak	C	A	C
90 dak	X	A	C

Tablo 4.11 Histerezis alanlarının normalize edilmiş sonuçları

	0,19	0,21	0,23
İlk an	A	C	B
30 dak	A	B	B
60 dak	C	A	B
90 dak	X	A	C

4.3.1 Kullanılan Polikarboksilat Bazlı Katkıların Performans Kıyaslaması Sonuçları

Ham veriler yardımıyla elde edilen sonuçlar:

- 1) Kıvam koruma performansı açısından 90 dakika sonraki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı C katkısı göstermiştir.
- 2) Başlangıç kıvamı açısından ilk an sonuçları incelendiğinde en iyi performansı B katkısı göstermiştir.
- 3) Ortalama dinamik EKG ve çıkış-iniş eğrilerinden elde edilen dinamik EKG’lerde en iyi performansı C katkısı, en kötü performansı D katkısı göstermiştir.
- 4) 0,19 s/ç oranındaki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkı B katkısıdır.
- 5) 0,21 s/ç oranındaki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkı A katkısıdır.
- 6) 0,23 s/ç oranındaki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkı C katkısıdır.
- 7) Histeresiz alanlarına bakıldığında en iyi performansı gösteren katkılar B ve C katkısıdır.

Normalize edilmiş reolojik veriler yardımıyla elde edilen sonuçlar:

- 1) Kıvam koruma performansı açısından 90 dakika sonraki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı A ve C katkısı göstermiştir.

- 2) Başlangıç kıvamı açısından ilk an sonuçları incelendiğinde en iyi performansı A ve B katkısı göstermiştir.
- 3) Ortalama dinamik EKG ve çıkış-iniş eğrilerinden elde edilen dinamik EKG’lerde en iyi performansı A katkısı, en kötü performansı D katkısı göstermiştir.
- 4) 0,19 s/ oranındaki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkı B katkısıdır.
- 5) 0,21 s/ oranındaki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkı A katkısıdır.
- 6) 0,23 s/ oranındaki sonuçlar incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkı C katkısıdır.
- 7) Histeresiz alanlarına bakıldığında en iyi performansı gösteren katkılar A ve B katkısıdır.

Normalize edilmiş verilerle dozajlar sabitlenince 90. dakikada ve ilk anda elde edilen en iyi performanslı katkılar değişmiştir. A katkısı, sabit kıvamı yakalamak adına diğer katkılardan daha az dozajda kullanıldığı için, ham verilerle elde edilen sonuçlar aslında gerçeği yansıtmamaktadır. Normalize edilmiş verilerde A katkısının üstün performansı ortaya çıkmıştır.

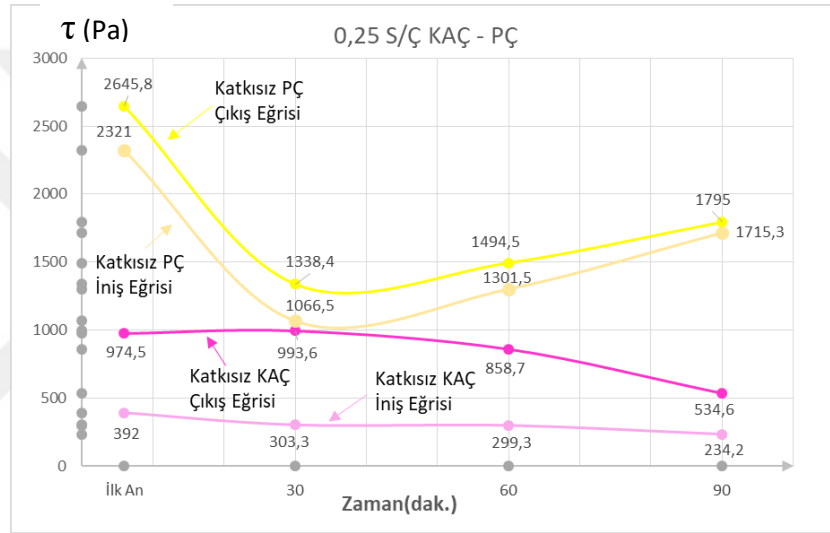
Ayrıca s/ oranı değişimiyle katkı etkinliğinin değiştiği elde edilen sonuçlarda grlmektedir. Düşük s/ oranlarında (0,19) B katkısı etkili olurken, 0,21 s/ oranında A katkısı ve yüksek s/ oranında (0,23) ise C katkısı etkili olmuştur.

4.4 Kalsiyum Alüminat imentosu ve Normal Portland imentosu Hamuru rneklerinin Reolojik zelliklerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde karşılaştırmalı deneyler için 0,25 s/ oranında, katkısız olarak hazırlanmış kalsiyum alüminat imentosu hamuru ve normal Portland imentosu hamuru karışımlarına reometre testleri uygulanmıştır. Burada 0,25 s/ oranının seçilme

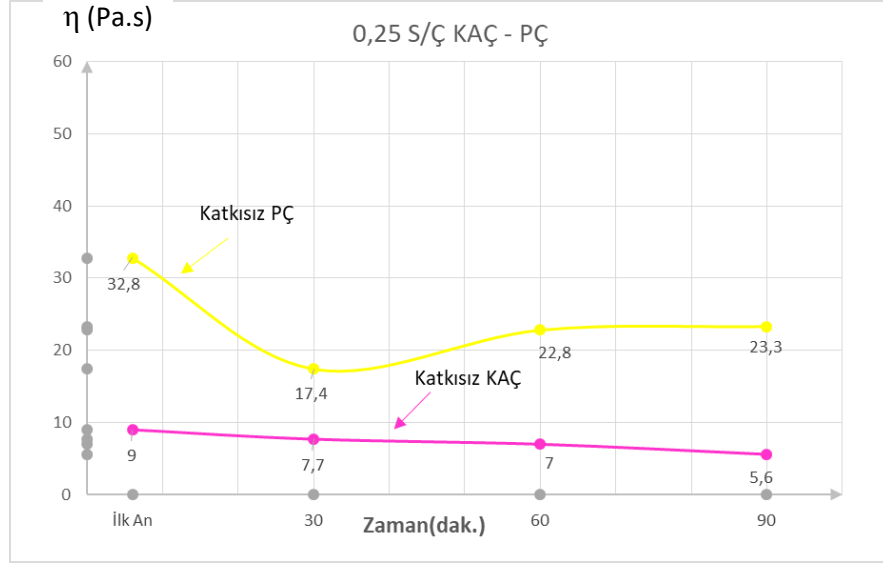
sebebi; kalsiyum alüminat çimentosu için çalışma skalası olarak belirlenen 0,19, 0,21 ve 0,23 s/ç oranında, normal Portland çimentosu ile çok kuru bir karışım elde edilmesidir.

Dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri, uygulanan akma protokolünün ikinci çıkış ve iniş eğrilerinin y eksenine çok yaklaştığı $5s^{-1}$ deformasyon hızı noktasındaki değerleri alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.27 0,25 s/ç katkısız kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği

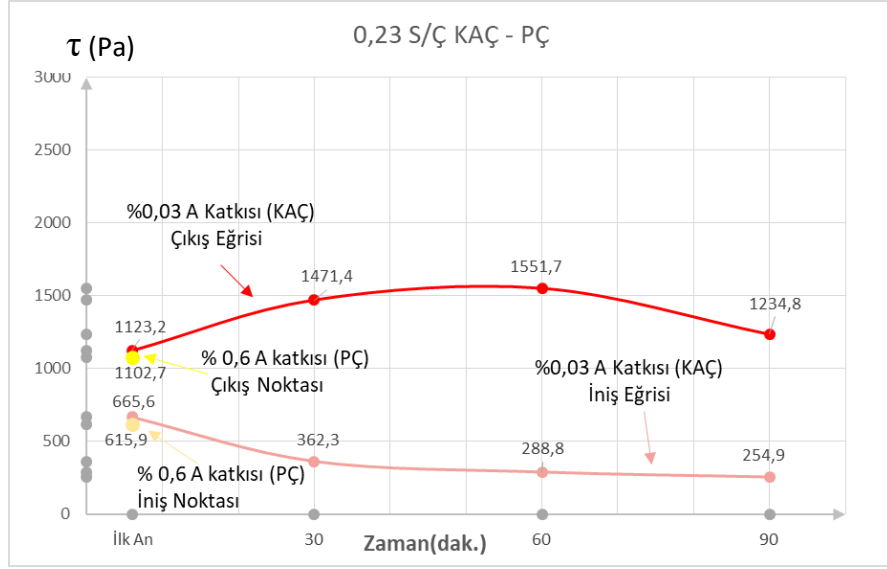
Şekil 4.27'deki değerlere göre çıkış eğrileri iniş eğrilerinin üzerinde kalmıştır. Yani çimento hamurları yapısal yumuşama davranışı göstermiştir. Katkısız Portland çimentosu karışımı ilk 30 dakikada kıvam kazanırken, 30 dakikadan sonra kıvam kaybetmeye başlamıştır. Kalsiyum alüminat çimentosu için ise sürekli bir EKG düşüşü, yani kıvam kazanımı görülmektedir. Aynı s/ç oranındaki normal Portland çimentosu hamuruna kıyasla, kalsiyum alüminat çimentosunda dinamik eşik kayma gerilmelerinin çok düşük olduğu görülmüştür.



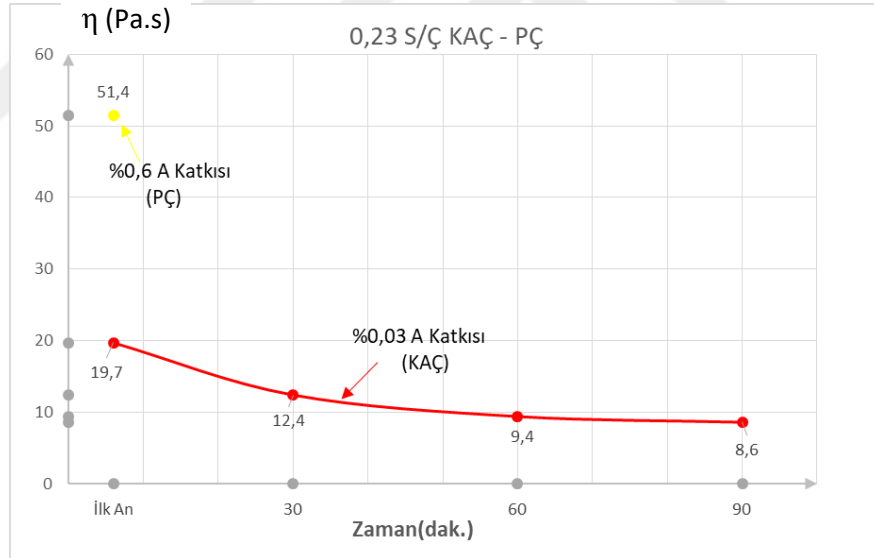
Şekil 4.28 0,25 s/ç katkısız kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının viskozite – zaman grafiği

Kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu hamurlarının viskozite değerleri Şekil 4.28’de görülmektedir. Aynı s/ç oranında normal Portland çimentosu hamurunun viskozite değerleri, kalsiyum alüminat çimentosu hamurlarının değerlerinden çok daha yüksektir.

Kalsiyum alüminat çimentosunun dinamik eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin normal Portland çimentosundan çok daha düşük çıkma nedeni, aynı s/ç oranında kalsiyum alüminat çimentosunun normal Portland çimentosuna kıyasla daha akışkan kıvamda olmasıdır.



Şekil 4.29 0,23 s/ç ve sabit kıvamda A katkılı kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının dinamik eşik kayma gerilmesi – zaman grafiği



Şekil 4.30 0,23 s/ç ve sabit kıvamda A katkılı kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosu karışımlarının viskozite – zaman grafiği

Şekil 4.25 ve 4.26’da A katkılı kalsiyum alüminat çimentosu ve normal Portland çimentosunun dinamik eşik kayma gerilmesi-zaman ve viskozite-zaman grafikleri sabit s/ç ve sabit kıvamda verilmiştir. A katkısı ile hazırlanan Normal Portland

imentosu karışımında, ilk andan sonra ani kıvam kaybı yaşanmış ve karışım reometre haznesine giremeyecek kuruluğa ulaşmıştır. Normal Portland çimentosunda ilk andan sonra çalışılmazken, kalsiyum alüminat çimentosuyla 90 dakika sonunda bile ölçüm alınabilmiştir. Şekil 4.25'e bakıldığında normal Portland imentosu ve kalsiyum alüminat çimentosunun ilk andaki dinamik eşik kayma gerilmeleri birbirine çok yakındır. Ancak, sabit kıvamı yakalamak için normal Portland çimentosunda kullanılan katkı miktarı, kalsiyum alüminat imentosu için kullanılanın 20 katıdır. Yani aynı başlangıç EKG değerlerine ulaşmak için, aynı katkıdan normal Portland imentosu için çok daha fazla dozajlarda kullanmak gerekmektedir. Şekil 4.26'da normal Portland imentosunun ilk andaki viskozite değerinin kalsiyum alüminat çimentosuna kıyasla çok yüksek olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlardan kalsiyum alüminat çimentosunun normal Portland çimentosuna kıyasla kıvam korumada daha iyi olduğu söylenebilir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Literatürde kalsiyum alüminat çimentolarının reolojik özelliklerini belirlemek adına, çimento hamurlarına genellikle çökme-yayılma veya Marsh hunisi testleri uygulanmış ya da viskozimetre kullanılmıştır. Bu tez kapsamında ise reometre yardımıyla akma eğrileri oluşturularak ayrıntılı bir karakterizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

VPEG kökenli A, B, C ve D katkıları çok düşük s/ç oranları ve dozajlarda (ağırlıkça %0,03) dahi kalsiyum alüminat çimentosunun hamurunun reolojik özelliklerini iyileştirmede, MPEG kökenli E katkısına kıyasla etkili olmuştur. Kalsiyum alüminat çimentosunun bu tezde incelenen MPEG kökenli polikarboksilat katkı ile uyumsuz olduğu söylenebilir.

Özellikle 0,21 ve 0,23 s/ç oranında, 90 dakikada, A katkısı kalsiyum alüminat çimentosunun EKG değerini önemli derecede yükselmesini engellemede (kıvam koruma) etkili olmuştur. Kalsiyum alüminat çimentosunun kullanılmasının önündeki bir engel olan kıvam koruma performansının uygun katkı ve s/ç oranı kombinasyonu seçimi ile iyileştirilebileceği kanıtlanmıştır.

En yüksek s/ç oranı ile hazırlanan katkısız çimento hamuru (0,24) ilginç bir sonuca işaret etmektedir. İlk an 438 Pa olan EKG değeri, 30. dakikada 622 ve 60.dakikada 697 Pa'a yükselirken, 90. dakikada 418 Pa değerine geri dönmüştür. Benzer geri dönüşler s/ç=0,23 oranındaki katkılı hamurlarda da gözlenmiştir. Bu durum tam olarak boşluk suyuna salınan iyon konsantrasyonlarındaki değişimlerden veya hidrasyon ürünlerinin mekanik çırpma etkisiyle stabilite kaybetmesiyle ilişkili olabilir. Daha net bir değerlendirme için ilave karakterizasyon deneylerine ihtiyaç vardır.

Nihai viskozite sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde akışkanlık geliştirme açısından en etkili katkı A katkısı olmuştur. Ancak zamana bağlı olarak nihai viskozitede düşüş eğilimlerine daha çok rastlanmıştır.

Çoğunlukla A katkısı viskoziteyi azaltmada daha etkili olmuştur. Yüksek deformasyon hızlarında örselenen hamurda çimento taneleri arasındaki etkileşim azalmakta ve ölçülen nihai viskozite değerleri de buna paralel olarak düşmektedir. Viskozite değeri hızlı azalmayan karışımlarda sakızlanma, ağdalanma davranışı daha belirgin olmaktadır.

Ölçüm tekniğinde kullanılan akma protokolündeki hangi aralıkta çalışıldığı reolojik parametrelerin elde edilmesinde çok önemli bir etkene sahip olduğu görülmüştür. Çıkış eğrileri kullanılırsa zamana bağlı olarak EKG değerleri artmakta yani kıvam kaybı yaşanmaktadır, iniş eğrileri kullanılırsa EKG değerleri azaldığı için kıvam kaybı yaşanmamış gibi görünmektedir.

Katkı türü, dozajı ve zamana göre kalsiyum alüminat çimentosunun tiksotropik ya da reopektik davranışının değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Katkısız çimento hamuru karışımlarının ise (0,21 ve 0,23 s/ç) tiksotropik davranış gösterdiği görülmüştür.

Kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiğindeki çıkış iniş eğrilerinin arasında kalan alan ile histerezis alanları karakterize edildiğinde, kalsiyum alüminat çimentosunun genelde pozitif histerezis alanı yani yapısal yumuşama davranışı gösterdiği görülmektedir. Deformasyon hızı artışının görüldüğü çıkış eğrisi, deformasyon hızı azalışının görüldüğü iniş eğrisinin altında kalmaktadır. Böylece kalsiyum alüminat çimentosunun tiksotropik davranış gösterdiği söylenebilir.

Ham veriler yardımıyla elde edilen sonuçlar incelendiğinde; kıvam koruma performansı açısından 90 dakika sonra en iyi performansı C katkısı göstermiştir. Başlangıç kıvamı açısından ise en iyi performansı B katkısı göstermiştir. Ortalama dinamik EKG ve çıkış-iniş eğrilerinden elde edilen dinamik EKG'lerle en iyi performansı C katkısı, en kötü performansı D katkısı göstermiştir. Son olarak histerezis alanları incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkılar B ve C katkılarıdır.

Normalize edilmiş reolojik veriler yardımıyla elde edilen sonuçlar incelendiğinde; kıvam koruma performansı açısından 90 dakika sonunda en iyi performansı A ve C katkısı göstermiştir. Başlangıç kıvamı açısından ise en iyi performansı A ve B katkısı göstermiştir. Ortalama dinamik EKG ve çıkış-iniş eğrilerinden elde edilen dinamik EKG'lerle en iyi performansı A katkısı, en kötü performansı D katkısı göstermiştir. Son olarak histerezis alanları incelendiğinde en iyi performansı gösteren katkılar A ve B katkılarıdır.

Normalize edilmiş verilerle dozajlar eşitlenince 90. dakikada ve ilk anda elde edilen en iyi performanslı katkılar değişmiştir. A katkısı, sabit kıvamı yakalamak adına diğer katkılardan daha az dozajda kullanıldığı için, ham verilerle elde edilen sonuçlar aslında gerçeği yansıtmamaktadır. Normalize edilmiş verilerde A katkısının üstün performansı ortaya çıkmıştır.

Su/çimento oranı değişimiyle katkı etkinliğinin değiştiği elde edilen sonuçlarda görülmektedir. Düşük s/ç oranında (0,19) B katkısı etkili olurken, 0,21 s/ç oranında A katkısı ve yüksek s/ç oranında (0,23) ise C katkısı etkili olmuştur.

Kalsiyum alüminat çimentosu aynı s/ç oranındaki (0,25) normal Portland çimentosu ile kıyaslandığında, dinamik EKG değerlerinin normal Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yani aynı s/ç oranında kalsiyum alüminat çimentosunun kıvamı normal Portland çimentosuna kıyasla daha iyidir.

A katkılı, sabit s/ç oranı (0,23) ve sabit kıvamda yapılan karşılaştırılmalı deneylerde ise normal Portland çimentosu ile sadece ilk anda ölçüm alınabilirken, kalsiyum alüminat çimentosunda 90 dakikaya kadar ölçüm yapılabilmiştir. İki çimento hamuru karışımının da ilk an dinamik EKG değerleri çok benzerdir. Ancak, normal Portland çimentosunda bu değerleri elde edebilmek için (sabit kıvam), kalsiyum alüminat

imentosunda kullanılan dozajdan 20 katı kadar fazla katkı dozajı kullanılmıştır. Bu sonuçlarla, kalsiyum alüminat imentosu için en etkili katkı olan A katkısının, normal Portland çimentosuyla çalışmadığı, ani kıvam kaybına yol açtığı ve kıvam koruma performansını iyileştiremediği sonucuna varılabilir.

Katkısız olarak çalışılmayan 0,19 s/ oranında A ve B katkılarıyla ilk yarım saat kıvam korunmuş, C katkısıyla ise kıvam koruma potansiyeli 60 dakikaya ulaşmıştır. Katkısız 0,21 s/ oranında 60 dakika sonra kıvam kaybı yaşanırken, kullanılan polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcılarla 90 dakika sonra bile ölçüm alınabilmektedir.



KAYNAKLAR

Aİtcin, P. C. ve Eberhardt, A. B. (2016). Historical background of the development of concrete admixtures. P. C. Aİtcin ve R. Flatt, (Ed.), *Science and technology of concrete admixtures* içinde (xlii-lii). Cambridge: Woodhead Publishing.

Alonso, M., Palacios, M. ve Puertas, F. (2013). Effect of polycarboxylate-ether admixtures on calcium aluminate cement pastes part 1: Compatibility studies. *I&EC Research*, 52, 17323-17329.

Baalbaki, M. (1990). Practical means for estimating superplasticizer dosage: Determining the saturation point. *Superplasticizers: Report of the Canadian Network of center of excellence in high performance concrete* içinde (49-57). University of Sherbrooke.

Banfill, P. F. G. ve Gillt, S. M. (1993). Superplasticizers for Ciment Fondu part 1: Effects on rheological properties of fresh paste and mortar. *Advances in Cement Research*, 5 (20), 131-138.

Barborak, R. (2010). *Calcium aluminate cement concrete (Class CAC concrete)*. 12 Ağustos 2019, https://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/tips/calcium_concrete.pdf.

Bedard, C. ve Mailvaganam, N. C. (2005). The use of chemical admixtures in concrete part I: Admixture-cement compatibility journal of performance of constructed facilities. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 19, 263-266.

Bensted, J. (2012). Calcium aluminate cements. J. Bensted ve P. Barnes, (Ed.), *Structure and performance of cement* içinde (114-138). London-New York: Spon Press.

Bizzozero, J. (2014). *Hydration and dimensional stability of calcium aluminate cement based systems*. Doktora Tezi, Lozan Federal Teknoloji Enstitüsü, İsviçre.

Collepari, M. (2005). Chemical admixtures today. *Proceedings of Second International Symposium on Concrete Tecnology for Sustainable*, 527-541.

Çimsa ISIDAÇ40 kalsiyum alüminat çimentosu karo uygulamaları, (b.t.). 05 Eylül 2019, <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/DB1C26E6FFD64208A38286A765A6B7ED.pdf>.

Felekoğlu, B. (2009). *Yüksek performanslı mikro beton tasarımı*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Flatt, R. J ve Schober, I. (2012). Superplasticizers and the rheology of concrete. N. Roussel, (Ed.), *Understanding the rheology of concrete* içinde (144-208). Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.

Flatt, R. J., Schober, I., Raphael, E., Plasard, C. ve Lesniewska, E. (2008). Conformation of adsorbed comb copolymer dispersants. *Langmuir*, 25, 845-855.

Fryda, H., Gachet, V., Bost, P. ve Scrivener, K. (2000). Interaction of superplasticizers with calcium aluminate cements. *Special Publication*, 195, 91-100.

FTIR Analysis, (b.t.). 26 Ağustos 2019, <https://rtlab.com/techniques/ftir-analysis/>.

Gagné, R., Boisvert, A. ve Pigeon, M., (1996). Effect of superplasticizer dosage on mechanical properties, permeability and freeze-thaw durability of high-strength concretes with and without silica fume. *ACI Materials Journal*, 93 (2), 111-120.

Garsel, D. V., (1996). *High alumina cements and chemical binders*. 26 Ağustos 2019, <http://www.almatis.com/media/1716/high-alumina-cements-chemicalbinders.pdf,%201996>.

Gelardi, G. (2017). *Characterization of comb copolymer superplasticizers by a multi-technique approach*. Doktora Tezi, Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü, İsviçre.

Giraudeau, C., Lacaille, J. B., Souguir, Z., Nonat, A. ve Flatt, R. J. (2009). Surface and intercalation chemistry of polycarboxylate copolymers in cementitious systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 92, 2471-2488.

Golaszewski, J. ve Szwabowski, J. (2004). Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34, 235-248.

Guirdao, F. ve Galí, S. (2006). Quantitative Rietveld analysis of CAC clinker phases using synchrotron radiation. *Cement and Concrete Research*, 36, 2021-2032.

Gupta, M. (2011). Effect of wall slip on the flow in a flat die for sheet extrusion. *Society of Plastics Engineers Annual Technical (ANTEC) Papers*, 57, 1191-1196.

Hanehara S. ve Yamada K., (1999). Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. *Cement and Concrete Research*, 29, 1159-1165.

Idrees, M., Sonyal, M. S. ve Ekinçioğlu, Ö. (2019). Calorimetric investigation of supplementary cementitious material incorporated calcium aluminate mortars. *10. International Concrete Congress*, 373-382.

IR spektroskopisi, (b.t.). 26 Ağustos 2019, <http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/MMZ3015MalzemekarakterizasyonuI/ftir.pdf>.

İşsever, F. (2002). *Süperakışkanlaştırıcı ve mineral katkılı taze çimento hamuru ve harçların reolojik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Janowska-Renkas, E. (2013). The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes. *Construction and Building Materials*, 38, 1204-1210.

Kan, Y., Pei, K., Cheng, M. (2017). *A study of fracture properties of high alumina shielding concrete (HASC)*. 12 Ağustos 2019, https://repor.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/31697/SMiRT-24_01-05-04.pdf?sequence=1.

Kırca, Ö. (2006). *Temperature effect on calcium aluminate cement based composite binders*. Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara.

Klaus, S., Buhr, A., Schmidtmeier, D., ve Kuiper, S. (2015). *Hydration of calcium aluminate cement phases CA and CA₂ in refractory applications*. 21 Ağustos 2019, https://www.researchgate.net/publication/284028632_Hydration_of_calcium_aluminate_cement_phase_CA_and_CA2_in_refractory_applications.

Koehler, E. P. ve Fowler, D. W. (2004). *Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete*. 25 Ağustos 2019, <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/35338>.

Kovler, K. ve Roussel, N., (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 41, 775-792.

Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. New York-London: Springer.

Mangabhai, R. J. (1990). *Calcium aluminate cements proceedings of a symposium dedicated to H G Midgley*. İngiltere: Spon Press.

Mindess, S., Darwin, D. ve Young, J. F. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Amerika: Prentice Hall, Pearson Education, Inc.

Ng, G. B. S. (2012). *Interactions of polycarboxylate based superplasticizers with Montmorillonite clay in Portland cement and with calcium aluminate cement*. Doktora Tezi, Münih Teknik Üniversitesi, Münih.

Ng, S. ve Plank, J. (2011). Formation of organo-mineral phases incorporating PCE superplasticizers during early hydration of calcium aluminate cement. *Proceedings of the 13th ICCI International Congress on the Chemistry of Cement*, 251.

Odler, I. (2000). *Special inorganic cements*. London-New York: Taylor & Francis.

Önder, A. E. (2008). *Kılcal reometrenin otomatik kontrol sisteminin tasarlanması ve hesaplama programının yazılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Özel, C. (2012). *Katkılı betonların reolojik özelliklerinin taze beton deney yöntemlerine göre belirlenmesi*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Plank, J., Pöllmann, K., Zouaoui, N., Andres, P. R. ve Schaefer, C. (2008). Synthesis and performance of methacrylic ester based polycarboxylate superplasticizers possessing hydroxy terminated poly(ethylene glycol) side chains. *Cement and Concrete Research*, 38, 1210-1216.

Plank, J., Sakai, E., Miao, C. W., Yu, C. ve Hong, J. X. (2015). Chemical admixtures-chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and Concrete Research*, 78, 81-99.

Puertas, F., Santos, F., Palacios, H. ve Martinez-Ramirez, M. (2005). Polycarboxylate superplasticiser admixtures: Effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advances in Cement Research*, 17 (2), 77-89.

Puertas, F., Santos, F., Palacios, H. ve Martinez-Ramirez, M. (2013). Effect of polycarboxylate-ether admixtures on calcium aluminate cement pastes, part 2: Hydration studies. *Advances in Cement Research*, 52, 17323-17329.

Qian, Y., Leasage, K., Cheikh ve Schutter, G. (2018). Effect of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE) on dynamic yield stress, thixotropy and flocculation state of fresh cement pastes in consideration of the Critical Micelle Concentration (CMC). *Cement and Concrete Research*, 107, 75-84.

Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook properties science, and technology*, (2nd ed.). Amerika: William Andrew.

Rixom, R. ve Mailvaganam, N. (1999). *Chemical admixtures for concrete*, (3rd ed.). Londra: E & FN Spon.

Robson, T. D. (1959). High-Alumina Cements. *Architectural Science Review*, 2, 49-56.

Robson, T. D. (1962). *High alumina cement and concretes*. New York: Contractors Record Ltd.

Saak, A. W., Jennings H. M. ve Shah S. P. (2001). The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 31 (29), 183-192.

Sakai, E., Ishida, A. ve Ohta, A. (2006). New trend in the development of chemical admixtures in Japan. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4, 211-223.

Scheinherrová, L. ve Trník, A. (2017). Hydration of calcium aluminate cement determined by thermal analysis. *AIP Conference Proceedings*, 1866, 040034-1 - 040034-5.

Scrivener, K. L. (2003a). Calcium aluminate cements. J. Newman ve B. S. Choo, (Ed.), *Advanced concrete technology* içinde (2/1-2/30). Oxford: Elsevier Ltd.

Scrivener, K. L. (2003b). New developments in CAC based concretes. *28th Conference on our world in concrete & structures*, 49-59.

Scrivener, K. L. ve Capmas, A. (1998). Calcium aluminate cements. P. C. Hewlett, (Ed.), *Lea's chemistry of cement and concrete* (4th ed.) içinde (713 – 775). UK: Elsevier.

Scrivener, K. L., Cabiron, J. L. ve Letourneux, R. (1999). High-performance concretes from calcium aluminate cements. *Cement and Concrete Research*, 1215-1223.

Sucu, M. ve Delibaş, T. (2015). Kalsiyum alüminat çimentosu bazlı tamir betonları. *Hazır Beton*, 131, 88-94.

Swift, P. D. (2013). *The development of calcium aluminate phosphate cement for radioactive waste encapsulation*. Doktora Tezi, Sheffield Üniversitesi, İngiltere.

Taylor, H. F. W. (1990). *Cement chemistry* (2nd ed.). New York: Academic Press.

Uchikawa, H. (1995). Placing the leading part. *Cement and Concrete*, 585, 25.

Ukrainczyk, N., Sipusic, J. ve Vrbos, N. (2014). Polycarboxylate ether based superplasticiser for calcium aluminate cement mortars. 12 Ağustos 2019, https://www.researchgate.net/publication/272942764_POLYCARBOXYLATE_E

THER_BASED_SUPERPLASTICISER_FOR_CALCIIUM_ALUMINATE_CEMENT_MORTARS.

Whitney, D. P. (2008). Chemical admixtures. E.G. Nawy, (Ed.), *Concrete construction engineering handbook* içinde (3-1-3-18). Amerika: Taylor & Francis Group.

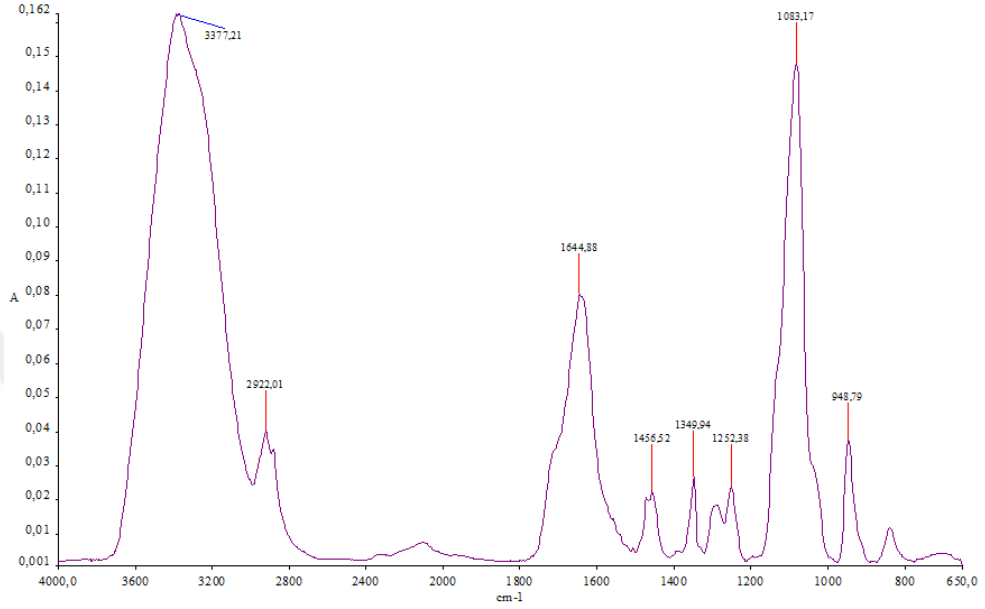
Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S. ve Matsuhisa, M. (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 30 (2), 197-207.

Yaman, İ. Ö. (2015). *Farklı bağlayıcıların kalsiyum alüminat çimentosu esaslı harçlar üzerindeki etkileri*. 12 Ağustos 2019, <https://docplayer.biz.tr/11825387-Farkli-baglayicilarin-kalsiyum-aluminat-cimentosu-esasli-harclar-uzerindeki-etkileri-prof-dr-ismail-ozgur-yaman.html>.

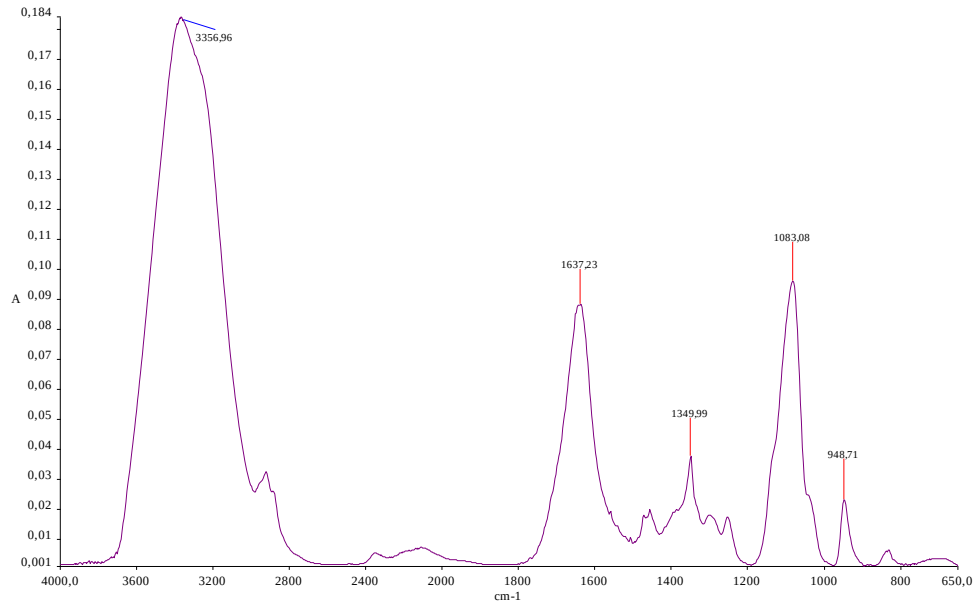
Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M. ve Kitahara, A. (1997). Role of steric hindrance in the performance of superplasticisers for concrete. *Journal of American Ceramic Society*, 80, 2667-2671.

EKLER

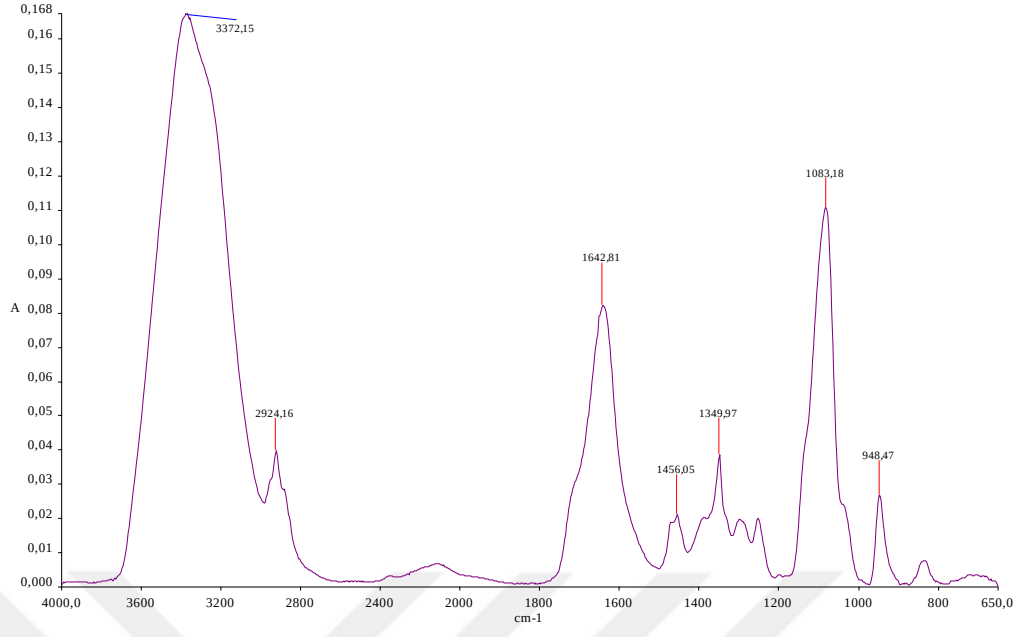
EK 1: FTIR Analiz Sonuçları



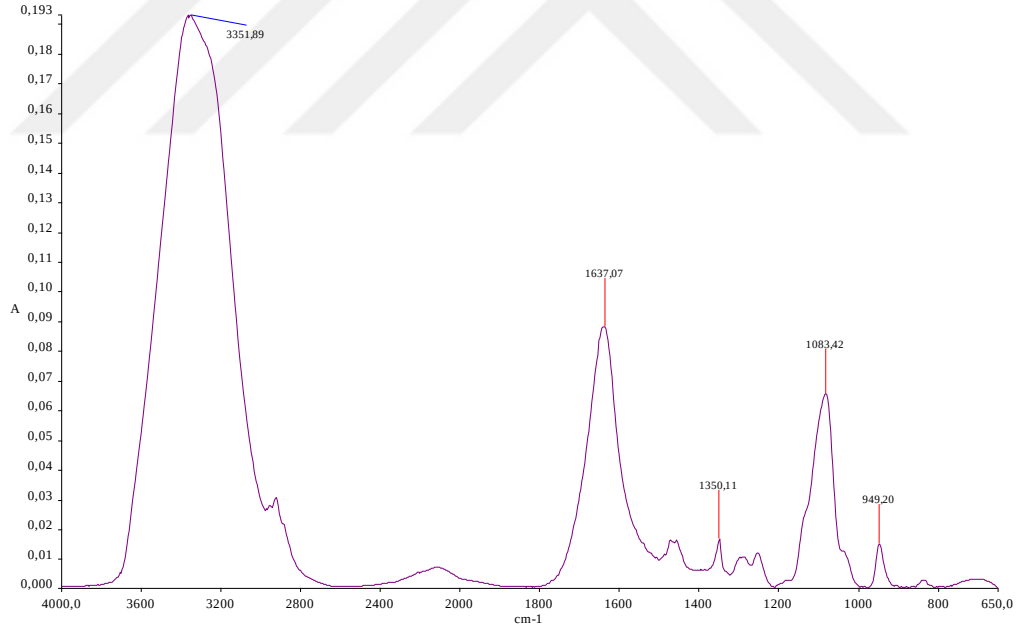
Şekil A.1 A katkısı FTIR analizi



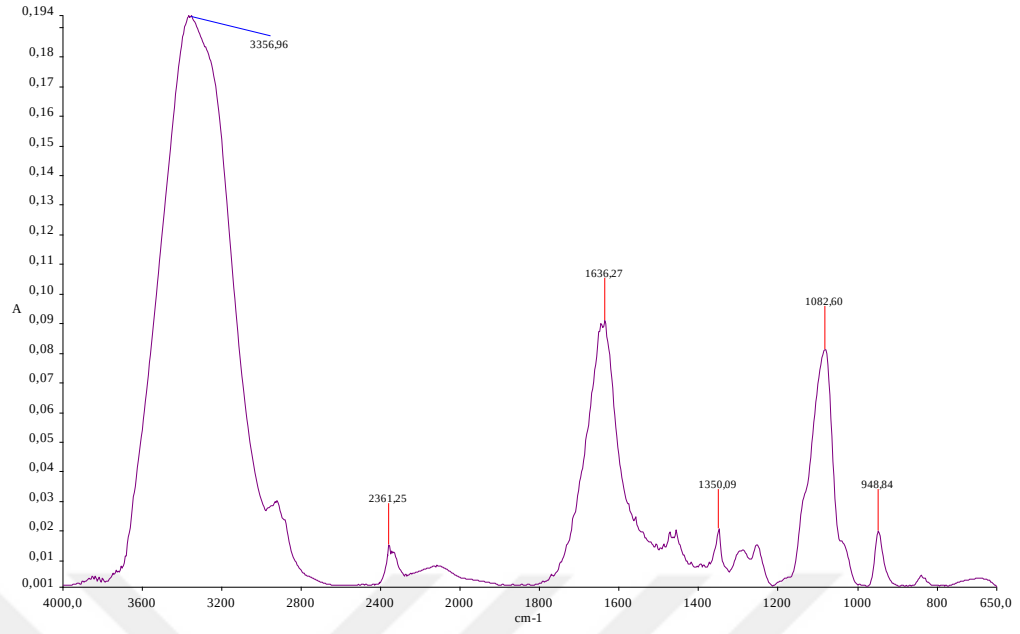
Şekil A.2 B katkısı FTIR analizi



Şekil A.3 C katkısı FTIR analizi

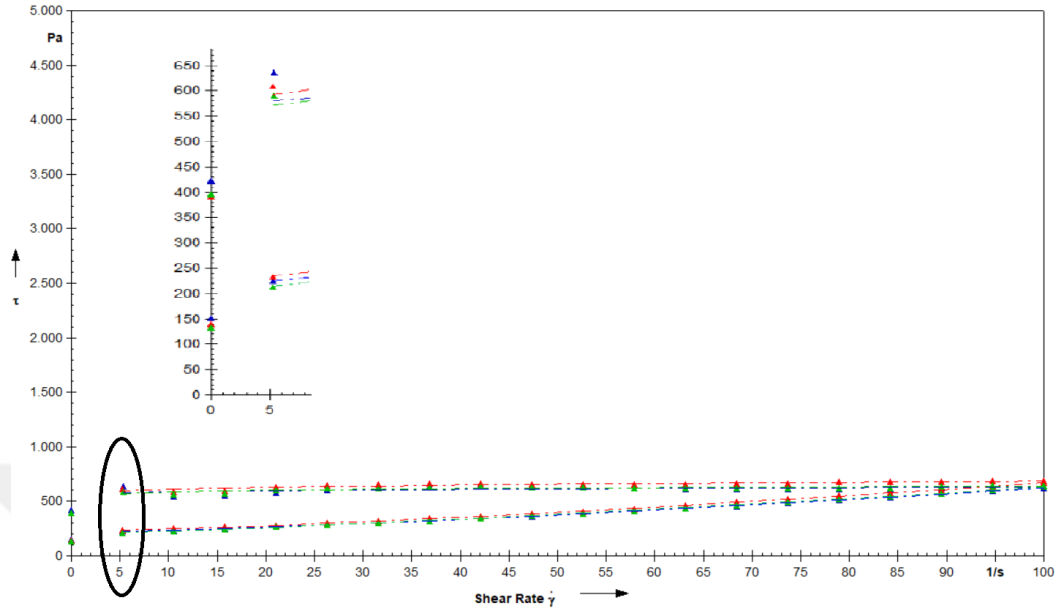


Şekil A.4 D katkısı FTIR analizi

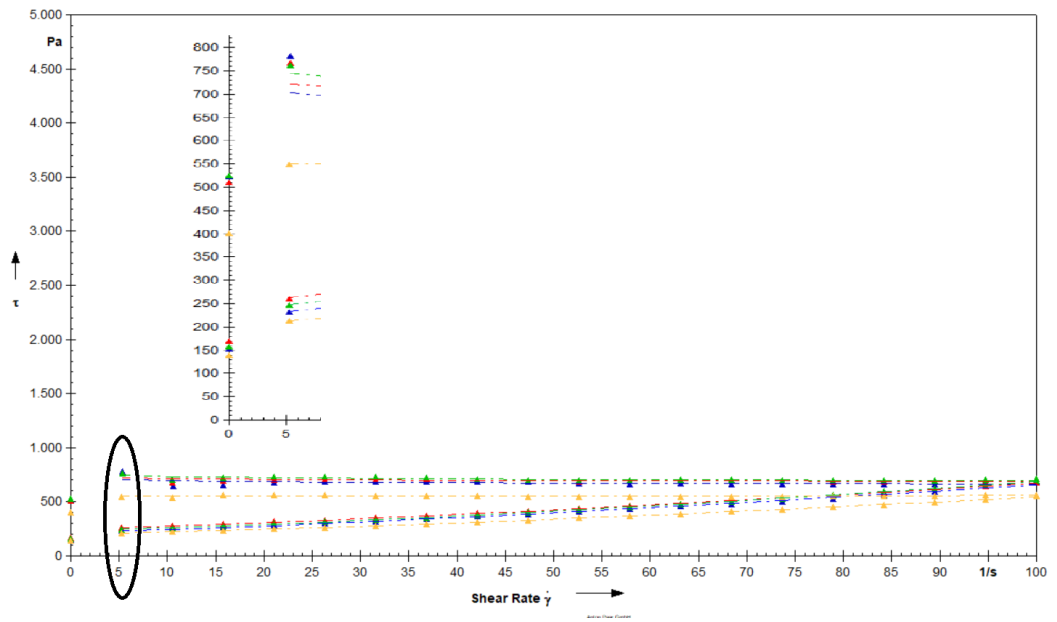


Şekil A.5 E katkısı FTIR analizi

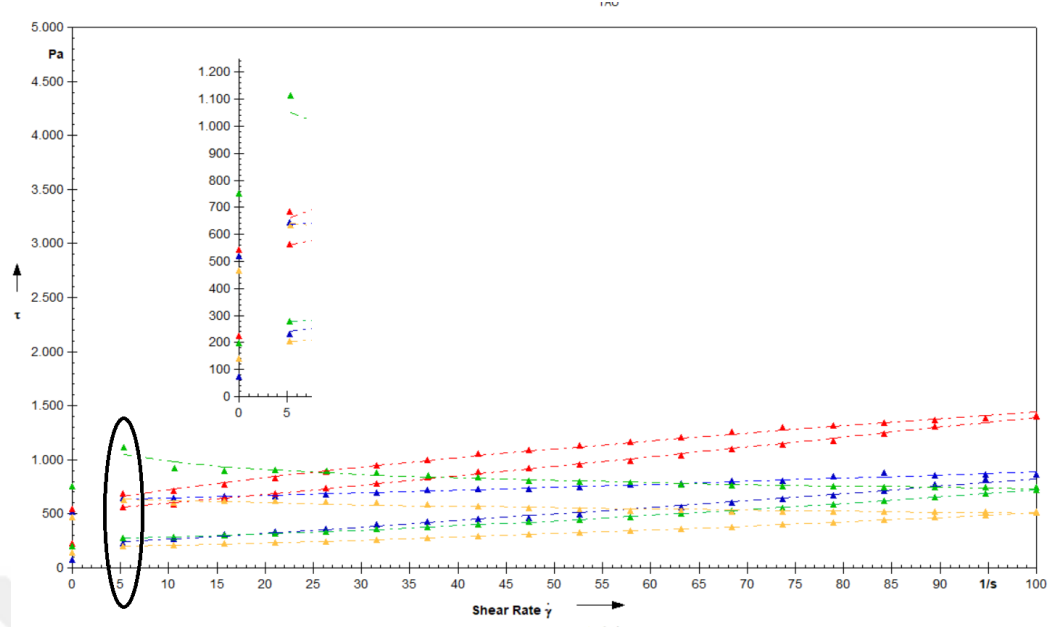
EK 2: Akma Eğrisi Grafikleri



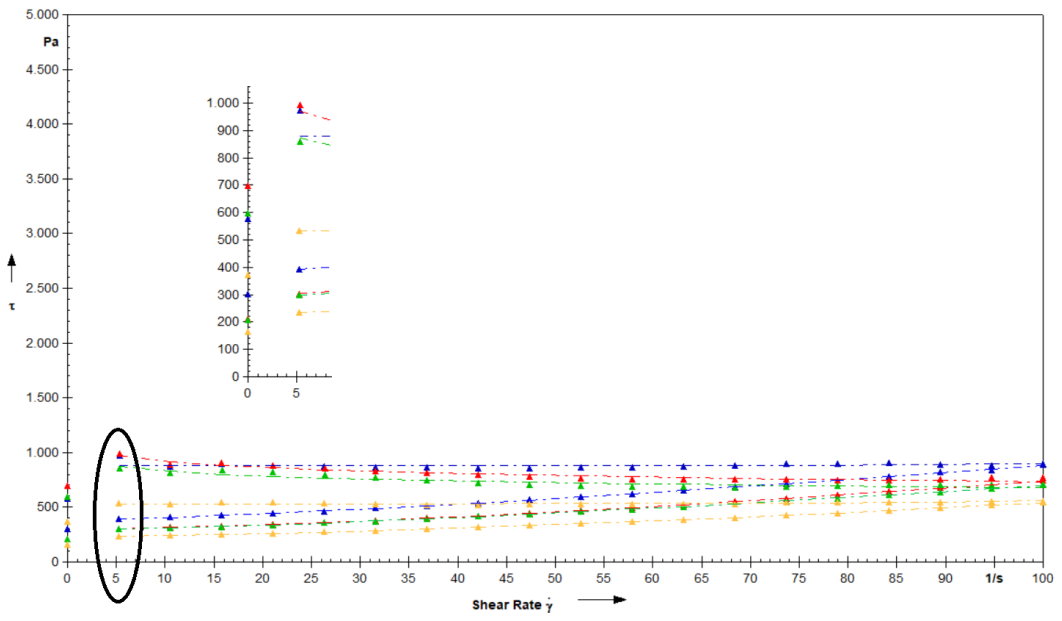
Şekil A.6 0,21 s/ç katkısız KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



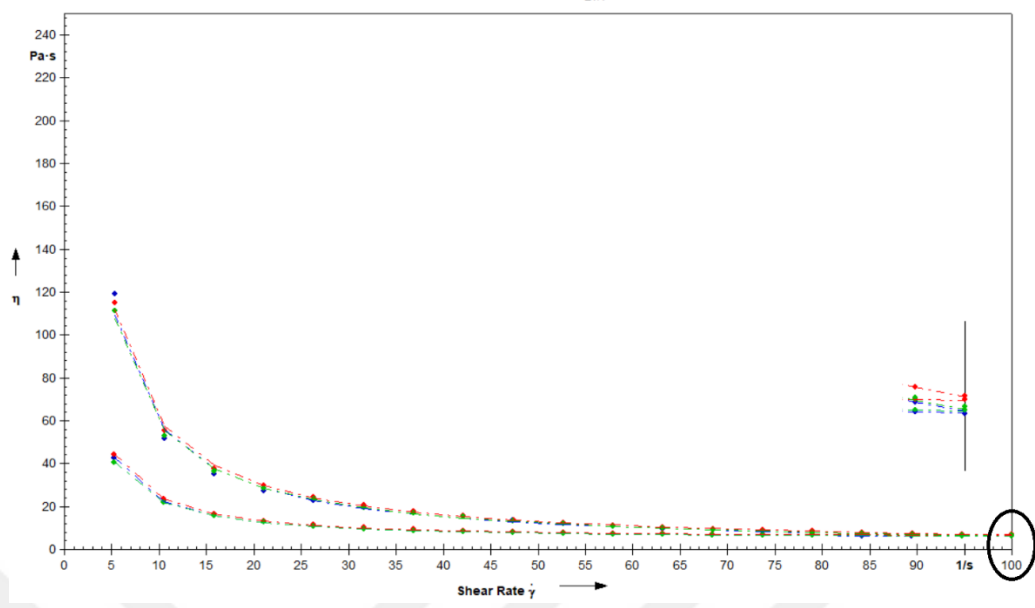
Şekil A.7 0,23 s/ç katkısız KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



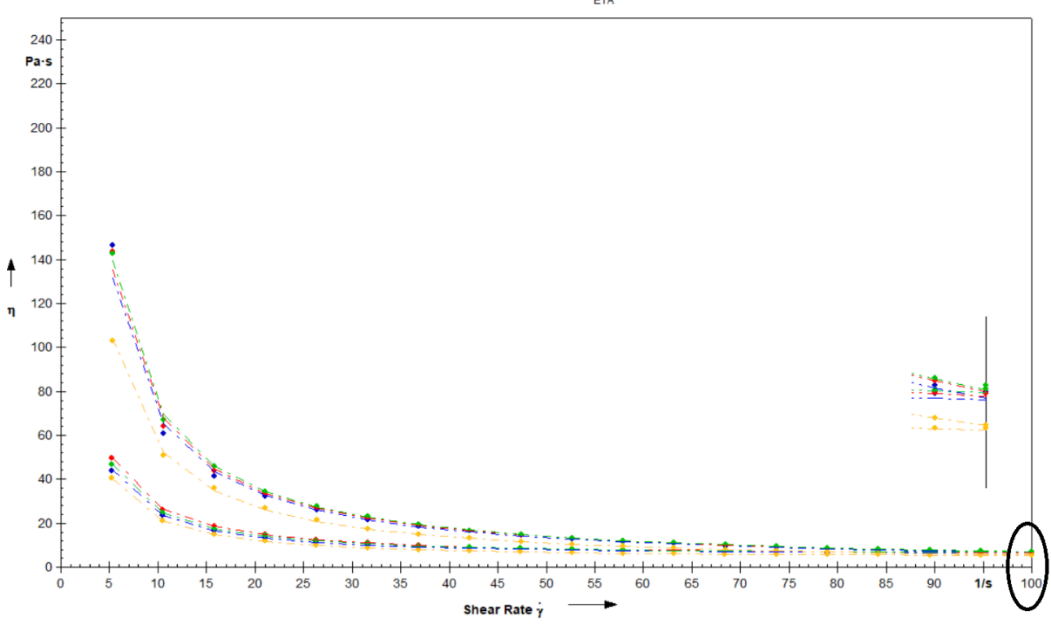
Şekil A.8 0,24 s/ç katkısız KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



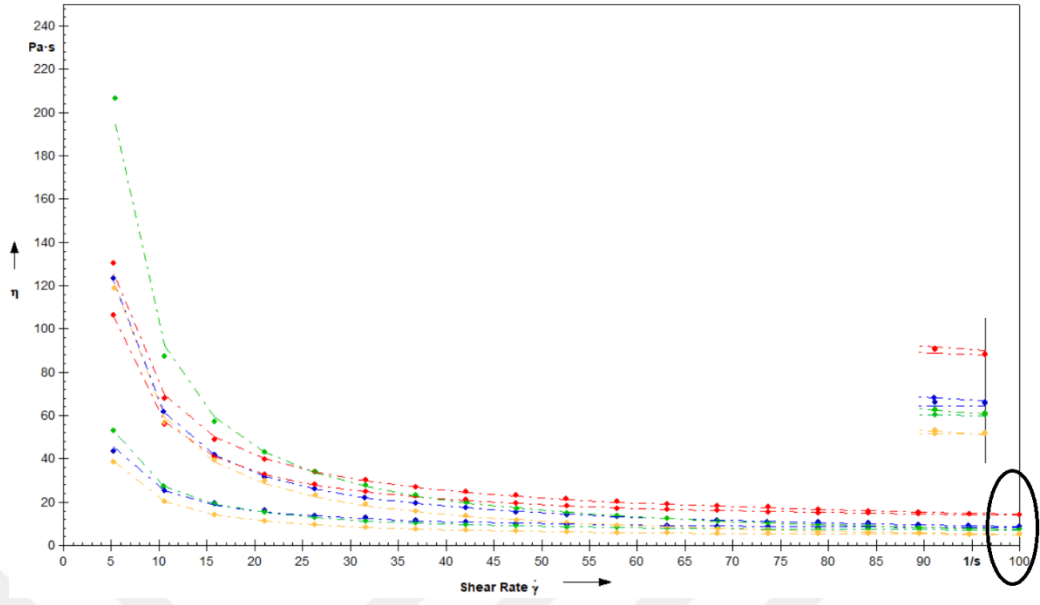
Şekil A.9 0,25 s/ç katkısız KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



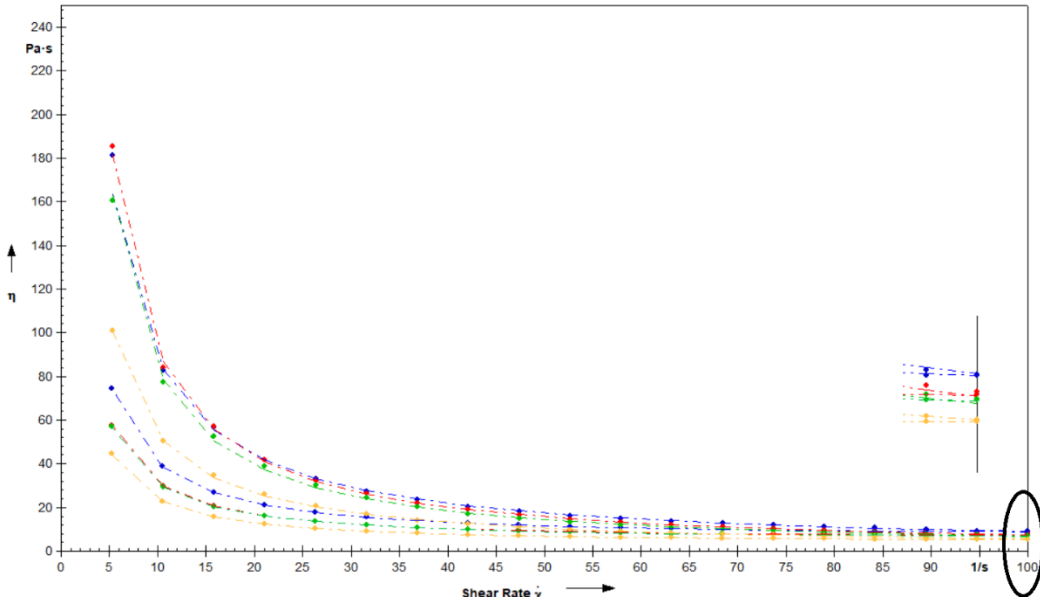
Şekil A.10 0,21 s/ç katkısız KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



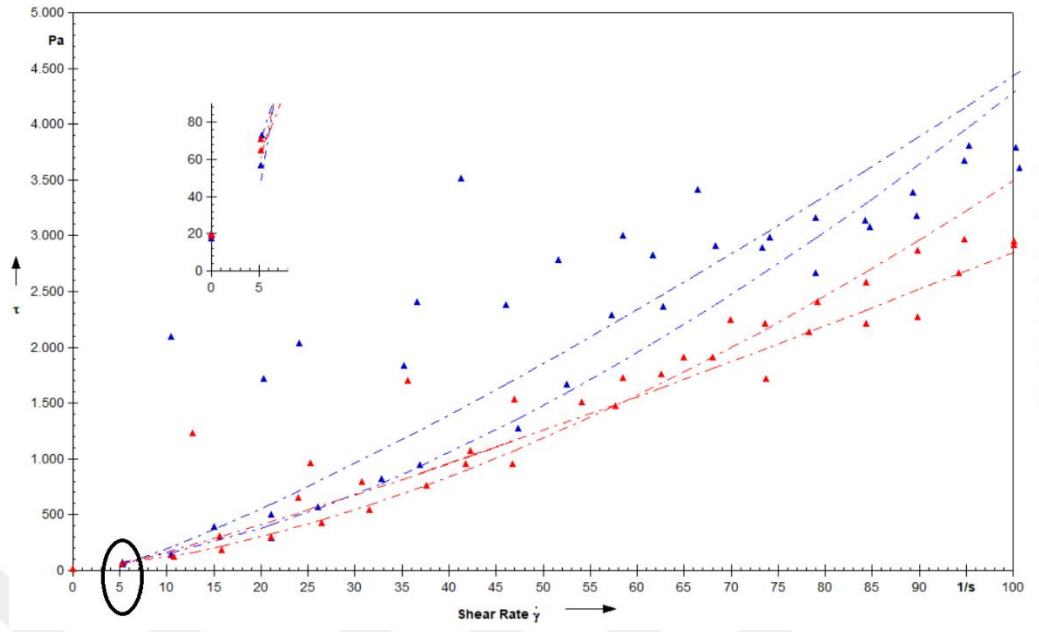
Şekil A.11 0,23 s/ç katkısız KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



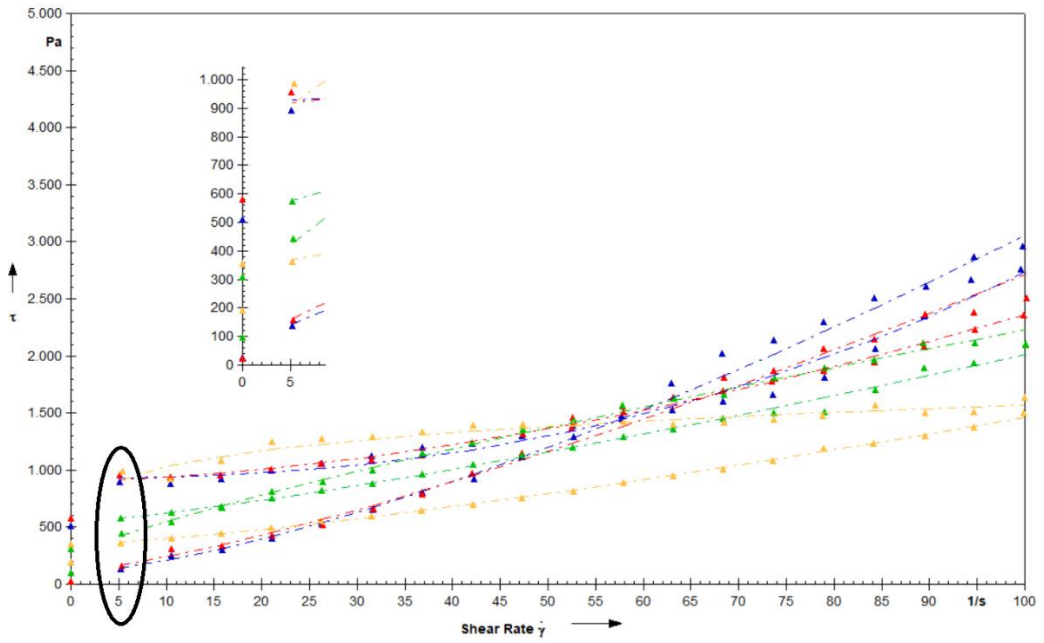
Şekil A.12 0,24 s/ç katkısız KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



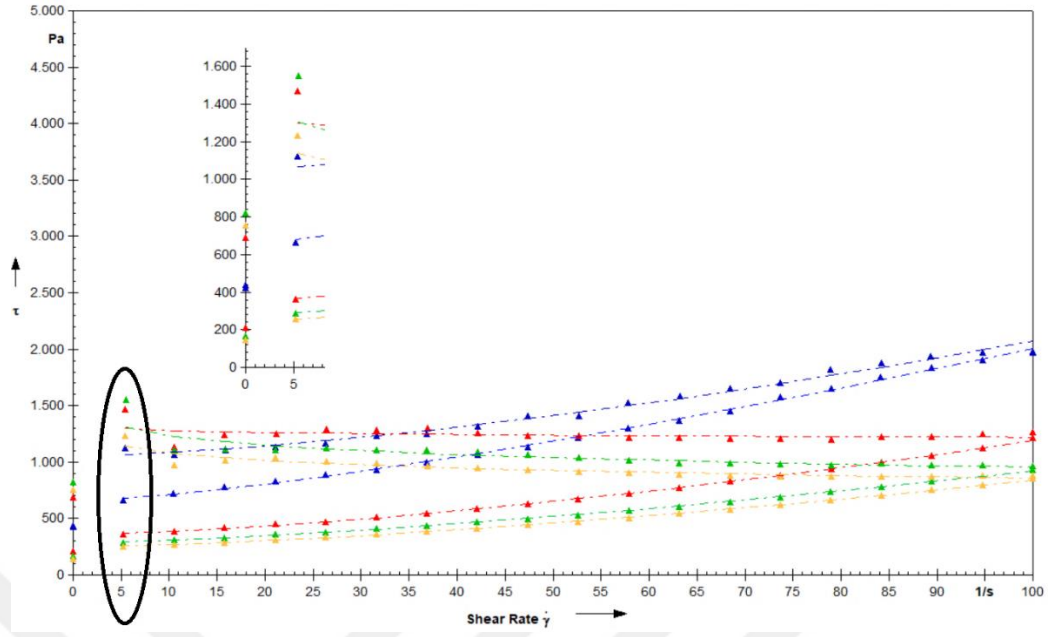
Şekil A.13 0,25 s/ç katkısız KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



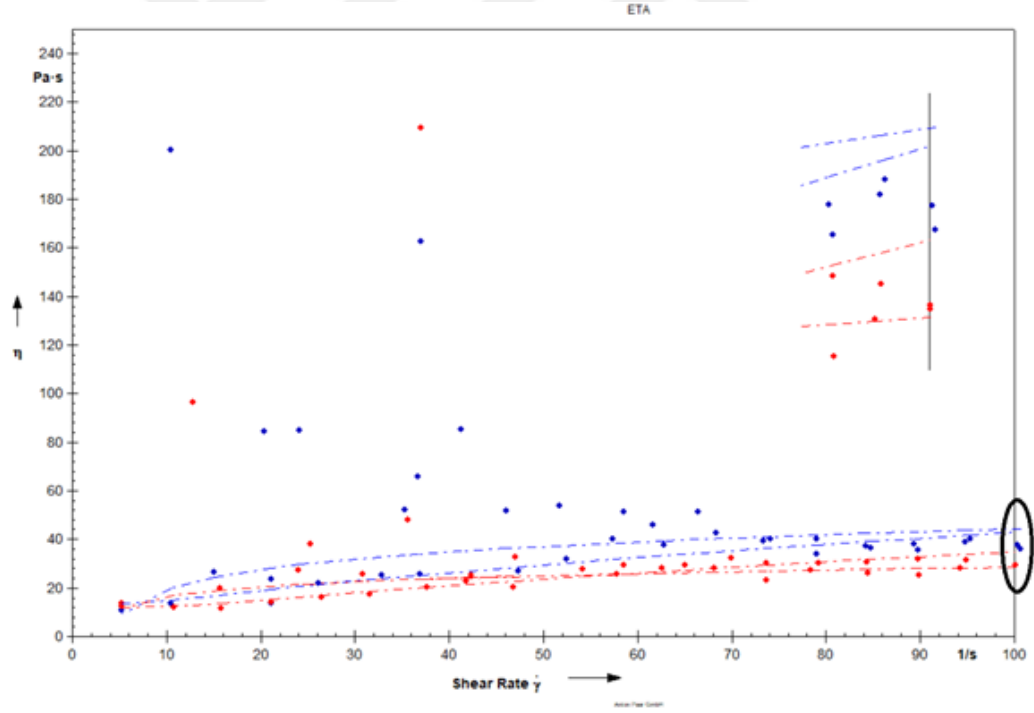
Şekil A.14 0,19 s/ç %0,07 A katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



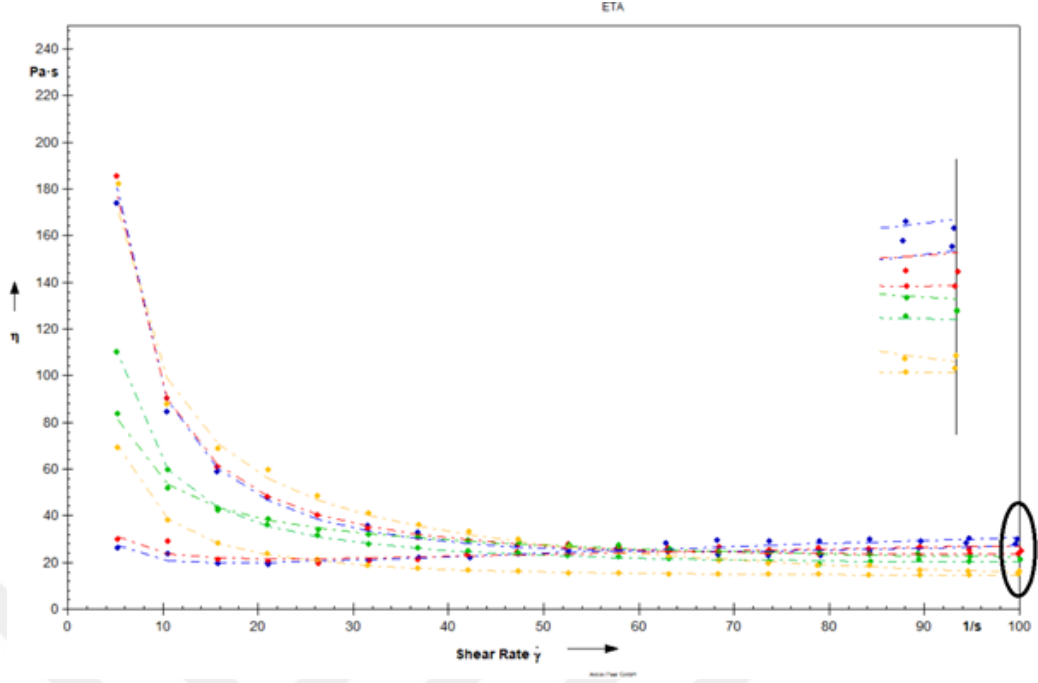
Şekil A.15 0,21 s/ç %0,04 A katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



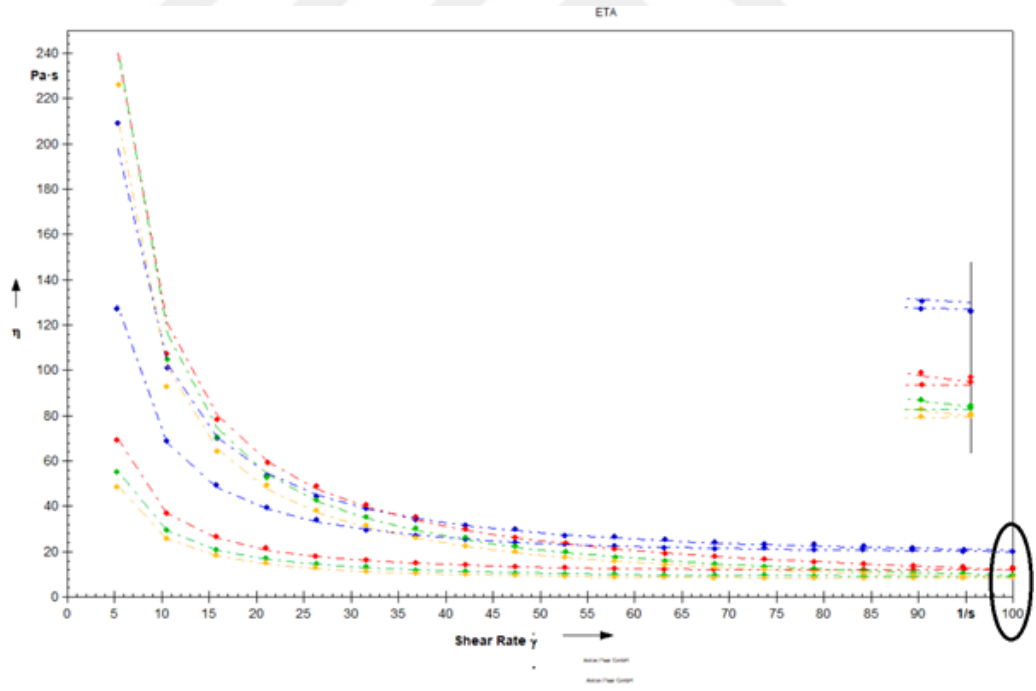
Şekil A.16 0,23 s/ç %0,03 A katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



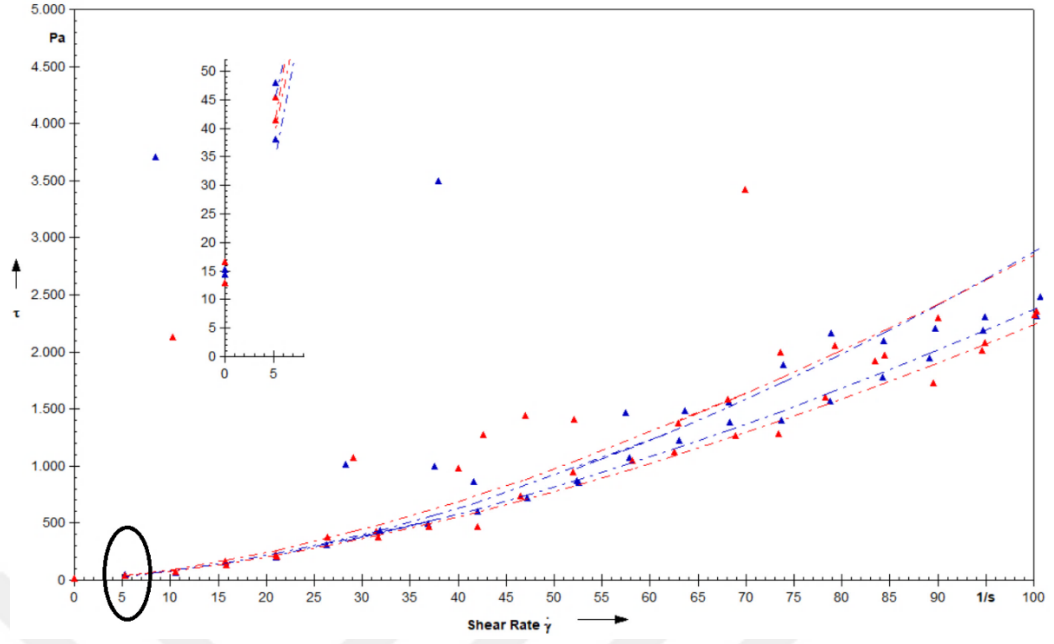
Şekil A.17 0,19 s/ç %0,07 A katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



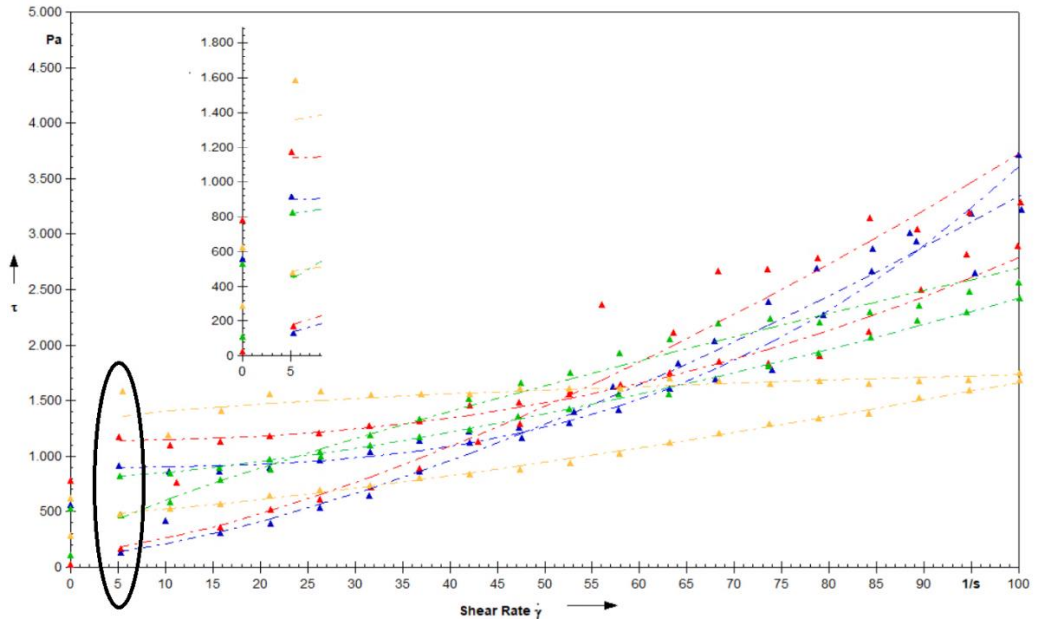
Şekil A.18 0,21 s/ç %0,04 A katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



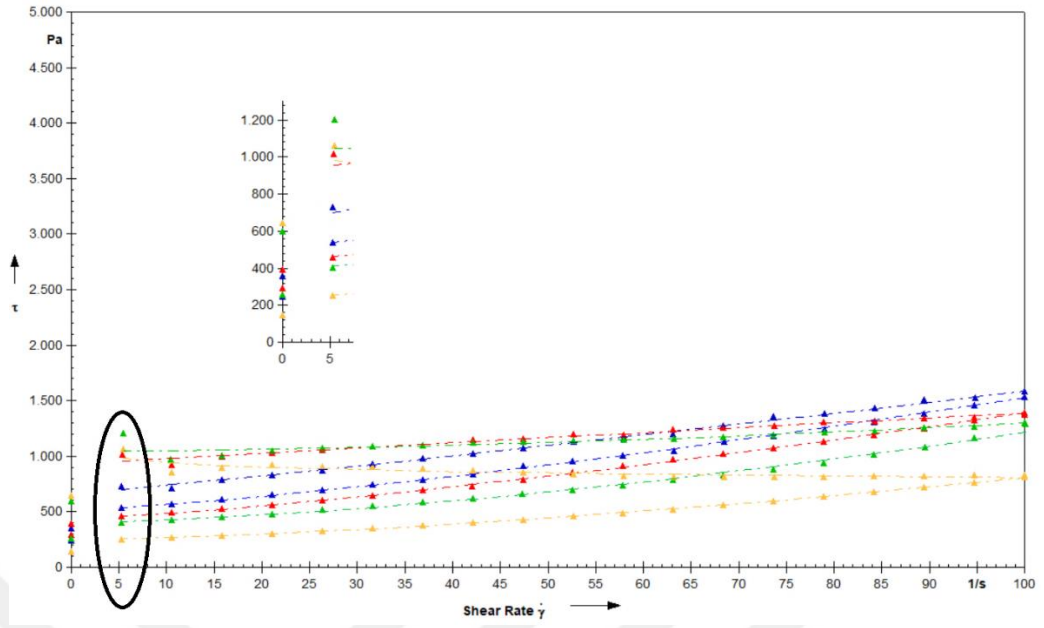
Şekil A.19 0,23 s/ç %0,03 A katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



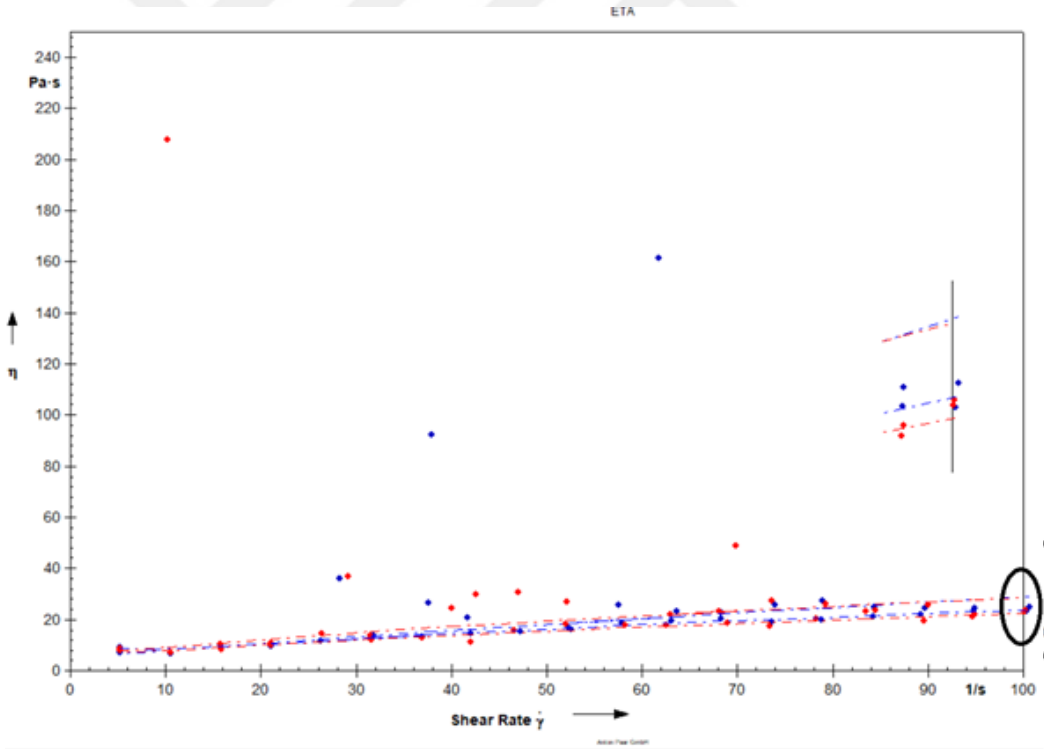
Şekil A.20 0,19 s/ç %0,1 B katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



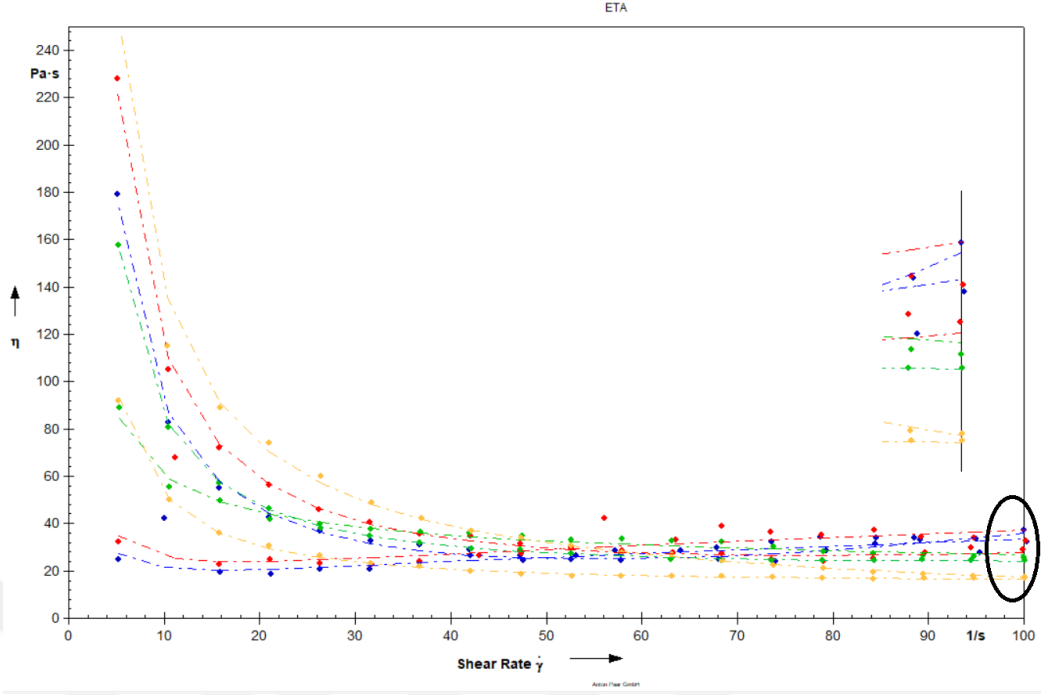
Şekil A.21 0,21 s/ç %0,06 B katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



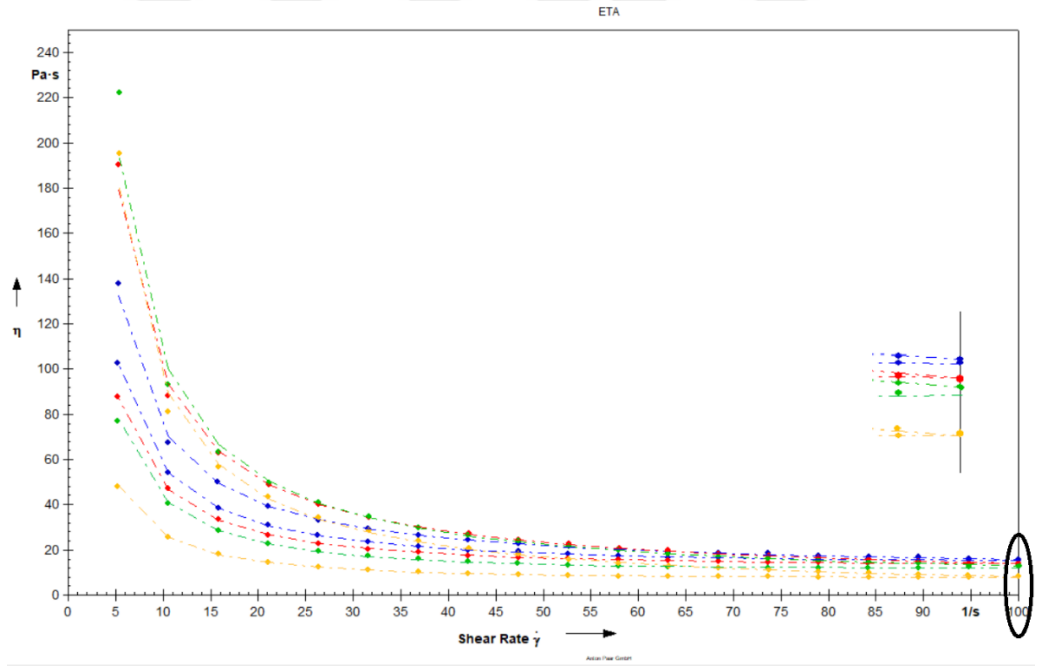
Şekil A.22 0,23 s/ç %0,03 B katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



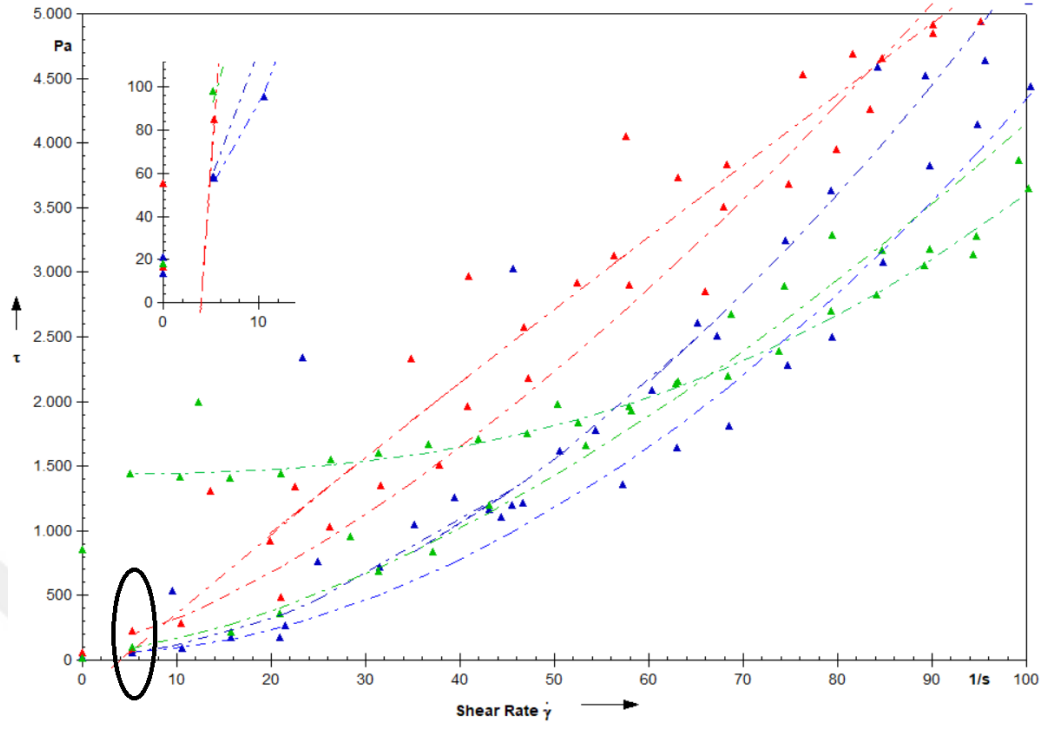
Şekil A.23 0,19 s/ç %0,1 B katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



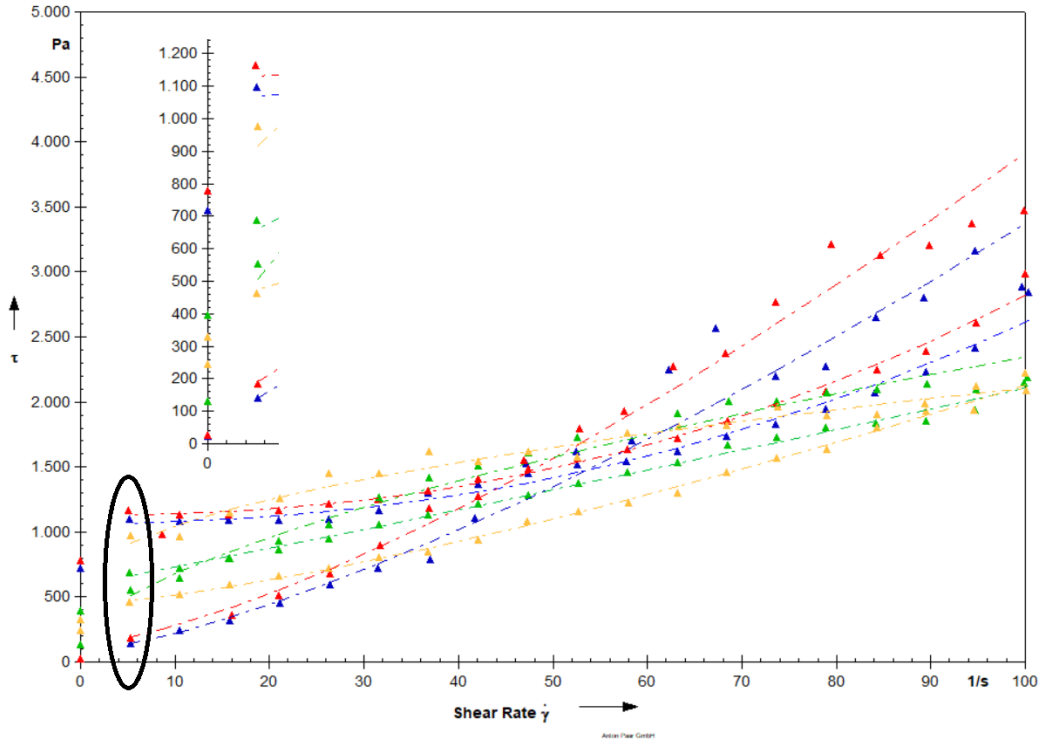
Şekil A.24 0,21 s/ç %0,06 B katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



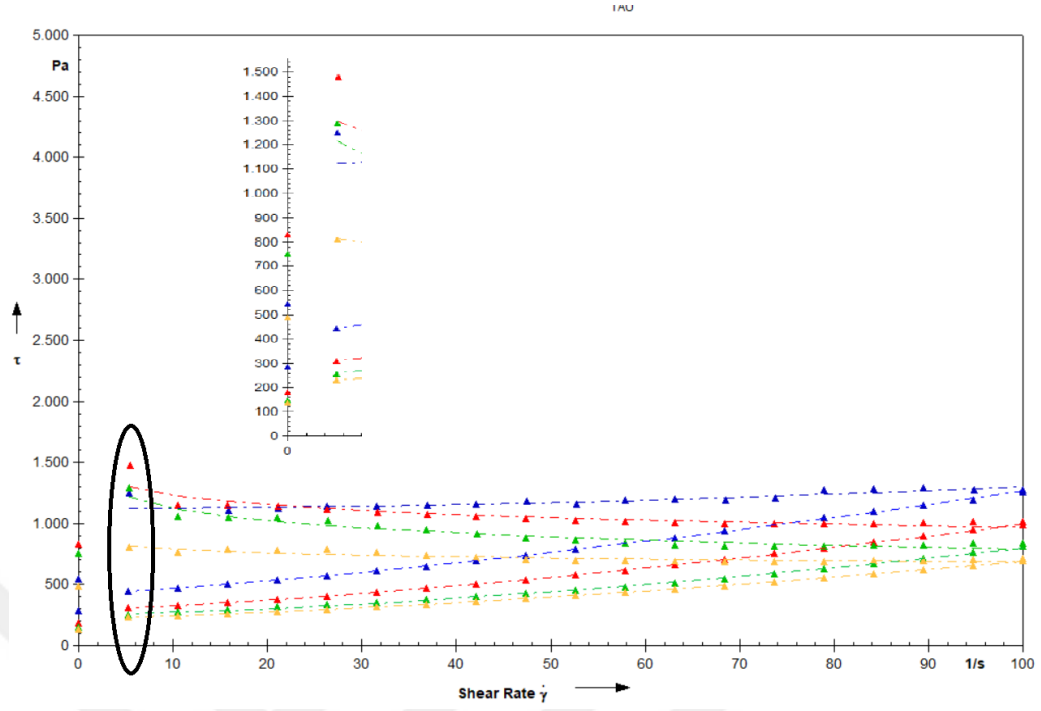
Şekil A.25 0,23 s/ç %0,03 B katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



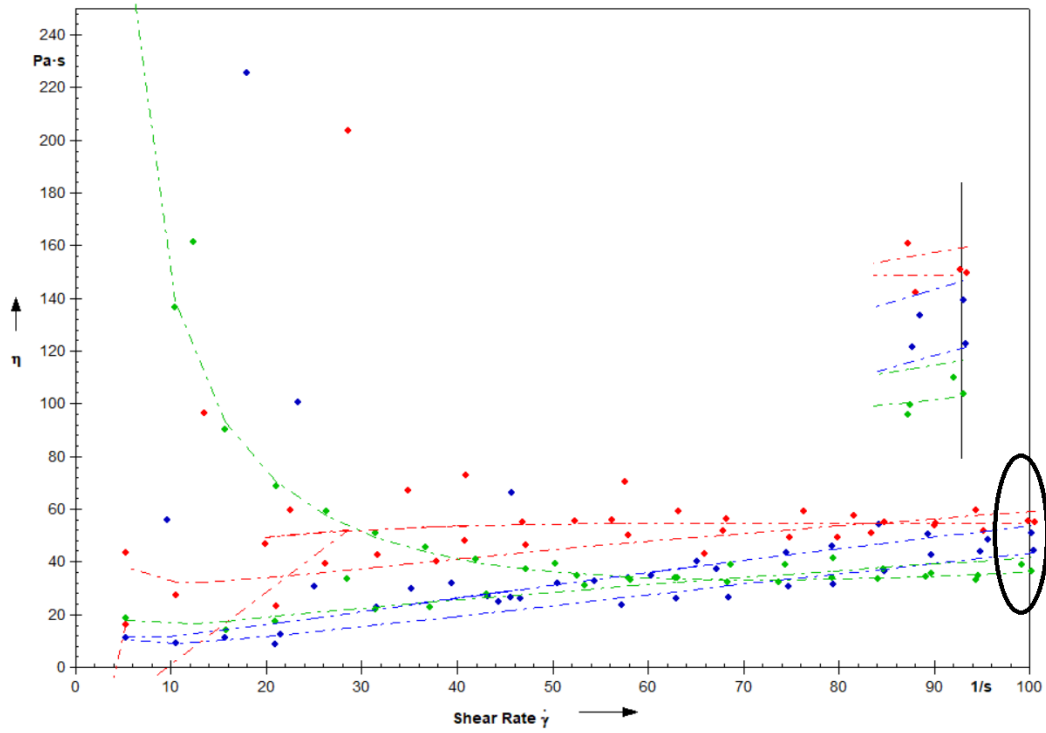
Şekil A.26 0,19 s/ç %0,1 C katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



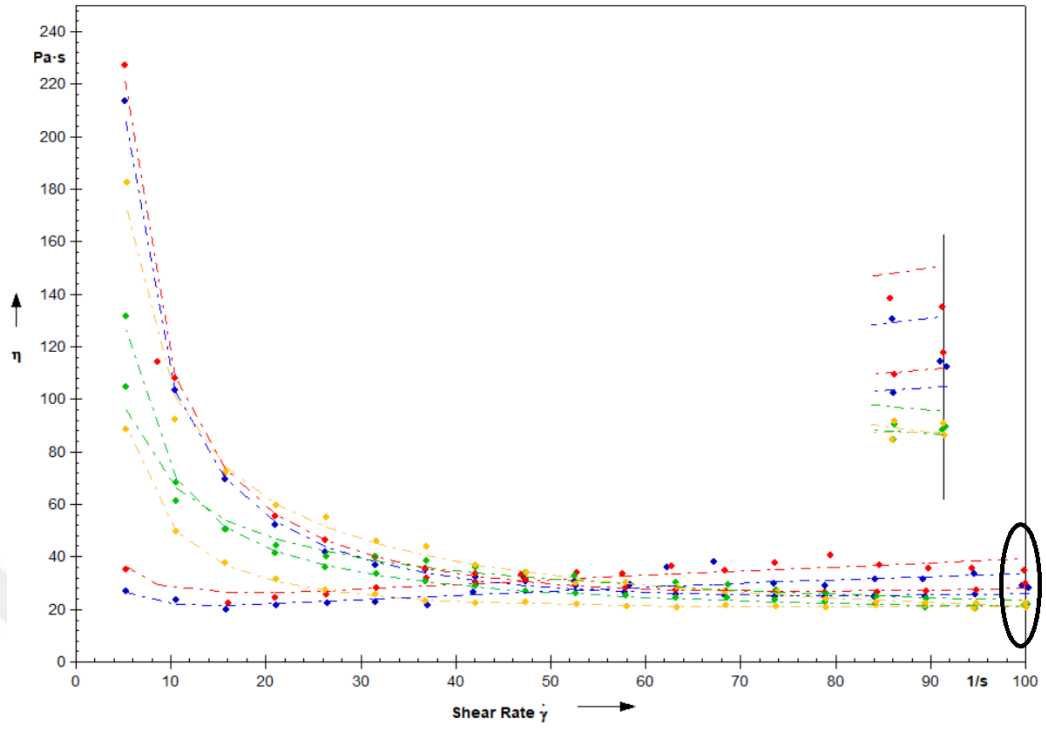
Şekil A.27 0,21 s/ç %0,06 C katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



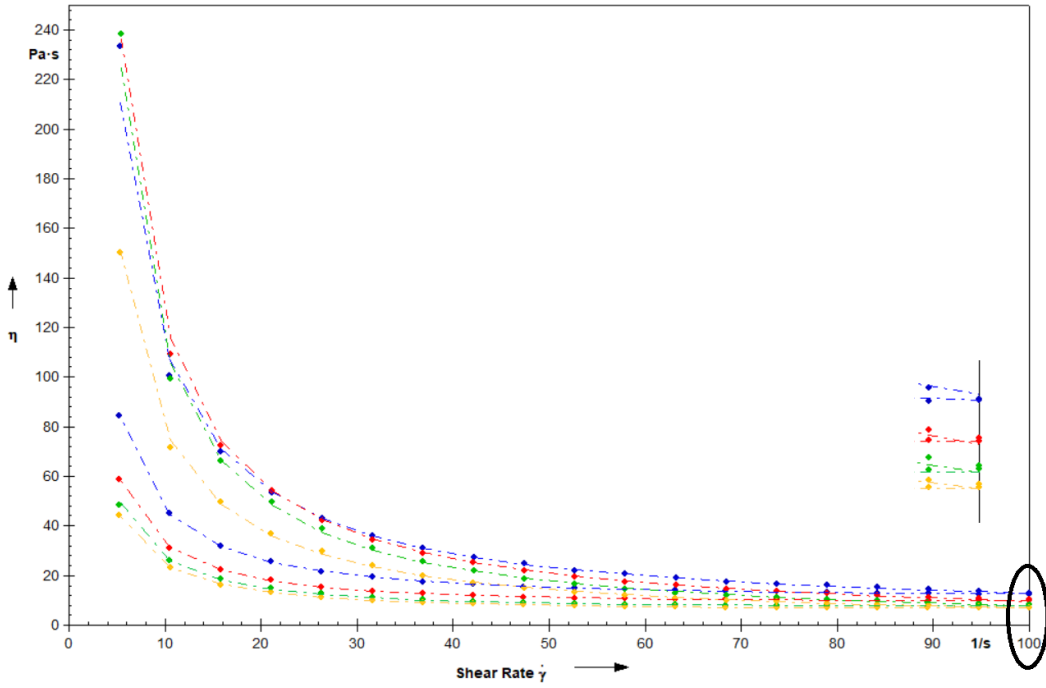
Şekil A.28 0,23 s/ç %0,03 C katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



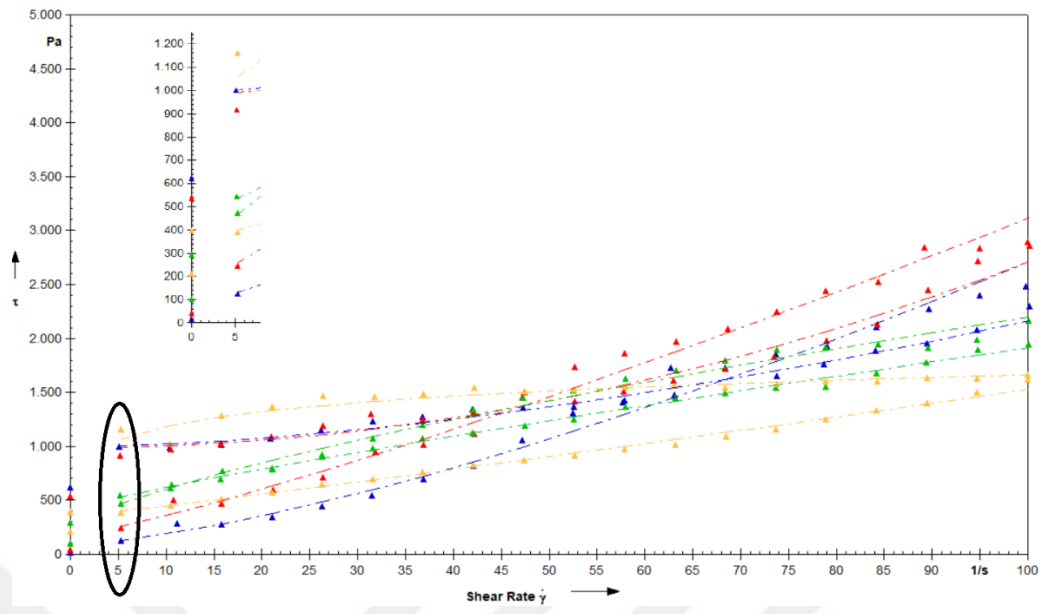
Şekil A.29 0,19 s/ç %0,1 C katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



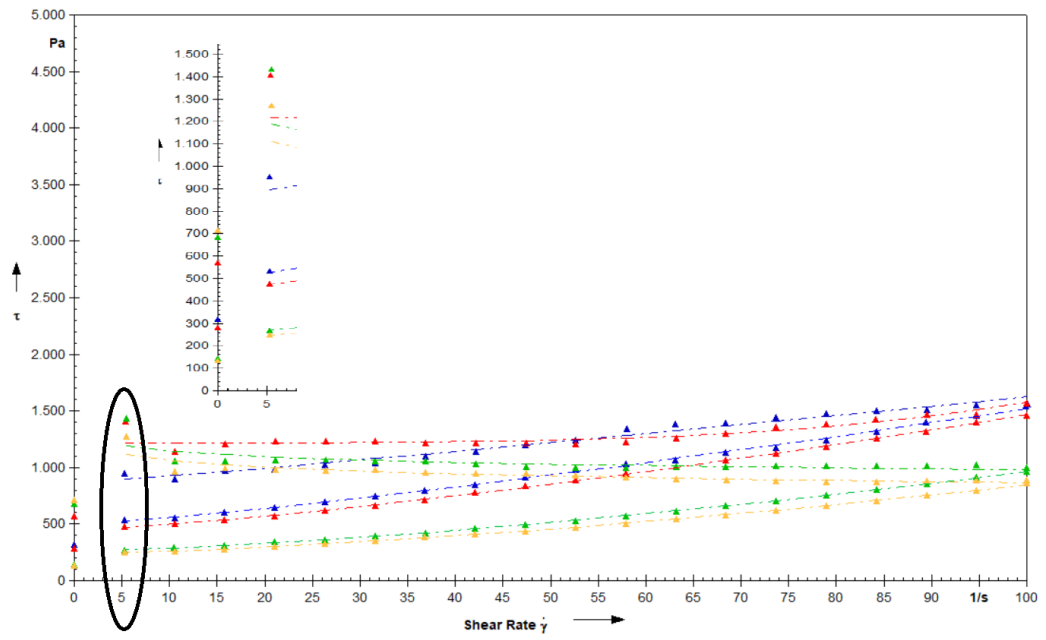
Şekil A.30 0,21 s/ç %0,06 C katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



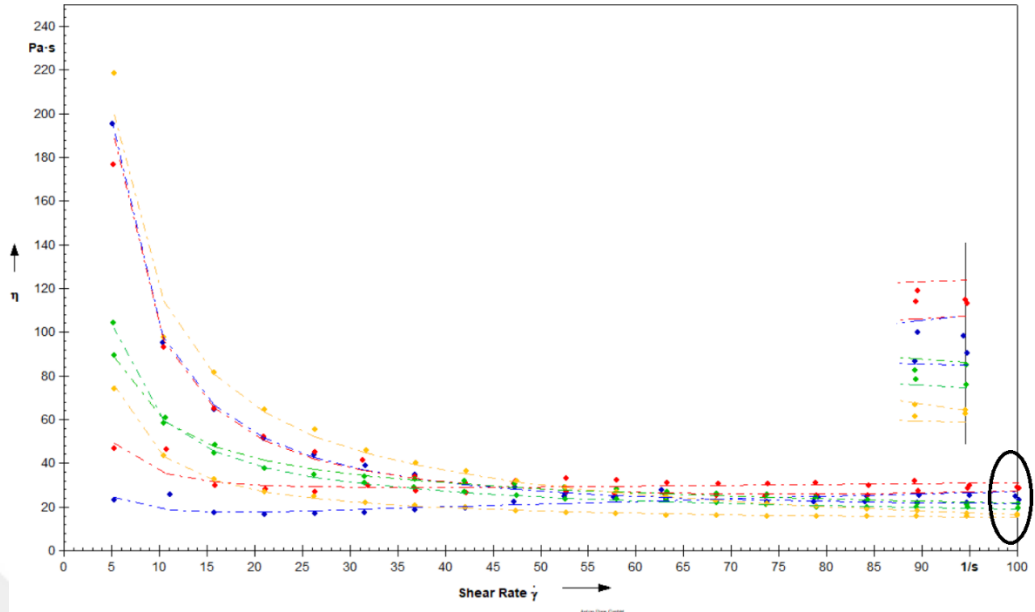
Şekil A.31 0,23 s/ç %0,03 C katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



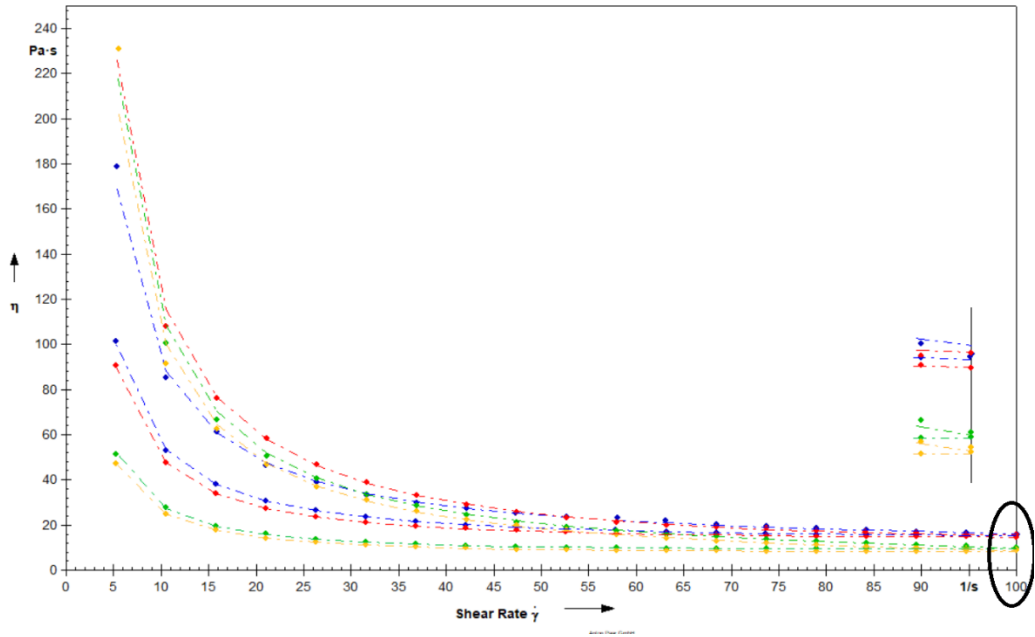
Şekil A.32 0,21 s/ç %0,07 D katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



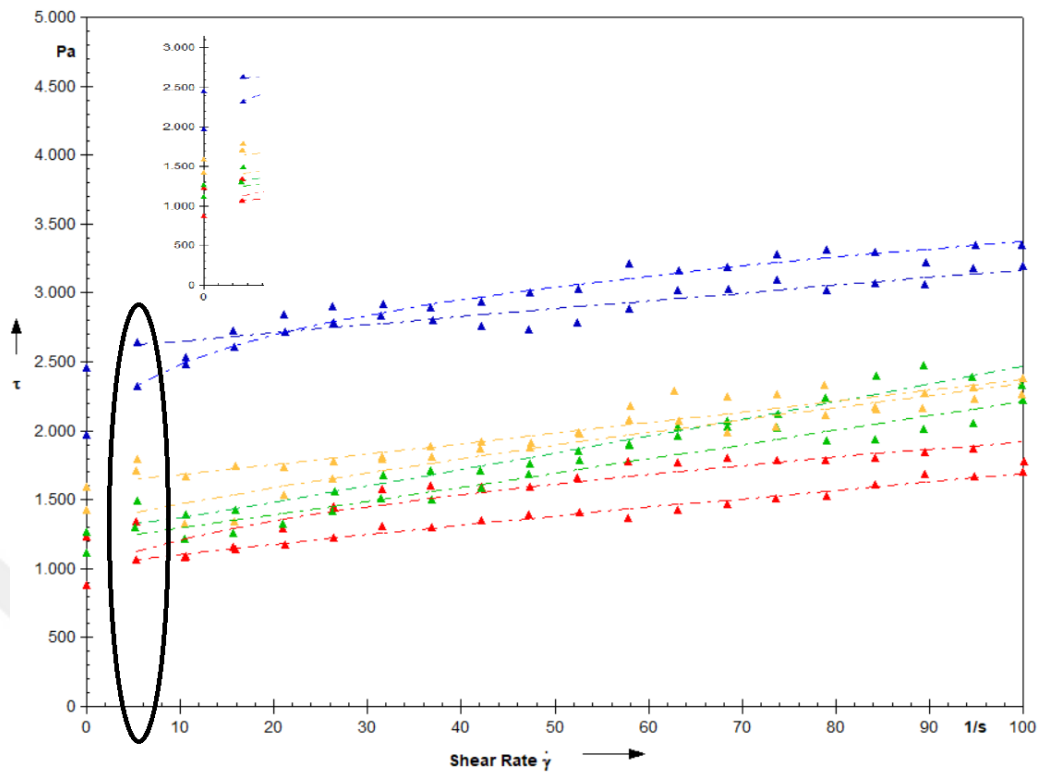
Şekil A.33 0,23 s/ç %0,04 D katkılı KAÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



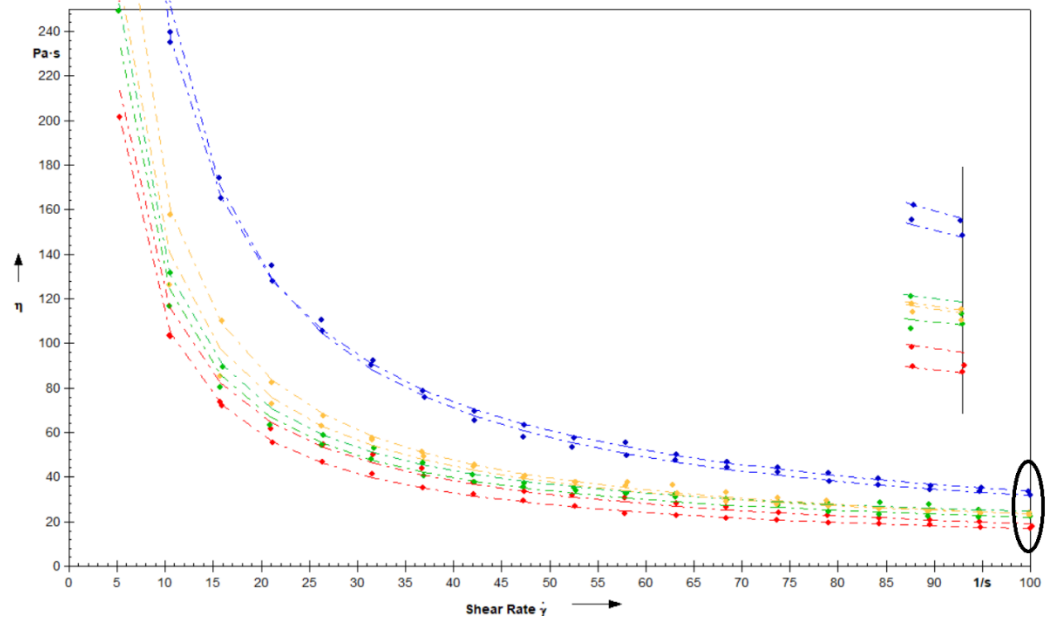
Şekil A.34 0,21 s/ç %0,07 D katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



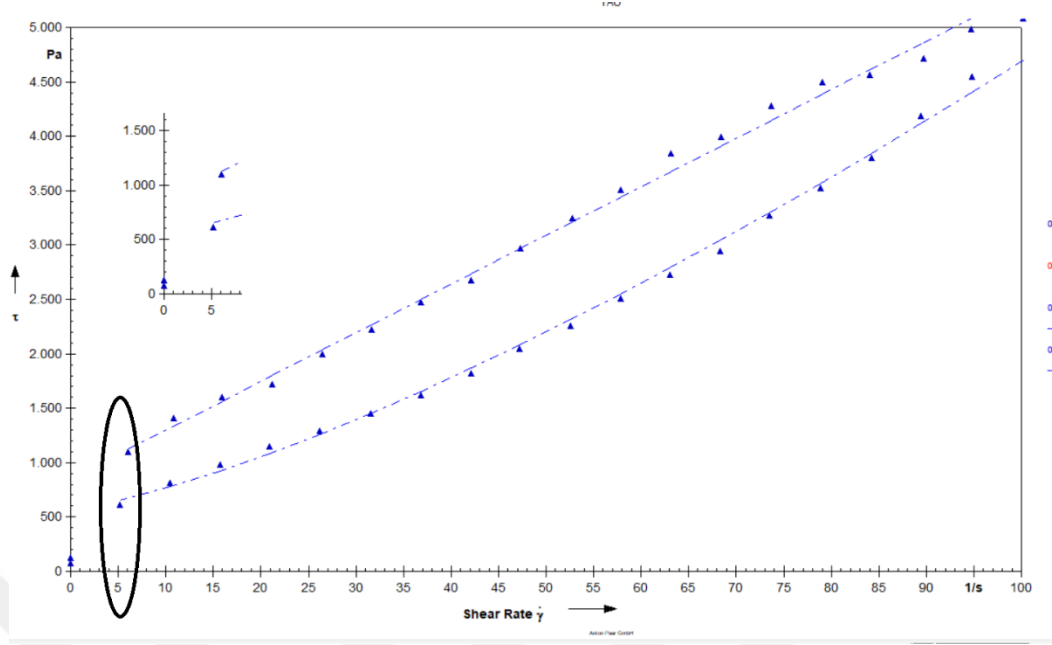
Şekil A.35 0,23 s/ç %0,03 D katkılı KAÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



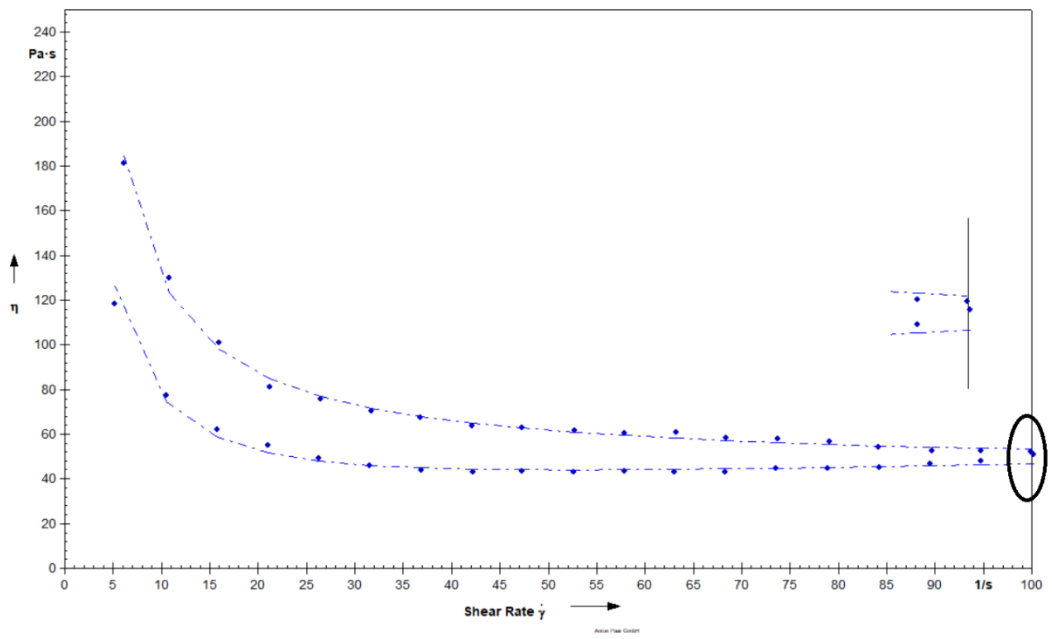
Şekil A.36 0,25 s/ç katkısız PÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



Şekil A.37 0,25 s/ç katkısız PÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği



Şekil A.38 0,23 s/ç %0,6 A katkılı PÇ hamuru kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği



Şekil A.39 0,23 s/ç %0,6 A katkılı PÇ hamuru viskozite-deformasyon hızı grafiği

EK 3: Katkılı ve Katkısız Karışımların Kayma Gerilmesi ve Viskozite Değerleri

Tablo A.1 Katkılı KAÇ karışımlarının kayma gerilmesi ve viskozite değerleri

S/Ç Oranı	A Katkısı	0 dk	30 dk	60 dk	90 dk
0,19	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	73	64,9	X	X
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	56,8	70,8	X	X
0,19	η (Pa.s)	36,9	29,3	X	X
0,21	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	138,4	158,1	442,7	987,4
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	893,8	956,7	575,3	363,8
0,21	η (Pa.s)	28,7	24,3	20,9	15,7
0,23	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	1123,2	1471,4	1551,7	1234,8
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	665,6	362,3	288,8	254,9
0,23	η (Pa.s)	19,7	12,4	9,4	8,6
	B Katkısı				
0,19	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	48	45,4	X	X
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	38,1	41,4	X	X
0,19	η (Pa.s)	23,9	23,3	X	X
0,21	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	131,6	170,5	469,7	1584,4
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	917,7	1173	826,3	480
0,21	η (Pa.s)	34,7	30,9	25	17,1
0,23	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	729,3	1014,5	1204,1	1062,6
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	537,9	460	403,7	252,9
0,23	η (Pa.s)	15,6	13,8	13	8,1
	C Katkısı				
0,19	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	58,1	85,2	98,2	X
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	58,5	227,6	1444,9	X
0,19	η (Pa.s)	47,5	55,3	37,7	X
0,21	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	141	184,6	553	975,4
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	1098,3	1163,8	687	464
0,21	η (Pa.s)	28,6	32,4	21,7	21,6
0,23	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	1247,5	1479	1288,5	807,1
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	443,2	308,9	254,3	231,7
0,23	η (Pa.s)	12,6	10,1	8,3	7,1
	D Katkısı				
0,19	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	X	X	X	X
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	X	X	X	X
0,19	η (Pa.s)	X	X	X	X
0,21	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	122,9	246,5	471,5	1160,9
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	1001	916,3	543,8	388,9
0,21	η (Pa.s)	24	28,7	20,6	16,4
0,23	$\tau_{\text{çıkış}}$ (Pa)	951,6	1405,6	1434,1	1272,9
	$\tau_{\text{iniş}}$ (Pa)	532,7	475,9	269,7	247,5
0,23	η (Pa.s)	15,5	15,2	9,8	8,8

Tablo A.2 Katkısız KAÇ-PÇ ve A katkılı PÇ karışımlarının kayma gerilmesi ve viskozite değerleri

S/Ç Oranı	Katkısız	0 dk	30 dk	60 dk	90 dk
0,19	τ ,çıkış (Pa)	X	X	X	X
	τ ,iniş (Pa)	X	X	X	X
0,19	η (Pa.s)	X	X	X	X
0,21	τ ,çıkış (Pa)	635,6	609,3	591,3	X
	τ ,iniş (Pa)	224,8	232,5	212,6	X
0,21	η (Pa.s)	6,2	6,8	6,5	X
0,23	τ ,çıkış (Pa)	781,4	766,4	761,9	547,8
	τ ,iniş (Pa)	230,8	260,4	247,1	212,9
0,23	η (Pa.s)	6,8	6,8	7	5,5
0,24	τ ,ort	437,9	622,3	696,5	417,7
0,24	η (Pa.s)	8,3	14,1	7,5	5,1
0,25	τ ,iniş (Pa)	974,5	993,6	858,7	534,6
	η (Pa.s)	392	303,3	299,3	234,2
0,25	η (Pa.s)	9	7,7	7	5,6
	Katkısız (PÇ)	0 dk	30 dk	60 dk	90 dk
0,25	τ ,çıkış (Pa)	2645,8	1338,4	1494,5	1795
	τ ,iniş (Pa)	2321	1066,5	1301,5	1715,3
0,25	η (Pa.s)	32,8	17,4	22,8	29,3
	A Katkısı (PÇ)	0 dk	30 dk	60 dk	90 dk
0,23	τ ,çıkış (Pa)	1102,7	X	X	X
	τ ,iniş (Pa)	615,9	X	X	X
0,23	η (Pa.s)	51,4	X	X	X