

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**PORTLAND ÇİMENTOSU VE
SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICI KATKI UYUMUNUN
İNCELENMESİ**

Ali MARDANI AGHABAGLOU

Tez Danışmanı : Prof Dr. Kambiz RAMYAR

İkinci Danışmanı: Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 24.02.2016

Bornova-İZMİR

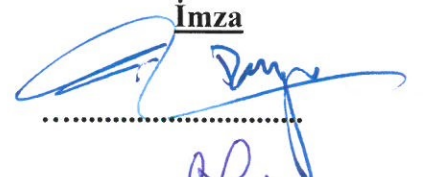
2016

Ali MARDANI AGHABAGLOU tarafından **Doktora tezi** olarak sunulan "Portland Çimentosu ve Süperakışkanlaştırıcı Katkı Uyumunun İncelenmesi" başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve **24.02.2016** tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

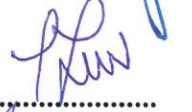
Jüri Başkanı

: Prof.Dr. Kambiz RAMYAR

İmza


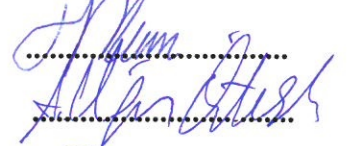
Raportör Üye

: Doç. Dr. Şemsi YAZICI




Üye

: Prof. Dr. Halit YAZICI



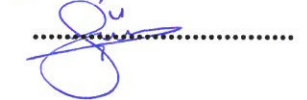
Üye

: Doç. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK



Üye

: Doç. Dr. Güzde İNAN SEZER



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca ~~Yüksek Lisans Tezi~~ / Doktora Tezi olarak sunduğum “**Portland Çimentosu ve Süperakışkanlaştırıcı Katkı Uyumunun İncelenmesi**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

24 / 02 / 2016

Ali MARDANI AGHABAGLOU

ÖZET**PORTLAND ÇİMENTOSU VE SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICI
UYUMUNUN İNCELENMESİ**

MARDANI AGHABAGLOU, Ali

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU
Şubat 2016, 290 sayfa

Bu tezde, farklı C_3A içeriğine sahip CEM I portland çimentoları ile süperakışkanlaştırıcı katkı uyumu incelenmiştir. Tez çalışması iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, çok değişkenli regresyon programı ile çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler belirlenmiştir. Bu amaçla 9 adet normal portland çimentosu ve 3 adet polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır. 226 hamur karışımının Marsh-hunisi akış süresi ve mini-yayılmaları ölçülmüştür. Ayrıca, farklı katkı dozajında ve farklı S/Ç oranına sahip 243 hamur karışımının da reolojik özellikleri belirlenmiştir. Sonuçlar istatistiksel program ile analiz edilmiştir. İstatistiksel incelemede, çimentonun inceliği, C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF ve eşdeğer alkali içeriği ile su azaltıcı katkı miktarı, katkı katı madde oranı ve karışımın su içeriği gibi parametreler dikkate alınmıştır. İstatistiksel analizler 4 aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, faktör analizi ile etken parametreler belirlenmiştir. İkinci aşamada, doğrusal olmayan regresyon ile üçüncü aşamada ise yapay sinir ağları yöntemi ile girdi çıktı ilişkisi kurulmuştur. Son aşamada duyarlılık analizi ile etken parametreler belirlenmiştir. Sonuçta, çimento kaynaklı etken faktörlerin, etki şiddeti sırasına göre çimentonun inceliği ile C_3A ve eşdeğer alkali içeriği olduğu saptanmıştır.

Tezin ikinci aşamasında birinci aşamada belirlenen çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler hamur, harç ve beton karışımlarında detaylı olarak incelenmiştir. Bu aşamada, istatistiksel çalışma sonunda belirlenen faktörlere ilaveten, çimentonun alçı türü ve su azaltıcı katkı yan zincir yoğunluğunun etkisi de incelenmiştir. Bu bağlamda, çimento hamurlarının, mini-yayılmaları, Marsh-hunisi akış süresi ve reolojik özellikleri, harç karışımlarının ise, katkı ihtiyacı,

zaman içerisinde yayılma kaybı, V-hunisi akış süresi, zamana bağlı akış kaybı, reolojik özellikleri ve basınç dayanımları incelenmiştir. Beton karışımlarında ise, hava içeriği, sertleşmiş ve taze birim hacim ağırlığı, çökme, yayılma, zamana bağlı çökme ve yayılma kaybı ile basınç dayanımı belirlenmiştir. Seçilen bazı hamur karışımlarında XRD analizleri yapılarak oluşan etrenjit ve monosülfoalüminat ürünleri hakkında daha detaylı bilgi elde edilmiştir.

Su azaltıcı katkı içermeyen karışımlarda, çimento inceliğinin artışı ile karışımların taze hal ve reolojik özellikleri olumsuz etkilenmiştir. Ancak, süperakışkanlaştırıcı katkılı karışımlarda bu durumun tersi görülmüştür. Bu olumlu etki, çimento inceliğinin artışıyla birlikte, çimento taneleri üzerinde süperakışkanlaştırıcı katkının emiliminin artması, dolayısıyla, süperakışkanlaştırıcı katkının etkinliğinin artmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, çimento inceliğinin artışıyla erken yaş dayanım değerleri artmıştır. İleri yaşlarda ise çimento inceliğinin artışı ile basınç dayanımları aralarındaki farklar azalmıştır. Çimento alkali ve C₃A oranının azalmasıyla çimentolu sistemlerin taze hal özeliği iyileşmiştir. Dehidrat alçı içeren çimento hemihidrat içeren çimentoya kıyasla, taze ve reolojik özellikleri açısından hamur, harç ve beton karışımlarında kullanılan polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı ile daha uyumlu olmuştur. Kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının çökme yayılması koruma potansiyeli katkı yan zinciri yoğunluğunun artmasıyla azalmıştır. Bu olayın, yan zincirlerin birbirine kenetlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler: çimento-süperakışkanlaştırıcı katkı uyumu, reolojik özellikler, incelik, C₃A içeriği, eşdeğer alkali içeriği

ABSTRACT**INVESTIGATION OF CEMENT-SUPERPLASTICIZER
ADMIXTURE COMPATIBILITY**

MARDANI AGHABAGLOU, Ali

Ph .D in Civil Engineering.

Supervisor: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Second Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak FELEKOĞLOU

February 2016, 290 pages

In this thesis, the compatibility between superplasticizers and cements containing different amounts of C_3A was investigated. The study was conducted in two steps. In the first step, the parameters affecting cement-admixture compatibility was obtained by using a multivariate regression program. For this purpose, 9 different CEM I portland cements and 3 polycarboxylate-ether based superplasticizer admixtures were used. Marsh-funnel flow time and mini-slump values of 226 cement paste mixtures were measured. In addition, the rheological properties of 243 paste mixtures having different W/C ratios and containing different amounts of admixture were determined. The results were analyzed statistically. In this analysis, cement fineness, C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF and equivalent alkali content of cement as well as admixture utilization level, admixture solid material ratio and amount of mixing water were considered. The statistical analysis was carried out in four steps. In the first step, the effective parameters were determined by factor analysis. The input-output relations were established by nonlinear regression and artificial neural networks methods in the second and third steps, respectively. In the last step, effective parameters were defined with sensitivity analysis. The cement-based factors that affect compatibility were determined as fineness, C_3A and equivalent alkali content in order of decreasing severity.

In the second step of the thesis, the effects of aforementioned parameters on the paste, mortar and concrete mixture characteristics were investigated in a more detailed manner. Moreover, the effect of cement-gypsum type and the admixture side chain density on the properties of cementitious systems were investigated. In this regard, the flow time, mini slump values, rheological parameters of the cement paste as well as admixture requirement, flow value, loss of flow, V-funnel

flow time, loss of V-funnel flow time, rheological properties and compressive strength of the mortar mixtures were investigated. In the concrete mixtures, fresh and hardened unit weight, air content, slump, loss of slump, slump flow, compressive strength tests were performed. Besides, XRD analysis was carried out on some paste mixtures to obtain more information about the formation of calcium alumino sulfate hydrates.

The fresh and rheological properties of the control cementitious systems containing no water reducing admixture were negatively affected by increasing cement fineness. The opposite effect was noted in the mixtures containing superplasticizer. Increasing the fineness of cement increased the superplasticizer adsorption level on cement particles, hence, increased the efficiency of the superplasticizer. In addition, increasing cement fineness led to an increase in the compressive strength of the mixtures at early ages. At later ages, the difference between the strength of the mixtures arisen from cement fineness reduced. The fresh and rheological properties of the cementitious systems were improved by decreasing C_3A and equivalent alkali content of the cement. Compared to the hemihydrate-bearing cement, the cement containing dihydrate gypsum was more compatible with the polycarboxylate-ether based water reducing admixture in terms of fresh state and rheological properties of the paste, mortar and concrete mixtures. The slump retention of self consolidating concrete mixtures decreased with increasing side chain density of the superplasticizer admixture. The fact was attributed to the interlocking of the side chains of the admixture.

Keywords: cement-superplasticizer compatibility, rheological properties, fineness, C_3A content, equivalent alkali ratio

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini bana aktaran ve tez konumun belirlenmesi, yürütülmesi, tezin yazımı esnasında çalışmalarımı ilgi ile izleyip yön veren, değerli fikir ve katkılarıyla çalışmalarına ışık tutan, bana her türlü desteği sağlayan, akademik hayatımı ona borçlu olduğum danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusunun ve ayrıntılarının belirlenmesinde, sonuçların yorumlanmasında ve tez yazımında büyük desteği olan ikinci tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU'na,

İstatistiksel analizler aşamasında hem analiz işlemini hemde analizlerden elde edilen sonuçların yorumlamasını beraber gerçekleştirdiğimiz Sayın hocam Doç. Dr. Alper SEZER'e

İzleme toplantılarında tezimin daha doğru ilerlemesi yönünde fikir ve önerilerini benden esirgemeyen Sayın hocalarım Prof. Dr. Halit YAZICI ve Doç. Dr. Şemsi YAZICI'ya

Doktora ders aşaması esnasında eğitimime katkı sağlayacak bilgilerini ve tecrübelerini bana aktardıkları için değerli hocalarım, Sayın Doç. Dr. Gözde İNAN SEZER, Doç. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU, Doç. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR ve Doç. Dr. Ninel ALVER'e

Tez çalışması boyunca laboratuvar işlemlerini beraber gerçekleştirdiğimiz arkadaşlarım İnş. Müh. Hojjat HOSSEİNNEZHAD, İnş. Müh. Onur Can BOYACI ve İnş. Müh. Arif Emre SON'a

Çalışma kapsamında kullanılan çimentoların temininde sağladıkları kolaylıklardan dolayı Prof. Dr. İsmail ÖZGÜR YAMAN, başta kalite kontrol şefi Sn. Selim TOPBAŞ olmak üzere BOLU ÇİMENTO'ya, başta Sn. Nilüfer AZRAK KARAKAŞ olmak üzere ÇİMENTAŞ'a ve uçucu kül ile çimentonun

fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde yardımcı olan başta Çimentoaş İzmir Çimento Fabrikası Türk A.Ş'ye,

Kimyasal katkı temininde, başta arkadaşım Gökhan YILMAZ olmak üzere DRACO YAPI KİMYASALLARI'na Uğur Emre ADLAN olmak üzere İNKA YAPI KİMYASALLARI'na ve BASF YAPI KİMYASALLARI'na

Labaratuvar imkanlarından faydalandığım Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'na

Doktora tezi boyunca, İz Bırakanlar Bursu kapsamında aldığım burs için TÇMB'ye ve son olarak;

Sadece tez çalışmamda değil, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili eşim Farnaz GOLGHASEMI ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxxv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çimento ve Türleri.....	1
1.2. Çimento Tiplerine Göre Kullanım Alanları.....	6
1.3. Kimyasal Katkı ve Katkı Türleri	6
1.3.1. Süperakışkanlaştırıcının adsorpsiyonu ve çimento-çözelti ara yüzeyindeki itme	10
1.3.2. Su azaltıcı katkının etki mekanizması	12
1.3.2.1. Elektrostatik etki.....	12
1.3.2.2. Sterik etki.....	13
1.3.3. Polikarboksilat ve naftalin sülfonat esaslı katkıların üretim prosesi	14
1.3.3.1. Esterifikasyon	14

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
1.3.3.2. Radikal polimer reaksiyonları	15
1.4. Çimento-Katkı Uyumu ve Etki Eden Faktörler	16
1.4.1. Çimento C ₃ A oranı etkisi	17
1.4.2. Çimento alkali oranı etkisi	18
1.4.3. Çimento inceliği etkisi	18
1.4.4. Çimentoda bulunan kalsiyum sülfat türünün etkisi.....	19
1.4.5. Su azaltıcı katkı özelliklerinin etkisi	20
1.4.6. Çimento-katkı uyumunun sağladığı avantajlar	21
1.5. Çimento Hamuru ve Harçların Taze Hal Özellikleri	22
1.5.1. Çimento hamurunun yapısı	22
1.5.2. Çimentolu sistemlerin işlenebilirliği ve kıvamı	23
1.5.3. Çimento hamurunun hidrasyonu ve katılaşması	25
1.5.4. Hamur ve harçların reolojik özellikleri	25
1.5.4.1. Reolojik özelliklerin ölçümü	29
1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı	35
2. KONUS İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	37
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	79

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1. Amaç, Konu ve Kapsam.....	79
3.2. Malzemeler	80
3.2.1. Çimento.....	80
3.2.1.1. Çalışmanın birinci aşamasında kullanılan çimentolar	80
3.2.1.2. Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan çimentolar	82
3.2.2. Agrega.....	87
3.2.3. Su azaltıcı katkı.....	90
3.2.4. Su	91
3.3. Karışımların Hazırlanması.....	91
3.3.1. Çimento hamuru karışımlarının hazırlanması	91
3.3.2. Harç karışımlarının hazırlanması.....	93
3.3.3. Beton karışımlarının hazırlanması.....	93
3.4. Çalışma Kapsamında Uygulanan Deneyler	94
3.4.1. Hamur karışımları deneyleri.....	94
3.4.2. Harç karışımları deneyleri	98
3.4.3. Beton karışımları deneyleri.....	99
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	101

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1. Çimento-Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi.....	101
4.1.1. Dayanım sonuçları	101
4.1.2. Marsh-hunisi akış süresi ve mini-yayıma sonuçları.....	103
4.1.3. Hamur karışımlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi.....	117
4.1.3.1. Hamur karışımlarının dinamik EKG ve nihai viskozitesi.....	117
4.1.3.2. Hamur karışımlarının statik EKG değerleri	129
4.1.4. Eşik kayma gerilmesi ve nihai viskoziteyi etkileyen faktörlerin matematiksel yöntemlerle araştırılması.....	133
4.1.4.1. İstatistiksel parametrelerin araştırılması	133
4.1.4.2. Bağımlı parametreler ile eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite arasındaki ilişkilerin doğrusal/doğrusal olmayan regresyon ile araştırılması	135
4.1.4.3. Yapay sinir ağları ile elde edilen çözüm.....	147
4.1.4.4. Eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerlerini etkileyen baskın parametrelerin elde edilmesi-YSA ile duyarlılık analizleri çözüm.....	158
4.2. Çimento-Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörlerin Detaylı İncelenmesi	163
4.2.1. Çimento inceliğinin çimento-katkı uyumuna etkisi	163
4.2.1.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi.....	164
4.2.2. C ₃ A içeriğinin çimento-katkı uyumuna etkisi.....	193

İÇİNDEKİLERSayfa

4.2.2.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	193
4.2.3. Çimento eşdeğer alkali miktarının çimento-katkı uyumuna etkisi	217
4.2.3.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	217
4.2.4. Çimentoda bulunan alçı türünün çimento-katkı uyumuna etkisi	231
4.2.4.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	231
4.2.5. Polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı yan zincir yoğunluğunun çimento-katkı uyumuna etkisi	248
4.2.5.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	249
4.3. Bu çalışmada elde edilen reolojik verilerinin diğer araştırmacılar tarafından elde edilen reolojik verileri ile kıyaslanması	259
5. SONUÇLAR	261
6. ÖNERİLER	269
KAYNAKLAR DİZİNİ	270
ÖZGEÇMİŞ	290

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Farklı akışkanlaştırıcı türleri (Ramachandran et al., 1998)	9
1.2. Elektrostatik itme (Ramachandran, 1998)	12
1.3. Taze çimento hamuru akışı-parçacıklar arası kuvvet ve zeta potansiyeli arasındaki ilişki (Uchikawa et al., 1997)	12
1.4. Su azaltıcı katkıların çimento taneleri dağıtma etkisi (Mindess et al., 2003)	13
1.5. PC-tipi Katkıların sterik etkisi (Collepari, 2005)	13
1.6. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcılara ait tipik moleküler yapı çeşitleri (Gay and Raphaël, 2001; Collepari, 2005).....	14
1.7. Karboksilat esterifikasyon reaksiyonu.....	15
1.8. Polimerin kimyasal yapısı.....	15
1.9. Çimento hamurundaki boşluklar (Mehta and Monteiro, 2010).....	23
1.10. Farklı akış davranışları (Griesser, 2002)	27
1.11. BTRHEOM reometrenin prensibi	29
1.12. BTRHEOM reometresinin üstündeki ve altındaki bıçakları.....	30
1.13. İBB reometresi.....	31
1.14. İBB reometresinin kap ve palet detayları	31
1.15. İki-noktalı reometrenin genel görünümü	32

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.16. İki-noktalı reometrenin kap ve palet özelliği (mm cinsinden).....	32
1.17. BML reometresi	33
1.18. BML reometresinin iç silindiri.....	34
2.1. Hidratasyon öncesi iti kuvvetler (Aydın vd., 2009).....	60
3.1. Normal beton üretiminde kullanılan agreganın gradasyonu ve TS EN 206 standardı sınırları	89
3.2. KYB üretiminde kullanılan agreganın gradasyonu ve TS EN 206 standardı sınırları	89
3.3. Çalışmada kullanılan reometre.....	96
3.4. Hamur karışımların reolojik parametrelerinin incelenmesinde uygulanan periyotlar.....	97
4.1. Ç-1 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi	104
4.2. Ç-2 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi	104
4.3. Ç-3 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi	105
4.4. Ç-4 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi	105

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.5. Ç-5 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi.....	106
4.6. Ç-6 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi.....	106
4.7. Ç-7 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi.....	107
4.8. Ç-8 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi.....	107
4.9. Ç-9 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi.....	108
4.10. Değişik dozajda SP-1 su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç-1 çimentosu hamur karışımlarının kayma gerilmesi-deformasyon hızı ilişkisi	118
4.11. Değişik dozajda SP-1 su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç-1 çimentosu hamur karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi	119
4.12. Normal ve modifiye edilmiş yönteme göre hazırlanan katkı içermeyen Ç-3 karışımına ait reometreden elde edilen veriler	126
4.13. 1/Marsh-hunisi akış süresi ve ortalama PV değeri arasındaki ilişki.....	129
4.14. Çimento hamuru karışımlarına ait dinamik-statik EKG değerleri arasındaki ilişki.....	132
4.15. EKG değerleri için korelasyon katsayılarını içeren çapraz matris	136

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.16. Nihai viskozite değerleri için korelasyon katsayılarını içeren çapraz matris	137
4.17. Bağımlı değişkenlerle EKG değerleri arasındaki ilişki.....	140
4.18. Bağımlı değişkenlerle nihai viskozite değerleri arasındaki ilişki.	141
4.19. EKG için Model 1’deki kalıntı değerleri	144
4.20. Nihai viskozite değerleri için Model 1’deki kalıntı değerleri	146
4.21. Nihai viskozite değeri için Model 4’teki kalıntı değerleri	147
4.22. Yapay nöron modeli.....	148
4.23. EKG'nin elde edilmesi için oluşturulan örnek sinir ağı mimarisi.....	150
4.24. EKG değeri tahmini için kurulan $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme aşamalarında elde edilen ortalama karesel hata değerleri.....	151
4.25. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında elde edilen hataların histogramı (EKG)	152
4.26. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde gerçek değerler ile YSA çıktıları arasındaki saçılım grafikleri (EKG).....	153
4.27. Nihai viskozite'nin elde edilmesi için oluşturulan örnek sinir ağı mimarisi	155
4.28. Nihai viskozite tahmini için kurulan $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme aşamalarında elde edilen ortalama karesel hata değerleri.....	156

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.29. 9×10×1 sinir ağında elde edilen hataların histogramı (Nihai viskozite parametresi)	156
4.30. 9×10×1 sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde gerçek değerler ile YSA çıktıları arasındaki saçılım grafikleri (Nihai viskozite)	157
4.31. EKG parametresinin tahmini için oluşturulan YSA'da girdi uzayında devre dışı bırakılan parametreler	160
4.32. Nihai viskozite parametresinin tahmini için oluşturulan YSA'da girdi uzayında devre dışı bırakılan parametreler.....	162
4.33. NÇ içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri	166
4.34. SDC içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri.....	167
4.35. Katkı içermeyen NÇ karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı.....	169
4.36. Katkı içermeyen SDC karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı.....	170
4.37. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren NÇ hamurlarının mini-yayılması (mm).....	172
4.38. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren SDC hamurlarının mini-yayılması (mm).....	172
4.39. 4230 cm ² /g inceliğinde SDC içeren hamur karışımının reolojik özellikleri (dinamik EKG ve viskozite).....	174
4.40. 4230 cm ² /g inceliğinde SDC içeren hamur karışımının reolojik özellikleri (statik EKG).....	174

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.41. NÇ içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm).....	178
4.42. SDC içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm).....	179
4.43. Süperakışkanlaştırıcı içeren NÇ harçlarının yayılması (mm).....	181
4.44. Süperakışkanlaştırıcı içeren SDC harçlarının yayılması (mm).....	181
4.45. NÇ içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm).....	183
4.46. SDC içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm).....	183
4.47. Harç karışımlarının basınç dayanımı	190
4.48. Beton karışımlarının basınç dayanımı.....	192
4.49. Hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi	194
4.50. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç _{5.85} hamur karışımlarının kayma gerilmesi-deformasyon hızı ilişkisi	196
4.51. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç _{5.85} hamur karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi.....	196
4.52. Çimento hamuru karışımlarına ait dinamik-statik EKG değerleri arasındaki ilişki	200
4.53. Harç karışımlarının yayılma-katkı kullanım oranı ilişkisi	201
4.54. Harç karışımlarının yayılma-zaman ilişkisi ve bağıl yayılması.....	202

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.55. Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akış süresi değişimi	203
4.56. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.5 S/Ç oranına sahip Ç _{5.85} çimentolu harç karışımlarının kayma gerilmesi ve nihai viskozitesi...205	
4.57. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.5 S/Ç oranına sahip Ç _{5.85} çimentolu harç karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi.....205	
4.58. Hamur karışımlarının dinamik EKG-mini yayılma değeri ilişkisi ve harç karışımlarının dinamik EKG-yayılma değeri ilişkisi.....207	
4.59. Beton karışımlarının zaman bağlı a: çökme kaybı, b: yayılma kaybı...209	
4.60. Çimento hamurlarının XRD paterni	212
4.61. Harç karışımlarının basınç dayanımı ve Ç _{5.85} karışımına göre bağlı dayanımı	214
4.62. Beton karışımlarının basınç dayanımı ve Ç _{5.85} karışımına göre bağlı dayanımı	215
4.63. Harç ve beton karışımlarının 1-günlük basınç dayanımları 60 dakikalık yayılma ve çökme kaybı ilişkileri.....216	
4.64. Hamur karışımların başlangıç ve bitiş priz süreleri.....220	
4.65. Hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi.....222	
4.66. Hamur karışımlarının mini-yayılma ve Marsh-hunisi akış süresi ilişkisi	223
4.67. Harç karışımlarının yayılma-katkı kullanım oranı ilişkisi.....224	

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.68.	Harç karışımlarının yayılma-zaman değişimi ve bağlı yayılması.....225
4.69.	Harç karışımlarının 60 dakika sonundaki bağlı yayılma kaybı (%). ...225
4.70.	Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akış süreleri..... 226
4.71.	Harç karışımlarının ilk 15 dakika boyunca yayılma-V hunisi akış süresi ilişkisi..... 227
4.72.	Harç karışımlarının basınç dayanımı sonuçları..... 229
4.73.	Harç karışımlarının 60 dakika sonundaki yayılma kaybı ve 1-günlük basınç dayanımı ilişkisi..... 230
4.74.	HG ve DG hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi..... 232
4.75.	0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren hamur karışımlarının kayma gerilmesi- viskozite ilişkisi 234
4.76.	0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren hamur karışımlarının kayma gerilmesi- zaman ilişkisi 234
4.77.	Harç karışımlarının yayılma-katkı kullanım oranı ilişkisi 236
4.78.	Harç karışımlarının a: yayılma-zaman; b: sıcaklık-zaman ilişkisi.....237
4.79.	Çimento hamurlarının farklı yaşlardaki XRD analizi 240
4.80.	Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akış süresi 241
4.81.	0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren harç karışımlarının kayma gerilmesi- viskozite ilişkisi 243

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.82. 0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren harç karışımlarının kayma gerilmesi- zaman ilişkisi.....	243
4.83. Harç karışımlarının a) Basınç dayanımı b): Bağlı basınç dayanımı....	247
4.84. Beton karışımlarının basınç dayanımı sonuçları.....	248
4.85. KYB karışımlarının kayma gerilmesi-deformasyon hızı eğrileri: (a) A karışımı, (b) B karışımı, (c) C karışımı, (d) D karışımı.....	253
4.86. KYB karışımlarında plastik viskozite ve V-hunisi akış süresi değerleri arasındaki ilişki.....	254
4.87. KYB karışımlarının zamana bağlı çökme-yayılma değişimi.....	255
4.88. KYB karışımlarının basınç dayanımı sonuçları.....	256
4.89. KYB karışımlarının ultrases geçiş hızı.....	257
4.90. KYB ve geleneksel beton karışımlarının ultrases geçiş hızı-basınç dayanımı ilişkisi.....	258

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Çimentoyu oluşturan temel oksitler.....	2
1.2. Çimento anabileşenleri.	2
1.3. TS- EN 197-1 standardı kapsamındaki çimento tipleri.	4
1.4. ASTM C 150 standardına göre portland çimento türleri ve kullanım alanları	5
1.5. Çimento ana bileşenlerinin göreceli özellikleri.	6
1.6. Aynı dayanıma sahip katkısız ve katkılı beton maliyetleri.....	22
2.1. Farklı formladaki sülfatların çözünebilirliği (Kim, 2000).....	52
3.1. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.	81
3.2. Klinkerlerin kimyasal özellikleri.	81
3.3. Çimento üretiminde klinkere eklenen alçıtaşının kimyasal özellikleri.....	82
3.4. Klinker ve çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.	83
3.5. Çimento üretiminde kullanılan alçıtaşının kimyasal özellikleri.	83
3.6. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.	84
3.7. Klinkerlerin ve alçıtaşının kimyasal özellikleri.....	84
3.8. Çimentoların kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri	85
3.9. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	86

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.10. Klinkerlerin ve alçıtaşının kimyasal özellikleri	86
3.11. Öğütülmüş çimentoların fiziksel özellikleri.....	87
3.12. Çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	87
3.13. CEN referans kumu tane boyu dağılımı limitleri.....	88
3.14. Agreganın fiziksel özeliği	90
3.15. Polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı özellikleri.....	90
3.16. KYB karışımları üretiminde kullanılan su azaltıcı katkı özellikleri.....	91
4.1. Çimentoların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa)	99
4.2. Ç-1 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	108
4.3. Ç-2 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	109
4.4. Ç-3 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	109
4.5. Ç-4 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	110
4.6. Ç-5 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	110
4.7. Ç-6 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	111
4.8. Ç-7 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	111
4.9. Ç-8 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	111
4.10. Ç-9 çimentosu hamurlarının akış performansı.....	112

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.11. Karışımlara ait 1/Marsh-hunisi akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$ (Süperakışkanlaştırıcı katkı tipine göre).....	113
4.12. Karışımlara ait ortalama 1/Marsh-hunisi akış süresi değeri, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$ (Çimento tipine göre).....	113
4.13. Hamur karışımlarının mini çökme yayılması (mm)	115
4.14. Hamur karışımlarının sıcaklığı (°C).....	116
4.15. Ç-1 çimentolu karışımların ait dinamik EKG ve viskozite değerleri.....	120
4.16. Ç-2 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri	120
4.17. Ç-3 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri.....	122
4.18. Ç-3 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri (Modifiye edilmiş yöntemle göre hazırlanan karışım).....	122
4.19. Ç-4 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri	123
4.20. Ç-5 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri.....	123
4.21. Ç-6 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri.....	124
4.22. Ç-7 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri	124
4.23. Ç-8 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri	124
4.24. Ç-9 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri	124

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.25. Süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri	125
4.26. Süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri.....	125
4.27. SP-1 katkısı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri ..	126
4.28. SP-2 katkısı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri ..	127
4.29. SP-3 katkısı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri...127	
4.30. Farklı çimento-katkı ikilisinden oluşan tüm karışımların ortalama PV (nihai viskozite) değeri.....	128
4.31. Ç-1 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	130
4.32. Ç-2 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	130
4.33. Ç-3 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	130
4.34. Ç-3 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri (Modifiye edilmiş yöntemle göre hazırlanan karışım)	130
4.35. Ç-4 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	131
4.36. Ç-5 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	131
4.37. Ç-6 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	131
4.38. Ç-7 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	131
4.39. Ç-8 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	132

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.40. Ç-9 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri	132
4.41. EKG ve nihai viskozite değerlerini etkileyen faktörlerin istatitkisel analizi	134
4.42. EKG parametresi için elde edilen modeller	143
4.43. EKG için kurulan birinci modeldeki katsayılar	144
4.44. Nihai viskozite için kurulan modeller	145
4.45. Nihai viskozite için kurulan birinci modeldeki katsayılar	145
4.46. Nihai viskozite için kurulan dördüncü modeldeki katsayılar	146
4.47. 9×10×1 sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıktı: EKG)	154
4.48. 9×10×1 sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıktı: nihai viskozite) ...	158
4.49. 9×10×1 sinir ağında deneme veri setlerinde ihmal edilen parametreler ve ortaya çıkan ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıktı: EKG)	159
4.50. 9×10×1 sinir ağında deneme veri setlerinde ihmal edilen parametreler ve ortaya çıkan ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıktı: nihai viskozite)	161
4.51. NÇ'nin priz süreleri	164
4.52. SDC'nin priz süreleri	164

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.53. NÇ içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri	165
4.54. SDÇ içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri	166
4.55. Katkı içermeyen NÇ karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı	168
4.56. Katkı içermeyen SDÇ karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı	168
4.57. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren NÇ hamurlarının mini-yayılması (mm)	171
4.58. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren SDÇ hamurlarının mini-yayılması (mm)	168
4.59. NÇ içeren hamurların reolojik özellikleri	175
4.60. SDÇ içeren hamurların reolojik özellikleri	176
4.61. NÇ içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm)	177
4.62. SDÇ içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm)	178
4.63. Süperakışkanlaştırıcı içeren harçlarının yayılması (mm)	180
4.64. Süperakışkanlaştırıcı içeren SDÇ harçlarının yayılması (mm)	180
4.65. NÇ içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm)	182
4.66. SDÇ içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm)	182
4.67. NÇ içeren harçların reolojik özellikleri	184
4.68. SDÇ içeren harçların reolojik özellikleri	185

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.69. NÇ içerikli betonların düzeltilmiş karışım oranları (kg/m ³) ve taze hal özellikleri	186
4.70. SDC içerikli betonların düzeltilmiş karışım oranları (kg/m ³) ve taze hal özellikleri	187
4.71. NÇ içerikli beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi.....	187
4.72. SDC içerikli beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi.....	188
4.73. NÇ içeren harç karışımlarının basınç dayanımı.....	189
4.74. SDC içeren harç karışımlarının basınç dayanımı	189
4.75. NÇ içeren beton karışımlarının basınç dayanımı.....	189
4.76. SDC içeren beton karışımlarının basınç dayanımı	189
4.77. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılması ve sıcaklığı.....	195
4.78. Hamur karışımlarının reolojik özellikleri sonucu.....	197
4.79. S/Ç oranın 0.32'den 0.35'e artışıyla, hamur karışımlarının reolojik değerlerindeki azalma (%).....	198
4.80. Su azaltıcı katkı kullanım oranının %0'dan %0.2'ye artışıyla, hamur karışımlarının reolojik değerlerindeki azalma yüzdesi.....	199
4.81. Harç karışımlarının reolojik deneyleri için tarama.....	204

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.82. Harç karışımlarının reolojik özellikleri.....	206
4.83. Düzeltilmiş karışım oranları (kg/m ³) ve taze hal özellikleri	208
4.84. Beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi	208
4.85. Hamur karışımlarının başlangıç ve bitiş priz süreleri.....	218
4.86. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılma ve sıcaklığı	221
4.87. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılma ve sıcaklığı	230
4.88. Hamur karışımlarının reolojik özellikleri sonucu	235
4.89. Etrenjit ve kalsiyum monosülfoalüminat ürünlerinin yoğunluğu (XRD ile tespit edilen)	241
4.90. Harç karışımlarının reolojik deneyleri için tarama.....	242
4.91. Hamur karışımlarının reolojik özellikleri.....	244
4.92. Düzeltilmiş karışım oranları (kg/m ³) ve taze hal özellikleri	244
4.93. Beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi	245
4.94. KYB'lerin düzeltilmiş karışım oranları (kg/m ³) ve taze hal özellikleri..	249
4.95. KYB karışımlarının işlenebilirlik açısından sınıflandırılması (EFNARC, 2005).....	250
4.96. KYB karışımlarının dinamik elastik modülü (GPa)	258

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
τ_0	Eşik kayma gerilmesi (Pa)
$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$	Deformasyon hızı
Ω	Dönme hızı (rad/s)
τ	Kayma gerilmesi
μ	Plastik viskozite (Pa.s)
\bar{S}	SO ₃
η	Viskozite katsayısı denilen orantılık sabiti
A	Al ₂ O ₃
AS	Aminosülfonik asit-esaslı geciktirici katkı
b	Herschel-Bulkley kıvam katsayısı
C	CaO
C ₂ S	2CaO.SiO ₂
C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃
C ₃ S	3CaO.SiO ₂
C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
CL	Kalsiyum lignosülfonat-esaslı katkı
CN	Sitrik asit-esaslı geciktirici katkı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C-S-H	Kalsiyum-silikat-hidrat
D	Silis dumanı,
F	Fe ₂ O ₃
F _{ed}	Elektrostatik itme kuvveti
F _{st}	Sterik itme kuvveti
F _{vdw}	Van der Waals kuvveti
K	K ₂ O
L	Organik madde içeriği %0.5'in altında olan kalker
LL	Organik madde içeriği %0.2'nin altında olan kalker
M	MgO
N	Na ₂ O
<i>p</i>	Herschel-Bulkley indeksi
P	Doğal puzolan,
Q	Doğal kalsine edilmiş puzolan,
S	SiO ₂
SG	Sodyum glukonat-esaslı geciktirici katkı
T	Piştirilmiş şist,
t	Zaman

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
V	Silissi uçucu kül,
W	Kalkersi uçucu kül,
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ACI	American Concrete Institute.
AFM	Atomic force microscopy
ASTM	American Society for Testing and Materials.
DTA	Differential Thermal Analysis
EKG	Eşik kayma gerilmesi (Pa)
FGD	Flue gas desulfurization
MLS	Modifiye lignosülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı
NÇ	Normal çimento
PAK	Priz ayarlayıcı katkı
PC	Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı
PMS	Polimelamin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı
PNS	Polinaftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı
S/Ç	Su/çimento oranı
SDÇ	Sülfata dayanıklı çimento

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
SEM	Secondary electron microscopy
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TEA	Tri-etanolamin esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı
TGA	Thermogravimetric analysis
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü.
TS	Türk Standartları.
UİÇ	Ultra ince çimento
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
XRD	X ray diffraction

1. GİRİŞ

Son zamanlarda betondan beklenen performans artmaktadır. Bu nedenle, beton veya harç üretiminde kimyasal katkı kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Örneğin, Ege Bölgesinde 2014 yılında 9.250.000 m³ hazır beton dökümü gerçekleşmiştir (THBB, 2014). Bir m³ beton üretiminde ortalama 3 kg su azaltıcı katkı tüketilmişse, bölgede yaklaşık 27.000 ton su azaltıcı katkı beton üretiminde kullanılmıştır.

Günümüzde Türkiye’de yılda 420.000 ton civarında beton kimyasal katkısı tüketilmektedir. Bunların yaklaşık %85’i polikarboksilat esaslı su azaltıcı katılardır. Söz konusu katkıların üretimi için ithal edilen hammadde yıllık yaklaşık 60.000 tona, bedeli ise 72 milyon dolara varmaktadır (KÜB, 2012, yazılı görüşme). Söz konusu katkıların bir bölümünün betonda yarattığı sıkıntıların başında çimento ile uyumsuzluk sorunu gelmektedir. Türkiye’de su azaltıcı katkıların büyük bir bölümü dış menşeli firmalar tarafından pazarlanmaktadır. Bu durumda çimento-katkı uyumsuzluğu ile ilgili çalışmalar yurtdışında yapıldığından Türkiye’de gerekli bilgi birikememektedir. Katkı-çimento ikilisinin uyumlu olması, hedeflenen işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan katkı dozajının azalmasını sağlar ve daha üstün özelliklere sahip beton karışımlarının üretilmesine imkân verir. Başka bir deyişle, çimento ile daha uyumlu olan katkının kullanımı betonda, ekonomik ve teknik açıdan avantaj sağlayabilmektedir.

1.1. Çimento ve Türleri

Kalker ve kil esaslı hammaddelerinin yüksek sıcaklıklarda pişirilmeleri ile oluşan “klinker” adı verilen malzemenin çok az bir oranda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen ürüne portland çimentosu denir. Bu ürün su ile karıştırıldığında kimyasal tepkimeler göstererek bağlayıcılık özeliği gösterir (Popovics, 1992; Erdoğan, 2013). Çimentonun üretiminde kullanılan kil, kalker ve alçıtaşından gelen oksitler, çimentolu karışımların özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Bu oksitlerin kimyasal reaksiyonlara girerek oluşturduğu anabileşenler çimento hamurunun bağlayıcılık ve kalıcılık özeliğini etkilemektedir (Erdoğan, 2013). Çimentoda bulunan oksitler ile sembolleri Çizelge 1.1’de, anabileşenler ve sembolleri ise Çizelge 1.2’de gösterilmiştir. Bileşen kompozisyonu dışında priz alma süresi,

kızdırma kaybı, çözünmeyen kalıntı, dayanım, hacim sabitliği ve incelik gibi parametreler çimentonun önemli özellikleridir (Neville and Brooks, 2010; Erdoğan, 2013).

Çizelge 1.1. Çimentoyu oluşturan temel oksitler.

Oksit	Sembol	Oran%
CaO	C	60 - 67
SiO ₂	S	17 - 25
Al ₂ O ₃	A	3 - 8
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6
MgO	M	0.1 - 4
Na ₂ O ve K ₂ O	N ve K	0.2 - 1.3
SO ₃	\bar{S}	1 - 3

Çizelge 1.2. Çimento anabileşenleri.

Anabileşen	Formül	Sembol
Trikalsiyum silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Dikalsiyum silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiyum alüminat	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetrakalsiyum alüminoferrit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

%95-100 oranında klinkere %3-6 oranında alçı taşı eklenerek birlikte öğütülmeleri sonucu elde edilen normal portland çimentosu (CEM I), çoğu ülkede beton yapılarında kullanılan en yaygın çimento türüdür. CEM I çimentolarında ortalama %49 oranında C₃S, %25 oranında C₂S, %12 oranında C₃A ve %8 oranında C₄AF ana bileşenleri bulunmaktadır. ASTM C 150 standardında "Standard Specification for Portland Cement" tip I olarak sınıflandırılan normal portland çimentosunda herhangi bir mineral katkı bulunmamaktadır (Mehta and Monteiro, 2006). TS EN 197-1 "Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" standardı ise CEM I çimentosunda en fazla %5 mertebesinde minör katkı bulunmasına izin vermektedir.

Sülfata dayanıklı portland çimentosu, sülfat etkisine maruz kalan yerlerde, normal portland çimentosuna göre daha fazla direnç gösterdiğinden, beton ve harç karışımlarında kullanılır. ASTM C 150'ye "Standard Specification for Portland Cement" göre portland çimentosunun sülfata

dayanıklı (Tip V) olarak kabul edilebilmesi için çimentonun ana bileşenlerinden C_3A içeriğinin %5'in altında olması gerekir. Sülfata dayanıklı portland çimentolarında ortalama %43 oranında C_3S , %36 oranında C_2S , %4 oranında C_3A ve %12 oranında C_4AF ana bileşenleri bulunmaktadır. ASTM Tip V çimentosunda herhangi bir mineral katkı bulunmamaktadır (Mehta and Monteiro, 2006).

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, inşaat sektöründeki artan ihtiyaçlar ve farklı amaçlar için üretilmek istenen betonlar nedeniyle, çimento ile ilgili yapılan çalışmalar artmaktadır. Bu ihtiyaç ve beklentileri karşılamak için mineral katkı kullanımını zorunlu duruma gelmiştir (Erdoğan, 2013).

Puzolanlar, kendi başına bağlayıcılık özeliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak (doğal olarak veya öğütülme sonucunda) çok ince taneli olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girdiklerinde, hidrolik bağlayıcılık özelliklerine sahip bileşenlerin oluşmasını sağlayan silisli veya silis ve alüminli malzemelerdir (Erdoğan, 2013).

Puzolan sınıfına giren malzemeler, klinker veya çimentoya farklı oranlarda eklenerek çeşitli katkı çimentolar oluşturulabilmektedir. Türkiye'de standart haline gelen çimento tipleri ve bunların içerikleri TS-EN 197-1 "Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" standardına göre Çizelge 1.3'te verilmektedir.

Çizelge 1.3. TS- EN 197-1 standardı kapsamındaki çimento tipleri.

Çimento tipleri ve işaretleri			Bileşim (kütlece % olarak)										Minör bileşen	
			Ana bileşenler											
			K*	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portland çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portland - curufllu çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portland - silis dumanlı çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM II	Portland- puzolanlı çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portland- uçucu küllü çimento	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portland - pişmiş şistli çimento	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0 - 5
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0 - 5	

¹ Tabloda, K klinkeri, S: yüksek fırın cürufunu, D: silis dumanını, P: doğal puzolanını, Q: doğal kalsine edilmiş puzolanı, V: silissi uçucu küllü, W: kalkersi uçucu küllü, T: pişirilmiş şisti, L ve LL: sırasıyla organik madde içeriği %0.5 ve %0.2'nin altında olan kalkeri göstermektedir.

Çizelge 1.3. TS- EN 197-1 standardı kapsamındaki çimento tipleri (devamı).

Çimento tipleri ve 'şaretleri		Bileşim (kütlece % olarak)										Minör bileşen	
		Ana bileşenler											
		K*	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM II	Portland - kalkerli çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0 - 5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0 - 5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0 - 5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0 - 5
	Portland - kompoze çimento	CEM II/A-M	80-94	←—————				6-20	—————→				0 - 5
		CEM II/B-M	65-79	←—————				21-35	—————→				0 - 5
CEM III	Yüksek fırın curufllu çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM IV	Puzolanik çimento	CEM IV/A	65-89	-	←—————		11-35	—————→		-	-	-	0 - 5
		CEM IV/B	4-64	-	←—————		36-55	—————→		-	-	-	0 - 5
CEM V	Kompoze çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	←—————		18-30	—————→		-	-	0 - 5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←—————		31-50	—————→		-	-	0 - 5

¹ Tabloda, K klinkeri, S: yüksek fırın cürufunu, D: silis dumanını, P: doğal puzolanını, Q: doğal kalsine edilmiş puzolanı, V: silissi uçucu külü, W: kalkersi uçucu külü, T: pişirilmiş şisti, L ve LL: sırasıyla organik madde içeriği %0.5 ve %0.2'nin altında olan kalkeri göstermektedir.

ASTM C 150 "Standard Specification for Portland Cement" standardına göre portland çimentoları 5 tipe ayrılmaktadır. Çizelge 1.4'te ASTM C150'ye göre portland çimento tiplerin bileşim nitelikleri ve kullanım yerleri gösterilmektedir.

Çizelge 1.4. ASTM C 150 standardına göre portland çimento türleri ve kullanım alanları

Tip	Bileşim özeliği	Kullanım alanı
I	Sınırlama yok	Özeliği olmayan tüm işlerde
II	$C_3A < \% 8$	Zayıf sülfat etkisi bulunan yerlerde
II (MH)	$C_3A < \% 8$ $C_3S + 4.75C_3A < \% 100$	Zayıf sülfat etkisi bulunan veya orta hidrasyon ısısı gereken yerlerde
III	$C_3A < \% 15$ C_3S yüksek	Yüksek erken dayanım istenen yerlerde
IV	$C_3A < \% 7$ $C_3S < \% 35$ $C_2S > \% 40$	Düşük hidrasyon ısısı gerektiren yerlerde
V	$C_3A < \% 5$ $2C_3A + C_4AF < \% 25$	Aşırı sülfat etkisi bulunan yerlerde

1.2. Çimento Tiplerine Göre Kullanım Alanları

Çizelge 1.5'te görüldüğü gibi, ana bileşenler çimentonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini etkilemektedir (Neville and Brooks, 2010).

Çizelge 1.5. Çimento ana bileşenlerinin göreceli özellikleri.

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidrasyon ısı salımı	Orta	Az	Çok yüksek	Orta
Dayanıma katkısı (Erken yaşlarda)	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Dayanıma katkısı (İleri yaşlarda)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

1.3. Kimyasal Katkı ve Katkı Türleri

Kimyasal katkıları, toplam bağlayıcı ağırlığının %5'ini aşmadan, betona veya harca katılan inorganik veya organik sıvı veya katı maddeler olarak tanımlanmaktadır (THBB, 2012; ASTM C 494/C494M-15, 2015; EN 934 (1-6), 1994). ACI 116R "Cement and Concrete Terminology Committee" ve

ASTM C125 "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates" standardında çimento, agrega, su ve lif dışında betona veya harca eklenen her hangi bir madde katkı olarak adlandırmaktadır.

Son zamanlarda betondan beklenen performansın artmasıyla beton veya harç üretiminde katkı kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Örneğin, A.B.D'de yol ve havaalanı beton şartnamelerinde hava sürükleyici katkı ilavesi zorunludur (Akman, 1996).

Betonun farklı özelliklerini iyileştirmek amacı ile çeşitli katkıları kullanılmaktadır (Aytaç, 2006; Felekoğlu et al., 2011). TS EN 934-2+A1 "Kimyasal katkıları-Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları-Tarifler, özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme" standardına göre beton üretiminde 11 tip katkı kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla, akışkanlaştırıcı, süper akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, priz hızlandırıcı, priz geciktirici, su geçirimsizlik artırıcı, su tutucu (terlemeyi engellemek amacıyla), sertleşme hızlandırıcı ve çok amaçlı katkılarıdır. RILEM 84 AAC komitesine göre betonda kullanılan katkıları, sırasıyla, akışkanlaştırıcı, süper akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici ve geciktirici katkıları olarak gruplanmaktadır. Bu gruplandırma ASTM C494 "Beton Kimyasal Katkıları için Standart Şartname" standardında ise, su azaltıcı, geciktirici, hızlandırıcı, su azaltıcı-geciktirici, su azaltıcı-hızlandırıcı, yüksek oranda su azaltıcı, yüksek oranda su azaltıcı ve geciktirici katkıları olarak yapılmıştır. Su azaltma oranı, standartta tanımlanan şahit betona göre %5-12 arasında olan katkıları "su azaltıcı" veya "akışkanlaştırıcı", %12'den fazla olanlar ise "yüksek oranda su azaltıcı" veya "süperakışkanlaştırıcı" sınıfına girmektedir.

Günümüzde, süperakışkanlaştırıcı katkıları beton sektöründe sıkça kullanılmaktadır. Süperakışkanlaştırıcılar; su azaltma özeliği sayesinde yüksek dayanımlı betonların imal edilmesini, kalıp alma süresini kısaltarak inşaat hızını artmasını, daha işlenebilir ve daha uzun servis ömrü olan betonların daha düşük maliyet ile üretilebilmesini sağlar. Sektörden alınan verilere göre Türkiye'de sadece son 3 yılda polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı %175 artış göstermiştir. Buna karşın orta akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ise aynı dönemde yaklaşık %15 azalmıştır. Bu azalmada, son yıllarda inşaat sektöründe yüksek dayanımlı betonların tercih edilmesinin önemli rolü olmaktadır (THBB, 2012). Katkı Üreticileri

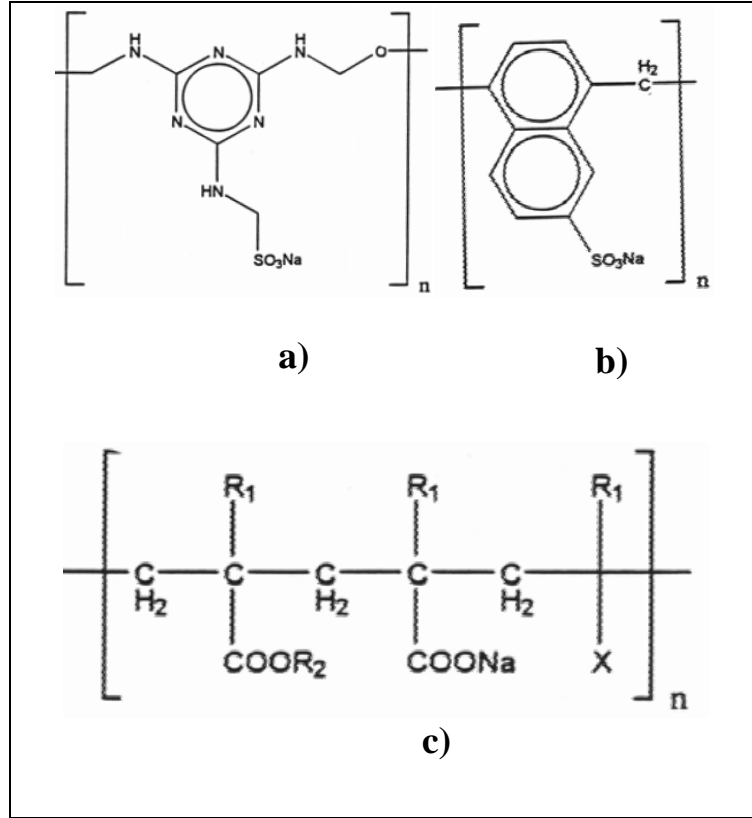
Birliği'nden alınan verilere göre Türkiye'de üretilen yıllık 420.000 ton kimyasal katkıının yaklaşık %30'u polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı olmaktadır. Bu üretim 2008 yılında yaklaşık %10, 2013 sonunda bu rakam %35 seviyelerindeyken 2018 yılında %70'e yükselmesi beklenmektedir (KÜB, 2013, yazılı görüşme). Günümüzde Avrupa'da bu oran yaklaşık %80 olduğu bilinmektedir (KÜB, 2012, yazılı görüşme).

Günümüzde, süperakışkanlaştırıcı katkıları; sülfonat melamin-formaldehit (polimelamin sülfatlar, PMS), sülfonat naftalin-formaldehit (polinaftalin sülfatlar, PNS), modifiye lignosülfonat (MLS) ve son olarak yeni nesil olarak adlandırılan polikarboksilat (PC) veya polimetakrilatlar türevleri olarak 4 gruba ayrılmıştır (Bradley and Howarth, 1986; Rixom and Mailvaganam, 1999). Beton karışımlarında süperakışkanlaştırıcı seçimi, kullanılan beton türüne dayanmaktadır. PMS, PNS ve MLS kökenli katkıları polikarboksilatlarla kıyasla daha eski katkı tipleridir ama yine de günümüzde beton karışımlarında fazla miktarda kullanılmaktadır. Ancak, bu süperakışkanlaştırıcı tiplerin sakıncası yüksek çökme kaybına yol açması ve soğuk hava şartlarında gerekli performansı göstermemesidir. Polikarboksilat tipi katkıların gelişimi ile birlikte bu gibi sıkıntılar aşılabılmıştır. Polikarboksilatlar, üstün performans gösteren % 40'a varan su azaltma yeteneğine sahip ve aynı zamanda sıcak havalarda tercih edilen yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı tipidir.

PNS ve PMS tipi süperakışkanlaştırıcılar (Şekil 1.1), düzenli aralıklarda sülfonat grupları ile bağlanmış iyonik doğrusal organik polimerleridir. Sülfonik asitler, sodyum veya kalsiyum karşıt iyonları ile nötralize edilir (Aitcin, 2004). Polikarboksilatlarda (Şekil 1.1) ise, akrilik veya metakrilik kopolimerlerinden oluşan bir ana zincir bulunmaktadır. Bu temel zincirlere, polar ya da iyonik karboksil veya hidroksil grupları yan zincirler ile bağlanmıştır (örneğin polietilen oksit yan zincirleri) (Ramachandran, 1998).

Süperakışkanlaştırıcı katkıların molekül ağırlıkları geniş bir aralıkta değişebilmektedir (örneğin 1400 ile 8800 g/mol) (Uchikawa, 1995; Uchikawa et al., 1997; Yamada, 2000). En büyük molekül ağırlığına sahip katkı PC tipi ile elde edilebilir. PC-tipi süperakışkanlaştırıcıların fonksiyonel grupları, PMS ve PNS tipi katkıları kıyasla daha zayıf asit olduğundan ve molekül kütlesi/fonksiyonel grupların kütlesi oranı PNS ve PMS moleküllere kıyasla

daha yüksek olduğundan, PC-tipi süperakışkanlaştırıcılar zayıf elektrolitlerdir. Bu nedenle, daha düşük bir iyonik aktivite göstermektedir (Ramachandran, 1998; Houst, 1999). PC-tipi katkıların ana ve yan zinciri tipi ve uzunluğu değiştirilerek çok değişken özelliklere sahip çeşitli ürünler elde edilebilir (Ramachandran, 1998).



Şekil 1.1. Farklı akışkanlaştırıcı türleri; a) Na-PMS, b) Na-PNS ve c) polikarboksilat; X: bir polar (örneğin CN) yada iyonik grubu (örnek olarak SO₃, R₁: H yada CH₃'ü temsil etmektedir, R₂: bir polieter yan zinciri (örneğin polietilen oksit) temsil etmektedir (Ramachandran et al., 1998)

Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıların ülkemizdeki pazar büyüklüğünün yıllık yaklaşık 180 milyon dolara vardığı rapor edilmiştir. Sektörün bu şekilde büyümesi ve bu katkıların kullanımının artmasından dolayı 2018 yılında bu rakamın yıllık 480 milyon dolara varması beklenmektedir. 2012 yılında 168.000 ton polimer esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı üretimi için yaklaşık 84.000 ton hammadde ithal edildiği bilinmektedir. Bahis konusu ham maddenin maliyeti 1202 dolar/ton olduğundan polikarboksilat esaslı katkı üretimi için ithal edilen ürün bedeli yaklaşık 100 milyon dolar olarak hesaplanmaktadır (KÜB, 2013, yazılı görüşme).

Yukarıda verilen bilgilere dayanarak beton sektöründe akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıları en çok kullanılan katkı türüdür. Bu nedenle bu tez kapsamında su azaltıcı katkı etkisi incelenmiştir.

Rixom ve Mailvaganam (1986) ve ACI 212 Komitesine "Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete" göre akışkanlaştırıcılar genelde beton veya harç üretiminde üç amaç için kullanılmaktadır. Bunlar;

- ✓ Su azaltıcı özeliğe sahip olduklarından, betona daha yüksek dayanım kazandırmak,
- ✓ Beton işlenebilirliğini iyileştirmek,
- ✓ Aynı işlenebilirliği ve dayanımı daha az çimento kullanarak sağlamak.

Süper akışkanlaştırıcıların betondaki etkileri normal akışkanlaştırıcıların etkilerine benzerdir. Ancak bu katkıları suyun yüzey gerilimini normal akışkanlaştırıcılara göre daha az düşürdüklerinden aşırı miktarda hava sürüklemeyiz. Süper akışkanlaştırıcılar bu nedenle normal akışkanlaştırıcılara göre daha yüksek dozajda betonda kullanılabilir (Prince et al., 2003).

1.3.1. Süperakışkanlaştırıcının adsorpsiyonu ve çimento-çözelti ara yüzeyindeki itme

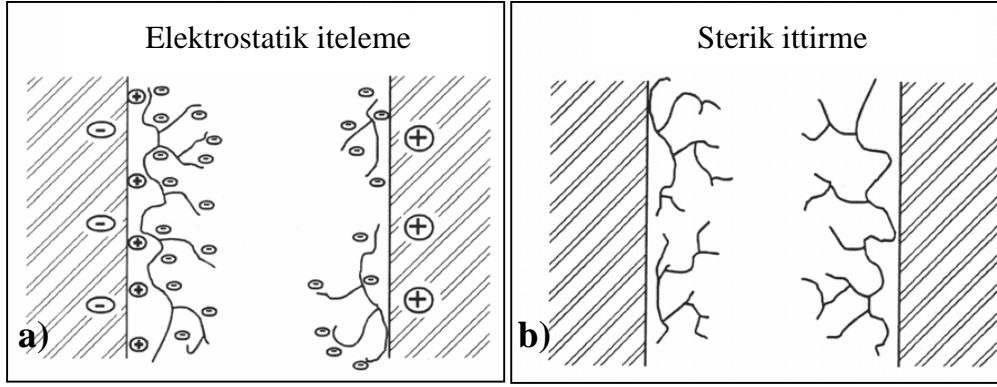
Süperakışkanlaştırıcıların fiziksel etkileri süspansiyon modelleri ile incelenebilir (Flatt and Houst, 2001; Jolicoeur et al., 1994; Nkinamubanzi, 1993). Sonuçlar, bu katkıların akışkanlaştırıcı etkisinin yalnızca adsorbe polimer miktarı ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Flatt and Houst, 2001). Bu nedenle, süperakışkanlaştırıcılar öncelikle çimento taneleri yüzeyine adsorbe olup, daha sonra tanelerin dağılmasını sağlamaktadır.

Kalsiyum iyonlarının hidrolizi sonucu çimentolu sistemlerin pH'ı yüksektir. Bu nedenle, çimento taneleri yüzeyi negatif yüklü olabilir. Elektron spektroskopisi analizleri, kalsiyum iyonlarının klinker minerallerinin iskelet yapısını bozmadan, klinker yüzeyinden çözündüğünü göstermiştir. Bu

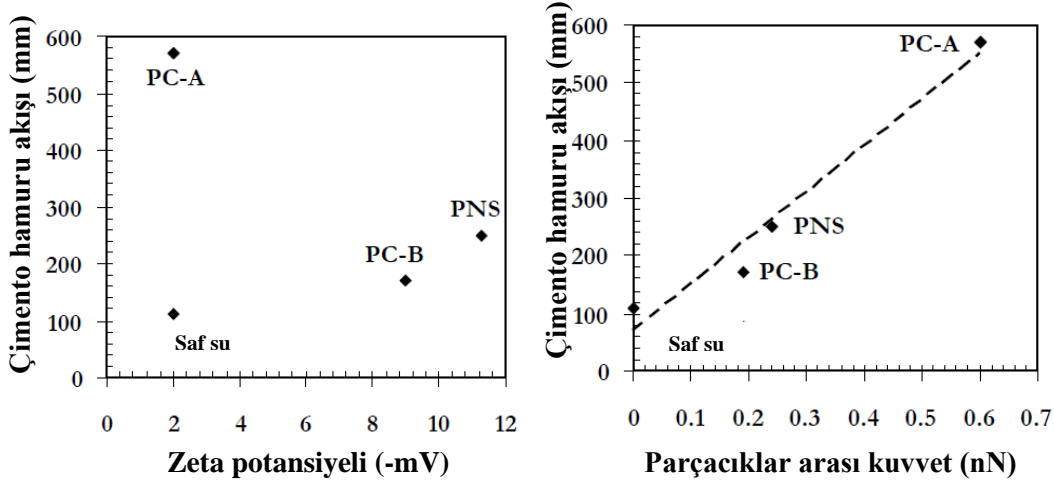
durum silikat (SiO_4^{-4}) veya alüminat (Al_2O_3) açısından zengin bir yüzeye yol açar (Uchikawa et al., 1995). Bu nedenle, Ca^{2+} gibi pozitif iyonlar parçacıklar yüzeyine adsorbe olarak pozitif yüklü bir tabaka oluşturur (Mollah et al., 2000). Bu sayede, süperakışkanlaştırıcıların negatif yüklü hidrofilik grupları (SO_3^- , COO^- e OH^-) taneler yüzeyine adsorbe olur. Adsorbe katkı molekülleri, su yayılmasını engelleyerek çimento tanesi yüzeyinde bir koruma veya ayırma etkisi yaratır (Şekil 1.2-a) (Mollah et al., 2000). Kolloidal dispersiyonların kararlılık teorisine göre, yüzeyine süperakışkanlaştırıcı katkı adsorbe olmuş çimento taneleri arasında etkili olan kuvvetler, van der Waals, (F_{vdw}), elektrostatik itme (F_{ed}) ve sterik itme (F_{st}) kuvvetlerinden oluşur (Derjaguin and Landau, 1941; Verwey and Overbeek, 1948). Bu kuvvetlerarsı ilişki Denklem 1.1'de verilmiştir.

$$F_{Toplam} = F_{vdw} + F_{ed} + F_{st} \quad [1.1]$$

Sterik itme kuvveti, adsorbe polimerlerin birbirine yaklaşması sonucu oluşan kısa menzilli itici güçtür. Şekil 1.2-b'de görüldüğü gibi, adsorbe polimerler arasındaki mesafe süperakışkanlaştırıcı katmanı kalınlığının iki katından daha küçük olması durumunda sterik etkileşim gerçekleşir. Çimento süspansiyonunun kararlılığı ve akışkanlığı, elektrostatik kuvvetlerin ortalaması olan, zeta potansiyeli ile incelenebilir. Ancak, akışkanlaştırıcı içeren çimento hamurunun akışının özellikle PC-tipi katkı kullanıldığında, zeta potansiyeli ile iyi bir korelasyonu yoktur (Şekil 1.3-a). Bununla birlikte, PNS ve PMS tipi süperakışkanlaştırıcı katkıları için itici gücün büyük bir kısmı elektrostatik itmeden kaynaklanmaktadır (Jolicoeur et al., 1994; Uchikawa et al., Yoshioka et al., Sakai and Daimon, 1997). Diğer taraftan Şekil 1.3-b'de de görüldüğü üzere, çimento hamurunun akışı, atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ile ölçülen çimento parçacıklararası toplam kuvvetle oldukça ilişkilidir (Uchikawa et al., 1997). Uchikawa ve arkadaşları (1997), polikarboksilat esaslı katkılar kullanarak yaptığı çalışmada, parçacıklararası toplam kuvvetten (F_{Toplam}) elektrostatik itici kuvveti çıkararak sterik itici kuvvetin etkisini hesaplamıştır. Bu yöntemle PC-tipi katkılar için sterik itici kuvvetinin ana itici güç olduğu ilk defa Uchikawa ve arkadaşları (1997) tarafından saptanmıştır.



Şekil 1.2. Elektrostatik itme; a) parçacıkların aynı parçacık yükünde sterik itme nedeniyle ittirilmesi, b) parçacıkların katkı polimerlerinin örtüşmesi nedeniyle ittirilmesi (Ramachandran, 1998)



Şekil 1.3. Taze çimento hamuru akışı-parçacıklar arası kuvvet ve -zeta potansiyeli arasındaki ilişki (Uchikawa et al., 1997)

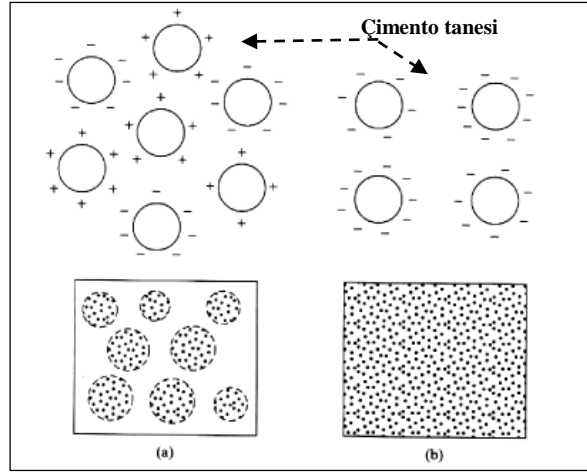
1.3.2. Su azaltıcı katkının etki mekanizması

Daha önce belirtildiği gibi, süperakışkanlaştırıcı içeren çimentolu sistemde, çimento tanelerinin dağılma özeliği genel olarak “elektrostatik” ve “sterik” etki mekanizmasıyla açıklanır. Aşağıda bu iki etki mekanizması kısaca anlatılmıştır.

1.3.2.1. Elektrostatik etki

Süperakışkanlaştırıcı, çimento tanelerinin topaklaşmasını önler. Bu etkiyle çimento hamurunun akışkanlığı artar. Çimento tanelerinin topaklaşmasına neden olan çekim kuvvetleri, negatif yüklü SNF ve SMF gibi

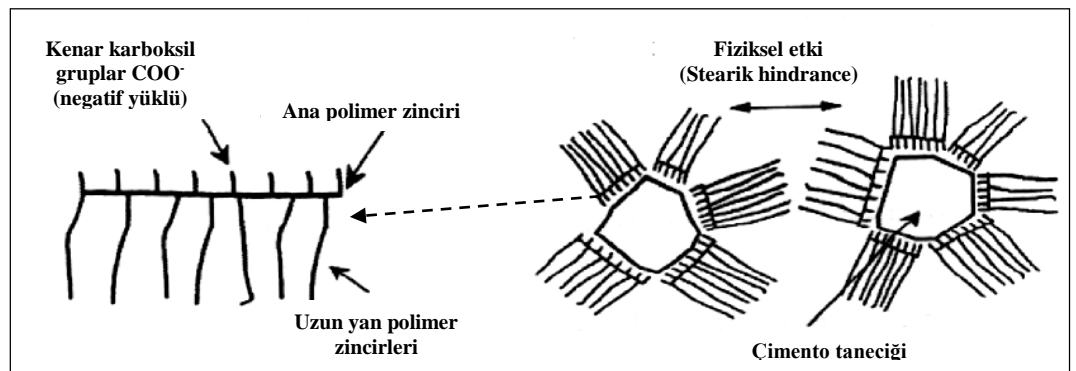
polimerlerin çimento tanesi üzerinde tutunması sonucu, nötr veya negatif yüklü hale gelmekte ve böylece dağıtma etkisi gerçekleşmektedir (Mindess et al., 2003; Collepardi, 2005). Böylece, askıdaki çimento taneleri benzer elektriksel yük taşıyor ve bunların arasında bir itme kuvveti oluşur. Bu elektriksel yükler yeterince fazla ise taneler birbirinden ayrı kalır ve topaklaşma oluşmaz. Şekil 1.4'te su azaltıcı katkının çimento tanelerinin dağıtılmasında olan etkisi gösterilmiştir.



Şekil.1.4. Su azaltıcı katkının çimento taneleri dağıtma etkisi a) topaklaşmış hamur; b) katkılı hamur (Mindess et al., 2003)

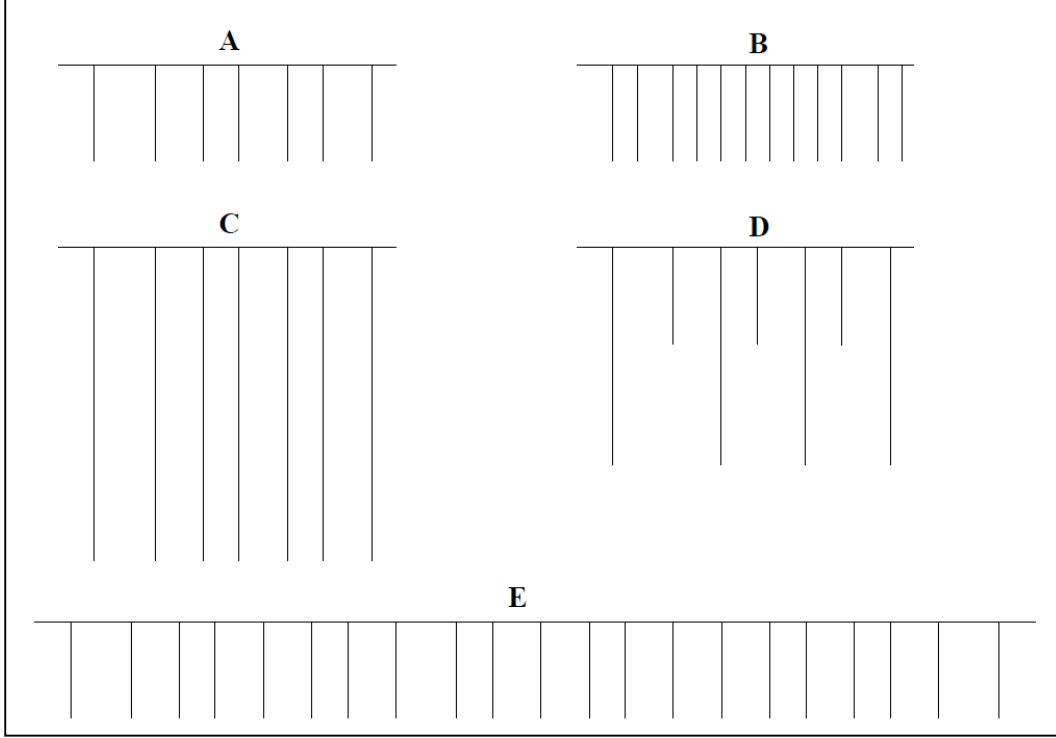
1.3.2.2. Sterik etki

Polikarboksilat esaslı katkıların dağıtma etkisi, elektrostatik itkidenden çok sterik (fiziksel-geometrisel) engelleme etkisi ile açıklanmaktadır. Şekil 1.5'te görüldüğü gibi, polimer molekülündeki uzun yan zincirler çimento taneleri arasında fiziksel bir etki oluşturmakta ve topaklaşmayı önlemektedir.



Şekil.1.5. PC-tipi katkıların sterik etkisi (Collepardi, 2005)

Sterik itki, elektrostatik itkinin tersine, çimento kompozisyonundan kaynaklanan, boşluk çözeltisindeki iyon tipi ve yoğunluğundan çok daha az etkilenmektedir. Sterik itkide önemli rol oynayan parametreler katkının ana zincir uzunluğu, yan zincirlerin uzunluğu ve yan zincirlerarası mesafe olarak verilmektedir (Şekil 1.6).



Şekil.1.6. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcılara ait tipik moleküler yapı çeşitleri. Yan zincirler arasındaki mesafe farklılığı (A-B), yan zincir uzunluğu farklılığı (C-D), ana zincir uzunluğu farklılığı (A, B, C, D-E) (Gay and Raphaël, 2001; Collepardi, 2005)

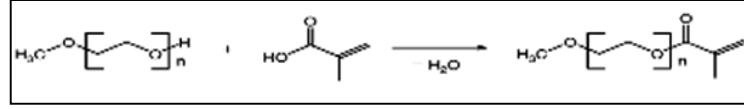
1.3.3. Polikarboksilat ve naftalin sülfonat esaslı katkıların üretim prosesi

Polikarboksilat üretim prosesi 2 aşamalı bir reaksiyondan oluşmaktadır. Bu aşamalar aşağıda özetlenmiştir.

1.3.3.1. Esterifikasyon

Karboksilik asit monomeri farklı molekül ağırlıklarındaki monohidroksil gruplu polietilen glikol ile asit katalizörlüğünde esterleştirilir. Daha sonra ester ara ürünü karboksilik asit monomeri kullanılarak başlatıcı

yardımıyla radikal polimerleşme reaksiyonu sonucu yapı oluşturulur (Şekil 1.7).



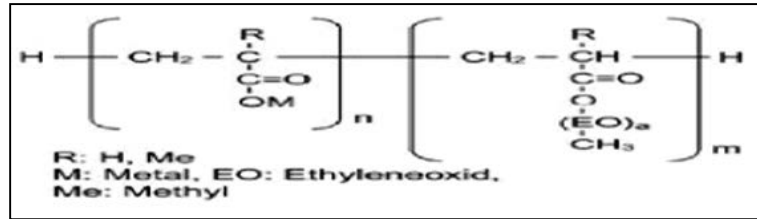
Şekil 1.7. Karboksilat esterifikasyon reaksiyonu

Uygulanan yöntem aşağıda açıklanmıştır:

Farklı molekül ağırlıklarındaki 1 mol monohidroksi polietilen glikol ile 4-8 mol arasında değişik miktarlarda karboksilatın 120-180°C arasında esterleşme sağlanır. 6-12 saat arasında esterleşme gerçekleşir. Reaksiyon sonunda serbest asit değeri analiz edilir.

1.3.3.2. Radikal polimer reaksiyonları

Monohidroksi polietilen glikol (x mol) karboksilat ile ilgili monomerlerin polimerleşme reaksiyonları Şekil 1.8'de gösterildiği gibidir:



Şekil 1.8. Polimerin kimyasal yapısı

Bu amaçla reaktöre %30-40 mertebesinde su alınır ve 70-90°C'ye kadar ısıtılır. Bir kaba %30-%40 monohidroksi polietilen glikol karboksilat ve/veya %10-%20 monomer ve %10-20 su ilave edilerek monomer karışımı hazırlanır. Diğer bir kapta başlatıcı olarak % 0.5-%4 amonyum persülfat ve/veya %1-%5 hidrojen peroksit sulu çözeltisi hazırlanır. Başlatıcı ve monomer aynı anda 70-90°C deki azot ortamına monohidroksi polietilen glikol (x g/mol) karboksilat üzerine 3-6 saat süresince aynı anda bitecek şekilde ilave edilir.

Naftalin sülfonat esaslı (PNS) katkını üretim prosesi aşağıda özetlenmiştir.

PNS üretimi naftalin sülfonasyon prosesi olup; naftalin ile sülfürik asidin reaksiyonu ve polimerizasyonunu kapsamaktadır. İlk önce 110-120°C sıcaklıkta naftalin sülfonat elde edilir, daha sonra polimerizasyonuna geçilerek yine 120-130°C sıcaklıkta polinaftalin sülfonat üretilir. Temel olarak naftalin ve sülfürik asit hammaddeleri kullanılarak ürünler elde edilir.

1.4. Çimento-Katkı Uyumu ve Etki Eden Faktörler

Betonda sabit bir işlenebilirlikte, akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı durumunda, su ihtiyacındaki azalma sırasıyla, %5-%12 ve %12-16'dan fazla ve basınç dayanımında, sırasıyla %10'dan ve %15'ten fazla artış beklenebilir (Rixom and Mailvaganam, 1986; Akman, 1996).

Genelde beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıları, beton karışımlarında istenilen olumlu etkilerin dışında bazen de istenmeyen olumsuz etkilere yol açabilir (Kantro, 1980; Schatzmann et al., 2003; Schatzmann et al., 2004; Koehler and Fowler, 2004; Perenchio et al., 1979; Tagnit-Hamou and Aïtcin, 1993). Bu olumsuz etkilere kısaca çimento-katkı uyumsuzluğu denir (Hanehara and Yamada, 1999). Rixom ve Mailvaganam (1986) ile Akman (1996) akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıların beton veya harçta yaratabileceği olumsuz etkileri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

Çimento-katkı uyumsuzluğunun etkisi, betonun taze ve sertleşmiş hal özelliklerini etkileyebilir. Olumlu etkilerin dışında, akışkanlaştırıcı kullanımı, priz gecikmesi, hızlı çökme kaybı ve büzülme riskinin artabilmesi gibi olumsuzluklar yaratabilir. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımında ise betonda işlenebilme kaybı, kuruma büzülmesi riskinin artışı ve ayrışma oluşumu şeklinde olumsuz yan etki görülebilir (Bedard and Mailvaganam, 2003; Dodson and Hayden, 1989; Bonen and Sakar, 1995; Erdoğan, 2000; Jiang et al., 1999).

Çimento-süperakışkanlaştırıcı etkileşimi sonucu ortaya çıkan olumsuzlukların bir kısmı çimentodan, bir kısmı akışkanlaştırıcı katkıdan, diğer kısmı ise karışım oranı, sıcaklık ve bakım koşulları gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Bedard and Mailvaganam, 2003; Bonen and Sakar, 1995; Ramachandran, 1995). Çimento özelliklerinden kaynaklanan olumsuzluklar

sırasıyla, çimento kimyasal kompozisyonu ve ana bileşenleri miktarı ile yapısı (C_3A ve C_4AF miktarı ve C_3A 'nın kristal yapısı), çimento inceliği ve alkali içeriği ile çimento üretimi esnasında klinkere eklenen kalsiyum sülfatın (alçının) miktarı ve türü ile ilişkili olabilmektedir (Roberts, 1995; Jiang et al., 1999; Jolicoeaur and diğerleri, 1994; Ramachandran, 2002).

Polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıya bağlı etkenler içinde ana zincir uzunluğu, yan zincir sayısı ve uzunluğu, molekül ağırlığı, moleküllerarası bağ yapısı, kimyasal bileşimi, yoğunluğu, adsorpsiyon özeliği, beton karışımına katılış şekli ve sırası önem kazanmaktadır (Flatt and Houst, 2001; Bonen and Sakar, 1995; Bedard and Mailvaganam, 2003; Ramachandran, 1995; Uchikawa et al., 1992; Aiad et al., 2002; Griesser, 2002; Prince et al., 2002; Rixom and Mailvaganam, 1999; Mollah et al., 1995; Ondova et al., 2012; Mardani-Aghabaglou et al., 2013; Ouyanga et al., 2009; Janowska-Renkas, 2013; Alonso et al., 2013).

1.4.1. Çimento C_3A oranı etkisi

Genel olarak C_3A miktarının az olması çimento hamuru reolojisi açısından istenen bir durumdur (Aitcin, 2004).

Prince ve arkadaşları (2002), C_3A -sülfat iyonu reaksiyonu sonucu oluşan etrenjitin, ortamda var olan suyu tükettiğini ve çimento hamurunun işlenebilirliğini azalttığını öne sürmüştür.

Genelde, C_3A bileşeni kübik ve ortorombik yapıda bulunmaktadır (Ramachandran, 1995). Regourd'a (1978) göre, C_3A bileşeninin içinde var olan Na^+ iyonları bu bileşenin polimorfik yapısını etkilemektedir. C_3A bileşeninde var olan Na^+ iyonu %2.4'ten az olduğu durumlarda bu bileşen kübik formunda oluşmaktadır. %2.4 ile %5.3 aralığında Na^+ iyonu içerdiği takdirde, C_3A bileşeni ortorombik formunda, ancak, Na^+ iyonu %5.3'den fazla olduğu durumunda C_3A bileşeninin monoklinik yapıda oluştuğu bu araştırmacı tarafından ifade edilmiştir. Başka bir araştırmacıya göre (Grzeszczyk, 1994) C_3A bileşeninde var olan Na^+ iyonlarının miktarı, çimento üretimi esnasında fırındaki Na^+/SO_3 oranına oldukça bağlıdır. Miller ve Tang'a (1996) göre, çimento üretimi esnasında sülfür miktarı fazla olan yakıt kullanıldığı zaman, fırında SO_3 miktarı artmaktadır. Söz konusu SO_3

ortamda var olan Na^+ iyonu ile hızlı bir şekilde reaksiyona girerek alkali sülfatları oluşturur. Bu durumda, C_3A bileşeni ile potansiyel olarak bağlanabilen Na^+ iyonu azalır. Bu sebeple, daha az miktarda Na^+ iyonu içeren kübik yapıdaki C_3A bileşeni oluşur. Kübik yapıdan olan C_3A ortorombik yapıya göre daha reaktiftir (Aitcin, 2004). Kübik yapıya sahip C_3A oranı arttıkça, etrenjit oluşumu hızlandığından reolojik özellikler daha kolay kontrol edilebilir (Vernet and Noworyta, 1992).

1.4.2. Çimento alkali oranı etkisi

Literatürde, çimento alkali oranının azalmasıyla çimentolu karışımların taze hal ve reolojik özelliklerinin iyileştiği söylenmiştir. Bu olayın, boşluk çözeltisindeki alkali içeriğinin artışıyla C_3A bileşeninin reaktivitesinin artmasından dolayı kalsiyum sülfat hidrat ürünlerinin oluşumunun hızlandığından kaynaklandığı söylenmiştir (Jawed and Skalny, 1978; Dodson and Hayden, 1989; Rollet et al., 1992).

1.4.3. Çimento inceliği etkisi

Klinker-alçıtaşı karışımı ne kadar ince taneli olarak öğütülürse, çimento tanelerinin yüzey alanları toplamı o kadar artmaktadır. Bu durumda, su ile temas eden tanelerin yüzey alanları daha fazla olmakta, dolayısıyla kimyasal reaksiyonlar daha hızlı ve daha iyi meydana gelebilmektedir. Öğütülen klinker-alçıtaşı karışımının tanecik boyutları 1-200 μm arasında değişmektedir. "İncelik" kelimesi, çimento tanelerinin ortalama büyüklüğünü belirtmektedir. Çimentonun inceliğini belirlemek amacıyla kullanılan farklı deney metodları bulunmaktadır. Bu metodlar arasında en çok tercih edileni, Blaine aleti denilen bir cihaz ile çimentonun "özgül yüzey"inin tayin edildiği yöntemdir. ASTM C 204 "Standard Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus" standardında açıklanan Blaine yöntemiyle bulunan incelik değeri cm^2/g olarak gösterilmektedir. Bu standarda göre, portland çimentosunun Blaine incelik değeri en az 2600 cm^2/g olmalıdır (Erdoğan, 2013).

Çimento ile suyun temas etmesiyle meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve dolayısıyla hidrasyon ürünlerinin oluşması, ilk olarak çimento tanelerinin yüzeyinde meydana gelmektedir. Bu nedenle, çimentonun

yeterli incelik değerine sahip olması gerekmektedir. İri tanelerden oluşan çimento daha yavaş hidrasyona uğramakta, hidrasyon sonucu oluşan ürünler daha geç oluşmakta, dolayısıyla çimento hamuru kazanması beklenen dayanıma daha geç ulaşmaktadır. Aşırı incelik değerine sahip çimento ise, beton yapımında kullanılmadan önce, depolama esnasında, havada bulunan nem ile bir ön hidrasyona uğrayabilmekte, çimentonun bağlayıcılık özeliği olumsuz etkilenebilmektedir. Çimentoda bulunan anabileşenlerin oranları, çimentonun özelliklerini etkilemektedir. Bununla birlikte, çimentonun sahip olduğu incelik değeri çimentonun ne hızla dayanım kazanabileceğini ve ne kadar iyi hidrasyon yapabileceğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Erdoğan, 2013).

Çimento inceliğinin artmasıyla beraber çimento hamurunun viskozitesi artmaktadır (Ramachandran, 1995). Ayrıca aynı işlenebilirliği sağlamak için daha fazla süperakışkanlaştırıcı gerekmektedir (Bonen and Sakar, 1995).

1.4.4. Çimentoda bulunan kalsiyum sülfat türünün etkisi

Bilindiği gibi, çimentonun priz süresini kontrol etmek amacı ile çimento üretim esnasında belli bir miktar alçıtaşı klinker ile beraber öğütülmektedir. Ramachandran'a (1995) göre, karışımın viskozitesi eklenen alçıtaşı tipine bağlı olarak değişmektedir. Söz konusu sülfatlar; dehidrat veya alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ve anhidrit (CaSO_4) olarak 3 farklı türde olabilir (Ramachandran, 1995). Ayrıca, karışımın öğütülmesi sırasında, belli bir miktar sıcaklığın ortaya çıkması bilinmektedir (Mork, 1994). Literatüre göre, ortaya çıkan bu sıcaklık alçıtaşı/hemihidrat ve alçıtaşı/çözülebilir anhidrit oranının azalmasına yol açmaktadır (Dodson and Hayden, 1989).

Hemihidratın (6.2-8.2 g/l) ve çözünebilir anhidritin (6.3 g/l) suda çözünebilirliği dehidratın (2.1 g/l) yaklaşık 3 katı kadardır (Kim, 2000). Bu sebeple, dehidrata kıyasla C_3A ve sülfat iyonu reaksiyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum sülfüalumino hidrat ürünleri daha hızlı oluşabilmektedir. Bu nedenle, çimentoda hemihidrat bulunduğu zaman, hidrasyonun ilk aşamalarında etrenjit oluşumu hızlandığı için ani priz önlenir. Ancak, hemihidrat miktarı fazlaysa yalancı priz ortaya çıkabilir (Mork and Gjoerv,

1997). Mork ve Gjoerv'ye göre (1997), alçı tipini değişimine bağlı olarak karışımın işlenebilirliği değişebilir.

Tagnit-Hamou ve Aitcin'e göre (1993), SO_4^{-2} iyonu konsantrasyonu karışımın hidrasyonunu ciddi mertebede etkilemektedir. Söz konusu iyonunun karışım içerisinde yetersiz miktarda bulunması ani prize, yüksek konsantrasyonu ise, yalancı prize neden olmaktadır. Ortaya çıkan söz konusu değişiklikler çimento-katkı uyumunu olumsuz yönde etkilemektedir (Mork and Gjoerv, 1997).

Tagnit-Hamou ve Aitcin'a göre (1993) klinkerde mevcut olan alkali sülfatların çözünebilirliği herhangi bir formdaki kalsiyum sülfattan daha hızlı olmaktadır. Nakajima ve Yamada'ya göre (2004), klinkerdeki alkali sülfatlar SO_4^{-2} iyonunun konsantrasyonunu hidrasyon sürecinin tamamında etkilemektedir. Ancak sülfat türünün değişimi, SO_4^{-2} iyonunun sadece başlangıçtaki konsantrasyonunu etkilemektedir.

1.4.5. Su azaltıcı katkı özelliklerinin etkisi

Su azaltıcı katkı etkisi ile ilgili literatürde birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Sözü edilen çalışmalarda katkı türü ve etkisi ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Ortak kanı olarak katkı kimyasal bileşimi, yapısı, molekül ağırlığı, karışıma katılış şekli ve sırası çimento-katkı etkileşimini etkileyen faktörler olarak sıralanmıştır (Ouyanga et al., 2009; Burgos-Montes et al., Gołaszewsk , He et al., 2012; Sonebi et al., Janowska-Renkas, Alonso et al., 2013; Andersen and Roy, 1988).

Rana ve arkadaşlarına (2009) göre, yan zincir uzunluğunun artışıyla, artan sterik etkiye bağlı olarak katkı performansı artmıştır. Mardani-Aghabaglou ve arkadaşlarına (2013) göre, katkı yan zincir yoğunluğunun belli bir değere kadar artışıyla, taze hal özelliklerinin iyileştiği, ancak, belli bir yoğunluktan sonra muhtemelen yan zincirler birbirine takıldığından taze betonun kıvam özeliğinin olumsuz etkilendiği ifade etmiştir.

Anderson ve arkadaşları (1988) sülfat polisterin esaslı katkının molekül ağırlığının artışıyla, katkı performansının arttığını beyan etmiştir. Cunningham ve arkadaşları (1989) sülfonat melamin formaldehit katkılarının

da benzer davranış gösterdiği bildirilmiştir. Ancak, Rixom (1978), sülfonat naftalin formaldehit katkılarında belli bir molekül ağırlığından sonra katkı performansının azaldığını söylemiştir. Ramachandran (1995), polikarboksilat esaslı katkıların optimum bir molekül ağırlığında işlenebilirlik açısından en üstün performansı gösterdiğini ifade etmiştir.

Aiad (2003), katkının gecikmeli olarak karışıma eklenmesi sonucu reolojik davranışının ve taze hal özelliklerinin olumlu etkilendiğini söylemiştir.

1.4.6. Çimento-katkı uyumunun sağladığı avantajlar

Her karışım için en uyumlu çimento-katkı ikilisinin seçilmesi, karışımın taze ve sertleşmiş hal özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğu bilinmektedir. Buna ilaveten, kullanılan su azaltıcı katkının çimento ile daha uyumlu olması sonucu beton karışımlarında aynı özellikler daha düşük çimento içeriğiyle sağlanabilir. Böylece, çimento tüketimi azalabilir. Çimento tüketiminin azalması doğal kaynakların korunması ve enerji tüketimi açısından da olumlu etki yaratmaktadır. Ayrıca, bir ton çimento üretimi esnasında gerekli 1.2 ton hammadde ve 130 kWh enerjiye ilaveten ortaya çıkan yaklaşık 1 ton CO₂ dikkate alındığında, çimento tüketiminin azaltılması çevre duyarlılığı bakımından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır (İzmir Çimentoaş, 2013, yazılı görüşme).

Çizelge 1.6'da 2013 yılında piyasada kullanılan aynı beton sınıfına ait katkısız ve katkılı olmak üzere 3 farklı betonun maliyeti kıyaslanmıştır (Betonsa, 2013, yazılı görüşme). Karışımlarda su azaltıcı katkı dışında benzer malzeme kullanılmıştır. Kullanılan su azaltıcı katkıların ise su kesme miktarı birbirinden farklıdır. Aynı çökme değerini elde etmek için A ve B karışımında çimento ağırlığının sırasıyla %1.2 ve % 1.3'ü kadar polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkıların ve çimentonun birim fiyatı sırasıyla 1.2 TL/kg ve 120 TL/t olarak alınmıştır. Sonuçlara dayanarak katkısız betona kıyasla aynı dayanıma sahip betonu üretmek için daha az miktarda çimento kullanılmıştır. Böylece, A ve B katkılı betonlar her m³ için katkısız betona göre sırasıyla 2.8 ve 0.1 TL/m³ daha ucuz üretilmiştir. Katkı ile çimentonun daha uyumlu olması aynı özelliklere sahip beton maliyetinde ne ölçüde etkili olduğu Çizelge 1.6'dan

anlaşılmaktadır. Bahis konusu kontrol karışımının satış bedeli 120 TL/m³ olduğu dikkate alındığında 2.8 TL/m³ bu maliyetin %2.5'una tekabül ettiği görülmektedir. Dolayısıyla uygun bir katkı-çimento seçimi ile daha ekonomik bir beton üretilebilir. Bu şekilde bir ortalama hazır beton tesisinin yıllık 120.000 m³ beton ürettiği düşünüldüğünde firmanın 456.000 TL/yıl kar sağlaması mümkündür.

Çizelge 1.6. Aynı dayanıma sahip katkısız ve katkılı beton maliyetleri.

C30/37 Beton Sınıfı	Katkısız	Katkılı	
		A	B
Su/ Çimento oranı	0.50	0.50	0.50
Çimento içeriği (kg/m ³)	390	320	340
Su içeriği (kg/m ³)	195	160	170
Katkı içeriği (kg/m ³)	0	3.84	4.42
Agrega içeriği (kg/m ³)	1765	1866	1835.5
Çökme (cm)	20	20	20
Basınç dayanımı (MPa)	39.8	40.3	40.1
Çimento maliyeti (TL/m ³)	46.8	38.4	40.8
Katkı maliyeti (TL/m ³)	0	4.60	5.20
Agrega maliyeti (TL/m ³)	17.65	18.66	18.36
Toplam maliyet (TL/m ³)	64.45	61.66	64.36
Maliyet avantajı (TL/m ³)	-	2.8	0.1
Satış bedeli (TL/m ³)	120	120	120

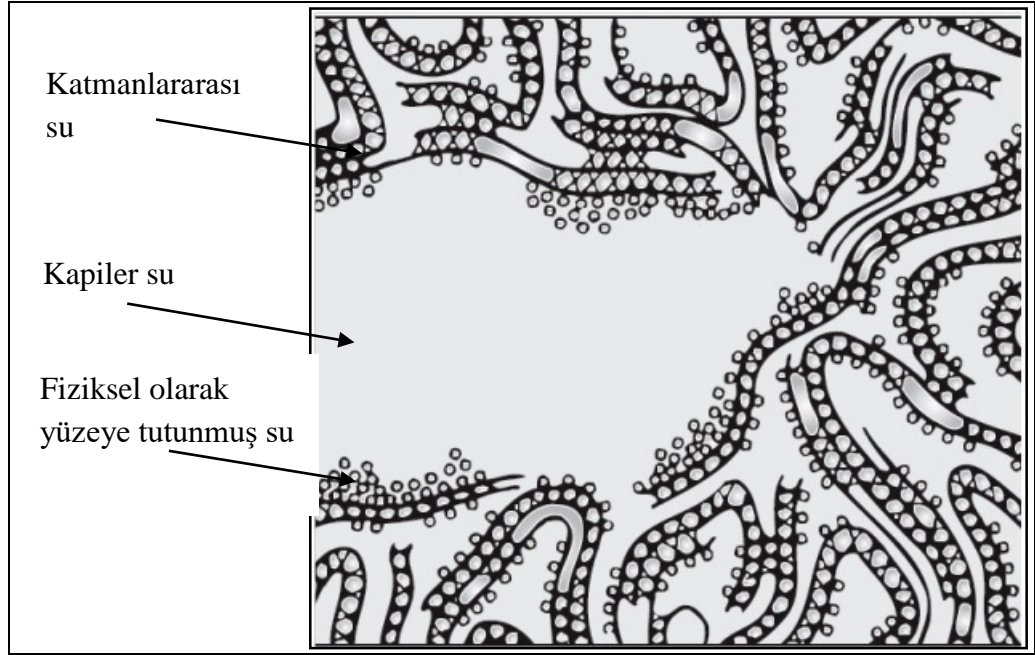
Diğer taraftan çimento ile uyumlu bir su azaltıcı katkı göreceli olarak daha etkili olacağından istenilen taze hal özellikleri daha düşük miktarda katkı kullanarak sağlanacaktır.

1.5. Çimento Hamuru ve Harçların Taze Hal Özellikleri

1.5.1. Çimento hamurunun yapısı

Hidratasyon ürünlerinin türü ve oranı çimento hamurunun özelliklerini belirlemektedir. Hidratasyon esnasında karışımın toplam hacminin sabit kaldığı varsayılmaktadır. Hidratasyon sonucu oluşan, kalsiyum hidroksit kristalleriyle birlikte tüm hidratasyon ürünleri çimento teknolojisinde "çimento jeli" olarak isimlendirilmiştir (Erdoğan, 2013). Hidratasyon ürünlerinde mevcut olan su 4 farklı türde bulunmaktadır. Bunlar, kapiler boşluklarda var olan su, fiziksek olarak taneler yüzeyine tutunan su,

katmanlar arasında var olan su ve kimyasal bağ ile üründe yer alan sudur (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Çimento hamurundaki boşluklar (Mehta and Monteiro, 2010)

1 cc çimento hidrate olduğunda yaklaşık 2.1 cc hidrasyon ürünü oluşmaktadır. Oluşan ürünün hacmi, hidrasyona giren çimento hacmine göre daha fazla olduğundan var olan kapiler boşluklar hidrasyon ürünü tarafından dolmaktadır. Oluşan hidrasyon ürünü ne kadar fazla olursa çimento hamuru içerisindeki kapiler boşluk oranı aynı oranda azalmaktadır. Hidrasyon reaksiyonu çimento tanelerinin yüzeyinde başlayarak çimento tanesinin merkezine doğru ilerlemektedir (Erdoğan, 2013).

1.5.2. Çimentolu sistemlerin işlenebilirliği ve kıvamı

Taze haldeki betonun kolayca karıştırılabilmesi, ayrışma göstermeden taşınabilmesi, yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilebilmesi betonun hangi ölçüde işlenebilir olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, bu özelliklerin tümüne "işlenebilme" adı verilmektedir. İşlenebilme, taze betonun uygun şekilde yerleştirilebilmesi için oldukça önemlidir. Çimento ve suyun oluşturduğu hidrasyon reaksiyonlarının hızı, çimento hamurunun sertleşme süresini belirleyen önemli bir etkidir (Erdoğan, 2013).

İşlenebilme özeliği, çimentolu karışımların yapısından dolayı aşığıda verilen özellikler ile ilgilidir;

- ✓ Taze haldeki çimentolu karışımlarda akmaya karşı gösterilen direnç (eşik kayma gerilmesi),
- ✓ Karışım akmaya başladıktan sonraki hareketlilik (viskozite),
- ✓ Karışımı meydana getiren malzemelerin birbirlerine ne oranda bağlanmış olması, dolayısıyla ayrışmaya karşı göstereceği direnç (kohezyon),
- ✓ Karışımın yerleştirebilmesini ve yüzeyinin düzeltilebilmesini etkileyen yapışkanlık.

Taze beton karışımının ıslaklık derecesine “kıvam” denilmektedir. Betonun kıvamı, beton karışımı içerisinde kayma kuvvetleri tarafından etkilenmektedir. Kıvam tanımı, taze beton karışımının kohezyonunu ve akıcılığını kapsamamaktadır. Taze beton karışımının kıvamı ve işlenebilirliği, su/çimento oranına, agreganın özellikleri ve çimento hamurunun yapısına bağlıdır (Erdoğan, 2013).

Çimento hamuru, çimento ve suyun bir araya gelmesiyle oluşan, yüksek oranda katı içeren bir süspansiyondur. Çimento hamurunun işlenebilirliği ve kıvamı, su/çimento oranına, çimentonun kimyasal kompozisyonuna, çimentonun tane boyu dağılımına ve hamur karışımının hava içeriğine bağlıdır. Bu etkenlere bağlı olarak çimento hamurunun eşik kayma gerilmesi ve viskozitesi değişkenlik göstermektedir (Mehta and Monteiro, 2006).

Harç karışımlarının işlenebilirlik ve kıvam özellikleri betonun özellikleriyle benzer olmakla birlikte betondan farklı olarak, nispeten daha çok çimento hamuru bulunduğundan, hamur kısmın özelliklerine daha çok bağlıdır.

1.5.3. Çimento hamurunun hidratasyonu ve katılaşması

Çimento hamurunun sertleşmesi ve dayanım kazanabilmesine yönelik iki klasik teori mevcuttur. Bunlardan ilki, Le Chatelier tarafından 1882 yılında ortaya atılmıştır. Bu teoriye göre, çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan ürünleri orijinal anabileşenlerinden daha az çözünme özeliğine sahiptir ve hidratlar aşırı doygun bir karışımdan çökelmektedir. Hidratasyon sonucu oluşan anabileşenlerin çökeltileri, yüksek kohezif ve adhesif özellikte dantel dokusuna benzer iç içe girmiş kristallerden oluşmaktadır. Diğer teori ise Michaelis tarafından 1893 yılında ortaya atılmıştır. Çimento hamurunun ilk dayanımı, sülfoalüminatlar, kristal alüminatlar ve kalsiyum hidroksit tarafından oluşmaktadır. Dolayısıyla, kirece doygun hale gelen su, silikatlarla reaksiyona girip erimeyen özellikteki kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jellerini meydana getirmektedir. Bu çok küçük, kolloidal boyutlara sahip hidratasyon ürünleri çok büyük yüzey alanına sahiptir. Çimento hamurunun kazandığı dayanım bu kolloidal boyutlardaki hidratasyon ürünleri arasında oluşan kohezyon sonucu oluşmaktadır (Erdoğan, 2013).

Çimento hamurunun dayanım kazanmasında hidratasyon sonucu oluşan ürünlerinin farklı oranlarda katkısı olmakla birlikte, dayanımın kazanılmasındaki en büyük etken C-S-H jellerinin oluşmasıdır. Hatta çimento hamurunun dayanım kazanmasının bu jellerin oluşmasından kaynaklandığını söylemek mümkündür. C-S-H jellerinin çimento hamuruna kazandırdığı dayanımın nasıl meydana geldiği açıklanamamakla beraber bu durumun iki tür bağ kuvvetinin oluşmasından olduğu düşünülmektedir. Bu bağ kuvvetlerinin ilki birbirlerine çok yakın olan (jel boşluğu kadar) çok küçük katı parçacıkların arasındaki fiziksel çekim kuvvetidir. Bu tür bağlar van der Waals bağları olarak isimlendirilmiştir. Diğer bağ kuvveti ise, van der Waals kuvvetlerinden çok daha güçlü olan kimyasal (kovalent ve iyonik) bağ kuvvetleridir. Oluşan jel parçacıkları bu tür bağdan ötürü dokuma örgüsü gibi çapraz olarak bağlanmaktadır (Erdoğan, 2013).

1.5.4. Hamur ve harçların reolojik özellikleri

Reoloji, maddenin deformasyon bilimi ve akışı olarak tanımlanır (Hackley and Ferraris, 2001). Sıvılar kendi akış eğrileri ile karakterize edilmektedir. Bu eğriler, basit sürekli kayma etkisi altında, kayma gerilmesi (

τ_0) ve deformasyon hızı arasındaki ($\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$) ilişkisinden elde edilmektedir.

En basit davranış, kayma gerilmesi ve deformasyon hızı arasında doğrusal bir ilişki bulunan Newton sıvısı davranıştır. Bu sıvının kayma gerilmesi Denklem 1.2'de gösterildiği gibidir:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad [1.2]$$

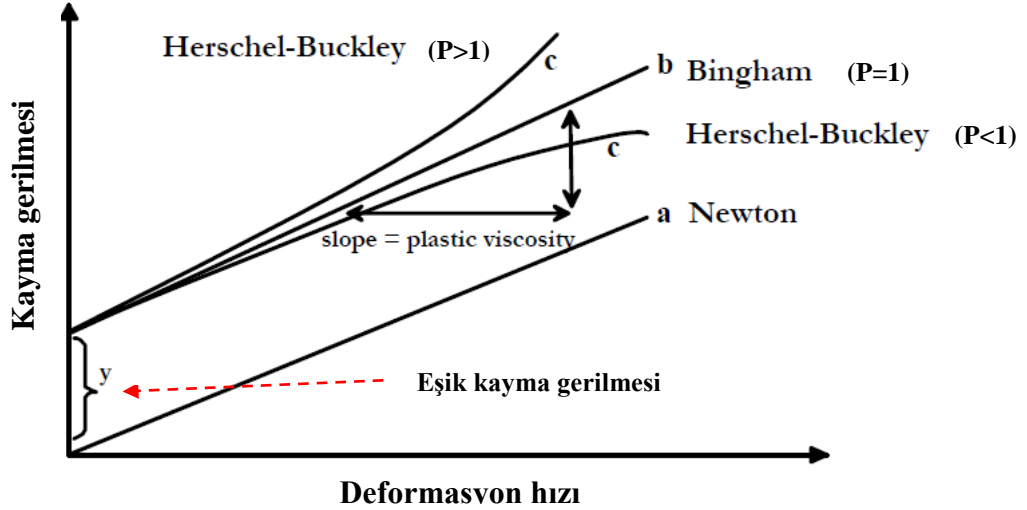
Bu denklemde, τ kayma gerilmesi, η viskozite katsayısı denilen orantılık sabiti ve $\dot{\gamma}$ deformasyon hızıdır. Şekil 1.10'da görüldüğü üzere bu davranışı belirlemek için ($\tau - \dot{\gamma}$) doğrusunda yalnızca tek bir nokta gereklidir. Ancak, çoğu sıvı Newtonyen değildir. Yani akış davranışını belirlemek için birden fazla nokta gerekmektedir (Şekil 1.10). Çimentolu sistemler viskoplastik süspansiyonlar olarak tanımlanabilir. Bu malzemeler, kritik gerilme değerinin altında (eşik kayma gerilmesi) bir katı madde gibi davranır, fakat bu gerilme değeri aşıldığında viskoz bir sıvı gibi akar (Hackley and Ferraris, 2001). Bu davranışın en basit örneği Denklem 1.3 ve Şekil 1.10'da gösterilen Bingham akış davranıştır (Koehler and Fowler, 2004; Schatzmann, 2005; Baradan, 2006).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad [1.3]$$

Burada, τ_0 eşik kayma gerilmesi, μ plastik viskozite $\dot{\gamma}$ ise, deformasyon hızıdır (Aitcin et al., 1994). Plastik viskozite, Bingham sıvısındaki ($\tau - \dot{\gamma}$) doğrusunun eğimidir. Birçok durumda, çimento hamuru, harç ve betonun akış davranışı bu formül ile ifade edilebilir. Eşik kayma gerilmesi, karışımı harekete geçirmek için gerekli olan kuvvetin ölçüsüdür (akışa karşı direnç). Plastik viskozite ise karışım yayılma hızının artışına karşı gösterdiği dirençtir (Punkki et al., 1996). Bununla birlikte, sıvılar her zaman bir doğrusal akış davranışı göstermezler. Bu durumlarda Denklem 1.4 ve Şekil 1.10'da gösterilen "Herschel-Bulkley" gibi doğrusal olmayan modeller uygulanabilir (Hackley and Ferraris, 2001; de Larrard et al., 1998).

$$\tau = \tau_0 + b \cdot \dot{\gamma}^p \quad [1.4]$$

Bu denklemede b ‘‘Herschel-Bulkley kıvam katsayısı’’, p ise ‘‘Herschel-Bulkley indeksi’’ olarak tanımlanmaktadır. Bu denklemde $P < 1$ ise deformasyon yumuşaması olarak adlandırılan ‘‘Pseudoplastik’’ davranış, P değeri 1’den büyük ise deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılan ‘‘Dilatant’’ davranış oluşmaktadır. P değerinin 1 ile eşit olduğu zaman model Bingham modeline dönüşmektedir (Huang et al., 1998; Hackley and Ferraris, 2001).



Şekil 1.10. Farklı akış davranışları: a) Newton akış davranışı, b) Bingham akış davranışı, c) doğrusal olmayan Herschel-Buckley akış davranışı (Griesser, 2002)

Bilindiği gibi, Newton sıvılarının davranışı üç farklı şekilde olabilir;

Psödoplastik (yalancı plastik) davranış: Akışkana uygulanan kayma gerilmesi arttıkça sıvının viskozite değeri düşmektedir. Bir başka deyişle düşük gerilme kuvvetleri etkidiğinde plastik, yüksek gerilme kuvvetleri etkidiğinde ise viskoz davranış göstermektedir (Schatzmann, 2005; Baradan, 2006).

Dilatant davranış: Bu tür sıvılarda psödoplastik davranışın tersine kayma gerilmesinin artışıyla viskozite değerinde de artış oluşmaktadır. Bu davranış psödoplastik davranışa göre daha seyrek görülmektedir. Su-kum karışımları, kil, şeker çözeltileri gibi süspansiyonlar dilatant davranış göstermektedir.

Plastik davranış: Bu davranışı gösteren akışkanlar statik gerilme altında katı madde davranışı gösterirler, ancak, belli bir düzeye ulaşan kayma gerilmesi etkidiğinde deformasyon göstermeye başlarlar ve akışkan davranış gösterirler. Akışkanın deformasyona uğramaya başladığı minimum kayma gerilmesine eşik kayma gerilmesi adı verilir. Plastik davranış gösteren akışkanlara eşik kayma gerilmesi değerinin üzerinde bir gerilme uygulandığında Newtonyen, psödoplastik veya dilatant davranış gösterebilirler (Schatzmann, 2005; Baradan, 2006).

Bunların yanında Newtonyen davranış göstermeyen akışkanlar, gerilmenin etki süresine (t) bağlı olarak iki farklı davranış gösterirler;

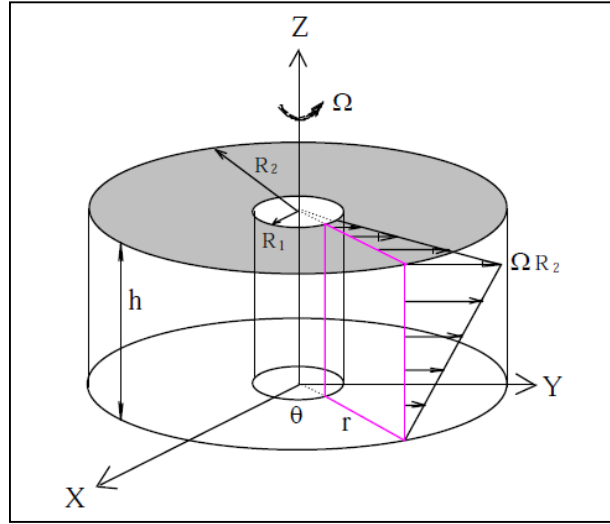
Tiksotropik davranış: Tiksotropik davranış gösteren akışkanlarda sabit bir deformasyon hızında (karıştırma hızı) viskozite zamanla düşmektedir. Taze beton tiksotropik davranış gösterir (Baradan, 2006). Reopektik davranışta ise Tiksotropik davranışın tersine sabit bir deformasyon hızında viskozite zamanla artış göstermektedir.

Koehler ve Fowler (2004) çimento esaslı kompozitlerde eşik kayma gerilmesini (EKG) dinamik ve statik olarak ikiye ayırmıştır. Roussel'e (2007) göre, EKG'nin statik ve dinamik olarak ikiye ayrılması, çimento esaslı kompozitlerin tiksotropik davranışının bir gereğidir. Statik eşik kayma gerilmesi, karışıma herhangi bir ön işlem uygulanmadan, karışım hazırlandıktan hemen sonraki eşik kayma gerilmesidir. Bu değer, karıştırma başlangıcından, karışımın ölçüm kabına yerleştirilmesine kadar geçen süreye oldukça bağlıdır. Statik EKG örselenmemiş karışımında kayma gerilmesi-zaman grafiğinde elde edilen en yüksek kayma gerilmesi değeridir. Ancak dinamik EKG, kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiğinde, eğrinin kayma gerilmesi-ksenini kestiği nokta olarak tanımlanır. Roussel'in (2007) beyanına göre dinamik EKG karışım özelliklerine bağlı olup kayma geçmişi vb. faktörlerden etkilenmez. Çünkü zaten verilen etki ile dengeye ulaşmış bir akma eğrisi oluşmuştur. Dinamik EKG hidrasyon gelişimi ile zamana bağlı olarak değişebilir. Ancak, kısa vadede hidrasyon etkisi ihmal edilebileceğinden, ilk saatlerde dinamik EKG'nin çok fazla değişmediği kabul edilebilir (Jarny et al., 2005).

1.5.4.1. Reolojik özelliklerinin ölçümü

Rotasyonel reometreler, Newton sıvısı olmayan akışkanların akış davranışını belirlemek için klasik bir laboratuvar cihazıdır. Günümüzde, farklı özelliklere sahip süspansiyonların reolojik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan birçok reometre tipi bulunmaktadır. Bazıları, sadece çimento hamuru ve harç süspansiyonları için [Viskomat (Larrard et al., 1993; Larrard et al., 1996)), diğerleride harç ve betonlar için (BTRHEOM (Larrard et al., 1993), IBB (Beaupré, 1994), BML (Wallevik; Wallevik and Gjør, 1990) ve iki-noktalı aparatı (Domone et al, 1999)] kullanılmaktadır.

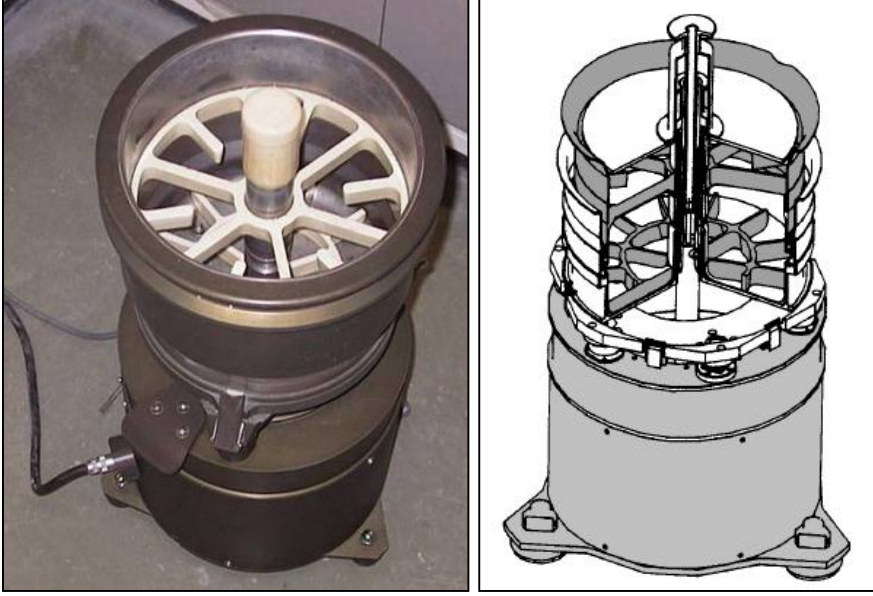
BTRHEOM paralel plakalı bir beton reometresidir. Beton sabit bir alt plaka olan silindirik bir kap içine yerleştirilir, betona gömülü bir üst plaka düşen ve artan hızlarda dönerken tork değeri ölçülür. Bu reometre, maksimum tane boyutu 25 mm, çökme değeri 100 mm'den fazla olan kendiliğinden yerleşen beton karışımı gibi yumuşak-akışkan beton için kullanılır. Bu reometre, boş bir silindirik kap içinde bir eksen etrafında döndürülen bıçaklar sistemi olarak tasarlanmıştır. Kap altında bulunan bir motor üst bıçak sistemini döndürür (Şekil 1.11 ve 1.12).



Şekil 1.11. BTRHEOM reometrenin prensibi

Böylece, üst bıçaklar ile ölçülen betonun akmaya karşı direncinden tork değeri elde edilir. Bu sistemde, reometrenin kontrol işlemi (dönme hızı Ω ve titreşimi), ölçümleri (tork ve dönme hızı) ve ham verilerden elde edilen reolojik parametrelerinin hesaplanması bir özel program ile yapılmaktadır.

BTRHEOM reometresinde, dönme hızı 0.63 rad/s (0.1 devir/s) ile 6.3 rad/s (1 devir/s) aralığında değişebilir ve maksimum ölçülebilen tork değeri 14 N.m'dir.

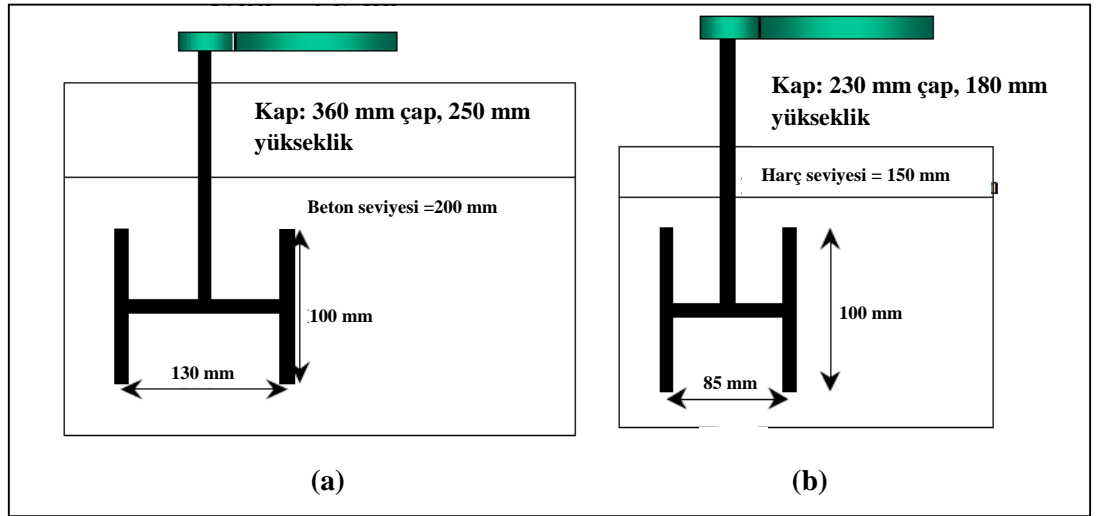


Şekil 1.12. BTRHEOM reometresinin üstündeki ve altındaki bıçakları

IBB reometresi Tattersall (Tattersall and Banfill, 1983) tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra Beaupré tarafından Kanada'da modifiye edilerek (1994), yüksek performanslı, ıslak yöntemi ile hazırlanan püskürtme betonunun davranışının incelenmesi için kullanılmıştır. Reometrede, veriler dönen bir koldan elde edilir. Bu sistemde, eşik kayma gerilmesi (N.m olarak) ve plastik viskozite (N.m.s olarak) elde edilmektedir. IBB reometresi bir akışkan ile kalibre edilir ve bundan dolayı, sonuçlar temel bilimlari ile değil göreceli olarak ifade edilir. Bu cihaz, 20 mm ile 300 mm çökme değerine sahip betonlar için kullanılabilir. KYB, yüksek performanslı, pompalanan, kuru ve ıslak yöntemle hazırlanan püskürtme, lifli ve normal beton karışımları için başarıyla kullanılmıştır. Cihazın genel görünüşü ve H şeklinde pervane (palet) ve kap detayları sırasıyla, Şekil 1.13 ve 1.14'te gösterilmiştir. Bu sistemde, beton karışımları için agreganın maksimum tane boyu 25 mm, harç karışımları için ise 12 mm dir.



Şekil 1.13. IBB reometresi



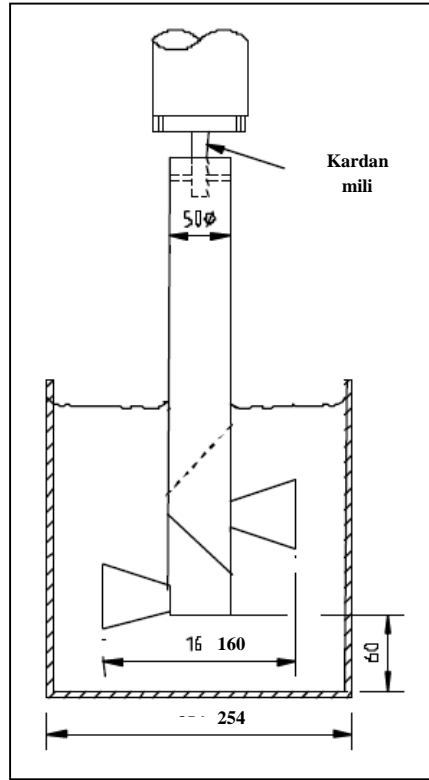
Şekil 1.14. IBB reometresinin kap ve palet detayları, a) beton karışımları, b) harç karışımları için uygun reometre

İki-noktalı reometre Tattersall ve Bloomer tarafından geliştirilmiştir (1979). Reometre, merkezi bir şaft etrafında helezoni bir desen geçen dört açılı bıçakları olan eksensel bir pervaneden oluşmaktadır. 10 mm üzerinde çökme değerine sahip betonlar için kullanılır. Şekil 1.15 ve 1.16'da sırasıyla, reometrenin genel görünümü ve palet detayları gösterilmektedir. Bu yöntemde pervane değişik hızlarda bir hidrolik motor tarafından döndürülür. Tork değeri yağ basıncı vasıtasıyla ölçülür. Yağ basıncı ve tork değeri

arasındaki doğrusal ilişki kalibrasyon yaparken daha önce elde edilir ve o ilişki dikkate alınarak tork değeri hesaplanır (Tattersall and Banfill, 1983).



Şekil 1.15. İki-noktalı reometrenin genel görünümü



Şekil 1.16. İki-noktalı reometrenin kap ve palet özelliği (mm cinsinden)

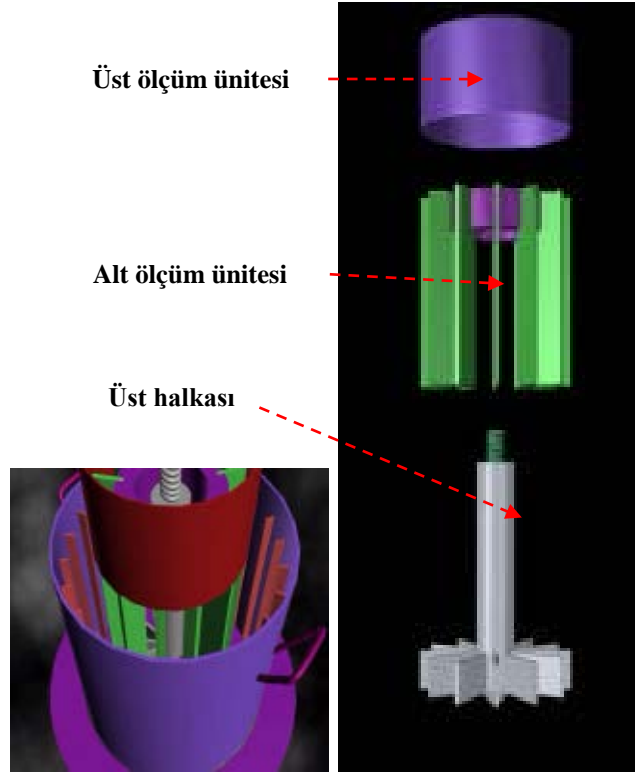
BML sistemi, çimento hamuru, sıva, harç, çimento bazlı tamir malzemeleri ve beton gibi süspansiyonlar için kullanılan bir eş-eksenli silindirik reometresidir. Bu sistemde, dış silindir değişken bir açısal hızla dönerken iç silindir tork değerini ölçer (Tattersall and Banfill, 1983). Bu sistem, 1987

senesinde Norveç'te Tattersall'ın iki-noktalı reometre üzerinde altı sene yoğun çalışmalarından sonra geliştirilmiştir (Wallevik; Wallevik and Gjorv, 1990). Şekil 1.17'de beton ve harç karışımları için kullanılan BML reometreleri gösterilmektedir. Şekil 1.17-a'da beton karışımları için kullanılan reometre, Şekil 1.17-b'de ise ağırlıklı olarak harç ve çok akışkan beton karışımları için kullanılan daha küçük boyutta tasarlanan reometre gösterilmektedir.

Bu sistemde her deney yaklaşık olarak 3 ila 5 dakika arasında sürmektedir. Şekil 1.18'den de görüldüğü üzere, bu tip reometrenin iç silindir kısmı üç farklı bölümden oluşmaktadır; bunlar, üst ölçüm ünitesi, alt ünite ve üst halkasıdır. Tork üst ünitesinin dönmesinden elde edilmektedir. Alt birim, "alt etkileri" ortadan kaldırmak veya en aza indirmek için kullanılmaktadır. "Alt etki" kabın alt plakasında oluşan kesme gerilmesi etkisi anlamına gelmektedir.



Şekil 1.17. BML reometresi, a: beton karışımları için uygun, b: harç ve çok akışkan beton karışımları için uygun



Şekil 1.18. BML reometresinin iç silindiri

Tez kapsamında açıklanan reometrelerde pervanenin farklı hızlarda dönmesi ile bir tork değeri ölçülür. Bu tork değeri ve dönme hızı arasındaki ilişki, Bingham akış davranışı ile matematiksel olarak aynı olduğu gösterilmiştir. Bu ilişki Denklem 1.5'te verilmektedir.

$$T = g + h.R \quad [1.5]$$

Burada, T tork değeri, R dönme hızı, g eşik kayma gerilmesi (τ_0) ve h ise plastik viskozitesi (μ) ölçüsüdür. Bu denklemin Denklem 1.3'e dönüştürülmesi için, malzemenin üç boyutlu kesilmesi, dönme hızının bir fonksiyonu olarak bilinmesi gerekir. Komplike test geometrileri için (örneğin rotasyonel viskozimetre harç paleti) bu bilgi mevcut değildir. Bu durumda, reometrenin geometrik tasarımına bağlı olarak eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değeri göreceli olarak (Nm, Nmm; Nms, Nmm.s gibi birimler ile) veya temel birimi olarak (Pa, Pa.s gibi) ifade edilebilir.

1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, farklı C_3A oranlarına sahip CEM I portland çimentoları ve süperakışkanlaştırıcı katkı uyumu incelenmiştir. Çimentolu sistemlerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerini etkileyen çimento-akışkanlaştırıcı katkı etkileşiminden kaynaklanan olumsuzlukların belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması iki aşamadan oluşmuştur. Birinci aşama, çimento-katkı uyumunu etkileyen parametrelerin belirlenmesidir. Uyumsuzluk parametrelerinin belirlenmesi amacı ile Bolu Çimento, İstanbul Nuh Çimento, İzmir Çimento, Söke-Batıçim ve İzmir Batıçim ürünü olmak üzere 9 adet normal portland çimentosu temin edilmiştir. Bu çimentoların kimyasal kompozisyonunun geniş bir yelpazede olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca piyasada mevcut 3 adet polikarboksilat esaslı katkı da temin edilmiştir. Bu aşamada, farklı katkı dozajlarında su azaltıcı katkı kullanarak 226 hamur karışımı hazırlanarak bunların Marsh-hunisi akış süresi ve mini çökme değeri elde edilmiştir. Sonuçta bazı çimentolar ile katkıların uyumsuz olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, katkı-çimento bileşiminin davranışını tam olarak anlamak için karışımların statik ve dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozitesi gibi parametrelerin belirlenmesinin gerekli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, üç farklı S/Ç oranında ve üç farklı katkı dozajında su azaltıcı katkı kullanarak toplamda 243 hamur karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımların reolojik özellikleri belirlenmiştir. Uyumsuzluk parametreleri tanımlandıktan sonra çok değişkenli regresyon programı yardımı ile çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler etki şiddeti açısından belirlenmiştir. Bu istatistiksel hesaplamada, çimento inceliği, çimentonun C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF ve eşdeğer alkali içeriği, su azaltıcı katkı miktarı, katkının katı madde oranı ve su miktarı gibi parametreler dikkate alınmıştır. İstatistiksel analizler 4 aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, faktör analizi ile etken parametreler belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü aşamada sırasıyla, doğrusal olmayan regresyon ve yapay sinir ağları yöntemi ile veri girdi-çıkışı ilişkisi kurulmuştur. Dördüncü ve son aşamada duyarlılık analizi ile etken parametreler belirlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında ise, birinci aşamada belirlenen çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler çimento hamur, harç ve beton karışımlarında detaylı incelenmiştir. Sonuçta, çimento-katkı uyumunda

çimento içeriği, C_3A ve eşdeğer alkali içeriğinin etken parametreler olduğu saptanmıştır. Tezin ikinci aşamasında bu parametrelere ilaveten çimento üretimi esnasında klinkere eklenen alçıtaşı türünün uyum üzerine etkisi de araştırılmıştır. Bu bağlamda, çimento hamurlarında mini-yayılma, Marsh-hunisi akış süresi ve reolojik özellikleri, harç karışımlarında katkı ihtiyacı, zaman içerisinde yayılma kaybı, V-hunisi akış süresi, zamana bağlı akış kaybı, reolojik özellikleri ve 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Beton karışımlarında ise, hava içeriği, sertleşmiş ve taze birim hacim ağılığı, çökme, yayılma, zaman bağlı çökme ve yayılma kaybı ve 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı belirlenmiştir. Ayrıca, alçıtaşı türünün harç ve beton karışımlarının kuruma-büzülmesine etkisi de incelenmiştir. Sonuçları daha kolay yorumlayabilmek amacı ile seçilen bazı karışımlarda XRD analizleri yapılarak oluşan etrenjit ve monosülfoalüminat ürünleri hakkında daha detaylı bilgiler elde edilmiştir.

2. KONU İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Günümüzde, betona artan ihtiyaç ve beton teknolojisinin gelişimiyle beraber üretilen katkı ve çimento türleri artmaktadır. Beton üretiminde kimyasal katkıların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Artık katkısız beton üretmek mümkün olmadığı söylenmesi abartılmış bir ifade değildir. Bilindiği gibi, su azaltıcı katkılar çimento esaslı karışımlarda yarattığı olumlu etkilerin yanında bazen, olumsuz etkilere de neden olabilmektedir. Bu olumsuz etkilerden dolayı, karışımlarda istenilen özellikleri elde etmek imkânsız veya çok maliyetli olabilmektedir. Bu sebeple, beton üretiminde kullanılan çimento ve katkı arasında uyum sağlanması ciddi derecede öneme sahiptir. Son zamanlarda, beton teknolojisi konuları ile ilgilenen araştırmacılar söz konusu olumsuzlukları etkileyen faktörleri ortadan kaldırmak için epey çapa göstermiştir. Literatürde, kullanılan katkının çimento ile uyumlu olup olmadığı ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Ama etkileyen faktörlerin sayısı fazla olduğundan, henüz bu konu ile ilgili kesin bir kanıya varılmamıştır. Bu başlık altında, konu ile ilgili daha önce gerçekleştirilen çalışmalar özetlenmiştir. Ancak, konuya daha detaylı odaklanmak için çimento-katkı uyumunu etkileyen faktörler ayrı ayrı verilmiştir. Bunlar; çimentonun C_3A ve alkali içeriği, çimentonun prizini kontrol etmek için klinker ile birlikte öğütülen alçı türü ve miktarı, çimentonun inceliği ve katkı kaynaklı faktörlerdir.

C_3A içeriğinin etkisi

Dalasa ve arkadaşları (2015), C_3A - $CaSO_4$ erken hidrasyonu sırasında polikarboksilat eter-esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanımıyla beraber etrenjit oluşumu ve yüzey alanı oranının değişimini incelemiştir. Bu amaçla, 2 farklı polikarboksilat eter-esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı farklı oranlarda kullanılmıştır. Hidratasyon ve yüzey alanı gelişimi, karışım hazırlanmasından hemen sonra 2 saat boyunca BET ve DSC (diferansiyel tarama kalorimetrisi) ile birlikte NMR (nükleer manyetik rezonans) relaksometresi ile incelenmiştir. Etrenjitin miktarı ve özgül yüzey alanı, C_3A - $CaSO_4$ hidrasyonu boyunca, katkılı ve katkısız durumlarda sayısal kıyaslama ile incelenmiştir. Sonuçta, her iki su azaltıcının eklenmesiyle etrenjitin oluşumu az da olsa bir miktar yavaşlamıştır. Etrenjitin yüzey alanı ilk 30 dakikada çok

fazla artmıştır, özellikle ilk 5 dakika boyunca aşırı etrenjit çökmesine bağlı olarak özgül yüzeyi alanı oldukça artış göstermiştir.

Polikarboksilat ve naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcı katkıların sentetik kübik ve ortorombik C_3A bileşeni üzerinde adsorpsiyonu Alonso ve Puertas (2015) tarafından incelenmiştir. Aynı zamanda bu katkıların sülfatların yüzeyine tutunması da incelenmiştir. Bu amaçla, üç farklı ana zincir uzunluğuna sahip üç adet polikarboksilat esaslı (zincir uzunluğuna göre sıralama $PC1 > PC2 > PC$) ve bir adet naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Sonuçlara göre, katkıların yapısı ve karışımında var olan sülfat miktarı, katkının C_3A yüzeyine tutunmasını etkileyen en önemli faktörler olmuştur. Ortorombik yapıda olan C_3A bileşeni, sistemde sülfat varlığında aşırı derecede tepkimeye girdiği ve bu yüzden katkıyla afinitesinin azaldığı bildirilmiştir. Çözünür sülfatların varlığında katkının eklenmesiyle kübik yapıda olan C_3A 'nın tepkimesinin azaldığı açıklanmıştır. Ortorombik yapıda olan C_3A 'nın hidratasyon pik değerine süperakışkanlaştırıcı katkının hiç bir etkisi olmamıştır. Ortorombik yapıdaki C_3A 'nın, kübik yapıda olana kıyasla katkı adsorpsiyonunun çok daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, süperakışkanlaştırıcıların ortorombik yapıda olan C_3A üzerinde daha kısıtlı bir etkisi olduğu söylenmiştir. Çözünür sülfatın yokluğunda, polikarboksilat eter-esaslı katkı ana zincir uzunluğunun artışıyla, C_3A üzerindeki adsorpsiyonu artmıştır. Çözünür sülfatların varlığında, polikarboksilat esaslı katkının, sülfatın kübik C_3A bileşeni ile ilgili yarışması, sülfat konsantrasyonu ve katkı yapısına bağlı olduğu öne sürülmüştür. Bu yarışmada en başarılı katkı, ana zincir uzunluğu en fazla olan $PC1$ olmuştur. Kübik yapıda olan C_3A için katkı-sülfat kapışması naftalin esaslı katkılarda polikarboksilat katkıya kıyasla daha kuvvetli ve yoğun olmuştur.

C_3A miktarının portland çimentosu ve portland kalkerli çimentolu harçlarında sülfat saldırısına etkisi Ashlee ve arkadaşları (2015) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, orta C_3A (%8-9) ve yüksek C_3A (%11-12) içerikli 2 adet klinker kullanılmıştır. Düşük C_3A 'lı klinker, ağırlıkça %4 ve %15 olmak üzere iki farklı oranda kireçtaşı ile öğütülmüştür. Yüksek C_3A 'lı ise, %4 ve %10 oranında kireçtaşı ile öğütülmüştür. Her bir çimento da F tipi uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkı kullanarak 3 farklı bağlayıcı maddesi hazırlanmıştır. 1. seride %100 çimento, 2. seride %20 uçucu kül ağırlıkça çimento ile ikame edilmiştir. 3. seride ise, %20 kül ve %5 silis dumanı

ağırlıkça çimento ile yer değiştirmiştir. Hazırlanan 12 çeşit bağlayıcı kullanılarak harç karışımları hazırlanmıştır. Karışımların %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 5 v 23 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta genleşmeleri incelenmiştir. Sülfat saldırısı kaynaklı hasar, yüksek C₃A'lı çimentodan üretilen harç karışımlarında orta C₃A'lı karışıma göre daha erken ortaya çıkmıştır. Dış sülfat etkisi 5 °C 'deki kürlenme koşulunda 23 °C'ye göre daha hızlı bir şekilde meydana gelmiştir. Kireçtaşı miktarının dış sülfat saldırı hızına etkisi olmadığı deney sonuçlarından anlaşılmıştır. F tipi uçucu külün çimentoyla ikamesi hem 23 hem de 5°C koşulunda karışımın sülfat saldırısına karşı direncini arttırmıştır. Silis dumanın eklenmesiyle 5 °C'lik ortamda sülfat saldırısına karşı belirgin bir direnç artışı görülürken, 23 °C'deki etkisi azalmıştır. 5°C'lik ortamda ortalama miktarda C₃A içeren çimentoyla hazırlanmış harç çubukları, yüksek miktarda C₃A içeren harçlara göre sülfat saldırısına karşı daha dayanıklı olmuştur. Ancak, 23°C'lik çözeltilerde bunun tersi gözlemlenmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı katkının karışıma eklenme sırasının organo-mineral fazlarının oluşumunda alkali-sülfat ve C₃A miktarının rolü Habbaba ve arkadaşları (2014) tarafından incelenmiştir. Bilindiği gibi, çoğu zaman katkının karışım suyu ile birlikte eklenmesi yerine, karışımı tamamlanmış taze betona eklenmesi, katkının dispersiyon etkisini önemli derecede arttırmaktadır. Bu çalışmada söz konusu etki incelenmiştir. Bu amaçla, 6 adet ticari çimento, 4 farklı polikarboksilat ve tek tip naftalin esaslı katkı kullanılmıştır. 6 adet çimentoya erken ve gecikmiş katkı eklenmesi yapılarak hamur karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan hamurların yayılması ölçülmüştür. Dört farklı polikarboksilat ve tek tip naftalin esaslı katkının C₃A içeriği farklı olan hamur karışımlarının yayılmasına etkisi incelenmiştir. Sonuçta, çimentonun C₃A miktarı ve alkali-sülfatların ortamdaki varlığı taze hal özeliği açısından önemli rolü olduğu söylenmiştir. Düşük alkali-sülfat/C₃A oranına sahip çimentolarda erken ve gecikmeli katkı eklenmesi, hamur karışımlarının akışkanlığını ciddi mertebede etkilemiştir. Yazarlara göre, süperakışkanlaştırıcı katkının C₃A hidratlarına kimyasal olarak tutunması buna neden olmuştur. Ancak, yüksek alkali sülfat/C₃A oranında baskın olarak etrenjit olduğundan, katkının kimyasal olarak tutunmasının imkânsız olduğu, bu yüzden, katkının erken veya gecikmeli eklenmesi yayılma değerini etkilemediği açıklanmıştır.

Süperakışkanlaştırıcı ve çimento kompozisyonunun taze ve sertleşmiş beton arasındaki adezyon kuvvetine etkisi Rees ve arkadaşları (2013) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, normal portland çimentosu (CEMI 42.5R) ve sülfata dayanıklı portland çimentosu (CEMI 42.5R-HS) olarak 2 adet çimento ve birer adet naftalin ve polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Taze ve sertleşmiş beton arasındaki adezyon kuvveti, bir aylık sertleşmiş beton çubuklarla, taze betondan salınan boşluk çözeltisinin emiliminin ölçülmesiyle ve agrega-hamur arasındaki ITZ bölgesi üzerinde gerçekleşen SEM analizleri ile incelenmiştir. Önceki çalışmalardan bilindiği üzere, çimento kompozisyonu, süperakışkanlaştırıcı ve eski betonun yüzeyinin pürüzlülüğü eski ve taze beton arasındaki kohezyon dayanımını etkilemektedir. Sonuçta, adezyon bağının ciddi mertebede çimento boşluk çözeltisindeki yüzey geriliminde ve çimento C₃A miktarından etkilendiği söylenmiştir. Süperakışkanlaştırıcıların yüksek kaliteli adezyon bağı elde etmek için kaçınılmaz bir etken olduğu, bu katkılar çimentonun topaklaşmalarını engelleyerek küçük çimento tanelerinin ITZ'e ulaşmasına neden olduğu bildirilmiştir. En fazla çimento tanelerinin ITZ'e ulaşması için süperakışkanlaştırıcının boşluk çözeltisi yüzeysel gerilmesini azaltmasının gerekli olduğu, çünkü kapiler emme kuvvetinin çok düşük olduğu durumlarda çok az miktarda boşluk çözeltisi ITZ'e sızabileceği açıklanmıştır. Bu mekanizmaya dayanarak taze betonda kullanılan çimentonun C₃A miktarının önem kazanmadığı, sülfata dayanıklı çimento-polikarboksilat kombinasyonundan oluşan karışım ve eski beton arasında gözlemlenen zayıf bağın bundan kaynaklandığı rapor edilmiştir. Ancak, naftalin esaslı katkı kullanımında adezif dayanımı çimentonun kompozisyonundan bağımsız olduğu beyan edilmiştir.

C₃A-alçı hidratasyonu Quennoz ve arkadaşları (2012) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, farklı alçıtaşı kullanarak C₃A-alçıtaşı sisteminin hidratasyonu, mikro-yapısal gelişme kinetikler ve faz bileşenleri açısından incelenmiştir. Alçının tükenmesinden sonra başlayan reaksiyon dikkate alınmıştır. XRD sonuçlarına göre, alçıtaşının tükenmesi etrenjit ile C₃A'nın çözülmesiyle monosülfo alüminat ve/veya hidroksi Afm fazları (alümina, ferrik oksit ve monosülfat) hızlıca oluşmuştur. Kalorimetrik gözlemlerden, farklı alçıtaşı kullanımıyla, hidratasyon hızını kontrol eden mekanizma Afm fazlarının çekirdeklenmesi ve büyümesi olduğu söylenmiştir. Afm fazlarının sadece C₃A taneleri arasındaki boşluklarda değil, aynı zamanda C₃A taneleri

sınırları içinde de olduğu mikro-yapı analizlerinden anlaşılmıştır. Bunlara ilaveten, C₃A ve alçıtaşının tepkimesinin birinci aşamasından alınan sonuçlara göre, C₃A'nın özgül yüzey alanı hidrasyon hızını ciddi mertebede etkilediği beyan edilmiştir.

Kalsiyum lignosülfonatın C₃A-anhidrit sisteminin hidrasyonuna etkisi Wang ve arkadaşları (2012) tarafından incelenmiştir. Akışkanlaştırıcı ve geciktirici olarak kullanılan kalsiyum lignosülfonat (CL) çoğu zaman anhidrit içeren portland çimentolarında hızlı prize yol açtığı bilinmektedir. Bu sorunun nedenlerini araştırmak için C₃A-anhidrit sisteminin hidrasyon özellikleri CL ile doymuş ve CL içermeyen Ca(OH)₂ çözeltisinde iki yönden incelenmiştir. Bunlar, sıvı faz bileşenleri ve hidrasyon ürünlerinin oluşumudur. Sonuçta, hidrasyonun ilk aşamalarında CL katkısı etrenjit oluşumunu desteklediği bu nedenle sülfat iyonu konsantrasyonunda ciddi bir azalmaya neden olduğu açıklanmıştır. Kalsiyum sülfat doygunluk oranının düşmesiyle, CL'in varlığında etrenjit kristallerinin boyutları büyümüştür. Hidrasyonun ilk anlarında, C₃A ve anhidrit tepkimesinin hızlanması nedeniyle CL'in varlığı sistemde hızlı prize neden olmuştur. CL'in eklenmesiyle, C₃A-anhidrit sisteminin likit fazındaki SO₄²⁻ konsantrasyonu ve CaSO₄ doygunluk oranı, Ca²⁺ konsantrasyonunun artmasına rağmen, özellikle hidrasyonun ilk anlarında düşmüştür. SO₄²⁻ ve Ca²⁺ konsantrasyonlarındaki değişikliklerle uyumlu olarak CL'in varlığında C₃A-anhidrit sisteminde etrenjit oluşumunun hızlandığı XRD ve TG analizlerinden anlaşılmıştır.

Geciktirici katkının aminosülfonik asit-esaslı (AS) süperakışkanlaştırıcı katkı içeren hamur karışımlarının akışkanlığına etkisi Guoxin ve arkadaşları tarafından (2012) incelenmiştir. Geciktirici katkı olarak sodyum glukonat (SG) ve sitrik asit (CN) kullanılmıştır. Hazırlanan hamur karışımlarının yayılması ve iki saat boyunca yayılma kaybı incelenmiştir. Uygun dozda SG kullanımı sadece AS kullanılan duruma göre çimento hamurunun işlenebilirliğini daha olumlu etkilemiştir. Ancak, aynı koşullarda CN kullanımı karışımın işlenebilirliğini iyileştirememiştir. Mekanizmayı daha iyi anlamak amacı ile her mineralin ve çimento parçacığının üzerinde tutunan AS miktarı, C₃A-alçıtaşı hamurundaki etrenjit oluşumu ve C₃A'in hidrasyon derecesi AS'nin varlığında ve farklı dozlarda SG ve CN içeren karışımlarda morötesi spektrometre ve termogravimetrik (ısıl ağırlık ölçümsel çözümleme) analizleri ile incelenmiştir. Sonuçlara göre, SG'nin yukarıda sıralanan özellikler

üzerinde etkisi CN'ye kıyasla daha zayıf olmuştur. Buna ek olarak SG, C₃S'in hidrasyonunu yavaşlatmıştır. Böylece, AS içeren hamur karışımlarının işlenebilirliğini iyileştirmiştir. Geciktirici ve AS arasından C₃S, C₂S ve C₄AF-alçı üzerine adsorblanma yarışmasından dolayı, her iki geciktirici (SG ve CN) AS'nin adsorbe oranını azaltmıştır. Tam aksine, çok fazla etrenjit oluşumundan dolayı C₃A-alçıtaşının yüzeyine tutunan AS miktarının arttığı, bu bağlamda, SG'nin CN'ye kıyasla daha zayıf bir etkisi olduğu açıklanmıştır.

Süperakışkanlaştırıcı katkının, C₃S ve C₃A bileşeni hidrasyon ürünlerinin karbonatlaşmaya karşı direncine etkisi He ve arkadaşları (2012) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, polikarboksilat (PA), naftalin (NS) ve aminosülfonat (AS) esaslı 3 adet süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. İlk olarak, portland çimentosu bileşeni mineralleri (C₃S ve C₃A), sırasıyla, CaCO₃.SiO₂ ve Al₂O₃'den sentezlenmiştir. Bu örnekler, ham maddelerinin sırasıyla, 1550 ve 1350⁰C'de reaksiyonu sonrası hızlı soğuma ile sentezlenmiştir. Bu malzemelerin mineralojik bileşenleri XRD analizi ile tespit edilmiştir. Katkıların, C₃S ve C₃A hidrasyon ürünlerinin kristal morfolojisi ve karbonatlaşması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her üç katkı, C₃S ve C₃A hidrasyon ürünlerinin karbonatlaşmaya karşı direncini arttırmış, fakat bu bağlamda katkıların performansının farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu olayın arkasındaki mekanizmayı anlamak için CaCO₃, Ca(OH)₂ ve etrenjitin miktarı ve kristal morfolojisi TGA ve SEM kullanarak araştırılmıştır. Süperakışkanlaştırıcıların kalsiyum kompleksi ile oluşmaları da X-ışını foto elektron spektroskopisi (XPS) ile tahmin edilmiştir. PA, anti-karbonatlaşma yeteneği açısından en başarılı olmuştur. SEM analizlerine göre, C₃S hidrasyon ürünlerinin kristal morfolojisi çok sıkışmış ve köşeleri belirsiz hale geldiği açıklanmıştır. Süperakışkanlaştırıcı varlığında CO₂ ile reaksiyon gösteren C₃S ara yüzeyi, akışkanlaştırıcı içermeyen duruma göre daha küçük olmuştur. Bu durum, süperakışkanlaştırıcının etrenjit kristalleri üzerine adsorbe olarak büyümesini engellediğinden kaynaklandığı bildirilmiştir. Ayrıca, etrenjitin morfolojisi katkı eklendikten sonra değişmiştir. PA molekülü Ca²⁺ ile birleşerek; dallanmış zincir hidrasyon ürünleri ile karışmıştır. Çimento taneleri üzerinde yoğunlaşan etrenjitin bu taneleri birbirine bağladığı açıklanmıştır. Dolayısıyla, hidrasyon ürünleri daha sık hale gelerek karbonatlaşma direncini artırmıştır. Her numunenin kalsiyum profili bağlanım enerjisi ölçümünden kalsiyum iyonunun kalsiyum sülfonat formunda olan NS ve AS molekülüne bağlı olduğu, kalsiyum

kompleksi biçiminde olan PA molekülüne bağlanan karboksil ve hidroksil gurupları ile bir şelat bileşeni oluşturduğu, böylece, kalsiyum iyonlarının karbonatlaşma reaksiyonuna girmesini azalttığı veya engellediği bildirilmiştir.

C₃A, silis dumanı ve naftalin sülfonat süper akışkanlaştırıcı katkı arasındaki etkileşim yüksek performanslı beton karışımlarında Kadri ve arkadaşları (2009) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, aynı Blaine inceliğine (4000 cm²/g) ve aynı C₃S oranına sahip birer adet normal portland ve sülfata dayanıklı portland çimentosu kullanılmıştır. Normal çimentonun C₃A içeriği %10'iken sülfata dayanıklı çimentonun C₃A içeriğinin %2 olduğu, her iki çimento da doğal alçıtaşı kullanıldığı vurgulanmıştır. Çimento ağırlığının %0, 10, 20 ve 30'ü kadar silis dumanı ikame edilerek toplamda 16 beton karışımı hazırlanmıştır. Karışımların çökme değerleri 185 ± 25 mm olarak hedeflenmiştir. Söz konusu çökmeyi sağlamak amacı ile %0.4-%2.8 arasında farklı miktarlarda naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, C₃A bileşeninin fazla olması katkı ihtiyacını arttırmıştır. Bu olayın, kimyasal etkileşimi sonucu oluşan organo minerallerin katkı moleküllerinin artan adsorpsiyonundan kaynaklandığı düşünülmüştür. Yazarlara göre, çimentonun bir kısmı yerine kullanılan silis dumanı ve naftalin sülfonat esaslı katkı arasındaki etkileşim iki etki oluşturmuştur: 1) dilüsyon (seyrekleşme) etkisinden katkı ihtiyacının azalması, 2) silis dumanı ikamesinden kaynaklanan yüzey alanı etkisinden su ihtiyacının artması. Bu zıt etkilerden dolayı, beton karışımlarında hedeflenen çökme değerini sağlamak için, optimum ikame oranının belirlenmesinin gerekli olduğu bildirilmiştir. Daha yüksek C₃A miktarına sahip karışımlarda daha yüksek bir hidrasyon ısısı oluşmaktadır. Silis dumanının çimento ile kısmi ikamesi, C₃S bileşeni durgunluk devresini kısalttığı söylenmiştir. Yüksek C₃A miktarına sahip çimento içeren karışımda, betonun erken yaştaki dayanımının daha yüksek olduğu rapor edilmiştir.

Aytaç (2006) yapmış olduğu çalışmada, portland çimentosu kompozisyonunun akışkanlaştırıcı katkı performansına etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmada, Türkiye'nin çeşitli çimento fabrikalarından temin edilen 18 adet CEMI 42.5, 1 adet SDÇ 32.5 ve 1 adet BPC 42.5 tipi çimento ile farklı firmalar ürünü olan 4 adet naftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Hazırlanan hamur karışımları üzerinde "Marsh Hunisi" ve "Mini Çökme" deneyleri yapılarak akış süresi ve yayılma değerleri elde

edilmiştir. Sonuçta, başlangıç akışkanlığının, çimentonun $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$ oranı ve C_4AF miktarı ile ilgili olduğu söylenmiştir. $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$ oranının artışı akış sürelerinin azalmasına sebep olurken, C_4AF oranının artışı akış sürelerinin artmasına neden olduğu bildirilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı özelliklerinin başlangıç akışkanlığa etkisinin, çimento kaynaklı etkilere göre çok önemsiz mertebede olduğu ifade edilmiştir. Kıvam kaybı ise hem çimento hem de süperakışkanlaştırıcıların özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği vurgulanmıştır. $C_3A/Na_2O_{eşdeğeri}$ oranının göreceli olarak yüksek değerler alması kıvam kayıplarını azalttığı beyan edilmiştir.

Çimento-süperakışkanlaştırıcı katkı uyumu bir istatistiksel çok-amaçlı optimizasyon programı desteği ile Grabiec ve Piasta (2004) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, C_3A oranı %4, 7.5 ve 11 olmak üzere 3 portland çimentosu kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı olarak melamin formaldehit esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Optimizasyonda, S/Ç oranı, C_3A oranı ve katkı miktarı dikkate alınmıştır. Sonuçta, C_3A miktarının az olması çimento-katkı uyumunu olumlu etkilediği gözlemlenmiştir.

Diğer parametreler

Belit içeriği yüksek sülfü alüminat çimentosu ile polikarboksilat esaslı katkının priz süresi ve hidrasyon özellikleri açısından uyumu Ma ve arkadaşları (2014) tarafından araştırılmıştır. Bu çimentoyu üretmek için ilk başta %60.58 kireçtaşı, %31.21 alümina içeriği yüksek uçucu kül ve %8.21 kükürtsüzleştirilmiş alçıtaşı karışımı kullanılmıştır. Daha sonra bu karışım su ile karıştırılıp $40 \times 25mm$ boyutunda bir disk kalıbına 15 MPa basınç ile preslenmiştir. Diskler fırında kurutulduktan sonra 60 dakika boyunca $1320^{\circ}C$ sıcaklıkta bir Si-Mo çubuğu dirençli fırın içerisinde kalsine edilmiştir. Sinterlenmiş klinker hemen sonra fırından çıkarılmış ve basınçlı hava ile hızlı soğutulmuştur. Klinker örnekleri $80\mu m$ elekten elenerek, elekten geçen klinker 90/10 oranı ile alçı ile karıştırılarak belit içeriği yüksek sülfü alüminat çimentosu hazırlanmıştır. Söz konusu çimentonun, erken yaşlarda hızlı priz alma sıkıntısını çözmek amacı ile polikarboksilat esaslı katkı kullanarak priz süresi ve mekanik performansı incelenmiştir. Sonuçlar, priz süresinin, özellikle priz başlama süresinin, süperakışkanlaştırıcı katkı miktarına bağlı olduğunu göstermiştir. Katkı kullanım dozajı çimento ağırlığının %0.75'ini geçtikten sonra priz başlama süresinde önemli miktarda gecikme

gözlemlenmiştir. Katkı kullanımı erken yaş dayanımlarını düşürürken 28 günlük dayanımlarda artışa neden olmuştur. Katkı miktarı artışıyla, çimentonun katkı adsorpsiyon kapasitesi artmıştır, ancak, adsorpsiyon hızı azalmıştır.

Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı ile katkılı çimento uyumu Alonso ve arkadaşları (2013) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, bir adet CEMI 42.5R tipi çimentosuna ilaveten kireçtaşı, uçucu kül ve cüruf içerikli birer adet CEMII çimentosu kullanılmıştır. Çimento-katkı arasındaki uyum, adsorpsiyon, zeta potansiyeli, reolojik ve kalorimetrik metotları ile incelenmiştir. Adsorpsiyon eğrisi sonuçlarına göre, katkı içerisinde polikarboksilat guruplarının büyük bir yüzdesi daha yoğun bir biçimde çimento hamuru üzerinde adsorbe olmuştur. Ayrıca, katkıların, en fazla kireçtaşı olmak üzere, mineral katkıları üzerinde de adsorbe olduğu gözlemlenmiştir. Reolojik özellikleri açısından, optimum karboksilat gurubu/ester gurubu oranı 0.7 ile 1.2 arasında olduğu tespit edilmiştir. Katkının çimento hamuru üzerindeki sıvılaştırma etkisi mineral katkıların varlığına bağlı olduğu söylenmiştir. Cüruf katkılı çimento, cürufun düşük adsorpsiyon oranına rağmen, reolojik parametreleri açısından olumlu sonuç göstermiştir. Katkının çimento hidratasyonu üzerindeki geciktirme etkisi katkı oranının artışıyla daha şiddetli olmuştur. Ayrıca, geciktirme etkisi mineral katkı türüne bağlı olarak değişmiştir. Geciktirme etkisi en çok cürufllu çimentoda gözlemlenmiştir.

Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkının (PCA) farklı priz ayarlayıcı katkıları ile uyumu, Felekoğlu ve arkadaşları (2011) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, kalsiyum format (CF), tri-etanolamin (TEA), kalsiyum nitrit ve nitrat tuzları karışımı (CNN) ve sodyum alüminat (SA) olmak üzere 4 adet priz ayarlayıcı katkı (PAK) kullanılmıştır. Farklı kombinasyonlarda PCA ve PAK kullanarak toplam 52 çimento hamuru ve harç karışımı hazırlanmıştır. Çimento hamuru ve harç karışımları sırasıyla, 0.25 ve 0.5 S/Ç oranında hazırlanmıştır. Hamur karışımlarında priz süresi, harç karışımlarında ise karışımların kıvamı ve basınç dayanımı incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, çimento ağırlığının %0.4'ün üstünde PCA kullanımı, hamur karışımlarının priz sürelerini geciktirmiş, harç karışımlarının kıvamını iyileştirmiş ve erken yaşlardaki dayanımını düşürmüştür. Ancak, PAK katkılarının eklenmesiyle, katkının türü ve miktarına bağlı olarak karışımların

özelliklerinde büyük değişiklikler gözlemlenmiştir. PCA katkısı içeren harç karışımlarda, karışımın kıvamından ödünç vermeden, priz süresini kısaltmak ve dayanımı arttırmak için PAK katkının türüne göre, PCA ve PAK katkı oranlarının optimize edilmesi gereği vurgulanmıştır. İstenilen özelliklerde en uygun katkı kombinasyonlarını belirlemek amacıyla, bir 3D kutu grafiği yöntemi kullanılmıştır. Bu istatistiksel analizde, maksimum yayılma, en kısa priz süresi ve maksimum erken yaş dayanımı kriterleri hedef alınmıştır. Erken yaşlardaki dayanım ve priz süresi açısından en uygun kombinasyon çimento ağırlığının %1.8'i kadar PCA ve %1.6'si kadar CNN katkıları kullanıldığı zaman tespit edilmiştir. Kıvam kaybı açısından ise, %1.8 PCA ve %1 SA katkı kombinasyonu en uygun karışım olmuştur.

Süperakışkanlaştırıcı katkının farklı kompozisyonlara sahip çimentolar ile uyumu Erdoğan (2000) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, katkılı (KC-32.5, CEMII), puzolanik (TC-32.5, CEMIV) ve portland çimentosu (PC42.5, CEMI) olmak üzere toplam 3 tip çimento kullanılmıştır. 300, 350 ve 400 kg/m³ miktarlarında çimento kullanılarak toplam 36 adet beton karışımı hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda, çökme değeri 5 ± 9 cm olarak hedef alınmıştır. Söz konusu çökme değerini sağlamak için karışımlara çimento ağırlığının %1, %2 ve %3'ü kadar süperakışkanlaştırıcı katkısı ilave edilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen kontrol karışımı kıyaslama amaçlı üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre katkılı, puzolanik ve portland çimentosu içeren beton karışımları için optimum çimento miktarı sırasıyla, 400, 350 ve 300 kg/m³ olmuştur. Çimento tipinden bağımsız olarak, maksimum dayanım %3 katkı ilave durumunda gözlemlenmiştir. %3'den fazla katkı kullanımı, katkılı çimento içeren beton karışımının dayanımında önemli etki yaratmamıştır. Puzolanik ve portland çimentosundan üretilen beton karışımlarında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanım oranı ve dayanım kazanım arasında doğrusal bir ilişki mevcut olduğu tespit edilmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı katkının çimento ile uyumu Agarwal ve arkadaşları (2000) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, naftalin esaslı, harmanlanmış polimer, melamin ve lignosülfonat esaslı 4 adet süperakışkanlaştırıcı ve 3 normal portland çimentosu (33, 42 ve 53 sınıflarında), bir puzolanik çimento ve bir yüksek fırın cürufu çimento olmak üzere 5 adet çimento kullanılmıştır. Hazırlanan hamur ve beton karışımlarının sırasıyla, priz süresi ve 1, 3, 7, 28 ve 360 günlük basınç dayanımı

belirlenmiştir. Ayrıca, kimyasal katkı içeren karışımların hidrasyon davranışları DTA analizi ile incelenmiştir. Sonuçta, farklı çimento-katkı ikilisinden üretilen karışımlar farklı davranış göstermiştir. En uygun performans için üretici firma tarafından önerilen katkı kullanım dozajının her zaman doğru olmadığı beton dökümünden önce muhakkak küçük çaplı karışımlarda bu dozajın kontrol edilmesinin gerektiği, söylenmiştir. 53 sınıfı normal portland çimentosu ve yüksek fırın cürüflü çimento tüm katkılar ile uyumlu olmuştur. Naftalin esaslı ve harmanlanmış polimer içeren katkı bazı karışımlarda priz geciktirme etkisi yaratmıştır.

Klinker ile birlikte öğütülen alçı türü ve miktarı

Çimento için geciktirici olarak alternatif kalsiyum içeren maddelerin araştırılması Tzouvalas ve arkadaşları (2004) tarafından yapılmıştır. Çimento hamurunun hidrasyon süreci sertleşmiş malzemenin fizikomekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışmada CEM-I ve CEM-II üretimi esnasında kullanılan, doğal alçıtaşı ile doğal anhidritin kullanımı oranları araştırılmıştır. Karışımların SO₃ içerikleri dikkate alınara, gelişmesi hidrasyon süreci izlenerek incelenmiştir. Deneysel veriler, doğal anhidritin kullanımının karışımın fizikomekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemeden, çimentonun prizini çok etkili bir şekilde geciktirdiğini göstermiştir. Priz ve dayanım sonuçları, doğal anhidritin alçıtaşına alternatif bir malzeme olduğunu göstermiştir. Anhidrit, basınç dayanımı kazanımı konusunda özellikle optimum SO₃ miktarında (3.5% civarı) alçıtaşına benzer davranış sergilemiştir. Priz süresinin hassas bir şekilde kontrolü için alçıtaşı ve anhidritin beraber kullanılmasının avantajlı olduğu söylenmiştir. Uygun oranlarda anhidrit ve alçıtaşı ile 85 ile 115 dakika arasında priz süresine ulaşılacağı ifade edilmiştir. Bu sonuçlar, birlikte bulunan alçıtaşı ve anhidritin çimento endüstrisinde kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Harmanlanmış alçı kullanımının portland çimentosu ve portland cürüflü çimentosu özelliklerine etkisi Singh (2000) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, işlenmemiş (ham) fosfojips (PG) ve fluorogypsum (FG) ayrı ayrı ve doğal alçıtaşı ile birlikte kullanımının portland ve cürüflü portland çimentosunun çeşitli özelliklerine etkisi incelenmiştir. Sonuçta, doğal alçıtaşı ile dengelenerek harmanlanmış PG ve FG içindeki P₂O₅ ve F safsızlığından dolayı ters etki telafi edilebilir olduğu belirtilmiştir. Alçıtaşıyla kompoze

edilmiş çimentolarda basınç dayanımının arttığı, priz süresinin ise, azaldığı gözlemlenmiştir. %40PG+%60FG ile hazırlanan karışım en yüksek dayanımı vermiştir. Yapay alçı içerikli portland ve cürufllu çimentonun doğal alçıtaşıyla üretilmiş çimentoya benzer özellikleri olduğu açıklanmıştır. PG ve FG karışımı içindeki çimentonun öğütme enerjisinin doğal alçıtaşı içeren çimentonunkine yakın olduğu saptanmıştır. Bütün alçıtaşı türlerinin harmanlanmış halinin çimento üretimine uygun olduğu belirlenmiştir.

Hemihidrat veya atık anhidrit kullanımının yüksek fırın cürufu içeren bağlayıcı kompozitlerinin hidratasyon ürünü, mikro-yapısı ve boyutsal stabilizesine etkisi Magallanes-Rivera ve Escalante-García (2014) tarafından incelenmiştir. Bu çalışma, uçucu kül ve silis dumanı eklenmiş yüksek kalsiyum sülfat içerikli yüksek fırın cürufu bağlayıcının 600 gün kürlenmesinin araştırılması ve bunun sonuçlarını kapsamıştır. Kalsiyum sülfat kaynağı olarak hemihidrat ve fluorogypsum kullanılmıştır. Bağlayıcılar iyi mekanik ve hidrolik özellik göstermiştir; suya karşı direnç ilk aşamada oluşan alçı ile karışan 1.08 ile 1.78 arasında Ca/Si oranına sahip C-S-H'ın oluşumuna bağlı olduğu söylenmiştir. Etrenjit, alçıtaşının uçucu kül ve cüruftan gelen alüminyum ile tepkimesinden oluştuğu bildirilmiştir. Ancak, silis dumanının varlığında bu durum söz konusu olmadığından, karışımın boyutsal stabilitesi iyileştiği ifade edilmiştir. Yüksek fırın cürufllu kompozit bağlayıcılar, hemihidrat veya atık anhidrit kullanımı ile 600 gün boyunca herhangi bir bozunma yaşamadan iyi hidrolik ve mekanik özelliği göstermiştir. Mikro-yapısal olarak anhidrit, hemihidrata göre hamurda daha iyi bir dayanım performansı göstermiştir. Ancak, sıcaklık 60 °C'nin üstüne çıkarıldığında alçıtaşı bozunmaya uğrayarak dayanım kaybı yaşanmıştır. Ana hidratasyon ürünleri alçı, C-S-H ve etrenjit olmuştur. Etrenjit, alçı ve cürufun tepkimesi sonucu 7 günden sonraki günlerde oluşmuştur. Etrenjit oluşumu genleşmeye neden olmuştur ancak bu kısa sürede herhangi bir çatlak veya önemli ölçüde dayanım kaybına neden olmamıştır. Silis dumanının, etrenjit oluşumunu ve genleşmeyi engellediği açıklanmıştır.

Kalsiyum sülfat kaynağının kalsiyum sülfoalüminat eko-çimento hidratasyonu üzerinde etkisi García-Maté ve arkadaşları (2015) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, üç farklı sülfat kaynağıyla (alçıtaşı, basanit, anhidrit) 0.5, 0.65 olarak iki farklı su/çimento oranında hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. Çalışmada, Rietveld yöntemi (kristal maddelerin

karakterizasyonunda kullanılan bir yöntem), yükselen sıcaklık, ısı iletkenliği, reolojik deneyleri, basınç dayanımı ve genleşme/reaksiyon ölçümleri yapılmıştır. Sülfat kaynağının çözünme hızı, hidrasyon tepkimelerinin kontrolünde anahtar bir parametre olduğu söylenmiştir. Basanit suda çok çabuk çözüldüğünden, bütün reaksiyonlar çok erken başlamıştır böylece başlangıç priz süresi hamur ve harçta çok kısalmıştır. Bu durum dayanım değerlerinde aşırı bir etki bırakmıştır. Az miktarda eklenen süperakışkanlaştırıcı (0.020 ağırlıkça%) başlangıçta, harçın işlenebilirliğini arttırmıştır, fakat priz süresini kayda değer mertebede geciktirmemiştir. Ancak, bu harçlar düşük dayanım göstermiştir. Daha yüksek dozajda süperakışkanlaştırıcı eklenmesiyle dayanım biraz artmıştır. Üç alçı tipi arasında, anhidrit en yavaş çözülmüştür. Anhidritle hazırlanmış hamur ve harçların başlangıç priz süresi çok uzun olmuştur. 0.5 S/Ç oranında anhidritle hazırlanmış hamur, ilk 10 saatte düşük iyonik geçirgenliği göstermiştir. Aynı zamanda iyonik yoğunlaşma düşük tempoda azalmıştır, 1 günlük hidrasyon sonunda, anhidrit ile hazırlanan karışımda alçı hamuruna göre daha az miktarda etrenjit oluşmuştur. Buna bağlı olarak da, anhidritle yapılan harçların 1 günlük dayanımı 21.0 ± 0.2 MPa iken alçı ile hazırlanan harçlarda 1 günlük dayanım 41 ± 2 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak 3 günlük anhidritli ve alçıtaşlı hamurlarda aynı etrenjit oranı gözlemlenmiştir. Anhidrit harçlarının uzun priz süresi etrenjitin çökmesiyle birlikte yüksek plastisite sağlanmıştır. 3 günlük dayanımlarda, anhidrit ve alçı harçları benzer özellik göstermiştir. Ancak, yüksek plastisite özeliğinden dolayı anhidrit biraz daha fazla dayanım göstermiştir. 3 günden sonraki dayanımlar dikkate alındığında anhidritin mühendislik uygulamalarında kalsiyum-sülfo-alüminat harçları için en uygun sülfat kaynağı olduğu ifade edilmiştir. Ancak, ilk günlerde yüksek erken dayanım isteniliyorsa alçının daha iyi bir seçenek olacağı söylenmiştir. Diğer bir yandan, kalsiyum-sülfo-alüminatlı harçlarda basanit kullanılması tavsiye edilmemiştir. Ancak, uygun katkı, doğru miktarda eklendiğinde priz süresini geciktirebileceği açıklanmıştır. Eko-çimentonun dayanım kazanmasında etrenjit oranının en önemli parametre olduğu vurgulanmıştır.

Sirkülasyonlu akışkan yatak (CFBC) uçucu külünde var olan anhidritin çimento priz geciktiricisi olarak kullanımı Shen ve arkadaşları (2013) tarafından incelenmiştir. CFBC külleri, bilindik kömür külüne göre iyi bir puzolandır ve iyi hidrolik özelliklere sahiptir. Ancak bu küller çok yüksek sülfat içeriğinden dolayı çimentoda kullanılmayan bir katkıdır. Bu çalışma

kapsamında, çimentodaki doğal alçıtaşının bir bölümü yerine CFBC içindeki anhidrit kullanılarak oluşturulan karışımların priz süresi, dayanım kazanması, hacim sabitliği ve hidrasyon süresine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, CFBC içindeki anhidritin etkin bir priz geciktirici olarak kullanılabilceğini ancak, harç karışımında doğal alçıtaşına göre düşük mukavemete sebep olacağını göstermiştir. Uygun miktarda eklenen anhidritin harcın hacim sabitliğine olumsuz etkisi olmamıştır. Doğal alçıtaşı ile CFBC'deki anhidrit karşılaştırıldığında, anhidritin, etrenjit oluşumunu yavaşlattığı ve daha dönüştürülebilir kıldığı görülmüştür.

Hidrasyon yükleme metodu (loading hydration process) ile özel bir alçı üretimi çalışması Zhou ve arkadaşları (2015) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, ilginç bir yaklaşım ile mükemmel sertlik ve eğilme mukavemetine ayrıca yük taşıma yeteneği sahip yeni bir alçı ürünü önerilmiştir. Bu metotta, basanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) kalıpta basınçla şekillendirilip yerinde hidrate edilerek alçıtaşına ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dönüştürülmüştür. 50 MPa'lık yükleme ile teorik olarak 1.5 GPa olan maksimum sertlik değeri 1.47 GPa olarak ölçülmüştür. Üretilen numuneler 20 MPa basınçta standart bir C40 betonundan daha yüksek, neredeyse seramik fayanslar kadar, eğilme dayanımı (17.8 MPa) göstermiştir. Öne çıkan bu mekanik özellikler, üretilen alçıtaşının düşük bir poroziteye ve kenetlenmiş bir mikroyapıya sahip olduğundan kaynaklandığı söylenmiştir.

Çimento sektöründe inorganik priz geciktirici kullanımı Papageorgiou ve arkadaşları (2005) tarafından araştırılmıştır. Yunanistan'daki çoğu çimento fabrikası ani prizi engellemek için doğal alçıtaşı kullanmaktadır. Bu alçıtaşını başka bir kalsiyum sülfat içerikli malzeme ile tamamen ya da kısmen ikame edilerek kullanılması iki yönden incelenmiştir. Birincisi, düşük maliyetli yan ürün olması, ikincisi ise, yakın gelecekte taş ocaklarından elde edilerek malzemenin alçıtaşı ve anhidritin karışımı olacağı maden incelemelerinden anlaşılmasıdır. Bu çalışmada, kalsiyum sülfatlı malzeme olarak doğal alçıtaşı, anhidrit ve FGD (flue gas desulfurization) alçıtaşının çimento üretiminde farklı oranlarda kullanılmasıyla laboratuvar ve endüstri alanında yapılan deneylerin sonuçları tartışılmıştır. Endüstride yapılan denemelerin sonucunda üretilen çimentolar incelenmiştir. Sonuç olarak, FGD alçısı eklendiğinde basınç dayanımını etkilemeden priz süresi uzamıştır. Dihidrat kalsiyum sülfatın kısmi olarak anhidrit ve FGD ile ikame edilmesi çimentonun priz

süresi ve dayanım performansını düzenlediği ifade edilmiştir. Laboratuvar ve endüstriyel denemeler sonucunda priz ve dayanım performansları göz önünde tutularak, FGD alçısının alçı temelli malzemelere alternatif olabileceği görülmüştür. Ancak, yüksek nem içeren (yaklaşık %10) FGD alçısı, yüksek yüzdelerde kullanıldığında taşıma ve boşaltma esnasında sorun çıkardığı anlaşılmıştır. Alçıtaşının sadece doğal anhidritle küçük oranlarda ikame edilmesi çimento kalitesini düşürmediği görülmüştür. Endüstriyel çimento üretiminde, priz geciktiricinin bileşimine bağlı olarak, prizde ve basınç dayanımında ters etki yaratan hemihidrat oluşumu ve alçıtaşının dehidrasyonu gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır. Dihidratın hemihidrata dönüşümü, üretim anındaki klinker sıcaklığına ve değirmendeki bağıl neme bağlı olduğu açıklanmıştır. Bu parametrelerin değirmene püskürtülen su ile kontrol altına alınabileceği, optimum dehidratasyon derecesinin 55-65 °C işbağ sıcaklığında görüldüğü bildirilmiştir.

Sülfat saldırısı durumunda alçı oluşumunun beton karışımlarında genleşmeye neden olup olmadığı Tian ve Cohen (2000) tarafından incelenmiştir. Portland çimentosu betonlarında sülfat saldırısı iki reaksiyon halinde ortaya çıktığı bilinmektedir. Birincisi, sülfat iyonlarının C₃A hidratasyon ürünleri ile tepkimesinden oluşan etrenjitin hacim sabitliğini bozarak genleşmesi ve betonda çatlak oluşturması; ikincisi ise, sülfat iyonlarının kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek alçıya dönüşmesidir. Yazarlara göre, alçı oluşumunun zararlı etkisinin ispatlanmadığı, bunun şişmeye neden olacağına çelişkili olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada sülfat saldırısı boyunca alçı oluşumu ve bunun sonuçları araştırılmıştır. Sonuçlara göre, sülfat saldırısı boyunca oluşan alçının genleşmeye neden olduğu, bunun kesin mekanizmasının tam olarak bilinmediği açıklanmıştır. Sonuçta, sülfat saldırısı sonucu oluşan şişme ve çatlakların sadece etrenjit oluşumuna bağlı olmadığı, betonun çekme dayanımının alçı oluşumu sürecinde meydana gelecek şişme ve bunu izleyen çatlakların oluşumunda etkili olduğu vurgulanmıştır.

Bilindiği gibi, çimentonun priz süresini kontrol etmek amacı ile çimento üretim esnasında, belli bir miktarlarda alçıtaşı klinkerele beraber öğütülmektedir. Ramchandran'a (1995) göre, karışımın viskozitesi eklenen alçıtaşı tipine bağlı olarak değişmektedir. Söz konusu sülfatlar; dehidrat veya alçıtaşı (CaSO₄.2H₂O), hemihidrat (CaSO₄.1/2H₂O) ve anhidrit (CaSO₄)

olarak 3 farklı yapıda olabilir (Ramachandran, 1995). Bilindiği gibi klinker-alçıtaşı öğütme sırasında, belli bir miktarda sıcaklığın ortaya çıkmaktadır (Mork, 1994). Literatüre göre, ortaya çıkan söz konusu yüksek sıcaklık alçıtaşı/hemihidrat ve alçıtaşı/çözünebilen anhidrit oranının azalmasına yol açmaktadır (Dodson and Hayden, 1990). Farklı formlarda olan sülfatların çözünübilirlik performansını Çizelge 2.1' kiyaslanmıştır.

Çizelge 2.1. Farklı formladaki sülfatların çözünübilirliği (Kim, 2000)

Sülfat tipi	Çözünübilirlik (g/l)
Dehidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	2.1
Hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)	6.2-8.2
Çözünebili anhidrit (CaSO_4)	6.3
Doğal anhidrit (CaSO_4)	2.7
Arkanit (K_2SO_4)	120
Afitalit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{K}_2\text{SO}_4$)	120
Kalsiyum langbenit ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$)	6.3
Sinjenit ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	2.5

Çizelge 2.1'den anlaşılması gibi hemihidratın (6.2-8.2 g/l) ve çözünebilir anhidritin (6.3 g/l) çözünübilirliği dehidratın (2.1 g/l) yaklaşık 3 katı kadar daha fazladır (Kim 2000). Bu sebeple, anhidrite kıyasla C_3A ve sülfat iyonu reaksiyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum sülfü alumino hidrat ürünleri daha hızlı oluşabilir. Mork ve Gjoerv'ye göre (1997), alçı tipini değişimine bağlı olarak karışımın işlenebilirliği değişebilir. Tagnit-Hamou ve Aïtcin'e göre (1993), SO_4^{2-} iyonu konsantrasyonu karışımın hidrasyonunu ciddi mertebede etkilemektedir. Söz konusu iyonunun karışım içerisinde yetersiz miktarda bulunması ani priz oluşmasına, konsantrasyonunun fazla olduğu durumunda ise, genleşmeye yol açması bilinmektedir.

Tagnit-Hamou ve Aïtcin 'a göre (1993), klinkerde mevcut olan alkali sülfatların çözünübilirliği herhangi bir formdaki kalsiyum sülfattan daha hızlı olmaktadır. Nakajima ve Yamada'ya göre (2004), klinkerdeki alkali sülfatlar ortamdaki SO_4^{2-} iyonunun konsantrasyonunu hidrasyon sürecinin tamamında etkilemektedir. Ancak, alçı türü değişimi, SO_4^{2-} iyonunun sadece başlangıçtaki konsantrasyonunu etkilemektedir.

Sönmüş kireç, anhidrit alçı ve kireçtaşı tozunun yüksek fırın cürufllu çimentolu beton ve harç karışımlarının özelliğine etkisi Mun ve arkadaşları (2007) tarafından incelenmiştir. Yüksek fırın cürufllu çimento harcı ile

betonun inorganik aktivatörlerin eklenmesiyle temel özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Sonuçta, alçıtaşı, kireç ve kireçtaşı tozu gibi malzemelerin aktivatör olarak cürüflü çimentoda kullanılması erken yaşta dayanımını arttırmış ve boşluk yapısını sıkıştırdığı ifade edilmiştir. Aktivatörün harca ve betona eklenmesiyle büzülme ve karbonatlaşmanın azaldığı vurgulanmıştır.

Çeşitli kalsiyum sülfalüminat çimentolarının hidrasyonu Telesca ve arkadaşları (2014) tarafından araştırılmıştır. Çalışmada, beş kalsiyum sülfalüminat (CSA) çimentosu, ayrıca normal portland çimentosu içeren bir üçlü karışımın hidrasyon süreci ve mikroyapısal özellikleri irdelenmiştir. Hamur karışımları DTA-TG analizi, cıva porozimetresi (MIP), SEM incelemesi ve genleşme/büzülme deneyine tabi tutulmuştur. CSA çimentosunun ana bileşeni olan $C_4A_3\bar{S}$ 'in hidrasyon reaksiyonlarındaki rolü DTA-TG analizi ile ispatlanmıştır. *i)* Bu bileşen, kireç ve kalsiyum sülfat karışımının hidrasyon ürünü, etrenjit, *ii)* bileşen ve kalsiyum sülfat karışımının hidrasyon ürününün etrenjit ve alumina hidroksit, *iii)* sadece bileşenin (kireç ve kalsiyum sülfatın bulunmadığı durum) hidrasyon ürününün monosülfat ve alüminyum hidroksit olduğu DTA-TG analizinden anlaşılmıştır. Bu sonuçlara göre, bütün CSA tabanlı çimentoların temel hidrasyon ürününün etrenjit ve alüminyum hidroksit olduğu anlaşılmıştır. CSA klinkerine alçıtaşının eklenmesi reaksiyon hızını önemli ölçüde etkilemiştir. $C_4A_3\bar{S}$ ve $C\bar{S}$ içeren CSA temelli çimentoların hidrasyon sonucunda yüksek miktarda etrenjit oluştuğu belirlenmiştir. MIP ve SEM analizleri ile genleşen genleşmeyen çimentolar ayrıt edilmiştir. %50 CSA klinker-%50 alçıtaşı ikili karışımında ve %40 CSA klinker, %20 alçıtaşı, %40 OPC üçlü karışımında önemli derecede şişme gözlemlenmiştir. MIP ve SEM analizleri hidrate olmuş CSA'nın şişme özelliklerinin belirlemede çok etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Hacim sabitliğini koruyan bağlayıcılarla karşılaştırıldığında genleşen çimentoyla ilgili şu sonuçlar çıkarılmıştır; *(i)* boşluk büyüklüğü dağılımı hızlıca büyük boşluklara doğru yönelmiştir. *(ii)* küçük boyutlu etrenjit parçaları hidrasyonun ilk 24 saatinde ortaya çıkmıştır. Ayrıca, %50 alçı içeren CSA çimentosunun sertleşmiş hamurunun SEM görüntüsünde yıldız biçimli kümelenmeler gözlenmiştir.

Kaba sıva olarak kullanılan hemdirat alçısına çimento eklenmesi sonucu durabilite özelliklerinin ne mertebede iyileştiği Camarini ve De Mito (2011)

tarafından araştırılmıştır. Alçı binalarda çok fazla kullanım alanı olmasına rağmen çözülebilirliği yüksek olduğundan iç yüzeyde daha çok kullanılmaktadır. Bunun dış yüzeyde de kullanılması için bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla araştırmacılar, epoksi reçinesi, polimer, çimento, cüruf ve su geçirmez malzemelerle iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada, yüksek fırın cürufllu portland çimentosunun β -hemihidrat'a eklenmesiyle alçıtaşının mekanik özelliklerinde ve mikro-yapısındaki değişimi incelenmiştir. Sonuçlara göre, bu çimento eklendiğinde alçı performansında artış olmuştur. Bu alçı 3 yıl boyunca dış etkilere maruz bırakıldığında hiç etrenjit oluşumuna rastlanmamış ve bozunma yaşanmadığı, aynı zamanda dihidrat'tan daha iyi durabilite performansı gösterdiği açıklanmıştır. β -hemihidrat-cürufllu çimento hamurunun suya karşı dayanıklı olduğu, fakat beklendiği kadar dayanıma sahip olmadığı, buna rağmen saf alçıdan daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. SEM analizlerinin daha sıkı bir yapı ve suya dayanıklı bir kompozit elde edildiğini desteklediği ifade edilmiştir.

Metakaolin-uçucu kül-kireç-anhidrit alçı kullanılarak çevre dostu bağlayıcı geliştirilmesi üzerinde bir çalışma Morsy ve arkadaşları (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, karbondioksit salınımı yapmadan çeşitli yararlı etkileriyle çevre dostu çimentosuz harcın özelliklerini incelemek üzere yapılmıştır. Bu bağlayıcı harçlarda inorganik malzemeler olarak, yüksek silis ve alümina içeren uçucu kül, aktive edilmiş kaolin ve kireç kullanılmıştır. Kimyasal aktivatör olarak anhidrit kütlece 0, 2.5, 5, 7.5 ve %10 olarak kullanılmıştır. Harç karışımlarında, bağlayıcı/kum oranı kütlece 1:1.5 ve su/bağlayıcı oranı ise, 0.50 olarak seçilmiştir. Harç numuneleri ilk 24 saat boyunca, 20⁰C sıcaklıkta kendi kalıbında kürlendikten sonra, kalıptan çıkarılmış 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numunelerin basınç dayanımı ve görünür yoğunluğu belirlenmiştir. Sonuçta, %10 aktivatör eklenmesi basınç ve eğilme dayanımını iyi yönde etkilediği, 28 günlük numunelerde kontrol karışımına nazaran basınç dayanımında %56, eğilme dayanımında ise %45 iyileşme olduğu bildirilmiştir. Kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum sülföalüminat hidrat (temel olarak etrenjit ve monosülfat) temel hidratasyon ürünleri, aktive edilmiş metakaolin-uçucu kül-kireçtaşı harcında tespit edilmiştir.

Evjua ve Hansen (2005) %50 kalsiyum alüminat çimentosu, %25 portland çimentosu ve %25 kalsiyum sülfattan oluşan karışımında (s/ç=1)

etrenjit oluşumu, hidrasyon ısı ve genişmeyi araştırmıştır. Kalsiyum sülfat olarak β -hemihidrat, anhidrit ve bu ikisinin karışımı kullanılmıştır. Kalsiyum sülfat miktarı ağırlıkça %25 olduğunda, hidrasyon kinetiği diğer karışımlardan farklı olmuştur. Alçı olarak %100 β -hemihidrat içeren hamurda, etrenjit iki farklı aşamada ilki, çimento tanelerinin üzerinde ince bir kristal tabakası halinde, ikincisi ise, daha büyük radyal kristaller halinde taneler üzerinde oluştuğu bildirilmiştir. Etrenjit oluşumundan kaynaklanan genişmenin nedeni, birbirine dokunan top etrenjit kristallerinden olduğu ifade edilmiştir. Alçı olarak %100 anhidrit içeren hamurlarda ise, etrenjit çimento taneleri üzerinde değil rastgele çözeltide oluştuğu ve genişme yarattığı açıklanmıştır. Alçı olarak, %50'den fazla β -hemihidrat içeren (geri kalanı anhidrit olan) çimentolarda ise genişme tespit edilmiştir. Sonuçta, yapılan çalışma kristal büyüme teorisini desteklediği ve etrenjit oluşumunun sülfat kaynağına oldukça bağlı olduğu bildirilmiştir.

Başka bir çalışmada, kalsiyum sülfatlı esaslı çimentolarda (CSAC), kalsiyum sülfatın hemihidrata dönüşümü ve uçucu külün sisteme etkisi Ioannou ve arkadaşları (2014) tarafından incelenmiştir. Uçucu kül, anhidrit (ANH), FGDG alçıtaşı (flue-gas desulfurization gypsum) ve hemihidrat (PL) kullanarak çeşitli kalsiyum sülfatlarla kalsiyum sülfatlı çimentosu üretimine çalışılmıştır. Çimentolar üzerinde priz süresi ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Hemihidrat temelli sistemde erken hidrasyonda XRD ve TG ile alçıtaşı dönüşümü gözlemlenmiştir. Anhidrit varlığında uçucu kül kullanımının, reaksiyona girmeyen kül taneleri üzerinde etrenjit yoğunluklu matrisin oluşumunu hızlandırdığını, bunların her ikisinin sıkı bir mikro-yapı oluşumuna katkı sağladığı görülmüştür. Belirli bir sülfat içeriğinde, anhidrit kullanımı hemihidrata göre, priz süresini, hidrasyon ısı çıkışını ve dayanım gelişmesini olumlu etkilediği ifade edilmiştir. Uçucu kül ve hidrate olmuş faz, ortak çalışarak daha sıkı bir mikro-yapı oluşturmuştur. Buda uçucu kül içeren bağlayıcıların saf CSAC/ANH ve CSAC/FGDG kombinasyonlarından daha yüksek erken dayanım göstermesine neden olduğu belirtilmiştir. CSAC ile anhidritin birlikte kullanımı hemihidrat kullanımına kıyasla mekanik özellik bakımından daha faydalı olduğu vurgulanmıştır. Çeşitli kalsiyum sülfatların ağırlıkça %35 oranına kadar kullanılması, hidrasyon ürünlerinin mineraloji ve morfolojisine kayda değer etkisi olmadığı açıklanmıştır.

Kalsiyum sülfat-alüminat-anhidrit-uçucu kül üçlü bağlayıcının betondaki performansının, portland çimentosu ve cürüflü çimento içeren betonlarla kıyaslanması Ioannou ve arkadaşları (2015) tarafından gerçekleştirilmiştir. 3 farklı su/çimento oranında hazırlanan beton karışımların mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Etrenjit ve uçucu külün sinerjik etkisi su emme, sülfata direnç ve klor iyonu geçirimsizliği özelliklerini iyileştirmiştir. Ancak, karbonatlaşma derinliği, sabit su/çimento oranında portland çimentosuyla üretilen betonlara kıyasla daha fazla çıkmıştır. Bu tip betonun performansında boşluk çözeltisindeki alkali hidroksit miktarının su/çimento oranı kadar önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Çimentoda alit ve C_3A -alçı hidratasyonları arasındaki etkileşimler Quennoz ve Scrivener (2013) tarafından incelenmiştir. Deneysel sonuçları, alçıtaşının varlığında alit fazının hidratasyonunun hızlandığını göstermiştir. Bu hızlanma alit'in içinde bulunan alüminyum iyonlarıyla alçıtaşının etkileşimine dayandırılmıştır. C_3A -alçı sisteminde gözükten tek ekzotermik pikin yerine, model çimentoda alüminat reaksiyonuna bağlı olarak 3 ekzotermik pik noktası gözlemlenmiştir. İlki sülfat iyonlarının tükenmesiyle C_3A 'nın çözünmesi ve etrenjitin oluşmasına, ikinci monosülfat oluşumuna, üçüncü ise, herhangi bir özel reaksiyona tekabül etmediği açıklanmıştır. Monosülfat oluşumundan önce, katının alçıtaşı tükendikten sonra fazlardan bir pik oluşturduğu görülmüştür. Bu pikin, çözeltideki sülfat iyonu konsantrasyonunun azalması ve C_3A çözünmesinin hızlanmasıyla ilgili olduğu belirtilmiştir. Alit'in varlığında, C_3A ve etrenjit reaksiyonu sonucu monosülfat oluşumunda ikinci pik oluşur. Alit'in varlığında, C_3A ve etrenjitten oluşan monosülfatın daha erken meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun muhtemelen bir kısım sülfatın C-S-H tarafından emilmesinden kaynaklandığı öne sürülmüştür. 3. pikin nedeni tam olarak açıklanmamış, fakat var olan boşlukların miktarıyla alakalı olduğu bildirilmiştir. Alit/ C_3A oranı, fazların dağılımı ve çimento ana fazlarının hidratasyon kinetiğindeki sıcaklık değişimleri gibi faktörlerde incelenmiştir. Fazların dağılımı yalnızca C_3A -alçıtaşı tepkimesini etkilediği, bu tepkimenin sıcaklığa daha hassas olduğu ve sıcaklık artışıyla hızlandığı açıklanmıştır. Sıcaklık ile ilgili olarak, C_3A -alçıtaşı reaksiyonu için gereken aktivasyon enerjisinin alit için gerekenden fazla olduğu bulunmuştur.

Uzun süre sülfat etkisi altında olan portland çimentosu harçlarında, gecikmiş etrenjit ve alçı miktarının değişimi Chen ve Jiang (2009) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, sülfat konsantrasyonu ve su/çimento oranının etrenjit oluşumuna etkisi incelenmiştir. Sonuçta, sodyum sülfat çözeltisinde etrenjitin 3 evrede oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunlar, 'penetrasyon periyodu, 'dayanım yükselmesi periyodu ve 'mikro-çatlak oluşumu periyodu olarak adlandırılmıştır. Oluşan çatlakların ana kaynağının etrenjit olduğu açıklanmıştır. Alçının oluşumu "durgun dönemi" ve 'hızlandırılmış dönemde olmak üzere iki periyotta olduğu gözlemlenmiştir. Etrenjit oluşumu şişmeyle doğrusal etkileşimdedir. Su/çimento oranı ve sülfat konsantrasyonunun etrenjit ve alçıtışının tepkimelerinde önemli rolü olduğu sonucuna varılmıştır.

Çimento inceliği

Portland çimentosunun inceliğinin ve tane boyu dağılımının çimentolu sistemin taze hal özelliklerine, hidrasyon kinetiklerine ve dayanımına etkileri çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Aşağıda son zamanlarda yapılan araştırmalardan bazıları özetlenmiştir.

Belirli bir su/çimento oranında, tane büyüklüğünün medyanında bir düşüş genellikle hidrasyonu hızlandırır ve dolayısıyla erken dayanım gibi erken yaş özelliklerini artırır. Buna göre, üretilen çimentonun inceliği zaman içinde artmıştır (Frigioine and Marra, 1976; Osbaeck and Johansen, 1989; Pommersheim, 1987; Knudsen, 1984; Wakasugi et al., 1998; Taylor, 1997). Ancak, Mehta (1997) durabilite konusunda daha ince çimentoların her zaman daha kaba çimentolara tercih edilemeyeceğini öne sürmüştür. Ayrıca, kıyasla daha düşük su/çimento oranına sahip yüksek performanslı betonlarda uzun vadede iri çimento taneleri ince taneler gibi performans gösterebileceği açıklanmıştır. Klinkerin öğütme süresinin kısaltılmasıyla dikkate değer tasarruf sağlanabileceği bilinmektedir (Bentz et al., 1999). Genellikle, daha yüksek inceliğe sahip çimentolar daha hızlı hidrasyon gösterir ve erken yüksek dayanım verir. Buna bağlı olarak, daha ince çimentoların kullanımıyla erken yüksek dayanıma sahip beton üretilir. Ayrıca geç yaşlardaki dayanım artışı kaba çimentolara kıyasla daha düşük olur. Dolayısıyla, daha ince çimento alkali reaktif agrega ile daha güçlü reaksiyon gösterir ve betonda olmasa da çimento hamurunda büzülme ve çatlak riskini artırır (Neville, 1995).

Kimyasal bileşime ilave olarak, çimentonun inceliği de çimentonun suyla olan reaktivitesini etkiler. Genellikle, çimento inceliği arttıkça daha hızlı tepkimeye girer. Sabit bir kimyasal bileşimde, çimentonun daha ince öğütülmesi sonucu reaktivite oranı ve dolayısıyla dayanım gelişimi artar; ancak, öğütme maliyeti ve hidrasyon ısısalınımı incelik konusunda bazı limitler oluşturur. Çimento endüstrisinde kalite kontrol amacıyla, incelik, No.200 (75 µm) ve No.325 (45 µm) gibi standart eleklerin üzerlerinde kalan malzeme oranlarıyla kolaylıkla belirlenebilir. 45 µm'den büyük olan çimento taneciklerinin yavaş hidrasyon gösterdikleri, 75 µm'den büyük taneciklerin ise asla tamamen hidrate olmayacağı genellikle kabul edilir. Ancak benzer bileşimlere sahip çimentoların göreceli reaktivite oranları, tane boyu dağılımının tamamı bilinmeden tahmin edilemez. Fakat tane boyu dağılımının belirlenmesi oldukça zordur ve pahalı ekipmanlar gerektirir. Bu nedenle endüstride yaygın olarak Blaine Hava Geçirimsizliği Metodu (ASTM C 204) ile çimentonun özgül yüzey alanı belirlenir (Mehta and Monteiro, 2006).

Neville'e göre (1971, 1995), sabit kıvamda, çimento inceliği arttıkça betonun su gereksinimi de artar ancak bir yandan da çimentonun Blaine inceliğindeki belirgin bir artış beton karışımının işlenebilirliğini artırır. Price (1951) ve US Bureau of Reclamation (1956) da bu durumu doğrulamıştır.

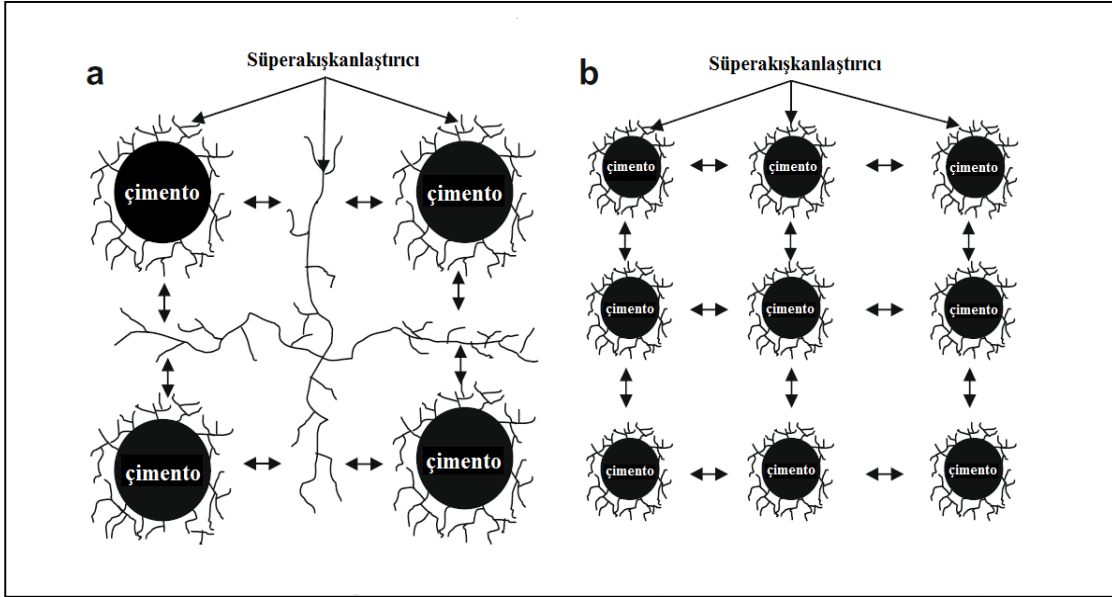
Wuhrer ve arkadaşları (1950) çimento inceliğindeki artışın sabit bir kıvama sahip betonda gereken su miktarını belirgin bir şekilde artabileceği sonucuna varmıştır ancak aksi bir şekilde sabit işlenebilirliğe sahip beton karışımı için gereken su miktarının belirgin bir şekilde azaldığını bulmuştur.

Higginson'a göre (1970), çimento inceliğinin artmasıyla betonun işlenebilirliği artar. Fakat hava sürüklenmiş betonda, çimento inceliğinin işlenebilirlikteki etkisi çok fazla belirgin olmadığı, ayrıca, çimento inceliğinin 2700'den 4000 cm²/g'ye kadar artışı betonun su ihtiyacını azalttığını bildirilmiştir.

Kwan ve Wong (2008) çimento hamurlarının plastisitesinde topaklaşma yoğunluğu, boşlukları dolduran suyun dışındaki fazla su ve katı yüzey alanı etkilerini incelemiştir. Sonuçlara göre, topaklaşma yoğunluğundaki artış, fazla suyu arttırdığı, işlenebilirliğin de buna bağlı olarak arttırdığını ifade etmiştir.

Hu ve diğerklerinin (2014), yaptıkları çalışmada üç farklı inceliğe sahip portland çimentosu ve bunlardan dört farklı S/Ç oranında hazırlanan harçların hidratasyon ısılarını ve priz sürelerini izotermal kalorimetre testi kullanılarak araştırmıştır. Daha yüksek inceliğe sahip çimentonun hidratasyonunun daha hızlı gerçekleştiği ve hidratasyon ısısının daha hızlı yükseldiği gözlemlenmiştir. Düşük su/çimento oranına sahip karışımlar erken saatlerde daha yüksek hidratasyon ısıları oluştururken 24 saat sonundaki toplam hidratasyon ısıları su/çimento oranından bağımsız olarak yaklaşık aynı bulunmuştur. Priz süreleri su/çimento oranının artışıyla ve çimento inceliğinin azalmasıyla artmıştır.

Bir başka çalışmada, altı farklı üreticiden tedarik edilen incelikleri 2800 ve 5500 cm²/g Blaine değerleri arasında değişen CEM I 42.5 çimentoların inceliklerinin Polinaftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı ile etkileşimi araştırılmıştır. Çimento inceliğinin çimento-süperakışkanlaştırıcı etkileşimindeki etkisi büyük oranda çimentonun kimyasal bileşimine bağlı olduğu, çimentonun katkı ile uyumsuz olduğu durumlarda çimento inceliğinin etkisinin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.1). Çimentonun Blaine inceliği, uyumlu çimentolarda, başlangıç Marsh hunisi akış süresini veya başlangıç çimento hamuru viskozitesini etkilememiştir. Ancak, uyumsuz olan çimentolar için, Blaine inceliğinin belirli bir derecede artışı çimento hamuru başlangıç viskozitesini düşürmüştür, fakat akma gerilmesinde dikkate değer bir etkisi olmamıştır. Başlangıç viskozitesindeki azalma 2800-3800 cm²/g Blaine inceliği değerleri arasında göze çarpmıştır. Süperakışkanlaştırıcı dozajına bağlı olarak, başlangıç mini-çökme değeri veya akma gerilmesi Blaine inceliği 3900 veya 4300 cm²/g üzerinde olduğu durumlarda azalmıştır. Çimento inceliği bu değerlerden daha düşük olduğunda, hamurların akma gerilmeleri neredeyse değişmemiştir. Çimento tipinden bağımsız olarak, çimento inceliğinin artmasıyla, 60 dakika bekletilen karışımlarda doygunluk noktası artmıştır. Çimento bileşimine bağlı olarak, çimento inceliğinin bir dereceye kadar artışı 60. dakikadaki akışkanlık süresini azaltmıştır. Mini-çökme testindeki akışkanlık kaybı çimento inceliğinin artmasıyla belirgin bir şekilde artmıştır. Aynı sonuç hamurun viskozitesi hakkında fikir veren Marsh hunisi akış süresi deneyinde de elde edilmiştir. Sonuçta, çimento inceliği, akma gerilmesini hamurun viskozitesinden biraz daha fazla etkilediği bildirilmiştir (Aydın et al., 2009).



Şekil 2.1. Hidratasyon öncesi iti kuvvetler: (a) relatif olarak kaba taneli çimento (b) relatif olarak ince taneli çimento (Aydın vd., 2009)

Ahmad (2002) çimento inceliğinin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yazar mevcut bilgi birikimine göre, işlenebilirlik üzerinde incelik etkisi hakkındaki sonuçların çelişkili olduğunu belirtmiştir. Buna göre aynı klinkerden 1690 ile 3733 cm^2/g arasındaki 6 farklı inceliğe sahip çimentonun beton işlenebilirliğine etkisi incelenmiştir. Sonuçta, incelikteki artışın işlenebilirliği arttırdığı gösterilmiştir. Beklendiği gibi sertleşmiş betonun erken dayanımı incelikteki artış ile artmıştır.

Süper ince çimento (Blaine inceliği 7800 cm^2/g) üzerinde yapılan bir çalışmada ise, çimentonun topaklaşma yoğunluğundaki etkisi, çimentonun su film kalınlığı ve çimento hamurunun yayılması, reolojik özellikleri ve dayanımı araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada %10 ve %20 oranında süper ince çimentonun normal çimento (Blaine inceliği 3200 cm^2/g) yerine kullanılmasıyla, topaklanma yoğunluğunu belirgin olarak arttığı görülmüştür. Yayılma test sonuçlarında ise, aynı su/çimento oranında %20'ye kadar süper ince çimento eklenmesi, özellikle düşük su/çimentolu karışımlarda, akış yayılması ve akış oranlarında belirgin bir artışa neden olabileceği açığa çıkmıştır. Ancak, aynı su film kalınlığında, akış yayılması ve akış oranı süper ince çimento oranına bağlı olarak değişmemiştir. Dolayısıyla, süper ince çimento, etkisini temel olarak su film kalınlığı sayesinde gösterdiği, süper ince çimento eklenmesiyle su film kalınlığında artış olduğu ve bu nedenle akış değerlerinin arttığı bildirilmiştir. Reometre test sonuçları, su/bağlayıcı

oranının 0.24'ten büyük olduğu durumda, süper ince çimento eklenmesi akma gerilmesini ve görünür viskoziteyi artırabileceğini, ancak, su/bağlayıcı oranının 0.22'den küçük olduğu durumda ise süper ince çimento eklenmesinin her zaman akma gerilmesini ve görünür viskoziteyi düşürdüğünü ortaya çıkarmıştır. Ancak aynı su film kalınlığında, süper ince çimento eklenmesi her zaman akma gerilmesini ve görünür viskoziteyi artırdığı bildirilmiştir (Chen ve diğerleri, 2012).

Diğer bir çalışma (Petre et al., 2012), ultra ince portland çimentosunun yapıştırma ve derz işlerinde kullanılan harçlarda kullanımıyla ilgilidir. Farklı inceliklere sahip portland çimentoları hazırlanıp bunların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çimentolar ile süperakışkanlaştırıcı kullanılarak farklı S/Ç oranlarında harç karışımları hazırlanmıştır. Harçların reolojik ve reoteknik (cohesyon) özellikleri incelenmiştir. Deneyler, ultra ince çimentonun (7000 cm²/g ve 8000 cm²/g) yapıştırma ve birleştirme işlerinde iyi olduğunu, elde edilen çimentoların birbirine yakın tane boyu dağılımına sahip olduğu açıklanmıştır. Yaklaşık %87-93'ü 32 µm'nin altında olduğu bildirilmiştir. Çimentoların dayanım sınıfları 52.5R olarak belirlenmiştir. S/Ç oranı şerbet karışımlarının viskozitesini ve kohezyonunu önemli ölçüde etkilemiştir. S/Ç oranının artışı akışkanlığı artırmış, kohezyonu düşürmüştür. Süper akışkanlatıcı çimento tanelerini dağıtarak Marsh hunisi akış süresini düşürmüştür. Aynı zamanda kohezyonu azaltmıştır. En iyi davranış, lignosülfonat ve naftalinsülfonat polimer esaslı akışkanlaştırıcılarda gözlemlenmiştir. Reolojik ve reoteknik özellikler çimento inceliğinden etkilenmiştir. İncelik arttıkça akışkanlık azalmış, kohezyon artmıştır. Düşük S/Ç oranlarında etkisi büyüktür ve akışkanlaştırıcı zorunlu hale gelmiştir.

Bu çalışmada, çimento inceliği ve klinker bileşimi gibi çimento karakteristiklerinin akma gerilmesi-deformasyon hızı eğrisi altındaki alan olarak hesaplanan "akış direnci" üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda naftalin sülfonat-formaldehit kondansatı, polieter-poliakrilat ve lignosülfonat olarak üç farklı süperakışkanlaştırıcı, altı farklı çimento ile test edilmiştir. Polieter-poliakrilat katkısı naftalin sülfonat-formaldehit ve lignosülfonat katkılarına nazaran en verimli katkı tipi olduğu sonucuna varılmıştır (Vikan et al, 2007).

Tam faktöriyel deney tasarımı, klinker tipi ve inceliğiyle ilgili çeşitli çimento özellikleri üzerinde %5 kireçtaşı ilavesinin etkisini değerlendirmek için uygulanmıştır. Sadece kireç doyumluk faktöründe (LSF) farklılık olan iki klinker kullanarak iki inceliğe sahip çimento hazırlanmıştır. Çimentolar, 15 ton/saat kapasiteli bilyeli bir öğütücüde hazırlanmıştır. Basınç dayanımı, hidrasyon ısı, priz süresi ve su ihtiyacı gibi faktörlere ilaveten bu faktörler arasındaki etkileşimde değerlendirilmiştir. Kireçtaşı ilavesi çimentonun bazı özelliklerini büyük ölçüde etkilediği, ancak, bu etkinin diğer faktörlere de bağlı olduğu söylenmiştir. Deneysel tasarım tekniğinin kullanımıyla, kireçtaşı ilavesi, incelik ve klinker tipinin sinerjik etkileri tespit edilmiştir. Kireçtaşı ilavesinin etkisi, incelikten ziyade klinker tipine bağlı olduğu açıklanmıştır. Düşük LSF'e sahip klinkere kireçtaşı ilavesi, çoğunlukla 28 günden sonraki basınç dayanımını ve başlangıç priz süresini etkilerken, yüksek LSF'e sahip klinkere kireçtaşı ilavesi ağırlıklı olarak erken yaşlardaki basınç dayanımı etkilemiştir (Vuk et al., 2001).

Björnström ve Chandra (2003) yaptıkları çalışmada süperakışkanlaştırıcıların çimento hamuru ve harç karışımlarının reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada üç farklı sülfonat esaslı lignosülfonat tabanlı süperakışkanlaştırıcı; melamin formaldehit sülfonik asit (SMF), naftalin formaldehit sülfonik asit (SNF) ve bir çeşit polikarboksilik asit polimer (MLS) kullanılmıştır. Sonuçlar, bu katkıların çimento taneciklerini dağıttığını, mekanizmanın ise temel olarak farklı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Polikarboksil esaslı polimer ile dağıtım mekanizması esas olarak sterik itki ile olduğu, sülfonatlı süperakışkanlaştırıcılar elektrostatik itme kuvveti ile dağıttığı çimento taneciklerinin üzerinde negatif bir yüke neden olduğu açıklanmıştır. Katkıların, çimento taneleri üzerindeki adsorpsiyonundan dolayı elektrostatik yük kazanımı olduğu, bunun çimento taneciklerinin dağılımına ve buna bağlı olarak akışkanlığın artışına yol açtığı bildirilmiştir. Süperakışkanlaştırıcıların çimento bileşenlerine adsorpsiyonunun oranı ve miktarı reolojik özellikleri, sertleşmeyi ve hidrasyon mekanizmasını etkilediği bildirilmiştir. Polikarboksilat-eter esaslı süper akışkanlaştırıcı polimerlerin molekülü, başlangıç hidrasyon ürünleriyle kaplı olan çimento tanelerini bile uzun hidrofil yan zincirin sağladığı sterik itme ile dağıttığı açıklanmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki geniş değişkenlikten dolayı, aynı süperakışkanlaştırıcı varlığında farklı çimentolar farklı şekillerde

davrandığı görülmüştür. Çimentonun kimyasal etkenleri arasında, C₃A içeriği, özgül yüzey alanı, C₃A'nın morfolojisi, alkali içeriği ve öğütme sırasında klinkere eklenen kalsiyum sülfat türü süperakışkanlaştırıcı içeren çimento karışımlarının özelliklerinde önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Ahmad ve Qureshi (2004), çimentonun inceliğindeki değişimin çimento ve betonun diğer özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu araştırmaya göre, taze betonun işlenebilirliği ve sertleşmiş betonun erken yaş basınç dayanımı, artan incelik ile artmaktadır. Yüksek değerlere ulaşmak için çimento üretim maliyetinin arttığı görülmüştür. Optimum basınç dayanımı 3200 cm²/g civarındaki incelikte elde edildiği açıklanmıştır. Bu inceliğin üstünde basınç dayanımında kayda değer artış oluşmadan üretim maliyetinin arttığı ifade edilmiştir.

Diğer bir çalışmada portland çimentosu inceliğindeki varyasyonların yüksek dayanımlı beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çimento inceliğinin artışıyla erken dayanımların arttığı görülmüştür. Basınç dayanımındaki bu kazanımın daha yüksek incelik derecelerinde kesildiği, orta inceliğe sahip çimentonun beton işlenebilirliğine kayda değer bir etkisi olmadığı, ancak, yüksek incelik derecelerinde işlenebilirliğin aniden azaldığı görülmüştür. İncelik artışıyla öğütme maliyetinin artışı doğrusal olarak değişmediğinden, projeden projeye basınç dayanımını artırmak ve bunun öğütme maliyeti ile dengesi için bir optimum değer aranmasının gerekli olduğu açıklanmıştır (Qureshi et al., 2010).

Bir başka çalışmada su filmi kalınlığı ve süperakışkanlaştırıcı dozajının harç reolojisi ve kohezyonuna etkisi araştırılmıştır. Hamurun yoğunluğu ve su filmi kalınlığı, süperakışkanlaştırıcı dozajının artmasıyla belirgin bir şekilde artmıştır. Düşük süperakışkanlaştırıcı dozajında, harç reolojisinin su film kalınlığı ile süperakışkanlaştırıcı dozajına bağlı olduğu, yüksek süperakışkanlaştırıcı dozajlarında ise harç reolojisinin yalnızca su filmi kalınlığına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Süperakışkanlaştırıcı dozajının yayılma ve reoloji üzerindeki etkileri belirli bir dozaja kadar artış göstermiştir, ancak, harç karışımlarında kohezyon süperakışkanlaştırıcı dozajıyla bir doyumluk göstermemiştir. Yayılma ve akış hızının, sırasıyla akma gerilmesi ve görünür viskozite ile olan korelasyonları, yayılma ve akış hızının, akma gerilmesi ve görünür viskozite ile az veya çok eğdeğer

olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, topaklaşmanın azalmasıyla, artan hamur yoğunluğu ve su filmi kalınlığı ile aynı su filmi kalınlığında harcın yayılmasını artıran kohezyonun azalmasının, süperakışkanlaştırıcı katkının iki esas etkisi olduğu rapor edilmiştir (Kwan ve Fung, 2012).

Sıcaklığın akışkan harçların reolojisine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, harçların işlenebilirliğinin zaman ve sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiştir. Karışımlar polimelamin (PMS), polinaftalin (PNS), polikarboksilat (PCP) esaslı süperakışkanlaştırıcılar ve farklı yerlerden elde edilmiş çimentolarla hazırlanmıştır. Yedi farklı mikro harç karışımı değişen bağlayıcı bileşimleri ve su/bağlayıcı oranı 0.42 ve 0.53 alınarak 10°C-33°C sıcaklık aralığında hazırlanmıştır. PNS ve PMS ile yapılan karışımlarda akma gerilmesi ve plastik viskozite bağlayıcı tipinden ve sıcaklıktan bağımsız olarak zamanla lineer bir şekilde durgunluk periyodunun sonuna kadar artmıştır. PCP ile yapılan harçlarda, akma gerilmesi, 0.53 su/bağlayıcı oranlarında karışım sıcaklığına, karışım oranlarına ve zamana bağlı olarak farklı şekillerde değişkenlik göstermiştir. PCP ile yapılan harçlar, belirli bir eşik sıcaklığın üzerinde PNS ile yapılan harçlar ile aynı davranışı göstermiştir. Belirli bir eşik sıcaklığının altında, harç karışımının durgunluk periyodunun %30'undan sonra akma değeri bir ölçüde korunmuş veya azalma göstermiştir. Durgunluk periyodunun %30'undan sonra akma değerinin belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. PCP ile yapılan ve 0.53 su/çimento oranına sahip harçta kullanılan çimentonun hacimsel olarak %12.5'i uçucu kül ile değiştirildiğinde 30°C'nin altında görülen eşik sıcaklık kaybolmuştur. PCP'nin yüksek oranda emilimi polimerin yan zinciriyle birlikte çimento tanecikleri yüzeyindeki hidratasyon sürecini yavaşlatabildiği, bunun da süperakışkanlaştırıcının sıcaklığa ve başlangıç akma gerilmesi değerlerine bağımlılığının azaltması ile sonuçlandığı bildirilmiştir. Uçucu kül, çimentonun bir kısmıyla yer değiştirildiğinde plastik viskozite veya plastik viskozitenin zaman ve sıcaklık varyasyonlarında dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Uçucu kül kullanımının PCP karışımlarının dizaynlarında sıcaklık varyasyonlarına karşı güvenilirliği artırdığı görülmüştür (Petit et al., 2010).

Bir diğer çalışmada ultra ince çimentonun (UİÇ), portland çimentosu harçlarının basınç dayanımını artırmak için bir katkı olarak kullanılması araştırılmıştır. Bu çalışmada kompozit portland çimento (CPC30R) 9000

cm²/g'ye kadar öğütülerek ultra ince çimento elde edilmiştir. UİÇ kullanılarak hazırlanan karışımlar normal çimento ile hazırlanan kontrol karışımına kıyasla UİÇ yüzdesinin artmasıyla açık bir eğilimle daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. %30, 35 ve 40 oranlarında UİÇ içeren numuneler arasında ufak farklar olması optimum UİÇ oranının bu aralıkta olduğunu ortaya çıkarmıştır. Normal portland çimentosu ile hazırlanan karışıma kıyasla UİÇ'nin kinetik reaksiyonu daha hızlı ve daha ekzotermik olduğu açıklanmıştır. Hidratasyon reaksiyonlarının ilk 20 saatte hızlı bir şekilde gerçekleştiği, ancak reaksiyon mekanizmasının sabit hale dönüşmesiyle yavaşladığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı, priz süresini uzattığından, UİÇ'nin reaktif davranışını azalmıştır. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden, UİÇ miktarı arttıkça ve su/çimento oranı azaldıkça elastisite modülünün arttığı ve malzemenin daha gevrek hale geldiği görülmüştür. %30-40 oranda UİÇ kullanımının harçların mekanik özelliklerini arttırdığı, ancak öğütme maliyetinin de arttığı görülmüştür. Yazarlar, özel amaçlar için yapılan ürünlerde yüksek maliyetli katkıları yerine bu çözümün maliyeti biraz düşürülebileceğini söylemiştir (Artega-Arcos et al., 2013).

Tosun (2006) yaptığı çalışmada çimento inceliği ve SO₃ içeriğinin sıcak kürlenme yapılmış portland çimentosu harçlarına olan etkisini araştırmıştır. Çimento inceliği arttıkça yoğun hamur yapısı, düşük porozite ve iyi boşluklu mikro yapıdan dolayı iç bölgeye nem taşınması daha düşük olduğundan hidratasyona uğramamış çimento kalacağını söylemiştir. Ancak uzun vadede suyun yavaş bir şekilde iç bölgeye ilerlemesiyle birlikte hidratasyona uğramamış çimento tanecikleri uygun koşulları bulduğunda etrenjit oluşturmaya başladığı açıklanmıştır. Yazar bu gecikmiş etrenjit reaksiyonun hızlı ve zararlı bir şişmeye neden olacağını bildirmiştir.

Çimentonun tane boyu dağılımı ve yüzey alanının dayanım gelişimine olan etkisi araştırılmıştır. 2 günlük dayanımda inceliğin etkisinin oldukça yüksek olduğu, ancak, sonraki dönemde daha iri daneciklerin miktarı ince taneciklere kıyasla dayanımı daha çok etkilediği görülmüştür. CEM I 42.5R portland çimentosuna daha ince çimento eklenmesiyle erken dayanım tane dağılımının homojenliğinden dolayı olumlu etkilenmiştir. Dağılımın ince ve iri olan kısımlarının dayanıma farklı etkileri olmuştur. İki uçta minimize

edilip, dağılım üniform hale getirildiği takdirde, yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir (Çelik, 2009).

Diğer bir çalışmada çimento-uçucu kül karışımının tane boyu dağılımının akma gerilmesi ve viskoziteye olan etkisi araştırılmıştır. Tane yoğunluğu ve parçacık yüzey alanları reolojik davranışı etkileyen önemli parametreler olduğu söylenmiştir. Uçucu külün etkin bir şekilde tanecik yoğunluğunu seyreltici bir rol üstlenmesi ile çimento parçacık yoğunluğundan daha baskın bir şekilde akma gerilmesini etkilediği bildirilmiştir. Viskoziteler çimento ve uçucu kül tanecikleri ile değişmiş ve plastik viskozite ile toplam tanecik yüzey alanı veya toplam tanecik yoğunluğu arasında lineer ilişkiler olduğu rapor edilmiştir (Bentz et al., 2012).

Başka bir çalışmada çimento inceliğinin artmasıyla harçların geçirimsizliğinin azaldığı ve sülfata karşı direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca hidrasyon ısısının daha ince çimento ile yapılan harçlarda daha yüksek olduğu görülmüştür (Binici et al., 2007).

Çimento alkali miktarı

Literatürde, çimento alkali oranının azalmasıyla çimentolu karışımlarının taze hal ve reolojik özelliklerinin iyileştiği söylenmiştir (Jawed et al., 1978; Dodson and Hayden, 1989; Rollet et al., 1992). Bu olayın, boşluk çözeltisindeki alkali içeriğinin artışıyla C₃A bileşeninin reaktivitesinin artmasından dolayı kalsiyum sülfü-alüminat hidrat ürünlerinin oluşumunun hızlandığından kaynaklandığı söylenmiştir. Konu ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Jiang ve arkadaşları (1999) çimento-katkı uyumunu sağlamak için çözünebilen alkali miktarının belirlenmesi ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Bu amaçla, eşdeğer alkali oranı 0.31 ile 0.92 arasında değişen toplam 6 adet normal portland çimentosu kullanılmıştır. Hazırlanan hamur karışımlarının üzerinde Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılma ve yayılma kaybı deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, çimentonun eşdeğer alkali içeriğinin %0.4 ve 0.5 arasında olduğu durumlarda akışkanlığın iyileştiği ve zamana bağlı akışkanlık kaybının azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, söz konusu optimum alkali oranının su azaltıcı katkı miktarına ve çimento tipine bağlı olduğu ifade

edilmiştir. Alkali oranı optimum olan karışımlarda, C_3A miktarının karışım akışkanlığı kaybına kayda değer etkisi olmadığı vurgulanmıştır.

Başka bir çalışmada, Dils ve arkadaşları (2013), çimento tipinin yüksek performanslı harç karışımlarının taze hal, reolojik ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Ayrıca, karışımların boşluk yapısı cıvalı porozimetre ile analiz edilmiştir. Bu amaçla, düşük C_3A oranına ve düşük eşdeğer alkali oranına sahip 6 adet çimento kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, en yüksek Blaine inceliği ve C_3A içeriğine sahip çimento ile en yüksek alkali oranı ve en düşük SO_3 oranına sahip çimento taze hal ve reolojik özellikleri açısından en düşük performansı göstermiştir. Ayrıca, mikro-yapının çimentonun kimyasal kompozisyonu ve karışımın işlenebilirliğine bağlı olarak değiştiği söylenmiştir. Deney esnasında kapiler boşluklarla birlikte hava boşlukları da görülmüştür. Düşük miktardaki hava baloncukları ultra yüksek dayanımlı harçların basınç dayanımlarını arttırdığı söylenmiştir. Dayanımdaki artışın vakumlama tekniği ile daha yüksek yoğunluğun elde edilmesine bağlı olduğu vurgulanmıştır. Hava baloncukları içeriğinin azalmasıyla karışımların işlenebilirliği ve reolojisinin arttığı, V-Funnel akış süresinin ise bütün çimento tiplerinde azaldığı söylenmiştir. Bazı durumlarda slump akışı artış göstermiştir. Bu olay azalmış plastik viskozite ve akma değerine bağlı olabilir.

Diğer bir çalışmada, alkali sülfat oranının su azaltıcı katkı içeren hamur karışımlarının reolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Karışımların reolojik özelliklerinin belirlenmesinde döner tipi viskozimetre kullanılmıştır. Su azaltıcı katkının büyük bir kısmı C_3A ve C_4AF bileşenleri üzerine az bir miktarının ise C_3S ve C_2S bileşenleri üzerine adsorbe olduğu ifade edilmiştir. Alkali sülfatın varlığı katkının C_3A ve C_4AF üzerine adsorbe olmasını engelleyerek, C_3S ve C_2S bileşenleri üzerinde adsorbe olmasını arttırmaktadır. Çimento hamuru viskozitesinin azalmasının, su azaltıcı katkının C_3S ve C_2S bileşeni üzerinde adsorbe olmasından kaynaklandığı söylenmiştir. Alkali sülfatların artması katkının C_3S ve C_2S üzerine adsorbe olmasının arttırdığından hamur karışımlarının viskozitesi azalmıştır. Ancak, alkali sülfat oranının çok fazla olması durumunda, elektrik çift tabakasını sıkıştırarak çimento hamurunun viskozitesini arttırdığı bildirilmiştir. Sonuçta, hamurun akışkanlığı açısından optimum bir alkali sülfat miktarının söz konusu olduğu açıklanmıştır (Nawa et al., 1989).

Benzer bir çalışmada, çimento tipi, su azaltıcı katkı tipi ve miktarının hamur karışımlarının taze hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, normal ve düşük alkalili ile beyaz çimento olmak üzere 3 adet çimento ve Lingnosülfonik asit (LS) ve Melaminsülfonik asit (SMF) olmak üzere 2 adet su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre LS katkısı SMF katsına göre taze hal özeliği açısından daha başarılı olmuştur. Beyaz çimento daha yüksek inceliğe sahip olmasına rağmen, daha düşük alkali, C_3A ve C_4AF içeriği ve daha yüksek SO_3 içerdiğine sahip olduğundan taze hal özeliği açısından en iyi performansı göstermiştir (Chandra and Björnström, 2002).

Gołaszewski (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, çimento inceliği, C_3A , eşdeğer alkali ve SO_3 miktarı ile bu faktörlerin etkileşiminin yeni nesil su azaltıcı katkı performansına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, laboratuvarında üretilen 19 adet çimento ve molekül ağırlıkları düşük ve yüksek olan iki adet polieter ve bir adet polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Yüksek işlenebilirliğe sahip harç karışımları hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, taze hal özelliklerini etkileyen faktörler, etki derecesine göre sırasıyla, C_3A miktarı, çimento inceliği, eşdeğer alkali oranı ve bu faktörlerin arasında oluşan etkileşim olmuştur. Yapılan deneylerde SO_3 miktarının taze hal özellikleri üzerinde çok etkin olduğu gözlemlenmemiştir. Çimento inceliği, C_3A ve eşdeğer alkali oranlarının artışıyla, su azaltıcı katkı performansı olumsuz etkilenmiştir. C_3A miktarının artışıyla, eşik kayma gerilme değeri artmıştır, ancak, plastik viskozite değerinde hafif bir azalma söz konusu olmuştur. C_3A etkisi, çimento inceliği ve eşdeğer alkali oranı artışıyla daha da bariz olmuştur. Eşdeğer alkali miktarının artışıyla, karışımların reolojik özellikleri olumsuz etkilenmiştir. Eşdeğer alkali miktarının karışımın reolojik özellikleri üzerindeki etkisi C_3A miktarının artışıyla daha baskın olmuştur.

Başka bir çalışmada (Habbaba et al., 2014) 4 tip polikarboksilat ve tek tip polikondensat su azaltıcı katkının çimento ile uyumu ve etkileşimi incelenmiştir. Bu etkileşimde alkali sülfatların ve C_3A miktarının büyük rolü olduğu görülmüştür. Alkali sülfat/ C_3A molar oranı 2 ve üstü olduğunda etrenjit oluşumunun hızlı ve yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Katkı moleküllerinin, yüksek oranlarda oluşan bu C-A-H kristallerinin arasını doldurduğu söylenmiştir.

Diğer bir çalışmada (Grzeszczyk and Kucharska, 1988), çimentodaki alkalilerin 1 saatlik çimento hamurunun reolojik özelliklerine etkisi, kıvam eğrisi ve sabit deformasyon hızında zamanla değişen gerilme ile tahmin edilmiştir. Hamurun kıvamı ve kıvam değişiminin alkalilerin etkisiyle değiştiği söylenmiştir.

Grzeszczyk ve Kucharska'ya (1990) göre, akış eğrisi ve kayma gerilmesi klinkerin reaktivitesi ile ilişkilidir. Bu reaktivite ise alkali ve C_3A miktarına bağlıdır. K_2O oranı %0.7-1.2, Na_2O %0.1-0.2 olduğunda sülfonatlaşmanın %55'in altına düşebildiği görülmüştür. Alkalilerin sülfonatlaşma derecesi arttıkça, reolojik özelliklerde iyileşme gözlemlenmiştir. Aynı kompozisyona sahip fakat farklı alkali içerikli çimentolardan hazırlanan hamurların 28 günlük dayanımının, hamur kıvamına bağlı olduğu söylenmiştir.

Su azaltıcı katkı kaynaklı faktörler

Kimyasal katkı tipinin yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımının hava boşluğu parametrelerine etkisi Łażniewska-Piekarczyk (2013) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, birer adet yeni nesil süperakışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, viskozite iyileştirici ve anti köpürme katkının taze KYB'nin hava içeriği ve işlenebilirliğine, sertleşmiş betonun ise hava boşluğu parametresine etkisi araştırılmıştır. Sonuçta, farklı kaynaklardan gelen katkılar benzer kimyasal kompozisyonuna sahip olsa bile, birbirine alternatif olarak kullanılmasının mümkün olmadığı bildirilmiştir.

Farklı süperakışkanlaştırıcı tiplerinin kendiliğinden yerleşen betonun taze, reolojik ve dayanım özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, aynı ana zincire ve aynı polimer yapıya sahip fakat farklı moleküler ağırlığa ve karboksilik asit gruplarının farklı yan zincir yoğunluklarına sahip 4 farklı polikarboksilat-eter tabanlı süperakışkanlaştırıcı katkıların, kendiliğinden yerleşen beton (KYB)'nin basınç dayanımının yanı sıra taze ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Süperakışkanlaştırıcının yan zincir yoğunluğu arttıkça, KYB karışımlarının plastik viskozitelerinin yanı sıra V-kutusu akış sürelerinin azaldığı bildirilmiştir. Görünen akma gerilmesinin süperakışkanlaştırıcı dozajından etkilendiği, bununla birlikte katkıların diğer özellikleri KYB karışımlarının görünen akma gerilmeleri üzerinde önemli bir

etki oluşturmadağı rapor edilmiştir. Polimerin yan zincir miktarı arttıkça, çimentolu sistemin taze hal özeliğı olumsuz etkilenmiştir. Bunun yan zincirlerin kenetlenmesinden kaynaklanabileceğı bildirilmiştir. Katkı ve çimento uyumlu iken, erken dayanımın katkı tipine bağımlı olduğı, fakat 7 günden sonra bu bağımlılığın ortadan kalktığı açıklanmıştır. En yüksek çökme kaybına neden olan katkı, betonda en yüksek erken dayanımı sağlamıştır (Mardani-Aghabaglou et al., 2013).

Diğer bir çalışmanın amacı, katkı adsorpsiyonunu etkileyen PCE kaynaklı parametrelerinin incelenmesi, katkının adsorpsiyonu ile rekabette olan sülfata karşı direncinin artırılması ve bundan dolayı katkı kullanım oranının azalmasıdır. Katkının kalsit ve etrenjit üzerinde adsorpsiyonu araştırılmıştır. Ayrıca, adsorpsiyon üzerinde polietilen oksit yan zincir uzunluğu ile yoğunluğu ve polikarboksilatın anyonik fonksiyonu (karboksilat, dikarboksilat veya fosfat) etkileri analiz edilmiştir. Sonuçta, anyonik modifikasyonun sülfat çekişmesine karşı direnci arttırmak için iyi bir teknolojik yöntem olduğı söylenmiştir. Eşdeğer yük yoğunluğunda, dikarboksilat polimerinin sülfat iyonu konsantrasyonuna karşı mono-karboksilat polimerine göre daha az duyarlı olduğı söylenmiştir. Hâlbuki fosfat polikarboksilat, bu çalışmada incelenen konsantrasyonlara karşı oldukça duyarsız olmuştur (Dalas et al., 2015).

Başka bir çalışmada (Hanehara and Yamada, 1999), çimento ve lignin sülfat, naftalin sülfat, melamin sülfat, amino sülfat ve polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkıları arasındaki etkileşimi, birlikte çalışma faktörleri ve mekanizmaları çimento hidrasyonu açısından tartışılmıştır. Polikarboksilat tipi süperakışkanlaştırıcı farklı tip çimento kombinasyonunda daha uyumlu olduğı kabul edilmesine rağmen, uyumluluğun çimentodaki alkali sülfat miktarından etkilendiğini açıklanmıştır.

Rixom'a (1978) göre, süperakışkanlaştırıcı katkının molekül ağırlığı çimento hamurunun taze hal özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Yapılan bir çalışmada (Nawa et al., 1989), karışımın işlenebilirliğini arttırmak için sülfonat naftalin formaldehit süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Sonuçlara göre, katkı molekül ağırlığının artışıyla karışımın işlenebilirliği artmıştır. Ancak, belli bir molekül ağırlığının üstünde, karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Sülfonat melamin formaldehit katkıları ile ilgili yapılan başka bir

çalışmada (Cunningham et al., 1989), molekül ağırlığı yüksek olan katkıının çimento taneleri üzerinde adsorpsiyonunun fazla olduğu ancak, düşük molekül ağırlığına sahip katkı için adsorpsiyonunun az olduğu söylenmiştir. Chandra ve Björnström'a (2002) göre, süperakışkanlaştırıcı katkıları farklı karışımlarda farklı performans sergiler, hatta aynı kökenli katkıları aynı karışımda bile katkı molekül ağırlığındaki farka bağlı olarak farklı etki yaratabilir.

Benzer başka bir çalışmada, polikarboksilat esaslı katkıının molekül ağırlığı değişiminin hamur karışımlarının taze hal özeliğine etkisi araştırılmıştır (Uchikawa, 1994). Bu amaçla 25000, 21900 ve 16000 olmak üzere 3 farklı molekül ağırlığına sahip süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. 0.5, 0.3 ve 0.2 S/Ç oranlarına sahip hamur karışımları üretilmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek S/Ç oranında hazırlanan karışımda molekül ağırlığı en yüksek olan katkı, 0.3 S/Ç oranındaki karışımda, orta molekül ağırlığındaki katkı ve en düşük S/Ç oranında hazırlanan karışımda, en düşük molekül ağırlığına sahip katkı en iyi performansı sergilemiştir.

Diğer bir çalışmada polietilen oksit zincir grupları ile bloklanan bir dizi polikarboksilat asit esaslı kopolimerler sentezlenmiştir. Farklı polietilen oksit zincirlerinin çimento hamurunun akışkanlığı, zeta potansiyeli ve adsorpsiyonu üzerindeki etkileri ile beton karışımında kopolimer performansı tartışılmıştır. Sonuçlara göre, kopolimer özellikleri, polietilen oksit greft ve blok zincirlerinin uzunluğu ve yoğunluğundan etkilenmiştir. Ayrıca, bu kopolimerler belirli bir uzunlukta olan bazı polietilen blok zinciriyle, su azaltıcı kapasitesi ve sıvı tutucu yeteneği açısından çok iyi bir performans sergilemiştir. Bu tür kopolimerlerin, yüksek oranda su azaltıcı katkısı olarak kullanılabilir olduğu açıklanmıştır. Elektrostatik itici kuvvet ve sterik engelleme etkileri nedeniyle, bu katkıları kullanarak uçucu kül ve benzeri mineral katkı içeren yüksek akışkanlığa sahip beton karışımlarının üretilebilir olduğu bildirilmiştir (Li et al., 2005).

Süper emici polimer (SAP) beton karışımları için yeni ve çok amaçlı kimyasal katkı türüdür. Bu çalışmada, SAP ile modifiye edilmiş çimento esaslı harçların taze ve reolojik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, farklı su emme ve desorpsiyon (kusma) kinetiği olan iki tip SAP kullanılmıştır. Ek olarak bir tip katkıının gradasyonu da değiştirilmiştir. Reolojik özelliklerin

belirlenmesinde sürekli akım yöntemi ile çalışan bir reometre kullanılmıştır. SAP katkıların doğuştan olan belirgin su alımı kinetikleri, reolojik ve taze hal özellikleri etkileyen önemli faktör olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, SAP'in gradasyonu (derecelendirilmesi) eşik kayma gerilmesi ve plastik viskoziteyi ciddi mertebede etkilediği görülmüştür. Buna ilaveten, SAP kullanımının beton karışımlarının reolojik özellikleri üzerinde yarattığı etki, S/Ç oranı, katkı kullanım oranı ve kullanılmışsa silis dumanı miktarına bağlı olduğu söylenmiştir (Mechtcherine, 2015).

Bu çalışmada, kireçtaşı, uçucu kül ve silis dumanı kullanımının etkisi ve bu mineral katkıların çimento ile naftalin, melamin, lignosülfonat ve polikarboksilat katkıları ile uyumu üzerinde yarattığı değişiklikler incelenmiştir. Mineral katkılı ve katkısız çimentoların adsorpsiyon izotermeleri, zeta potansiyeli ve reolojik davranışları kıyaslanmıştır. Sonuçta, çimento-katkı uyumu mineral katkıların özgül yüzeyi ve yüzey yükü gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değiştiği açıklanmıştır (Burgos-Montes et al. 2012).

Polikarboksilat katkı kimyasal yapısının, katkı özelliklerine etkisi Yamada ve arkadaşları (2000) tarafından incelenmiştir. Çalışmada, polioksietilen (POE) yan zincir uzunluğu, polimerizasyon derecesi, karboksilik ve sülfonik gibi fonksiyonel grupların kompozisyonu ve polimer saflığı gibi etkenler incelenmiştir. Farklı S/Ç oranlarında hazırlanan hamur karışımlarının mini-yayıması, plastik viskozitesi ve eşik kayma gibi reolojik özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüksek S/Ç oranlarına sahip karışımlarda katkı özeliği karışım davranışını önemli derecede etkilememiştir. Düşük S/Ç oranında söz konusu etki daha belirgin olmuştur. Daha uzun POE yan zinciri, daha düşük polimerizasyon derecesi ve daha fazla sülfonik grupları içeren polimer en yüksek dispersiyonu göstermiştir. Sulu faz içerisinde iyonik fonksiyonel gruplarının konsantrasyonunun fazla olması, çimento hamuru priz süresini geciktirmiştir.

Başka bir çalışmada katkı sülfonasyon derecesinin ve molekül ağırlığının karışımın taze hal özeliğine etkisi Hsu ve arkadaşları tarafından (2000) araştırılmıştır. Bu amaçla, sentezlenmiş sülfonat formaldehit, sülfonat sodyum bisülfid ve fenol sülfonat formaldehit kullanılmıştır. Hazırlanan karışımların işlenebilirliği kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre, katkının

sülfonasyon derecesi ve molekül ağırlığı karışımların işlenebilirliğini etkilemiştir. Ancak, sülfonasyon derecesinin etkisi daha belirgin olmuştur. Karışımların taze hal özelliklerinin katkı sülfonasyon derecesi ve molekül ağırlığı artışı ile olumlu etkilendiği beyan edilmiştir.

Aitcin'in (2004) beyanına göre HSO₃ gurubu naftalin moleküllerine iki farklı modelde bağlanmaktadır. HSO₃ gurubunun β pozisyonunda bağlandığı durumunda (saat 2 yönünde bağlanması) süperakışkanlaştırıcı katkı daha üstün performans göstermiştir.

Bilindiği gibi, taze hamur karışımlarının akışkanlığı ve akışkanlık kaybı organik katkı maddelerinin eklenme zamanı ve türünden etkilenmektedir. Katkı ekleme zamanının hamur karışımlarının taze ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisi Aiad (2003) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, melamin ve naftalin formaldehit sülfonat olarak iki süperakışkanlaştırıcı katkı ile normal portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento olmak üzere iki adet çimento kullanılmıştır. Karışımların ilk 120 dakikalık davranışları incelenmiştir. Kimyasal katkı 0, 5, 10, 15, 20 ve 25 dakika gecikmeli olarak karışıma eklenmiştir. Reolojik özellikleri 0, 30, 60, 90 ve 120 dakikalık karışımlarda farklı deformasyon hızlarında (3-146 s⁻¹) Bingham modeli yardımı ile ölçülmüştür. Sonuçlara göre, katkının karışıma geç eklemesiyle beraber hem erken zamanlarda (15 dakika) hemde ileri zamanlarda (120 dakika) karışımların kesme gerilmesi, eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitesi azalmıştır, dolayısıyla, karışımın işlenebilirliği artmıştır. Ancak, taze hal özelliği açısından katkının optimum eklenme zamanının 10-15 dakika olduğu açıklanmıştır. Yazarların beyanına göre, söz konusu optimum ekleme süresi çimento ve katkı tipinden bağımsızdır.

Lignosülfonat süperakışkanlaştırıcı katkının kullanımı Rixom ve Waddicor (1981), tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, kalsiyum ve sodyum lignosülfonat katkıları kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, taze hal özellikleri açısından sodyum lignosülfonat katkısı daha başarılı olmuştur.

Malhotra ve Malanka (1978) sülfonat naftalin foemaldehit katkının sülfonat melamin formaldehit ve modife lignosülfonat katkılarına nazaran taze hal açısından daha üstün performans gösterdiğini söylemiştir. Simard ve arkadaşlarına göre (1993), sodyum-sülfonat naftalin formaldehit katkının

etkinliği kalsiyum- sülfonat naftalin formaldehit katkısına kıyasla daha fazla olmuştur.

Tagnit-Hamou ve Aïtcin'e (1993) göre süperakışkanlaştırıcı katkının polimer zincirinin uzunluğu, bağ tipi ve sülfat gurubunun dizilişı katkı performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bazı araştırmacılara (Yamada et al., 2000; Izumi et al., 2003) göre, polimerin ana zincir ve yan zincirinin uzun olması, katkı adsorpsiyonunun artmasına neden olmuştur. Bu sebeple yan zincir ve ana zincir uzunluğunun artışıyla karışımın taze hal özeliği iyileşmiştir.

Reolojik özellikleri

Bilindiği gibi taze beton reolojik özellikleri çimento ve katkı miktarı, tipi ve özellikleri dışında, katkı eklememe metodu, S/Ç oran ve katkı miktarı gibi parametrelerden de etkilenmektedir (Li et al., 2005).

Konu ile ilgili bir çalışmada, ASTM Tip I çimentosu kullanılarak 0.35 S/Ç oranına sahip çimento hamurları, moleküler yapıları farklı iki polikarboksilat esaslı polimer ve kalsiyum naftalin sülfonat esaslı olmak üzere üç farklı polimer kullanılarak, konstranre çimento hamurlarındaki viskozite düşüşlerinin fiziksel mekanizmaları, Vane geometrisine sahip C-VOR Bohlin reometresi kullanılarak araştırılmıştır. Yazarlar, akışkanlaştırıcıların çimento topaklaşmasını engelleyerek, viskoz yayılmasını azalttığını yani akışkan tabakaların kayma yerlerini ve yoğunluklarını etkilediğini bildirilmiştir. Çimento taneleri arasındaki boşluklarda bulunan kayma yığılmaları ve bu boşlukların büyüklüğu adsorbe edilmiş polimer tarafından etkilendiği söylenmiştir (Hot et al., 2014).

Benzer bir çalışmada yapısal olarak üç farklı polikarboksilat-eter esaslı polimer ve EN 197-1'e uygun olan CEM I 42.5R (referans çimentosu), CEM II/B-L 32.5N, CEM II/A-V 42.5R ve CEM III/B 32.5R olmak üzere dört farklı çimento kullanılarak, bunlar arasındaki uyum; adsorpsiyon, zeta potansiyeli, reoloji ve kalorimetri metotları kullanılarak araştırılmıştır. Adsorpsiyon eğrilerinin sonuçlarına göre, içeriğinde bulunan karboksilat grupları oranının artışıyla katkının çimento hamurundaki adsorpsiyonu artmıştır. Buna ilaveten, çimento içerisinde mineral katkı bulunmasıyla

adsorpsiyon daha da artmış, en efektif adsorpsiyon ise kireçtaşında gerçekleşmiştir. Reolojik olarak bakıldığında, katkılar için optimum karboksilat grubu/ester grubu oranı 0.7 ile 1.2 arasında gerçekleşmiştir. Çimento hamurlarında kullanılan katkıların akışkanlaştırıcı etkisi mineral katkı eklenmesine bağlıdır. Cürufllu çimentolarda katkının daha az adsorbe edilmesine rağmen, polikarboksilat-eter tabanlı katkı kullanılması reolojik parametrelerde en fazla düşüşe neden olmuştur. Katkı dozajının artışı ile çimento hamurundaki hidrasyon gecikmiştir. Katkıdan kaynaklanan geciktirici etki mineral katkının niteliğine bağlı olarak değişmiş olup cürufllu çimentoda en fazla olmuştur (Alonso et al., 2013).

Süperadsorbe katkılar süperakışkanlaştırıcı katkıların tersi etki göstererek çimentonun hidrasyonu esnasında suyu emerek çimento hamurunun daha fazla kıvam kaybetmesini sağlamayı amaçlar. Bu katkı, püskürtme betonu gibi hızlı kıvam kaybı gerektiren uygulamalar için tasarlanmıştır. Bu çalışmada farklı adsorpsiyon ve desorpsiyon kinetiklerine sahip iki farklı süperabsorbe edici katkı kullanılarak çimentolu harç karışımlarının reolojik davranışları incelenmiştir. Buna ilaveten katkılardan birinin gradasyonu da değiştirilerek kullanılmıştır. Taze haldeki harç karışımlarının reolojik özellikleri 90 dakika boyunca devamlı akış reometresinde gözlemlenmiştir. Süperabsorbe katkıların gradasyonu akma gerilmesinin ve plastik viskozitenin zamanla gelişimini belirgin bir şekilde etkilediği, bu etkinin su/bağlayıcı oranına, süperakışkanlaştırıcı dozajına ve bulunduğu takdirde silis dumanına bağlı olduğu bildirilmiştir (Mechtcherine et al, 2015).

Başka bir çalışmada kireçtaşı tozu, yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanın harç reolojisine etkisi ve bu katkıların polikarboksilik tabanlı süperakışkanlaştırıcı ile etkileşimleri araştırılmıştır. Harç karışımlarının viskoziteleri ve akma gerilmeleri süperakışkanlaştırıcı dozajının artışıyla birlikte belirgin bir şekilde azalmıştır. Katkı doğal puzolanlı karışımda olumlu etkisini yitirmiştir, ancak, kireçtaşı tozu ve yüksek fırın cürufu kullanılan karışımlarda daha etkili hale gelmiştir. Doğal puzolan kullanılmasıyla, harç karışımının yayılması azalmıştır ve diğer karışımlarla aynı yayılma gösterebilmesi için daha fazla süperakışkanlaştırıcıya ihtiyaç duymuştur. Yüksek fırın cürufu ve kireçtaşı tozu %10 ikame oranında işlenebilirliği

olumlu etkilemiştir. Bu olumlu etki katkı kullanılmadığı takdirde de görülmüştür (Adjoudj et al., 2014).

Diğer bir çalışmada, lignosülfonat, naftalin sülfonat formaldehit kondensatı ve üç farklı polikarboksilat-eter esaslı olmak üzere beş farklı akışkanlaştırıcının, kalsine edilmiş kireçli kilin %60 oranına kadar çimento ile yer değiştirilmesiyle elde edilen katkılı çimentolar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada paralel levha geometrisine sahip “Physica MCR 300” reometresi kullanılmıştır. Kalsine edilmiş kilin suyu yüksek oranda emmesinden dolayı hamur daha viskoz hale gelmiş ve akma davranışı şiddetli bir biçimde olumsuz etkilenmiştir. Diğer kimyasal katkıları içeren karışımlarda da benzer davranış görülmüştür. Polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcının egemen olan uzun yan zincirlerinin kalsine edilmiş killer arasında seyrelip tüketilmesiyle etkisi azalmıştır. Bu nedenle, polikarboksilat eterin etken olabilmesi için dozajının artırılması gereği ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı, çimento hidrasyonunda biraz gecikme görülmüştür. Naftalin sülfonat formaldehit ve lignosülfonatın, katkılı çimentodaki performansı klinker oranına bağlı olduğu söylenmiştir (Ng and Justnes, 2015).

Harç veya beton uygulayıcıları polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcıları genellikle 0.40'ın altındaki düşük su/çimento oranında kullanmaktadır. Ancak, harç veya beton karışımları bu durumda yapışkan, kıvamı yüksek; pompalama, yerleştirme ve sıkıştırma işlemi için elverişsiz karışımlar elde edilebilmektedir. Yalnızca birkaç özel polikarboksilat tabanlı süperakışkanlaştırıcı ile akışkan beton karışımları elde edilebilmektedir. Yapılan çalışmada, bu reolojik davranışın arkasındaki nedeni araştırmak için harç karışımının yayılması, akış çizgisi (mini L-box deneği) ve akış süresi ölçülmüştür. Polikarboksilat tabanlı süperakışkanlaştırıcı polimerin hidrofilik/lipofilik (su emen/yağ emen) oranının beton karışımının akışkanlığını belirleyen faktör olduğu bulunmuştur. Bu oranının artışıyla, işlenebilirlik özellikleri daha iyi hale geldiği açıklanmıştır (Lange et al., 2014).

Beton karışımlarının reolojik özellikleri bunların akma performanslarını belirlemek için kullanılır, dolayısıyla reolojik özellikler betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasında büyük öneme sahiptir. Taze betonun davranışını tam olarak anlayabilmek için içerisindeki çimento hamurunun

reolojik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Çimento hamuru, S/Ç oranı, çimento tipi ve su azaltıcı katkının dozajı gibi fiziksel ve kimyasal faktörlerden etkilenecek farklı reolojik davranışlar gösterebilir. Belit çimentosu ile hazırlanan karışımların reolojik özelliklerini incelemek amacıyla, iki farklı tip yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılarak 0.30 ile 0.36 arasında S/Ç oranına sahip karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmada "Chandler Engineering Model 3500" marka eş eksenel silindirlere sahip viskometre kullanılmıştır. Yapılan çalışmada polinaftalin sülfonat ve polikarboksilat tabanlı olmak üzere iki farklı katkının etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçta, belit çimentonun düşük S/Ç oranında polikarboksilat tabanlı akışkanlaştırıcı katkı ile kullanıldığında kayma kalınlaşması (viskozite ve kayma gerilmesi artışı) görülmüştür. Katkisiz karışımda ise kayma kalınlaşması davranışı yüksek S/Ç oranında gözlemlenmiştir. Normal portland çimentosu ile kıyaslandığında, belit çimentosu kullanımı S/Ç oranından ve su azaltıcı katkı dozajından bağımsız olarak daha düşük kayma kalınlaşması davranışı göstermiştir. Polikarboksilat tabanlı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanıldığında her iki çimento tipinde de kayma kalınlaşması araştırılmıştır. Diğer yandan, polinaftalin sülfonat esaslı katkının belit çimentosu ile olan kombinasyonlarında daha yüksek akma gerilmeleri gözlemlenmiştir (Yahia and Tanimura, 2015).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Amaç, Konu ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı, C_3A içeriğine göre sınıflanan CEM I portland çimentoları ve süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunun incelenmesi, çimentolu sistemlerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerini etkileyen çimento-akışkanlaştırıcı katkı etkileşiminden kaynaklanan olumsuzlukların belirlenmesidir.

Tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, çimento-katkı uyumunu etkileyen parametrelerin belirlenmesidir. Uyumsuzluk parametrelerinin belirlenmesi amacı ile Bolu Çimento, İstanbul Nuh Çimento, İzmir Çimentaş, Söke-Batıçim ve İzmir Batıçim ürünü olmak üzere 9 adet normal portland çimentosu temin edilmiştir. Bu çimentoların kimyasal kompozisyonunun geniş bir yelpazede olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca piyasada mevcut 3 adet polikarboksilat esaslı katkı da temin edilmiştir. Bu aşamada, farklı katkı dozajlarında polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanarak 226 hamur karışımı hazırlanmıştır. Hamurların Marsh-hunisi akış süresi ve mini çökme değeri elde edilmiştir. Sonuçta, bazı çimentolar ile katkıların uyumsuz olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, katkı-çimento bileşiminin davranışını tam olarak anlamak için karışımların statik ve dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozitesi gibi parametrelerin belirlenmesinin gerekli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, üç farklı S/Ç oranında ve üç farklı katkı dozajında polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanarak toplamda 243 hamur karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımların reolojik özellikleri belirlenmiştir. Uyumsuzluk parametreleri tanımlandıktan sonra çok değişkenli regresyon programı yardımı ile çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler etki şiddeti açısından belirlenmiştir. Bu statiksel hesaplamada, çimentonun inceliği, C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF ve eşdeğer alkali içeriği ile su azaltıcı katkı miktarı, katkı katı madde oranı ve karışımın su içeriği gibi parametreler dikkate alınmıştır. İstatistiksel analizler 4 aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, faktör analizi ile etken parametreler belirlenmiştir. İkinci aşamada, doğrusal olmayan regresyon ile girdi çıktı ilişkisi kurulmuştur. Üçüncü aşamada yapay sinir ağları yöntemi ile girdi çıktı ilişkisi kurulmuştur. Dördüncü ve son aşamada ise, duyarlılık analizi ile etken parametreler belirlenmiştir. Analiz sonunda çimento kaynaklı etken faktörlerin, etki şiddeti

sirasına göre çimentonun inceliği ile C₃A ve eşdeğer alkali içeriği olduğu saptanmıştır.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında ise, birinci aşmada belirlenen çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler hamur, harç ve beton karışımlarında detaylı olarak incelenmiştir. Bu aşamada, istatistiksel çalışma sonunda belirlenen faktörlere ilaveten literatürde çimento katkı uyumunu etkilediği vurgulanan, çimentonun alçı türü ve su azaltıcı katkı yan zincir yoğunluğu etkisi de incelenmiştir. Bu bağlamda, çimento hamurlarının, mini-yayılması, Marsh-hunisi akış süresi ve reolojik özellikleri, harç karışımlarının ise, katkı ihtiyacı, zaman içerisinde yayılma kaybı, V-hunisi akış süresi, zamana bağlı akış kaybı, reolojik özellikleri ve 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Beton karışımlarında ise, hava içeriği, sertleşmiş ve taze birim hacim ağırlığı, çökme, yayılma, zamana bağlı çökme ve yayılma kaybı ile 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı belirlenmiştir. Sonuçları daha kolay yorumlayabilmek amacı ile seçilen bazı karışımlarda XRD analizleri yapılarak oluşan etrenjit ve monosülfoalüminat ürünleri hakkında daha detaylı bilgi elde edilmiştir.

3.2. Malzemeler

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ile çimento hamuru, harç ve beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları verilmiştir.

3.2.1. Çimento

Daha öncede vurgulandığı gibi, bu tez çalışması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birincisi, çimento-katkı uyumunu etkileyen faktörlerin belirlenmesi, ikincisi ise seçilen karışımlarda belirlenen faktörlerin daha detaylı incelenmesidir.

3.2.1.1. Çalışmanın birinci aşamasında kullanılan çimentolar

Birinci aşamada, uyumsuzluk parametrelerinin belirlenmesi amacı ile Bolu Çimento (3), Çanakkale Akçansa (2), İstanbul Nuh Çimento (1), İzmir Çimento (1), Söke-Batıçim (1) ve İzmir Batıçim (1) ürünü olmak üzere 9

adet normal portland çimentosu bunlara ait klinker ve üretiminde kullanılan alçıtaşı temin edilmiştir. Çimento fabrikası tarafından analizleri gerçekleştirilen çimento, klinker ve alçıtaşlarının kimyasal ve fiziksel özellikleri sırasıyla, Çizelge 3.1 ila 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.

	Ç-1	Ç-2	Ç-3	Ç-4	Ç-5	Ç-6	Ç-7	Ç-8	Ç-9	
SiO ₂	19.85	18.77	18.95	18.98	19.03	21.88	19.01	18.21	18.65	
Al ₂ O ₃	4.41	3.67	3.66	4.11	4.08	3.76	2.82	3.97	5.09	
Fe ₂ O ₃	4.14	5.05	4.95	3.48	3.42	4.05	4.64	3.17	2.45	
CaO	61.05	64.27	63.91	65.34	64.84	62.58	64.28	64.39	63.75	
MgO	1.68	1.38	1.52	1.78	1.48	1.56	1.42	1.17	2.35	
Na ₂ O	0.27	0.20	0.24	0.10	0.28	0.63	0.72	0.42	0.64	
K ₂ O	0.50	0.62	0.41	0.58	0.63	0.63	0.74	0.7	0.9	
SO ₃	3.16	3.17	2.81	2.83	3.10	2.47	3.00	2.95	2.72	
Cl ⁻	-	0.006	0.006	0.005	0.005	0.007	0.007	0.005	-	
Serbest CaO	1.37	1.42	1.97	1.69	1.93	1.22	0.91	1.41	1.51	
Kızdırma kaybı	3.3	1.40	1.64	2.01	1.37	0.70	2.53	3.3	1.77	
Toplam	99.73	99.96	100.06	100.09	100.16	99.49	100.08	98.99	99.83	
Özgül ağırlık	3.14	3.16	3.16	3.15	3.14	3.15	3.2	3.11	3.11	
Özgül yüzey (cm ² /g)	4260	3820	3760	3690	3900	2810	3810	3090	3510	
0.090 mm elek üstü	0.2	0	0	0.2	0.2	4.9	0.2	1.3	0.4	
0.045 mm elek üstü	1.4	1.7	2	3.1	11.4	21.5	0.3	-	-	
0.032 mm elek üstü	6.6	7.2	7.9	9.5	20.7	33.6	7.3	21.4	2.7	
Priz süresi	Başlangıç	02:50	02:50	03:30	02:40	02:25	02:25	02:55	02:50	02:30
(saat)	Bitiş	05:10	05:15	05:25	04:35	03:45	03:35	04:05	04:50	04:05
Vicat Suyu* (%)		30.2	30.8	30.4	28	28.2	24.6	28.8	27.6	27.2

*Normal kıvam için gereken su miktarı.

Çizelge 3.2. Klinkerlerin kimyasal özellikleri.

	K-1	K-2	K-3	K-5	K-6	K-7	K-8	K-9
SiO ₂	21.13	21.24	21.14	21.53	21.21	20.94	20.86	20.91
Al ₂ O ₃	5.07	4.4	4.13	4.64	4.11	4.39	5.14	6.85
Fe ₂ O ₃	4.48	5.25	5.35	3.18	4.32	5.01	3.38	2.52
CaO	65.83	65.67	65.7	66.32	65.68	64.55	66.00	66.17
MgO	1.36	1.4	1.38	1.27	1.39	1.89	1.09	1.23
Na ₂ O	0.30	0.32	0.32	0.34	0.33	0.37	0.35	0.34
K ₂ O	0.52	0.45	0.45	0.74	0.59	0.92	0.87	1.12
SO ₃	0.48	0.45	0.51	0.81	1.11	0.95	1.06	0.5
Cl ⁻	0.008	0.009	0.015	0.016	0.014	0.011	0.012	0.008
S.CaO	1.02	1.18	1.39	1.10	1.32	1.23	1.61	2.05
C ₃ S	62.83	64.03	65.73	66.15	67.10	61.99	64.21	52.5
C ₂ S	13.20	12.63	11.05	11.86	10.20	13.31	11.39	20.37
C ₃ A	5.85	2.77	1.90	6.92	3.58	3.15	7.92	13.88
C ₄ AF	13.63	15.98	16.27	9.68	13.13	15.23	10.27	7.67

*K-4 klinkeri elde edilemediği için analizi yapılamamıştır.

Çizelge 3.3. Çimento üretiminde klinkere eklenen alçıtaşının kimyasal özellikleri.

	A-1	A-2	A-3	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9
SiO ₂	3.48	3.48	3.48	7.4	7.4	0.22	1.73	0.17
Al ₂ O ₃	0.58	0.58	0.58	1.83	1.83	0	0.19	0
Fe ₂ O ₃	0.4	0.4	0.4	0.94	0.94	0.09	0.29	0.07
CaO	32.09	32.09	32.09	29.56	29.56	31.71	33.96	33.01
MgO	1.36	1.36	1.36	1.63	1.63	1.32	1.27	1.12
Na ₂ O	0.47	0.47	0.47	0.59	0.59	0.43	0.43	0.46
K ₂ O	0.14	0.14	0.14	0.38	0.38	0	0.06	0
SO ₃	38.51	38.51	38.51	38.47	38.47	40.00	39.63	38.02
Kızdırma kaybı	22.85	22.85	22.85	19.43	19.43	22.12	21.35	22.14

*Elde edilemeyen A-4 alçıtaşı kompozisyonu verilememiştir.

**Aynı fabrika ürünü olan Ç-1, Ç-2 ve Ç-3 çimentolarında tek tip alçıtaşı kullanılmıştır. Benzer durum Ç-5 ve Ç-6 çimentoları içinde geçerlidir.

3.2.1.2. Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan çimentolar

a) Alçıtaşı türü etkisinin incelemesinde kullanılan çimentolar

Çalışmada bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına "Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" uygun, farklı alçıtaşları içeren, iki tip CEMI 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Üretici firma beyanına göre her iki tip ticari çimentonun klinkeri aynı ancak, üretim esnasında klinkere eklenen alçıtaşı farklıdır. Üretim esnasında klinker ile beraber öğütülen alçı tipine bağlı olarak, çimentolar ve bu çimentoları içeren karışımlar HG (hemihidrat alçısı içeren çimento) ve DG (dehidrat alçısı içeren çimento) olarak adlandırılmıştır. HG çimentosu üretiminde 1/2 mol su içeren hemihidrat (CaSO₄.1/2H₂O), DG çimentosunda ise 2 mol su içeren dehidrat (alçıtaşı- CaSO₄.2H₂O) kullanılmıştır. Çimento ve çimento üretiminde kullanılan alçıtaşlarının üretici firma tarafından verilen kimyasal bileşimi, mekanik ve fiziksel özellikleri sırasıyla, Çizelge 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Klinker ve çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Oksit	Klinker	HG	DG	Fiziksel özellikleri	HG	DG
SiO ₂	20.74	18.21	18.29	Özgül ağırlığı	3.11	3.11
Al ₂ O ₃	5.43	4.11	4.27	Priz süresi	140	160
Fe ₂ O ₃	3.32	3.07	3.13	(Dakika) Başlangıç	215	300
CaO	65.93	64.70	64.59	Bitiş	1.0	0.5
MgO	1.16	1.28	1.41	Hacim genişmesi (Le chatelier, mm)	HG	DG
K ₂ O	0.97	0.42	0.51	İncelik	2860	3060
Na ₂ O	0.36	0.81	0.76	Özgül yüzeyi (Blaine, cm ² /g)	0.9	0.8
Cl-	0.012	0.005	0.006	0.090 mm elekten kalıntı (%)	23.2	22.2
SO ₃	1.06	3.64	3.36	0.032 mm elekten kalıntı (%)		
LOI	-	2.5	2.86			
Katkı	-	3.92	4.68			

Çizelge 3.5. Çimento üretiminde kullanılan alçıtaşının kimyasal özellikleri.

Oksit %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI	Ölçülme
G _{HG} *	0.18	0	0.09	38.85	2.04	51.45	7.36	0.03
G _{DG}	0.42	0.01	0.08	34.28	2.24	35.75	24.98	2.24

* G: alçıtaşı,

b) Çimento C₃A oranı etkisinin incelemesinde kullanılan çimentolar

Çalışmada bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına "Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" uygun farkı C₃A içeriğine sahip 3 adet CEMI 42.5 tipi çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentolar Çizelge 3.1'de Ç-1, Ç-2 ve Ç-3 olarak adlandırılan çimentolardır. Üretici firma beyanına göre her 3 çimentonun hammaddesi ve üretim esnasında klinkeri ile birlikte öğütülen alçıtaşı aynıdır. C₃A içeriğine göre çimentolar Ç_{5.85}, Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} olarak adlandırılmıştır. Kodlarda yer alan rakamlar çimentonun C₃A içeriğini % olarak vermektedir. Çimentoların ve bunlara ait klinkeri ile alçıtaşının üretici firma tarafından verilen kimyasal bileşimi, mekanik ve fiziksel özellikleri sırasıyla, Çizelge 3.6 ve 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Oksit (%)	Ç _{5.85}	Ç _{2.77}	Ç _{1.90}	Fiziksel özellikleri	Ç _{5.85}	Ç _{2.77}	Ç _{1.90}
SiO ₂	19.85	18.77	18.95	Özgül ağırlığı	3.14	3.16	3.16
Al ₂ O ₃	4.41	3.67	3.66	Priz süresi	02:50	02:50	03:30
Fe ₂ O ₃	4.14	5.05	4.95	(Saat)	05:10	05:15	05:25
CaO	61.05	64.27	63.91	Vicat Suyu (%)	30.2	30.8	30.4
MgO	1.68	1.38	1.52	İncelik	Ç _{5.85}	Ç _{2.77}	Ç _{1.90}
Na ₂ O	0.27	0.20	0.24	Özgül yüzeyi (Blaine, cm ² /g)	4260	3820	3760
K ₂ O	0.50	0.62	0.41	0.090 mm elekte kalıntı (%)	0.2	0	0
SO ₃	3.16	3.17	2.81	0.045 mm elekte kalıntı (%)	1.4	1.7	2
Cl ⁻	-	0.006	0.006	0.032 mm elekte kalıntı (%)	6.6	7.2	7.9
Serbest CaO	1.37	1.42	1.97				
K.kaybı	3.3	1.40	1.64				
Toplam	99.73	99.96	100.0				

Çizelge 3.7. Klinkerlerin ve alçıtaşının kimyasal özellikleri

Oksit	Klinker			Klinkere eklenen alçıtaşı
	K _{5.85}	K _{2.77}	K _{1.90}	Tüm çimentolarda aynı alçıtaşı kullanılmıştır
SiO ₂	21.13	21.24	21.14	3.48
Al ₂ O ₃	5.07	4.4	4.13	0.58
Fe ₂ O ₃	4.48	5.25	5.35	0.4
CaO	65.83	65.67	65.7	32.09
MgO	1.36	1.4	1.38	1.36
Na ₂ O	0.30	0.32	0.32	0.47
K ₂ O	0.52	0.45	0.45	0.14
SO ₃	0.48	0.45	0.51	38.51
Cl ⁻	0.008	0.009	0.015	-
S.CaO	1.02	1.18	1.39	22.85
C ₃ S	62.83	64.03	65.73	
C ₂ S	13.20	12.63	11.05	
C ₃ A	5.85	2.77	1.90	
C ₄ AF	13.63	15.98	16.27	

c) Çimento alkali oranı etkisinin incelemesinde kullanılan çimentolar

Bu çalışmada bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına "Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" uygun olarak yüksek alkali (HA) ve düşük alkali (LA) içeriklerine sahip iki adet CEMI 42.5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoların üretici firma tarafından verilen kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.8'de

verilmiştir. Çimentoların eşdeğer alkali miktarı ASTM C150 standardına göre Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Çimento eşdeğer alkali oranı (\%)}: Na_2O(\%) + 0.658 \times K_2O(\%) \quad [3.1]$$

Çizelge 3.8. Çimentoların kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

Bileşen (%)	Yüksek alkali (HA)	Düşük alkali (LA)
SiO ₂	19.72	19.54
Al ₂ O ₃	5.31	4.80
Fe ₂ O ₃	3.37	5.71
CaO	61.33	61.65
MgO	2.33	1.89
SO ₃	3.33	3.12
Na ₂ O	0.53	0.37
K ₂ O	0.77	0.40
Cl ⁻	0.0136	0.0087
Çözünmeyen kalıntı	0.48	0.20
Kızdırma kaybı	2.09	1.53
Toplam	99.24	99.22
Eşdeğer alkali oranı	1.04	0.63
Özgül ağırlık	3.08	3.13
Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)	3960	3570
Hacim sabitliği (Le Chatelier, mm)	1.00	1.00

d) Çimento inceliği etkisinin incelemesinde kullanılan çimentolar

Bu incelemede kullanılan 2 adet çimento, Çizelge 3.1'de verilen Ç-6 ve Ç-8 çimentolarıdır. Ç-6 çimentosu katkı ile uyum gösteren ve eldeki en iri çimento olduğu için, Ç-8 çimentosu ise Ç-6'ya en yakın inceliğe sahip olduğu için seçilmiştir. Bu aşamada çimentolar sırasıyla, SDÇ ve NÇ olarak kodlandırılmıştır. Çimentolara ait klinkerlerin ve alçıtaşlarının üretici firmalar tarafından verilen kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.9 ile 3.10'da verilmiştir. İncelik faktörünü daha net araştırmak amacı ile, çimentolar öğütme işlemine tabi tutularak farklı incelik seviyelerine getirilmiştir. Bilindiği gibi çimentoların başlangıç inceliği aynı olmadığı için ayrıca farklı klinkerle üretildikleri için, her iki çimentonun inceliği yakın olsun diye çimentolar farklı devir sayısında öğütülmüştür. Deneysel çalışma kapsamında istenilen inceliklerde çimento üretmek için çimentolar bilyeli öğütücüde 80 devir/dakika hızında farklı toplam devir sayılarında öğütülmüştür. Öğütülen çimentoların fiziksel özellikleri Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.9. NÇ ve SDC çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Oksit (%)	NÇ	SDÇ	Fiziksel özellikleri	NÇ	SDÇ
SiO ₂	18.21	21.88	Özgül ağırlığı	3.11	3.15
Al ₂ O ₃	3.97	3.76	Priz süresi	Başlangıç	02:50
Fe ₂ O ₃	3.17	4.05	(Saat)	Bitiş	04:50
CaO	64.39	62.58	Vicat Suyu (%)	27.6	24.6
MgO	1.17	1.56	İncelik	NÇ	SDÇ
Na ₂ O	0.42	0.63	Özgül yüzeyi (Blaine, cm ² /g)	3223	2810
K ₂ O	0.7	0.63	0.090 mm elekte kalıntı (%)	1.3	4.9
SO ₃	2.95	2.47	0.045 mm elekte kalıntı (%)	-	21.5
Cl ⁻	0.005	0.007	0.032 mm elekte kalıntı (%)	21.4	33.6
Serbest CaO	1.41	1.22			
K.kaybı	3.3	0.7			
Toplam	98.99	99.49			

Çizelge 3.10. Klinkerlerin ve alçıtaşının kimyasal özellikleri

Oksit	Klinker		Alçıtaşı	
	NÇ	SDÇ	NÇ	SDÇ
SiO ₂	20.86	21.21	1.73	7.4
Al ₂ O ₃	5.14	4.11	0.19	1.83
Fe ₂ O ₃	3.38	4.32	0.29	0.94
CaO	66.00	65.68	33.96	29.56
MgO	1.09	1.39	1.27	1.63
Na ₂ O	0.35	0.33	0.43	0.59
K ₂ O	0.87	0.59	0.06	0.38
SO ₃	1.06	1.11	39.63	38.47
Cl ⁻	0.01	0.01	-	-
S.CaO	161	1.32	21.35	19.18
C ₃ S	64.21	67.10		
C ₂ S	11.39	10.20		
C ₃ A	7.92	3.58		
C ₄ AF	10.27	13.13		

Çizelge 3.11. Öğütülmüş çimentoların fiziksel özellikleri

	NÇ				SDÇ			
	0	5000	10000	15000	0	5000	10000	20000
Devir sayısı	0	5000	10000	15000	0	5000	10000	20000
Özgül ağırlık	3.08	3.08	3.08	3.08	3.00	3.00	3.00	3.00
Blaine inceliği (cm ² /g)	3223	3835	4321	4580	2810	3180	3540	4230
32 µm elek üstü (%)	24.95	23.10	21.70	21.65	35.90	32.10	28.50	25.90
45 µm elek üstü (%)	14.25	11.75	10.65	9.50	23.10	19.95	17.05	14.25
90 µm elek üstü (%)	4.15	3.10	2.05	1.15	4.85	3.95	3.35	3.00

e) Kimyasal katkı özeliği etkisinin incelemesinde kullanılan çimento

Bu çalışmada TS EN 197 standardına "Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" uygun bir tipi CEM II B-M (L/W) 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun üretici firma tarafından verilen kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.12 verilmiştir.

Çizelge 3.12. Çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Oksit	CEM II	Fiziksel özellikleri		CEM II
SiO ₂	20.52	Özgül ağırlığı		2.97
Al ₂ O ₃	6.46	Priz süresi	Başlangıç	03:55
Fe ₂ O ₃	3.31	(Saat)	Bitiş	05:40
CaO	57.45	Vicat Suyu (%)		27.6
MgO	1.54	İncelik		CEM II
Na ₂ O	0.44	Özgül yüzeyi (Blaine, cm ² /g)		4590
K ₂ O	0.88	0.090 mm elekte kalıntı (%)		0.3
SO ₃	3.13	0.045 mm elekte kalıntı (%)		-
Cl ⁻	0.01	0.032 mm elekte kalıntı (%)		9.2
Serbest CaO	2.02	Basınç dayanımı (MPa)	2 günlük	32.1
K.kaybı	3.8		7 günlük	46.3
Toplam	99.56		28 günlük	55.2

3.2.2. Agrega

Deneyisel çalışma çimento hamuru, harç ve beton karışımları deneyleri olmak üzere 3 farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada hazırlanan harç karışımlarında TS EN 206-1 "Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk" standardına uygun CEN standard kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun tane boyu dağılımı ve ilgili standard limitleri Çizelge 3.13'te verilmiştir.

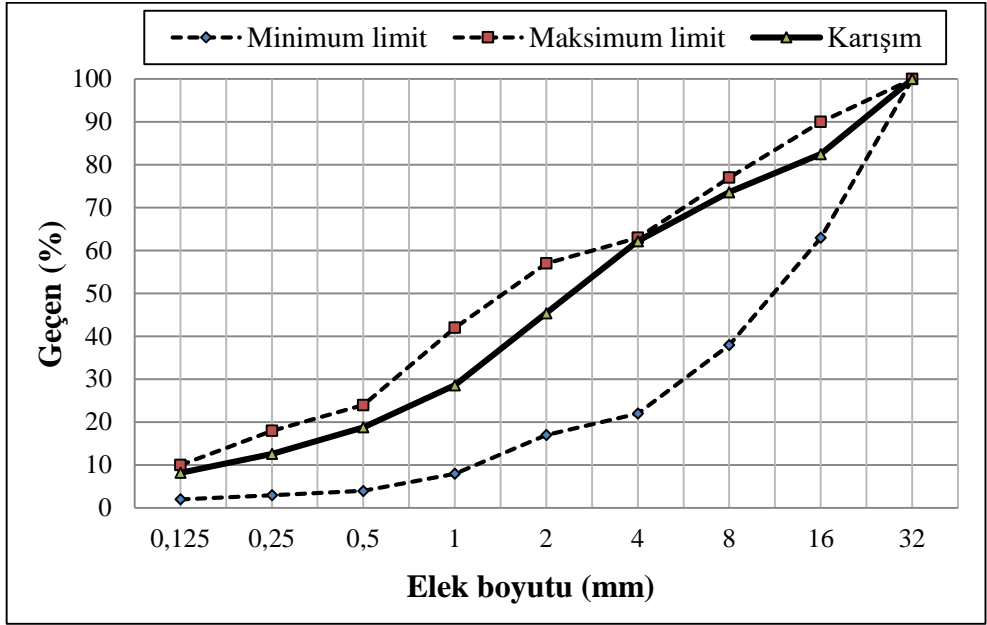
Çizelge 3.13. CEN referans kumu tane boyu dağılımı limitleri

Kare göz açıklığı (mm)	Kalan (%)	Standart limitleri
2.00	0	0
1.60	4.32	7 ± 5
1.00	33.98	33 ± 5
0.50	67.11	67 ± 5
0.16	86.85	87 ± 5
0.08	99.83	99 ± 5

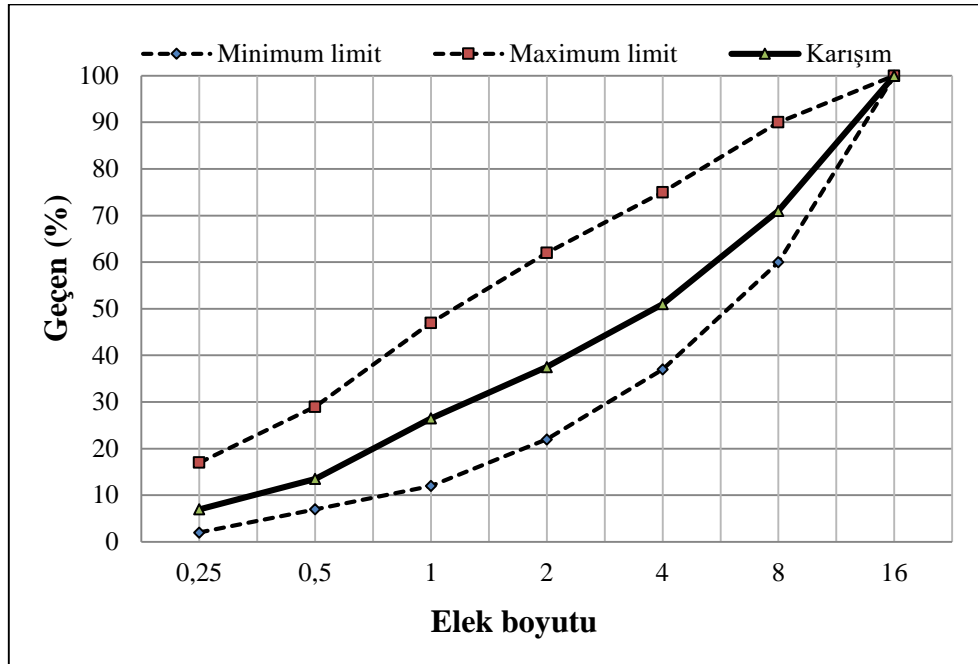
Daha önce de vurgulandığı üzere tez çalışması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında hem normal beton hem de kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımları üretilmiştir. Her iki karışımda da agregalar olarak kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Ancak, agregaların gradasyonu farklı olduğundan her iki karışım için agregalar gradasyonları ayrı ayrı verilmiştir.

Normal beton üretimi için, 0-3, 0-5, 5-15 ve 15-25 mm olmak üzere dört farklı boyda kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Normal beton karışımları için en büyük tane boyu 25 mm olan agregaların, elek analizi sonucu dikkate alınarak beton karışımlarında kullanılan oranları (0-3 mm) %40, (0-5 mm) %20, (5-15 mm) %20 ve (15-25 mm) %20 olarak belirlenmiştir. Normal beton karışımlarında kullanılan agregalar karışımının gradasyonu ve ilgili standart sınırları Şekil 3.1’de verilmiştir.

KYB karışımları üretiminde kullanılan, en büyük tane boyutu 15 mm olan kırma kireçtaşı agregaların elek analizi sonucu dikkate alınarak beton karışımlarında kullanılan oranları (0-5 mm) %50 ve (5-15 mm) %50 olarak belirlenmiştir. KYB karışımları üretiminde kullanılan agregalar karışımının granülometrisi ve ilgili standart sınırları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Normal beton üretiminde kullanılan agreganın gradasyonu ve TS EN 206 standardı sınırları



Şekil 3.2. KYB üretiminde kullanılan agreganın gradasyonu ve TS EN 206 standardı sınırları

Agregaların özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi, TS EN 1097-6 "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini" standardına uygun olarak belirlenmiştir. Agregaların fiziksel özellikleri Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Agreganın fiziksel özeliği

	0-3 mm	0-5 mm	5-15 mm	15-25 mm
Görünür özgül ağırlığı	2.71	2.74	2.68	2.69
Etüv kurusu özgül ağırlığı	2.63	2.68	2.65	2.66
Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı	2.66	2.70	2.66	2.67
Su emme kapasitesi (%)	1.15	0.75	0.45	0.45
Gevşek yığın yoğunluğu (kg/m ³)	1780	1730	1515	1490

3.2.3. Su azaltıcı katkı

Tez çalışmasının ilk aşamasındaki karışımlarda, TS EN 934-2+A1 "Kimyasal Katkılar - Beton, Harç ve Şerbet için - Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları - Tarifler, Gereklere, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme " standardına uygun, "Priz Geciktirici Yüksek Oranda Su Azaltıcı/Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkısı' olarak üç adet polikarboksilat-eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Daha sonra en uyumlu katkı seçilerek çalışmanın ikinci aşamasında tek tip katkı kullanılmıştır. Kullanılan katkıların üretici firma tarafından verilen özellikleri Çizelge 3.15'te verilmiştir.

Çizelge 3.15. Polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı özellikleri

Tip	Alkali miktarı (%) (Na ₂ O)	Yoğunluk (g/cm ³)	Katı madde miktarı (%)	Cl (%)	pH, 25 °C	Kullanım aralığı (%) [*]	Birim Fiyat (TL/kg)
SP-1	< 5	1.098	33.5	0.012	6.54	0.6 - 2.0	3.30
SP-2	< 5	1.099	33.76		6.60	0.6 - 2.0	5.22
SP-3	0.31	1.075	38.56	0.009	5.68	0.6 - 2.0	3.4

* Çimento ağırlığının yüzdesi olarak

Su azaltıcı katkı özelliklerinin çimento-katkı uyumu üzerindeki etkisini incelemek için aynı polimer yapısına ve aynı aza zincir ve yan zincir uzunluğa, fakat farklı molekül ağırlığına ve farklı yan zincir yoğunluğuna sahip dört adet polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Katkıların üretici firma tarafından verilen özellikleri Çizelge 3.16'da verilmektedir.

Çizelge 3.16. KYB karışımları üretiminde kullanılan su azaltıcı katkı özellikleri

	A	B	C	D
Görünüm	Hafif sarımsı sıvı	Hafif sarımsı sıvı	Hafif sarımsı sıvı	Hafif sarımsı sıvı
pH, 25 °C	6.2	6.03	6.0	6.86
Yoğunluk , (g/cm ³)	1.116	1.097	1.073	1.116
Ortalama molekül ağırlığı	50000	42000	48000	42000
Karboksilik asit gruplarının yan zinciri yoğunluğu	1:5	1:3	1:4.5	1:6
Viskozite cP, pervane dönüş hızı (rpm)	896 cP, 20	265 cP, 100	256 cP, 100	940 cP, 30

3.2.4. Su

Yapılan araştırmada pH değeri 7.4 olan Bornova şebeke suyu kullanılmıştır.

3.3. Karışımların Hazırlanması

3.3.1. Çimento hamuru karışımlarının hazırlanması

Önceki Çalışmalarda (Aitcin, 2004) önerilen 0.35-0.40 S/Ç oranı dikkate alınarak bu çalışmada Marsh-hunisi ve mini-yayımla deneyinde karışımların S/Ç oranı 0.35 olarak seçilmiştir. Tüm karışımlarda çimento ve su miktarı sabit tutulmuştur. Her çimento için, süper akışkanlaştırıcı katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten çimento ağırlığının %0.5'i ile %2.75'i arasında değişen 10 farklı oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Hamur karışımlarının hazırlama yöntemi aşağıda özetlenmiştir:

1. Kimyasal katkı su ile 30 saniye boyunca 62 devir/dakika (yavaş) hızla karıştırılmıştır.
2. Mikser durdurulup, çimento eklenip 30 saniye boyunca 62 devir/dakika (yavaş) hızla karıştırılmıştır.
3. Mikser durdurulup, mikser kabının kenarına yapışıp ve karışmayan çimento taneleri kaşık ile temizlenmiştir.
4. Daha sonra 2 dakika boyunca 125 devir/dakika (hızlı) hızla karıştırılmıştır.

Ancak, reolojik parametrelerinin incelenmesinde, her bir çimento-katkı ikilisi için, üç farklı S/Ç oranında (0.35, 0.33 ve 0.32) ve üç farklı katkı dozajında (çimento ağırlığının %0, %0.1 ve %0.2'si) toplam 9 adet hamur karışımları hazırlanmıştır. Böylece tezin ilk aşamasında, toplam 270 adet hamur karışımı hazırlanarak, tüm karışımların reolojik özellikleri incelenmiştir. S/Ç oranı 0.35'in üstünde olduğu zaman, karışımlarda katkı kullanım gereksinimi azalmıştır. 0.32'den daha düşük S/Ç oranında hazırlanan karışımlar ise, aşırı katılıktan dolayı, homojen bir şekilde karıştırılması mümkün olmamıştır. Hamur karışımları mutfak tipi yüksek devirli bir karıştırıcı kullanılarak homojen bir şekilde hazırlanmıştır. 0.32 ve 0.33 S/Ç oranlarına sahip karışımlar çok yakın reolojik özellikler sergilediği için 0.33 S/Ç oranında hazırlanan karışımların reolojik değerleri tezde verilmemiştir. Reolojik özelliklerin ölçümleri için karışımların hazırlama yöntemi aşağıda özetlenmiştir:

1. Çimento, su ile 30 saniye boyunca 62 devir/dakika (yavaş) hızla karıştırılmıştır.
2. Mikser durdurulup, tabana yapışan ve karışmayan hamur varsa kaşık ile sıyrılmıştır.
3. Karışım, iki dakika boyunca 125 devir/dakika (hızlı) hızla karıştırılmıştır. Dolayısıyla katkı içermeyen karışımlarda toplam karıştırma süresi 2.5 dakika olarak alınmıştır.
4. Katkı içeren karışımlarda, ilk başta süperakışkanlaştırıcı katkısı içermeyen kontrol (Ç-SP-%0) karışımı yukarıda anlatılan yöntemle uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Kontrol karışımı deneye tabi tutulduktan hemen sonra tekrar mikser boşaltılıp 30 saniye boyunca 62 devir/dakika (yavaş) hızla karıştırılmıştır. Mikser durdurulup, tabana yapışan hamur varsa kaşık ile sıyrılmıştır. Daha sonra çimento ağırlığının %0.1'i kadar süperakışkanlaştırıcı katkı ilave edilip 2 dakika boyunca 125 devir/dakika (hızlı) hızla karıştırılarak %0.1 katkı içeren karışımı (Ç-SP-%0.1) hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımın reolojik ölçümleri alındıktan sonra tekrar mikser boşaltılıp bir kere daha çimento ağırlığının %0.1'i kadar süperakışkanlaştırıcı

katkı eklenerek aynı şekilde %0.2 katkı içeren karışım (Ç-SP-%0.2) hazırlanmıştır. Deney esnasında, karışımın su kaybını engellemek için mikserin kapağı kapalı tutulmuştur.

Bunlara ilaveten, hamur karışımlarında, oluşan kalsiyum sülföalüminat hidrat ürünlerinin oluşumunu incelemek amacı ile hamur karışımları üzerinde X ışını kırımı (XRD) analizi yapılmıştır. Bu amaçla, 0.35 S/Ç oranına sahip farklı çimentoları içeren kimyasal katkı içermeyen hamur karışımları hazırlanmıştır. Numuneler deney gününe kadar standart koşulda küremeye tabi tütülmüştür. Deneyden önce, numuneler 24 saat boyunca 40°C'lık bir fırında kurutulmuştur. Kurutulan numuneler kırılıp toz haline getirilmiştir. Daha sonra No. 325 (45µm) elekten elenerek, elekten geçen toz malzeme XRD analizine tabi tutulmuştur.

3.3.2. Harç karışımlarının hazırlanması

Harç karışımları ASTM C109 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" metoduna uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda S/Ç oranı, kum/çimento oranı ve yayılma değeri sırasıyla, 0.485, 2.75 ve 270±10 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için polikarboksilat-eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Harç karışımları homojen olarak Hobart mikserinde hazırlanmıştır.

3.3.3. Beton karışımlarının hazırlanması

Tez kapsamında çimento özeliğinin çimento-katkı uyumuna etkisini araştırmak için geleneksel beton karışımları üretilmiştir. Ancak, süperakışkanlaştırıcı katkı kaynaklı faktörlerin incelenmesi için kendiliğinden yerleşen beton karışımları hazırlanmıştır. KYB karışımlarının seçim nedeni daha yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı içermeleridir. Ayrıca, var olan paletli reometre ile KYB kıvamında aşırı akışkan karışımların reolojik özellikleri belirlenebilmekteydi. Her iki beton tipinin üretim prosesi ile ilgili gerekli bilgiler aşağıda verilmiştir. Ancak, beton karışımlarında kullanılan 10 adet çimentonun özgül ağırlıkları farklı olduğundan ve aynı çökme farklı katkı içeriklerinde elde edildiği için, beton karışım oranları çimentoya göre

değişim göstermiştir. Bu nedenle, betonların karışım oranları ilgili bölümlerde verilmiştir.

ACI 211 "Standard Practice For Selecting Proportions For normal, Heavyweight and Mass Concrete" yöntemine uygun olacak şekilde tasarlanan beton karışımlarında, S/Ç oranı 0.45 karışımların kıvamı ise 230 ± 20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen kıvamı sağlamak için farklı oranlarda polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tüm hamur, harç ve beton karışımlarının hazırlaması ve deneyleri, sıcaklık kontrollü odada $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda bu sıcaklığı elde etmek için malzemeler aynı sıcaklıkta bekletilmiştir.

EFNARC (2005) "Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete" standardına uygun olacak şekilde farklı su azaltıcı katkı içeren 0.4 S/Ç oranına sahip 4 adet kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda sabit miktarda (450 kg/m^3) CEM II B-M (L/W) 42.5R tipi çimentosu kullanılmıştır. Tüm karışımların yayılma miktarı 730 ± 10 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için $5.5\text{-}7.5 \text{ kg/m}^3$ aralığında su azaltıcı katkı kullanılmıştır. KYB karışım oranları tezin 4.2.5 bölümünde verilmiştir.

3.4. Çalışma Kapsamında Uygulanan Deneyler

Tez çalışmasında uygulanan deneyler ve ilgili standartlar bu bölümde kısaca anlatılmıştır:

3.4.1. Hamur karışımları deneyleri

Çimentoların başlangıç ve bitiş priz süreleri ASTM C 191" Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle" standardına uygun olarak belirlenmiştir. Bu deney için gereken hamur karışımları ASTM C 305" Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency" standardına uygun olacak şekilde hazırlanmıştır.

Hamur karışımlarının akış süresi, mini yayılma değerleri ve nihai viskozite ve dinamik ile statik EKG gibi reolojik parametreleri belirlenmiştir.

Yaklaşık 1.2 lt. olarak hazırlanan homojen çimento hamuru karışımı vakit kaybetmeden alt ucu parmakla kapanan Marsh-hunisi içine dökülüp daha sonra parmak huni ucundan kaldırılarak 700 ml'lik hacim boşalana kadar geçen süre ölçülmüştür. Ölçülen süre o karışımın akış süresi olarak kaydedilmiştir. Karışımlarda ayrışma oluşana kadar aynı karışım daha fazla katkı dozajıyla hazırlanıp, deney tekrarlanmıştır. Marsh-hunisi deneyi, hazırlanan hamur karışımının standart Marsh hunisinden geçiş süresinin belirlenmesi ilkesine dayanır (Aİtcin, 2004). Bu deney yönteminde, akış süresinin katkı dozajıyla değişimi incelenerek “doygunluk noktası” belirlenir. Çimento hamurunda akışkanlaştırıcı katkı dozajı arttıkça akış süresi azalmaktadır. Ancak, belli bir sınırdan sonra katkı dozajının artmasıyla akış süresinde kayda değer değişim görülmemektedir. O dozaj, katkı-çimento ikilisinde kullanılan akışkanlaştırıcı katkının doygunluk noktası olarak tanımlanmaktadır. Ekonomik dezavantajının yanında, bu dozajın üzerinde katkı kullanımı ayrışmaya neden olabilmektedir (Aİtcin, 2004).

Mini çökme deneyinde hazırlanan hamur karışımı düzgün bir yüzeyin merkezine konulan, alt iç çapı 38.1 mm, üst iç çapı 19 mm ve yüksekliği 57.2 mm olan kesik konik biçimli bir aparatın içine doldurulur (Aİtcin, 2004; Kantro, 1980). Çökme aparatı düşey olarak yavaşça kaldırılır ve yayılmanın tamamlanması için bir süre (10-20 sn) beklenir. Daha sonra kumpas yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınır ve kaydedilir.

Reolojik ölçümlerinde Şekil 3.3'te gösterilen ve bilyeli ölçüm sisteminden yararlanan (Ball measuring system–BMS) reometre kullanılmıştır (Schatzmann et al., 2004; Schatzmann et al., 2003; Felekoğlu, 2014). Bu sistemde ulaşılabilecek en yüksek deformasyon hızı 35 s⁻¹'dir. Bu değer, 8 mm'lik bilyeli sistemin 60 devir/dakika'lık hızla dönmesine eşdeğerdir. Ayrıca bu sistemde maksimum ölçülebilecek moment (tork) değeri 125 mNm olduğu için ulaşılabilecek en yüksek kayma gerilmesi değeri 2850 Pa'dır.

Karışımların reolojik özelliklerini incelemek için Rheoplus yazılımı ile çeşitli küçük programlar (makrolar) oluşturularak, deneme karışımlarında uygulanmıştır. Şekil 3.4'te gösterilen yöntemin tez kapsamında hazırlanan karışımlara uygun olduğuna karar verilmiştir. Benzer yöntem diğer araştırmacılar tarafından da uygulanmıştır (Felekoğlu, 2009). Bu yöntemin

oluşturulmasında, reometrenin kapasitesi, maksimum katkı kullanılabilmesi ve bilyenin tam dönmesi gibi faktörler dikkate alınmıştır. Reolojik parametrelerin belirlenmesinde 4 periyottan oluşan, Şekil 3.4'te gösterilen yöntem uygulanmıştır.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan reometre

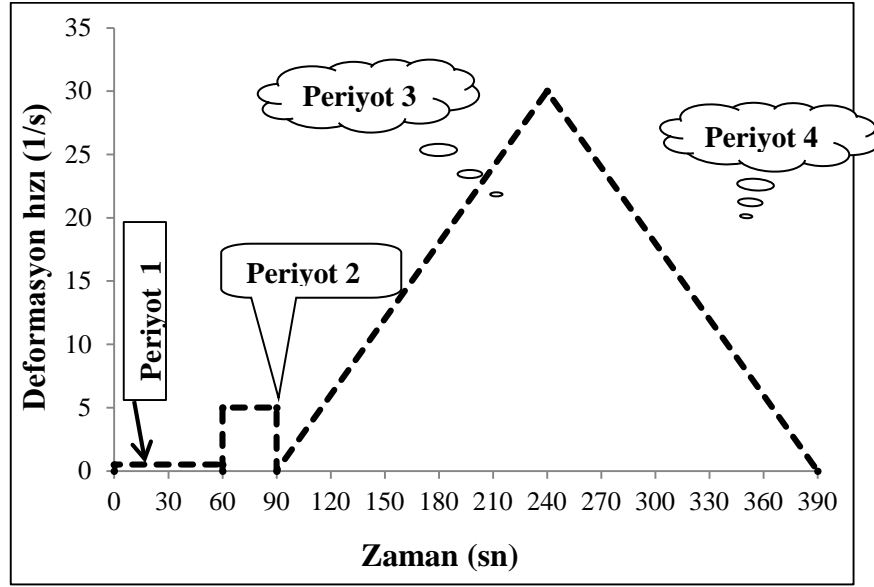
1. Periyot: Karışım örselenmeden bilye ölçüm noktasına indirilmiş ve sabit bir deformasyon hızı ile (0.5 s^{-1}) 60 saniye boyunca her 2 saniyeden bir toplam 30 defa moment ölçümü alınmıştır. Bu periyotta malzemenin statik (durgun halde) eşik kayma gerilmesi ölçülmüştür.

2. Periyot: Bu periyot, mikserde karıştırma esnasında geçmiş kayma gerilmesini (shear history) ortadan kaldırmak için uygulanmıştır. 5 s^{-1} sabit bir deformasyon hızı ile bilye karışım içinde 30 saniye boyunca döndürülmüştür.

3. Periyot: Bu periyot akma eğrisinin çıkış kısmının oluşturulması için yapılmıştır. Deformasyon hızı 0'dan 30 s^{-1} 'e kadar arttırılmıştır. 5 saniyede bir olmak üzere toplam 150 saniye boyunca ölçüm alınmıştır.

4. Periyot: Bu periyot akma eğrisinin iniş kısmının oluşturulması için yapılmıştır. Deformasyon hızı 30 'dan 0 s^{-1} 'e kadar azaltılmıştır. 5 saniyede bir olmak üzere toplam 150 saniye boyunca ölçüm alınmıştır.

Bu sistemde ham veriler dönme hızı (Ω) ve moment (T) olarak ölçülmüştür. Rheoplus programında ampirik katsayılar yardımı ile dönme hızı (Ω), deformasyon hızına ($\dot{\gamma}$), moment (T) ise kayma gerilmesine (τ) dönüştürülmüştür (Schatzmann, 2005).



Şekil 3.4. Hamur karışımların reolojik parametrelerinin incelenmesinde uygulanan periyotlar

Hamur karışımlarının reolojik özellikleri, statik ve dinamik olmak üzere iki farklı açıdan incelenmiştir. Burada bu iki aşama kısaca anlatılmıştır. İlk aşamada, karışımlara uygulanan deformasyon hızları, belli kurallara bağlı olarak değiştirilerek, akma eğrileri elde edilmiştir. Akma eğrisi verilerinin Herschel Bulkley modeli yardımıyla analizi sonucunda, her akma eğrisi için dinamik eşik kayma gerilmesi hesaplanmıştır. İkinci aşamada, hamur karışımlarının çok düşük deformasyon hızlarında her hangi bir ön işlem uygulanmadan statik eşik kayma gerilmesi (EKG) belirlenmiştir. Bu aşamada karışımların ilk anda bilye hareketine karşı dirençleri ölçülmüştür. Roussel'e (2007) göre EKG'nin statik ve dinamik olarak ikiye ayrılması, çimentolu kompozitlerin tiksotropik davranışının bir gereğidir. Karışım hazırlandıktan sonra zaman içinde maruz kaldığı kayma deformasyonu geçmişi, eşik kayma gerilmesini sürekli değiştirmektedir. Bu değişim malzemenin tiksotropik davranışına bağlıdır. Karıştırma sonrası bekleme anında, malzemede topaklaşma meydana gelerek, zaman içinde anlık eşik kayma gerilmesini belli bir değere kadar yükseltmektedir. Bu değer, başlangıç anında "statik EKG" olarak adlandırılmıştır. Daha basit bir deyişle "statik eşik kayma gerilmesi", karışıma herhangi bir ön işlem uygulanmadan, karışım hazırlandıktan hemen sonraki eşik kayma gerilmesidir. Bu değer, karıştırma başlangıcından örneğin ölçüm kabına yerleştirilmesine kadar geçen süreye oldukça bağlıdır. Bu nedenle, tüm karışımların yaklaşık olarak aynı sürede ölçülmesine özen gösterilmiştir. Bu aşamada karışımların ilk anda bilye hareketine karşı

dirençleri ölçülmüştür. Statik EKG'nin tespitinde 1. periyotta elde edilen değerler kullanılmıştır. Daha öncede anlatıldığı gibi, bu aşamada bilyenin karışım içinde 60 saniye boyunca, $0.5s^{-1}$ 'lik bir deformasyon hızında dönmesi sağlanmıştır. Bilye, moment kapasitesini aşmayan karışımlarda bu deformasyon hızında, 60 saniyede 1 turu tamamlamıştır. Daha sonra bu periyottan elde edilen kayma gerilme değerleri dikkate alınarak, her hamur karışımı için eşik kayma gerilmesi-zaman grafiği çizilmiştir. Bu grafikte maksimum eşik kayma gerilme değeri o karışımın statik EKG değeri olarak seçilmiştir.

Dinamik EKG değerlerinin belirlenmesi için reometreden elde edilen 4. periyodaki ham veriler dikkate alınarak her karışım için akma eğrisi çizilmiştir. Akma eğrisi verilerinin Herschel-Bulkley modeli yardımıyla analizi sonucunda, dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri her karışım için hesaplanmıştır. EKG değeri olarak modelden elde edilen değerler alınmıştır. Her eğrinin y-eksenini kestiği nokta "dinamik eşik kayma gerilmesi" olarak tanımlanmıştır. Bu değer statik EKG değerinden farklı olarak doğrudan verilerden değil, modelden alınan bir büyüklüktür. Roussel'e (2007) göre, dengeye ulaşmış bir karışımda dinamik EKG karışım özelliklerine bağlı olup kayma geçmişi vb. ön etkilerden değişmez. Ancak, hidrasyon gelişimiyle zamana bağlı olarak dinamik EKG değişebilir, fakat kısa vadede hidrasyon etkisi ihmal edilebileceğinden, ilk saatlerde dinamik EKG'nin sabit olduğu kabul edilebilir (Jarny et al., 2005). Ayrıca, hareket halindeki durum için teorik bir büyüklüktür. Bu modelde viskozite değeri anlık olarak ölçülmektedir. Ancak, viskozite eğrisi dikkate alındığında, belli bir deformasyon hızından sonra viskozite değerinin değişmediği görülmektedir. Bu değer o karışımın nihai viskozite değeri olarak alınmıştır.

3.4.2. Harç karışımları deneyleri

Harç karışımlarının yayılma değeri ve V-hunisi akış süresi sırasıyla ASTM C1437 "Flow of hydraulic cement mortar." ve EFNARC (2005) "Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete" standartlarına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca, harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi akış süresi değişimini tespit etmek amacı ile dökümden 15, 30, 45 ve 60 dakika sonra yayılma ve V-hunisi deneyleri tekrarlanmıştır. Deneyden 1 dakika önce, bekletilen karışımlar Hobart mikserinde 30 saniye

boyunca karıştırılmıştır. Çimento hamuru deneyleri bölümünde anlatılan yöntemeye uygun olacak şekilde harç karışımlarının da dinamik EKG, nihai viskozite ve statik EKG gibi reolojik parametreleri de belirlenmiştir. Harç karışımlarının 1, 3, 7 ve 28-günlük basınç dayanımları, 50 mm'lik küp numuneler üzerinde belirlenmiştir.

3.4.3. Beton karışımları deneyleri

Hazırlanan beton karışımlar üzerinde TS EN 12350-2 "Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi" standardına uygun olacak şekilde çökme deneyi yapılmıştır. Karışımların hava içeriği ASTM C 231 "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method " standardına göre belirlenmiştir. Çimento tipinin beton karışımı kıvam korumasına etkisini incelemek amacı ile 15, 30 ve 45 dakika dökümden sonra çökme ve yayılma deneyi tekrarlanmıştır. Deneyden 1 dakika önce 30 saniye boyunca karışımlar mikserde karıştırılmıştır. Beton karışımlarının taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlıkları sırasıyla, TS EN 12350-6 "Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk" ve TS EN 12390-7 "Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini" standartlarına göre belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler ASTM C 511'de " Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes" belirtildiği gibi $23 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ve minimum %95 nem oranına sahip kür odasında prizini alması için bekletildikten sonra $23 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ su sıcaklığına sahip kür havuzunda kürlenmiştir. Karışımların 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesi için 100 mm ayrıntılı küp numune kullanılmıştır.

Üretilen KYB karışımları üzerinde sırasıyla yayılma çapı deneyi, T50 süresi tayini, V-hunisi ve L-kutusu deneyi, EFNARC (2005) "Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete" kriterlerine uygun olarak yapılmıştır. Ayrıca karışımların her 15 dakikadan bir 30 dakika boyunca yayılma kaybı ölçülmüştür. KYB karışımlarının taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlıkları sırasıyla, TS EN 12350-6 "Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk" ve TS EN 12390-7 "Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini" standartlarına göre belirlenmiştir. Bunlara ilaveten, KYB karışımlarının eşik kayma gerilmesi ve

plastik viskozitesi gibi reolojik özellikleri beton reometresi kullanarak elde edilmiştir. Her karışımdan üçer adet 150 mm küp numune üzerinde, TS EN 12390-3 "Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini" ve TS EN 12504-4 "Beton Deneyleri - Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini" standartlarına göre 1, 3, 7 ve 28 günlük sırasıyla, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı belirlenmiştir. 150 mm'lik numunelerin dinamik elastik modülü ise, Denklem 3.2'de verilen formüle göre hesaplanmıştır (Neville and Brooks, 2010; Philleo, 1995).

$$E_{dn} = \rho c^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad [3.2]$$

Burada, E_{dn} = betonun dinamik elastik modülü (MPa), ρ = sertleşmiş betonun yoğunluğu (kg/m^3), c = ultrases geçiş hızı (km/sec) and ν = Poisson oranıdır. Poisson oranı tüm KYB numunelerinde 0.22 olarak sabit farz edilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar bu bölümde çizelgeler, şekiller halinde sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi, bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, çimento-katkı uyumunu etkileyen faktörlerin belirlenmesi, ikinci aşama ise, birinci aşamada belirlenen faktörlerin daha detaylı incelenmesidir.

4.1. Çimento-Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi

Bu aşamada 9 adet CEM I çimentosu ile 3 adet polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanarak 226 hamur karışımı üzerinde Marsh-hunisi akış süresi tayini ve mimi yayılma deneyi, 243 adet hamur karışımı üzerinde reoloji deneyleri yapılmıştır. Daha sonra çok değişkenli bir regresyon istatistiksel programı yardımı ile çimento inceliği, çimento C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF , eşdeğer alkali miktarı, su azaltıcı katkı miktarı, katı madde oranı ve karışım su içeriği gibi parametrelerin hamur karışımlarının eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozitesi değerlerini ne mertebede etkilediği incelenerek, çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler etki derecesine göre sıralanmıştır. Ayrıca, etkisi olmayan parametreler de belirlenmiştir.

4.1.1. Dayanım sonuçları

Harç karışımların yayılma ve basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. Dayanım sonuçları 3 numune sonucunun ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Çimentoların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

	3-günlük	7-günlük	28-günlük	Yayılma (mm)
Ç-1	37.39	47.73	57.92	180
Ç-2	33.71	45.81	53.07	190
Ç-3	38.28	48.44	59.80	205
Ç-4	44.45	56.84	65.24	215
Ç-5	44.97	48.04	61.95	210
Ç-6	27.04	36.11	46.44	210
Ç-7	44.89	51.53	56.76	205
Ç-8	43.08	46.65	60.64	205
Ç-9	37.80	46.77	54.95	200

28 gün kürlenme sonrası en düşük ve en yüksek basınç dayanımının sırasıyla Ç-6 ve Ç-4 çimentosu içeren karışımlarına ait olduğu Çizelge 4.1'den anlaşılmaktadır. Ç-6 çimentosuna ait klinkerin analiz sonucuna göre bu çimento %67 oranında C_3S içerisine sahip olmaktadır. Ancak bu çimentoyu içeren karışımın düşük basınç dayanımı göstermesi, bu çimentonun çok düşük özgül yüzeye ($2810 \text{ cm}^2/\text{g}$) sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Vikat suyu değerleri de dikkate alınırca en düşük su ihtiyacı Ç-6 çimentosuna ait olduğu Çizelge 3.1'den anlaşılmaktadır. Bu durum da Ç-6 çimentosunun daha az inceliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Ç-1, Ç-2 ve Ç-3 çimentoları üretici firma beyanına göre aynı hammadde üzerinde değişiklikler yapılarak üretilmiştir. Bu çimentoların C_3A miktarı sırasıyla %5.85, %2.77 ve %1.90 olmaktadır. Literatüre dayanarak genel olarak C_3A içeriğinin az olması, taze hal özellikleri açısından istenen bir durumdur. Klinkerin MgO içeriğinin yüksek olması C_4AF miktarının artmasına, dolayısıyla, C_3A içeriğinin azalmasına yol açacağı bildirilmiştir. C_3A oranının azalması ise akışkanlık açısından iyileşme yarattığı rapor edilmiştir (Aitcin, 2004). C_3A 'nın reaksiyonuyla oluşan iğne formunda etrenjit yapı, ortamdaki su moleküllerini tüketir ve dolayısıyla çimento hamurunun işlenebilirliği azalır (Prince et al., 2002).

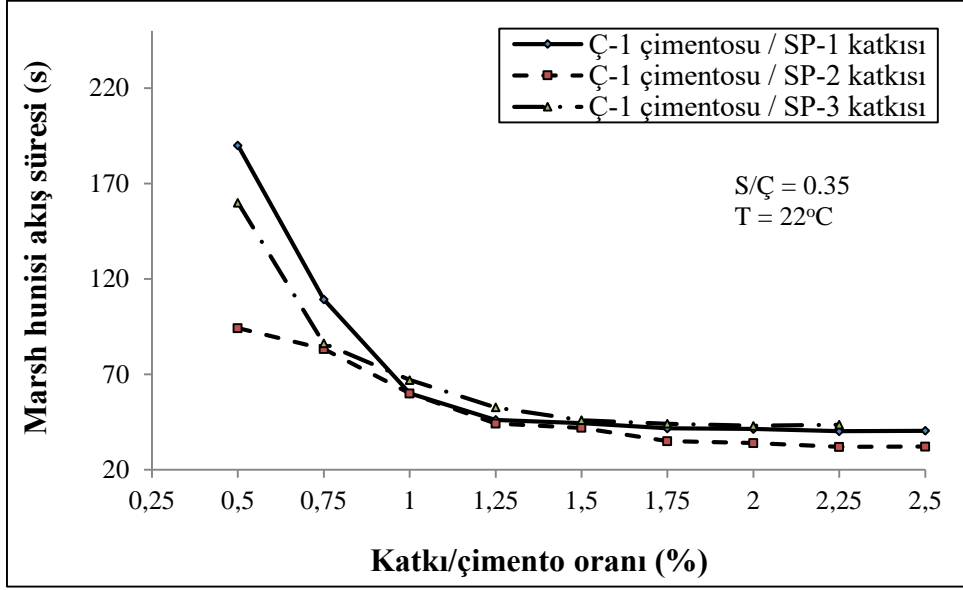
Ç-1 ve Ç-2 çimentosu içeren karışımlarının 3 günlük dayanım sonuçları dikkate alınırca, Ç-1 karışımı Ç-2 karışımına kıyasla yaklaşık %10 daha yüksek dayanım göstermiştir. Bu olay bir ölçüde Ç-2 çimentosunun daha az C_3A içermesinden ve ona bağlı olarak az olsa bile biraz daha geç priz almasından (çimento priz süresi sonuçları da bunu kanıtlamaktadır) ve daha önemlisi Ç-1 çimentosunun daha ince olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak Ç-1 çimentosu Ç-3 çimentosuna nazaran daha ince olmasına ve daha yüksek C_3A oranına sahip olmasına rağmen, Ç-3 çimentosu içeren karışımın 3 günlük dayanımı Ç-1 karışımına göre daha yüksek olmuştur. Çimento hamuru reolojik deneyleri esnasında Ç-3 karışımının reometre kabına yerleştirildikten sonra aşırı katılaşması ve bileyenin zorlanarak dönmesiyle beraber karışımın yeniden yumuşaması gözlemlenmiştir. Bu olay bu karışımda yalancı priz oluşma ihtimalini ortaya koymuştur. Aynı olay, Ç-3 çimentosundan elde edilen harç karışımlarında da yerleştirme esnasında gözlemlenmiştir. Ç-3 çimentonun erken yaşta daha

yüksek dayanım göstermesi bu karışımda yalancı prizden dolayı erken katılaşma ve sertleşmeden gibi ihtimalden kaynaklandığı düşünülmektedir.

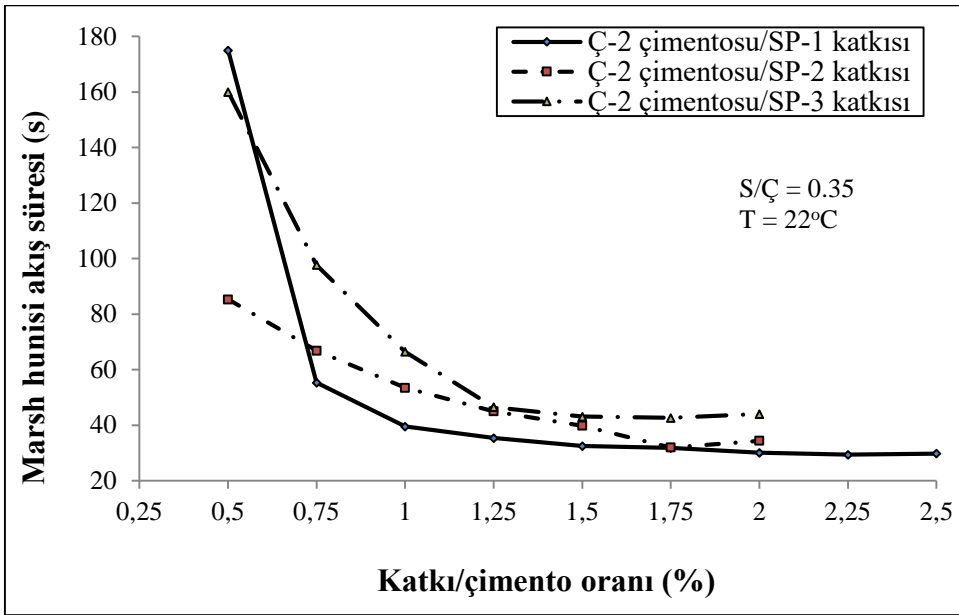
Ayrıca, C_3A %7.9 olan Ç-8 çimentosunun inceliği ($3090 \text{ cm}^2/\text{g}$) çok yüksek olmamasına rağmen bu çimentoyu içeren harç karışımı nispeten yüksek dayanım göstermiştir.

4.1.2. Marsh-hunisi akış süresi ve mini-yayılma sonuçları

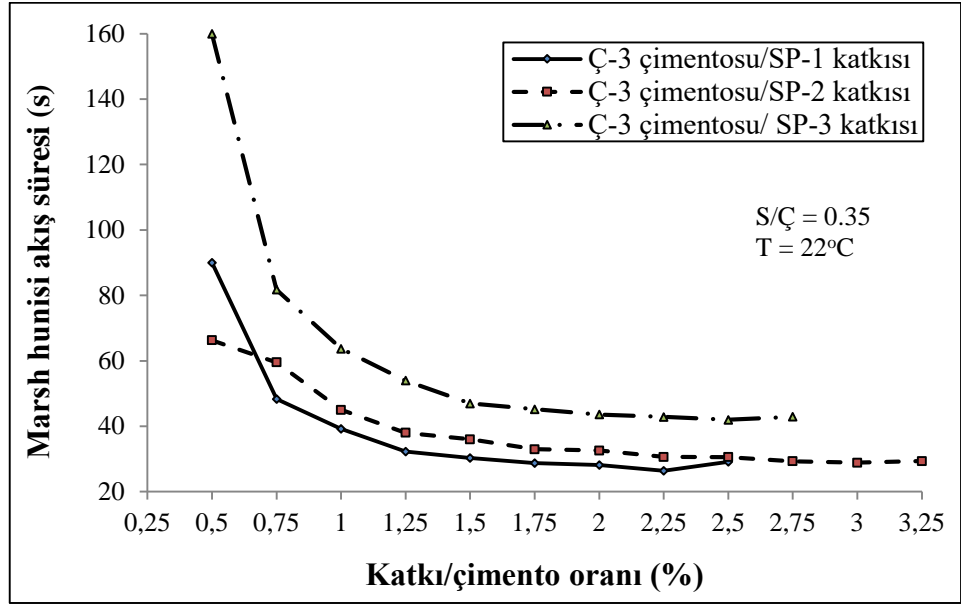
Marsh-hunisi akış süresi deney sonuçları Şekil 4.1 ila 4.9'da gösterilmiştir. Her çimento ile kullanılan farklı katkıların performansı iki değişik açıdan incelenmiştir. Hazırlanan hamurların 1/akış süresi değeri hesaplanarak hamurun akış performansı, başka bir deyişle kullanılan katkının ne mertebede etkili olduğu değerlendirilmiştir. Daha sonra, bu değer katkı birim fiyatına bölünerek katkının etkinliği ve bu etkinliğin maliyeti belirlenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 4.2 ila 4.10'da sunulmuştur. Deney sonuçlarına dayanarak Ç-1, Ç-6, Ç-7 ve Ç-8 çimentolarını içeren karışımlar, akış performansı açısından SP-2 adlı süperakışkanlaştırıcı katkı ile en uyumlu davranış göstermiştir. Yani bu karışımlara ait 1/Marsh-hunisi akış süresi değerleri SP-2 katkısı kullanıldığı takdirde diğer iki tip katkıya göre en yüksek değer olmuştur. Ç-2, Ç-3 ve Ç-9 çimentosunu içeren karışımlar ise SP-1 adlı katkı ile daha uyumlu davrandıkları deney sonuçlarından anlaşılmıştır. Ç-4 ve Ç-5 çimentosunu içeren karışımlar SP-3 adlı katkı ile daha uyumlu olmuştur. Ancak süperakışkanlaştırıcı katkılarının polimer yapısı ile ilgili özellikler üretici firmaları tarafından ticari sır gerekçesiyle paylaşılmadığından bu çalışmada katkı ile ilgili yorumlar yer alamamıştır. Dolayısıyla, çalışmada daha çok çimento özellikleri üzerinde durulmuştur.



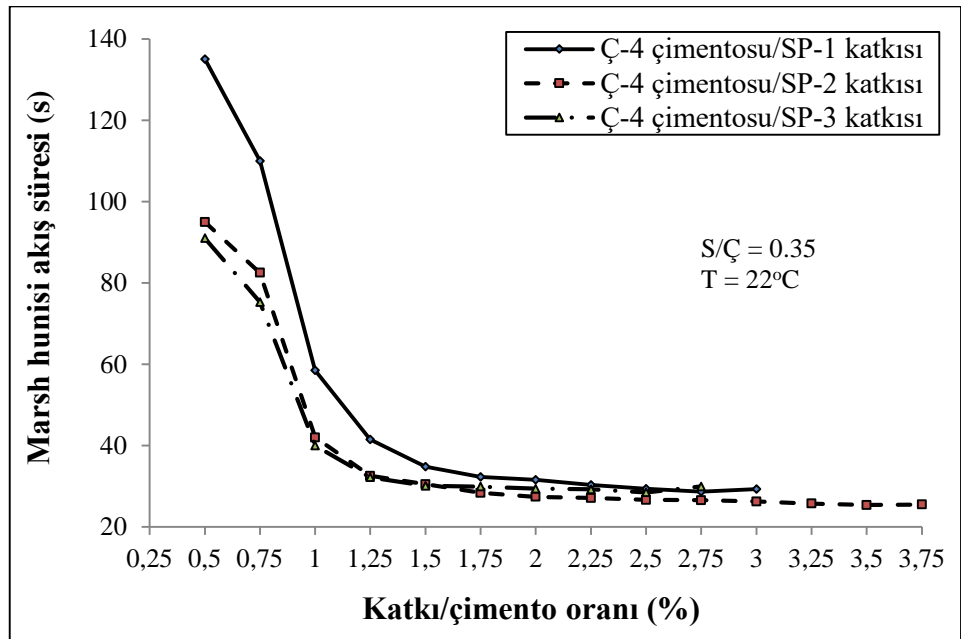
Şekil 4.1. Ç-1 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



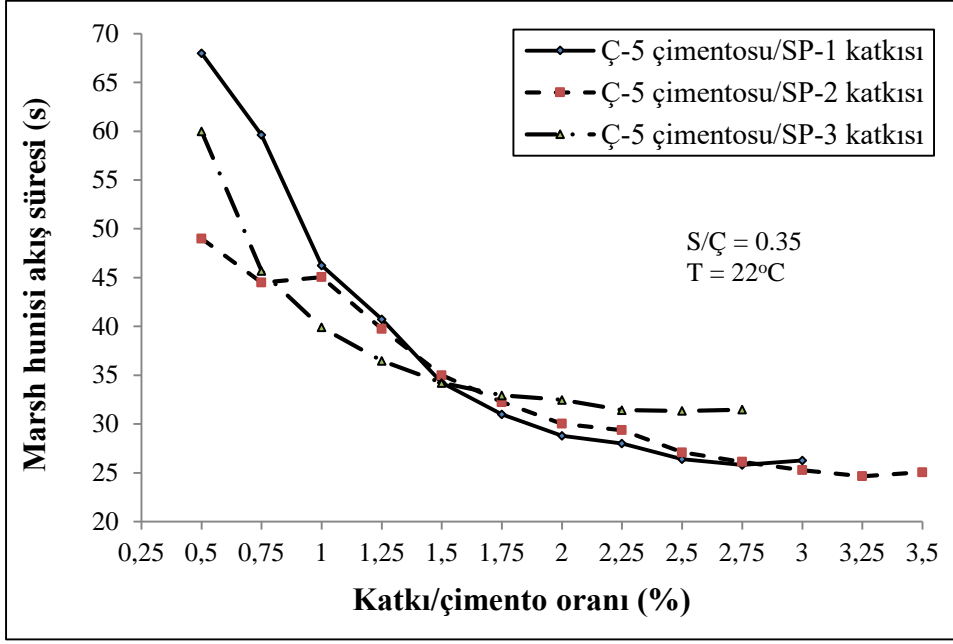
Şekil 4.2. Ç-2 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



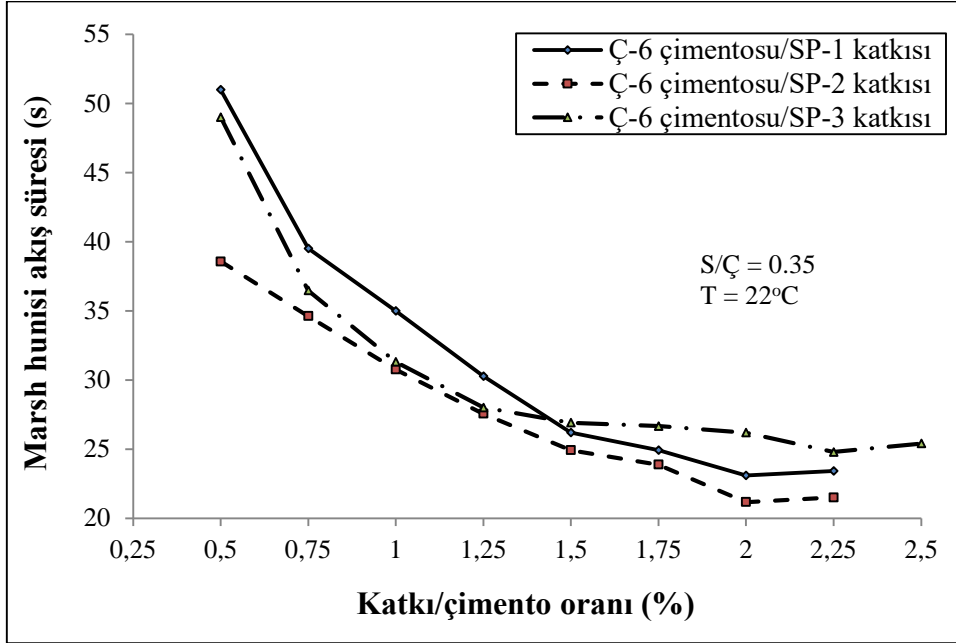
Şekil 4.3. Ç-3 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



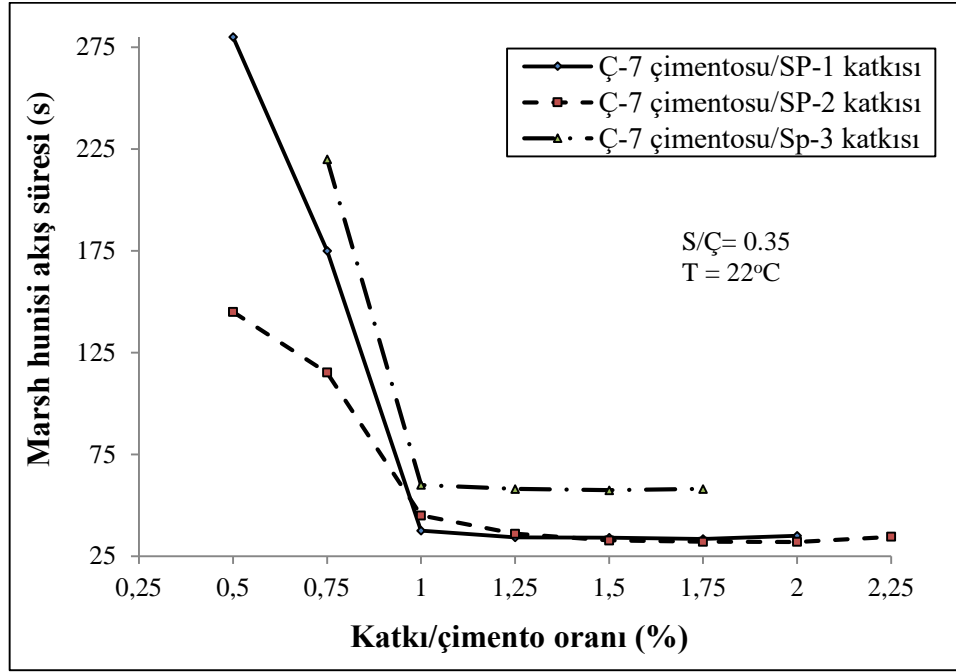
Şekil 4.4. Ç-4 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



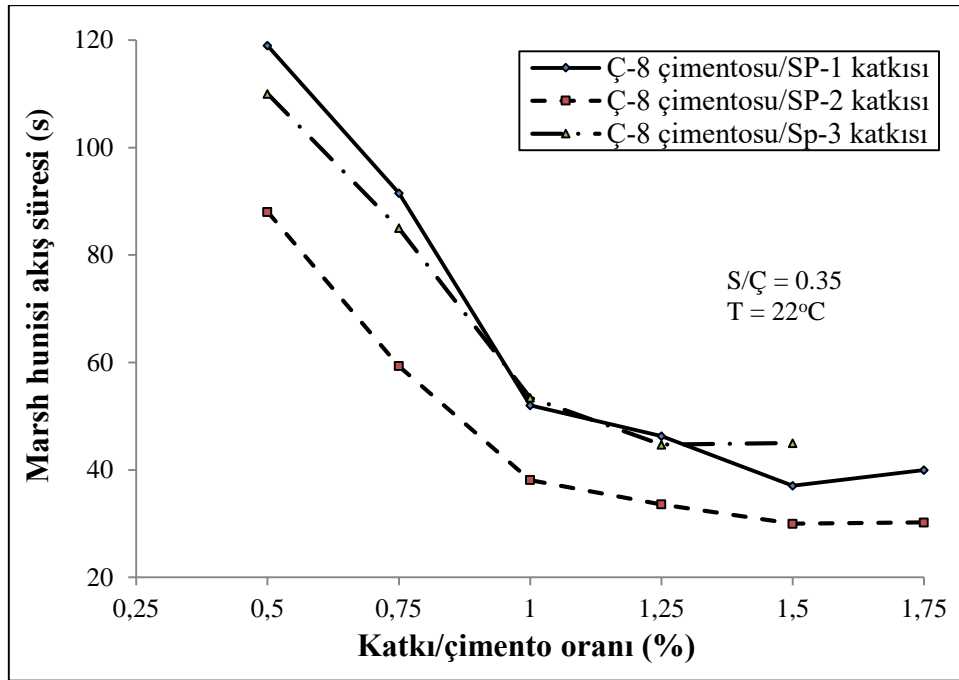
Şekil 4.5. Ç-5 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



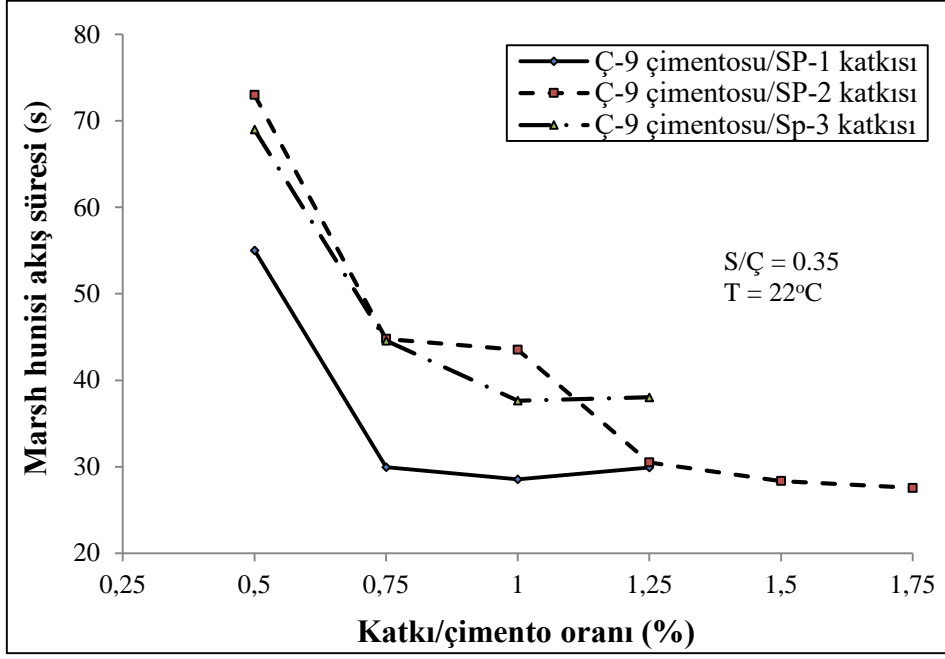
Şekil 4.6. Ç-6 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



Şekil 4.7. Ç-7 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



Şekil 4.8. Ç-8 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi



Şekil 4.9. Ç-9 çimentosu hamurlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi

Çizelge 4.2. Ç-1 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%) [*]	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	53	106	63	159	203	184
0.75	91	120	116	227	230	341
1.00	167	167	149	505	319	438
1.25	216	226	190	656	433	558
1.50	225	238	217	681	456	639
1.75	239	286	226	725	547	666
2.00	241	294	232	731	563	683
2.25	248	313	229	753	599	674
2.50	247	311	öa ^{**}	749	595	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.3. Ç-2 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	57	117	63	173	225	184
0.75	181	150	102	548	286	301
1.00	253	187	151	767	358	443
1.25	282	222	215	856	426	632
1.50	308	251	232	932	481	682
1.75	314	313	234	953	599	690
2.00	332	291	227	1007	557	668
2.25	340	öa**	öa	1031	öa	öa
2.50	336	öa	öa	1017	öa	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.4. Ç-3 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	111	151	63	337	289	184
0.75	207	168	122	627	322	360
1.00	255	222	157	773	426	462
1.25	310	263	185	938	504	545
1.50	330	278	213	1000	532	626
1.75	347	303	221	1052	581	651
2.00	355	307	229	1075	588	675
2.25	379	326	233	1148	625	686
2.50	344	327	238	1041	626	701
2.75	öa**	341	233	öa	653	686
3.00	öa	346	öa	öa	664	öa
3.25	öa	340	öa	öa	652	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.5. Ç-4 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	74	105	110	224	202	323
0.75	91	121	133	275	232	391
1.00	171	238	250	518	456	735
1.25	241	307	311	730	588	914
1.50	287	328	332	870	627	977
1.75	310	352	334	939	675	982
2.00	317	365	340	960	699	1000
2.25	330	369	342	999	706	1006
2.50	340	375	351	1031	719	1032
2.75	348	377	334	1055	721	981
3.00	342	381	öa	1035	730	öa
3.25	öa**	388	öa	öa	744	öa
3,5	öa	394	öa	öa	755	öa
3.75	öa	392	öa	öa	751	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.6. Ç-5 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	147	204	167	446	391	490
0.75	168	225	219	508	430	644
1.00	216	222	251	655	425	737
1.25	246	252	274	744	482	806
1.50	292	286	292	885	547	859
1.75	323	310	304	978	594	893
2.00	347	333	308	1053	638	906
2.25	357	340	318	1082	652	936
2.50	379	369	319	1147	707	938
2.75	387	383	318	1174	733	935
3.00	381	396	öa	1153	758	öa
3.25	öa**	406	öa	öa	777	öa
3.5	öa	399	öa	öa	764	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.7. Ç-6 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	196	259	204	594	497	600
0.75	253	289	274	767	553	806
1.00	286	325	319	866	623	940
1.25	330	363	357	1001	695	1050
1.50	382	401	372	1157	769	1093
1.75	401	419	375	1216	803	1103
2.00	433	473	382	1312	905	1123
2.25	427	465	403	1294	891	1186
2.50	öa**	öa	394	öa	öa	1158

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.8. Ç-7 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	36	69	***	108	132	-
0.75	57	87	45	173	166	134
1.00	266	222	167	807	426	490
1.25	292	278	172	886	532	507
1.50	293	306	174	889	587	512
1.75	299	312	172	907	598	507
2.00	285	313	öa	865	599	öa
2.25	öa**	290	öa	öa	556	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

***Aşırı katılıktan dolayı huniden akmadığından ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.9. Ç-8 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	84	114	91	255	218	268
0.75	109	169	118	331	323	346
1.00	192	262	187	583	502	550
1.25	216	298	224	655	570	658
1.50	270	333	222	818	639	654
1.75	250	331	öa**	758	634	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.10. Ç-9 çimentosu hamurlarının akış performansı

Katkı dozajı (%)*	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			1/(akış süresi/birim fiyat), $\frac{kg}{s.TL} \times 10^{-5}$		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
0.50	182	137	145	551	262	427
0.75	334	223	224	1011	428	660
1.00	350	230	266	1061	440	781
1.25	334	328	263	1013	628	773
1.50	öa**	353	öa	öa	676	öa
1.75	öa	363	öa	öa	695	öa

*Çimento ağırlığının yüzdesi olarak ilave edilmiştir.

**Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Tüm karışımlara ait 1/Marsh hunisi akış süresi değerleri kullanılan çimento ve katkı tipine göre sırasıyla Çizelge 4.11 ve 4.12’de gösterilmiştir. Ancak, çimento-katkı ikililerinin akış performansını daha kolay kıyaslamak amacı ile katkı dozajı çimento ağırlığının %0.5’i ile %1.75’i arasında olan karışımlara ait 1/Marsh hunisi akış süresi değerlerinin ortalaması dikkate alınmıştır. Çizelgeden de anlaşıldığı gibi her üç katkı tipinde de en iyi ve en kötü akış performanslarını sırasıyla Ç-6 ve Ç-1 çimentosu içeren karışımlar göstermiştir. Kullanılan diğer çimentolara kıyasla Ç-6 çimentosunun inceliği en düşük ve Ç-1 çimentonun inceliği en yüksek olmaktadır.

Çizelge 4.11. Karışımlara ait 1/Marsh-hunisi akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$ (Süperakışkanlaştırıcı katkı tipine göre)

Süperakışkanlaştırıcı katkı firması	Çimento tipi	Katkı dozajı (çimento ağırlığının yüzdesi olarak)						
		0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	Ortalama
SP-1	Ç-1	53	91	167	216	225	239	165
	Ç-2	57	181	253	282	308	314	232
	Ç-3	111	207	255	310	330	347	260
	Ç-4	74	91	171	241	287	310	196
	Ç-5	147	168	216	246	292	323	232
	Ç-6	196	253	286	330	382	401	308
	Ç-7	36	57	266	292	293	299	207
	Ç-8	84	109	192	216	270	250	187
	Ç-9	182	334	350	334	öa*	öa	300
SP-2	Ç-1	106	120	167	226	238	286	191
	Ç-2	151	168	222	263	278	303	231
	Ç-3	117	150	187	222	251	313	207
	Ç-4	105	121	238	307	328	352	242
	Ç-5	204	225	222	252	286	310	250
	Ç-6	259	289	325	363	401	419	343
	Ç-7	69	87	222	278	306	312	212
	Ç-8	114	169	262	298	333	331	251
	Ç-9	137	223	230	328	353	363	272
SP-3	Ç-1	63	116	149	190	217	226	160
	Ç-2	63	122	157	185	213	221	160
	Ç-3	63	102	151	215	232	234	166
	Ç-4	110	133	250	311	332	334	245
	Ç-5	167	219	251	274	292	304	251
	Ç-6	204	274	319	357	372	375	317
	Ç-7	-**	45	167	172	174	172	146
	Ç-8	91	118	187	224	222	öa	168
	Ç-9	145	224	266	263	öa	öa	225

*Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

**Aşırı katılıktan dolayı huniden akmadığından ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.12. Karışımlara ait ortalama 1/Marsh-hunisi akış süresi değeri, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$ (Çimento tipine göre)

Çimento tipi	1/akış süresi, $\frac{1}{s} \times 10^{-4}$			En iyi katkı
	SP-1	SP-2	SP-3	
Ç-1	165	191	160	SP-2
Ç-2	232	231	160	SP-1
Ç-3	260	207	166	SP-1
Ç-4	196	242	245	SP-3
Ç-5	232	250	251	SP-3
Ç-6	308	343	317	SP-2
Ç-7	207	212	146	SP-2
Ç-8	187	251	168	SP-2
Ç-9	300	272	225	SP-1

27 farklı çimento-katkı ikilisinden oluşan 228 hamur karışımına ait mini çökme deney sonuçları ve karışım sıcaklığı sırasıyla, Çizelge 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir. Tüm karışımlarda yayılma değeri katkı artışı ile artmıştır. Ancak, belli bir katkı kullanım oranının üstünde katkı miktarının artmasına rağmen yayılma değerleri sabit kalmıştır. Ayrıca tüm karışımlarda maksimum katkı dozajı kullanıldığı zaman hamur karışımlarının tabelaya yapıştığı ve ayrışmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çizelge 4.14'ten anlaşıldığı gibi, Ç7 ve Ç8 karışımları her üç katkı kullanımında da sırasıyla, en yüksek ve en düşük sıcaklığa sahip olmuştur.

Çizelge 4.13. Hamur karışımlarının mini çökme yayılması (mm)

Deney	Çimento hamuru		Katkı dozajı (çimento ağırlığının yüzdesi olarak)															
	Kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı	Çimento	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75		
Mini çökme yayılması	SP-1	Ç-1	140	150	170	175	180	180	175	180	-*	-	-	-	-	-	-	
		Ç-2	150	170	175	180	180	180	180	180	180	-	-	-	-	-	-	
		Ç-3	150	175	175	180	180	180	185	185	190	-	-	-	-	-	-	
		Ç-4	140	150	150	160	160	160	170	170	180	180	180	180	-	-	-	
		Ç-5	140	150	150	160	160	160	170	170	170	170	170	170	-	-	-	
		Ç-6	140	160	160	170	170	170	170	170	170	-	-	-	-	-	-	
		Ç-7	115	120	170	180	190	180	180	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-8	140	160	170	180	180	170	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-9	150	175	175	175	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SP-2	Ç-1	140	155	165	175	175	180	175	175	175	-	-	-	-	-	-	
		Ç-2	150	170	175	175	180	180	180	180	180	180	180	180	-	-	-	
		Ç-3	150	170	170	170	175	175	175	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-4	140	145	170	170	170	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	
		Ç-5	145	160	160	170	170	170	170	170	170	170	170	180	180	180	-	
		Ç-6	150	160	160	170	170	175	175	180	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-7	110	115	180	190	190	190	190	190	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-8	130	160	160	170	170	170	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-9	140	150	165	175	175	175	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SP-3	Ç-1	140	170	190	190	190	195	195	195	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-2	140	170	170	170	170	175	175	180	180	180	-	-	-	-	-	
		Ç-3	145	160	170	170	170	170	170	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-4	135	160	160	170	170	170	170	170	170	170	-	-	-	-	-	
		Ç-5	140	160	160	170	170	175	175	175	175	175	-	-	-	-	-	
		Ç-6*	140	165	165	165	170	170	165	160	Ayrışma							
		Ç-7	105	110	170	180	185	185	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-8	140	160	165	175	180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Ç-9	140	160	160	160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

*Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.14. Hamur karışımlarının sıcaklığı (°C)

Özelik	Çimento hamuru		Katki dozajı (çimento ağırlığının yüzdesi olarak)															
	Kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı	Çimento	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75		
Karışım sıcaklığı (°C)	SP-1	Ç-1	28.1	27.7	27.6	26.9	27.8	27	27.5	27.6	27.8	-*	-	-	-	-	-	
		Ç-2	27.1	27.3	26.7	26.5	26.5	26.9	26.7	26.1	26.0	-	-	-	-	-	-	
		Ç-3	28.5	27.9	26.6	26.3	26.3	26.8	26.5	26.1	26.1	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-4	24.1	24.3	25	25.3	25.3	25.2	25.4	25.4	25.7	25.5	25.6	-	-	-	-	-
		Ç-5	25	25.1	25.9	26.2	26.2	26.1	26.4	26	26.1	25.9	25.5	-	-	-	-	-
		Ç-6	24.5	24	24.7	25	25.2	25.2	25.1	25	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-7	31.5	31	30.4	30.5	30	31	31.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-8	21	21	20.9	21.5	21.5	21.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-9	23.5	23.8	24.5	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SP-2	Ç-1	27.5	27.2	27.5	26.5	26.2	26	25.7	26.5	27	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-2	25.5	25.2	25.9	25.9	25.7	25.5	25.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-3	26.2	26.5	27.3	28	27.1	26.8	26.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-4	26.5	26	26.8	26.6	26.3	26.4	26	25.9	25.6	25.3	-	-	-	-	-	-
		Ç-5	25.9	25.6	25.4	25.7	26	26.1	26.1	26.2	26.2	26.2	26.5	26.2	26.3	-	-	-
		Ç-6	24.7	25	24.9	25.2	25.1	25.5	25.4	25.4	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-7	30.1	30.3	29.8	29.5	29.3	29	28.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-8	22.2	22.5	22.5	22.2	23.1	23.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-9	25.4	25.5	24.3	24.6	25.2	25.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SP-3	Ç-1	27	26.7	27.4	26.8	25.9	25.3	24.9	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-2	27.3	27.1	26.7	26.9	26.6	26.2	26.1	25.8	25.6	25.4	-	-	-	-	-	-
		Ç-3	28	27.7	30.2	28.5	27.2	27.3	27.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-4	26.6	27.2	27.1	27.6	27.5	27.5	27.5	27.4	27.4	27.4	-	-	-	-	-	-
		Ç-5	26.3	26.8	25.9	25.9	27.3	27.3	27	27.1	27.8	27.8	-	-	-	-	-	-
		Ç-6	26.4	26.8	26.9	27.1	26.8	27.1	27.3	27.1	27.5	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-7	30.8	30.5	29.2	28.9	28.7	28.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-8	23.8	23.5	23.3	23.5	23.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ç-9	24.6	24.5	25.4	24.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Ayrışmadan dolayı ölçüm alınamamıştır.

4.1.3. Hamur karışımlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi

Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmada, reolojik özeliği olarak karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi (EKG), statik EKG ve nihai viskozitesi belirlenmiştir.

4.1.3.1. Hamur karışımlarının dinamik EKG ve nihai viskozitesi

Bu amaçla, her çimento-katkı ikilisi için kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafikleri çizilmiştir. Burada örnek olarak değişik oranda SP-1 su azaltıcı katkı içeren, Ç1 çimentosu ile hazırlanan ve 0.32 S/Ç oranına sahip Ç1-0.32-SP1 hamur karışımına ait kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafikleri sırasıyla, Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir. Daha önce de açıklandığı gibi reolojik parametrelerin belirlenmesi için uygulanan döngüde, 4. ve 1. periyotlarda elde edilen ham veriler dikkate alınmıştır. Parametrelerin dikkate alınan ham verilerden nasıl bedirlenildiği bölüm 3.4.1'de açıklanmıştır. Diğer karışımlara ait kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafikleri de aynı metotla elde edilmiştir. Ancak, şekil sayısı fazla olduğundan tez çalışmasında gösterilmemiştir. Kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafiklerinden elde edilen dinamik ve statik EKG ve nihai viskozite değerleri Çizelge 4.15 ila 4.24'te özetlenmiştir.

Şekil 4.10'deki akma eğrileri grafiği dikkate alındığında karışımın genel olarak Herschel-Bulkley modeline uygun davrandığı görülmektedir. Ancak, katkı kullanımı ve kullanım oranının artışıyla beraber eğrilerin bu modele daha da yaklaştığı söylenebilir.

Herschel-Bulkley modeline göre:

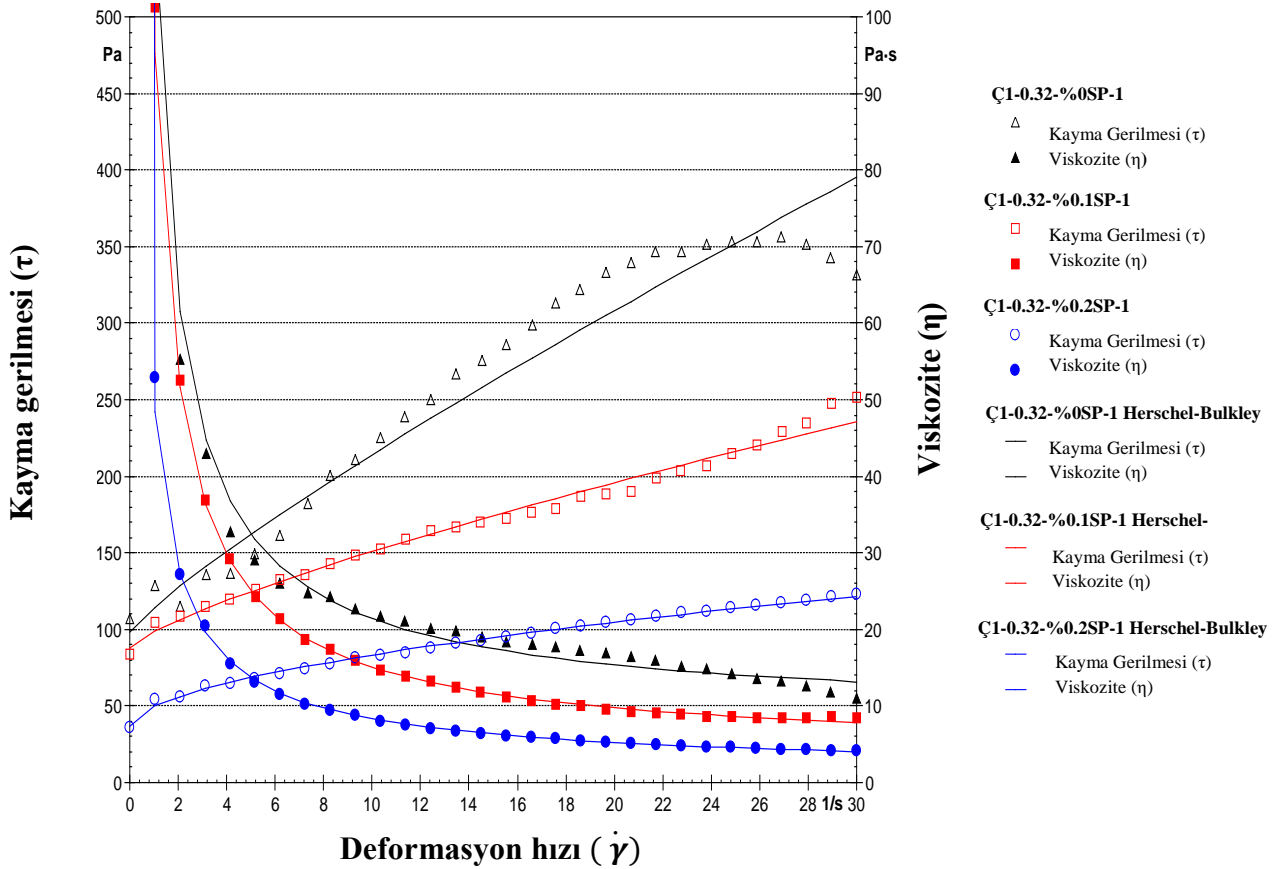
$$\tau = \tau_o + b \cdot \dot{\gamma}^p \quad [4.1]$$

Bu formülde b “Herschel-Bulkley kıvam katsayısı”, p ise “Herschel-Bulkley indeksi” olarak tanımlanmaktadır. Bu denklemde $p > 1$ ise deformasyon sertleşmesi olarak adlandırdığımız Dilatant davranışı oluşmaktadır. Örnek olarak seramik hamuru veya su-niştasta hamuru bu dâiş göstermektedir. $p < 1$ ise deformasyon yumuşaması olarak adlandırılan "Pseudoplastik" davranışı oluşmaktadır.

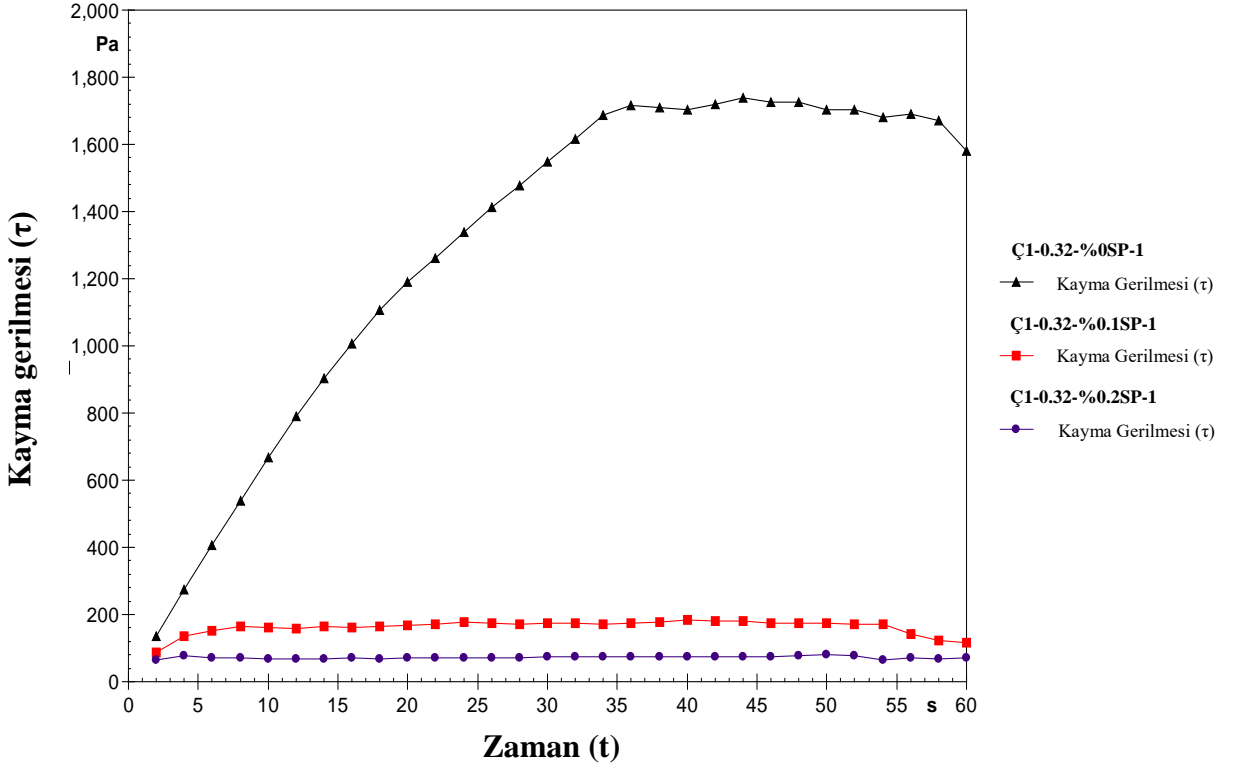
Viskozitesi yüksek olan çimento hamuru, polimer veya şampuan gibi malzemeler bu gibi davranmaktadır. P değeri 1 ile eşitse, model Bingham modeline dönüşmektedir (Koehler and Fowler, 2004). Herschel-Bulkley modelinin basitleştirilmiş şekli Bingham sıvısı olarak tanımlanabilir (sabit viskoziteli esik kayma gerilmeli sıvı davranışı). Bingham sıvısı için $p=1$ ve $b = \eta_B$ (η_B : Bingham viskozitesi) olmakta ve akış formülü Denklem 4.2'deki şekilde olmaktadır:

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad [4.2]$$

Pratikte pek çok sıvıda deformasyon hızı ile viskozite değişkenlik gösterdiğinden Bingham modeli basitleştirilmiş, teorik bir modeldir. Deneysel sonuçları dikkate alındığında P değerinin 1'den küçük olması hamur karışımlarının Pseudoplastik davranışı gösterdiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.10. Değişik dozajda SP-1 su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç-1 çimentosu hamur karışımlarının kayma gerilmesi-deformasyon hızı ilişkisi



Şekil 4.11. Değişik dozajda SP-1 su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç-1 çimentosu hamur karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi

Daha öncede söylendiği gibi hamur karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek amacı ile her bir çimento tipi için üç farklı polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı, çimento ağırlığının %0, %0.1 ve %0.2'si olmak üzere üç farklı dozajda hamur karışımlarına eklenmiştir. Bu katkıların performansını hamur karışımlarında daha kolay kıyaslamak amacı ile özel bir kıyaslama metodu geliştirilmiştir. Şöyle ki, her çizelgede dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri kendi aralarında ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Her katkı dozajında belirli S/Ç oranı için üç farklı katkı içeren karışımlara ait değerler kıyaslanarak en küçük veri optimum değer olarak işaretlenmiştir. Bu kıyaslama, tüm katkı dozajlarında her iki S/Ç oranı için ayrı ayrı yapılmıştır. Kıyaslama sonucu her katkı için toplam işaret sayısı belirlenmiştir. Çizelgelerin son satrında her katkı için verilen değer bahis konusu sayıyı göstermektedir. Dinamik ekg ve nihai viskozite açısından en fazla işaret sayısına sahip katkı, o çimento ile en uyumlu katkı olarak seçilmiştir. Ancak, katkıların performansı incelendiği için bu kıyaslamalarda katkı içermeyen karışımların dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri dikkate alınmamıştır. Genel olarak beklendiği gibi katkı miktarı arttıkça karışımların dinamik eşik kayma gerilme ve nihai viskozite değerleri azalmıştır. Çizelge 4.15 ila 4.24'teki kıyaslama sonucu dikkate alındığında Ç1, Ç3, Ç4, Ç7 ve Ç8 çimentoları içeren karışımlar için, dinamik EKG ve nihai viskozite açısından en iyi performansın SP-1 katkısına ait olduğu anlaşılmıştır. Ç5, Ç6 ve Ç9 çimentoları içeren

karışımlarda ise en iyi performansı SP-3 katkısı göstermiştir. Ç2 çimentosunu içeren karışımlarda, SP-2 katkısı kullanıldığı zaman en düşük dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri gözlemlenmiştir.

Diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalara göre genel olarak, C₃A ve göreceli olarak daha az öneme sahip C₄AF miktarı, çimento inceliği ve sülfatların çözünübilirliği gibi faktörler, düşük S/Ç oranına sahip yüksek performanslı betonların reolojik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler olarak bilinmektedir (Tagnit-Hamou and Aïtcin, 1993). Bu çalışmada da hazırlanan hamur karışımları çok düşük (0.32 ve 0.35) S/Ç oranlarına sahiptir.

Çizelge 4.15. Ç-1 çimentolu karışımların ait dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.10		%0.20	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç1-0.32-SP1	97.9	13.17	88	8.39	44.25	4.22
Ç1-0.35-SP1	82.8	6.59	50.3	4.78	38.21	2.9
Ç1-0.32-SP2	106.12	11.62	97.28	9	96.16	6.07
Ç1-0.35-SP2	72	6.25	64.53	4.56	42.8	2.94
Ç1-0.32-SP3	126.06	9.85	111.27	7.07	103.26	10.15
Ç1-0.35-SP3	87.51	6.25	80.41	4.77	43.98	3.15

SP-1:6 SP-2:1 SP-3:1

Çizelge 4.16. Ç-2 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.10		%0.20	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç2-0.32-SP1	95.38	9.25	75.3	5.8	36.3	4.05
Ç2-0.35-SP1	61.25	3.75	36.7	3.9	7.71	1.11
Ç2-0.32-SP2	97.4	11.35	67.54	4.42	33.14	2.98
Ç2-0.35-SP2	48.73	4.14	27.09	2.28	17.99	1.35
Ç2-0.32-SP3	70.34	5.8	58.73	4.1	36.6	2.6
Ç2-0.35-SP3	50	4.88	35.7	2.56	20.5	1.98

SP-1:2 SP-2:4 SP-3:3

Farklı çimento-katkı ikilisinden oluşan hamur karışımların reolojik özelliklerini daha kolay kıyaslamak için, deney sonuçları katkısız ve katkılı olarak iki farklı kategoride incelenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 4.25 ve 4.26'da gösterilmiştir. Çizelge 4.25'te yer alan değerler her karışım için üç reolojik ölçümü sonuçlarının ortalamasıdır. Çizelge 4.26'da yer alan veriler ise her ikili

için çimento ağırlığının %0.1 ve %0.2'si kadar süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlarının reolojik sonuçlarının ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Tüm karışımlarda beklenildiği gibi S/Ç oranının artışıyla dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri azalmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen kontrol karışımına kıyasla çimento ağırlığının %0.2'si kadar süperakışkanlaştırıcı katkı içeren tüm karışımlarda EKG ve PV değerleri azalmıştır. Ancak, 0.32 S/Ç oranında hazırlanan Ç5-0.32-SP1 ve Ç5-0.32-SP2 karışımlarında, çimento ağırlığının %0.2'si kadar katkı kullanılmasına rağmen, bu karışımların dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri kontrol karışımına kıyasla daha yüksek olmuştur. Ç-5 çimentosunun nispeten yüksek Blaine inceliğine (3900 cm²/g) ve yüksek C₃A içeriğine (%6.92) sahip olduğu Çizelge 3.1 ve 3.2'den anlaşılmaktadır. Bölüm 3.3.1'de anlatıldığı gibi Ç-SP-%0.1 karışımları reolojik ölçüm sonrası, kontrol karışımına katkı ilave edilerek üretilmiştir. Aynı şekilde Ç-SP-%0.2 karışımları da reolojik ölçümü alınan Ç-SP-%0.1 karışımına katkı ilave edilerek hazırlanmıştır. Bu işlem yaklaşık 20 dakika sürmüştür. Bu süre içinde daha yüksek inceliğe sahip çimentonun daha hızlı hidrasyonu sonucu daha fazla etrenjit oluşumuna ve hamurun daha erken katılaşmasına neden olduğundan, SP-1 ve SP-2 katkıları çok etkin olamamıştır. Ancak, çimento ile uyumlu olan SP-3 katkısı içeren karışımlarda bu davranış gözlemlenmemiştir.

EKG ve PV değerleri açısından en iyi performansı gösteren çimentonun Ç6 olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun çimentonun düşük C₃A oranı ve çok düşük inceliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimentonun C₃A oranının az olması akışkanlık açısından iyileşme yarattığı Aïtcin (2004) tarafından da rapor edilmiştir. C₃A'nın reaksiyonuyla oluşan iğne formundaki etrenjit yapı, ortamdaki su moleküllerini tükettiği ve dolayısıyla çimento hamurunun işlenebilirliği azalttığı açıklanmıştır (Prince et al., 2002).

Çizelge 4.17. Ç-3 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	0%		0.10%		0.20%	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç3-0.32-SP1	81.71	12.94	100.73	6.99	43.7	3.7
Ç3-0.35-SP1	53.59	12.08	47.27	3.46	14.4	2.5
Ç3-0.32-SP2	76.58	8.98	101.13	7.78	53.79	4.66
Ç3-0.35-SP2	41.1	5.83	32.97	3.67	11.81	1.26
Ç3-0.32-SP3	95.13	13.55	110.79	7.04	29.99	4.15
Ç3-0.35-SP3	59.73	6.07	46.77	3.49	5.39	1.05

SP-1:4 SP-2:1 SP-3:3

Çizelge 4.18. Ç-3 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri (Modifiye edilmiş yönteme göre hazırlanan karışım)

Karışım	0%		0.10%		0.20%	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç3-0.32-SP1	81.25	6.8	58.73	4.1	8.21	1.95
Ç3-0.35-SP1	48.37	5	12.62	1.15	0.1	0.23
Ç3-0.32-SP2	75.34	5.9	47.8	6.25	13.97	2.34
Ç3-0.35-SP2	40.71	3.5	18.94	2.22	4.38	0.94
Ç3-0.32-SP3	54.55	8.44	39.61	4.91	3.97	1.96
Ç3-0.35-SP3	43.1	3.34	11.48	1.55	2.57	0.58

SP-1:5 SP-2:0 SP-3:3

Bu çalışmada kullanılan Ç1, Ç2 ve Ç3 çimentoları aynı fabrika ürünü olmaktadır. Bu çimentolar üretici firma beyanına göre aynı hammaddeden üretilmiştir. Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilen çimentoların ve bu çimentolara ait klinkerlerin özelliklerine göre Ç1, Ç2 ve Ç3 çimentosunun C₃A içeriği sırasıyla, %5.85, %2.77 ve %1.90 olmaktadır. Reolojik özellikleri etkileyen diğer faktörler dikkate alınmazsa, bu çimento tiplerinde C₃A miktarının azalmasıyla karışımların reolojik özelliklerinin iyileşmesi beklenmektedir. Ç1 ve Ç2 çimentosundan üretilen katkılı ve katkısız karışımlarının Çizelge 4.15, 4.16, 4.25 ve 4.26'da verilen reolojik özellikleri dikkate alındığında, dinamik EKG ve nihai viskozite açısından Ç2 karışımı Ç1 karışımına göre daha iyi performans göstermiştir. Buna neden olarak Ç1 çimentosunun daha yüksek incelik ve C₃A oranına sahip olması söylenebilir.

Ç3 çimentosu ise, Ç1 ve Ç2 çimentolarına göre çok düşük C₃A oranına sahip olmasına rağmen dinamik EKG ve nihai viskozite açısından daha kötü performans göstermiştir. Karışım hazırlama esnasında karışım sıcaklığının 25⁰C'den bir anda 32⁰C'ye yükselmesi ve karışımı reometre kabına boşalttıktan

hemen sonra ani bir şekilde katılması bu karışımda yalancı priz olduğu düşüncesini ortaya koymuştur. Bu şüphenin gerçek olup olmadığını görmek için yalancı prizin etkisini ortadan kaldırmak amacıyla, Bölüm 3.3.1’de açıklandığı gibi mikserde karıştırma süresini 2.5 dakikadan 4 dakikaya arttırılmıştır. Modifiye edilmiş yöntemle göre hazırlanan Ç3 karışımlarında yalancı priz oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu karışımlara ait dinamik EKG ve nihai viskozite değerinin normal yöntemle göre hazırlan Ç3 karışımına kıyasla azalması, daha düşük sürede karıştırılan Ç3 karışımlarında yalancı prizin oluşumunu ispatlamıştır. Bu durum her iki yöntemle hazırlanan karışımların, Şekil 4.12’de gösterilen kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiğinde anlaşılmaktadır. Şekil 4.12’de de görüldüğü gibi yalancı priz oluşumu söz konusu olan karışımda, karışımın aşırı derecede katılmasından dolayı belli bir deformasyon hızına kadar reometrenin ölçüm alamadığı gözükmektedir. Normal yöntemle göre hazırlanan 0.32 S/Ç oranına sahip tüm Ç3 karışımlarında %0.1 katkı kullanıldığında kontrol karışımına kıyasla dinamik EKG değerleri artmıştır. Bu karışımlarda hazırlama esnasında yalancı priz gözlemlenmiştir. Ancak, bir süre bilyenin karışımda dönmesinin ardından Ç3-SP-%0.2 karışımının hazırlanması için tekrar mikserde karıştırılmasından dolayı söz konusu yalancı priz ortadan kalkmıştır. Modifiye edilmiş yöntemle göre tekrar hazırlanan Ç3 karışımında benzer etkiye rastlanmamıştır.

Çizelge 4.19. Ç-4 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç4-0.32-SP1	49,40	6,92	58,73	4,14	23,53	2,4
Ç4-0.35-SP1	85,91	5,54	30,51	2,32	8,37	1
Ç4-0.32-SP2	81,15	6,26	89,22	5,43	37,31	3,15
Ç4-0.35-SP2	75,34	5,89	27,09	2,22	7,52	1
Ç4-0.32-SP3	114,21	6,67	78,78	4,80	12,61	2,42
Ç4-0.35-SP3	89,89	4,5	35,73	2,37	1,96	0,67

SP-1:5 SP-2:0 SP-3:3

Çizelge 4.20. Ç-5 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç5-0.32-SP1	39,18	3,02	75,24	4,17	57,22	3,3
Ç5-0.35-SP1	23,43	2,29	19,02	1,65	4,14	0,75
Ç5-0.32-SP2	33,14	2,98	83,06	4,82	44,62	2,98
Ç5-0.35-SP2	30,72	2,34	34,28	2,34	17,99	1,37
Ç5-0.32-SP3	67,54	4,43	35,78	2,75	4,59	1,1
Ç5-0.35-SP3	36,58	2,58	13,13	1,34	3,69	0,68

SP-1:0 SP-2:0 SP-3:8

Çizelge 4.21. Ç-6 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç6-0.32-SP1	43,70	3,74	14,01	1,31	2,56	0,77
Ç6-0.35-SP1	20,33	2,06	7,65	0,78	1,74	0,45
Ç6-0.32-SP2	49,04	4,21	10,53	1,28	3,85	0,72
Ç6-0.35-SP2	22,11	2,38	4,31	0,66	2,92	0,44
Ç6-0.32-SP3	37,63	3,76	6,09	0,74	1,61	0,44
Ç6-0.35-SP3	21,89	2,13	2,24	0,52	0,005	0,24

SP-1:0 SP-2:0 SP-3:8

Çizelge 4.22. Ç-7 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç7-0.32-SP1	80,91	9,24	83,4	6,19	20,24	3,03
Ç7-0.35-SP1	90,73	9,81	47,56	3,77	6,82	1,43
Ç7-0.32-SP2	82,82	6,6	98,44	6,3	31,99	3,23
Ç7-0.35-SP2	62,58	7,23	28,84	2,52	6,88	1,06
Ç7-0.32-SP3	93,99	13,52	89,72	6,64	21,14	3,08
Ç7-0.35-SP3	109,17	10,41	36,99	2,84	7,3	1,21

SP-1:5 SP-2:3 SP-3:1

Çizelge 4.23. Ç-8 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç8-0.32-SP1	85,24	6,57	36,76	3,9	3,47	1,22
Ç8-0.35-SP1	44,67	3,75	8,84	1,46	1,54	0,55
Ç8-0.32-SP2	97,7	7,97	58,38	5,01	14,66	2,05
Ç8-0.35-SP2	49,08	3,59	26,83	2,35	6,02	1,01
Ç8-0.32-SP3	69,93	6,02	30,54	3,17	6,66	1,36
Ç8-0.35-SP3	31,29	2,70	11,63	1,19	4,3	0,66

SP-1:5 SP-2:0 SP-3:3

Çizelge 4.24. Ç-9 çimentolu karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç9-0.32-SP1	95,52	5,6	77,6	4,69	29,22	2,50
Ç9-0.35-SP1	56,12	3,42	30,58	2,22	6,99	0,91
Ç9-0.32-SP2	100,35	6,08	74,92	4,56	27,61	2,49
Ç9-0.35-SP2	61,09	3,92	40,09	2,83	16	1,53
Ç9-0.32-SP3	98,55	6,22	23,98	2,41	1,92	0,86
Ç9-0.35-SP3	60,81	3,79	15,05	1,40	2,40	0,61

SP-1:0 SP-2:0 SP-3:8

Çizelge 4.25. Süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

		Ç-1	Ç-2	Ç-3	Ç-3*	Ç-4	Ç-5	Ç-6	Ç-7	Ç-8	Ç-9
S/Ç: 0.32	EKG	110.3	87.71	88.47	70.38	81.6	46.6	43.5	85.9	84.29	98.14
	PV	11.55	8.8	11.82	7.05	6.6	3.52	3.5	9.78	6.85	5.97
S/Ç: 0.35	EKG	80.77	53.33	51.47	44.06	83.7	30.2	21.4	87.5	41.68	59.34
	PV	6.36	4.26	7.99	3.95	5.31	2.4	2.2	9.2	3.35	3.71

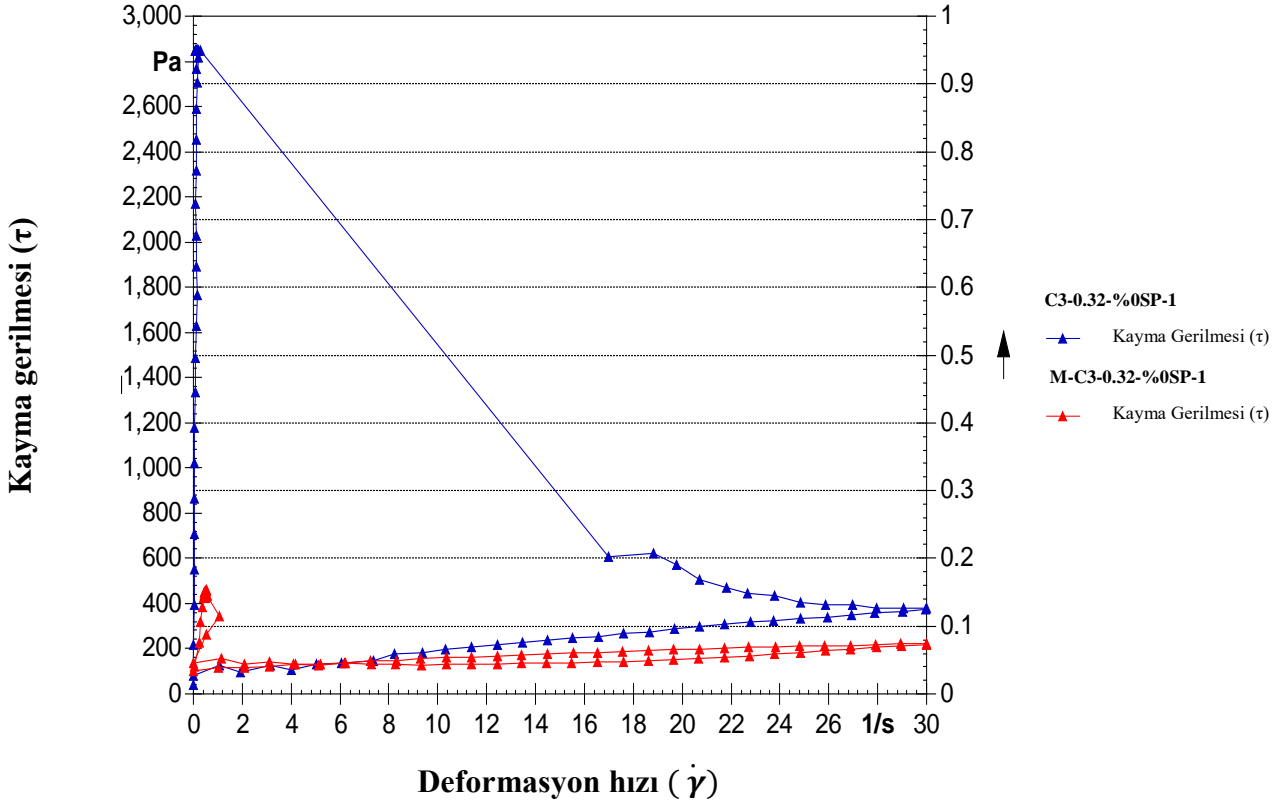
*modifiye edilmiş yöntemle göre hazırlanan karışımlar

Çizelge 4.26. Süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

		Ç-1	Ç-2	Ç-3	Ç-3*	Ç-4	Ç-5	Ç-6	Ç-7	Ç-8	Ç-9	
SP-1	S/Ç: 0.32	EKG	66.13	55.8	72.2	33.47	41.13	66.23	8.29	51.82	20.11	53.41
		PV	6.31	4.93	5.34	3.02	3.27	3.73	1.04	4.61	2.56	3.60
	S/Ç: 0.35	EKG	44.25	22.2	30.8	6.36	19.44	11.58	4.70	28.19	5.19	18.79
		PV	3.84	2.5	2.98	0.69	1.66	1.2	0.61	2.6	1.005	1.57
SP-2	S/Ç: 0.32	EKG	96.72	50.34	77.46	30.89	63.26	63.84	7.19	65.22	36.52	51.27
		PV	7.53	3.7	6.22	4.3	4.29	3.9	1	4.77	3.53	3.53
	S/Ç: 0.35	EKG	53.67	22.5	22.39	11.66	17.31	26.14	3.62	17.86	16.43	28.05
		PV	3.75	1.8	2.47	1.58	1.61	1.86	0.55	1.79	1.68	2.18
SP-3	S/Ç: 0.32	EKG	107.26	47.7	70.39	21.79	45.70	20.19	3.85	54.43	18.6	12.95
		PV	8.61	3.35	5.59	3.43	3.4	1.93	0.59	4.86	2.27	1.64
	S/Ç: 0.35	EKG	62.20	28.1	26.08	7.03	13.85	8.41	1.13	22.15	7.97	8.73
		PV	3.96	2.27	2.29	1.07	1.41	1.01	0.38	2.03	0.93	1.01

*modifiye edilmiş yöntemle göre hazırlanan karışımlar

Daha önce vurgulandığı gibi hamur karışımlarında 3 farklı fabrikaya ait süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Her akışkanlaştırıcı katkı için dinamik EKG ve nihai viskozite açısından en uyumlu çimentoyu belirlemek amacı ile her katkıya ait dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değeri Çizelge 4.27 ile 4.29'da ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Ancak, buradaki amaç katkı performansını incelemek olduğu için katkı içermeyen karışımların reolojik değerleri dikkate alınmamıştır. SP1, SP2 ve SP3 katkıları ile en uyumlu çimentonun Ç6 olduğu Çizelge 4.28 ve 4.29'dan anlaşılmaktadır. Ç6 çimentosu bu çalışma kapsamında kullanılan en düşük Blaine inceliğine sahip olan sülfata dayanıklı çimentodur.



Şekil 4.12. Normal ve modifiye edilmiş yönetime göre hazırlanan katkı içermeyen Ç-3 karışımına ait reometreden elde edilen veriler

Çizelge 4.27. SP-1 katkısı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç1-0.32-SP1	97.9	13.17	88	8.39	44.25	4.22
Ç1-0.35-SP1	82.8	6.59	50.3	4.78	38.21	2.9
Ç2-0.32-SP1	95.38	9.25	75.3	5.8	36.3	4.05
Ç2-0.35-SP1	61.25	3.75	36.7	3.9	7.71	1.11
Ç3-0.32-SP1	81.71	12.94	100.73	6.99	43.7	3.7
Ç3-0.35-SP1	53.59	12.08	47.27	3.46	14.4	2.5
Ç3-0.32-SP1*	81.25	6.8	58.73	4.1	8.21	1.95
Ç3-0.35-SP1*	48.37	5	12.62	1.15	0.1	0.23
Ç4-0.32-SP1	49,40	6,92	58,83	4,14	23,53	2,4
Ç4-0.35-SP1	85,91	5,54	30,51	2,32	8,37	1
Ç5-0.32-SP1	39,18	3,02	75,24	4,17	57,22	3,3
Ç5-0.35-SP1	23,43	2,29	19,02	1,65	4,14	0,75
Ç6-0.32-SP1	43,70	3,74	14,01	1,31	2,56	0,77
Ç6-0.35-SP1	20,33	2,06	7,65	0,78	1,74	0,45
Ç7-0.32-SP1	80,91	9,24	83,4	6,19	20,24	3,03
Ç7-0.35-SP1	90,73	9,81	47,56	3,77	6,82	1,43
Ç8-0.32-SP1	85,24	6,57	36,76	3,9	3,47	1,22
Ç8-0.35-SP1	44,67	3,75	8,84	1,46	1,54	0,55
Ç9-0.32-SP1	95,52	5,6	77,6	4,69	29,22	2,50
Ç9-0.35-SP1	56,12	3,42	30,58	2,22	6,99	0,91

Ç1:0 Ç2:0 Ç3:2 Ç4:0 Ç5:0 Ç6:6 Ç7:0 Ç8:0 Ç9:0

* modifiye edilmiş yönetime göre hazırlanan karışım

Çizelge 4.28. SP-2 katkısı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç1-0.32-SP2	106.12	11.62	97.28	9	96.16	6.07
Ç1-0.35-SP2	72	6.25	64.53	4.56	42.8	2.94
Ç2-0.32-SP2	97.4	11.35	67.54	4.42	33.14	2.98
Ç2-0.35-SP2	48.73	4.14	27.09	2.28	17.99	1.35
Ç3-0.32-SP2	76.58	8.98	101.13	7.78	53.79	4.66
Ç3-0.35-SP2	41.1	5.83	32.97	3.67	11.81	1.26
Ç3-0.32-SP2*	75.34	5.9	47.8	6.25	13.97	2.34
Ç3-0.35-SP2*	40.71	3.5	18.94	2.22	4.38	0.94
Ç4-0.32-SP2	81,15	6,26	89,22	5,43	37,31	3,15
Ç4-0.35-SP2	75,34	5,89	27,09	2,22	7,52	1
Ç5-0.32-SP2	33,14	2,98	83,06	4,82	44,62	2,98
Ç5-0.35-SP2	30,72	2,34	34,28	2,34	17,99	1,37
Ç6-0.32-SP2	49,04	4,21	10,53	1,28	3,85	0,72
Ç6-0.35-SP2	22,11	2,38	4,31	0,66	2,92	0,44
Ç7-0.32-SP2	82,82	6,6	98,44	6,3	31,99	3,23
Ç7-0.35-SP2	62,58	7,23	28,84	2,52	6,88	1,06
Ç8-0.32-SP2	97,7	7,97	58,38	5,01	14,66	2,05
Ç8-0.35-SP2	49,08	3,59	26,83	2,35	6,02	1,01
Ç9-0.32-SP2	100,35	6,08	74,92	4,46	27,61	2,49
Ç9-0.35-SP2	61,09	3,92	40,09	2,83	16	1,53

Ç1:0 Ç2:0 Ç3:0 Ç4:0 Ç5:3 Ç6:8 Ç7:0 Ç8:0 Ç9:0
*modifiye edilmiş yonteme göre hazırlanan karışım

Çizelge 4.29. SP-3 katkısı içeren karışımların dinamik EKG ve viskozite değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)	EKG (Pa)	PV (Pa.s)
Ç1-0.32-SP3	126.06	9.85	111.27	7.07	103.26	10.15
Ç1-0.35-SP3	87.51	6.25	80.41	4.77	43.98	3.15
Ç2-0.32-SP3	70.34	5.8	58.73	4.1	36.6	2.6
Ç2-0.35-SP3	50	4.88	35.7	2.56	20.5	1.98
Ç3-0.32-SP3	95.13	13.55	110.79	7.04	29.99	4.15
Ç3-0.35-SP3	59.73	6.07	46.77	3.49	5.39	1.05
Ç3-0.32-SP3*	54.55	8.44	39.61	4.91	3.97	1.96
Ç3-0.35-SP3*	43.1	3.34	11.48	1.55	2.57	0.58
Ç4-0.32-SP3	114,21	6,67	78,78	4,80	12,61	2,42
Ç4-0.35-SP3	89,89	4,5	35,73	2,37	1,96	0,67
Ç5-0.32-SP3	67,54	4,43	35,78	2,75	4,59	1,1
Ç5-0.35-SP3	36,58	2,58	13,13	1,34	3,69	0,68
Ç6-0.32-SP3	37,63	3,76	6,09	0,74	1,61	0,44
Ç6-0.35-SP3	21,89	2,13	2,24	0,52	0,005	0,24
Ç7-0.32-SP3	93,99	13,52	89,72	6,64	21,14	3,08
Ç7-0.35-SP3	109,17	10,41	36,99	2,84	7,3	1,21
Ç8-0.32-SP3	69,93	6,02	30,54	3,17	6,66	1,36
Ç8-0.35-SP3	31,29	2,70	11,63	1,19	4,3	0,66
Ç9-0.32-SP3	98,55	6,22	23,98	2,41	1,92	0,86
Ç9-0.35-SP3	60,81	3,79	15,05	1,40	2,40	0,61

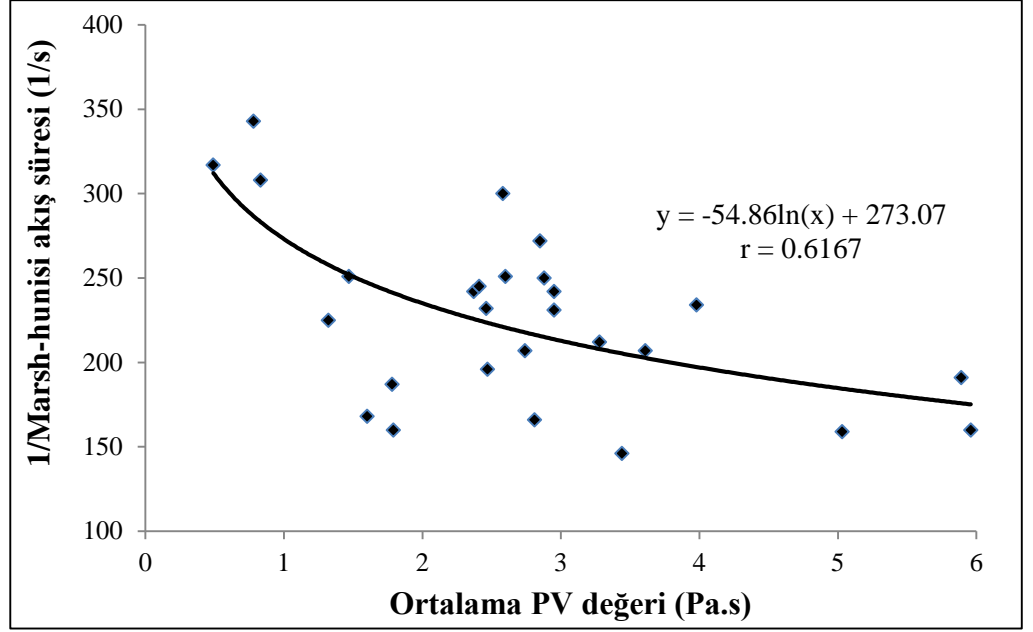
Ç1:0 Ç2:0 Ç3:0 Ç4:0 Ç5:3 Ç6:8 Ç7:0 Ç8:0 Ç9:0

Marsh-hunisi akış süresi deneyinden elde edilen verileri, reometreden elde edilen sonuçlar ile kıyaslamak amacı ile her karışımın ortalama nihai viskozitesi belirlenmiştir. Ortalama viskozite değeri her bir karışım için Çizelge 4.26'da verilen iki farklı S/Ç oranına ait nihai viskozite değerlerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır. Karışımlara ait hesaplanan ortalama viskozite değerleri Çizelge 4.30'da verilmiştir. Çizelge 4.30'da verilen ortalama viskozite değerleri ile Çizelge 4.11'de verilen ortalama 1/Marsh-hunisi akış süresi değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Şekil 4.13'den de anlaşıldığı gibi, Marsh-hunisi akış süresi deneyi sonucu ile reometreden elde edilen viskozite değerleri arasında zayıf logaritmik ve ters bir ilişki mevcuttur. Marsh-hunisi deneyi esnasında karışımların akış süresini ölçmek için çok akıcı bir karışımın deneye tabi tutulması gerekmektedir. Aksi takdirde hamur huniden akmaz. Böylece Marsh-hunisi deneyinde viskozitesi çok düşük suya yakın hamur karışımının akış süresi ölçülebilmektedir. Dolayısıyla, deneyde kullanılan karışım çok akıcıdır. Böyle bir karışıma katkı eklendiği zaman ayrışmaya daha da meyilli hale gelmektedir. Bu nedenle, Marsh-hunisi deneyinde dar bir orifisten geçen hamur karışımının akış süresi ve reometre bilyesinin matris içerisinde hareketinden elde edilen viskozite değerleri arasında kuvvetli bir ilişkinin elde edilmesi mümkün değildir. Reoloji özellikleri açısından, dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri küçük olan karışımlar makbuldür. Ancak, her çimento için her ne kadar 1/Marsh-hunisi akış süresi değeri büyük olursa o katkının o çimento ile akış performansı açısından daha uyumlu olduğunu ifade etmektedir. Reoloji ve 1/Marsh-hunisi akış süresi parametreleri arasındaki ters ilişkinin nedeni bundan kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.30. Farklı çimento-katkı ikilisinden oluşan tüm karışımların ortalama PV (nihai viskozite) değeri

Çimento tipi	Ortalama PV değeri (Pa.s)			Ortalama EKG değeri (Pa)		
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-1	SP-2	SP-3
Ç-1	5.07	5.64	6.29	55.19	75.19	87.73
Ç-2	3.71	2.75	2.81	39	36.44	37.88
Ç-3	4.16	4.34	3.93	51.52	49.92	48.23
Ç-3*	1.85	2,94	2,25	19.91	21.28	14.40
Ç-4	2.47	2.95	2.41	30.30	40.29	29.77
Ç-5	2.46	2.88	1.47	38.91	44.99	14.30
Ç-6	0.83	0.78	0.49	6.49	5.40	2.49
Ç-7	3.61	3.28	3.44	40	41.54	38.29
Ç-8	1.78	2.6	1.6	12.65	26.47	13.28
Ç-9	2.58	2.85	1.32	36.1	39.66	10.84

*modifiye edilmiş yöntemle göre hazırlanan karışımlar



Şekil 4.13. 1/Marsh-hunisi akış süresi ve ortalama PV değeri arasındaki ilişki

4.1.3.2. Hamur karışımlarının statik EKG değerleri

Hamur karışımlarının kayma gerilmesi-zaman grafiğiklerinden elde edilen statik eşik kayma (EKG) değerleri Çizelge 4.31 ile 4.40'da gösterilmiştir. Bu çizelgelerde görüldüğü ve beklenildiği gibi S/Ç oranı ve katkı kullanım dozajının artışıyla karışımların statik EKG değerleri azalmıştır. Ayrıca, beklenildiği gibi tüm karışımlarda statik EKG, dinamik EKG'nin üstünde bir değer olmuştur. Katkı içermeyen karışımlarda statik ve dinamik EKG değerleri arasında çok bariz bir fark varırken, katkı kullanımını ile ve katkı dozajı artışıyla statik ve dinamik EKG değerleri arasındaki fark azalmıştır. Çimento ağırlığının %0.2'si kadar süperakışkanlaştırıcı katkı içeren bazı karışımlarda statik ve dinamik EKG değerleri birbirine çok yakın ve düşük değerler olmuştur.

Katkı içeren karışımların statik EKG değerleri dikkate alındığında, dinamik EKG'ye benzer olarak burada da Ç1, Ç2, Ç3, Ç4, Ç7 ve Ç8 çimentoları içeren karışımlarda en iyi performansın SP-1 katkısı ile elde edildiği görülmüştür. Ç5, Ç6 ve Ç9 çimentolu karışımlarda ise en iyi performansı SP-3 katkısı göstermiştir.

Çizelge 4.31. Ç-1 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç1-0.32-SP1	1738	97.9	185.4	88	79.3	44.25
Ç1-0.35-SP1	289	82.8	104.1	50.3	56.4	38.21
Ç1-0.32-SP2	1295	106.12	305.8	97.28	142.5	96.16
Ç1-0.35-SP2	452.5	72	92.1	64.53	56.5	42.8
Ç1-0.32-SP3	686	126.06	335	111.27	169.5	103.26
Ç1-0.35-SP3	274	87.51	98.8	80.41	65.1	43.98

SP-1:4 SP-2:0 SP-3:0

Çizelge 4.32. Ç-2 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç2-0.32-SP1	1278	95.38	155.9	75.3	58.8	36.3
Ç2-0.35-SP1	155.6	61.25	63.9	36.7	12.5	7.71
Ç2-0.32-SP2	562	97.4	161.6	67.54	73.4	33.14
Ç2-0.35-SP2	308	48.73	39.8	27.09	15.5	17.99
Ç2-0.32-SP3	681	70.34	172.4	58.73	40.7	36.6
Ç2-0.35-SP3	265.3	50	61.3	35.7	14.9	20.5

SP-1:2 SP-2:1 SP-3:1

Çizelge 4.33. Ç-3 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç3-0.32-SP1	2850	81.71	307.5	100.73	140	43.7
Ç3-0.35-SP1	2849	53.59	81.6	47.27	35.3	14.4
Ç3-0.32-SP2	2838	76.58	286.4	99.13	130.8	53.79
Ç3-0.35-SP2	1727	41.1	104.3	32.97	52.3	11.81
Ç3-0.32-SP3	2850	95.13	154	110.79	50.1	29.99
Ç3-0.35-SP3	465.4	59.73	67.8	46.77	33.2	5.39

SP-1:0 SP-2:0 SP-3:4

Çizelge 4.34. Ç-3 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri (Modifiye edilmiş yönteme göre hazırlanan karışım)

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç3-0.32-SP1	461.6	81.25	63.5	58.73	11.96	8.21
Ç3-0.35-SP1	81.7	48.37	18.5	12.62	1.86	0.1
Ç3-0.32-SP2	438	75.34	75	47.8	24	13.97
Ç3-0.35-SP2	150.8	40.71	25.5	18.94	6.6	4.38
Ç3-0.32-SP3	420.5	54.55	68.4	39.61	12.84	3.97
Ç3-0.35-SP3	150.8	43.1	18.4	11.48	2.97	2.57

SP-1:3 SP-2:0 SP-3:1

Çizelge 4.35. Ç-4 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç4-0.32-SP1	338,4	49,40	74	58,73	43	23,53
Ç4-0.35-SP1	185	85,91	41,4	30,51	5,1	8,37
Ç4-0.32-SP2	252,6	81,15	112,4	89,22	53,7	37,31
Ç4-0.35-SP2	195,4	75,34	33,9	27,09	13	7,52
Ç4-0.32-SP3	155,7	114,21	106,6	78,78	29,2	12,61
Ç4-0.35-SP3	113,3	89,89	34,6	35,73	8,4	1,96
SP-1:2 SP-2:1 SP-3:1						

Çizelge 4.36. Ç-5 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç5-0.32-SP1	608,7	39,18	90,6	75,24	86,7	57,22
Ç5-0.35-SP1	46,1	23,43	23,7	19,02	7,1	4,14
Ç5-0.32-SP2	710,4	33,14	103,8	83,06	61,5	44,62
Ç5-0.35-SP2	146,2	30,72	40,6	34,28	26,1	17,99
Ç5-0.32-SP3	124,4	67,54	49,9	35,78	12,1	4,59
Ç5-0.35-SP3	49,7	36,58	21,5	13,13	7,1	3,69
SP-1:1 SP-2:0 SP-3:4						

Çizelge 4.37. Ç-6 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç6-0.32-SP1	166,4	43,70	19,6	14,01	5,4	2,56
Ç6-0.35-SP1	68,6	20,33	13,8	7,65	1,79	1,74
Ç6-0.32-SP2	138,9	49,04	16,4	10,53	4,9	3,85
Ç6-0.35-SP2	56,9	22,11	11,1	4,31	2	2,92
Ç6-0.32-SP3	77,2	37,63	6,1	6,09	1,62	1,61
Ç6-0.35-SP3	74,3	21,89	2,5	2,24	0,54	0,005
SP-1:0 SP-2:0 SP-3:4						

Çizelge 4.38. Ç-7 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç7-0.32-SP1	548,7	80,91	127,4	83,4	56,6	20,24
Ç7-0.35-SP1	760,9	90,73	66	47,56	18,6	6,82
Ç7-0.32-SP2	240,5	82,82	140,1	98,44	54,7	31,99
Ç7-0.35-SP2	555,7	62,58	43	28,84	19	6,88
Ç7-0.32-SP3	2850	93,99	134,6	89,72	58,1	21,14
Ç7-0.35-SP3	547,4	109,17	51,5	36,99	13,3	7,3
SP-1:3 SP-2:1 SP-3:0						

Çizelge 4.39. Ç-8 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç8-0.32-SP1	179,4	85,24	57,5	36,76	7,7	3,47
Ç8-0.35-SP1	68,2	44,67	16	8,84	1,9	1,54
Ç8-0.32-SP2	299,6	97,7	76,1	58,38	13,2	14,66
Ç8-0.35-SP2	85,1	49,08	38,6	26,83	14	6,02
Ç8-0.32-SP3	128,2	69,93	54,8	30,54	11,6	6,66
Ç8-0.35-SP3	42,8	31,29	16,1	11,63	3,4	4,3

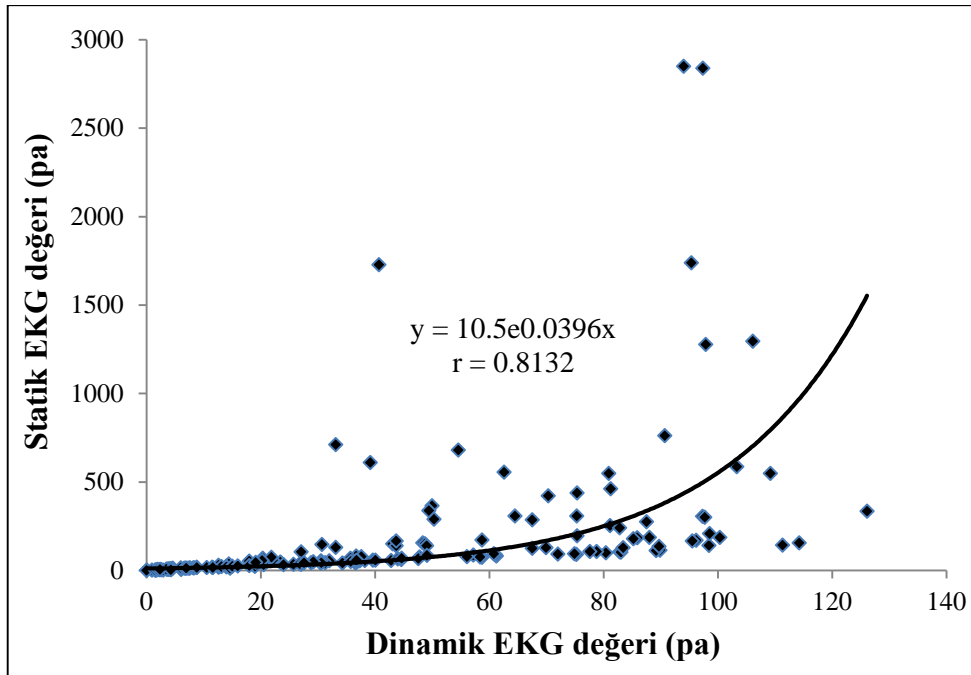
SP-1:3 SP-2:0 SP-3:1

Çizelge 4.40. Ç-9 çimentolu karışımların statik ve dinamik EKG değerleri

Karışım	%0		%0.1		%0.2	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
Ç9-0.32-SP1	166,3	95,52	106,7	77,6	48,1	29,22
Ç9-0.35-SP1	77,8	56,12	43,6	30,58	13,3	6,99
Ç9-0.32-SP2	185,5	100,35	93,3	74,92	44,1	27,61
Ç9-0.35-SP2	87,7	61,09	57,8	40,09	24,9	16
Ç9-0.32-SP3	208,3	98,55	33,2	23,98	5,3	1,92
Ç9-0.35-SP3	94,4	60,81	23,6	15,05	5,7	2,40

SP-1:0 SP-2:0 SP-3:4

1. periyottan elde edilen statik EKG ile 4. periyottan alınan dinamik EKG değerleri arasındaki üstsel zayıf ilişkisi Şekil 4.14'de verilmiştir. İlişkinin zayıf olduğunun başlıca nedeni az veya hiç katkı içermeyen karışımlardaki dinamik ve statik EKG değerleri arasında bulunan uçurumdur.



Şekil 4.14. Çimento hamuru karışımlarına ait dinamik-statik EKG değerleri arasındaki ilişki

4.1.4. Eşik kayma gerilmesi ve nihai viskoziteyi etkileyen faktörlerin matematiksel yöntemlerle araştırılması

Bir önceki bölümde, farklı çimento-katkı ikilisi kullanılarak, farklı S/Ç oranında değişik katkı içeriğinde hamur karışımlarının EKG ve nihai viskozite değerleri belirlenmiştir. Burada çok değişkenli regresyon programı yardımı ile çimento-katkı uyumunu etkileyen faktörlerin etki derecesi hesaplanmıştır. Bu analizlerde, literatür bilgilerine dayanarak, çimento inceliği, çimento C₃A, C₃S, C₂S, C₄AF ve eşdeğer alkali içeriği, su azaltıcı katkı miktarı, su zaltıcı katkı madde oranı ve karışım su içeriği dikkate alınmıştır. İstatiksel analizler 4 aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, faktör analizi ile etken parametreler belirlenmiştir. İkinci aşamada, doğrusal olmayan regresyon ile üçüncü aşamada ise yapay sinir ağları yöntemi ile girdi-çıkı ilişkisi kurulmuştur. Dördüncü ve son aşamada, duyarlılık analizi ile etken parametreler belirlenmiştir.

4.1.4.1. İstatistiksel parametrelerin araştırılması

İlk aşamada, deneysel verilerin basit bir istatistik analizi yapılmıştır. EKG ve nihai viskozite belirlenmesinde yapılan deneylerde kullanılan faktörlerin tanımlayıcı istatistikleri Çizelge 4.41’de verilmiştir.

Çizelge 4.41’deki sonuçlar incelendiğinde, incelik, EKG ve nihai viskozite değerlerinin oldukça büyük bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Diğer parametreler, ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında nispeten daha dar bir aralıkta dağılmışlardır. Bununla birlikte, incelik, C₃S yüzdesi, C₄AF yüzdesi ve katkı katkı madde oranı parametreleri sağa çarpık, katkı miktarı ve su içeriği parametrelerinde dağılım düzgün, diğer parametrelerin dağılımlarının kütlesi ortalamanın sol tarafında yığılmıştır. Ancak %5 anlamlılık düzeyinde ± 1.96 aralığındaki çarpıklık katsayıları tüm parametrelerin normal dağılıma yakın olduğunu göstermektedir. Eğrilerin kurtosis katsayıları incelendiğinde, incelik, C₄AF yüzdesi, eşdeğer alkali miktarı, katkı miktarı, katkı katkı madde oranı, su içeriği ve EKG parametreleri, normal dağılıma uygun eğrilerden daha basık, geri kalan parametrelerin ise daha sivri bir dağılıma sahip oldukları söylenebilir.

Genel bir değerlendirilme yapılırsa, iki veritabanındaki datanın da normala uygun bir dağılıma sahip olduğu söylenebilir. Girdi verilerinin tamamı normal dağılıma uygun olmasa da doğrusal veya doğrusal olmayan modellerle girdi-çıkı arasında ilişkilerin kurulabileceği bilinmektedir.

Çizelge 4.41. EKG ve nihai viskozite değerlerini etkileyen faktörlerin istatistiksel analizi

Parametre	İncelik (cm²/g)	C₃A (%)	C₃S (%)	C₂S (%)	C₄AF (%)	Eşdeğer Alkali (%)	Katkı miktarı	Katkı oranı	Su içeriği (g)	EKG (Pa)	Nihai viskozite (Pa.s)
Veri sayısı	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143
Ortalama	3618.67	6.29	62.93	13.05	11.97	0.93	1.01	35.27	268.11	37.71	3.20
Std. Sapma	402.70	4.03	4.99	3.44	3.07	0.26	0.81	2.33	12.00	29.65	2.36
Varyasyon kats.	194042.59	13.56	18.75	8.89	8.99	0.07	0.67	5.47	145.01	126.06	8.15
Maksimum	4260.00	13.88	67.10	20.37	16.27	1.23	2.00	38.56	280.00	0.01	13.52
Minimum	2810.00	1.90	52.50	10.20	7.67	0.51	0.00	33.50	256.00	-0.67	0.24
Kurtosis kats.	-0.66	-0.50	0.46	0.68	-1.46	-1.31	-1.51	-1.52	-2.04	0.52	3.26
Çarpıklık kats.	-0.56	1.12	-1.69	1.77	-0.36	0.28	0.00	0.71	0.00	37.71	1.20

4.1.4.2. Bağımlı parametreler ile eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite arasındaki ilişkilerin doğrusal/doğrusal olmayan regresyon ile araştırılması

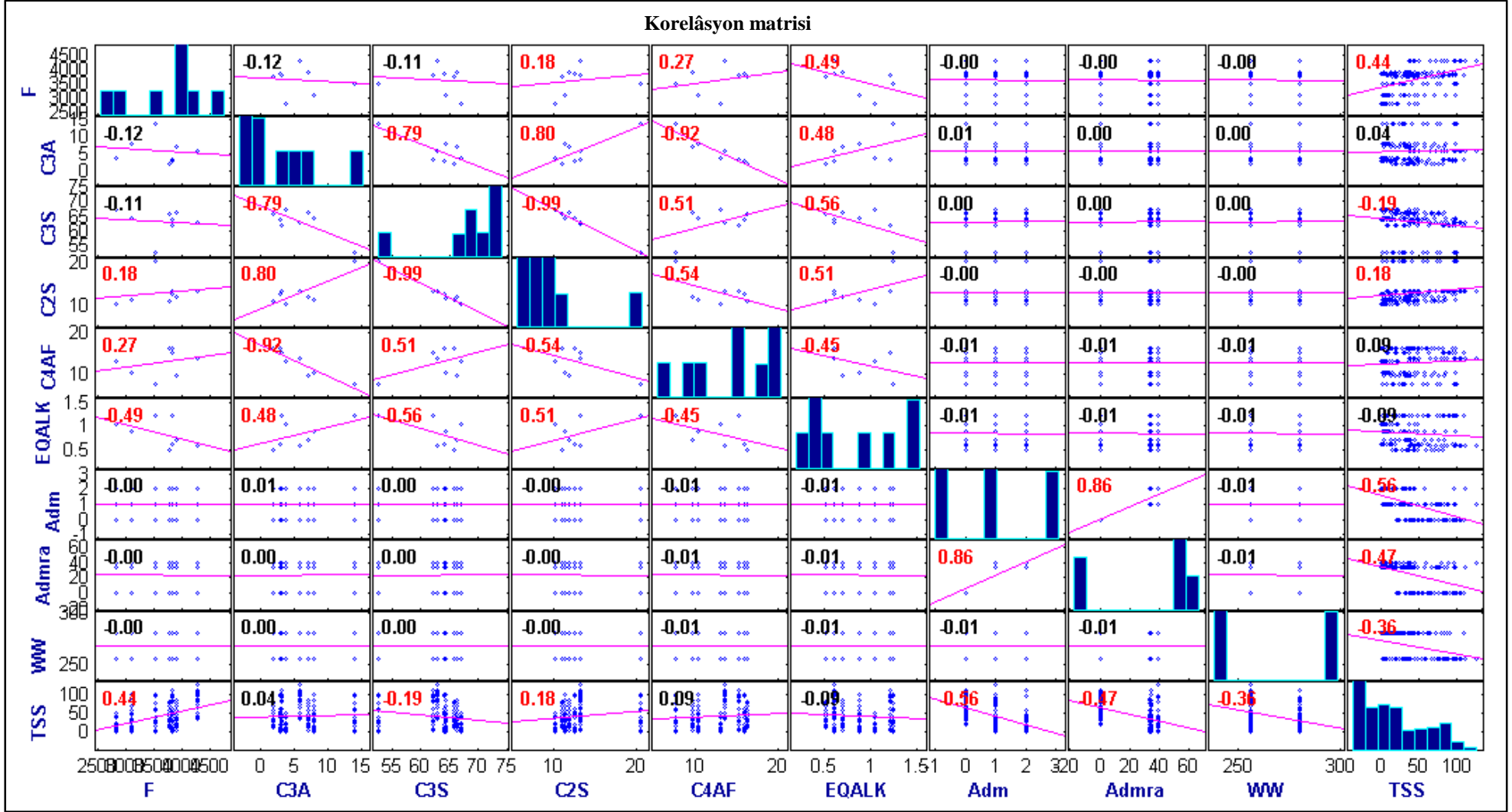
Parametreler arasında görsel/doğrusal ilişkilerin araştırılması

Korelasyon, girdi/çıkıtı verileri arasındaki karşılıklı ilişkinin sayısal olarak puanlamasını sağlamaktadır. İki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin en bilinen hesaplama yöntemi “korelasyon katsayısı”dır. X ile Y gibi iki rasgele değişkenin kovaryanslarının standard sapmalarının çarpımına oranı olarak bilinen bu parametre, Denklem 4.3'teki gibi formülize edilebilir:

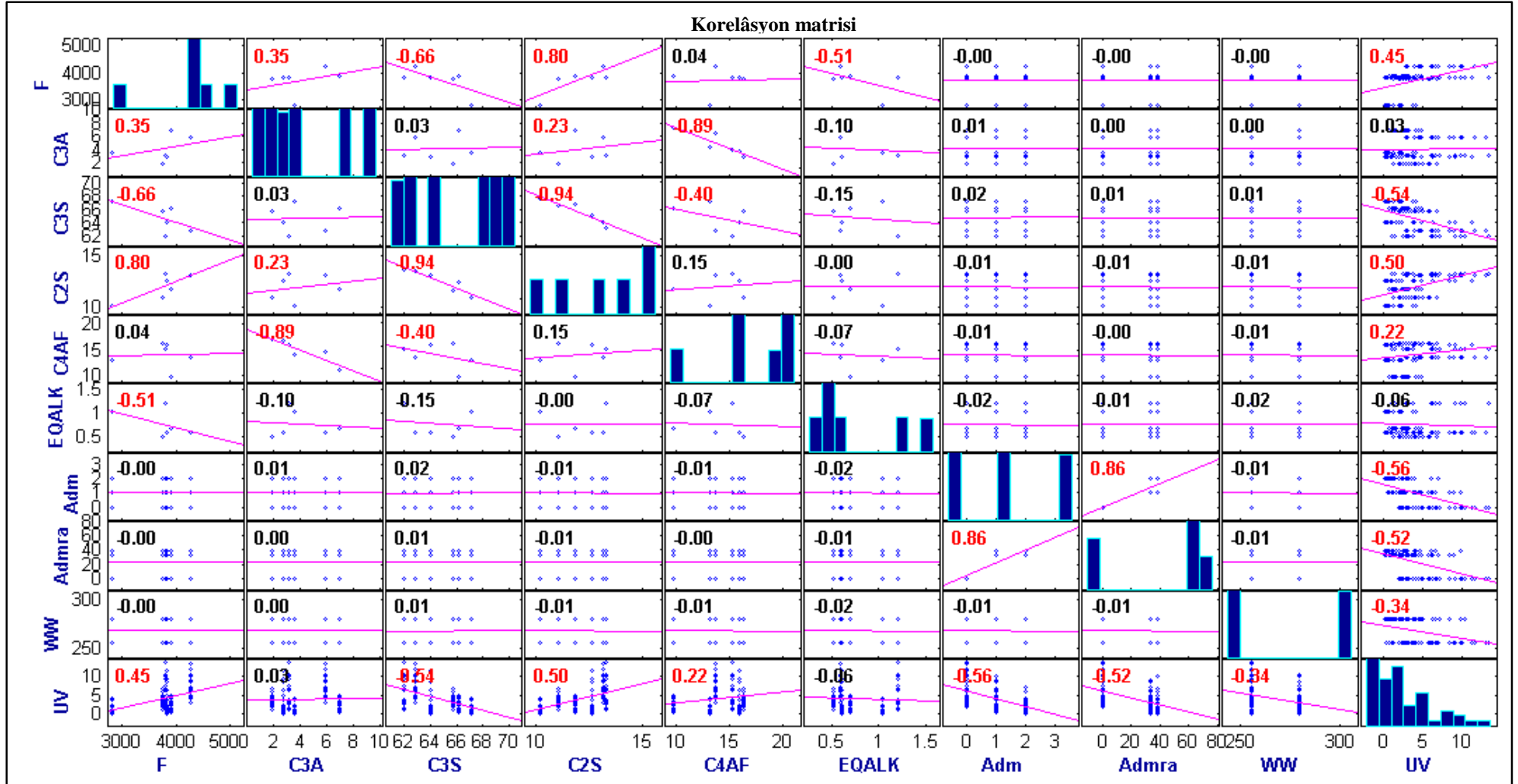
$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad [4.3]$$

Bir rastgele örnekleme olarak n büyüklükte X ve Y değişkenleri için aralıksal ölçekli veya oransal ölçekli sayısal veri serileri bulunmaktadır. Bu seriler n satırlı ve 2 sütunlu bir veri matrisi olarak ifade edilir. Bu veriler $i = 1, 2, \dots, n$ için x_i ve y_i olarak yazılır. Burada \bar{x} ve \bar{y} sırasıyla, x_i ve y_i için örnekleme aritmetik ortalamasıdır. r_{xy} katsayısı 1 olduğunda iki değişken arasında mükemmel bir doğrusal ilişki, -1 ise iki değişkenler arasında mükemmel ters doğrusal ilişki, 0 ise iki değişkenin arasında hiçbir ilişki olmadığı sonucuna varılmaktadır. Bu anlamda, değişkenler arasında çapraz korelasyon grafikleri çizilerek (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16) ilgili korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. İşlemi kolaylaştırmak amacı ile çalışmanın bu kapsamında kısaltmalar yapılmıştır. Bunlar; çimento inceliği "F", çimento eşdeğer alkali miktarı "EQALK", su azaltıcı katkı miktarı "Adm", su azaltıcı katkı katı madde oranı "Adm-rat", karışımın su miktarı "WW", nihai viskozite "UV" ve son olarak karışımın eşik kayma gerilmesi "TSS" ile gösterilmiştir.

Şekil 4.15 ve 4.16 değerlendirildiğinde, EKG parametresini doğrusal olarak en çok etkileyen parametrelerin incelik, katkı miktarı, karışım su miktarı, C₃S ve C₂S olduğu görülmektedir. Görsel inceleme de benzer sonuçları vermektedir. Bununla birlikte, nihai viskozite parametresinin bağımlı olduğu parametrelerin çimento inceliği, C₃S, C₂S, C₄AF, katkı miktarı, katkı katı madde oranı ve su içeriği olduğu açıktır, yine görsel incelemeler de benzer sonuçları göstermektedir. Bazı parametrelerin arasında bir iç bağımlılığın var olduğu görülmüştür.



Şekil 4.15. EKG değerleri için korelasyon katsayılarını içeren çapraz matris



Şekil 4.16. Nihai viskozite değerleri için korelasyon katsayılarını içeren çapraz matris

Kendall'in rank katsayısı yöntemi (aynı zamanda Kendall'in τ katsayısı olarak da adlandırılmaktadır) ölçülen iki değer arasındaki ilişkiyi sayısal olarak ifade etmektedir. " τ " testi parametrik olmayan bir hipotez testidir. Korelasyon katsayılarına alternatif olan bu yöntem, normal dağılımın dışındaki dağılımlara sahip olan veri eğilimlerinden daha az etkilenmektedir ve daha az işlem ve hesap gerektirmektedir.

Burada, $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_n, y_n)$ ikililerinin ayrık rastgele X ve Y değişkenlerinin elemanları olduğunu düşünelim. Herhangi iki (x_i, y_i) ve (x_j, y_j) çiftinin uyumlu olması, ancak iki elemanın da rankının sıralı olması ile mümkün olmaktadır: Yani, eğer $x_i > x_j$ ve $y_i > y_j$ ise veya $x_i < x_j$ ve $y_i < y_j$ ise bu veriler uyumlu (konkordant) aksi halde bu veriler uyumsuz olmaktadır.

Kendall'in τ katsayısı Denklem 4.4 gibi tanımlanmaktadır (Nelsen, 2001):

$$\tau = \frac{(\text{Uyumlu çiftlerin sayısı} - \text{uyumsuz çiftlerin sayısı})}{0.5 \times n \times (n-1)} \quad [4.4]$$

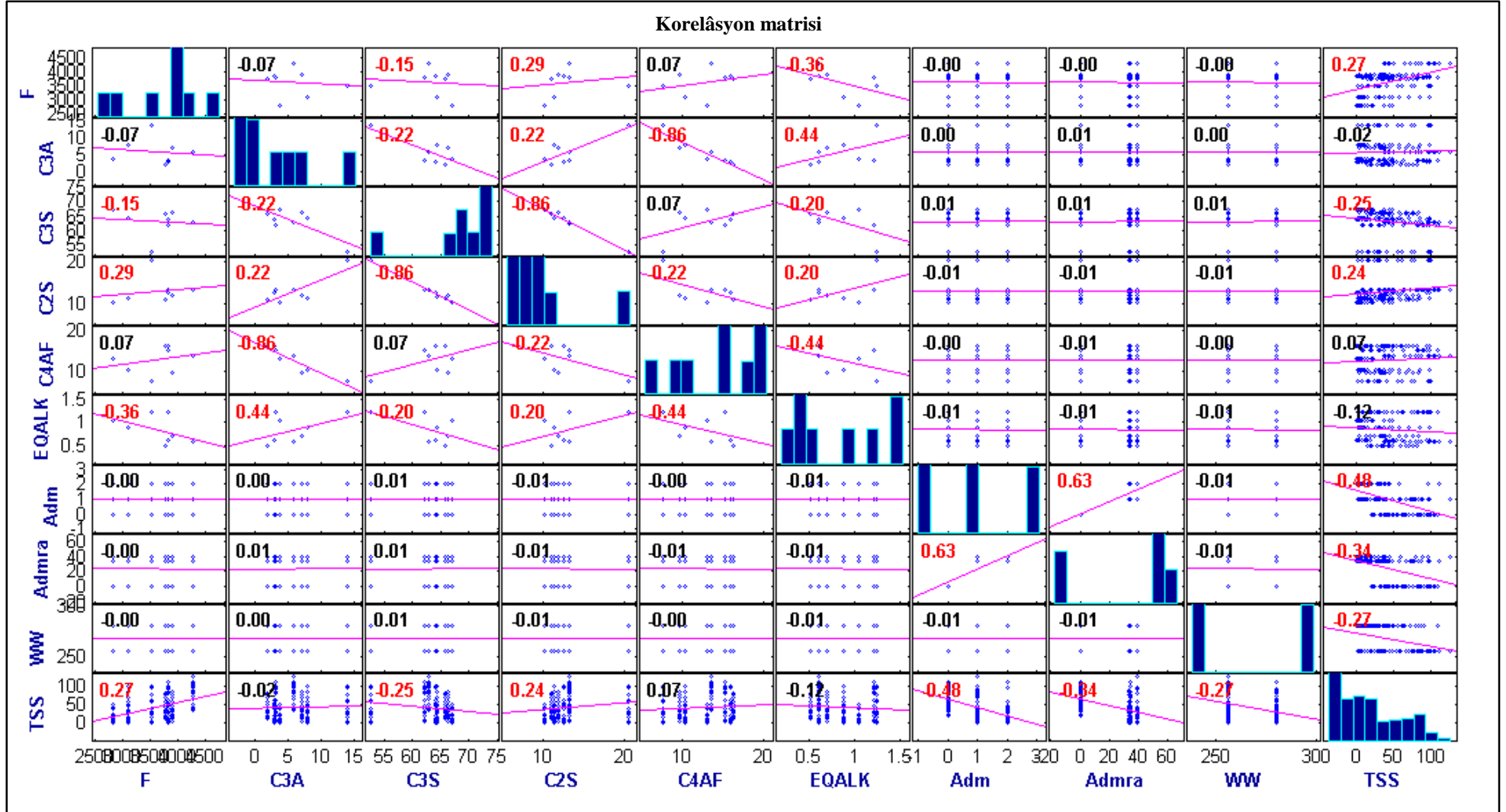
Bu formülde, paydadaki n veri çifti sayısıdır. " τ " katsayısı 1 olduğunda iki değişken mükemmel derecede uyumlu, -1 ise iki değişken son derece uyumsuz, 0 ise iki değişkenin bağımsız olduğu sonucuna varılmaktadır.

Şekil 4.17'de gösterilen korelasyon matrisi incelendiğinde, diyagonal kolonda olan histogramlar, datanın en üniform dağıldığı verilerin çimento inceliği, C₃A, C₄AF, eşdeğer alkali ve EKG olduğunu göstermektedir. Grafik üzerindeki rakamlar Kendall'in rank katsayılarıdır ve parametrik olmayan bir test ile adı geçen iki değişkenin birbirine istatistik olarak ne derecede bağımlı olduğunu göstermektedir. Şekildeki veriler incelendiğinde, EKG değerlerinin en çok çimento inceliği, C₃S, C₂S ve katkı miktarı parametrelerinden etkilendiği görülmektedir. Katkı miktarı ve katkı katkı madde oranı parametrelerinin birbirine son derecede bağımlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, C₃S içeriği C₂S içeriğinden oldukça fazla etkilenmektedir. Benzer şekilde C₄AF ve C₃A arasındaki ilişkinin " τ " katsayısı da 0.86 olarak elde edilmiştir ve bu yüksek bir değerdir.

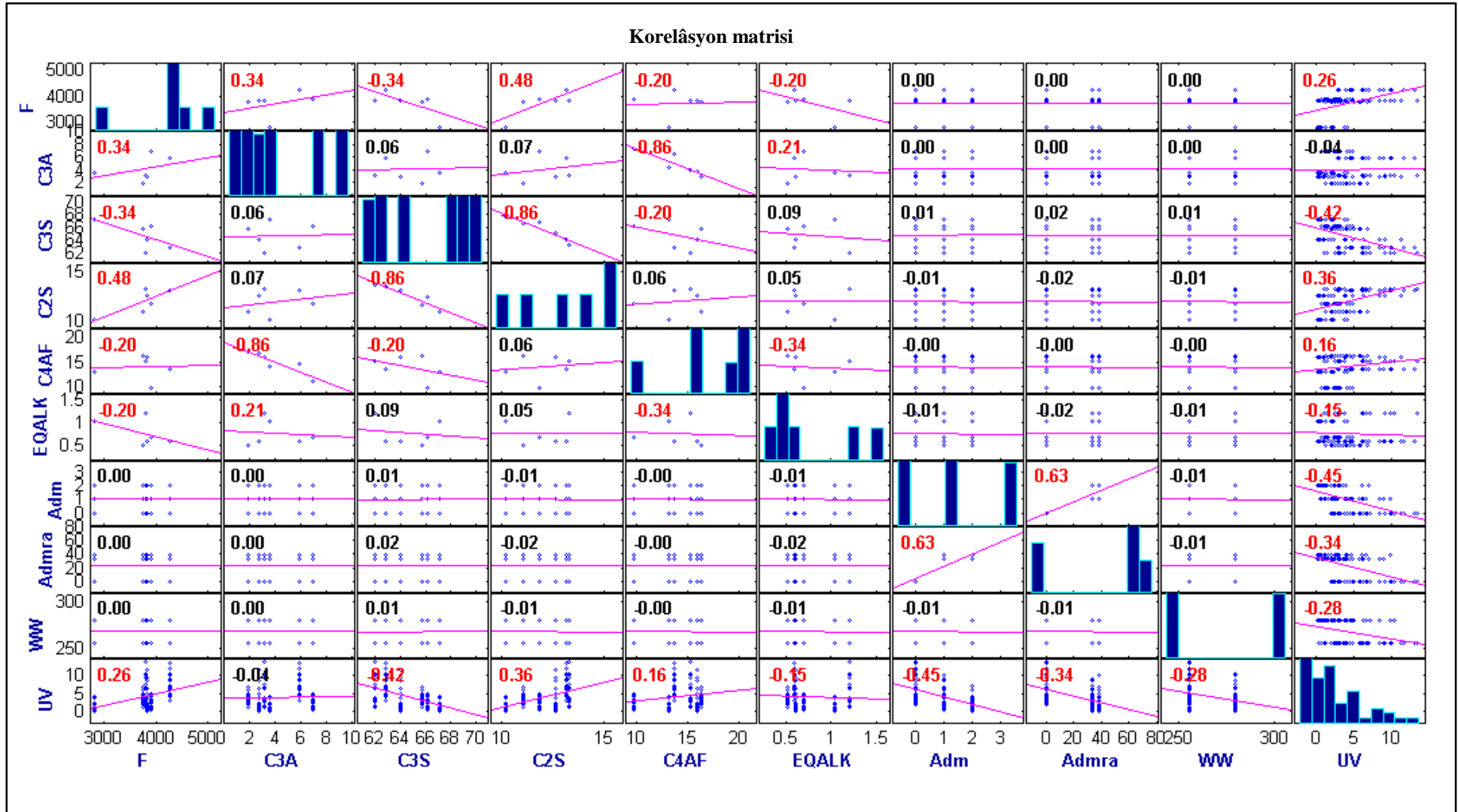
Nihai viskozite parametresinin diğer parametrelere bağımlılığı Şekil 4.18'de incelenmiştir. Nihai viskozite parametresinin histogramı incelendiğinde, verinin sola çarpı, düzgün biçimde dağıldığının altını çizmek gerekmektedir. Nihai viskozitenin ise doğrusal olarak incelik, C₃S, C₄AF, katkı miktarı, katkı katı

madde oranı, su miktarı parametrelerinden etkilendiğini söylemek gerekir. Elde edilen çıktılar üzerindeki görsel incelemeler de bu sonuçları onaylamaktadır.

Bu sonuçlardan hareketle, EKG ve nihai viskozite parametrelerinin diğer parametrelere bir bağımlılığı sözkonusu olsa da, bu bağımlılığın derecesi hakkında parametrik olmayan testlerin yanında, parametrik testler de denenmiştir. Böylece, faktör analizi ile bağımlılığın derecesi araştırılmış ve yukarıdaki parametreler ile uyumluluğu incelenmiştir.



Şekil 4.17. Bağımlı değişkenlerle EKG değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.18. Bağımlı değişkenlerle nihai viskozite değerleri arasındaki ilişki.

Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon yöntemi

Bu tip modeller, iki veya daha fazla parametreye bağımlı olarak bir değişkenin davranışının modellenmesinde kullanılmaktadır. Çözümün bir doğru olduğu doğrusal regresyonun aksine, çözüm eğrisel, düzlemsel veya daha karmaşık bir yüzey olabilir.

Genellikle en küçük kareler yönteminden faydalanılan çözümlerde, m sayıda veriye sahip n bilinmeyene sahip bir model, iteratif olarak hesaplanmaktadır. m veri noktası ve n adet α parametresine bağlı $y=f(x, \alpha)$ eğrisel modelini düşünelim. α değerlerinin elde edilmesi, kalıntıların karelerin toplamının minimize edilmesi ile mümkün olacaktır:

$$S = \sum_{i=1}^m r_i^2 \quad [4.5]$$

Burada, r_i olarak verilen kalıntı veya hata değerleridir ve gerçek değerler ile elde edilen denklemden hesaplanan tahminlerin farkıdır:

$$r_i = y_i - f(x_i, a) \quad [4.6]$$

olarak ifade edilebilir.

Hata kareleri toplamının minimize edilmesi, gradyanın sıfıra eşit olması ile mümkün olabilecektir:

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_j} = 2 \sum_i^j r_i \frac{\partial r_i}{\partial \alpha_j} \quad [4.7]$$

sıfır olmalıdır. Doğrusal olmayan bir denklem için, kalıntıların α parametrelerine kısmi türevleri hem bağımsız hem de bağımlı parametrelerin fonksiyonu olduğundan, başlangıç değerleri problemidir ve değerler k. iterasyon için aşağıdaki denklemden belirlenir:

$$\alpha_j^{k+1} = \alpha_j^k + \Delta \alpha \quad [4.8]$$

Bu denkelemde $\Delta \alpha$ artım vektörü olarak bilinmektedir. Her iterasyonda α_j^k civarında Taylor serisine açılması ile kalıntılar yeniden hesaplanır ve bu

denklemlerin gradyan denklemlerinin içine yerleştirilmesi ile n doğrusal denklem haline gelmektedir. Bu denklemlerin matris formu aşağıdaki gibidir:

$$J^T W J \Delta \alpha = J^T W \Delta y \quad [4.9]$$

Burada, W kalıntıların ağırlık matrisi, J ise kalıntıların α parametresine göre kısmi türevlerini içeren matristir. Denklem 4.9 doğrusal olmayan en küçük kareler probleminin çözümünü sağlamaktadır (Kelley, 1999; Strutz, 2010).

Yukarıdaki bilgilerin ışığında, öncelikle EKG için yukarıda adı geçen parametrelere bağlı olarak regresyon denklemi hazırlanmış, ancak anlamlı olarak kabul edilen parametreler ile çözüm yapıldığında determinasyon katsayısı oldukça küçük olduğu (0.53) tespit edilmiştir. Dolayısıyla, korelasyon ve daha sonra faktör analizi ile desteklenen doğrusal ilişkilerin ve açıklanan varyansın kestirilmesi, parametre indirgeme esnasında faydalı olmamıştır. Tüm parametrelerin dâhil edildiği çözüm için regresyon denklemleri Çizelge 4.42'de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi 0.73 olan R^2 değerleri denklemlerin kabul edilebilir bir derecede doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. EKG değerleri için kurulan birinci modelde katsayılar Çizelge 4.43'te verilmektedir.

Çizelge 4.42. EKG parametresi için elde edilen modeller

Sıra	Model
1	$a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g \times Adm + h \times Adm_rat + i \times WW + j$
2	$a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g \times Adm + h \times Adm_rat + i \times WW$
3	$exp(a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g \times Adm + h \times Adm_rat + i \times WW + j)$

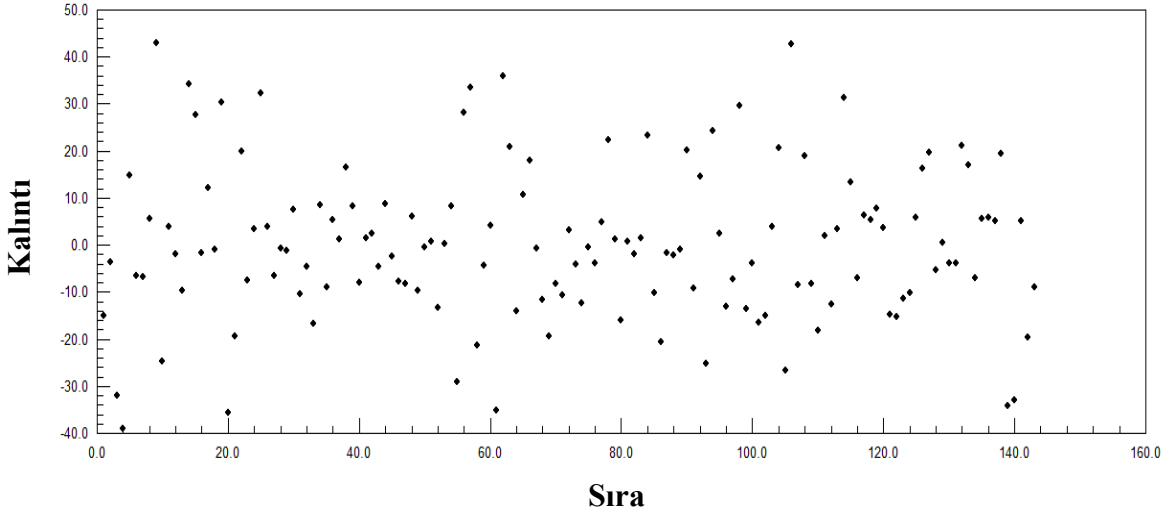
Sıra	Standart hata	Toplam kalıntı	Ortalama kalıntı	RSS*	R^2
1	17.60657	-1.46E-11	-1.02E-13	41228.86	0.729942
2	17.54199	-0.07001	-0.00049	41234.65	0.729904
3	18.08337	-134.766	-0.94242	43492.1	0.715117

*Kalıntı kareler toplamı (Residual sum of squares)

Çizelge 4.43. EKG için kurulan birinci modeldeki katsayılar

Katsayı	Değer
a	0.04925411931
b	18.56730263
c	0.3372422858
d	-10.80341348
e	15.87836312
f	49.95799808
g	-23.34583736
h	0.06291192683
i	-0.9823628156
j	-82.6407573

Model 1'in kullanılması ile elde edilen kalıntıların dağılımı Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. EKG için Model 1'deki kalıntı değerleri

Daha sonra, nihai viskozite için aynı regresyon denklemleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu anlamda ilk denemeler yukarıda listelediğimiz parametreler ile yapılmıştır. Nihai viskozite için kurulan modeller Çizelge 4.44'te ve nihai viskozite için kurulan birinci modelde katsayılar ise, Çizelge 4.45'te verilmiştir.

Çizelge 4.44. Nihai viskozite için kurulan modeller

Rank	Model
1	$\exp(a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g \times Adm + h \times Adm_rat + i \times WW + j)$
2	$a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g \times Adm + h \times Adm_rat + i \times WW + j$
3	$a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g \times Adm + h \times Adm_rat + i \times WW$
4	$a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g$
5	$\exp(a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK + g)$
6	$a \times F + b \times C_3 A + c \times C_3 S + d \times C_2 S + e \times C_4 AF + f \times EQALK$

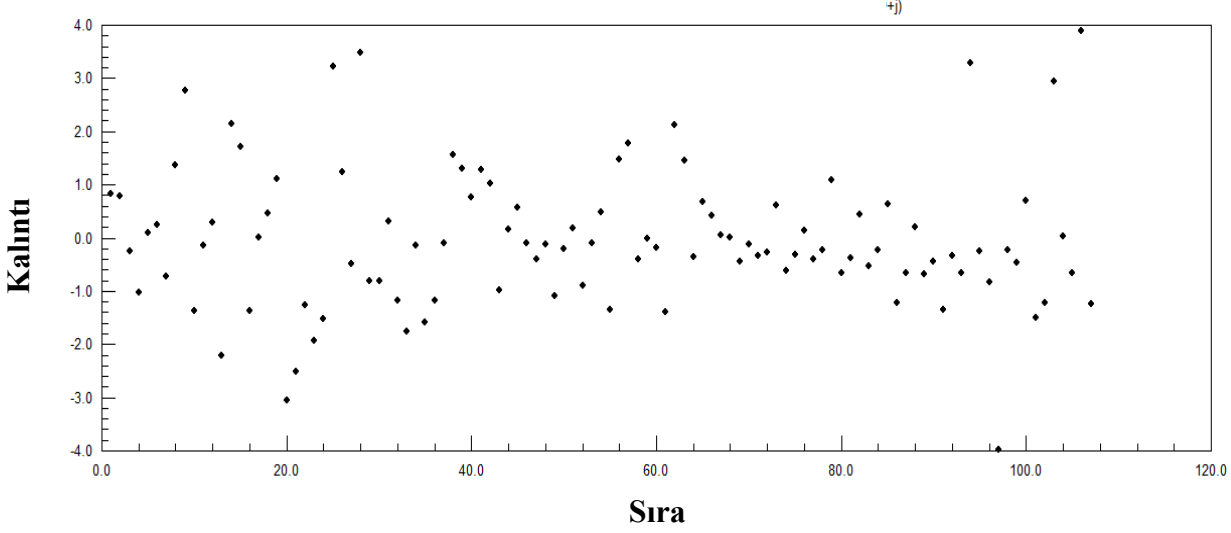
Sıra	Standart hata	Toplam kalıntı	Ortalama kalıntı	RSS*	R ²
1	1.370671	-3.77442	-0.03527	182.2376	0.817789
2	1.563013	-0.7225	-0.00675	236.9718	0.763063
3	1.555147	-1.43E-11	-1.33E-13	237.0112	0.763023
4	1.656855	1.48E-13	1.39E-15	274.5168	0.725523
5	1.656855	8.69E-12	8.12E-14	274.5168	0.725523
6	1.87633	1.313235	0.012273	355.582	0.64447

*Kalıntı kareler toplamı (Residual sum of squares)

Çizelge 4.45. Nihai viskozite için kurulan birinci modeldeki katsayılar

Katsayı	Değer
a	1.46E+08
b	7.05E+10
c	1.03E+11
d	6.03E+10
e	8.04E+10
f	3.42E+11
g	-0.57196
h	0.002638
i	-0.02016
j	-9.61E12

Model 1'in kullanılması ile elde edilen kalıntıların değişimi Şekil 4.20'da verilmiştir.



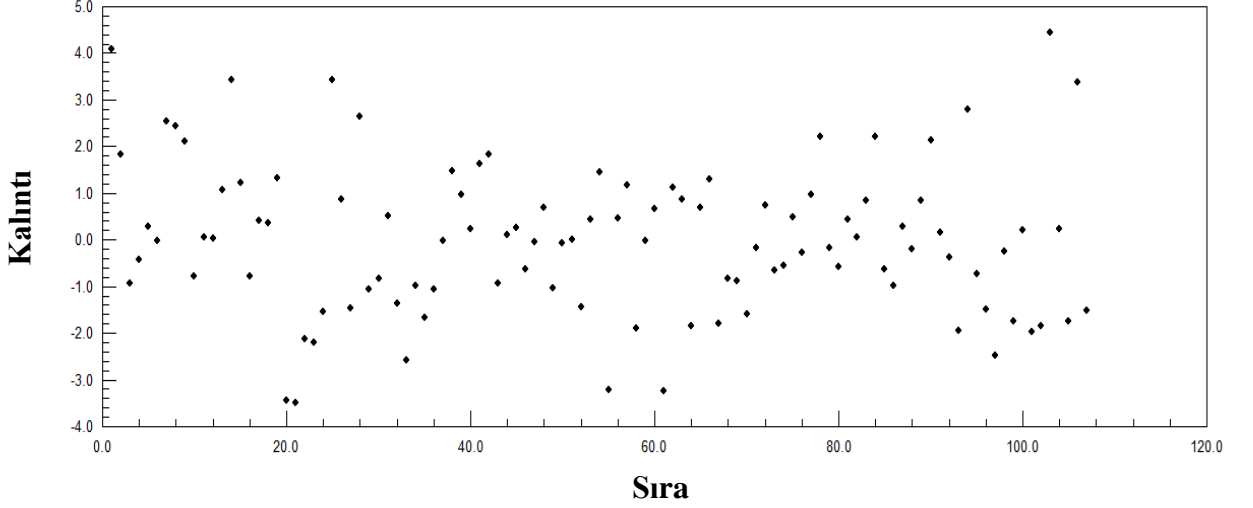
Şekil 4.20. Nihai viskozite değerleri için Model 1'deki kalıntı değerleri

Denenen 6 model arasından nispeten basit bir denkleme sahip, aynı zamanda diğer basit modellere kıyasla daha yüksek R^2 değeri olan 4 nolu modele ait denklemin katsayıları ve kalıntı değerleri Çizelge 4.46'da verilmektedir.

Çizelge 4.46. Nihai viskozite için kurulan dördüncü modeldeki katsayılar

Katsayı	Değer
a	0.001427
b	-0.6044
c	0.083175
d	-1.58126
e	-0.02788
f	-0.08552
g	61.7294

Model 4'ün kullanılması ile elde edilen kalıntıların değişimi Şekil 4.21'te verilmiştir. Sonuçta, çok değişken doğrusal olmayan regresyon yönteminin eşik kayma gerilmesi ve nihayi viskoziteyi etkileyen parametrelerin belirlenmesinde başarılı olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, yapay sınır ağları yönteminin uygulanmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.21. Nihai viskozite değeri için Model 4'teki kalıntı değerleri

4.1.4.3. Yapay sinir ağları ile elde edilen çözüm

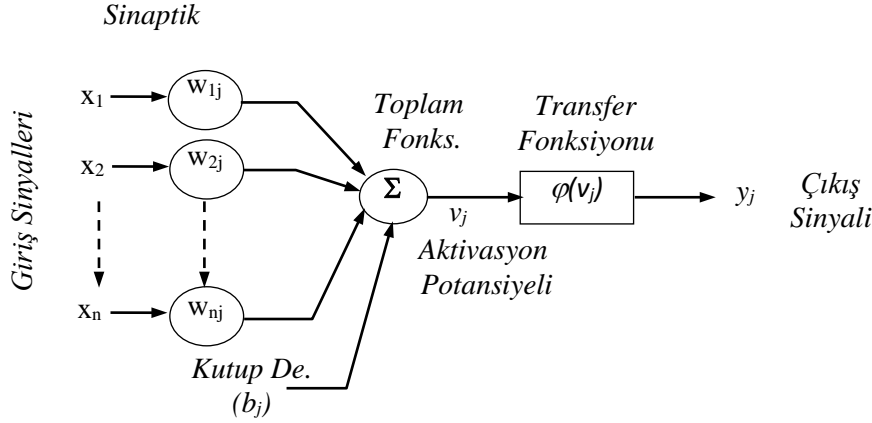
Yapay sinir ağlarına genel bakış

Yapay sinir ağları (YSA), insan beynindeki öğrenme işlemini gerçekleştiren paralel ağ yapısını taklit eden bir programlama biçimidir. İlk yapay nöron modeli Mc Culloch ve Pitts (1943) tarafından ileri sürülmüştür. Ancak, YSA'nın etkin bir şekilde kullanımı geri-yayılım öğrenme algoritmasının bulunması ile başlamıştır (Rumelhart et al., 1986). Geri yayılım öğrenme algoritmasının ileri sürülmesinden sonra birçok araştırmacı konu üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmıştır (Jacobs, 1988; Reidmiller and Braun, 1993; Hagan and Menhaj, 1994).

Bu yöntem, ağırlıklar, toplama fonksiyonu ve transfer fonksiyonu yapay nöronu oluşturmaktadır. Diğer nöronlardan gelen iletiler (ağırlıklar ve giriş sinyalleri) toplanıp, bir kutuplanma değeri ile karşılaştırılarak aktivasyon potansiyeli hesaplanır ve bu potansiyel transfer fonksiyonundan geçirilerek yapay nöronun çıkış sinyali üretilir (Şekil 4.22). Hesaplama Denklem 4.10'deki gibi yapılmaktadır:

$$y_k = F(v_j) = F\left(\sum_{i=1}^n x_i w_{ij} - b_j\right) \quad [4.10]$$

Burada, x_i giriş sinyalini, w_{ij} sinaptik ağırlığı, b_j kutuplama değerini, v_j aktivasyon potansiyelini, y_k çıkış sinyalini, n önceki katmandaki nöron sayısını ve k işlem yapılan nöronun indisini belirtmektedir. Kutuplanma değeri, sabit bir değerdir. Aktivasyon potansiyeli ise transfer (aktivasyon) fonksiyonu tarafından istenilen aralığa göre normalize edilerek YSA'nın yakınsayabilmesi mümkün kılınmaktadır.



Şekil 4.22. Yapay nöron modeli

Çok katmanlı perseptronları (MLP) giriş/çıkış katmanları ile ara katmanlar oluşturur ve her katmanda en az bir nöron bulunur. Her katmandaki nöronlar diğer katmandaki nöronlara paralel şekilde bağlıdır. Esas olarak, MLP'lerde sinyallerin çıkış katmanına ulaşması ile beraber çıkış katmanındaki nöronlardaki hata miktarları hesaplanmaktadır. Çıkış katmanındaki hataların kareleri toplamının en küçük olmasıyla istenilen amaca erişilmektedir. Bundan sonraki aşamada, geri yayılan hata miktarları ve sinaptik ağırlıklar ile kutup değerleri güncellenmektedir. Bağımsız parametrelerin güncellenmesi hataların oluşturduğu amaç fonksiyonunun en küçük olmasını sağlayacaktır. Bu da nihai YSA'nın oluştuğu anlamına gelmektedir (Haykin, 1998; Demuth ve Beale, 2000; Kecman, 2001).

Öğrenme hızındaki yükseklik ve optimizasyondaki başarısından dolayı bu çalışmada yapılan YSA eğitimlerinde Lavenberg-Marquardt öğrenme algoritması kullanılmıştır (Haykin, 1998; Demuth ve Beale, 2000). Doğrusal olmayan en küçük kareler ve en büyük komşuluk yaklaşımları Lavenberg-Marquardt algoritmasının temellerini oluşturmaktadır. Algoritmik olarak, Hessian matrisinin hesaplanmasına gerek olmamakta, Jakobina matrisin hesabı gerekmektedir (Sezer, 2011). Burada Hessian matrisi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$H(n) = J^T(n) J(n) \quad [4.11]$$

Burada, $J(n)$ hata enerji fonksiyonunun birinci derece türevleri içeren Jakobian matrisidir. Gradyan, hata uzayındaki maksimum hata azalımının oluşacağı doğrultunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Lavenberg-marquardt algoritmasında amaç türevinin birinci fonksiyonu olan gradyan (δ_j) aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$\delta_j(n) = J^T(n) e_j(n) \quad [4.12]$$

Denklem 4.12'de $e_j(n)$ hata sinyali vektörüdür. Sonuç olarak, Lavenberg-Marquardt algoritmasında, öğrenme işlemi aşağıdaki Denklem 4.13 yardımı ile gerçekleştirilmektedir:

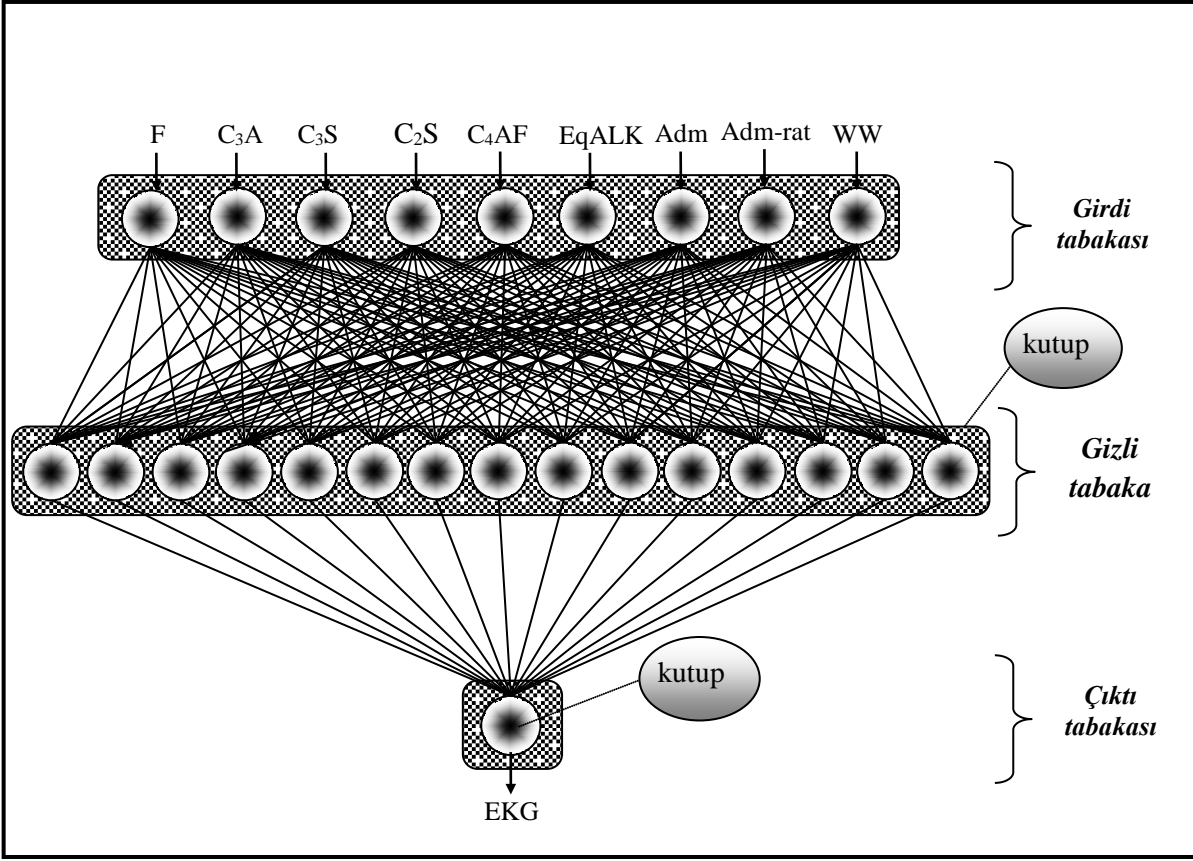
$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) - [J^T(n) J(n) + \lambda I]^{-1} J^T(n) e_j(n) \quad [4.13]$$

Denklem 4.13'de I birim matrisi, λ ise, Marquardt parametresini göstermektedir. Denklem 4.14'de hata enerjisi fonksiyonu verilmiştir ve bu enerji fonksiyonu minimize edilinceye dek ağırlıkların (w_{ij}) hesaplanmasına devam edilmektedir (Hagan ve Menhaj, 1994; Haykin, 1998; Demuth and Beale, 2000):

$$E(w) = \sum_{i=1}^m e_j^2(w) \quad [4.14]$$

Yapay sinir ağları ile eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozitenin tahmini için kurulan modeller

Yapay sinir ağları ile modellemenin yapılması için, iki veri seti düzenlenmiş ve 9 girdi, bir çıktı parametresinden oluşan bir model oluşturulmuştur. Girdi parametrelerinin çıktı parametresini modelleyebilme yeteneği gizli katmandaki nöron sayısı 10, 30 ve 50 olarak değiştirilerek araştırılmıştır. Şekil 4.23'te EKG parametresinin hesaplanmasında kullanılan YSA yapısı ve girdi/çıkıtı parametreleri gösterilmektedir.



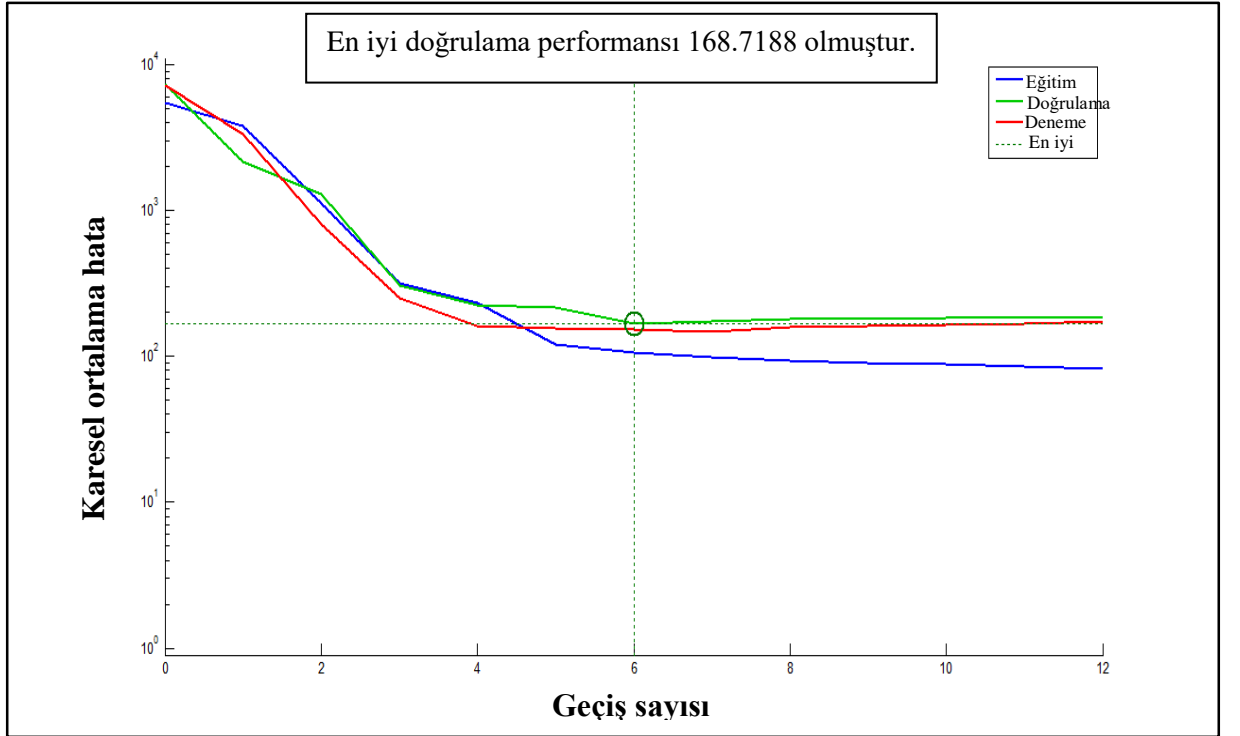
Şekil 4.23. EKG'nin elde edilmesi için oluşturulan örnek sinir ağı mimarisi.

Burada, önemli olan nokta, öğrenme, doğrulama ve deneme veri setlerinin istatistiklerinin ve saçılım grafiklerinin benzer olmasıdır. Verilerin %65'i öğrenme, % 15'i doğrulama, % 20'si ise deneme için kullanılmıştır. Normal dağılıma sahip olan, ortalamalarının eşit olduğu, varyanslarının eşit, ancak bilinmediği sıfır hipotezini kabul eden t testi ile veri setlerin anlamlı bir şekilde bölünmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.24'te $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme aşamasında elde edilen ortalama karesel hata değerleri gösterilmektedir. Kesikli çizgiler ile gösterilen değerler minimum ortalama karesel hatanın elde edildiği iterasyon değerini, bir başka deyişle, eğitimin doğrulama veri setine dayanarak sonlandırıldığı iterasyon sayısını göstermektedir.

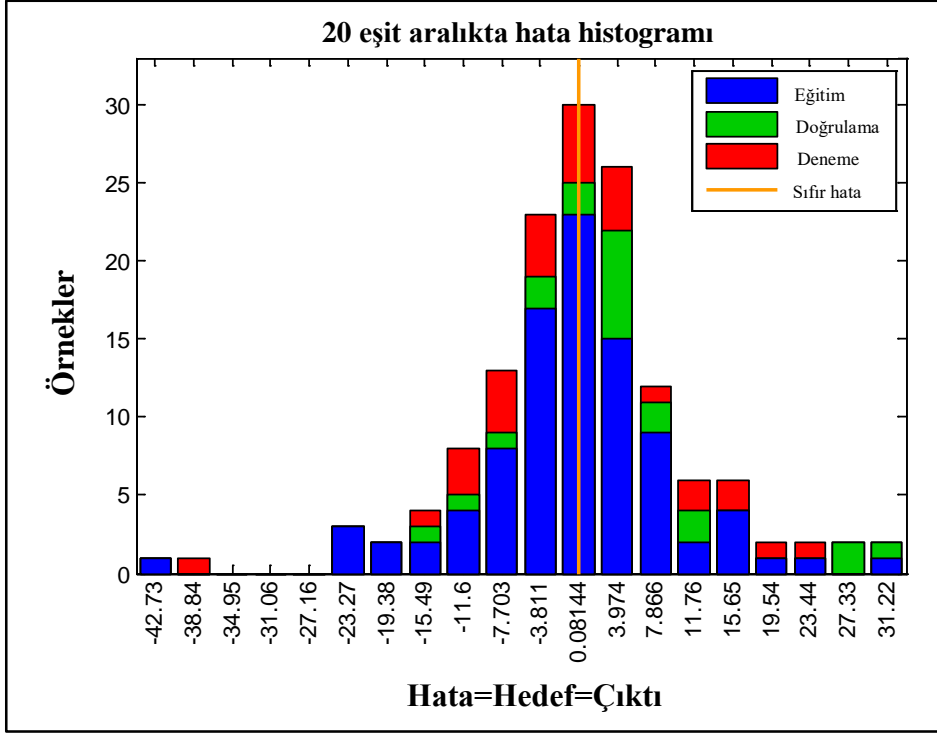
Test işlemi için, eğitim setinde kullanılmayan verilerden oluşan test seti kullanılır. Test setindeki girdiler YSA modeline verilir ve YSA'nın çıktı değeri ile istenilen çıktı değeri karşılaştırılır. Amaç, YSA modelinin yeterli bir genelleme yapıp yapamadığını görmektir. Eğitim ve test aşamalarında istenilen başarı elde

edilirse YSA modeli kullanılabilir. Eğitim ve deneme ile çapraz doğrulama (cross validation) setinin %25 ile %90'ı arasında değişen miktarı eğitim seti olarak seçilir. Geri kalan kısım ise test seti olarak ayrılır. Çapraz doğrulama tekniğinde ise, YSA'nın eğitilmesinde ve test edilmesinde tüm veri seti kullanılır. Bu yaklaşımda, tüm veri seti k adet örtüşmeyen kümeye ayrılır ve k farklı YSA elde edilir. Her YSA'nın testinde farklı bir küme kullanılmak üzere, eğitim işlemi geri kalan k-1 adet küme ile gerçekleştirilir. Uygulamada kullanılacak YSA ise, tüm veri seti kullanılarak eğitilir. Bu YSA'nın performansı, k farklı YSA'nın test sonuçlarının ortalaması ile ölçülür.



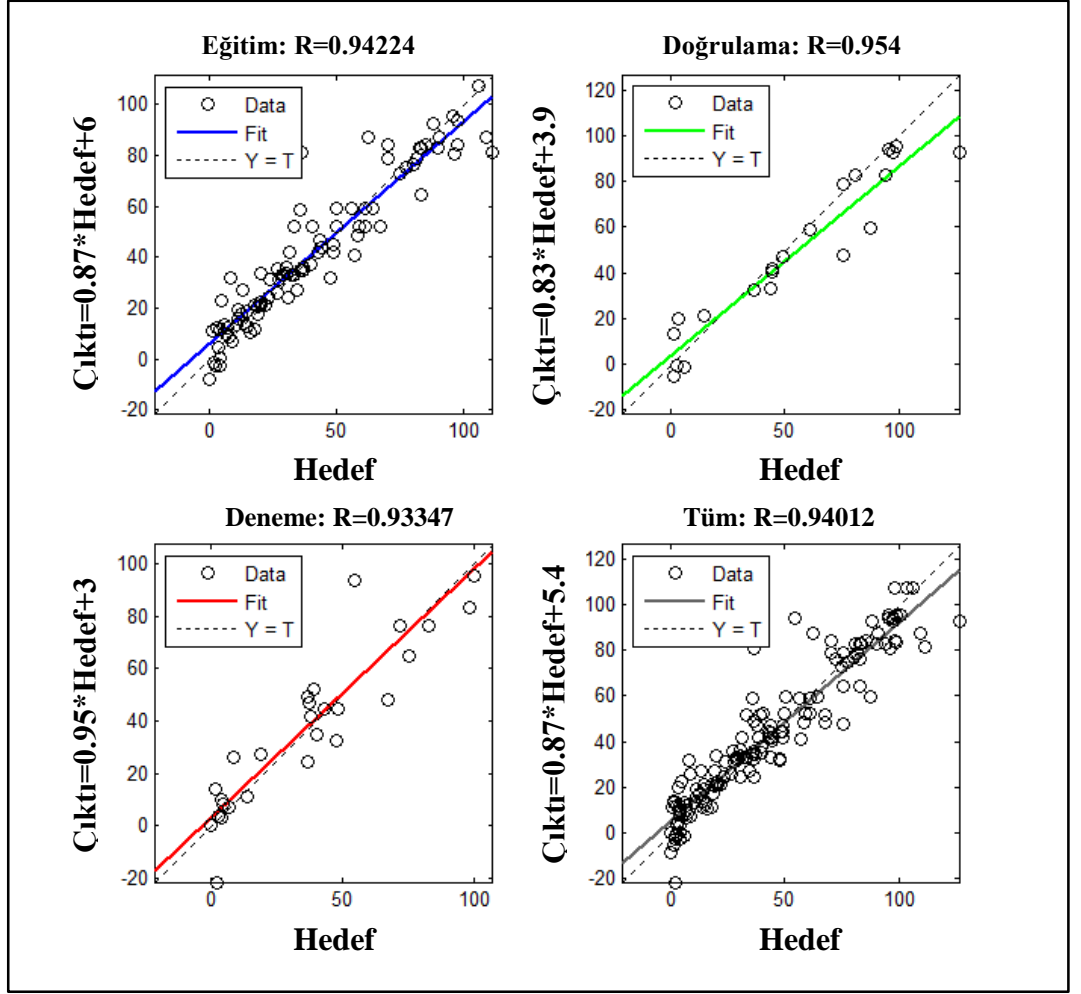
Şekil 4.24. EKG değeri tahmini için kurulan 9x10x1 sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme aşamalarında elde edilen ortalama karesel hata değerleri

Şekil 4.25'te 9x10x1 mimariye sahip sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme setlerinde elde edilen hataların histogramı gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, hatalar sıfır değeri civarında yığılma göstermiştir.



Şekil 4.25. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında elde edilen hataların histogramı (EKG)

Şekil 4.26’da $9 \times 10 \times 1$ mimariye sahip YSA’da eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinin gerçek çıktı değerleri ile YSA’nın sağladığı çıktıların saçılım grafikleri gösterilmektedir. Gerçek değerler ve YSA çıktıları arasındaki ilişki aynı zamanda regresif bir bağıntı ile desteklenerek, korelasyon katsayısı değerleri ile beraber, YSA’nın simülasyon yeteneği de gösterilmektedir. Eğitim, doğrulama, deneme ve tüm veri setleri için elde edilen 0.94, 0.95, 0.93 ve 0.94 korelasyon katsayısı değerleri, iki değer arasında mükemmel bir doğrusal ilişkiyi gösteren 1 değerine oldukça yakındır ve kurulan YSA’nın başarısını göstermektedir.



Şekil 4.26. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde gerçek değerler ile YSA çıktıları arasındaki saçılım grafikleri (EKG)

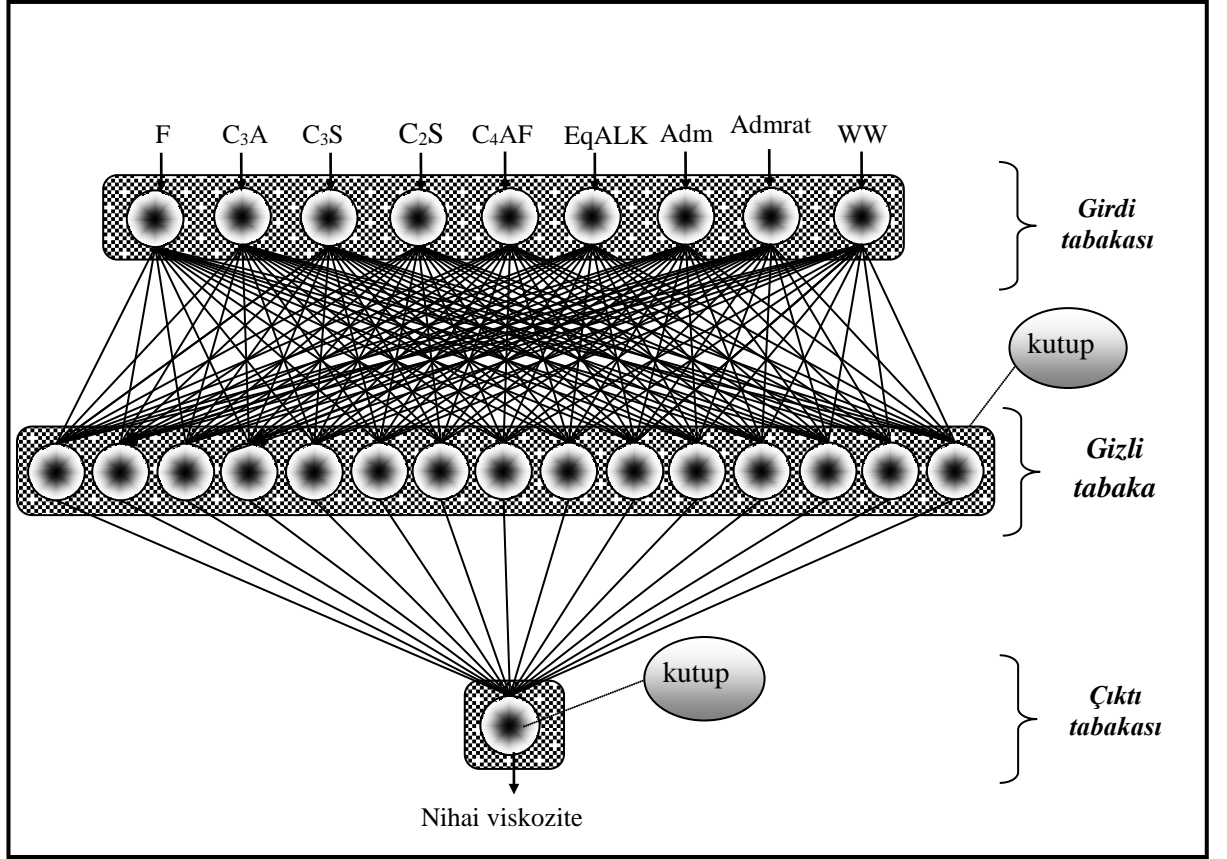
Benzer işlemler $9 \times 30 \times 1$ ve $9 \times 50 \times 1$ mimarilerinde de gerçekleştirilmiş ve hataların histogramı ve regresyon grafikleri elde edilmiştir. Analizlerden elde edilen R değerleri Çizelge 4.47'de verilmiştir. Çizelge 4.47'den görüldüğü gibi, gizli nöron sayısında artış, özellikle deneme setinde bir performans artışına sebep olmamıştır. Bu aşırı öğrenmenin bir kanıtı olabilir. Bu nedenle, EKG için yapılan hesaplamalarda gizli nöron sayısı 10 olarak alınmıştır. 10 gizli nörona sahip modelin EKG'yi etkin bir şekilde ve düşük hata ile modellediği görülmüştür.

Çizelge 4.47. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıkıtı: EKG)

YSA Mimari	Veri seti	Karasel ortalama hata	R
$9 \times 10 \times 1$	Eğitim	105.23	0.94
	Doğrulama	168.72	0.95
	Deneme	152.63	0.93
$9 \times 30 \times 1$	Eğitim	72.99	0.96
	Doğrulama	193.35	0.89
	Deneme	205.13	0.91
$9 \times 50 \times 1$	Eğitim	124.03	0.94
	Doğrulama	119.71	0.95
	Deneme	230.22	0.90

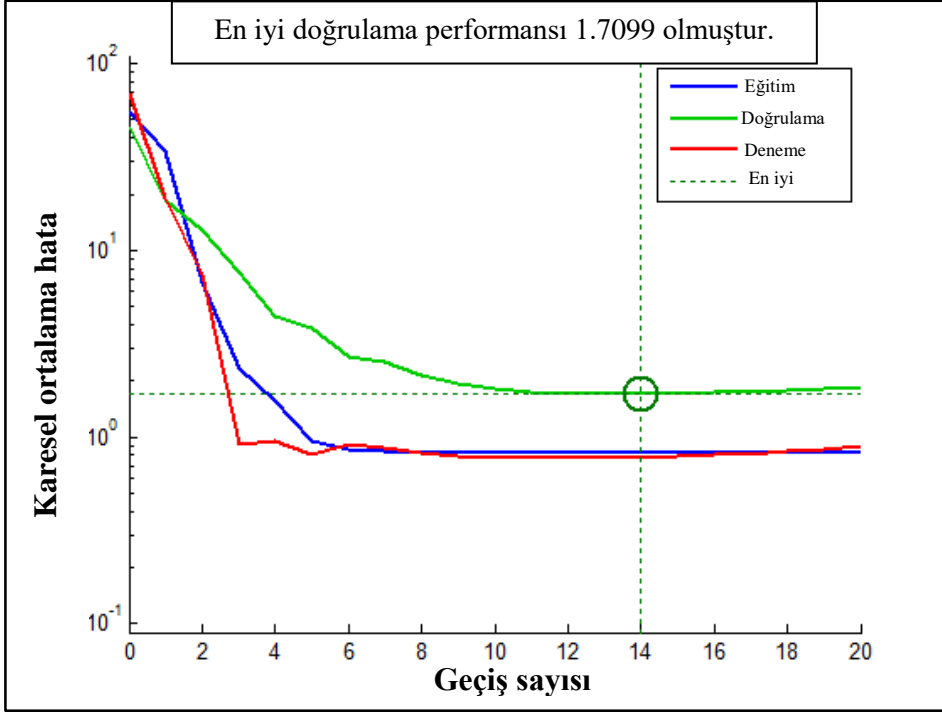
Benzer hesaplamalar, nihai viskozitenin belirlendiği deneylerden elde edilen veriler için de yapılmıştır. Aynı tipte bir YSA, nihai viskozite parametresi için kurulmuş ve EKG'ye benzer şekilde, eğitim, doğrulama ve deneme veri setleri %65, %15, %20 yüzdelerinde bölünmüştür. Şekil 4.27'de nihai viskozite parametresine ait YSA mimarisi görülmektedir. Yine EKG parametresinde olduğu gibi, normal dağılıma sahip olan, ortalamalarının eşit olduğu, varyanslarının eşit, ancak bilinmediği sıfır hipotezini kabul eden t testi ile veri setlerinin anlamlı bir şekilde bölünmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.28'de ise eğitim, doğrulama ve deneme setlerinin eğitim esnasında hesaplanan ortalama karesel hatanın iterasyon sayısı ile değişimi görülmektedir. 14. geçişte doğrulama veri setindeki karesel hata minimize edilmiştir ve eğitim sonlandırılmıştır. Hataların histogramı ise Şekil 4.29'da verilmiştir. Hataların sıfır çizgisi civarında yığıldığı YSA modelinin nihai viskozite tahmininde başarılı olduğunu göstermektedir.

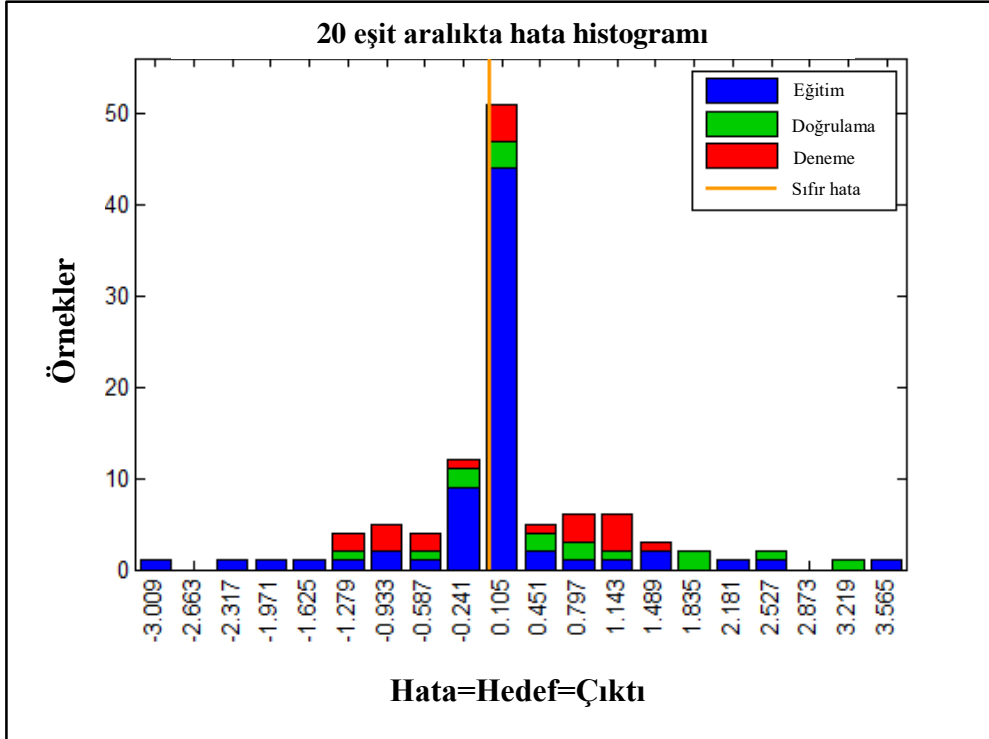


Şekil 4.27. Nihai viskozite'nin elde edilmesi için oluşturulan örnek sinir ağı mimarisi

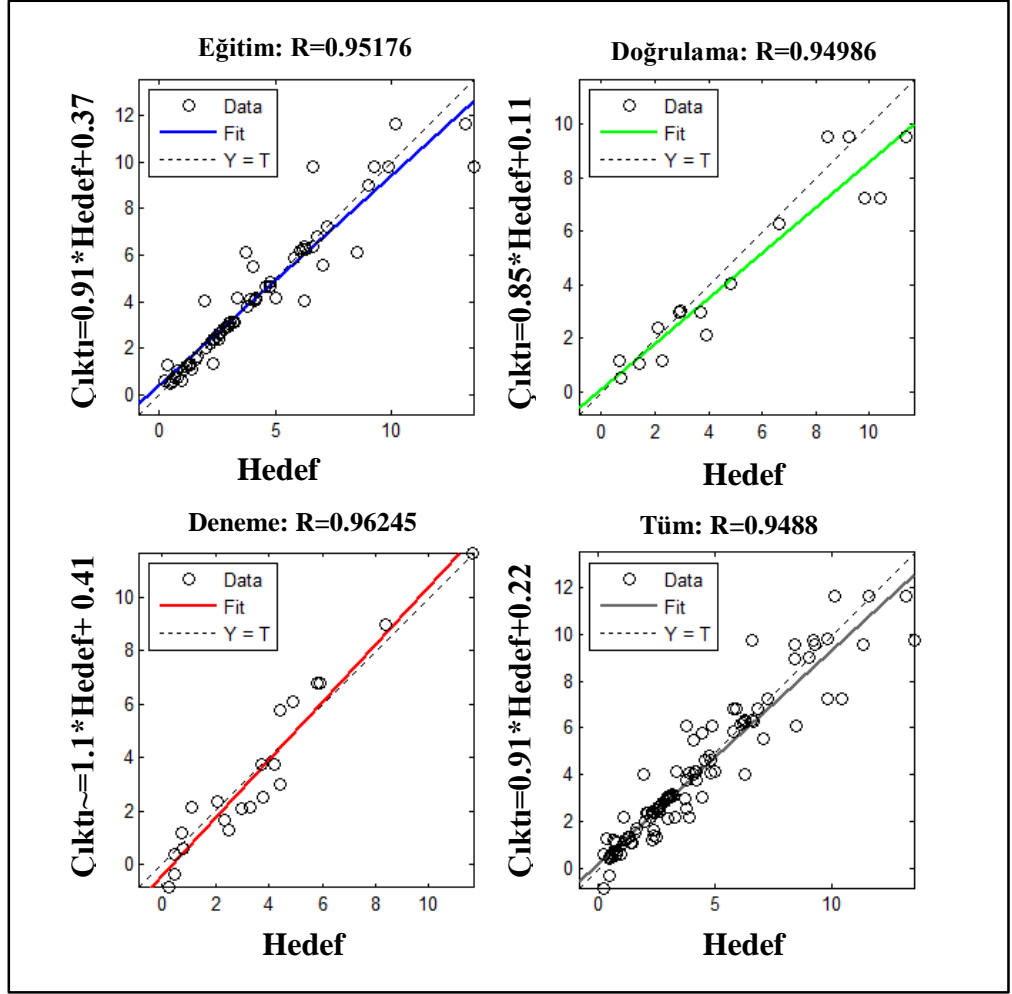
Eğitim, doğrulama, deneme veri setlerinde ve veri setinin tamamında deneysel değerler ile YSA çıktıları arasındaki saçılım grafikleri (Şekil 4.30) incelendiğinde, bu ilişkileri açıklayan regresyon katsayılarının 0.95, 0.05, 0.96 ve 0.95 olduğu görülmektedir. Nihai viskozite parametresinde 10 gizli nörona sahip YSA, EKG veri setine göre daha büyük başarı sağlamıştır. Dolayısı ile malzeme özelliklerini ve miktarlarını içeren 9 parametrelili girdi seti, hem EKG'nin hem de nihai viskozitenin YSA yöntemi ile tahmininde başarılı olduğu kanısına varılmıştır.



Şekil 4.28. Nihai viskozite tahmini için kurulan $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme aşamalarında elde edilen ortalama karesel hata değerleri



Şekil 4.29. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında elde edilen hataların histogramı (Nihai viskozite parametresi)



Şekil 4.30. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde gerçek değerler ile YSA çıktıları arasındaki saçılım grafikleri (Nihai viskozite)

Benzer işlemler $9 \times 30 \times 1$ ve $9 \times 50 \times 1$ mimarilerinde de gerçekleştirilmiş ve hataların histogramı ve regresyon grafikleri elde edilmiştir. Analizlerden elde edilen R değerleri Çizelge 4.48'de verilmiştir. Çizelge 4.48'de görüldüğü gibi, gizli nöron sayısının 10'dan 50'ye çıkarılması eğitim serisinde çıktı/gerçek değer arasındaki ilişkiyi karakterize eden korelasyon katsayısında artışlara sebep olsa da, aynı şeyleri doğrulama ve deneme veri setleri için söylememiz mümkün olmamaktadır. Gizli nöron sayısındaki artışla azalan korelasyon katsayısı ve artan ortalama karesel hata değerleri, $9 \times 10 \times 1$ 'lik mimarinin en iyisi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.48. $9 \times 10 \times 1$ sinir ağında eğitim/doğrulama/deneme veri setlerinde ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıktı: nihai viskozite)

YSA Mimari	Veri seti	Karasel ortalama hata	R
$9 \times 10 \times 1$	Eğitim	0.825	0.95
	Doğrulama	1.709	0.95
	Deneme	0.782	0.96
$9 \times 30 \times 1$	Eğitim	0.765	0.95
	Doğrulama	2.071	0.90
	Deneme	2.957	0.93
$9 \times 50 \times 1$	Eğitim	0.626	0.97
	Doğrulama	2.458	0.90
	Deneme	2.423	0.87

4.1.4.4. Eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerlerini etkileyen baskın parametrelerin elde edilmesi-YSA ile duyarlılık analizleri

Duyarlılık analizleri herhangi bir fiziksel sistemin çıktılarının girdilerindeki değişimlere verdiği tepkilerin incelenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Burada, girdi verilerinin ayrı ayrı çıkarılarak eksiltilmiş girdi veritabanı ile sistem performansının tekrar test edilmesi duyarlılığın tespit edilmesinde sıkça tercih edilmektedir.

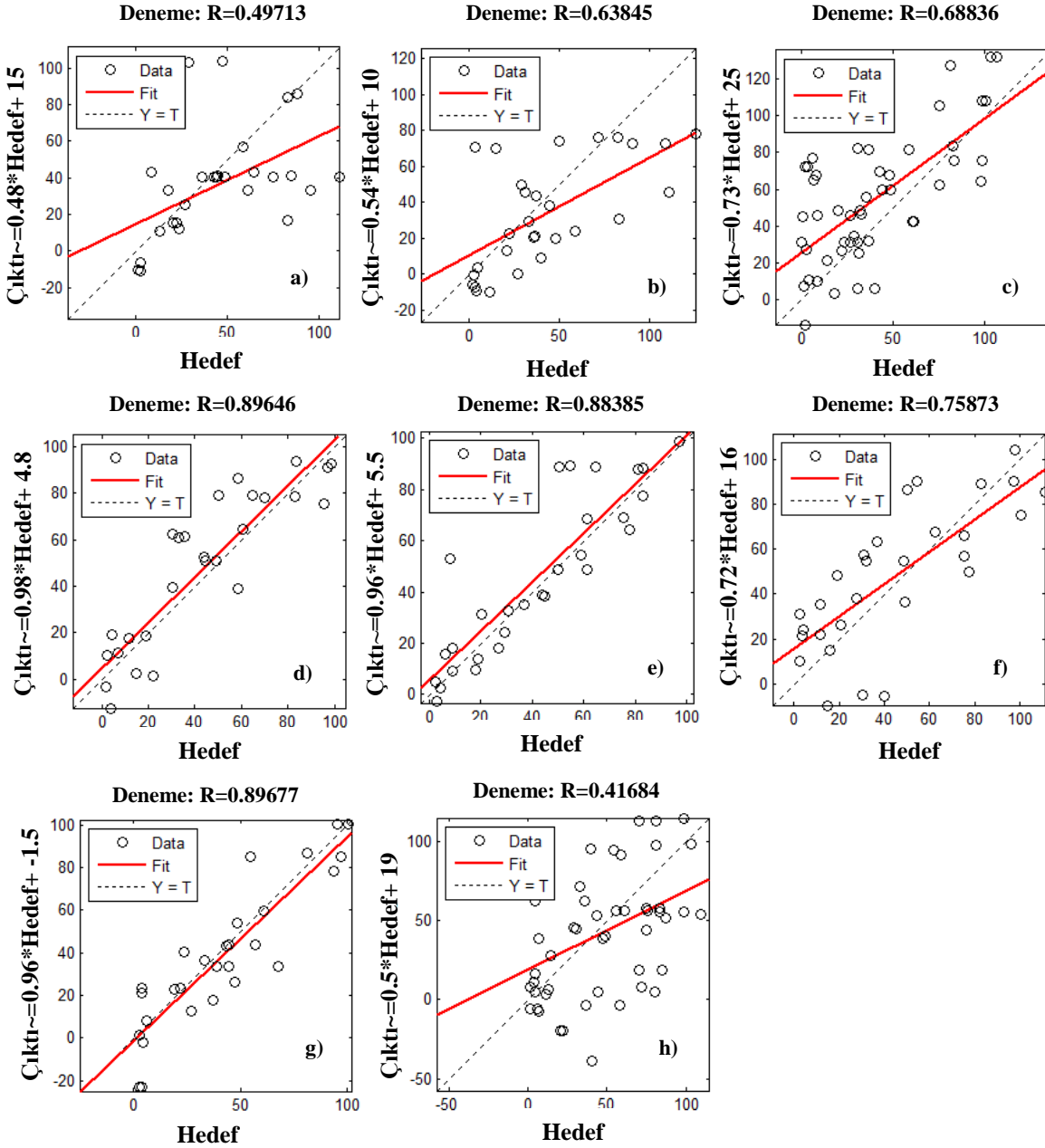
Bu çalışmada duyarlılık analizleri kurulan YSA üzerinde yapılmıştır. Tüm girdi parametreleri ile eğitilen çok katmanlı YSA'da, girdilerden birinin ağırlığı sıfırlanarak sonuçlara etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, korelasyon katsayısı ve ortalama karesel hata cinsinden değerlendirilmiştir. Ağırlıkların sıfırlanması ile çıktıları en çok etkileyen parametrelere ait saçılım grafikleri de aşağıda tek tek verilmiştir.

Çizelge 4.49'da EKG'nin parametresinin girdi parametreleri birer birer çıkarıldığında elde edilen model performansları görülmektedir. Çizelge 4.49 ve Şekil 4.31'den çıkarılan sonuç, su azaltıcı katkı miktarı, su miktarı, çimento inceliği, çimento C_3A ve eşdeğer alkali miktarının EKG'yi en çok etkileyen parametreler olduğudur. Katkı kullanım miktarı, karışımın su içeriği, çimento inceliği, çimento C_3A ve eşdeğer alkali miktarı parametrelerinin çıkarılması ile ortalama karesel hata değeri 1556.26, 988.27, 865.06, 500.11 ve 491.34 gibi görece olarak yüksek değerlere erişmiştir. Analizler, çimento C_4AF , C_3S , C_2S parametrelerinin sonuçlara etkisinin kısıtlı olduğunu göstermiştir. YSA çıktıları ile hedefler arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları incelendiğinde,

yukarıda belirtilen en etkin beş parametre (katkı kullanım miktarı, karışımın su içeriği, çimento inceliği, çimento C₃A ve eşdeğer alkali miktarı) etkisizleştirildiğinde, R değerinin 0.42, 0.50, 0.64, 0.76 ve 0.71 olarak elde edildiği görülmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi, bu beş parametre EKG'yi en fazla etkileyen parametrelerdir.

Çizelge 4.49. 9×10×1 sinir ağında deneme veri setlerinde ihmal edilen parametreler ve ortaya çıkan ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıkıtı: EKG)

9x10x1 YSA mimarisinde etkisizleştirilen parametre	Karasel ortalama hata	R
Karışımın su içeriği	988.27	0.50
Çimento inceliği	865.06	0.64
Eşdeğer alkali miktarı	491.34	0.71
C ₄ AF	247.46	0.89
C ₃ S	223.16	0.88
C ₃ A	500.11	0.76
C ₂ S	243.58	0.90
Katkı kullanım miktarı	1556.26	0.42



Şekil 4.31. EKG parametresinin tahmini için oluşturulan YSA'da girdi uzayında devre dışı bırakılan parametreler: a) Su miktarı b) Çimento inceliği c) Eşdeğer alkali miktarı d) C₄AF e) C₃S f) C₃A g) C₂S h) Katkı miktarı

Çizelge 4.50'de nihai viskozite parametresini etkileyen faktörler sistemden birer birer etkisizleştirildiğinde ortaya çıkan ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri görülmektedir. Çizelge 4.50 ve Şekil 4.32'den gözlenebileceği üzere, nihai viskozite parametresini en çok etkileyen parametrelerin karışımın su içeriği, çimento C₃A miktarı, katkı kullanım miktarı, çimento inceliği ve eşdeğer alkali miktarı olduğu görülmektedir. Bu parametreler etkisizleştirildiğinde elde edilen R değerleri 0.53, 0.61, 0.74, 0.78 ve 0.80 olmaktadır. Aynı parametrelerin

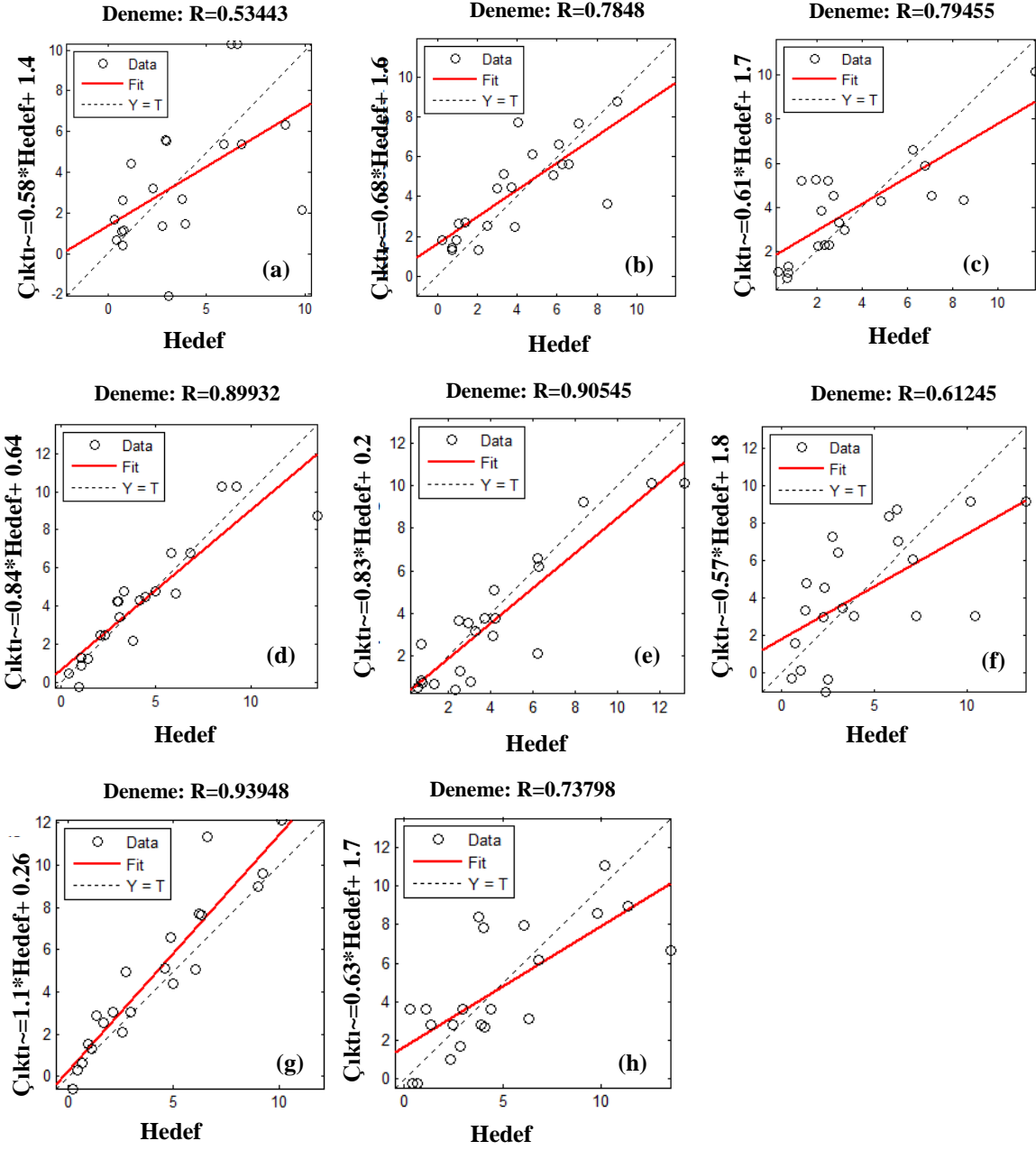
etkisizleştirilmesi ile ortalama karesel hata değerleri 7.936, 8.614, 6.34, 2.757 ve 3.214 değerlerine çıkmıştır. Nihai viskoziteyi etkileyen parametreler EKG'yi etkileyen parametreler ile aynı olsa da, bu parametreden C₃A içeriği nihai viskoziteye daha fazla etkisi olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.50. 9×10×1 sinir ağında deneme veri setlerinde ihmal edilen parametreler ve ortaya çıkan ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı değerleri (çıktı: nihai viskozite)

9x10x1 YSA mimarisinde etkisizleştirilen parametre	Karasel ortalama hata	R
Karışımın su içeriği	7.936	0.53
Çimento inceliği	2.757	0.78
Eşdeğer alkali miktarı	3.214	0.80
C ₄ AF	1.914	0.90
C ₃ S	2.307	0.91
C ₃ A	8.614	0.61
C ₂ S	2.170	0.94
Katkı kullanım miktarı	6.34	0.74

Burada yapılan analiz, bir eğitim ile elde edilen YSA yapısında parametrelerin teker teker etkisizleştirilmesi ile çıktılardaki değişimin ortaya konulması olarak özetlenebilir. Daha büyük veri setlerinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. Burada yapılan analizlerde, veri setinin bölünmesi istatistiksel bir metodla yapılmış olup, eğitim/doğrulama/deneme veri setlerine bölünmüş verilerin istatistiklerinin anlamlı derecede birbirinden farklı olmaması küçük bir bilgisayar programı yazılarak sağlanmış olsa da, daha değişik koşullarda hazırlanan veri setlerinin bu sete eklenmesi ile daha farklı parametreler elde edilebileceği de altı çizilmesi gereken önemli bir husustur.

Sonuçta, su azaltıcı katkı miktarı, karışım su içeriği, çimento inceliği, çimento C₃A ve eşdeğer alkali miktarının EKG'yi sırasıyla en çok etkileyen parametreler olduğu, nihai viskoziteyi en çok etkileyen parametreler ise sırasıyla, karışımın su içeriği, çimento C₃A içeriği, katkı kullanım miktarı, çimento inceliği ve eşdeğer alkali miktarı olarak belirlenmiştir. Benzer sonuçlar Gołaszewski (2012) tarafından da elde edilmiştir.



Şekil 4.32. Nihai viskozite parametresinin tahmini için oluşturulan YSA'da girdi uzayında devre dışı bırakılan parametreler: a) Su miktarı b) Çimento inceliği c) Eşdeğer alkali miktarı d) C₄AF e) C₃S f) C₃A g) C₂S h) Katkı miktarı

4.2. Çimento-Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörlerin Detaylı İncelenmesi

Bu bölümde, daha önce belirlenen çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler daha detaylı olarak çimentolu sistemlerde araştırılmıştır. Bu amaçla, çimento inceliği, çimento C₃A ve alkali eşdeğer oranının çimento hamuru, harç ve beton karışımlarının taze hal ve reolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bunlara ilaveten, literatüre dayanarak çimento-katkı uyumunu etkileyen çimentodaki alçı türünün etkisi de incelenmiştir. Ayrıca, su azaltıcı katkı polimer yapısının yarattığı etki de KYB karışımlarda araştırılmıştır. Hazırlanan karışımların taze hal özeliği, reolojik parametreleri ve basınç dayanımı incelenmiştir.

4.2.1. Çimento inceliğinin çimento-katkı uyumuna etkisi

Tez çalışmasının bu başlığında, çimento-süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunu etkileyen parametrelerden biri olan çimento inceliğinin hamur ve harç karışımlarının taze hal, reolojik özellikleri ve basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, iki farklı C₃A oranına sahip CEM I 42.5R portland çimentosu kullanılmıştır. Bilyeli öğütücü yardımıyla söz konusu çimentolar 4 farklı Blaine inceliğine getirilmiştir. Üretilen çimentolar ile farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan hamur karışımlarında priz süresi, Marsh hunisi akış süresi, EKG ve nihai viskozite gibi reolojik özellikler elde edilmiştir. Harç karışımlarında ise yayılma, zamana bağlı yayılma kaybı, katkı ihtiyacı, reoloji deneyleri ve 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Hazırlanan beton karışımlarının hava içeriği, taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlığı, çökme, yayılma ve zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi ile 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir.

Sonuçta, süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımlarda çimento inceliğinin artışıyla, çimento taneciklerinin toplam yüzey alanı arttığından karışımların su ihtiyacının arttığı, buna bağlı olarak karışımların taze hal ve reolojik özelliklerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan karışımlarda ise bu durumun tersi gözlemlenmiştir. Çimento inceliğinin artışıyla çimento taneleri üzerinde süperakışkanlaştırıcı katkının emilimi ve katkının etkinliğinin arttığı bu olumlu etkiyi yarattığı düşünülmektedir. Ayrıca, çimento inceliğinin artışıyla basınç dayanım değerleri artmıştır. İnceliği ve C₃A

içeriği yüksek olan NÇ, SDC'ye göre daha yüksek dayanım göstermiştir. Dayanımlar arasındaki fark zamanla azalmıştır. Ancak, 28 günlük inceleme süresinde bu farkın sıfırlanmadığı anlaşılmıştır.

4.2.1.1. Denev sonuçları ve değerdendirilmesi

Taze hal özellikleri

Çeşitli incelikte olan çimentolar, %0, %0.1 ve %0.2 olmak üzere üç farklı süperakışkanlaştırıcı katkı içeriğinde hamur karışımları üretiminde kullanılmıştır. Karışımların priz süreleri Çizelge 4.51 ve 4.52'de verilmiştir.

Çizelge 4.51. NÇ'nin priz süreleri

NÇ Blaine inceliği (cm ² /g)	%0 Katkı		%0.1 Katkı		%0.2 Katkı	
	Priz başlangıcı (dk.)	Priz bitişi (dk.)	Priz başlangıcı (dk.)	Priz bitişi (dk.)	Priz başlangıcı (dk.)	Priz bitişi (dk.)
3223	200	245	235	340	260	365
3835	190	230	210	315	255	355
4321	145	180	180	290	225	320
4580	125	150	165	275	210	295

Çizelge 4.52. SDC'nin priz süreleri

SDÇ Blaine inceliği (cm ² /g)	%0 Katkı		%0.1 Katkı		%0.2 Katkı	
	Priz başlangıcı (dk.)	Priz bitişi (dk.)	Priz başlangıcı (dk.)	Priz bitişi (dk.)	Priz başlangıcı (dk.)	Priz bitişi (dk.)
2810	115	235	178	248	238	348
3180	122	225	173	248	215	320
3540	129	156	130	200	137	242
4230	91	139	100	160	95	170

Her iki çimento tipinde de süperakışkanlaştırıcı oranından bağımsız olarak çimento inceliğinin artışıyla priz başlangıç ve bitiş süresi kısalmıştır. Katkısız durumda NÇ'nin inceliğinin artışıyla priz başlangıç süresinin kısılması SDC'ye kıyasla daha belirgin olmuştur. Bu durum NÇ'nin C₃A içeriğinin SDC'ye kıyasla daha fazla olduğundan kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi çimento inceliğinin artmasıyla C₃A bileşeni daha reaktif davranarak daha fazla etrenjit oluşumuna

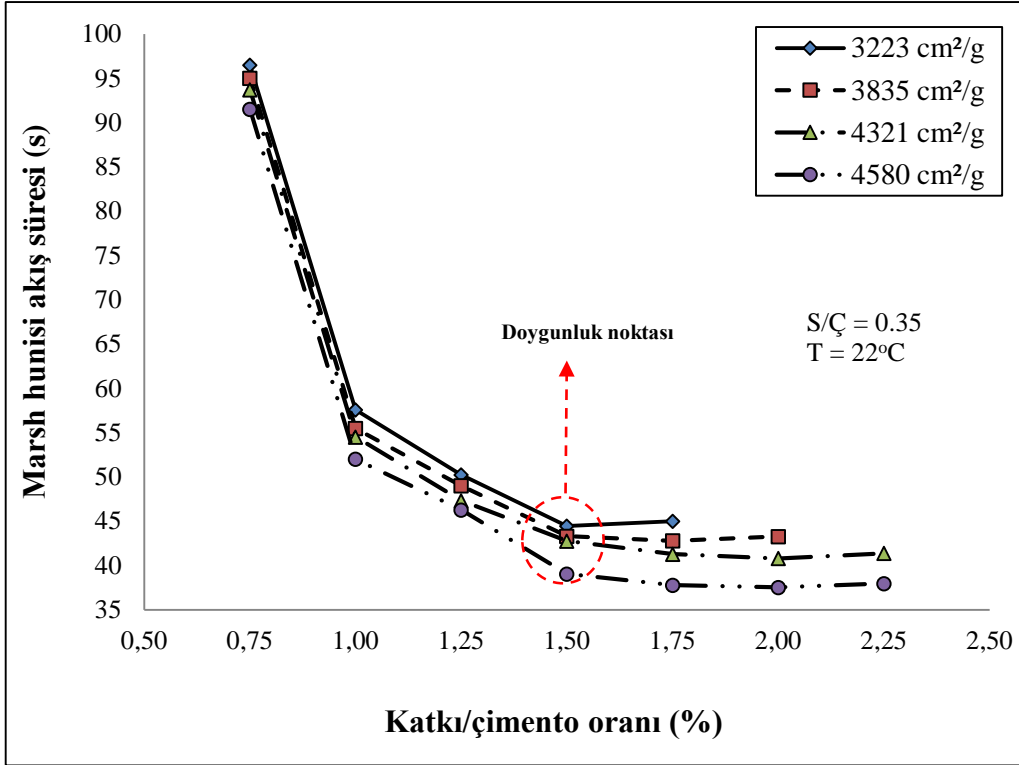
neden olur (Mehta and Monteiro, 2010). Ancak, süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile bu durum tersine dönmüştür. Şöyle ki, çimento inceliğinin ve süperakışkanlaştırıcı katkı oranının artışıyla SDC'nin priz sürelerindeki kısalma daha belirgin hale gelmiştir. Buradan çimentodaki C₃A miktarının çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkı arasındaki etkileşimde rolü olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, süperakışkanlaştırıcı dozajının artışıyla çimentoların priz süreleri artmıştır. Bu durum süperakışkanlaştırıcı katkının geciktirici etkisinden kaynaklanmaktadır. Marsh hunisi akış süresi deneyi sonuçları Çizelge 4.53 ve 4.54 ile Şekil 4.33 ve 4.34'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.53. NÇ içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri

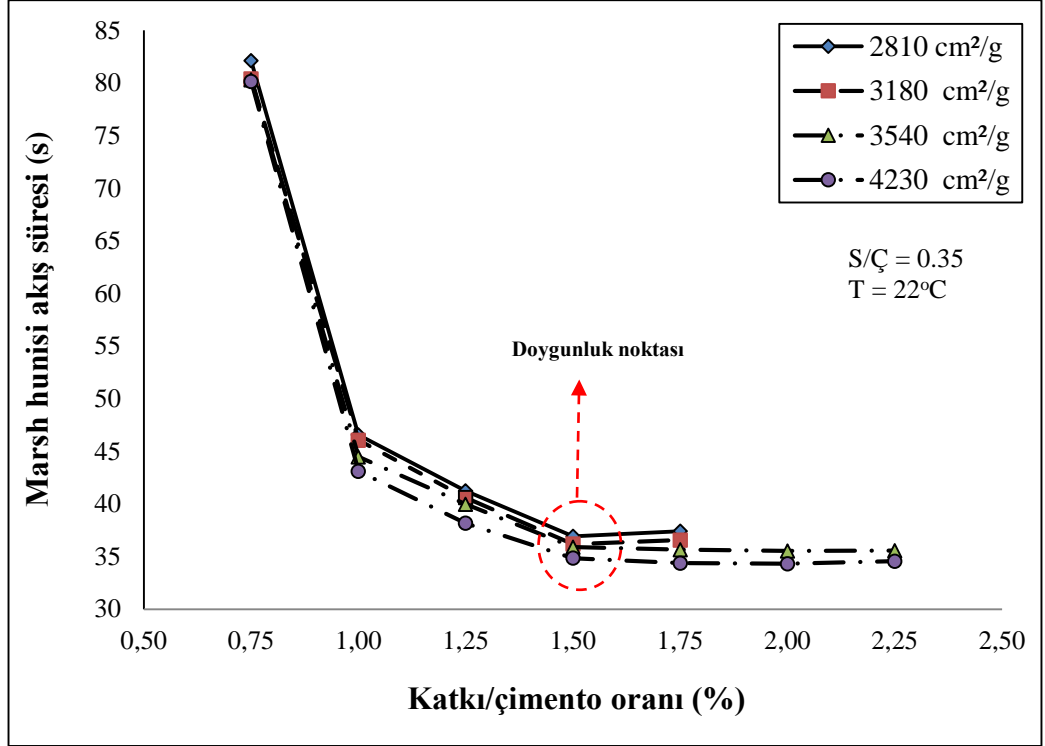
		NÇ - 3223 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		96,48	57,57	50,25	44,47	45,00	-	-
		NÇ - 3835 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		95,02	55,47	49,01	43,31	42,80	43,28	-
		NÇ - 4321 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		93,70	54,51	47,32	42,78	41,29	40,81	41,38
		NÇ - 4580 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		91,50	52,00	46,28	39,06	37,78	37,54	37,97

Çizelge 4.54. SDC içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri

		SDÇ - 2810 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		82,13	46,56	41,25	36,93	37,42	-	-
		SDÇ - 3180 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		80,40	46,06	40,60	36,19	36,56	-	-
		SDÇ - 3540 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		80,31	44,47	39,97	35,90	35,66	35,53	35,56
		SDÇ - 4230 cm ² /g						
Katkı (%)		0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
Akış süresi (s)		80,14	43,11	38,16	34,84	34,38	34,31	34,56



Şekil 4.33. NÇ içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri



Şekil 4.34. SDÇ içeren hamurların Marsh hunisi akış süreleri

Beklenildiği gibi süperakışkanlaştırıcı oranı arttıkça her iki çimentoda da Marsh hunisi akış süreleri kısalmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi belli bir süperakışkanlaştırıcı içeriğinin ötesinde Marsh hunisi akış sürelerinde çok fazla değişiklik gözlemlenmemiştir. Literatüre göre bu noktaya doygunluk noktası denir. Doygunluk noktası katkıının etkinliği ve karışımın maliyeti bakımından önemlidir. Sonuçlardan görüldüğü gibi her iki çimento ile hazırlanan hamur karışımlarında doygunluk noktası çimento/süperakışkanlaştırıcı oranının %1.5'inde meydana gelmiştir. Ancak, akış süreleri SDÇ içeren karışımlarda daha kısa olmuştur.

Her iki çimento ile hazırlanan hamur karışımlarında da çimento inceliğinin artışıyla Marsh hunisi akış süreleri kısalmıştır. Bu kısalmının, daha önce de söylendiği gibi süperakışkanlaştırıcı katkıının ince taneler üzerinde emiliminin daha fazla olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuçlardan görüldüğü gibi süperakışkanlaştırıcı/çimento oranının artışıyla belli bir orandan sonra Marsh hunisi akış süresi çok az miktarda artmıştır. Bu artış, karışımların ayrışmaya karşı direncinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, mini-yayılma deneyinde karışımın yayılma tablasına yapışmasından ve hamurun sudan ayrışmasından

anlaşılmasıdır. Öte yandan çimento inceliği arttıkça her iki çimentonun da ayrılmaya karşı direnci artmıştır.

Mini-yayılma deneyi sonuçlarını daha kolay yorumlamak için karışımlar süperakışkanlaştırıcı içeren ve içermeyen olarak ayrı ayrı incelenmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen NÇ ve SDC çamur karışımlarında elde edilen başlangıç mini-yayılma ve her 15 dakikada bir ölçülen mini-yayılma kaybı değerleri sırasıyla Çizelge 4.55 ve 4.56 ve Şekil 4.35, 4.36'de verilmiştir.

Çizelge 4.55. Katkı içermeyen NÇ karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı

Blaine inceliği (cm ² /g)	Yayılma değerleri (mm)			
	3223	3835	4321	4580
Başlangıç	65	60	58	53
15 dk.	64	58	55	50
30 dk.	63	57	54	47
45 dk.	63	57	52	44
60 dk.	63	55	50	40

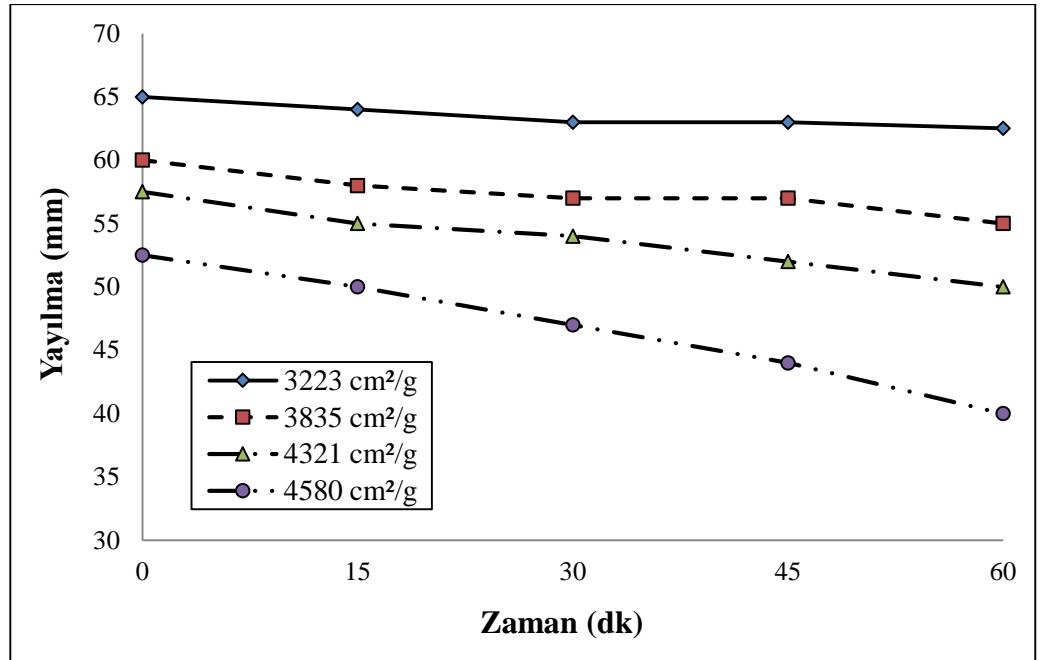
Çizelge 4.56. Katkı içermeyen SDC karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı

Blaine inceliği (cm ² /g)	Yayılma değerleri (mm)			
	2810	3180	3540	4230
Başlangıç	80	75	75	67
15 dk.	79	74	73	60
30 dk.	79	73	71	58
45 dk.	79	73	71	57
60 dk.	78	72	70	55

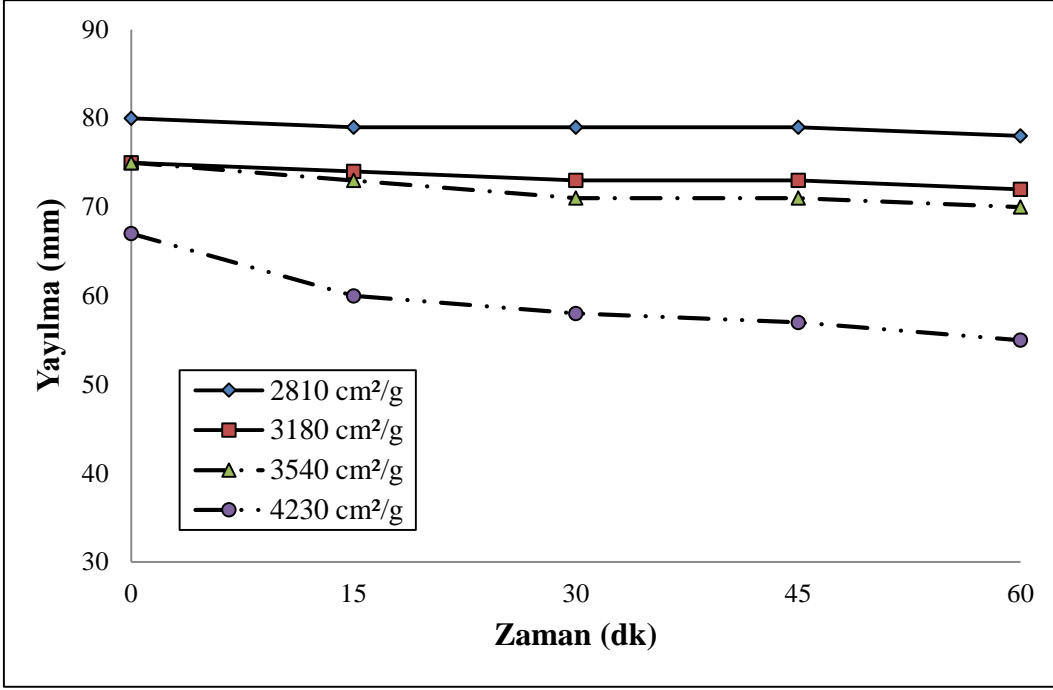
Çizelge 4.55'ten anlaşıldığı gibi, süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen NÇ ile hazırlanan çimento hamuru karışımlarında, çimento inceliğinin değişimiyle, karışımların mini-yayılma değerleri çok ciddi mertebelerde değişmemiştir. Ancak, çimento inceliği 3223 cm²/g'dan 4580 cm²/g'a kadar arttığında karışımların yayılması %23 oranında bir azalma göstermiştir. İncelik artışıyla çimento yüzey alanının artmasına bağlı olarak karışımın su ihtiyacı arttığı için mini-yayılma değerleri azalmıştır. Görüldüğü gibi inceliği 3223, 3835, 4321, 4580 cm²/g olan çimentoları içeren karışımların 60 dakikalık mini-yayılma kayıp oranları sırasıyla %4, %9, %14, %31 olmuştur. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi çimento inceliğinin

artışıyla süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen hamur karışımlarının mini-yayılma kayıp oranları artmıştır. Bilindiği gibi çimento inceliğinin artışıyla, çimento hidrasyonu hızı artmaktadır. Daha fazla hidrasyon ürününün oluşması ise karışımın yayılma yeteneğinin azalmasına yol açmaktadır.

Çizelge 4.56'dan anlaşıldığı gibi süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen SDC ile üretilen hamur karışımlarının mini-yayılması çimento inceliğinin artışıyla maksimum %18'lik bir azalma göstermiştir. Bir saatlik mini-yayılma değerleri dikkate alındığında SDC'nin inceliği 2810 cm²/g ile 4230 cm²/g aralığında arttığında karışımların mini-yayılma kayıpları sırasıyla %2.5, %4, %7, %22 olmuştur.



Şekil 4.35. Katkı içermeyen NÇ karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı



Şekil 4.36. Katkı içermeyen SDC karışımının mini-yayılma ve yayılma kaybı

Her iki çimentonun 1 saatlik mini-yayılma kayıpları kıyaslandığında NÇ'nin 1 saatlik mini-yayılma kaybı SDC'ye kıyasla daha fazla olmuştur. Bu olay SDC'nin daha düşük miktarda C₃A içermesinden ve ilk 1 saatlik periyotta NÇ'ye göre daha az kalsiyum sülfat alüminat ürünleri oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

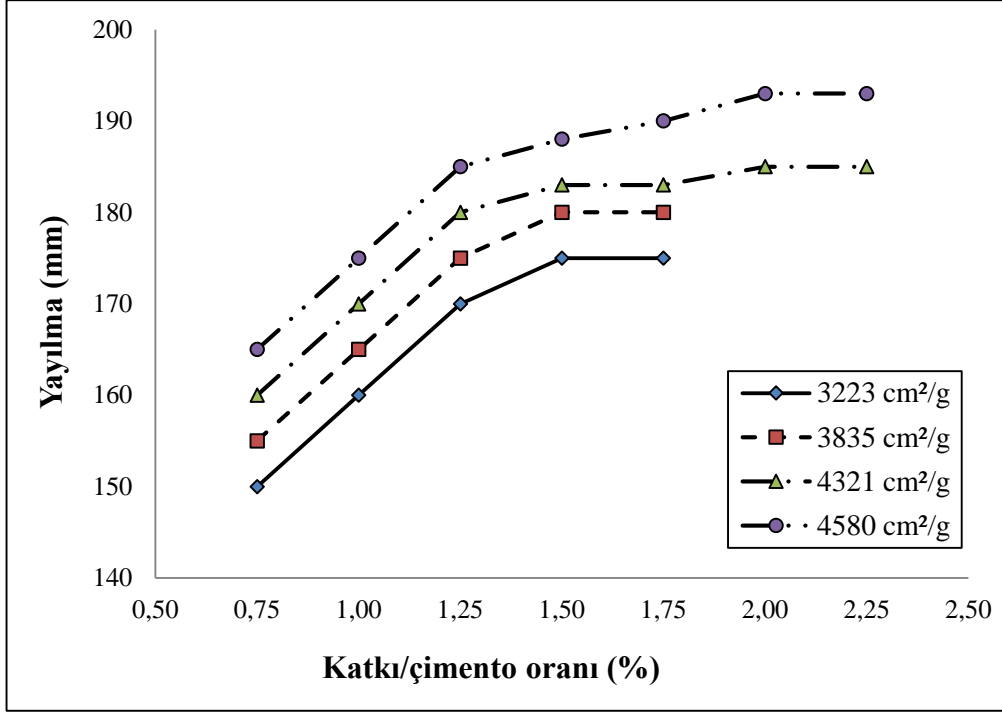
Süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımların mini-yayılma deneyi sonuçları Çizelge 4.57 ve 4.58, Şekil 4.37 ve 4.38'de verilmiştir.

Çizelge 4.57. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren NÇ hamurlarının mini-yayılması (mm)

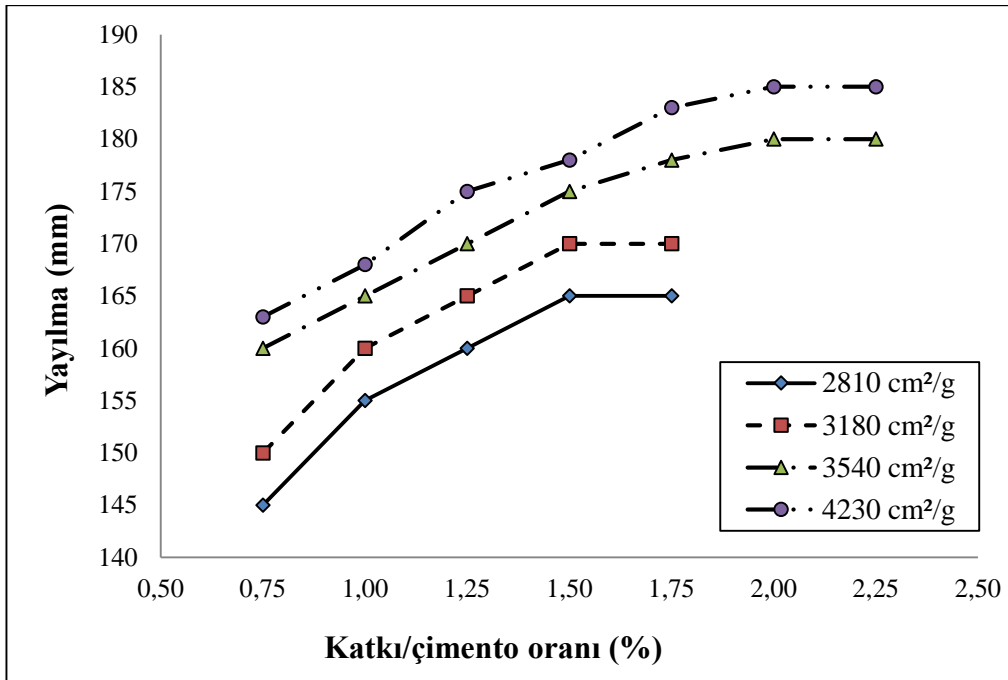
		NÇ - 3223 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		150	160	170	175	175	-	-
		NÇ - 3835 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		155	165	175	180	180	-	-
		NÇ - 4321 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		160	170	180	183	183	185	185
		NÇ - 4580 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		165	175	185	188	190	193	193

Çizelge 4.58. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren SDCÇ hamurlarının mini-yayılması (mm)

		SDCÇ - 2810 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		145	155	160	165	165	-	-
		SDCÇ - 3180 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		150	160	165	170	170	-	-
		SDCÇ - 3540 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		160	165	170	175	178	180	180
		SDCÇ - 4230 cm²/g						
Katkı (%)		0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
Yayılma (mm)		163	168	175	178	183	185	185



Şekil 4.37. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren NÇ hamurlarının mini-yayılması (mm)



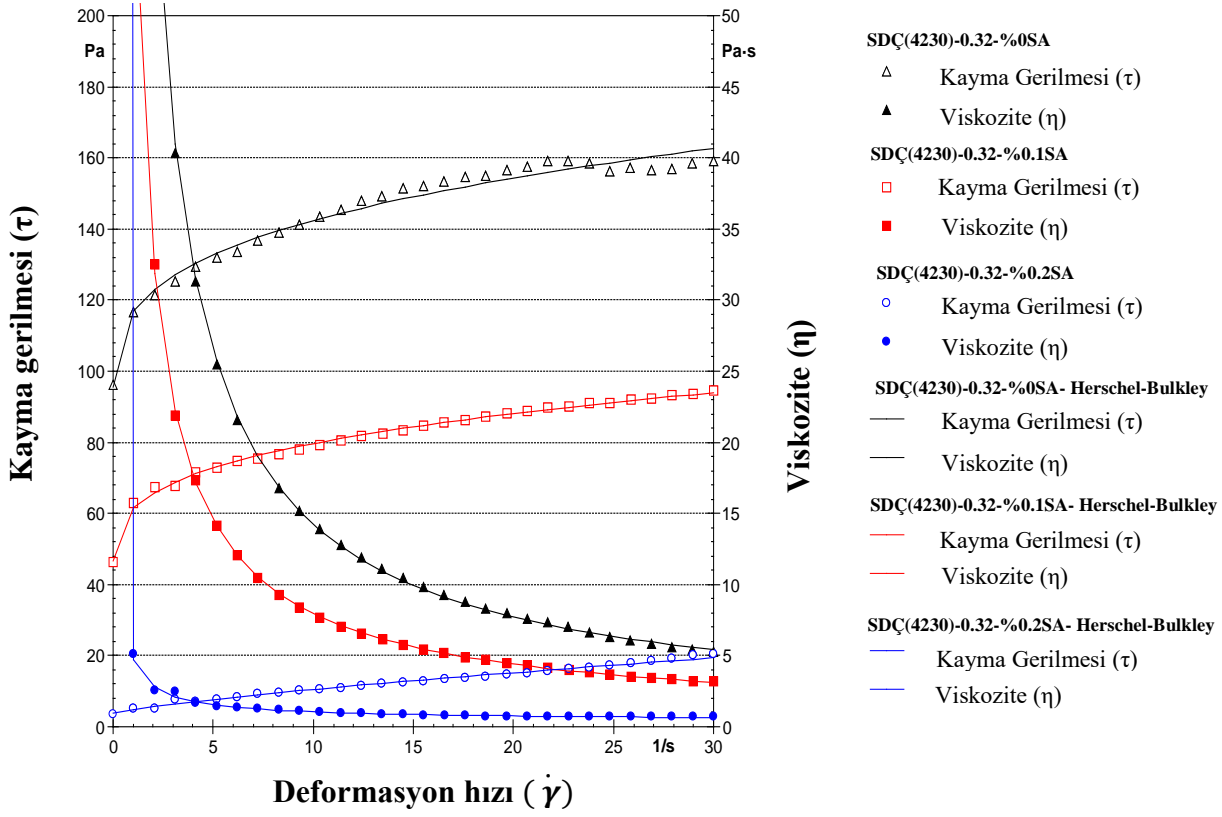
Şekil 4.38. Farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı içeren SDC hamurlarının mini-yayılması (mm)

Hem NÇ hem de SDC ile üretilen hamur karışımlarının mini-yayıma değerleri çimento inceliğinin artışıyla artış göstermiştir. Literatüre göre, genelde çimento inceliğinin artışıyla çimento hamuru mini-yayıma değerinin azalması beklenilmektedir. Ancak söz konusu etki süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımlarda geçerlidir. Yeterli oranda süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlarda çimento inceliğinin artışıyla süperakışkanlaştırıcının çimento taneleri üzerine emilimi dolayısıyla katkının etkinliği artmıştır.

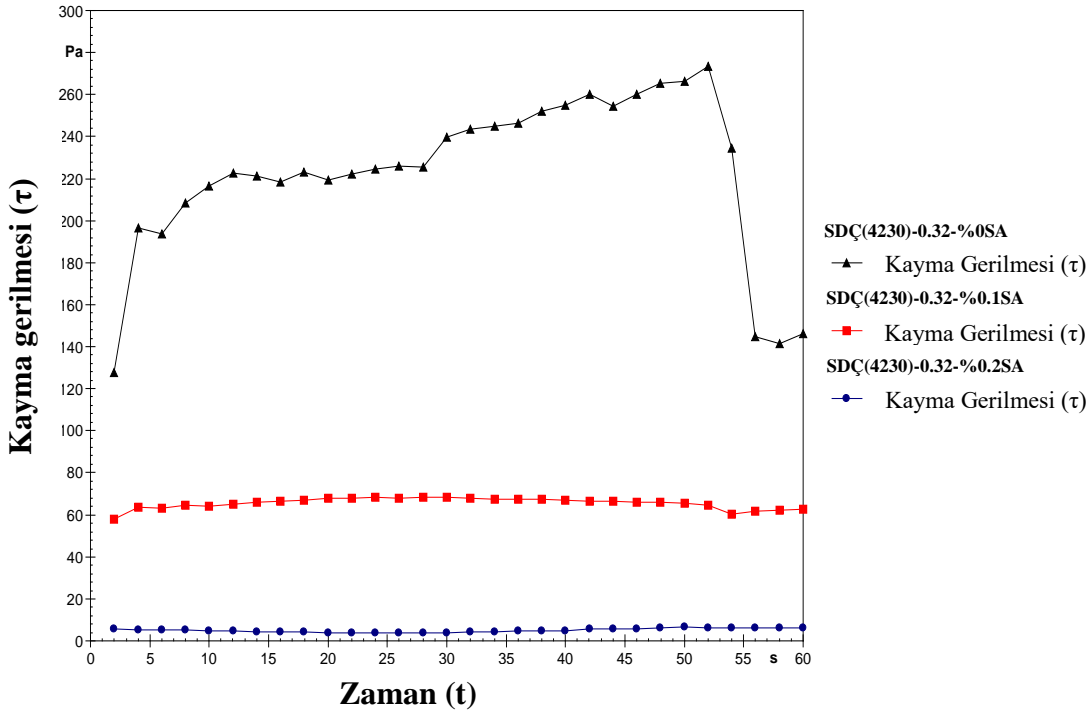
Daha önce anlatıldığı gibi dinamik EKG ve viskozite değerlerinin hesaplanmasında 4. periyottan alınan değerler kullanılmıştır. 4. periyottaki tork değerleri Rheoplus programının yardımıyla kayma gerilmesine, dönme hızı ise deformasyon hızına dönüşürülmüştür. Daha sonra Rheoplus programında var olan Herschel–Bulkley modeli uygulanarak her karışım için kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri çizilmiştir. Örnek olarak 4230 cm²/g inceliğe sahip SDC ile hazırlanan %0, %0.1 ve %0.2 katkı içeriğine sahip hamur karışımının kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiği Şekil 4.39’da gösterilmiştir. Bu grafta, Herschel-Bulkley modeline göre çizilen eğrinin kayma gerilmesi eksenini kestiği nokta dinamik EKG olarak alınmıştır.

Şekilden de görüldüğü gibi karışımların viskozite değerleri zamanla değiştiğinden, plastik viskozite değil anlık viskozite söz konusudur. Ancak viskozite-deformasyon hızı grafiğinden de anlaşıldığı gibi belli bir deformasyon hızından (30 s⁻¹) sonra karışımların viskozite değeri yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Dolayısıyla, her 30 s⁻¹ deformasyon hızına karşılık olan viskozite değeri karışımların nihayi viskozitesi olarak kabul edilmiştir.

Statik EKG’nin bulunması için daha önce anlatıldığı gibi 1. periyottan alınan veriler kullanılmıştır. Belirtildiği gibi statik kayma gerilmesi örselenmemiş karışımın EKG’si olarak kabul edilmiştir. Bu değeri elde etmek için her karışımın için 1. periyottaki verilerine göre kayma gerilmesi-zaman grafiği çizilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen en yüksek kayma gerilmesi o karışım için statik EKG değeri olarak kaydedilmiştir. Örnek olarak, 4230 cm²/g inceliğe sahip SDC ile hazırlanan %0, %0.1 ve %0.2 katkı içerikli hamur karışımlarının kayma gerilmesi-zaman grafiği Şekil 4.40’da verilmiştir.



Şekil 4.39. 4230 cm^2/g inceliğinde SDC içeren hamur karışımının reolojik özellikleri (dinamik EKG ve viskozite)



Şekil 4.40. 4230 cm^2/g inceliğinde SDC içeren hamur karışımının reolojik özellikleri (statik EKG)

NÇ ve SDÇ ile 0.32 ve 0.35 S/Ç oranlarına sahip %0, %0.1, %0.2 oranlarında süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan 48 karışıma ait dinamik EKG, nihai viskozite ve statik EKG değerleri Çizelge 4.59 ve 4.60'da verilmiştir.

Çizelge 4.59. NÇ içeren hamurların reolojik özellikleri

Blaine inceliği (cm ² /g) S/Ç	Katkı oranı (%)	Dinamik EKG (Pa)	Nihai viskozite (Pa.s)	Statik EKG (Pa)
3223 0.32	0.0	69.46	5.26	124.82
	0.1	60.04	3.77	76.65
	0.2	48.00	3.50	68.34
3223 0.35	0.0	33.29	2.66	45.84
	0.1	29.20	2.02	37.03
	0.2	12.43	1.14	18.26
3835 0.32	0.0	79.23	5.86	129.35
	0.1	53.62	3.53	72.79
	0.2	15.37	1.77	31.52
3835 0.35	0.0	34.48	2.69	51.78
	0.1	22.26	1.76	30.32
	0.2	9.49	1.01	12.28
4321 0.32	0.0	96.43	5.92	130.41
	0.1	47.82	3.46	65.39
	0.2	14.24	1.65	24.31
4321 0.35	0.0	37.39	2.92	61.29
	0.1	14.61	1.46	21.39
	0.2	4.40	0.83	8.82
4580 0.32	0.0	97.30	6.03	150.19
	0.1	69.00	4.38	90.07
	0.2	15.02	1.69	24.80
4580 0.35	0.0	47.55	3.27	70.65
	0.1	29.91	2.11	39.73
	0.2	5.50	0.83	8.96

Çizelge 4.60. SDÇ içeren hamurların reolojik özellikleri

Blaine inceliği (cm ² /g) S/Ç	Katkı oranı (%)	Dinamik EKG (Pa)	Nihai viskozite (Pa.s)	Statik EKG (Pa)
2810 0.32	0.0	38.69	3.09	100.51
	0.1	24.84	1.89	39.13
	0.2	14.23	1.34	25.47
2810 0.35	0.0	20.85	1.82	61.05
	0.1	8.37	0.86	15.70
	0.2	6.66	0.75	12.32
3180 0.32	0.0	43.49	3.74	166.40
	0.1	15.04	1.43	26.46
	0.2	4.66	0.77	9.33
3180 0.35	0.0	21.48	2.06	68.62
	0.1	7.53	0.77	13.78
	0.2	2.23	0.45	4.68
3540 0.32	0.0	55.06	3.80	173.83
	0.1	14.10	1.31	19.56
	0.2	2.54	0.68	5.52
3540 0.35	0.0	28.09	2.20	79.98
	0.1	6.86	0.77	13.34
	0.2	0.19	0.33	0.78
4230 0.32	0.0	96.17	5.31	273.22
	0.1	46.83	3.13	68.30
	0.2	3.63	0.77	6.46
4230 0.35	0.0	48.05	3.28	122.32
	0.1	29.25	1.77	36.52
	0.2	1.74	0.43	1.70

Tüm karışımlarda süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla ve S/Ç oranının artışıyla dinamik EKG, nihai viskozite ve statik EKG değerleri azalma göstermiş, yani, karışımların işlenebilirlikleri belirgin bir şekilde artmıştır.

Katkısız durumda S/Ç oranından ve çimento tipinden bağımsız olarak çimento inceliğinin artışıyla dinamik EKG, nihai viskozite ve statik EKG değerleri artmıştır. Bu sonuç çimento inceliğinin artışıyla çimento hamurunun işlenebilirliğinin olumsuz etkilediğini göstermiştir. Çimento inceliğinin artışıyla çimento tanelerinin yüzey alanı, dolayısıyla belli bir işlenebilirlik için karışımın su ihtiyacı artmaktadır.

Bilindiği gibi çimento inceliğinin artışıyla süperakışkanlaştırıcı katkı daha ince taneler üzerine daha çok emilmektedir (Jolicoeur et al.,1994). 4580 cm²/g inceliğe sahip NÇ ve 4230 cm²/g inceliğe sahip SDÇ ile hazırlanan hamur karışımları, %0.1 süperakışkanlaştırıcı oranında en yüksek dinamik ve statik EKG değerlerine sahip olmuştur. Bunun aşırı yüzey alana sahip söz konusu çimentolarda katkı miktarının yetersiz kaldığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, süperakışkanlaştırıcı katkı oranı %0.1'den %0.2'ye arttırıldığı takdirde çimento inceliğinin artışıyla tüm reolojik özellikler her iki çimento tipinde de olumlu etkilenmiştir. Buradan, her iki çimentoyu içeren hamurlarda %0.2 süperakışkanlaştırıcı katkı oranının yeterli olduğu kanısına varılmıştır. Bunun üstündeki oranlarda karışımın ayrıştığı görülmüştür.

Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi süperakışkanlaştırıcı içermeyen tüm hamur karışımlarında statik EKG, dinamik EKG'nin çok üstünde bir değer almıştır. Süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile beraber statik ve dinamik EKG değerleri arasındaki fark azalmıştır. Bu olay çimento hamurunun tiksotropik davranışının göstergesidir.

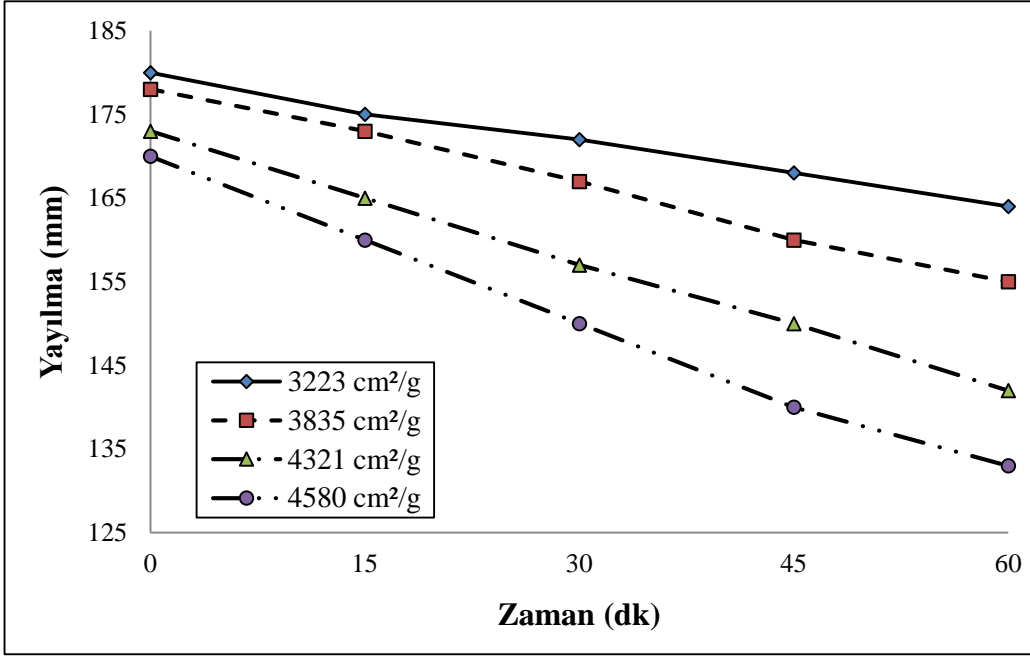
Dörder farklı incelikte NÇ ve SDÇ içeren fakat süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen 8 adet harç karışımının yayılması ve yayılma kaybı incelenmiştir. Karışımlar ASTM C109 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" standardına göre hazırlanmıştır. Karışımların zamana bağlı yayılma kayıpları 60 dakika boyunca her 15 dakikada bir ölçülmüştür. Deney sonuçları Çizelge 4.61 ve 4.62 ile Şekil 4.41 ve 4.42'da verilmiştir.

Çizelge 4.61. NÇ içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm)

	Başlangıç	15 dk.	30 dk.	45 dk.	60 dk.
3223 cm ² /g	180	175	172	168	164
3835 cm ² /g	178	173	167	160	155
4321 cm ² /g	173	165	157	150	142
4580 cm ² /g	170	160	150	140	133

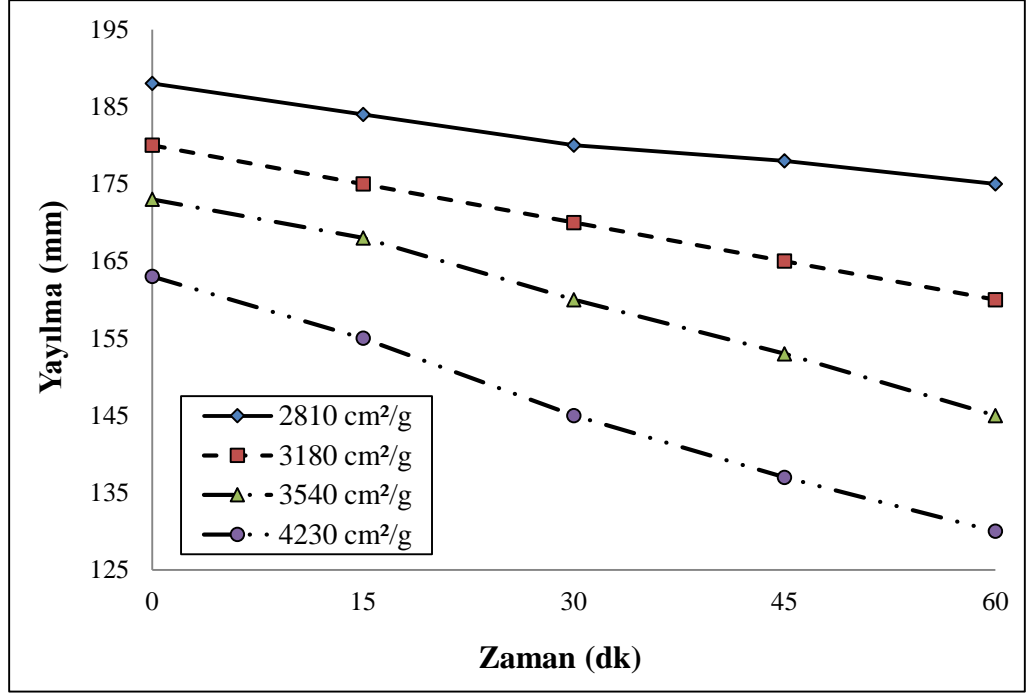
Çizelge 4.62. SDC içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm)

	Başlangıç	15 dk.	30 dk.	45 dk.	60 dk.
2810 cm ² /g	188	184	180	178	175
3180 cm ² /g	180	175	170	165	160
3540 cm ² /g	173	168	160	153	145
4230 cm ² /g	163	155	145	137	130



Şekil 4.41. NÇ içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm)

NÇ ile hazırlanan harç karışımlarında çimento inceliğinin 3223 cm²/g'dan 4580 cm²/g'a artışıyla başlangıç yayılma değerlerinde %6'lık bir düşüş gözlemlenmiştir. SDC ile hazırlanan harç karışımlarında ise çimento inceliğinin 2810 cm²/g'dan 4230 cm²/g'a artışıyla başlangıç yayılma değerlerinde %15'lik bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 4.42. SDC içeren katkısız harçların zamana bağlı yayılması (mm)

NÇ içeren karışımlarda 60 dakika sonunda, en yüksek (%22) ve en düşük (%9) yayılma kayıpları sırasıyla, 4580 cm²/g (en ince) ve 3223 cm²/g (en iri) Blaine inceliğine sahip çimentosunu içeren karışımlarda gözlemlenmiştir.

SDÇ ile hazırlanan harç karışımlarında ise 2810, 3180, 3540 ve 4230 cm²/g inceliklere sahip çimento içeren karışımların 60 dakika sonundaki yayılma kayıpları sırasıyla %7, %14, %16 ve %20 olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi çimento inceliğinin artışıyla katkı içermeyen karışımın zamana bağlı yayılma kaybı artmıştır. Bunun, inceliğin artısından dolayı hidrasyon hızının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SDC ile hazırlanan harç karışımlarının 60 dakika sonundaki yayılma kayıpları NÇ ile hazırlanan harç karışımlarına kıyasla bir miktar daha az olmuştur. Bu durumun bir ölçüde SDC'nin NÇ'ye göre ince olmasından, bir ölçüde de düşük C₃A içeriğine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Farklı tipte ve farklı incelik değerlerinde çimento içeren harç karışımlarının süperakışkanlaştırıcı katkı ihtiyaçlarını belirlemek amacıyla ilk başta tüm karışımlar katkısız olarak hazırlanmıştır. Daha sonra çimento ağırlığının %0.1'i aralığıyla %0.5'e kadar süperakışkanlaştırıcı katkı eklenerek 6 farklı harç karışımlarının yayılma değerleri ölçülmüştür. Deney sonuçları Çizelge 4.63 ve 4.64, Şekil 4.43 ve 4.44'te verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, katkı oranının artışıyla yayılma değerleri artmıştır. Yayılma değerlerindeki bu artışın SDC karışımlarında daha belirgin olduğu anlaşılmıştır. Katkı içermeyen karışımlarda, çimento inceliğinin artışıyla karışımın yayılması azalmıştır.

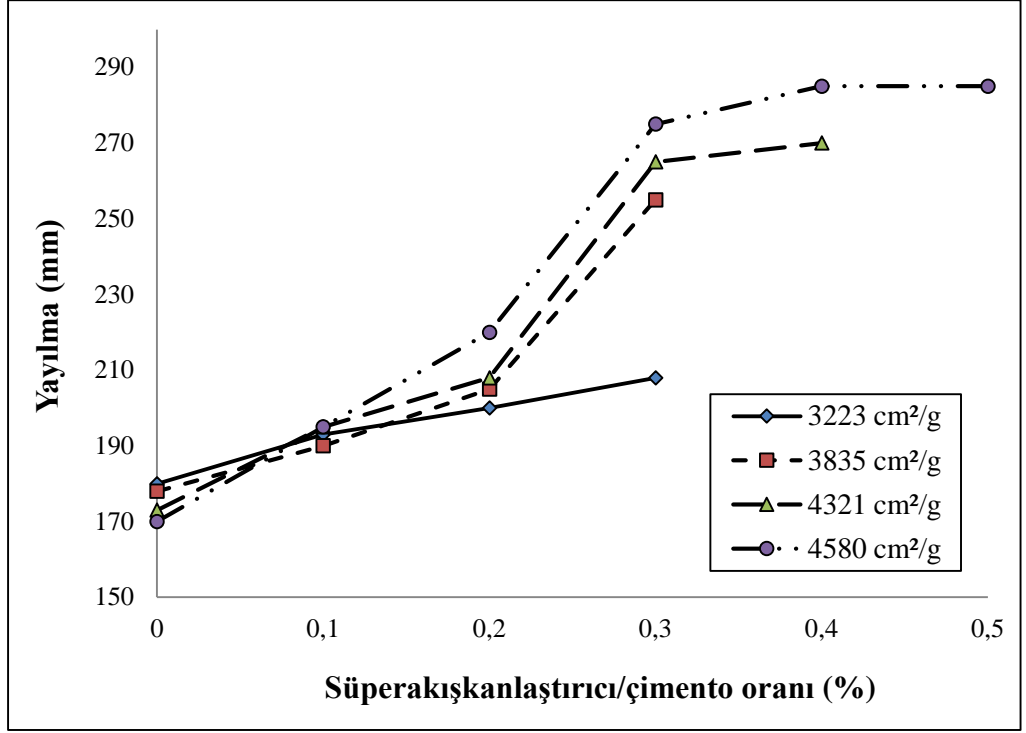
Çizelge 4.63. Süperakışkanlaştırıcı içeren harçlarının yayılması (mm)

Katkı (%)	3223 cm ² /g	3835 cm ² /g	4321 cm ² /g	4580 cm ² /g
0	180	178	173	170
0.1	193	190	195	195
0.2	200	205	208	220
0.3	208	255	265	275
0.4	öa*	öa	270	285
0.5	öa	öa	öa	285

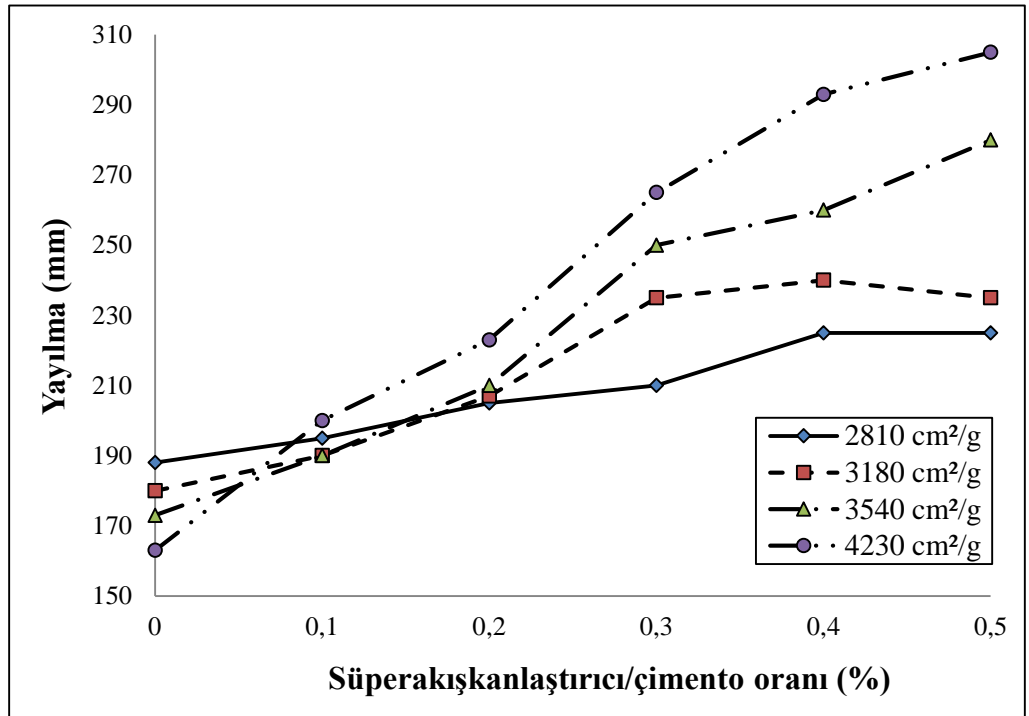
öa*Karışımın ayrışmasından dolayı ölçüm alınamamıştır.

Çizelge 4.64. Süperakışkanlaştırıcı içeren SDC harçlarının yayılması (mm)

Katkı (%)	2810 cm ² /g	3180 cm ² /g	3540 cm ² /g	4230 cm ² /g
0	188	180	173	163
0.1	195	190	190	200
0.2	205	207	210	223
0.3	210	235	250	265
0.4	225	240	260	293
0.5	225	235	280	305



Şekil 4.43. Süperakışkanlaştırıcı içeren NÇ harçlarının yayılması (mm)



Şekil 4.44. Süperakışkanlaştırıcı içeren SDC harçlarının yayılması (mm)

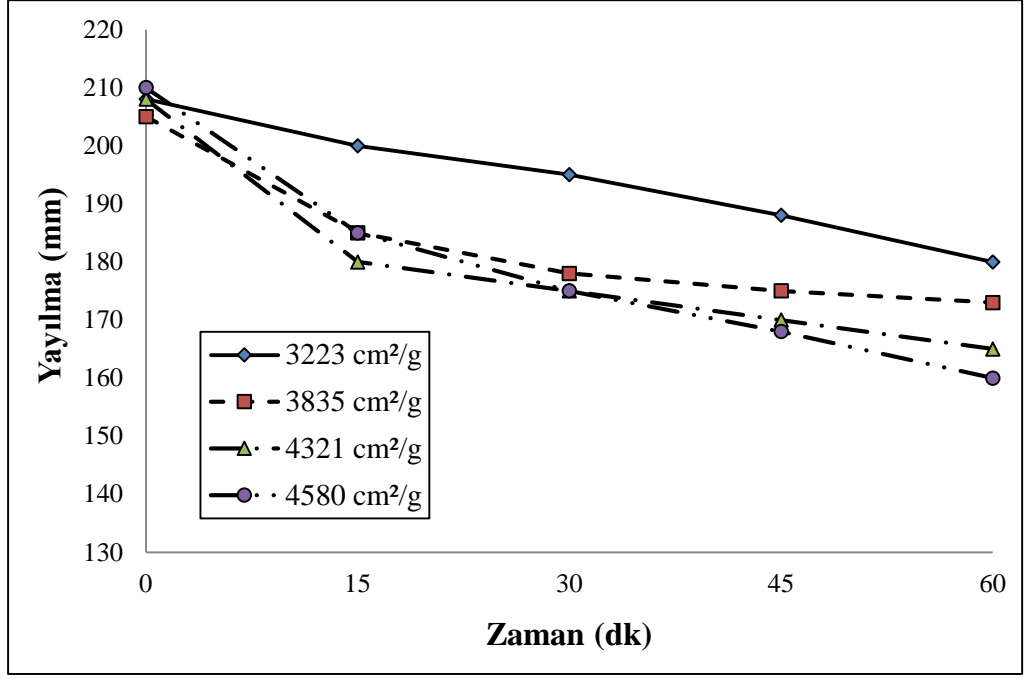
Karışımların zamana bağlı yayılma değişimlerini incelemek amacı ile 210 ± 10 mm sabit yayılma değerine sahip karışımlar tekrardan hazırlanmıştır. $3223 \text{ cm}^2/\text{g}$ incelikte NÇ içeren harç karışımında hedef yayılma %0.3 oranında katkı kullanımıyla sağlanmıştır. $3835 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve $4321 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliklerde olan çimentolarla hazırlanan harç karışımlarında ise hedef yayılma değeri %0.2 süperakışkanlaştırıcı oranına sahip karışımlarda elde edilmiştir. $4580 \text{ cm}^2/\text{g}$ incelikteki çimentoda ise söz konusu yayılma değeri yaklaşık %0.15 süperakışkanlaştırıcı oranında tespit edilmiştir. Bu değişimin benzeri SDC ile hazırlanan harç karışımlarında da görülmüştür. Sonuçta, süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlarda çimento inceliğinin artışıyla sabit bir yayılmayı elde etmek için süperakışkanlaştırıcı katkı ihtiyacının azaldığı belirtilmiştir. Sabit yayılma değerine (210 ± 10 mm) sahip karışımların zaman içinde yayılması ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 4.65 ve 4.66 ile Şekil 4.45 ve 4.46'da verilmiştir.

Çizelge 4.65. NÇ içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm)

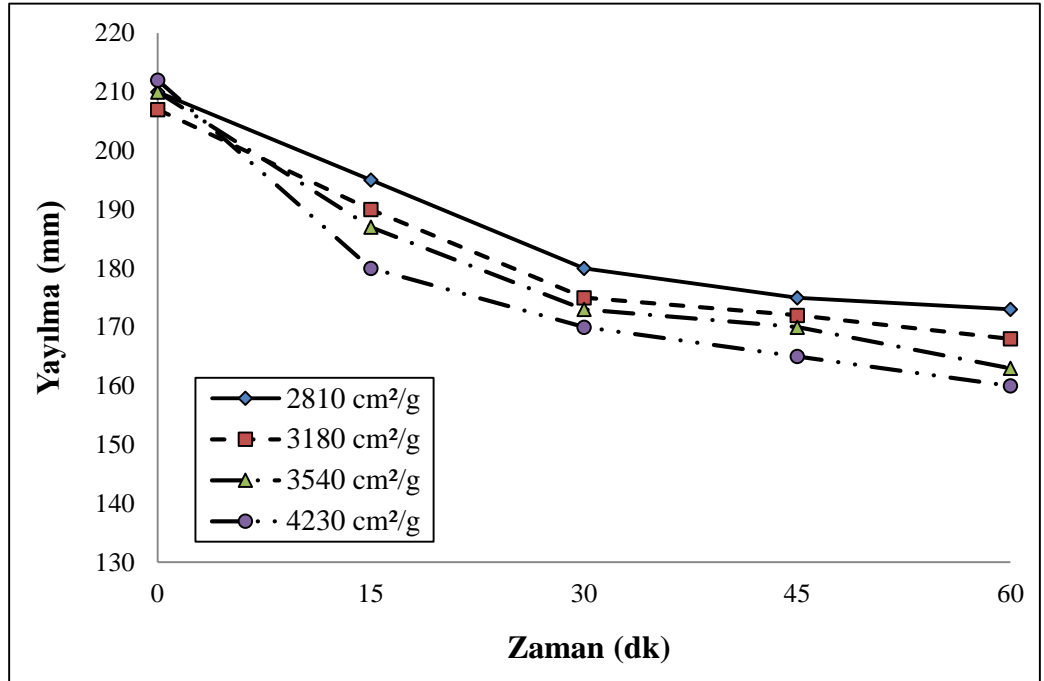
	Başlangıç	15 dk.	30 dk.	45 dk.	60 dk.
$3223 \text{ cm}^2/\text{g}$	208	200	195	188	180
$3835 \text{ cm}^2/\text{g}$	205	185	178	175	173
$4321 \text{ cm}^2/\text{g}$	208	180	175	170	165
$4580 \text{ cm}^2/\text{g}$	210	185	175	168	160

Çizelge 4.66. SDC içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm)

	Başlangıç	15 dk.	30 dk.	45 dk.	60 dk.
$2810 \text{ cm}^2/\text{g}$	210	195	180	175	173
$3180 \text{ cm}^2/\text{g}$	207	190	175	172	168
$3540 \text{ cm}^2/\text{g}$	210	187	173	170	163
$4230 \text{ cm}^2/\text{g}$	212	180	170	165	160



Şekil 4.45. NÇ içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm)



Şekil 4.46. SDC içerikli harçların zamana bağlı yayılması (mm)

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi her iki çimento tipinde de 60 dakika sonundaki maksimum yayılma kayıpları en yüksek incelik değerine sahip çimento içeren harç karışımlarında görülmüştür. Her iki çimentoda da, çimento inceliğinin artışıyla 60 dakika sonunda yayılma kayıpları artmıştır. Bunun ilki nedeni olduğu düşünülmektedir. Birincisi 210 mm olan hedef yayılma değerini sağlamak için en yüksek inceliğe sahip çimento içeren harç karışımında daha az süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmasıdır. Böylece, katkının priz geciktirme etkisi de azalmıştır. İkincisi ise çimento inceliğinin artışıyla hidrasyon hızı yükselenerek daha fazla yayılma kaybına neden olmuştur.

Harç karışımlarının reolojik özellikleri hamur karışımlarına benzer yöntemle hesaplanmıştır. Harç karışımlarının reolojik özellikleri Çizelge 4.67 ve 4.68'de verilmiştir.

Çizelge 4.67. NÇ içeren harçların reolojik özellikleri

Blaine inceliği (cm²/g)	S/Ç - Katkı oranı	Dinamik EKG (Pa)	Nihai viskozite (Pa.s)	Statik EKG (Pa)
3223	0.5 - %0.2	132.23	12.84	928.00
	0.5 - %0.3	51.42	10.12	360.67
	0.6 - %0.0	32.65	5.22	420.42
3835	0.5 - %0.2	89.10	11.41	765.30
	0.5 - %0.3	42.24	9.26	296.71
	0.6 - %0.0	40.15	5.36	432.77
4321	0.5 - %0.2	71.10	11.20	564.52
	0.5 - %0.3	31.24	9.25	234.44
	0.6 - %0.0	46.80	5.64	485.45
4580	0.5 - %0.2	61.20	9.25	491.65
	0.5 - %0.3	27.21	8.36	226.14
	0.6 - %0.0	48.76	5.82	512.04

Çizelge 4.68. SDC içeren harçların reolojik özellikleri

Blaine İnceliği (cm ² /g)	S/Ç - Katkı oranı	Dinamik EKG (Pa)	Nihai viskozite (Pa.s)	Statik EKG (Pa)
2810	0.5 - %0.2	140.30	15.83	1835.00
	0.5 - %0.3	37.04	14.99	1084.00
	0.6 - %0.0	26.79	4.25	278.57
3180	0.5 - %0.2	70.92	10.03	639.95
	0.5 - %0.3	23.96	9.47	608.07
	0.6 - %0.0	29.56	4.55	291.87
3540	0.5 - %0.2	60.67	7.87	494.20
	0.5 - %0.3	15.95	7.68	196.40
	0.6 - %0.0	35.38	4.94	387.11
4230	0.5 - %0.2	45.83	6.88	310.05
	0.5 - %0.3	15.86	6.27	48.55
	0.6 - %0.0	36.50	5.83	890.06

Sonuçlardan da görüldüğü gibi süperakışlaştırıcı katkı içermeyen harç karışımlarında çimento inceliğinin artışıyla hamur karışımlarına benzer olarak dinamik EKG, nihai viskozite ve statik EKG değerleri artmıştır. Daha önce de açıklandığı gibi çimento inceliğinin artışıyla toplam yüzey alanının artmasından dolayı karışımın su ihtiyacının artması sonucu bu durum meydana gelmektedir. Süperakışkanlaştırıcı içeren karışımlarda ise çimento inceliğinin artışıyla tüm reolojik parametreler azalma göstermiştir. Bu durum hamur karışımlarında yapılan deneyde olduğu gibi süperakışkanlaştırıcı emiliminin artışından kaynaklanmaktadır. Çimento hamuru karışımlarına benzer olarak süperakışkanlaştırıcı katkı bulunmayan harç karışımlarında da statik EKG, dinamik EKG'nin birkaç katı değerindedir. Ancak süperakışkanlaştırıcı oranının artışıyla statik ve dinamik EKG değerleri arasındaki fark azalmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi harç karışımların reolojik özellikleri hamur karışımlarına benzer şekilde olmuştur. Ancak harç karışımlarında ince agrega sisteme dâhil olduğu için beklenildiği gibi hamur karışımlarına kıyasla reolojik parametre değerleri daha yüksek olmuştur.

Daha öncede vurgulandığı gibi, ACI 211 "Standard Practice For Selecting Proportions For Normal, Heavyweight and Mass Concrete" yöntemine uygun olacak şekilde tasarlanan beton karışımlarında, S/Ç oranı 0.45 olarak sabit tutulmuştur. 1 m³ için gerekli düzeltilmiş malzeme miktarları NÇ ve SDC karışımları için sırasıyla Çizelge 4.69 ve 4.70'de özetlenmiştir. Karışımların

çökme değeri 235 ± 10 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen çökme değerini sağlamak için NÇ karışımlarında $3.4-4 \text{ kg/m}^3$ aralığında, SDC karışımlarında ise, $2.6-3.6 \text{ kg/m}^3$ aralığında polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır.

Karışımların zaman bağlı çökme ve yayılma değişimi NÇ ve SDC karışımları için sırasıyla, Çizelge 4.71 ve 4.72'de verilmiştir.

Çizelge 4.69. NÇ içerikli betonların düzeltilmiş karışım oranları (kg/m^3) ve taze hal özellikleri

Karışım	Blaine inceliği (cm^2/g)			
	3223	3835	4321	4580
Çimento	392	392	393	395
Su	176	176	177	178
SA*	4.0	3.9	3.7	3.4
Agrega (DKY)	0-3 mm	746	747	750
	0-5 mm	378	379	381
	5-15 mm	373	373	375
	15-25 mm	374	375	376
Birim hacim ağırlık (kg/m^3)				
Teorik	2426.2	2426.1	2428.6	2426.3
Ölçülen-taze	2442.6	2446.4	2455.2	2461.9
Ölçülen-sertleşmiş (DKY)	2521	2532	2536	2529
Σ Hamur	572	572	574	572
Σ Harç	1696	1698	1704	1708
Beton karışımlarının taze hal özellikleri				
Hava içeriği (%)	1.5	1.5	1.6	1.4
Çökme değeri (mm)	235	230	245	235
Yayılma değeri (mm)	490	500	510	510

*Süperakışkanlaştırıcı katkı

Çizelge 4.70. SDC içerikli betonların düzeltilmiş karışım oranları (kg/m³) ve taze hal özellikleri

Karışım	Blaine inceliği (cm ² /g)				
	2810	3180	3540	4230	
Çimento	392	393	394	395	
Su	176	177	177	178	
SA*	3.6	3.4	3.0	2.6	
Agrega (DKY)	0-3 mm	750	752	754	755
	0-5 mm	381	381	383	383
	5-15 mm	375	376	377	378
	15-25 mm	376	377	378	379
Birim hacim ağırlık (kg/m³)					
Teorik	2433.9	2433.7	2433.3	2432.9	
Ölçülen-taze	2454.1	2459.3	2465.6	2470.4	
Ölçülen-sertleşmiş (DKY)	2529	2518	2532	2544	
ΣHamur	569	570	571	573	
ΣHarç	1703	1706	1711	1714	
Beton karışımlarının taze hal özellikleri					
Hava içeriği (%)	1.4	1.4	1.7	1.5	
Çökme değeri (mm)	230	230	240	245	
Yayılma değeri (mm)	500	500	515	525	

*Süperakışkanlaştırıcı katkı

Çizelge 4.71. NÇ içerikli beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi

	Blaine inceliği (cm ² /g)	Zaman (dakika)				
		0	15	30	45	60
Çökme (mm)	3223	235	225	210	195	160
	3835	230	220	205	180	145
	4321	245	230	200	170	140
	4580	235	220	185	150	125
Yayılma (mm)	3223	490	470	310	290	270
	3835	500	460	290	275	245
	4321	510	445	260	245	Yayılmadı
	4580	510	435	250	240	Yayılmadı

Çizelge 4.72. SDC içerikli beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi

	Blaine inceliği (cm ² /g)	Zaman (dakika)				
		0	15	30	45	60
Çökme (mm)	2810	230	220	200	170	150
	3180	230	215	190	165	140
	3540	240	220	190	150	135
	4230	245	220	180	135	125
Yayılma (mm)	2810	500	470	300	310	265
	3180	500	465	290	265	250
	3540	515	475	275	260	240
	4230	525	475	260	255	Yayılmadı

Beton karışımlarının taze hal özelliği sonuçlarından da anlaşıldığı gibi, bu karışımlarda da harç karışımlarına bezer davranışlar gözlemlenmiştir. Ancak, çimento inceliği ve kompozisyonunun beton özelliklerine etkisi harç özelliklerine nazaran daha hafif olmuştur. Çimento tipinden bağımsız olarak, çimento inceliğinin artışıyla, beton karışımlarında benzer çökme değerini sağlamak için (235±10 mm) gereken katkı ihtiyacı azalmıştır. Ancak, zamana bağlı çökme kaybı çimento inceliğinin artışıyla artmıştır. Bu artışın, çimento inceliğinin artışından ve priz geciktirici etkisi de olan su azaltıcı katkının daha az kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenlerden dolayı sülfata dayanıklı çimento normal çimentoya kıyasla taze hal özelliği açısından daha başarılı sonuç vermiştir.

Basınç dayanımı

ASTM C109 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" standardına göre hazırlanan harç karışımlarının ve ACI 211 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete" standardına uygun hazırlanan beton karışımlarının 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneyi sonuçları Çizelge 4.73 ila 4.76 ve Şekil 4.47 ve 4.48'de verilmiştir.

Çizelge 4.73. NÇ içeren harç karışımlarının basınç dayanımı

Blaine inceliği (cm ² /g)	Basınç dayanımı (MPa)			
	1 Günlük	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
3223	20.24	40.62	44.82	58.74
3835	25.65	43.70	48.74	62.36
4321	28.41	45.18	50.72	64.41
4580	30.80	47.02	51.40	65.08

Çizelge 4.74. SDC içeren harç karışımlarının basınç dayanımı

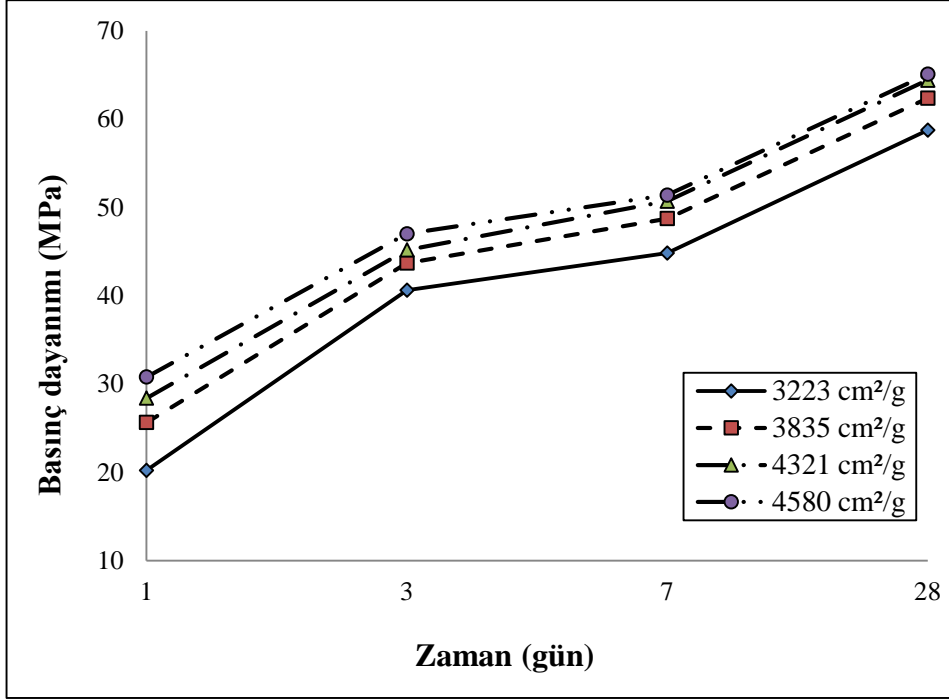
Blaine inceliği (cm ² /g)	Basınç dayanımı (MPa)			
	1 Günlük	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
2810	11.57	27.04	36.11	46.44
3180	14.26	31.88	41.20	53.77
3540	16.8	36.68	42.13	57.66
4230	22.04	39.01	45.45	61.74

Çizelge 4.75. NÇ içeren beton karışımlarının basınç dayanımı

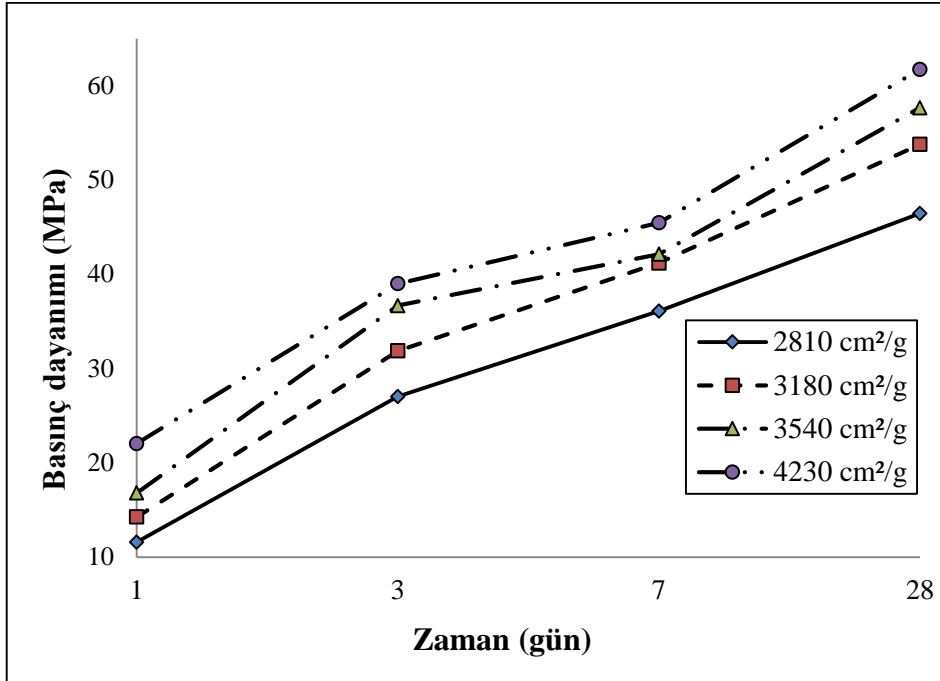
Blaine inceliği (cm ² /g)	Basınç dayanımı (MPa)			
	1 Günlük	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
3223	19.2	37.90	45.21	52.60
3835	21.35	40.50	46.80	54.00
4321	24.2	41.60	48.88	57.00
4580	25.85	43.55	51.55	58.99

Çizelge 4.76. SDC içeren beton karışımlarının basınç dayanımı

Blaine inceliği (cm ² /g)	Basınç dayanımı (MPa)			
	1 Günlük	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
2810	13.25	29.66	38.12	47.25
3180	14.95	30.99	39.55	48.23
3540	16.2	34.68	41.26	50.64
4230	19.85	36.01	43.16	52.36



(a)

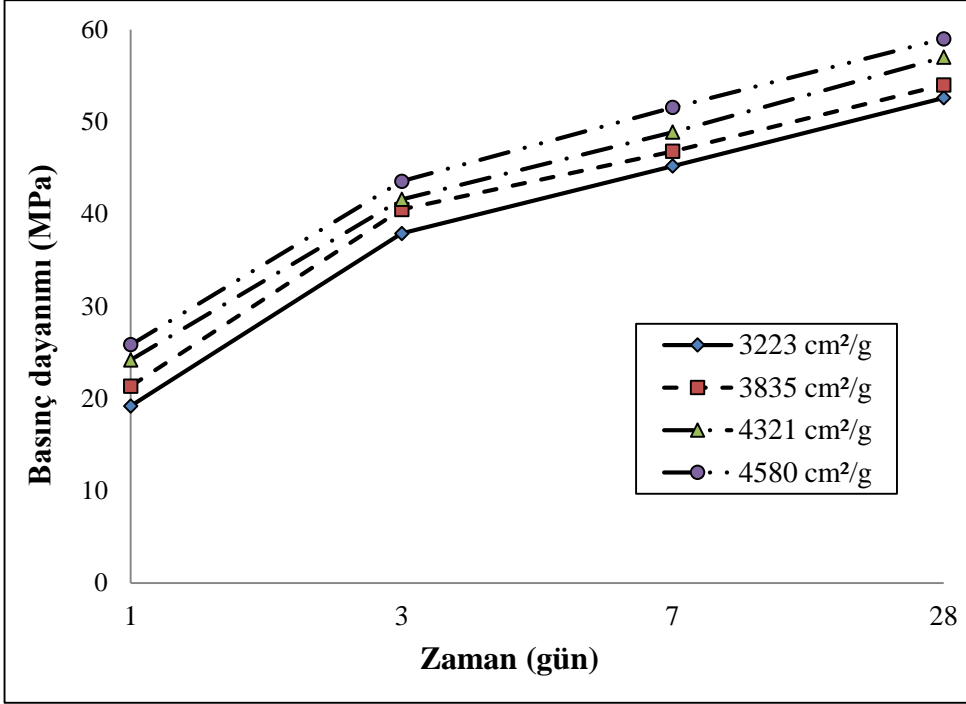


(b)

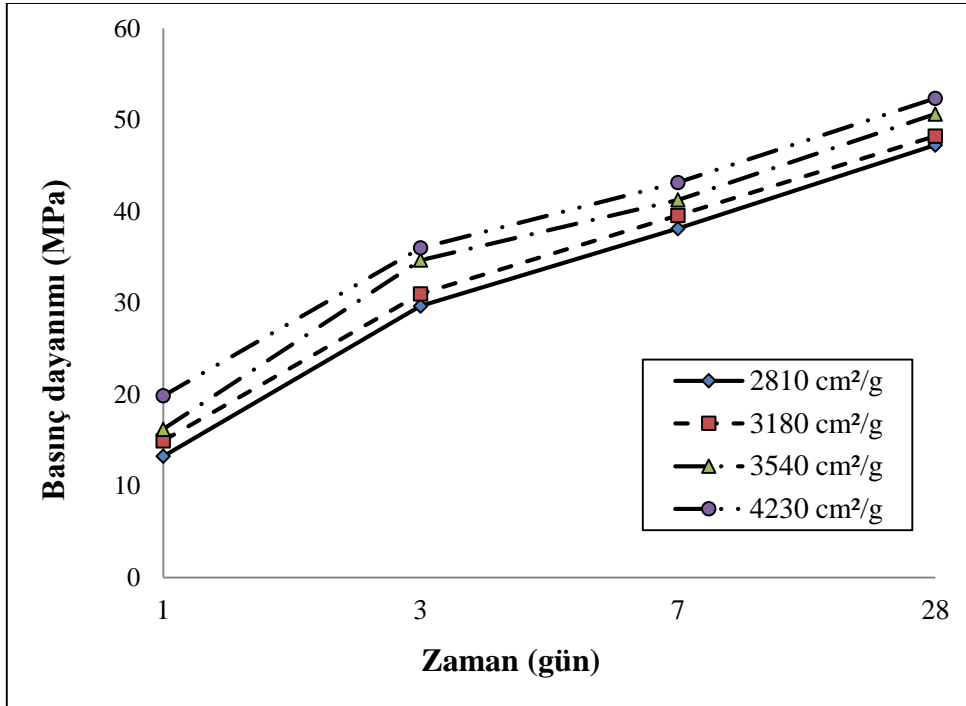
Şekil 4.47. Harç karışımlarının basınç dayanımı; a: normal çimento içeren karışımlar, b: sülfata dayanıklı çimento içeren karışımlar

Harç klarışımları sonuçlarına göre, N ile hazırlanan harç karışımlarının bir günlük basınç dayanımı imento inceliğinin artışı ile belirgin bir şekilde artmıştır. Ancak 3 ve 7 günlük dayanımlada bu fark gittikçe azalmıştır. Kullanılan CEM I 42.5R Portland imentosunun gtlmemiş 28 günlük dayanımına bakıldığında çimentonun dayanım sınıfına uygun olduğu görülmüştür. SDC içeren harç karışımlarda da N içerenlere benzer şekilde 1 günlük dayanımlar imento inceliğinin artışı ile belirgin bir şekilde artmıştır. Fakat 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında N'de olduğu gibi bu dayanım farkı azalmamıştır. Beton karışımlarında da harç karışımları kadar çarpıcı olmasa da benzer davranış söz konusu olmuştur.

Dayanım sonuçları incelendiğinde, tüm yaşlarda N içeren harç karışımlarının basınç dayanımı SDC içeren karışımlara kıyasala daha yüksek olmuştur. Bu durum, yakın inceliğe sahip çimentolardan üretilen karışımlarda bile söz konusu olmuştur. N karışımlarının ilk  günde SDC'ye göre daha yüksek dayanım göstermesi daha yüksek C₃A oranına sahip olması ile açıklanabilir. Ancak, ileri yaşlarda karışımların dayanımı daha fazla kalsiyum silikat hidrat tarafından kontrol edildiği bilinmektedir (Neville and Brooks, 2010; Mehta and Monteiro, 2010). Bu çalışmada kullanılan N immentosunun C₃S, C₂S ve C₄AF oranı sırasıyla, 64.21, 11.39 ve 7.92 dir. Aynı bileşenler SDC için sırasıyla, 67.1, 10.2 ve 3.58 değerlerini almıştır. Bu sebeple, N imentosunun SDC'ye göre ileri yaşlarda da daha yüksek dayanım göstermesi daha farklı mekanizmadan kaynaklanmaktadır. Bu konu başka bir araştırma başlığı olabilir. Beton karışımlarında da benzer davranışlar gözlemlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.48. Beton karışımlarının basınç dayanımı; a: normal çimento içeren karışımlar, b:sülfata dayanıklı çimento içeren karışımlar

4.2.2. C₃A içeriğinin çimento-katkı uyumuna etkisi

Bilindiği gibi çimento C₃A oranı çimento-su azaltıcı katkı uyumunu etkileyen önemli etkenlerden biridir. Tez çalışmasının bu aşamasında, söz konusu etki incelenmiştir. Bu amaçla, hammaddeleri ve üretim esnasında klinkeri ile birlikte öğütülen alçıtaşı aynı ancak, farkı C₃A içeriğine sahip 3 adet CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Farklı S/Ç oranlarında çimento hamuru, harç ve beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların taze hal, reolojik özellikleri ve farklı yaşlarda basınç dayanımı incelenmiştir. Ayrıca, her çimentodan oluşan 6 saatlik hamur karışımlarının XRD paterni çekimi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çimento C₃A içeriği azaldıkça hamur, harç ve beton karışımlarının taze hal, reolojik ve kıvam koruma özellikleri iyileşmiştir. Ancak, C₃A oranının azalmasıyla karışımların erken yaşlardaki dayanımları azalırken, ileri yaş dayanımları C₃A içeriğinden bağımsız olarak hemen hemen aynı olmuştur. Yapılan XRD analizi sonucundan, daha yüksek C₃A oranına sahip çimento hamurunda görülen etrenjit piki daha yüksek (daha yoğun) olduğundan, C₃A miktarı fazla olan hamurda daha fazla etrenjit kristallerinin oluşumu anlaşılmıştır.

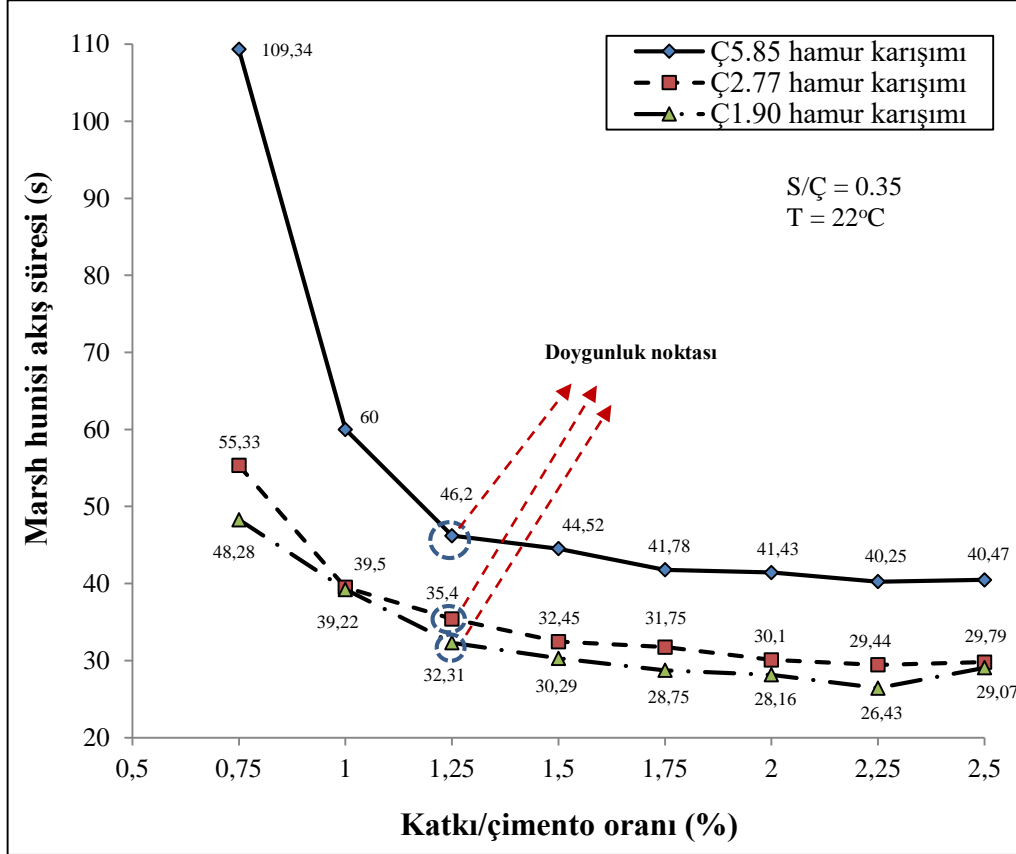
4.2.2.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Taze hal özellikleri

Karışımların Marsh-hunisi akış süresi, mini yayılması ve sıcaklığı ölçülmüştür. Ancak, %0.5'in altında katkı kullanıldığı takdirde karışımların Marsh-hunisinden akmadığından ölçümleri alınamamıştır. Nkinamubanzi ve Fournier'e göre hamur karışımı huniden akmadığı takdirde deney geçersizdir (Nkinamubanzi and Fournier, 2003).

Farklı C₃A içeriğine sahip olan Ç_{5.85}, Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} çimentoları içeren karışımlara ait Marsh-hunisi akış süresi, mini yayılma ve sıcaklık değerleri Şekil 4.49 ve Çizelge 4.77'de verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, katkı kullanım oranının artışıyla karışımların Marsh-hunisi akış süresi artmıştır. Ancak, belli bir katkı kullanım oranından sonra katkı miktarının artışıyla Marsh-hunisi akış süresinde çarpıcı bir değişiklik oluşmamıştır. Bu oran katkının doyum noktası olarak adlandırmaktadır. Her üç hamur karışımında da katkının doyum noktası %1.25 olduğu tespit edilmiştir. Ancak, doyum noktasındaki Marsh-hunisi akış süreleri dikkate alındığında, C₃A içeriğinin azalmasıyla, karışımın Marsh-hunisi

akış süresinin kısaldığı görülmüştür. C_3A miktarı %5.85 olan çimentoyu içeren karışımın Marsh-hunisi akış süresi C_3A miktarı 2.77 ve 1.90 olan çimentoları içeren karışımlara kıyasla sırasıyla, %30 ve %43 daha uzun olmuştur. Katkı kullanım oranının artışıyla (doygunluk noktanın üstünde) Marsh-hunisi akış süreleri pek çok değişiklik göstermemiştir. Ancak çimento ağırlığının %2.5'ü kadar su azaltıcı katkı kullanıldığı takdirde, Marsh-hunisi akış sürelerinde çok az olsa dahi bir miktar artış olmuştur. Söz konusu karışımlarda ayrışma gözlemlenmiştir.



Şekil 4.49. Hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi

Çizelge 4.77'den de anlaşıldığı gibi katkı kullanım miktarının artışıyla, hamur karışımlarının mini-yayımla değerleri artmıştır. Ancak belli bir kullanım oranından sonra karışımların yayılması sabitlenmiştir. Çimento ağırlığının %2.5'ü kadar su azaltıcı katkı içeren karışımda, Marsh-hunisi akış süresi deneyinde de gözlemlenildiği gibi, bu deneyde de hamurun mini-yayımla tabelasına yapıştığı ve karışımda ayrışma oluştuğu gözlemlenmiştir. Çimento ağırlığının %0.75'i kadar su azaltıcı katkı içeren karışımda ise, çimento C_3A miktarının %5.85'den %1.90'a düşmesiyle karışımın mini-yayımlasında %15'lik bir artış meydana gelmiştir.

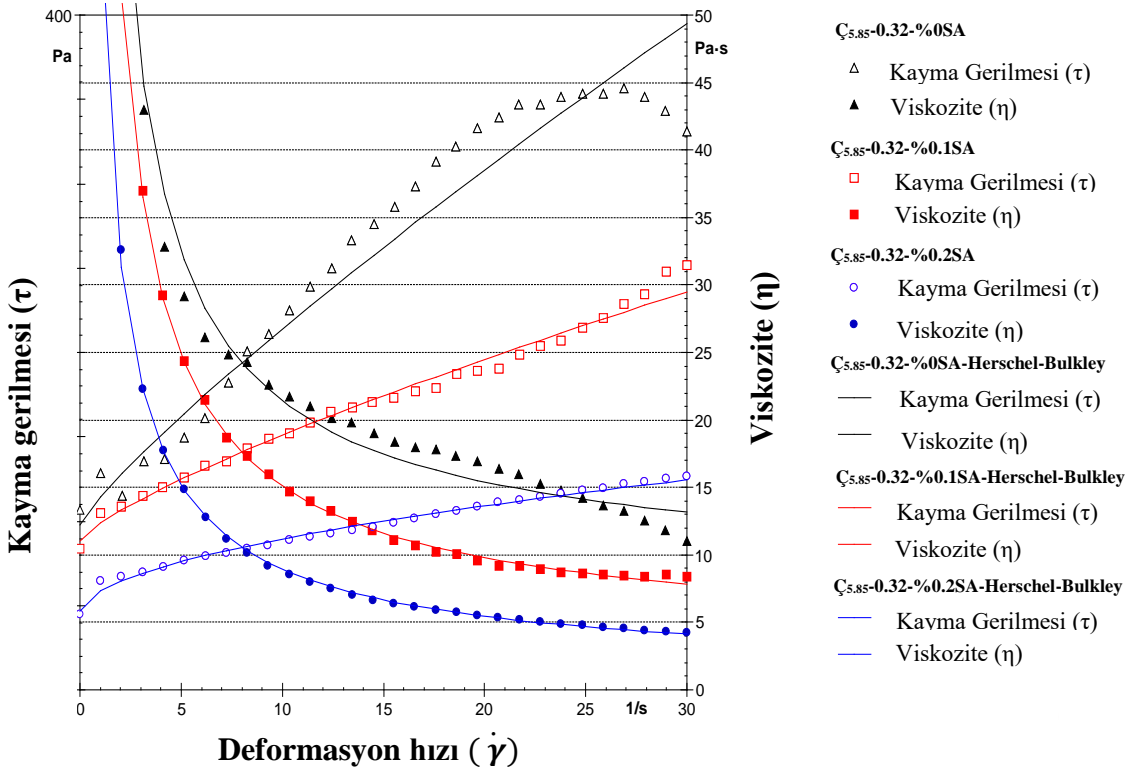
Ancak, kakı kullanım oranının artışıyla, söz konusu farkın azaldığı tespit edilmiştir. Bu olay, numune hacminin daha fazla yayılmak için yetersiz olduğundan kaynaklanmaktadır. Katkı oranı artışıyla, karışım sıcaklığının çok fazla değişmemesi deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Ancak, çimento C₃A miktarının azalmasıyla, karışımın sıcaklığı çok az miktarda düşüş göstermiştir.

Çizelge 4.77. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılması ve sıcaklığı

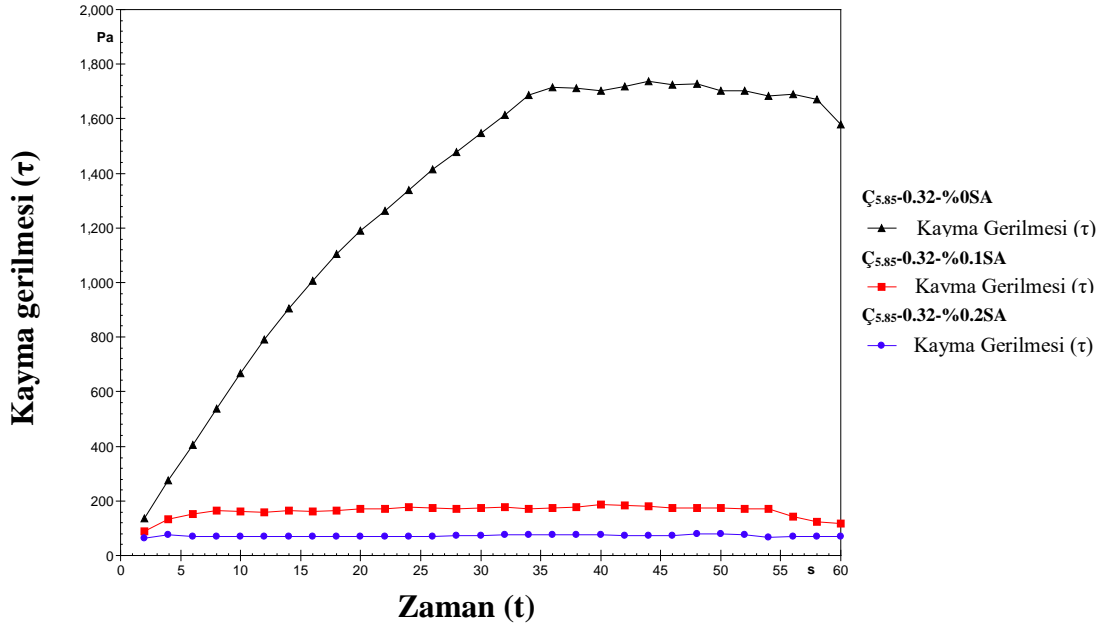
Katkı/çimento (%)		0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
Marsh-hunisi akış süresi, s	Ç _{5.85} karışımı*	109.3	60	46.2	44.5	41.8	41.4	40.3	40.5
	Ç _{2.77} karışımı	55.3	39.5	35.4	32.5	31.8	30.1	29.4	29.8
	Ç _{1.90} Karışımı	48.3	39.2	32.31	30.3	28.8	28.2	26.4	29.1
Mini-yayılma, mm	Ç _{5.85} Karışımı	150	170	175	180	180	175	180	Ayrıştı
	Ç _{2.77} karışımı	170	175	180	180	180	180	180	Ayrıştı
	Ç _{1.90} Karışımı	175	175	180	180	185	185	190	Ayrıştı
Sıcaklık, °C	Ç _{5.85} Karışımı	27.7	27.6	26.9	27.8	27	27.5	27.6	27.8
	Ç _{2.77} karışımı	27.3	26.7	26.5	26.5	26.9	26.7	26.1	26.0
	Ç _{1.90} Karışımı	27.9	26.6	26.3	26.3	26.8	26.5	26.1	26.1

*Ç_{5.85} karışımı: C₃A miktarı 5.85 olan çimentoyu içeren hamur karışımı

Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmada, reolojik özelliği olarak karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi (EKG), statik eşik kayma gerilmesi (EKG) ve nihai viskozitesi belirlenmiştir. Bu amaçla, her çimento-katkı ikilisi için kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafikleri çizilmiştir. Burada örnek olarak değişik oranda su azaltıcı katkı içeren, Ç_{5.85} çimentosu ile hazırlanan ve 0.32 S/Ç oranına sahip hamur karışımının kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi sırasıyla, Şekil 4.50 ve 4.51'de gösterilmiştir. Parametrelerin dikkate alınan ham verilerden nasıl bedirlenildiği deney metotları bölümünde açıklanmıştır. Diğer karışımlarda benzer şekilde çizilen grafiklerden elde edilen reolojik özellikler Çizelge 4.78'de verilmiştir.



Şekil 4.50. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç_{5.85} hamur karışımlarının kayma gerilmesi-deformasyon hızı ilişkisi



Şekil 4.51. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.32 S/Ç oranına sahip Ç_{5.85} hamur karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi

Çizelge 4.78. Hamur karışımlarının reolojik özellikleri sonucu

S/Ç oranı	Karışım	Reolojik özellikleri	Katki kullanım oranı (çimento ağırlığının %'si)			
			%0	%0.1	%0.2	
0.32	Ç _{5.85} *	EKG (Pa)**	Dinamik	97.9	88	44.25
			Statik	1738	185.4	79.3
		Nihai viskozite (Pa.s)	13.17	8.39	4.22	
		Herschel-Bulkley indeksi	0.85	0.77	0.54	
	Ç _{2.77}	EKG (Pa)	Dinamik	95.38	75.3	36.3
			Statik	1278	155.9	58.8
		Nihai viskozite (Pa.s)	9.25	5.8	4.05	
		Herschel-Bulkley indeksi	0.71	0.53	0.42	
	Ç _{1.90}	EKG (Pa)	Dinamik	81.25	58.73	8.21
			Statik	461.6	63.5	11.96
		Nihai viskozite (Pa.s)	6.8	4.1	1.95	
		Herschel-Bulkley indeksi	0.54	0.40	0.33	
0.35	Ç _{5.85} *	EKG (Pa)	Dinamik	80.8	50.3	38.21
			Statik	289	104.1	56.4
		Nihai viskozite (Pa.s)	6.59	4.78	2.9	
		Herschel-Bulkley indeksi	0.79	0.53	0.47	
	Ç _{2.77}	EKG (Pa)	Dinamik	61.25	36.7	7.71
			Statik	155.6	63.9	12.5
		Nihai viskozite (Pa.s)	3.75	3.9	1.11	
		Herschel-Bulkley indeksi	0.60	0.48	0.42	
	Ç _{1.90}	EKG (Pa)	Dinamik	48.37	12.62	0.1
			Statik	81.7	18.5	1.86
		Nihai viskozite (Pa.s)	5	1.15	0.23	
		Herschel-Bulkley indeksi	0.48	0.34	0.29	

* Ç_{5.85}: %5.85 C₃A oranına sahip çimentodan üretilen hamur karışımı, **EKG: eşik kayma gerilmesi

Hamur karışımlarının akma eğrisi grafikleri denklem 4.1'de gösterilen Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu anlaşılmaktadır. Su azaltıcı katkı kullanım oranının artışıyla, çizilen akma gerilmesi Herschel-Bulkley modeli tarafından önerilen akma eğrisi ile daha çok örtüşmektedir. Buda su azaltıcı katkı içeren karışımlarının Herschel-Bulkley modeline daha çok uygun olduğunu göstermektedir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi karışımların Herschel-Bulkley indeksi (P) değerleri 1'den küçük olmuştur. Dolayısıyla, karışımlar Pseudoplastik davranış göstermiştir.

S/Ç oranı 0.32'den 0.35'e arttırıldığında, hamur karışımlarının dinamik ve statik EKG'si ile nihai viskozite değerleri azalmıştır. Başka bir deyişle karışımların reolojik özelliklerinde iyileşme söz konusu olmuştur. S/Ç oranının artışıyla hamur karışımlarının reolojik parametrelerinde oluşan iyileşme (reolojik büyüklüklerde azalma yüzdesi) Çizelge 4.79'da verilmiştir.

Çizelge 4.79. S/Ç oranının 0.32'den 0.35'e artışıyla, hamur karışımlarının reolojik değerlerindeki azalma (%)

Karışım	Reolojik özellikleri	Katkı kullanım oranı (çimento ağırlığının %'si)			
		%0	%0.1	%0.2	
Ç _{5.85} *	EKG**	Dinamik	17	43	14
		Statik	83	44	29
	Nihai viskozite	50	43	31	
Ç _{2.77}	EKG	Dinamik	36	51	79
		Statik	88	59	79
	Nihai viskozite	59	33	73	
Ç _{1.90}	EKG	Dinamik	40	79	99
		Statik	82	71	84
	Nihai viskozite	26	72	88	

* Ç_{5.85}: %5.85 C₃A oranına sahip çimentodan üretilen hamur karışımı, **EKG: eşik kayma gerilmesi

Çizelge 4.79'dan de anlaşıldığı üzere, 5.85 C₃A içerikli çimentodan oluşan hamur karışımlarında S/Ç oranının artışıyla, su azaltıcı katkı içermeyen karışımlarda reolojik parametreleri değerindeki azalma katkı içeren duruma göre daha fazla olmuştur. Katkı miktarının artışıyla söz konusu iyileşme azalmıştır. Ancak, C₃A oranı 1.90 olan çimentodan oluşan hamur karışımlarında S/Ç oranının artışıyla katkı içeren karışımlarda su azaltıcı katkı içermeyen karışıma kıyasla reolojik özelliklerinde oluşan iyileşme daha fazla olmuştur.

Beklenildiği gibi, su azaltıcı katkı içeren karışımlarının reolojik değerleri katkı içermeyen karışımlara kıyasla daha düşük olmuştur. Karışımların katkı oranının artışıyla beraber reolojik değerleri daha fazla azalmıştır. Katkı kullanım oranının %0'dan %0.2'ye kadar (karışımın içerdiği çimento ağırlığının yüzdesi olarak) artmasıyla, dinamik ve statik EKG ve nihai viskozite değerlerindeki azalma oranı Çizelge 4.80'de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi, C₃A oranı 5.85 olan çimento ile üretilen hamur karışımlarında, su azaltıcı katkı kullanım oranının atışına bağlı olarak reolojik parametrelerindeki iyileşme daha düşük S/Ç oranında (S/Ç oranı: 0.32) hazırlanan karışımlarda daha belirgin olmuştur. Ancak, C₃A oranı 1.90 olan çimentodan üretilen hamur karışımlarının reolojik özelliklerindeki azalma, katkı kullanım oranı artışıyla yüksek S/Ç oranına sahip karışımda daha çarpıcı olmuştur.

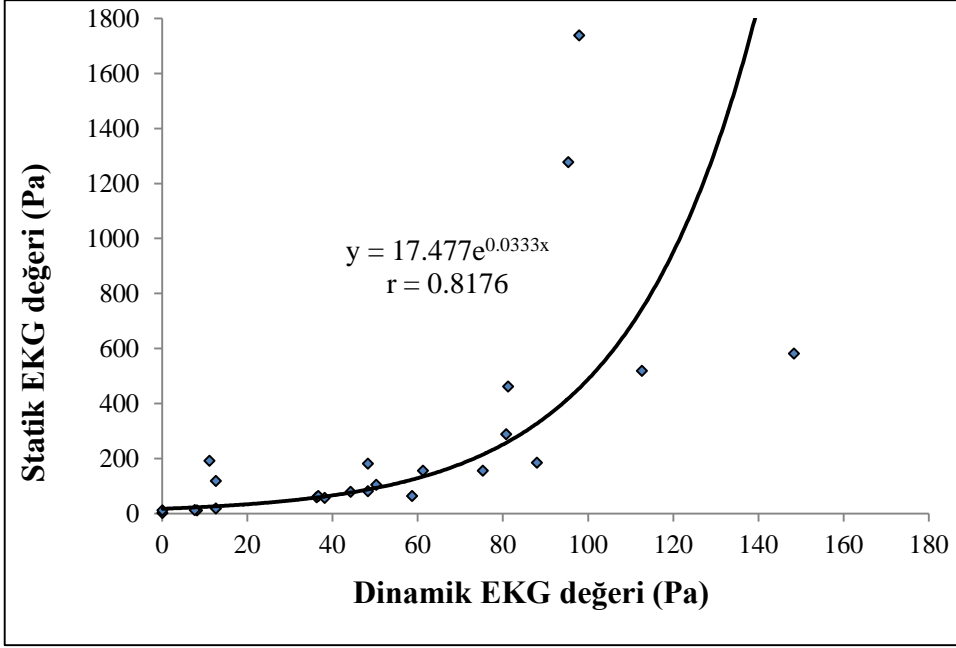
Çizelge 4.80. Su azaltıcı katkı kullanım oranının %0'dan %0.2'ye artışıyla, hamur karışımlarının reolojik değerlerindeki azalma yüzdesi

S/Ç oranı	Karışım	Reolojik özellik		
		Dinamik EKG**	Statik EKG	Nihai viskozite
0.32	Ç _{5.85} *	55	95	68
	Ç _{2.77}	62	95	56
	Ç _{1.90}	89	99	77
0.35	Ç _{5.85} *	52	80	55
	Ç _{2.77}	87	92	70
	Ç _{1.90}	99	97	95

* Ç_{5.85}: %5.85 C₃A oranına sahip çimentodan üretilen hamur karışımı, **EKG: eşik kayma gerilmesi

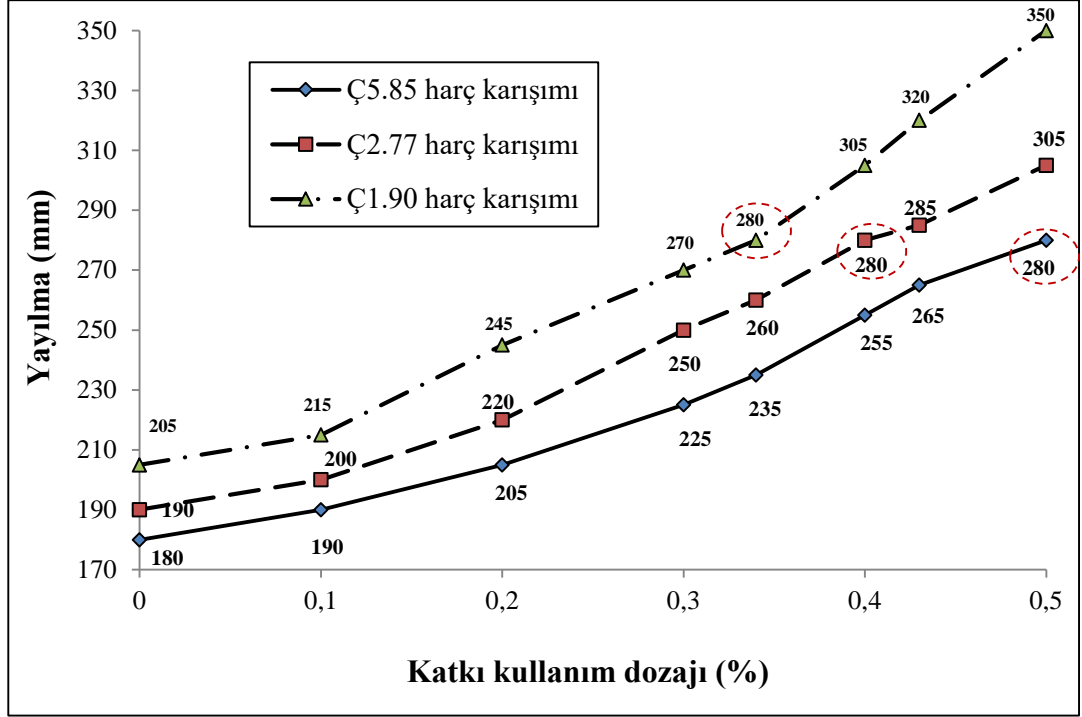
Bir karışımın dinamik ve statik EKG ve nihai viskozitesinin azalması, o karışımın reolojik özelliğinin iyileşmesi anlamına gelmektedir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, S/Ç oranı ve su azaltıcı katkı kullanım oranından bağımsız olarak, çimento C₃A içeriğinin azalmasıyla hamur karışımlarının tüm reolojik özellikleri azalmıştır. Dolayısıyla, çimento C₃A içeriğinin az olması reolojik parametreleri açısından istenilen bir durumdur.

Ayrıca beklenildiği gibi, tüm karışımlarda statik EKG değeri dinamik EKG değerinin üstünde olmuştur. Buda çimento esaslı karışımlarının tiksotropik davranış gösterdiklerinin bir simgesidir. Katkı içermeyen karışımlarda statik ve dinamik EKG değerleri arasında çok fark var iken, katkı kullanımı ile bu fark azalmıştır. Hamur karışımlarının dinamik ve statik EKG değerleri arasında doğrusal olmayan zayıf bir ilişkinin mevcut olduğu Şekil 4.52'den görülmektedir. Bu zayıf ilişkinin, su azaltıcı katkı içermeyen hamur karışımlarının dinamik ve statik EKG değerleri arasındaki bariz farktan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.52. Çimento hamuru karışımlarına ait dinamik-statik EKG değerleri arasındaki ilişki

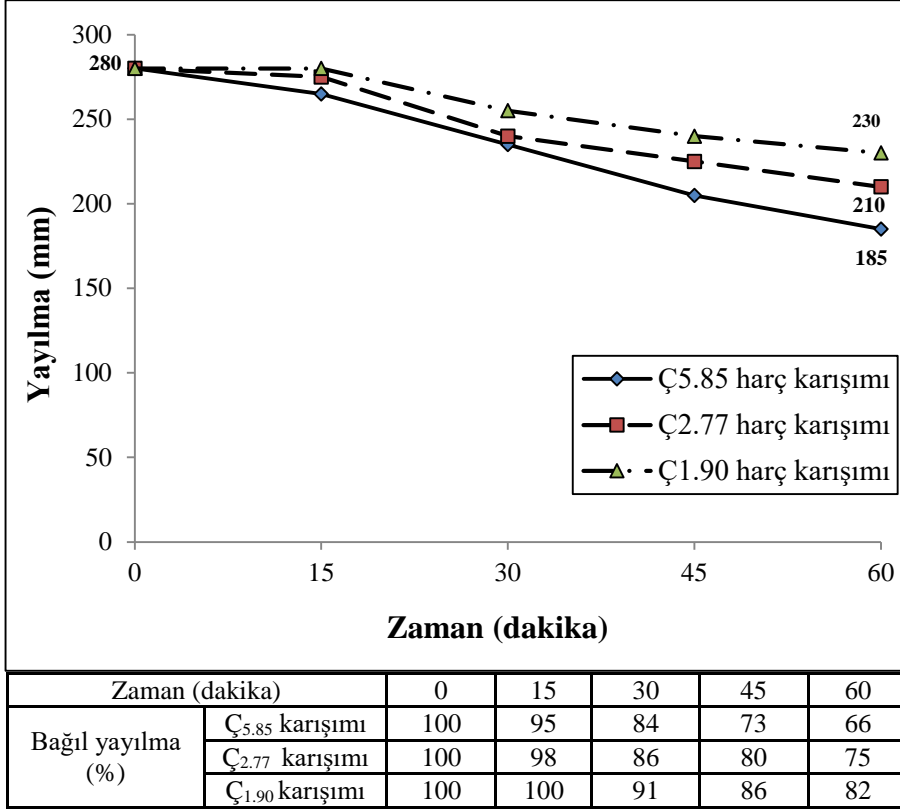
Çimento C₃A içeriğinin harç karışımının yayılmasına olan etkisini incelemek amacı ile C₃A içeriği farklı üç çimento ile su azaltıcı katkı içermeyen ASTM C109 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" standardına uygun harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların yayılması ölçülerek çimento C₃A oranının yayılmaya etkisi incelenmiştir. Daha sonra, söz konusu karışımlara çimento ağırlığının %0.1 ile %0.5'i arasında değişen 5 farklı oranda su azaltıcı katkı eklenerek toplam 24 adet karışımın yayılması incelenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.53'te gösterilmiştir. Su azaltıcı katkı içermeyen karışımlarda Ç_{5.85} çimentodan üretilen karışım en düşük yayılma göstermiştir. Katkı içermeyen söz konusu harç karışımı, Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} çimentoları içeren karışımlara kıyasla sırasıyla %5 ve %12 daha az yayılma göstermiştir. Beklenildiği gibi, katkı kullanımı ile ve kullanım oranının artışıyla her üç seri karışımının da yayılması artmıştır. Ancak, tüm katkı dozajlarında Ç_{1.90} karışımı en fazla yayılmayı göstermiştir. Katkı kullanım oranının %0.2den %0.5'e arttırılmasıyla, Ç_{5.85}, Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} çimentoları içeren karışımların yayılması sırasıyla, %55, %60 ve %71 oranlarında artmıştır. Çimento ağırlığının %0.5'i kadar katkı içeren Ç_{1.90} karışımının yayılması Ç_{2.77} ve Ç_{5.85} karışımlarına kıyasla sırasıyla %15 ve %25 daha fazla olmuştur.



Şekil 4.53. Harç karışımlarının yayılma-katkı kullanım oranı ilişkisi

Harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değişimini incelemek için 280 mm olarak hedef bir yayılma değeri belirlenmiştir. Her serinin 280 mm yayılma değerini hangi katkı kullanım oranında sağladığı Şekil 4.53'den tespit edilmiştir. Ç_{5.85} karışımı söz konusu yayılmayı %0.5 katkı kullanım oranında, Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} karışımları ise sırasıyla %0.4 ve %0.34 katkı kullanım oranlarında sağlamıştır.

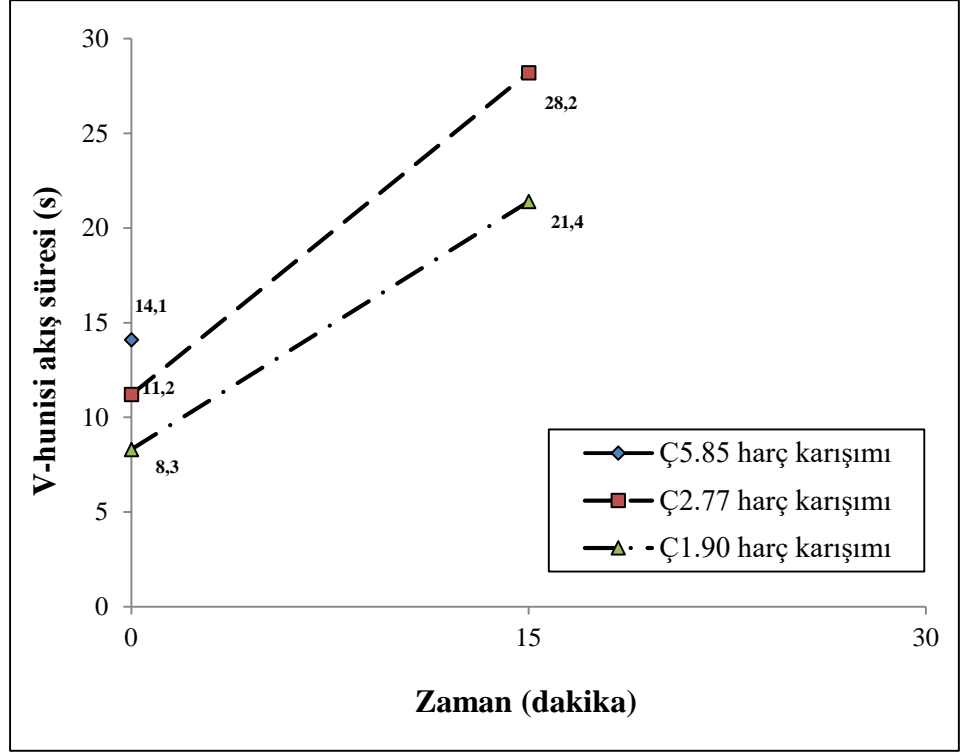
Tespit edilen katkı kullanım oranlarında, farklı çimento içeren üç harç karışımı tekrardan hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların her 15 dakikada bir 60 dakika boyunca yayılması ölçülmüştür. Bekletilen karışımlar yayılma ölçümünden 60 saniye önce tekrar mikserde karıştırılmıştır. Karışımların zaman bağlı yayılması ve başlangıç yayılma değerine göre bağlı yayılması Şekil 4.54'te verilmiştir.



Şekil 4.54. Harç karışımlarının yayılma-zaman ilişkisi ve bağıl yayılması

Beklenildiği gibi, zamanla karışımların yayılma değeri azalmıştır. Ancak, Ç_{5.85} karışımı 60 dakika bekleme sonrası diğer karışımlara kıyasla en fazla yayılma kaybı göstermiştir. Ç_{5.85}, Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} karışımlarında 60 dakika bekleme sonrası sırasıyla, %34, %25 ve % 18 yayılma kaybı meydana gelmiştir. Ç_{1.90} karışımında 60 dakika bekleme sonrası Ç_{2.77} ve Ç_{5.85} karışımlara kıyasla sırasıyla, %10 ve %20 daha az yayılma kaybı kaydedilmiştir.

Karışımların zaman bağılı V-hunisi akış süresi değişimini incelemek amacı ile 280 mm yayılmaya sahip üç harç karışımının V-hunisi akış süresi ölçülmüştür. Bu işlem 15 dakika bekletildikten sonra tekrarlanmıştır. Bu süre sonunda Ç_{5.85} karışımının akmadığı görülmüştür. Diğer karışımların akma süreleri ise Şekil 4.55'te gösterilmiştir. 30 dakika bekleme sonrasında ise karışımlarda akma tespit edilmemiştir.



Şekil 4.55. Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akış süresi değişimi

Ç_{5.85} karışımının başlangıçta V-hunisinden akması Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} çimentoya kıyasla %25 ve %70 daha uzun sürmüştür. 15 dakika bekleme sonrası Ç_{1.90} karışımının V-hunisi akış süresi Ç_{2.77} karışımına kıyasla %22 daha kısa olmuştur. Dolayısıyla, Ç_{1.90} karışımı V-hunisi akış süresi açısından en iyi performansı göstermiştir.

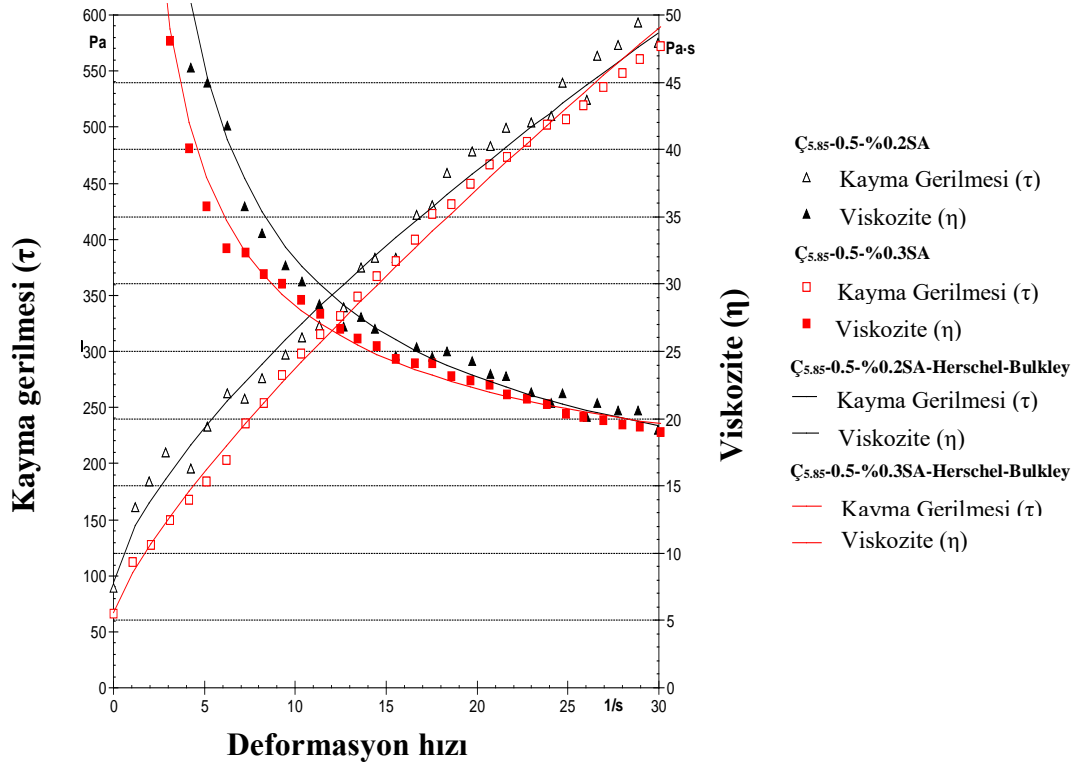
Reolojik parametrelerinin belirlenmesi için dört farklı S/Ç oranı ve dokuz farklı katkı dozajlarında harç karışımları hazırlanmıştır. Ayrışma gösteren, aşırı katkı olan ve deneye elverişli olan karışımlar belirlenmiştir. Kullanılan reometrenin kapasitesi ve hazırlanan harç karışımlarının durumu (aşırı katılık veya ayrışma) dikkate alınarak Çizelge 4.81'de gösterilen bir tarama gerçekleştirilmiştir. Tarama sonucu 0.5 S/Ç oranlarına sahip %0.2 ve %0.3 katkı içerikli ile 0.6 S/Ç oranına sahip %0 ve %0.1 katkı içerikli karışımların reolojik ölçümlere uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.81. Harç karışımlarının reolojik deneyleri için tarama

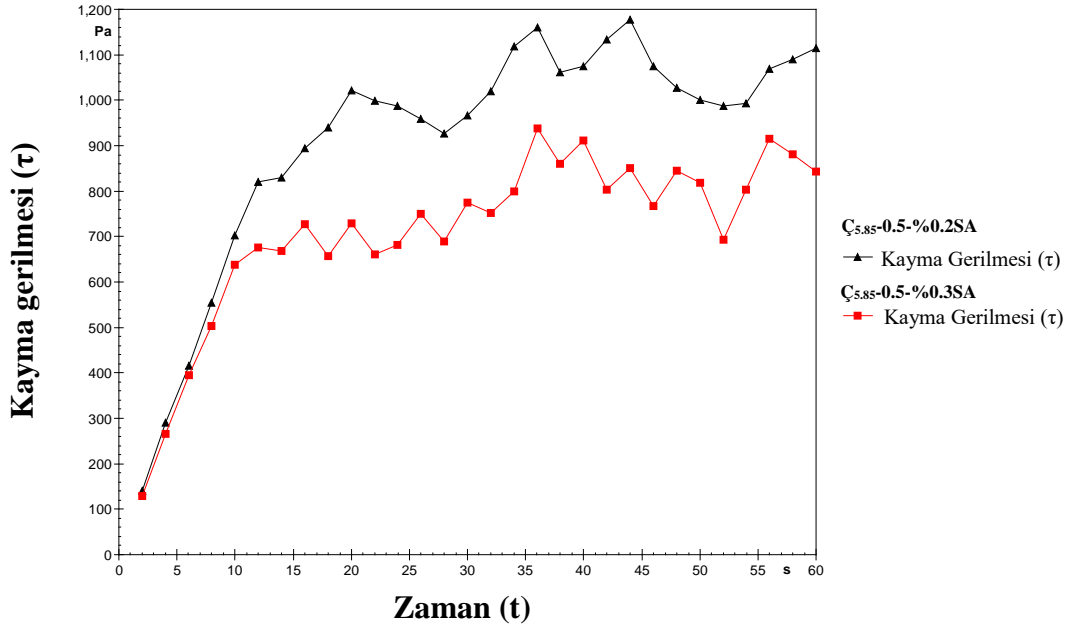
Katkı kullanım oranı (çimento ağırlığının %'si)	S/Ç oranı			
	0.40	0.50	0.60	0.80
	Ç _{1.90} karışımı/	Ç _{2.77} karışımı/	Ç _{5.85} karışımı	
%0	×/×/×	×/×/×	√/√/√	Δ/Δ/Δ
%0.1	×/×/×	×/×/×	√/√/√	Δ/Δ/Δ
%0.2	×/×/×	√/√/√	√/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ
%0.3	×/×/×	√/√/√	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ
%0.4	×/×/×	√/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ
%0.5	×/×/×	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ
%0.6	×/×/×	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ
%0.7	×/×/×	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ
%0.8	×/√/√	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ	Δ/Δ/Δ

× : aşırı katı, √: uygun, Δ:ayrışma

Harç karışımlarının da dinamik ve statik EKG ve nihai viskozitesi hamur karışımlarında uygulanan yöntemle benzer olarak belirlenmiştir. Burada örnek olarak Ç_{5.85} çimentoyu içeren 0.5 S/Ç oranında hazırlanan harç karışımının kayma gerilmesi-deformasyon hızı, viskozite değişimi ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafikleri Şekil 4.56 ve 4.57'de gösterilmiştir. Harç karışımlarının Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Şekillerden elde edilen dinamik, statik EKG ve nihai viskozite değerleri Çizelge 4.82'de özetlenmiştir.



Şekil 4.56. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.5 S/Ç oranına sahip Ç_{5,85} çimentolu harç karışımlarının kayma gerilmesi ve nihai viskozitesi



Şekil 4.57. Değişik dozajda su azaltıcı katkı içeren, 0.5 S/Ç oranına sahip Ç_{5,85} çimentolu harç karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi

Çizelge 4.82. Harç karışımlarının reolojik özellikleri

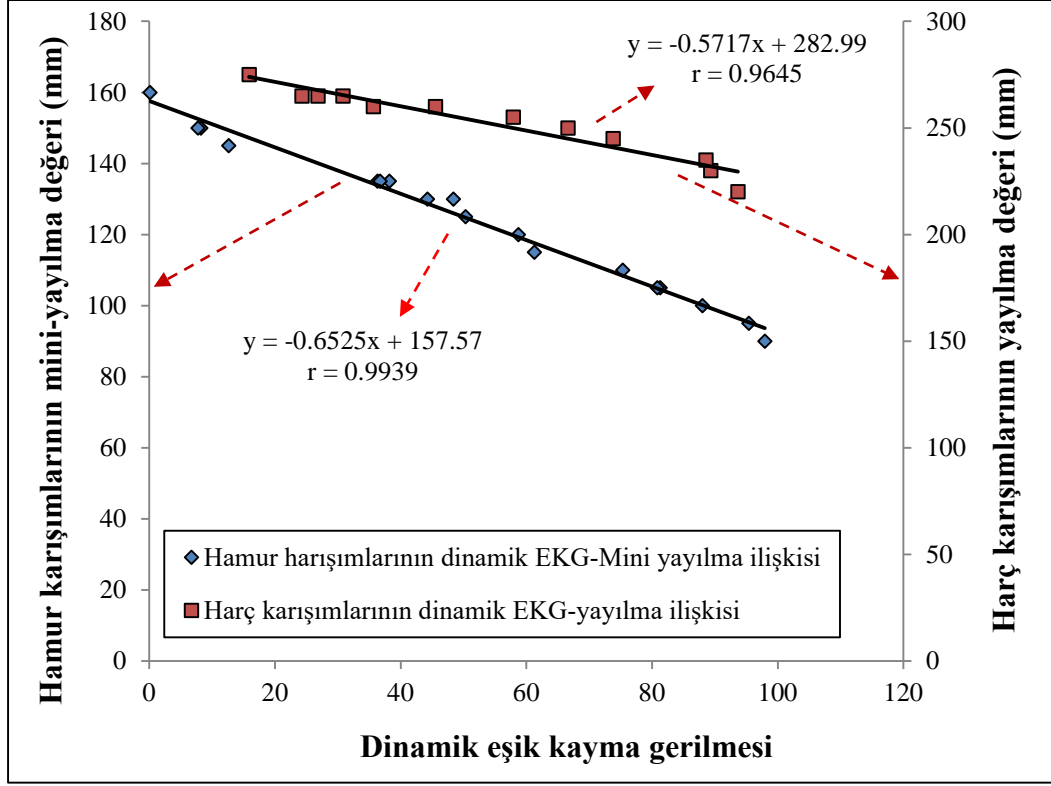
S/Ç oranı	Karışım	Reolojik özellikleri	Katkı kullanım oranı (çimento ağırlığının %'si)				
			%0	%0.1	%0.2	%0.3	
0.5	Ç _{5.85} *	EKG (Pa)**	Dinamik	-	-	93.64	66.62
			Statik	-	-	1177.4	937.6
		Nihai viskozite (Pa.s)	-	-	19.61	19.21	
	Ç _{2.77}	EKG (Pa)	Dinamik	-	-	89.33	35.66
			Statik	-	-	979.2	691.6
		Nihai viskozite (Pa.s)	-	-	19.34	14.08	
	Ç _{1.90}	EKG (Pa)	Dinamik	-	-	73.79	26.81
			Statik	-	-	882.04	519.8
		Nihai viskozite (Pa.s)	-	-	18.07	13.79	
0.6	Ç _{5.85} *	EKG (Pa)	Dinamik	88.57	30.80	-	-
			Statik	997.1	422.4	-	-
		Nihai viskozite (Pa.s)	9.03	6.05	-	-	
	Ç _{2.77}	EKG (Pa)	Dinamik	57.87	24.26	-	-
			Statik	741.6	309.6	-	-
		Nihai viskozite (Pa.s)	6.35	5.12	-	-	
	Ç _{1.90}	EKG (Pa)	Dinamik	45.54	15.87	-	-
			Statik	514.9	240.1	-	-
		Nihai viskozite (Pa.s)	6.08	4.51	-	-	

* Ç_{5.85}: %5.85 C₃A oranına sahip çimentodan üretilen harç karışımı, **EKG: eşik kayma gerilmesi

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, hamur karışımlarına benzer olarak S/Ç oranı ve katkı kullanım oranı artışıyla harç karışımlarının statik, dinamik EKG ve nihai viskozite değerleri azalmıştır. Hamur karışımlarına benzer olarak harç karışımlarında da reolojik özellikleri açısından en iyi ve en kötü performansı sırasıyla Ç_{1.90} ve Ç_{5.85} harç karışımı göstermiştir. Beklenildiği gibi karışımların örselenmeden durgun haldeki eşik kayma gerilmesi (statik EKG) hareket halindeki eşik kayma gerilmesine (dinamik EKG) nazaran çok yüksek bir değer almıştır. Katkı kullanımıyla ve kullanım oranının artışıyla EKG değerleri arasındaki fark azalmıştır. Tüm karışımlarda, S/Ç oranından bağımsız olarak, katkı kullanım miktarının artışıyla, dinamik EKG değerleri diğer iki reolojik parametreye kıyasla daha fazla düşüş göstermiştir.

Hamur karışımlarının dinamik eşik kayma gerilmesi-mini yayılma değeri ve harç karışımlarının dinamik eşik kayma gerilmesi-yayılma değeri ilişkileri Şekil 4.58'de gösterilmiştir. Her iki parametre arasında kuvvetli doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu şekilden de anlaşılmaktadır. Ancak, hamur karışımlarının dinamik EKG-mini yayılma değerleri arasındaki ilişkinin harç karışımlardaki benzer ilişkiden daha kuvvetli olduğu "r" değerinden anlaşılmaktadır. Bunun, hamur

karişimlarının harç karişimlarına kıyasla daha homojen olduğundan kaynaklandığı düşünölmektedir.



Şekil 4.58. Hamur karişimlarının dinamik EKG-mini yayılma değeri ilişkisi ve harç karişimlarının dinamik EKG-yayılma değeri ilişkisi

Çimento C₃A içeriğinin beton karişimlarının taze hal özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacı ile piyasada daha çok talep edilen, 225±5 mm sabit bir çökme değeri hedef olarak belirlenmiştir. İstenilen kıvamı sağlamak için değişik oranlarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. 1 m³ için gerekli düzeltilmiş malzeme miktarları Çizelge 4.83'te özetlenmiştir. Çizelgeden de göröldüğü gibi, hedef çökme değerini sağlamak için Ç_{5.85} beton karişımında 4.3 kg/m³ su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} beton karişımlarında söz konusu çökme değerini sağlamak için sırasıyla %5 ve %16 daha az katkı kullanılmıştır. Çimento türü değişimi ile beton karişımların hava içeriği çok fazla değişmemiştir. Karişımlara ait zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi sonuçları Çizelge 4.84'de bunların bağlı değerleri ise Şekil 4.59'da verilmiştir.

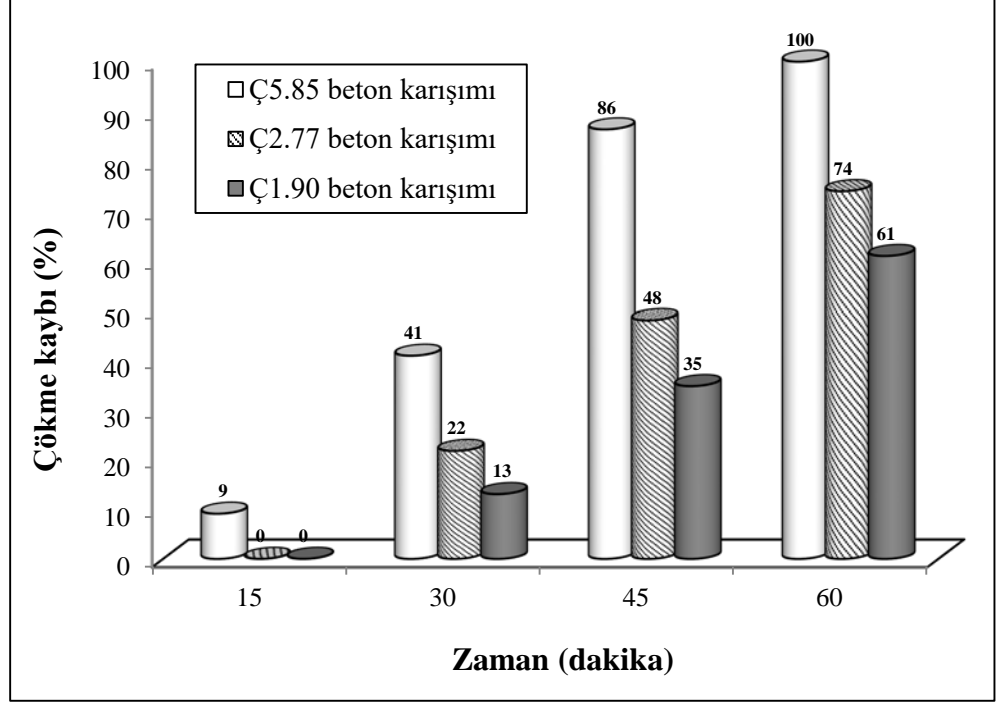
Çizelge 4.83. Düzeltilmiş karışım oranları (kg/m³) ve taze hal özellikleri

Karışım	Ç_{5.85}	Ç_{2.77}	Ç_{1.90}	
Çimento	392	393	393	
Su	176	177	177	
Süper akışkanlaştırıcı katkı	4.3	4.1	3.7	
Agrega (DKY)	0-3 mm	747	750	751
	0-5 mm	379	381	381
	5-15 mm	373	375	376
	15-25 mm	375	376	377
Birim hacim ağırlık (kg/m³)				
Teorik	2424.7	2427.5	2427.5	
Ölçülen-Taze	2441	2420	2420	
Ölçülen-Sertleşmiş (DKY)**	2519	2452	2455	
ΣHamur	572	574	574	
ΣHarç	1698	1705	1706	
Beton karışımlarının taze hal özellikleri				
Hava içeriği (%)	1.8	1.9	1.6	
Çökme değeri (mm)	220	230	230	
Yayılma değeri (mm)	480	490	490	

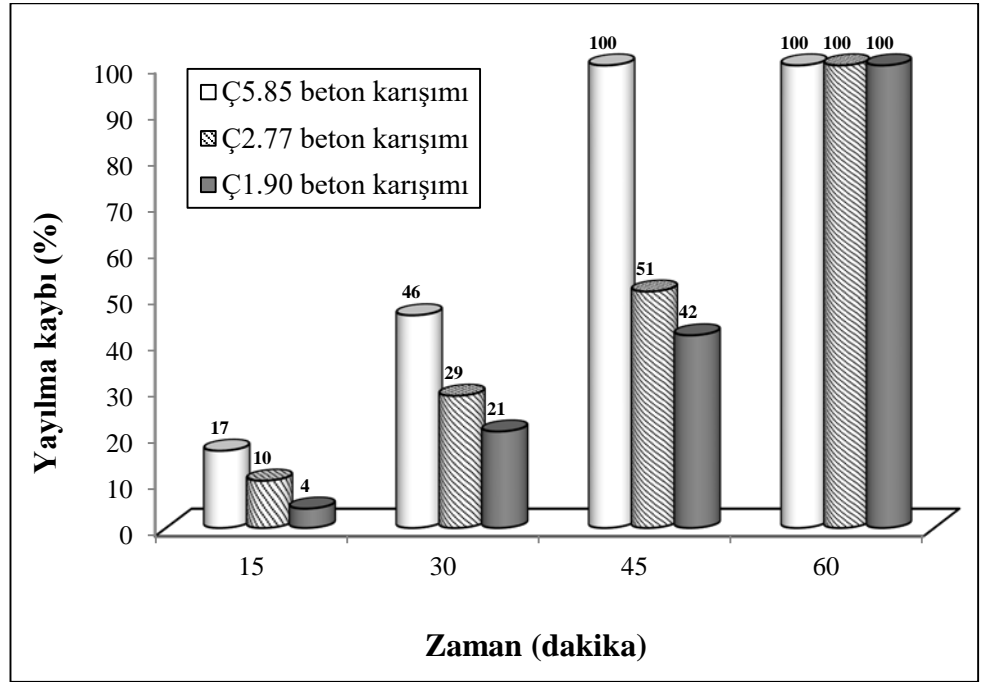
Çizelge 4.84. Beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi

		Zaman (dakika)				
		0	15	30	45	60
Çökme (mm)	Ç _{5.85} *	220	200	130	30	0
	Ç _{2.77}	230	230	180	120	60
	Ç _{1.90}	230	230	200	150	90
Yayılma (mm)	Ç _{5.85} *	480	400	260	-	-
	Ç _{2.77}	490	440	350	240	-
	Ç _{1.90}	480	460	380	280	-

* Ç_{5.85}: %5.85 C₃A oranına sahip çimentodan üretilen harç karışımı



(a)



(b)

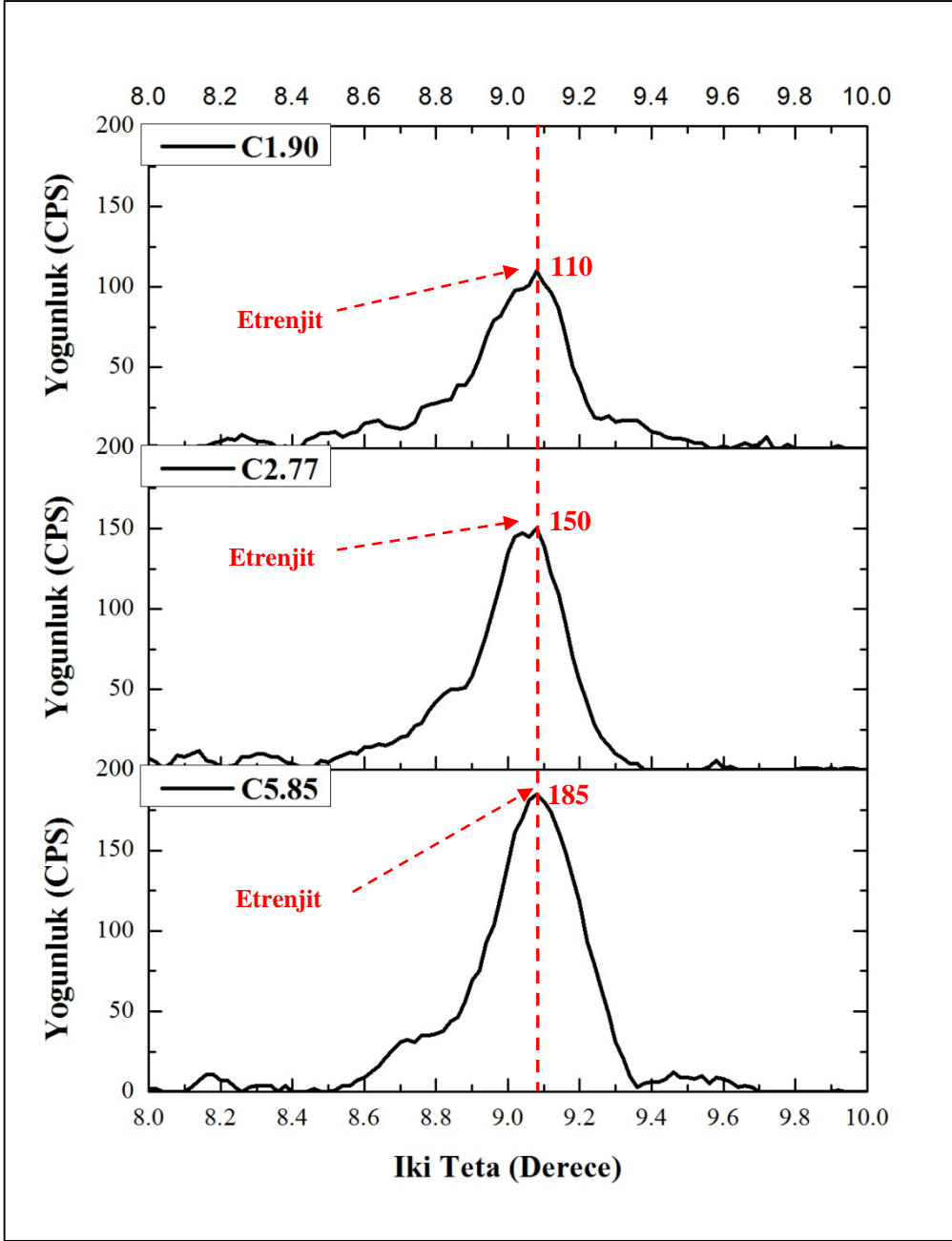
Şekil 4.59. Beton karışımlarının zaman bağılı a: çökme kaybı, b: yayılma kaybı

Beklenildiği gibi, zamanla karışımların çökme ve yayılması azalmıştır. İlk 30 dakikalık sürede Ç₁₉₀ karışımının çökme değeri kyada değer değişmemiştir.

Benzer davranış $\text{Ç}_{2.77}$ ve $\text{Ç}_{5.85}$ karışımlarında ilk 15 dakika da gözlemlenmiştir. Ancak, C_3A oranı en yüksek olan $\text{Ç}_{5.85}$ çimentosundan üretilen beton karışımı 45 dakika bekleme sonrası %86'lık bir çökme kaybı göstermiştir. 60 dakika sonunda söz konusu karışım çökme göstermemiştir. $\text{Ç}_{2.77}$ ve $\text{Ç}_{1.90}$ karışımları ise aynı süre sonunda sırasıyla %71 ve %60 çökme kaybı göstermiştir. Yayılma deneyi açısından ilk 30 dakika bekleme sonrası $\text{Ç}_{5.85}$, $\text{Ç}_{2.77}$ ve $\text{Ç}_{1.90}$ karışımları sırasıyla, %46, %29 ve %21 yayılma kaybı göstermiştir. $\text{Ç}_{5.85}$ karışımı 45 dakika bekleme sonrası yayılmamıştır. Ancak, $\text{Ç}_{2.77}$ ve $\text{Ç}_{1.90}$ karışımı sırasıyla 240 ve 280 mm yayılma göstermiştir. Deney sonuçlarına göre beton karışımlarının taze hale özellikleri açısından en iyi ve en kötü performansı sırasıyla $\text{Ç}_{1.90}$ ve $\text{Ç}_{5.85}$ karışımı göstermiştir. Ayrıca, Şekil 4.59'dan da anlaşıldığı üzere her üç seri beton karışımlarında da zamana bağlı yayılma kaybı çökme kaybına kıyasla daha fazla olmuştur.

Taze hal özellikleri açısından $\text{Ç}_{5.85}$ çimentosu ile hazırlanan hamur, harç ve beton karışımları diğer çimentolar ile hazırlanan karışımlara kıyasla en düşük performansı gösterdiği deney sonuçlardan kanıtlanmıştır. Bunun, bir ölçüde bu çimentonun diğer iki çimentoya nazaran daha yüksek Blaine inceliğine sahip olması (Çizelge 3.6) dolayısıyla çimento hidrasyonunun daha hızlı gerçekleşmesi diğer ölçüde ise söz konusu çimentonun C_3A içeriğinin diğer çimentolara kıyasla daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bağlamda, en düşük C_3A içeriğine sahip $\text{Ç}_{1.90}$ çimentosundan üretilen hamur, harç ve beton karışımları taze hal ve reolojik özellikleri açısından en iyi performansı göstermiştir. Literatüre göre çimento C_3A bileşeninin fazla olması taze hal ve reolojik parametreleri açısından istenilmeyen durumdur (Perenchio et al., 1979; Aitcin, 2004). C_3A reaksiyonu sonucu oluşan iğnemsiz etrenjit kristalleri, karışıma eklenen su moleküllerini tüketerek sistemin işlenebilirliğini düşürür (Tagnit-Hamou and Aitcin, 1993; Prince et al., 2002). C_3A miktarı fazla olursa daha fazla kalsiyum sülfüalumino hidrat ürünleri oluşmaktadır. Üç çimentoya ait 12 saatlik hamurların XRD paternleri Şekil 4.60'da verilmiştir. Yüksek C_3A oranına sahip çimento hamurunda oluşan daha yüksek etrenjit piki bu hamurda daha fazla etrenjit kristallerinin oluşumunu göstermektedir. Ancak, su azaltıcı katkının bulunmasıyla katkı, çimento tanelerinin topaklaşmasını engelleyerek karışımın akışkanlığını sağlıyor. Buna ilaveten, C_3A bileşeninin üzerine tutunarak reaksiyonunu yavaşlatır, dolayısıyla, karışımın işlenebilirliğini kötü yönde etkileyen iğnemsiz etrenjitin oluşum hızını azaltır (Vernet and Noworyta, 1992; Ramachandran, 1995). Başka araştırmacılar su azaltıcı katkının bulunduğu

sistemde, iğnemsiz yapıda olan etrenjit yerine taze hal özellikleri açısından daha az zararlı olan kübik formunda masif etrenjit oluştuğunu öne sürmüştür (Basant, 1994; Prince et al., 2003). Yukarıdaki nedenlerden, tarafımızdan yapılan çalışmada katkı kullanım oranının %0.2'ye (çimento ağırlığının) kadar artışıyla karışımların taze hal ve reolojik özellikleri iyileşmiştir. C₃A miktarı fazla olan karışımlarda ise, su azaltıcı katkı etkisinin düşük C₃A'lı karışıma kıyasla biraz daha az olduğu deney sonuçlarından anlaşılmıştır. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir (Mailvaganam, 1979). Prince ve arkadaşlarına (2002) göre, erken yaşlarda C₃A bileşeni hidrasyonu, ortama etrenjit kristalleri oluşumunu sağlayan Al(OH)⁻⁴ iyonları bırakır. Dolayısıyla, sistemde etrenjit kristalleri oluşmaya başlar. Aynı araştırmacılara göre su azaltıcı katkı içeren karışımlarda, oluşmaya başlayan etrenjit kristalleri katkının bir kısmını kendi bünyesinde hapsederek tüketir. Böylece, katkının performansı düşer. Dolayısıyla karışımların taze hal özelliklerini olumsuz etkiler. Ayrıca yüksek C₃A içerikli sistemde, su azaltıcı katkının bu bileşen tarafından tutunması, reaktivite açısından ikinci sırada yer alan C₃S bileşeninin üzerinde tutunan katkı yüzdesini göreceli olarak azaltır. Bu olay, karışımın akışkanlığını azaltır (Chandra and Björnström, 2002).



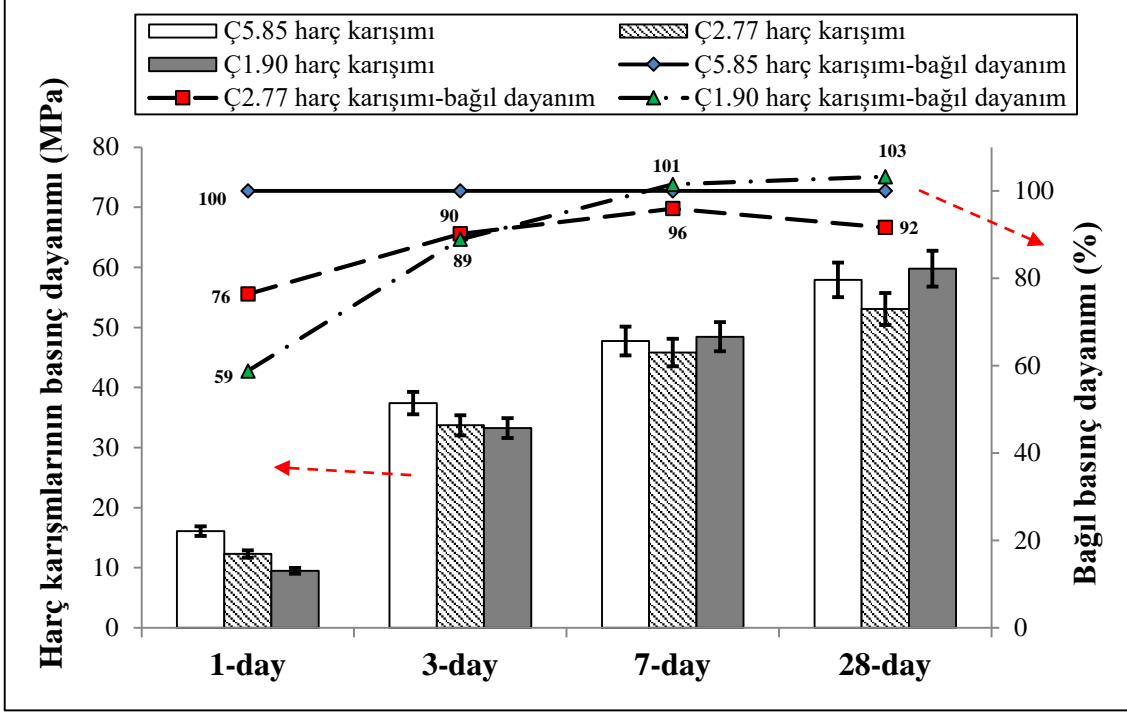
Şekil 4.60. Çimento hamurlarının XRD paterni, $2\theta = 8-10$ °C, Ettringite: $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$

S/Ç oranının artmasıyla beraber çimento hamuru ve harç karışımlarının taze hal ve reolojik özelliklerinin iyileşmesi deney sonuçlarından görülmüştür. Chandra ve Björnström'a (2002) göre karışımın S/Ç oranı boşluk çözeltisindeki iyon konsantrasyonunu kontrol etmektedir. Daha önce de vurgulandığı gibi, su azaltıcı katkının bir bölümü C_3A bileşeni tarafından tutunabilmektedir. Düşük S/Ç oranına sahip karışımlarda, katkının C_3A bileşeni tarafından tutunmasıyla

çözeltideki katkı miktarı azalarak işlenebilirlik olumsuz etkilenir. Ancak, S/Ç oranı yüksek olan karışımlarda, C₃S bileşeninin daha fazla hidrate olması sebebiyle ortama salınan Ca⁺² iyonu miktarı fazla olur. Bundan dolayı boşluk çözeltisindeki kirece doygunluk ve buna bağlı olarak akışkanlık artar.

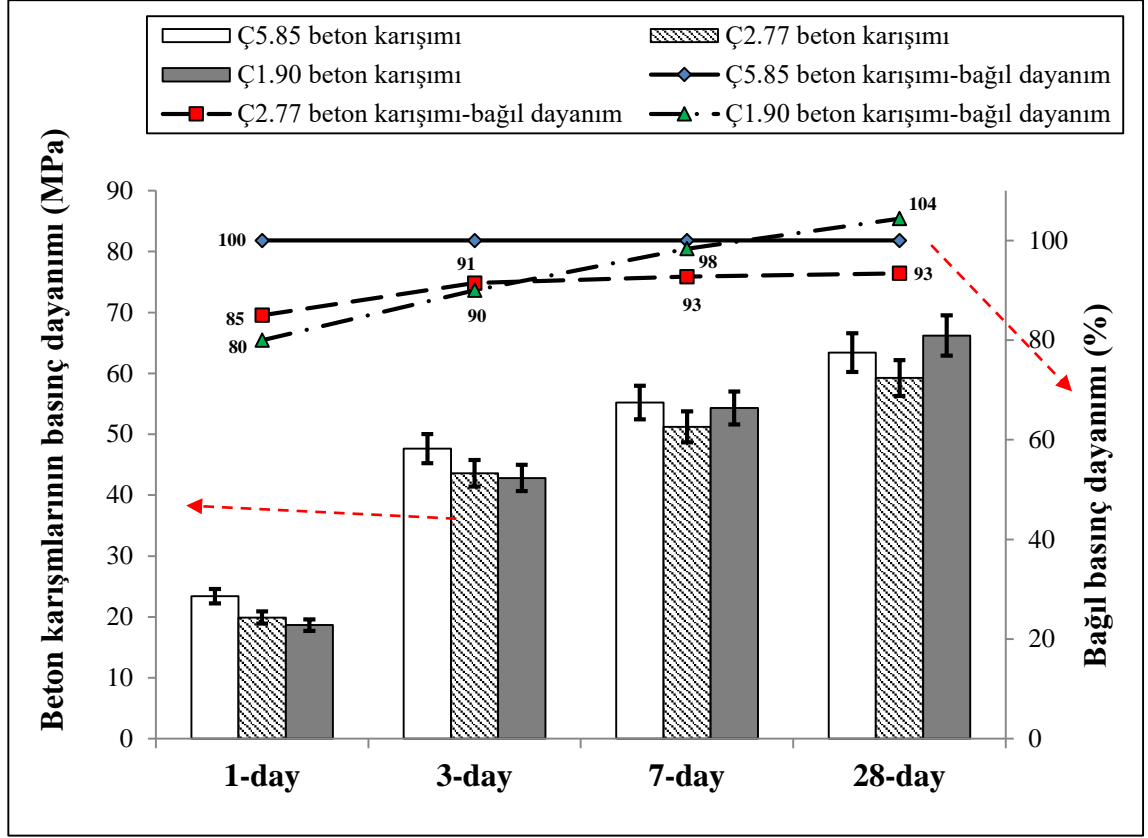
Basınç dayanımı

Çimento C₃A miktarının harç karışımlarının dayanım gelişmesine etkisini incelemek amacı ile söz konusu çimentoları içeren 280 mm yayılma değerine sahip harç karışımları hazırlanmıştır. Daha önce de vurgulandığı gibi istenilen yayılma değerini sağlamak için değişik oranlarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Harç karışımlarının 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve Ç_{5.85} çimentoyu içeren harç karışımına göre bağıl dayanımı sonuçları Şekil 4.61'de verilmiştir. Ç_{5.85} harç karışımının 1-günlük basınç dayanımı Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} karışımına kıyasla sırasıyla, %24 ve %41 daha fazla olmuştur. 3-günlük numunelerde ise bu oranın sırasıyla, %10 ve %11'e düştüğü gözlemlenmiştir. Ç_{2.77} harç karışımı başlangıçtan itibaren Ç_{5.85} karışımına kıyasla daha düşük dayanım göstermiştir. 28 gün bekleme sonrasında da Ç_{2.75} karışımının dayanım kazanım performansı Ç_{5.85} karışımının altında kalmıştır. Ancak, Ç_{1.90} karışımı erken yaşlarda Ç_{5.85} karışımına kıyasla daha az dayanım göstermesine rağmen 28 gün kürleme sonrası Ç_{5.85} karışımına kıyasla az da olsa bir miktar daha yüksek dayanım göstermiştir.



Şekil 4.61. Harç karışımlarının basınç dayanımı ve Ç_{5.85} karışımına göre bağıl dayanımı

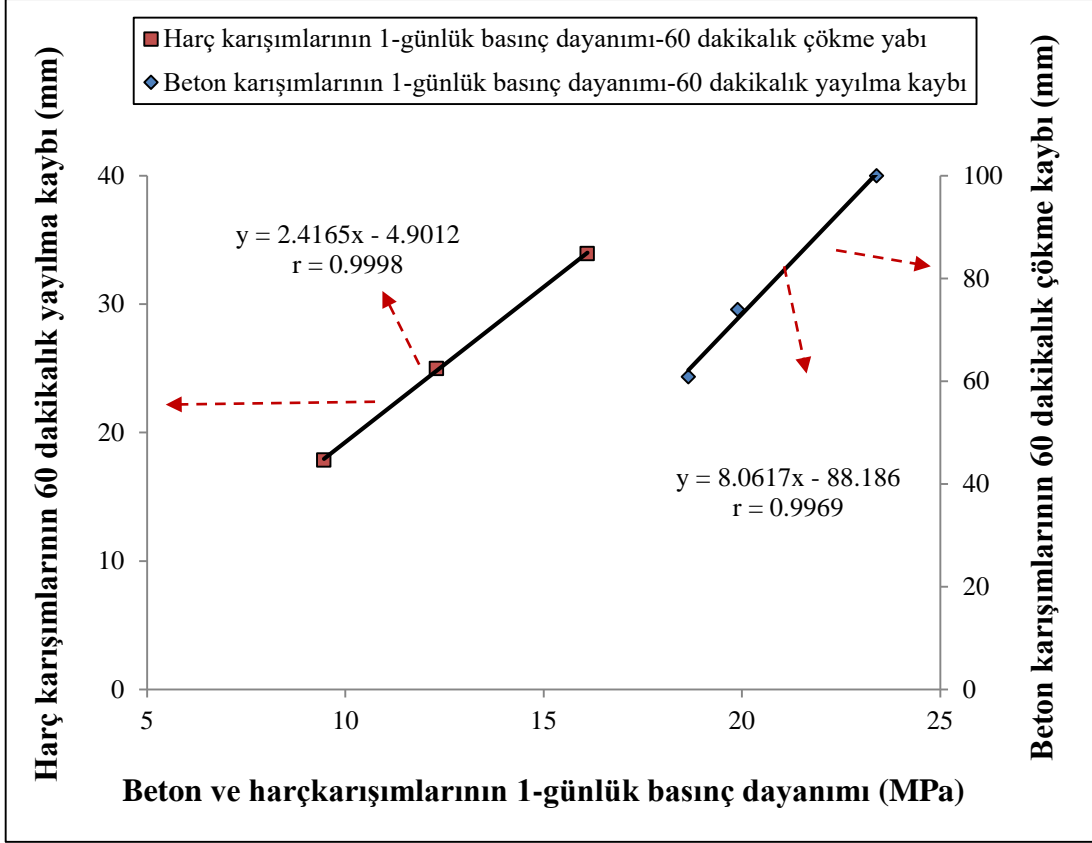
Çimento C₃A içeriğinin beton karışımlarının dayanım gelişmesine etkisini incelemek amacıyla söz konusu çimentoları içeren, 225±5 mm çökme değerine sahip, beton karışımları hazırlanmıştır. Söz konusu çökme değerini sağlamak için değişik oranlarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Beton karışımlarının 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve Ç_{5.85} çimentoyu içeren beton karışımına göre bağıl dayanımı sonuçları Şekil 4.62'de verilmiştir. Sonuçlarından da anlaşıldığı gibi, harç karışımlarına benzer beton karışımlarında da erken yaşlarda Ç_{5.85} karışımı basınç dayanımı açısından en iyi sonucu göstermiştir. Bu karışımın 1-günlük basınç dayanımı Ç_{2.77} ve Ç_{1.90} karışımına kıyasla sırasıyla, %15 ve %20 daha fazla olmuştur. Beton karışımlarında da erken yaşlarda Ç_{5.85} karışımına nazaran daha düşük dayanım gösteren Ç_{1.90} karışımı 28 günün sonunda daha yüksek dayanım göstermiştir.



Şekil 4.62. Beton karışımlarının basınç dayanımı ve Ç_{5.85} karışımına göre bağıl dayanımı

Harç karışımlarının 1-günlük basınç dayanımı-60 dakika bekleme sonrası yayılma kaybı oranı ve beton karışımlarının 1-günlük basınç dayanımı ile 60 dakika sonunda çökme kaybı ilişkileri Şekil 4.63'te gösterilmiştir. Beklenildiği gibi en hızlı kıvam kaybeden karışımın 1 günlük basınç dayanımı en yüksek olmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, dayanım ve kıvam kaybı arasında çok kuvvetli doğrusal ilişki mevcuttur. Ç_{5.85} karışımının 1-günlük dayanımı diğer karışımlara kıyasla daha yüksek olması, priz süresinin daha kısa olduğundan kaynaklanmaktadır. Söz konusu çimentonun priz süresinin kısalığı, Şekil 4.60'da görüldüğü gibi hidrasyonun ilk 12 saatinde daha fazla etrenjit oluşmasından meydana gelmektedir. Ancak, 1 günün ötesindeki yaşlarda karışımların dayanımı daha fazla kalsiyum silikat hidrat tarafından kontrol edildiğinden (Neville and Brooks, 2010; Mehta and Monteiro, 2010) ve çimentolar aynı hammaddelerden üretildiğinden, dayanımlar arasındaki fark azalmıştır. Erken yaşlarda Ç_{5.85} karışımına kıyasla çok az dayanım gösteren Ç_{1.90} karışımının ileri yaşlarda bu karışıma göre daha fazla dayanım göstermesi, Ç_{1.90} çimentonun çok düşük C₃A içeriğine (%1.90) sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çimentonun başlangıçta hidrasyon hızının diğer çimentolara kıyasla nispeten daha yavaş olmasından

dolayı, daha homojen hidrasyon ürünlerinin oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Beton ve harç karışımlarının dayanım kazanım davranışları birbirine benzer olduğu ancak, çimento C₃A içeriğinin harç karışımlarının dayanımı üzerinde daha çok etkisi olduğu deney sonuçlarından anlaşılmıştır.



Şekil 4.63. Harç ve beton karışımlarının 1-günlük basınç dayanımları 60 dakikalık yayılma ve çökme kaybı ilişkileri

4.2.3. Çimento eşdeğer alkali miktarının çimento-katkı uyumuna etkisi

ASTM C 1293 "Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction" standardına göre karışımın ASR potansiyelini ölçmek amacı ile toplam alkali miktarı %1.3'ün altında olduğu durumda, karışımlara dışarıdan NaOH ilavesi yapılmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmada, dışarıdan NaOH eklenmesinin karışımların kıvam kaybını ciddi derecede arttırdığı görülmüştür. Bu durum, karışımın yerleştirme ve sıkıştırılmasını zorlaştırdığı için, numunenin geçirgenliğini arttırabilir. ASR gibi durabilite deneylerinde karışımın geçirgenliği deney sonuçlarını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Bu çalışmada, düşük ve yüksek alkali içerikli iki adet CEMI 42.5R tipi çimentosu kullanarak hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. Düşük alkalili çimento içeren karışıma, üç farklı oranda NaOH ilavesiyle, toplam beş $SO_3/(Na_2O)_{eş}$ oranına sahip hamur ve harç karışımı üretilmiştir. Çimentonun $SO_3/(Na_2O)_{eş}$ oranının azalması hamur ve harç karışımlarının taze hal özeliği ve basınç dayanımına olumsuz etkisi olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla, ASTM C 1293 standardına göre hazırlanan karışımların eşit işlenebilirlikte olması sağlanmalıdır. Bu bağlamda standart gözden geçirilmelidir.

4.2.3.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Taze hal özellikleri

Farklı $SO_3/Na_2O_{eş}$ oranına sahip karışımları üretmek için, düşük eşdeğer alkali oranına (0.63) sahip çimentoyu içeren karışıma, çimento ağırlığının %0.21 , %0.41 ve %0.63'ü kadar NaOH karışım suyunda çözünerek karışıma ilave edilmiştir. Böylece, %0.63 ve %1.04 eşdeğer alkali oranına sahip karışımlara ilaveten toplam eşdeğer alkali oranı %0.84, %1.04 ve %1.26 olan karışımlar da hazırlanmıştır. Böylece, farklı $SO_3/Na_2O_{eş}$ oranına sahip beşer hamur ve harç karışımları üretilmiştir. Karışımların isimlendirilmesi, çimento tipine (yüksek alkalili, HA- düşük alkalili, LA), çimentonun eşdeğer alkali oranına ve dışarıdan ilave edilen NaOH oranına göre yapılmıştır. Örneğin %0.63 eşdeğer alkali oranına sahip düşük alkalili (LA) çimentodan üretilen, dışarıdan NaOH ilave edilmeyen karışım $LA_{(0.63+0)}$ olarak gösterilmiştir. Buna göre, aynı çimentodan üretilen,

çimento ağırlığının %0.21'i kadar NaOH ilave edilen karışım LA_(0.63+0.21) olarak adlandırılmıştır.

Su azaltıcı katkı içermeyen ve çimento ağırlığının %0.2'si kadar su azaltıcı katkı içeren hamur karışımlarının başlangıç ve bitiş priz süreleri Çizelge 4.85'te verilmiştir. Çizelge 4.85'te görüldüğü gibi karışımlar arasında, NaOH içermeyen LA_(0.63+0) karışımının başlangıç ve bitiş priz süresi en uzun olmuştur.

Çizelge 4.85. Hamur karışımlarının başlangıç ve bitiş priz süreleri

Su azaltıcı katkı içermeyen hamur karışımları			
Hamur karışımı	Normal kıvam için su gereksinimi (g)	Priz süresi (Dakika)	
		Başlangıç priz	Bitiş priz
LA _(0.63+0)	141	190	290
LA _(0.63+0.21)	141.9	178	260
LA _(0.63+0.41)	142.3	149	203
LA _(0.63+0.63)	142.8	129	168
HA _(1.04+0)	142.4	150	246
Çimento ağırlığının %0.2'si kadar su azaltıcı katkı için hamur karışımları			
LA _(0.63+0)	138	220	322
LA _(0.63+0.21)	139.4	201	272
LA _(0.63+0.41)	140.3	167	214
LA _(0.63+0.63)	141.7	140	175
HA _(1.04+0)	140.15	171	266

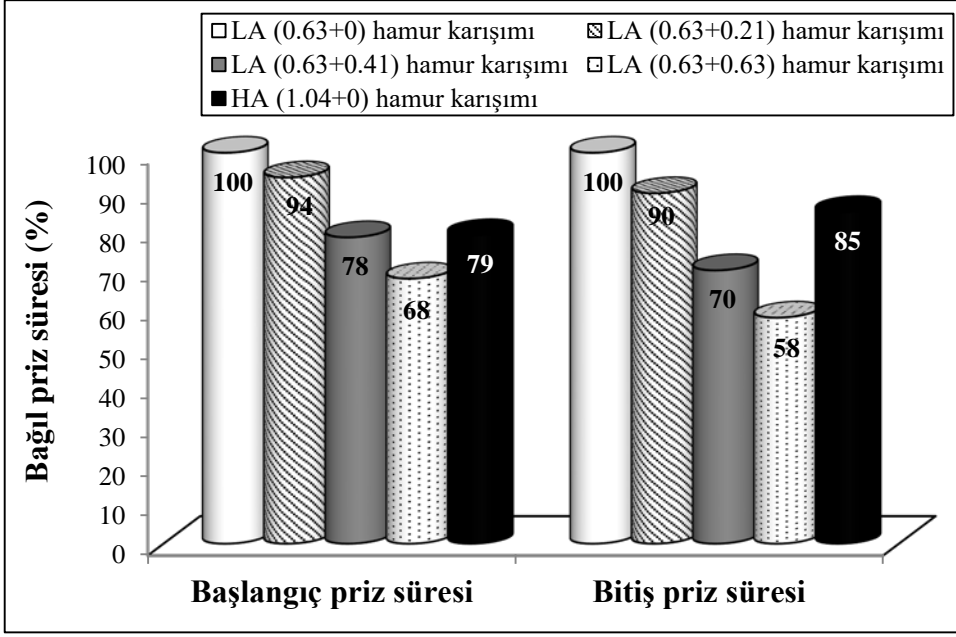
Su azaltıcı katkı içeren ve içermeyen karışımlarda, NaOH ilavesi ve kullanım oranının artışıyla, normal kıvam için gereken su miktarı artmıştır. Beklenildiği gibi, su azaltıcı katkı kullanımıyla söz konusu su miktarı azalmıştır. Ancak, karışıma NaOH eklenmesi ve oranının arttırılması normal kıvam için su gereksinimini arttırmıştır.

Şekil 4.64-a'dan da anlaşıldığı gibi, NaOH ilavesi ve ilave oranının artışıyla hamur karışımlarının priz süresi kısalmıştır. Su azaltıcı katkı içermeyen karışımlarda, çimento ağırlığının %0.21-%0.63'ü oranında NaOH eklenmesiyle, karışımların başlangıç priz süresi NaOH içermeyen LA_(0.63+0) karışımına kıyasla %6-%32 aralığında kısalmıştır. Priz süresindeki bu kısalma oranı, bitiş süresi için %10-%42 arasında olduğu Şekil 4.64-a'dan görülmektedir. Su azaltıcı katkı içeren karışımlarda söz konusu kısalma oranının başlangıç ve bitiş priz süreleri için sırasıyla, %9-%36 ve %18-%46 aralığında olduğu Şekil 4.64-b'de görülmektedir.

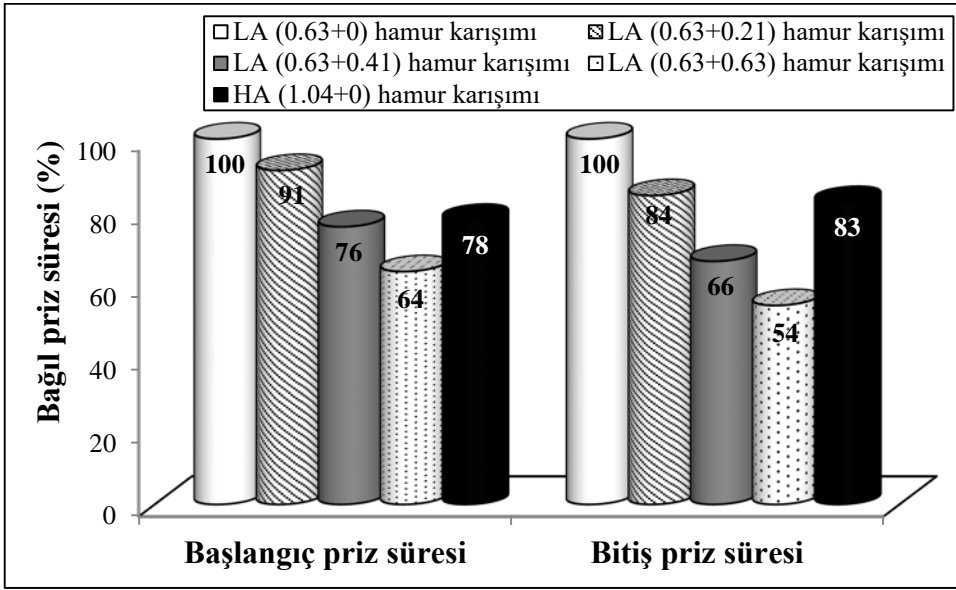
Su azaltıcı katkı kullanımıyla hamur karışımların priz süresi uzamıştır. Ancak, NaOH içeren karışımlarda, NaOH içermeyen karışımlara kıyasla katkı kullanımının priz süreleri üzerindeki etkisi daha az olmuştur. NaOH kullanım oranının artışıyla, su azaltıcı katkının priz geciktirme etkisi azalmıştır. Başka bir deyişle, sistemde NaOH çözeltisinin bulunması katkı performansını düşürmüştür.

Eşdeğer alkali oranı %1.04 olan NaOH içermeyen HA_(1.04+0) karışımının başlangıç ve bitiş priz süreleri NaOH içermeyen LA_(0.63+0) karışımına kıyasla sırasıyla, %20 ve %15 daha kısa olmuştur. HA çimentosunun alkali içeriği ve inceliği, LA çimentosuna göre daha fazladır. HA_(1.04+0) karışımı priz süreleri açısından, çimento ağırlığının %0.41'i kadar NaOH eklenerek toplam aynı eşdeğer alkali oranına (1.04) getirilen LA_(0.63+0.41) karışımına benzer davranış sergilemiştir.

Farklı oranlarda su azaltıcı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılmaları ve sıcaklığı Çizelge 4.86'da verilmiştir. Ayrıca, katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi sonuçları Şekil 4.65'te gösterilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, NaOH içeriğinden bağımsız olarak su azaltıcı katkı oranının artışıyla Marsh-hunisi akış süresi kısalmıştır. Belli bir katkı dozajının üstünde katkı kullanım oranının artmasına rağmen hamur karışımlarının akış süresi çok fazla değişiklik göstermemiştir. Doygunluk noktası, katkının kullanım oranının artışıyla, birbirini izleyen iki akış süresi değerinin arasındaki fark 5 saniyenin altında olduğu nokta olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.65'ten anlaşıldığı gibi, LA_(0.63+0) karışımı diğer karışımlara kıyasla Marsh-hunisinden en hızlı akan karışım olmuştur. Bu karışımın, doyum noktası katkı/çimento oranının %1 olduğu durumda gerçekleşmiştir. HA_(1.04+0) karışımında ise, doyum noktası, katkı/çimento oranının %1.25 olduğunda meydana gelmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.64. Hamur karışımların başlangıç ve bitiş priz süreleri, a: su azaltıcı katkı içermeyen karışımlar, b: çimento ağırlığının %0.2'si kadar su azaltıcı katkı içeren karışımlar

Çizelge 4.86. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayıma ve sıcaklığı

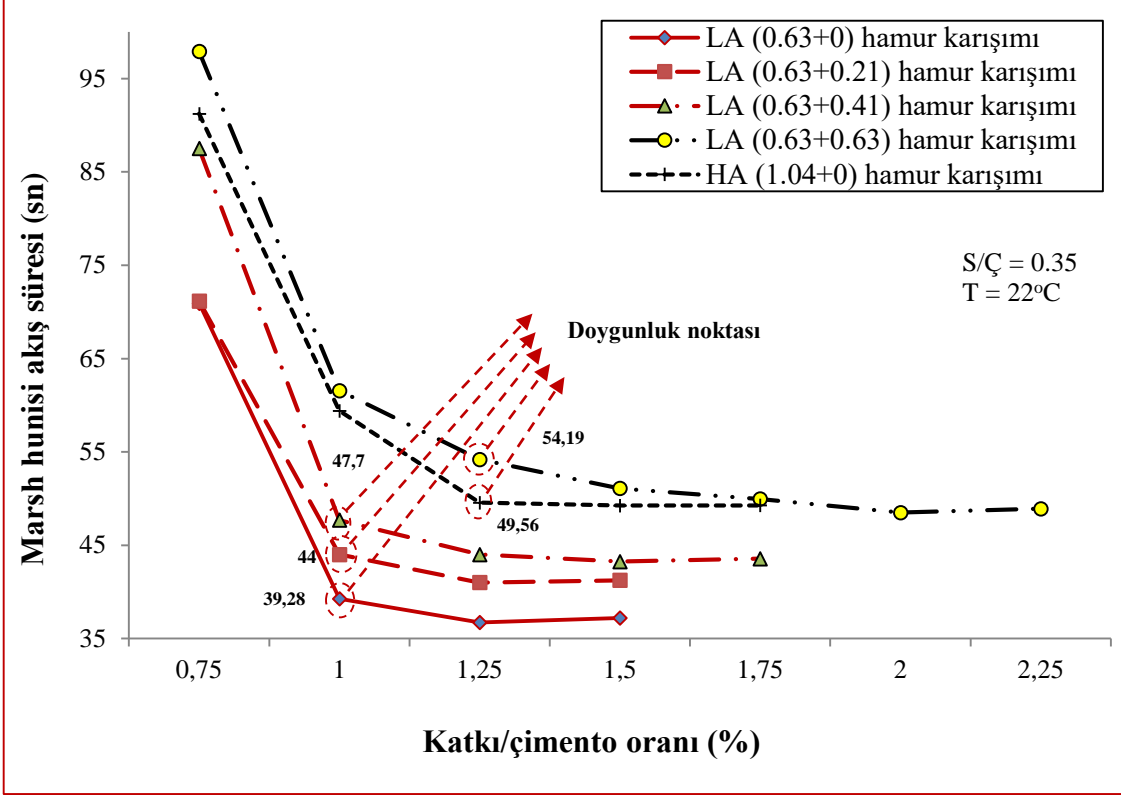
Deney	Hamur karışımı	Katkı/çimento oranı (%)						
		0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25
Marsh-hunisi akış süresi (s)	LA _(0.63+0)	70.9	39.3	36.7	37.2	Ayrıştı	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.21)	71.2	44	41	41.3	Ayrıştı	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.41)	87.5	47.7	44.0	43.3	43.6	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.63)	97.9	61.6	54.2	51.1	50	48.5	48.9
	HA _(1.04+0)	91.2	59.4	49.6	49.3	49.3	Ayrıştı	Ayrıştı
Mini-yayıma (mm)	LA _(0.63+0)	150	170	180	180	Ayrıştı	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.21)	140	160	175	175	Ayrıştı	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.41)	135	155	170	170	175	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.63)	120	140	155	160	165	175	180
	HA _(1.04+0)	130	150	165	170	170	Ayrıştı	Ayrıştı
Sıcaklık (°C)	LA _(0.63+0)	25.5	25.3	26	25.5	Ayrıştı	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.21)	27	27.1	27.2	26.9	Ayrıştı	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.41)	27.4	27.4	27.4	27.1	27.2	Ayrıştı	Ayrıştı
	LA _(0.63+0.63)	29.5	29.7	29.5	29.7	29.5	29.4	29.9
	HA _(1.04+0)	27.6	27.9	27.5	27.8	27.6	Ayrıştı	Ayrıştı

LA_(0.63+0) karışımına çimento ağırlığının %0.41'i kadar NaOH ilavesiyle, karışımların doyumluk noktasına karşı gelen katkı dozajı değişmemiştir. Ancak, doyumluk noktasındaki akış süreleri %21 oranında artmıştır. NaOH içeriği çimento ağırlığının %0.63'üne yükseldiğinde, karışımın doyumluk noktası %1 katkı/çimento oranından %1.25'e değişmiştir. Ayrıca, doyumluk noktasındaki akış süresi LA_(0.63+0) karışımına kıyasla %38 oranında artmıştır.

%1.04 eşdeğer alkali oranına sahip, NaOH içermeyen HA_(1.04+0) karışımı hem doyumluk noktası açısından hem de bu noktadaki akış süresi açısından NaOH ilavesiyle toplam eşdeğer alkali oranı aynı seviyeye yükseltilen LA_(0.63+0.41) karışımına kıyasla daha düşük performans göstermiştir. NaOH oranı en yüksek olan LA_(0.63+0.63) karışımı Marsh-hunisi akış süresi açısından en düşük performansı göstermiştir.

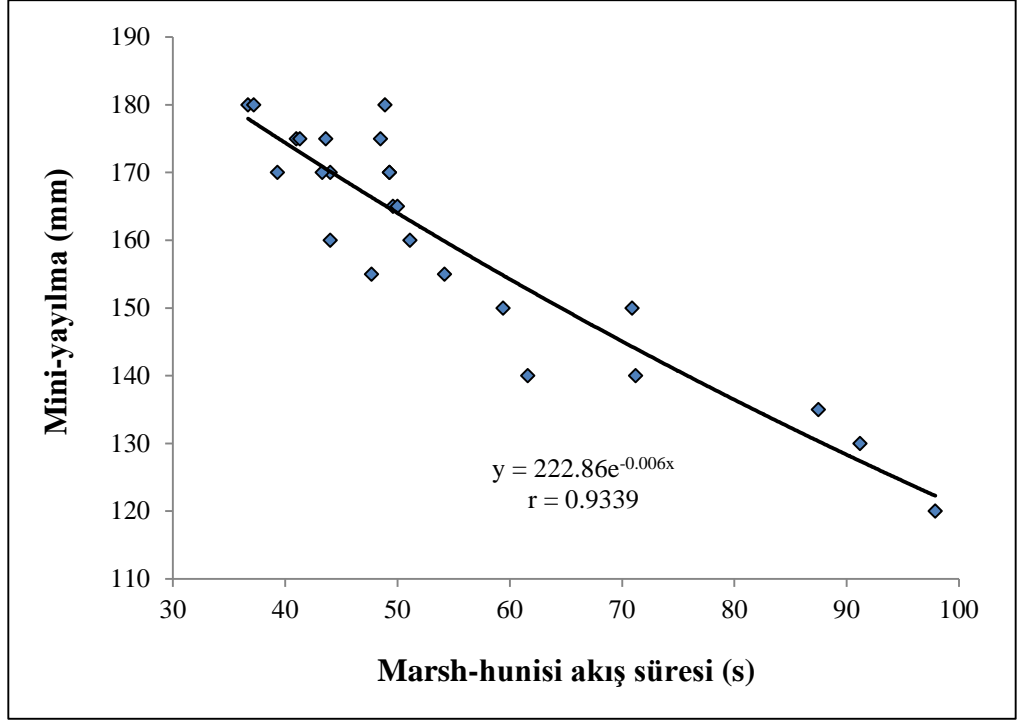
NaOH içeriğinden bağımsız olarak, katkı miktarının artışıyla, karışımların mini-yayıma değerleri artmıştır. Belli bir katkı dozajından sonra, karışımların mini-yayıması kayda değer değişiklik göstermemiştir. Bunun üstünde katkı dozajlarında ise karışımında ayrışma meydana gelmiştir. NaOH içeriğinin artışıyla, karışımların mini-yayıması azalmıştır. Burada da en fazla NaOH içeren LA_(0.63+0.63) karışımı yayılma açısından en düşük performansı göstermiştir. En iyi

yayımla/akma performansı $LA_{(0.63+0)}$ karışımına ait olmuştur. Bu karışım düşük alkali çimentodan üretilmiş ve NaOH içermemektedir. Katkı miktarından bağımsız olarak, NaOH ilavesiyle ve ilave oranının artışıyla, karışımların sıcaklığı da artmıştır. Örneğin, $LA_{(0.63+0)}$ karışımına çimento ağırlığının %0.63'ü kadar NaOH ilavesiyle karışım sıcaklığında 4 °C'lik bir artış gözlemlenmiştir.



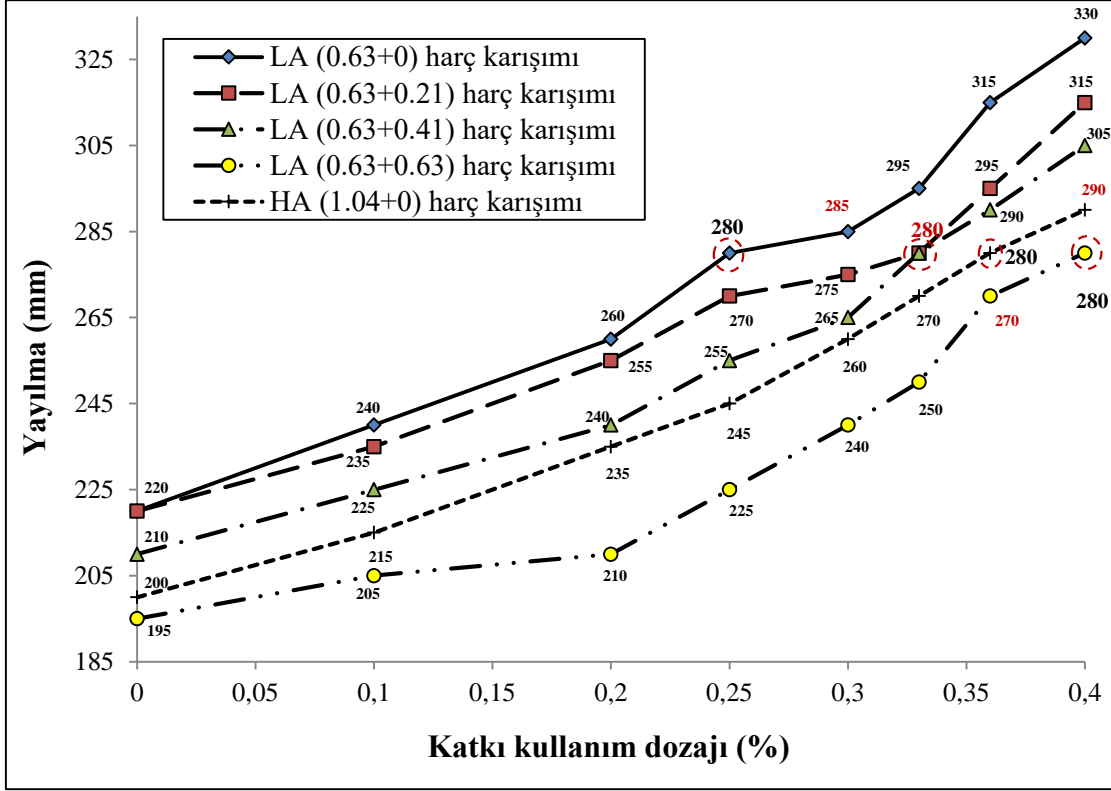
Şekil 4.65. Hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi

Bunlara ilaveten, hamur karışımlarının mini-yayımla ve Marsh-hunisi akış süresi ilişkisi Şekil 4.66'te gösterilmiştir. Karışımların Marsh-hunisi akış süresi ve mini yayılması arasında kuvvetli bir üstel ilişkinin mevcut olduğu anlaşılmıştır.



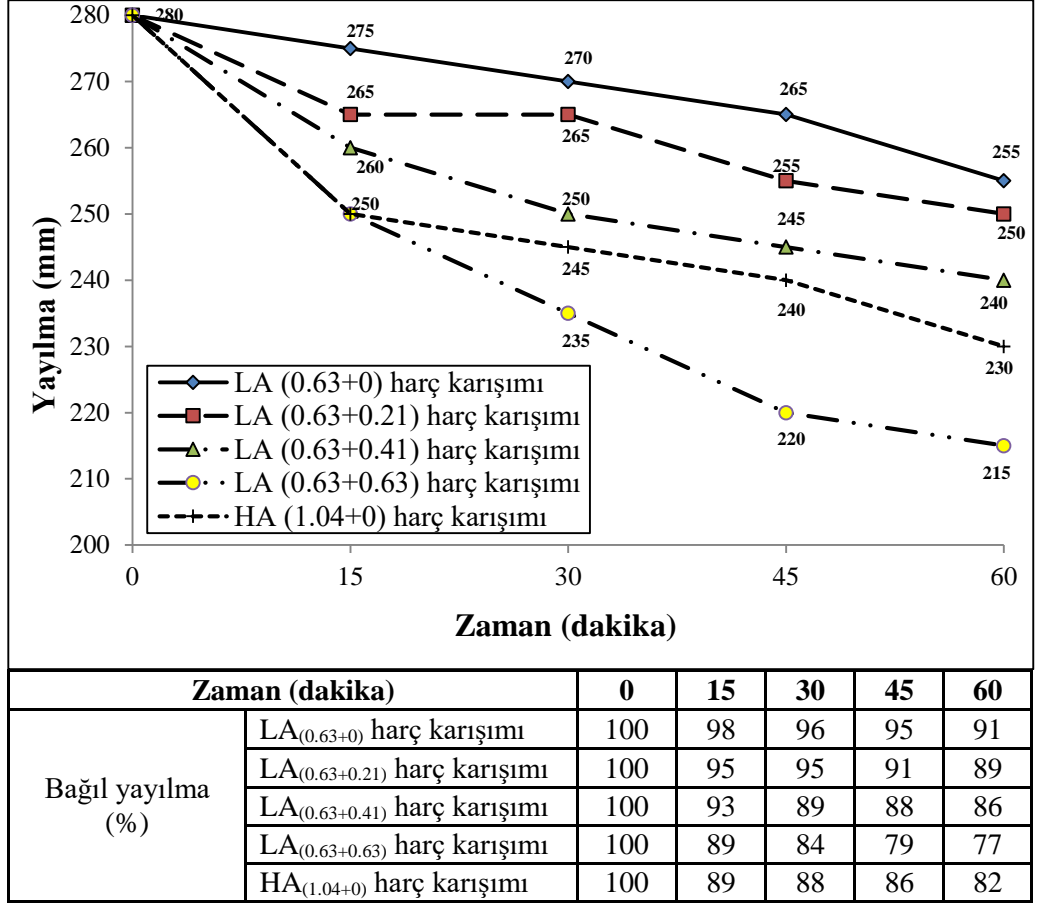
Şekil 4.66. Hamur karışımlarının mini-yayılma ve Marsh-hunisi akış süresi ilişkisi

Çimento eşdeğer alkali oranının harç karışımlarının yayılma değerine etkisini görmek amacı ile bu çimentoları kullanarak S/Ç oranı 0.485 ve kum/bağlayıcı oranı 2.75 olacak şekilde harç karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımların yayılma değeri ölçülmüştür. Daha sonra tüm karışımlarda çimento ağırlığının %0-%0.4 aralığında 8 farklı oranda su azaltıcı katkı eklenerek yeni karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların su azaltıcı katkı kullanım dozajına bağlı olarak yayılması Şekil 4.67'de gösterilmiştir. Şekil 4.67'de de görüldüğü gibi, su azaltıcı katkı içermeyen karışımlarda eşdeğer alkali oranı en düşük olan $LA_{(0.63+0)}$ karışımı en fazla yayılmayı göstermiştir. $LA_{(0.63+0.63)}$ karışımı ise, yayılma açısından en kötü performansı sergilemiştir. Beklenildiği gibi, su azaltıcı katkı kullanım oranı artışıyla tüm karışımların yayılması artmıştır. Ancak, eşdeğer alkali oranının artışıyla su azaltıcı katkının harç karışımları üzerindeki performansı azalmıştır. Örneğin, çimento ağırlığının %0.4'ü kadar su azaltıcı katkı kullanılan karışımlarda, çimento toplam alkali oranı %0.63'den 1.26'ya yükselmesiyle karışımların yayılma değerinde %15'lik bir azalma meydana gelmiştir. $HA_{(1.04+0)}$ ve $LA_{(0.63+0.41)}$ karışımları aynı toplam eşdeğer alkali oranlarına sahip olmalarına rağmen $LA_{(0.63+0.41)}$ karışımı yayılma açısından daha iyi performansı göstermiştir.

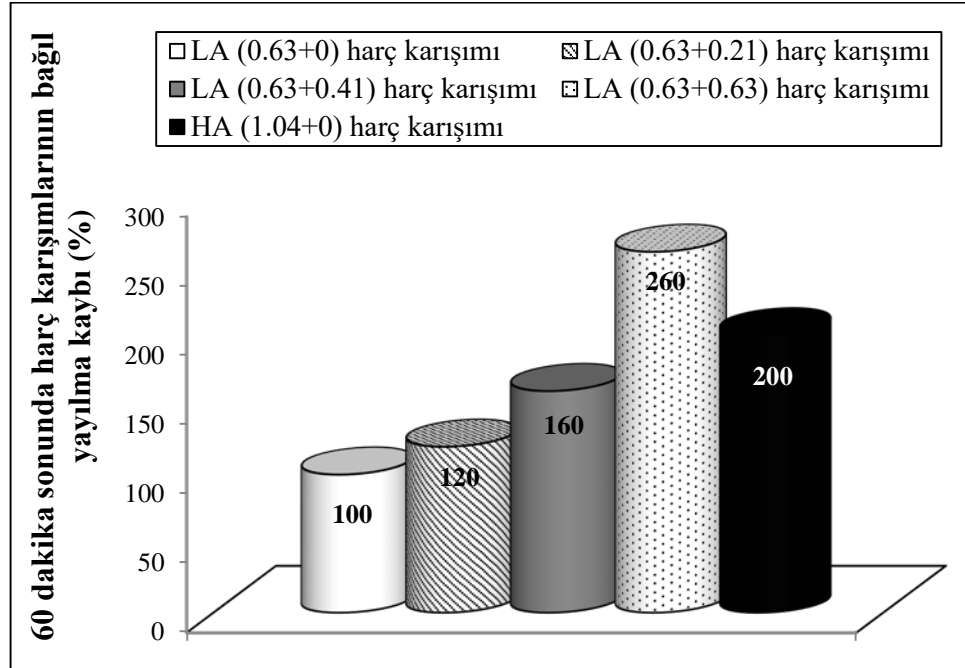


Şekil 4.67. Harç karışımlarının yayılma-katkı kullanım oranı ilişkisi

Karışımların zamana bağlı yayılma değişimini kıyaslamak amacıyla 280 mm olarak sabit yayılma değerine sahip karışımlar tekrardan hazırlanmıştır. Bu amaçla Şekil 4.68'deki sonuçlar dikkate alınarak, her karışımda söz konusu yayılmayı elde etmek için gereken su azaltıcı katkı gereksinimi tespit edilmiştir. Bu oran $LA_{(0.63+0)}$, $LA_{(0.63+0.21)}$, $LA_{(0.63+0.41)}$, $LA_{(0.63+0.63)}$ ve $HA_{(1.04+0)}$ karışımları için sırasıyla, çimento ağırlığının %0.25, 0.33, 0.33, 0.4 ve 0.36'sı olarak belirlenmiştir. Başlangıç yayılma değeri 280 mm olan bu karışımların zamana bağlı yayılma değişimi Şekil 4.68'de verilmiştir. Ayrıca, harç karışımlarının 60 dakika sonunda $LA_{(0.63+0)}$ karışımına göre bağıl yayılma kaybı Şekil 4.69'da gösterilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, 60 dakika sonunda $LA_{(0.63+0.63)}$ karışımı, %77 olarak en düşük bağıl yayılmayı (en yüksek yayılma kaybını) göstermiştir. Bu anlamda, $LA_{(0.63+0)}$ karışımının yayılma koruma performansı açısından en iyi karışım olduğu gözlemlenmiştir.

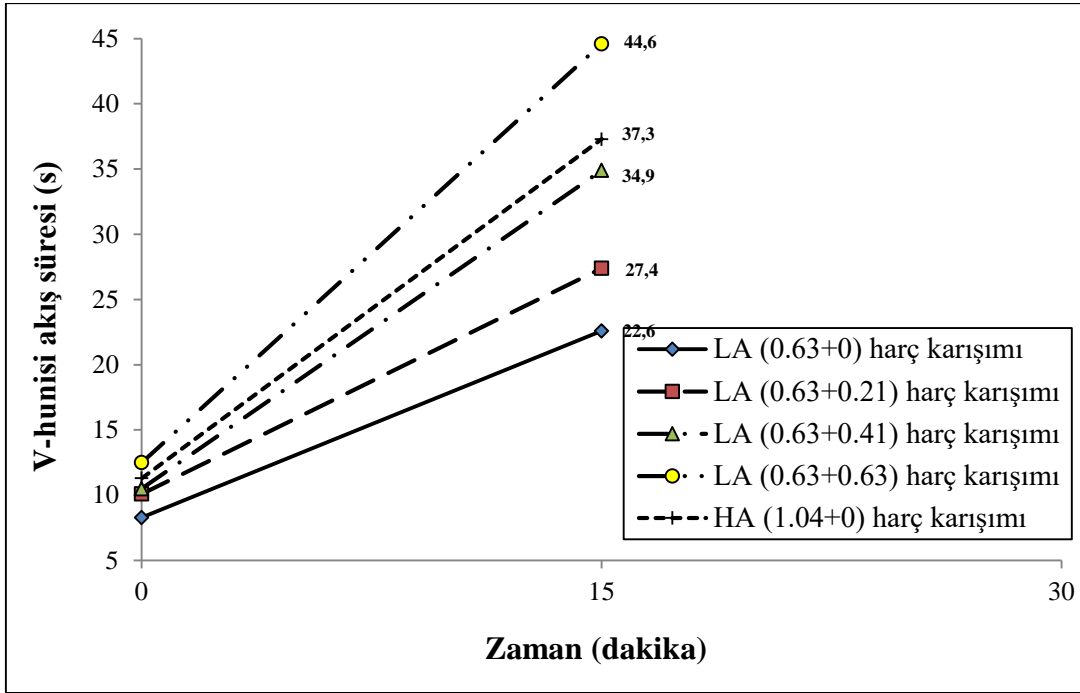


Şekil 4.68. Harç karışımlarının yayılma-zaman değişimi ve bağıl yayılması



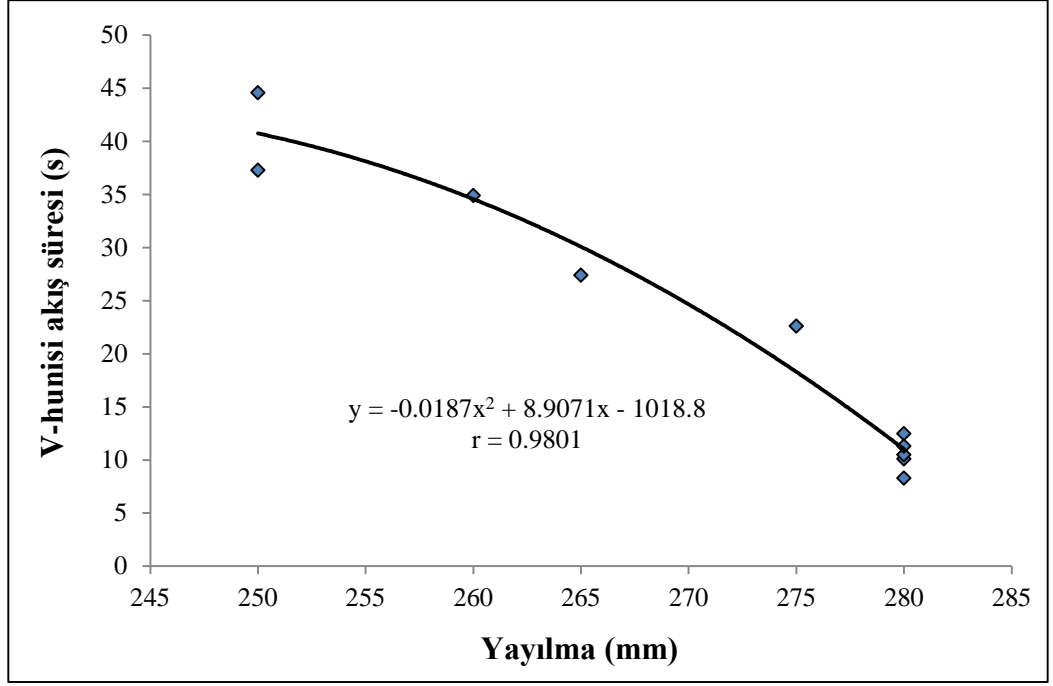
Şekil 4.69. Harç karışımlarının 60 dakika sonundaki bağıl yayılma kaybı (%)

Her bir çimento için 280 mm sabit yayılma değerine sahip harç karışımları tekrardan hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların zamana bağlı V-hunisi akış süreleri ölçülmüştür. Ancak, 30 dakika bekletilen karışımların V-hunisinden akmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, yalnız 15 dakika bekletilen karışımların akış süreleri ölçülebilmektedir. Sonuçlar Şekil 4.70'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eşdeğer alkali oranı en düşük olan $LA_{(0.63+0)}$ karışımı başlangıçtan itibaren V-hunisinden en hızlı akan karışım olarak tespit edilmiştir. Eşdeğer alkali oranı en yüksek olan $LA_{(0.63+0.63)}$ karışımı V-hunisi akış süresi açısından en kötü performansı göstermiştir. Bu karışımın 15 dakikalık V-hunisi akış süresi $LA_{(0.63+0)}$ karışımına nazaran yaklaşık 2 kat daha fazla olmuştur. Bu deneyde de eşit eşdeğer alkali oranına sahip olmalarına rağmen, $LA_{(0.63+0.43)}$ karışımı $HA_{(1.04+0)}$ karışımına göre daha başarılı bir sonuç göstermiştir.



Şekil 4.70. Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akış süreleri

Harç karışımlarının ilk 15 dakikalık periyottaki yayılma-V hunisi akış süresi ilişkisi Şekil 4.71'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi karışımların yayılma ve V-hunisi akış süresi değerleri arasında kuvvetli bir polinom ilişkisi mevcuttur.



Şekil 4.71. Harç karışımlarının ilk 15 dakika boyunca yayılma-V hunisi akış süresi ilişkisi

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, dışarıdan NaOH eklenmesiyle karışımın eşdeğer alkali oranının artışıyla hamur ve harç karışımlarının tüm taze hal özellikleri olumsuz etkilenmiştir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir (Aitcin, 2004; Jiang et al., 1999). Claisse ve arkadaşları (Claisse et al., 2001) çimento alkali miktarının artışıyla taze hal özelliklerinin olumsuz etkilenmesini, çimento alkali miktarının C₃A bileşeninin reaktivitesini arttırdığından kaynaklandığını söylemiştir. Griesser (2002), sistemde alkali miktarını artmasıyla C₃A bileşeninin reaktivitesinin arttığından dolayı daha çok etrenjit oluştuğunu öne sürmüştür. Daha fazla etrenjitin oluşması sistemdeki suyu tüketerek işlenebilirliğin kötü yönde etkilenmesine sebep olmuştur. Taze hal özellikleri açısından NaOH eklenmeyen LA_(0.63+0) karışımının HA_(1.04+0) karışımına göre daha iyi performans göstermiştir. Bunun nedeni bir ölçüde, LA çimentosunun daha düşük oranda eşdeğer alkali içeriğinden, bir ölçüde de HA çimentosunun daha yüksek Blaine inceliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

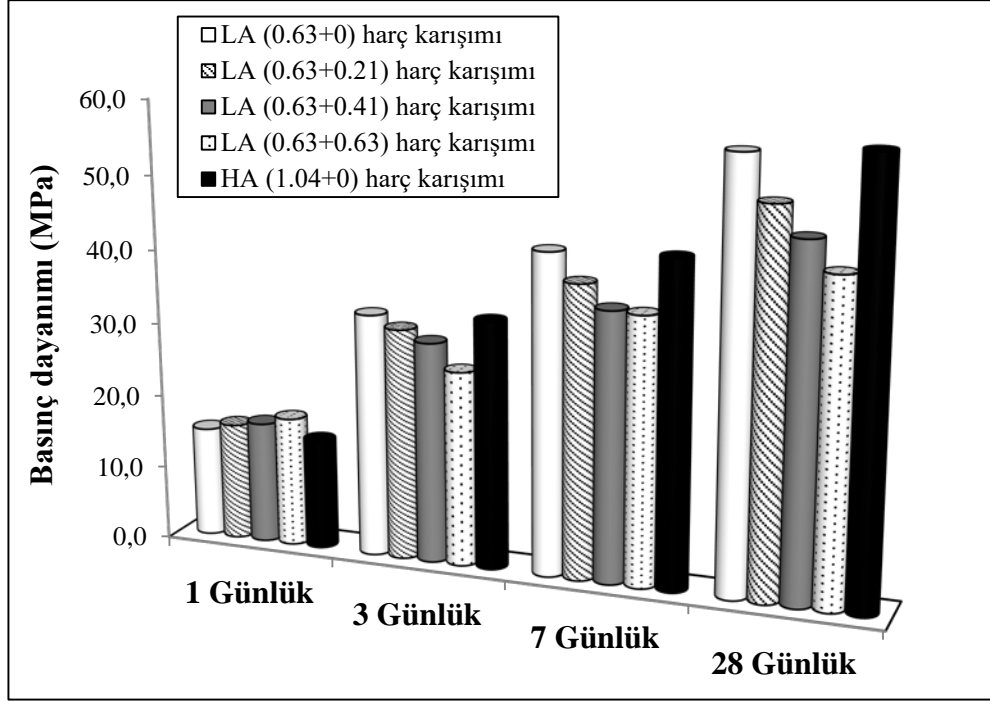
Klinkerin sülfürtrioksit/alkali miktarına oranı sülfürizasyon derecesi olarak bilinmektedir. Aitcin (2004) bu oranın Denklem 4.15'te olduğu gibi hesaplanmasını önermiştir.

$$\text{Klinkerin sülfürizasyon derecesi} = \frac{SO_3 \times 100}{1.292Na_2O + 0.85K_2O} \quad [4.15]$$

Bu oran C₃A bileşeninin reaktivite derecesini, dolayısıyla, sistemde oluşacak kalsiyum sülfü-alüminat hidrat ürünlerinin tipini ve yoğunluğunu etkilemektedir (Aitçin, 2004). Bu oranın yüksek olması SO₃ miktarının fazla olduğunu veya alkali miktarının az olduğunu göstermektedir. Her iki koşulda da C₃A bileşeninin reaktivitesi azalmaktadır. Bu durumda taze hal özelliklerinin iyi yönde etkilenmesi beklenmektedir. Bu çalışmada kullanılan HA çimentosuna ait klinkerin sülfürizasyon derecesinin %35.9 ve LA çimentosuna ait klinkerim ise, %56.5 olduğu hesaplanmıştır. Sülfürizasyon derecesi yüksek olan klinkerden üretilen çimento hem hamur hem harç karışımlarında taze hal özellikleri açısından daha başarılı performans göstermiştir. Benzer sonuçlar başka araştırmacılar tarafından da söylenmiştir (Tagnit-Hamou et al., 1992; Aitcin and Neville, 1993). Daha önce de vurgulandığı gibi LA_(0.63+0.41) ve HA_(1.04+0) karışımları eşit eşdeğer alkali oranına sahiptir. Dışarıdan eklenen alkanin çimento bileşenleri arasında var olan alkaliye göre daha yüksek çözünübilirliğe sahip olduğu bilinmektedir. Beklentinin tersine LA_(0.63+0.41) karışımı HA_(1.04+0) karışımına göre taze hal özeliği açısından daha üstün performans göstermiştir. Bu olayın nedeni HA çimentosunun daha yüksek Blaine inceliğine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Basınç dayanımı

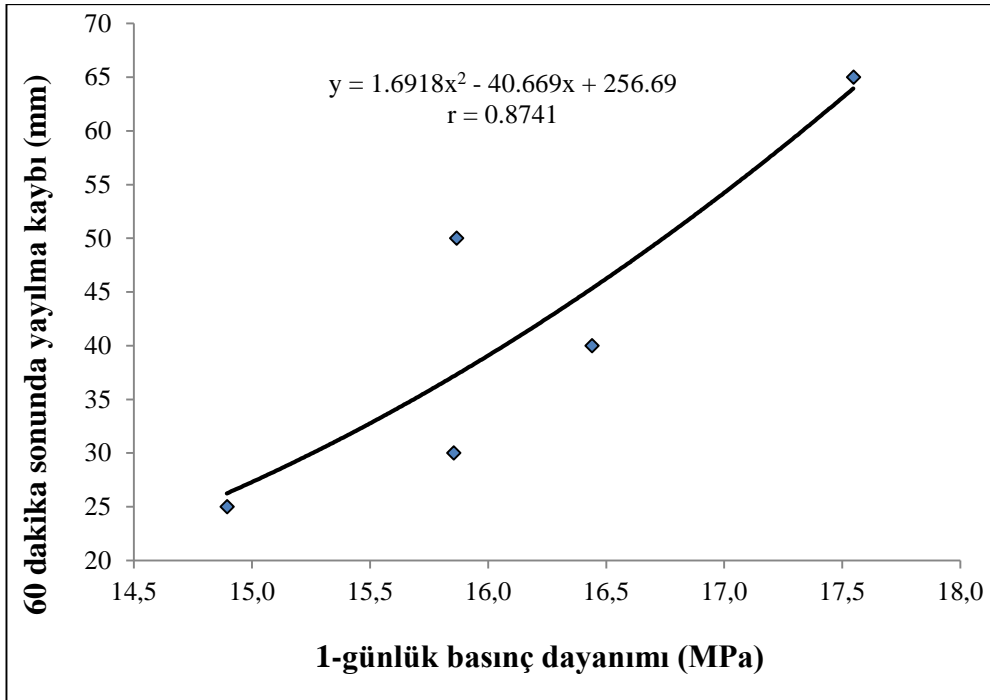
Harç karışımı işlenebilirliğinin basınç dayanımına etkisini ortadan kaldırmak için bu aşamada da farklı oranlarda su azaltıcı katkı kullanarak sabit yayılma değerine (280 mm), S/Ç oranına (0.485) ve kum/bağlayıcı oranına (2.75) sahip harç karışımları hazırlanmıştır. Karışımların 50 mm ayrıtlı küp basınç dayanımı Şekil 4.72'de göstermiştir. Her değer 3 numune sonucunun ortalaması olarak alınmıştır.



Şekil 4.72. Harç karışımlarının basınç dayanımı sonuçları

1 günlük deney sonuçları dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımının $LA_{(0.63+0)}$ karışımına ait olduğu anlaşılmaktadır. Daha öncede vurgulandığı gibi bu karışım en düşük eşdeğer alkali oranına sahiptir. Dışarıdan NaOH eklenmesiyle eşdeğer alkali oranının artışı sonucu karışımların 1 günlük dayanımı artmıştır. Ancak, 3 gün ve daha ileri yaşlarda ters bir etkinin söz konusu olduğu görülmüştür. NaOH eklenmesiyle eşdeğer alkali oranı maksimum olan $LA_{(0.63+0.63)}$ karışımının 1 günlük basınç dayanımı en yüksek olmasına rağmen 28 gün sonunda en düşük dayanım sonucunu göstermiştir. $LA_{(0.63+0)}$ karışımının 1 günlük basınç dayanımı $LA_{(0.63+0.63)}$ karışımına kıyasla %25 daha fazla olmuştur. LA çimentosu serisinde, eşdeğer alkali oranının artışıyla 1 günlük dayanımların artması daha öncede vurgulandığı gibi, artan alkali oranının C_3A bileşeninin reaktivitesini etkileyerek karışımın priz süresini kısalttığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.73'teki ilişki bu ifadenin bir kanıtı olabilir. Şekilden de görüldüğü gibi harç karışımlarının 60 dakika sonrası yayılma kaybı oranı ve 1 günlük basınç dayanımı arasında kuvvetli bir polinom ilişkisi mevcuttur. Ancak, alkali oranı artışı sonucu ileri yaşlardaki dayanımların düşük olması hidrasyon ürünlerinin üniform şekilde dağılmadığından kaynaklanabilir. Daha önce de söylendiği gibi $LA_{(0.63+0.41)}$ karışımının eşdeğer alkali oranı dışarıdan NaOH eklenmesiyle $HA_{(1.04+0)}$ karışımının eşdeğer alkali oranıyla aynı seviyeye getirilmiştir. HA çimentosu LA çimentosuna göre daha yüksek Blaine inceliğine

sahiptir. Dışarıdan eklenen NaOH'ın çözünürlüğü çimento bileşenleri içerisinde var olan alkalilere göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Kıvam koruma açısından LA_(0.63+0.41) çimentosu HA_(1.04+0) çimentosuna göre daha iyi performans göstermesinden bu kısa vadeli deneylerde (maksimum 60 dakika) incelik faktörünün daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Priz kaybı daha fazla olan karışımda erken yaşlardaki dayanımın daha fazla olması beklenmektedir. Ancak, burada HA_(1.04+0) karışımının daha hızlı kıvam kaybına uğramasına rağmen dayanım açısından, LA_(0.63+0.41) karışımına kıyasla %10 daha düşük dayanım göstermiştir. Buradan, dışarıdan eklenen alkalinin etkisinin ilk 60 dakika ile sınırlı olmadığı ilk 24 saatte etkinin sürdüğü anlaşılmıştır. LA_(0.63+0.41) karışımı 1 günlük dayanımının HA_(1.04+0) karışımına kıyasla fazla olması, daha öncede vurgulandığı gibi, erken yaşlarda dışarıdan eklenen alkalinin daha yüksek çözünürlüğe sahip olmasına bağlıdır. Ancak, ileri yaşlarda bu etkinin tersi görülmüştür. Bunun nedeni, uniform şekilde dağılmayan hidratasyon ürünlerinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.73. Harç karışımlarının 60 dakika sonundaki yayılma kaybı ve 1-günlük basınç dayanımı ilişkisi

4.2.4. Çimento da bulunan alçı türünün çimento-katkı uyumuna etkisi

Bilindiği gibi çimento-katkı uyumu genelde çimento ve su azaltıcı katkı kaynaklı faktörlere bağlıdır. Bu çalışmada çimento-katkı uyumunu etkileyen alçı türü faktörü etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, ham maddeleri aynı ancak, üretim esnasında klinkere eklenen alçı türü farklı, iki adet CEMI 42.5 R tipi çimentosu kullanılmıştır. Bunlar HG ve DG olarak adlandırılmıştır. HG çimentosu üretiminde 1/2 mol su içeren hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), DG çimentosunda ise 2 mol su içeren dehidrat (alçıtaşı- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Çimento alçı türü etkisini incelemek için farklı su/çimento oranında çimento hamuru, harç ve beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların taze hal, reolojik ve sertleşmiş hal özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre "hemihidrat" içeren çimentonun kullanımı hamur, harç ve beton karışımlarının taze hal ve reolojik özelliklerini olumsuz etkilediği, ancak, erken yaşlardaki dayanımı arttırdığı görülmüştür. Taze hal ve reolojik özelliklerindeki olumsuz etki en belirgin olarak hamur karışımlarında ortaya çıkmıştır. Harç ve beton karışımlarında agreganın bulunması sonucu söz konusu olumsuz etki bir miktar azalmıştır.

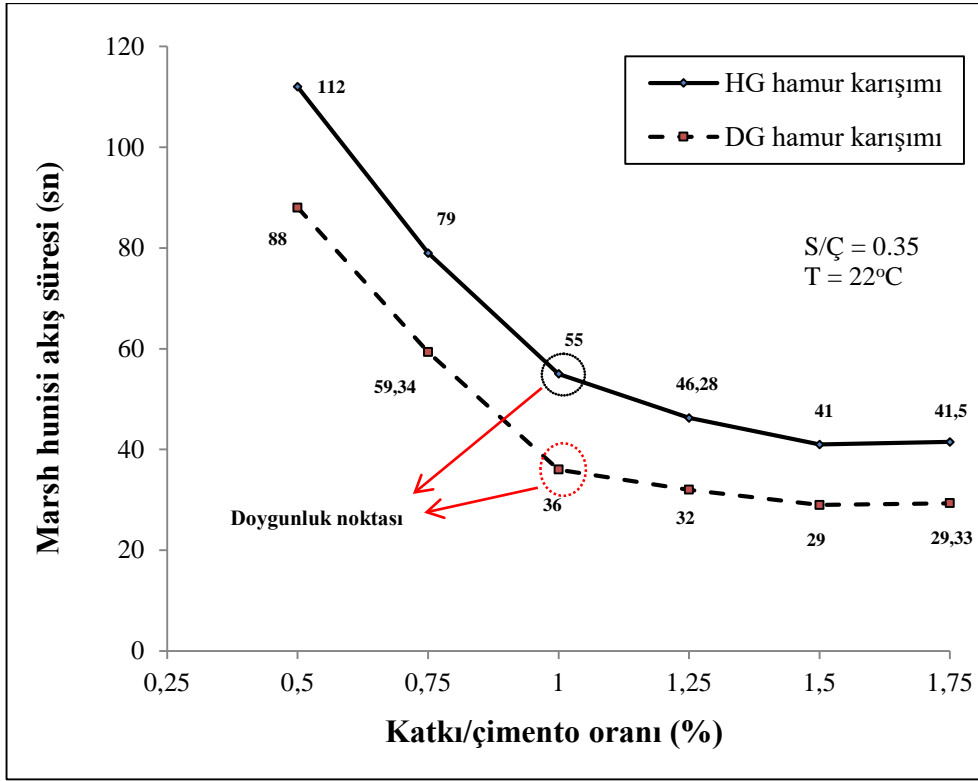
4.2.4.1. Deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Taze hal özellikleri

Karışımların Marsh-hunisi akış süresi ölçüldükten sonra mini yayılma ve sıcaklığı da ölçülmüştür. Ancak, katkısız karışımının Marsh-hunisi akış süresi ve mini yayılma değeri yüksek viskozitesinden dolayı huniden akmadığı için dikkate alınmamıştır. Nkinamubanzi ve Fournier göre hamur karışımının huniden akmadığı takdirde deney geçersiz sayılmaktadır (Nkinamubanzi and Fournier, 2003). HG ve DG karışımlarına ait Marsh-hunisi akış süresi deney sonuçları Şekil 4.74'te gösterilmiştir. Farklı dozajda süper akışkanlaştırıcı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini yayılması ve sıcaklığı Çizelge 4.87'de verilmiştir.

S/Ç oranı, katkı dozajı ve karıştırma prosedürü Marsh-hunisi akış süresini ve doyunluk noktasını önemli ölçüde etkilemektedir. S/Ç oranının artışıyla hem akış süresi hem de doyunluk noktası değerinin arttığı, ancak, katkı dozajının artışıyla akış süresinde her zaman azalma olmayabileceği Agullo ve arkadaşları

(Agullo et al., 1999) tarafından ifade edilmiştir. Bu çalışmada da beklenildiği gibi katkı dozajı arttıkça her iki karışımın Marsh-hunisi akış süresi değeri azalmıştır. Ancak, katkı/çimento oranı %1.5'ü geçtikten sonra akış sürelerinde az bir miktarda artış söz konusu olmuştur. Akış sürelerinde oluşan bu artışın nedeni, karışımın ayrışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.74'ten de anlaşıldığı gibi, başlangıçtan itibaren HG karışımının Marsh-hunisi akış süresi DG karışımına kıyasla daha yüksek olmuştur. Her iki karışımın doyum noktası %1 katkı/çimento oranına tekabül ettiği deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Ancak, DG karışımının doyum noktasındaki Marsh-hunisi akış süresi HG karışımına kıyasla %35 daha düşük olmuştur. Başka bir deyişle kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkısı DG karışımında daha yüksek performans göstermiştir. Aynı miktarda katkı kullanılmasına rağmen, DG karışımının viskozitesini daha fazla düşürerek akış hızını artırmıştır. Bilindiği gibi, karışımın viskozitesi her ne kadar düşük olursa akış süresi kısalmaktadır.



Şekil 4.74. HG ve DG hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süresi

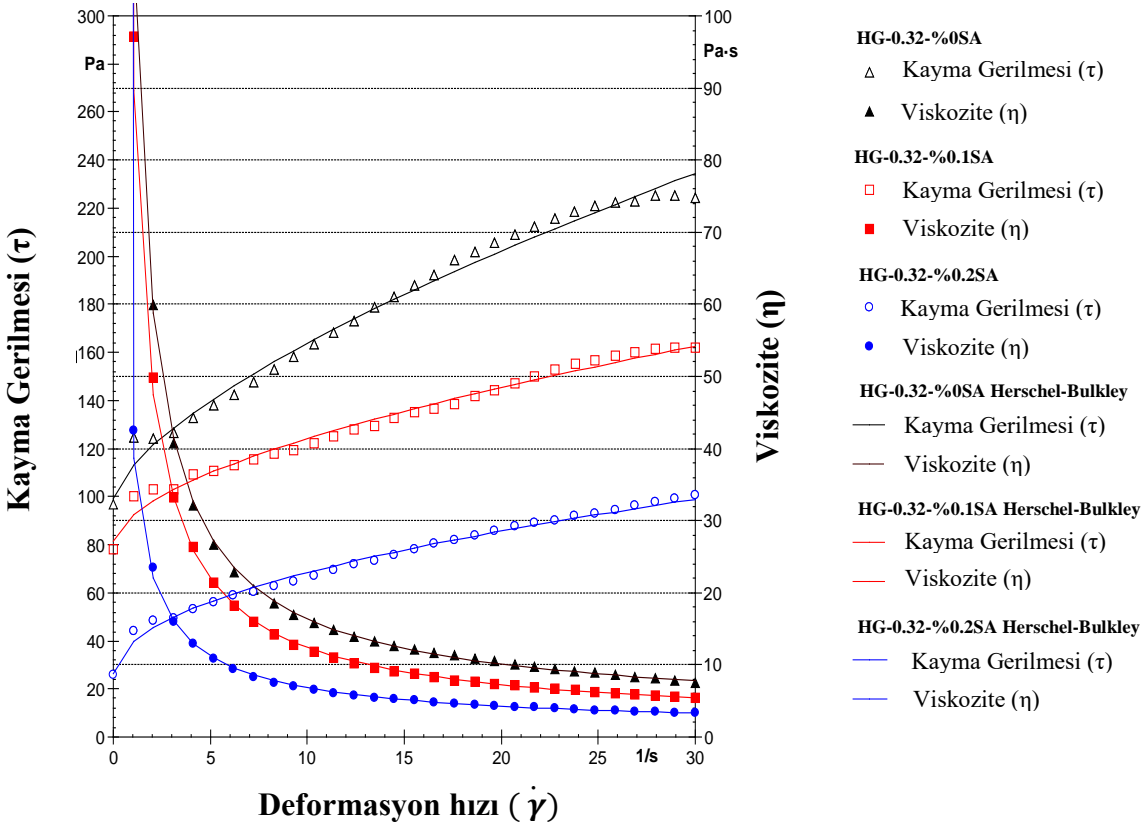
Çizelge 4.87. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılma ve sıcaklığı

Katkı/çimento oranı (%)		0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
akış süresi, s	HG karışımı	112	79	55	46.28	41	41.5
	DG karışımı	88	59.34	36	32	29	29.33
Mini-yayılma, mm	HG karışımı	120	130	145	155	160	160
	DG karışımı	145	160	170	180	190	190
Sıcaklık, °C	HG karışımı	22.20	22.30	22.60	23.10	23.40	22.50
	DG karışımı	21.00	21.20	20.80	21.30	21.20	21.10

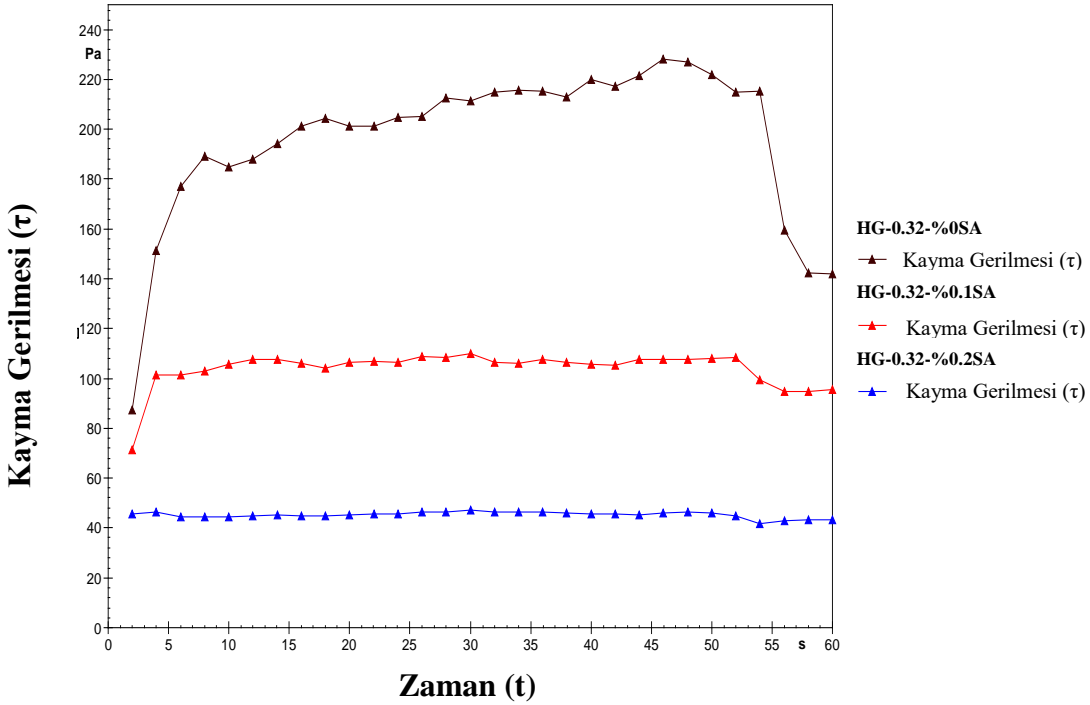
Ayrıca, DG karışımının mini yayılma değeri tüm katkı dozajlarında HG karışımına göre yaklaşık %20 daha yüksek çıkmıştır. HG karışımının daha az yayılması, DG karışımına göre daha yüksek eşik kayma gerilmesine sahip olduğu anlamına gelmektedir.

Hamur karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek amacı ile her çimento-katkı ikilisi için kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafikleri çizilmiştir. Burada örnek olarak değişik oranda su azaltıcı katkı içeren, HG çimentosu ile hazırlanan ve 0.32 S/Ç oranına sahip hamur karışımının kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi sırasıyla, Şekil 4.75 ve 4.76'da gösterilmiştir. Bu şekillerden elde edilen dinamik ve statik EKG ve nihai viskozite değerleri ise Çizelge 4.88'de özetlenmiştir. Şekil 4.75 ve 4.76'daki akma eğrileri grafiği dikkate alındığında eğrilerin genel olarak Denklem 4.1'de verilen Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu görülmüştür. Ancak katkı kullanımıyla ve kullanım oranının artışıyla eğrilerin bu modele daha uygun hale geldiği tespit edilmiştir. Çizelge 4.88'de görüldüğü gibi karışımların Herschel-Bulkley indeksi (P) değeri 1'den küçük olduğundan akışların Pseudoplastik karakterde olduğu anlaşılmıştır.

Beklenildiği gibi, S/Ç oranı ve katkı kullanım oranının artışıyla, EKG ve nihai viskozite değerleri azalmıştır. Bahis konusu azalmanın, DG karışımlarında daha da belirgin olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.75. 0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren hamur karışımlarının kayma gerilmesi-viskozite ilişkisi



Şekil 4.76. 0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren hamur karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi

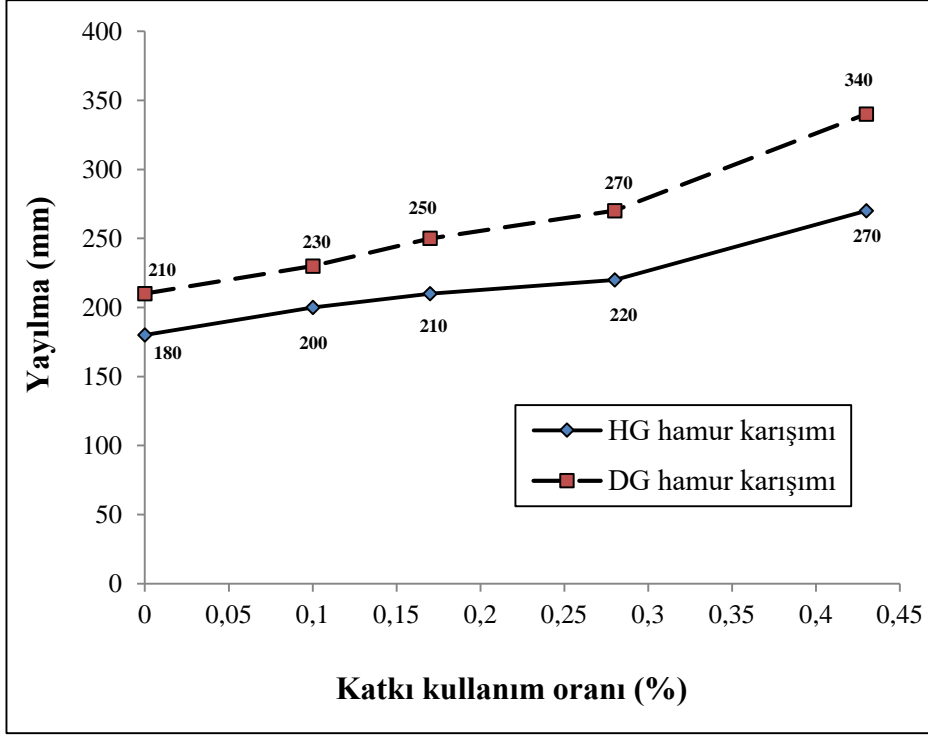
EKG ve nihai viskozite değerlerinin düşük olması karışımın reolojik açıdan bir o kadar iyi olduğu anlamına gelmektedir. Tüm S/Ç oranı ve katkı içeriklerinde, HG karışımının eşik kayma gerilme (hem dinamik hem de statik) ve viskozite değerleri DG karışımına kıyasla daha yüksek olmuştur. Dolayısıyla, reolojik özellikler açısından DG çimentosu daha olumlu davranış göstermiştir.

Ayrıca, tüm karışımlarda statik EKG değeri dinamik EKG değerinin üstünde olduğu görülmüştür. Katkı içermeyen karışımlarda statik ve dinamik EKG değerleri arasında büyük fark varırken, katkı kullanımı ile bu fark azalmıştır.

Çizelge 4.88. Hamur karışımlarının reolojik özellikleri sonucu

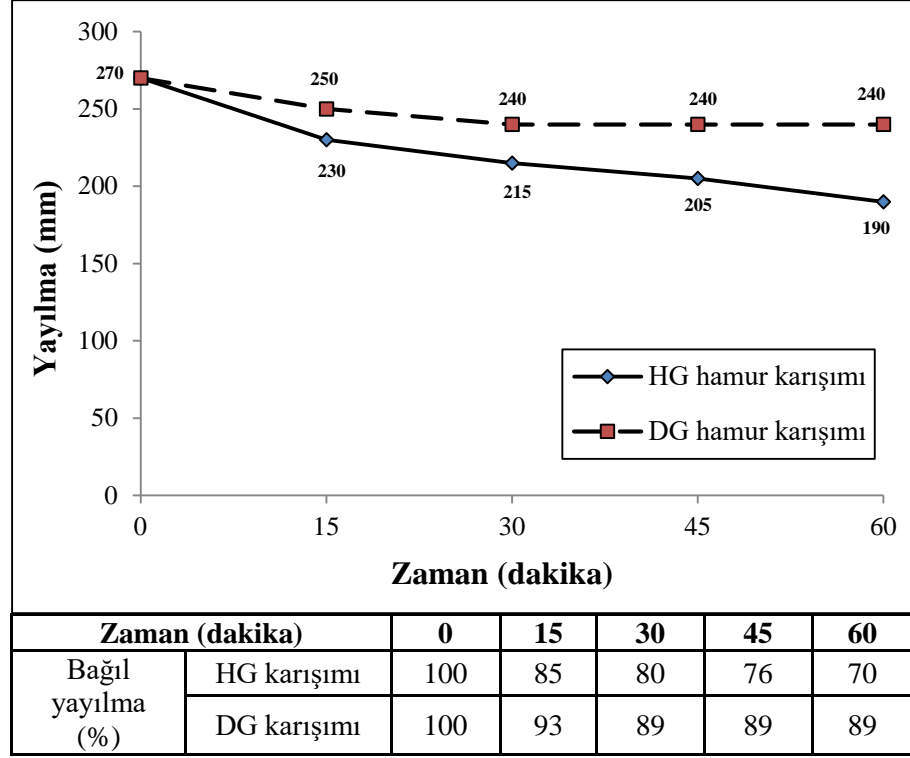
Karışım	Katkı kullanım oranı (çimento ağırlığının yüzdesi olarak)				
			%0	%0.1	%0.2
HG-0.32*	EKG (Pa)**	Dinamik	98.99	81.14	26.14
		Statik	228	109.99	47
	Nihai viskozite (Pa.s)		7.81	5.41	3.35
	Herschel-Bulkley indeksi		0.88	0.74	0.62
DG-0.32	EKG (Pa)	Dinamik	63.01	34.08	4.58
		Statik	179.1	54.96	9.35
	Nihai viskozite (Pa.s)		5.62	3.51	1.44
	Herschel-Bulkley indeksi		0.80	0.69	0.55
HG-0.35	EKG (Pa)	Dinamik	51.56	23.09	7.65
		Statik	194.1	45.57	12.13
	Nihai viskozite (Pa.s)		5.95	2.26	1.11
	Herschel-Bulkley indeksi		0.62	0.51	0.46
DG-0.35	EKG (Pa)	Dinamik	41.15	11.16	3.02
		Statik	82.94	16.69	3.24
	Nihai viskozite (Pa.s)		3.12	1.71	0.71
	Herschel-Bulkley indeksi		0.54	0.43	0.38

*HG-0.32: 0.32 S/Ç oranına sahip HG karışımı, **EKG: eşik kayma gerilmesi

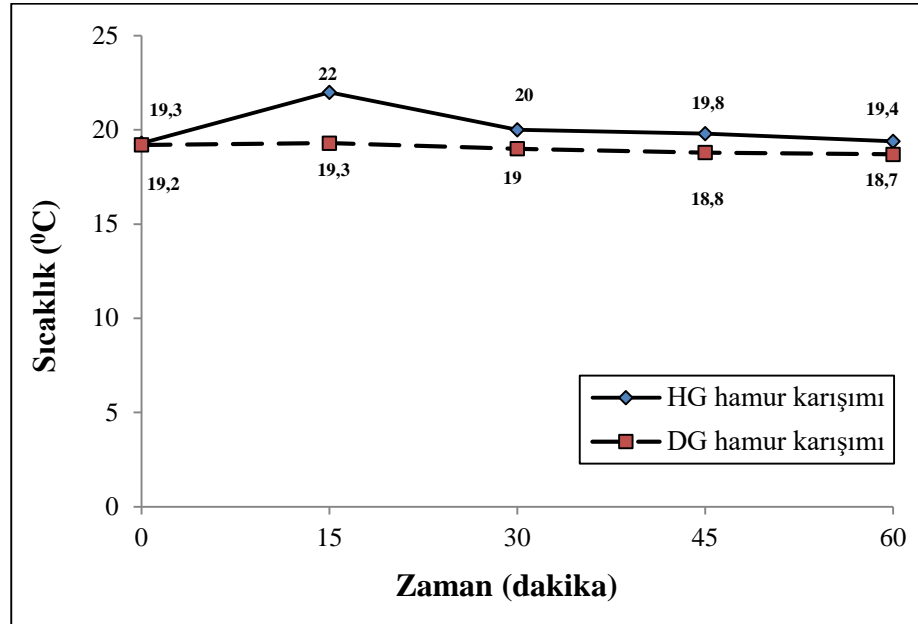


Şekil 4.77. Harç karışımlarının yayılma-katkı kullanım oranı ilişkisi

Katkı kullanım oranının harç karışımlarının yayılmasına etkisini incelemek amacı ile aynı S/Ç oranı ve aynı kum/bağlayıcı oranında, HG ve DG çimentosunu içeren akışkanlaştırıcı katkı içermeyen iki harç karışımı hazırlanmıştır. Karışımların yayılma değeri ölçülmüştür. Daha sonra her iki karışıma aynı miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilerek elde edilen beş farklı karışımın yayılması ölçülmüştür. Katkı kullanım oranının artışı ile karışımların yayılma değerinin değişimi Şekil 4.77'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere, aynı miktarda katkı kullanılmasına rağmen, DG karışımının başlangıçtan itibaren HG karışımına göre yayılma değeri daha yüksek olmuştur. En fazla katkı içeren karışımlarda (çimento ağırlığının %0.43'ü kadar) DG karışımının yayılma değeri HG karışımına göre %26 daha fazla olmuştur.



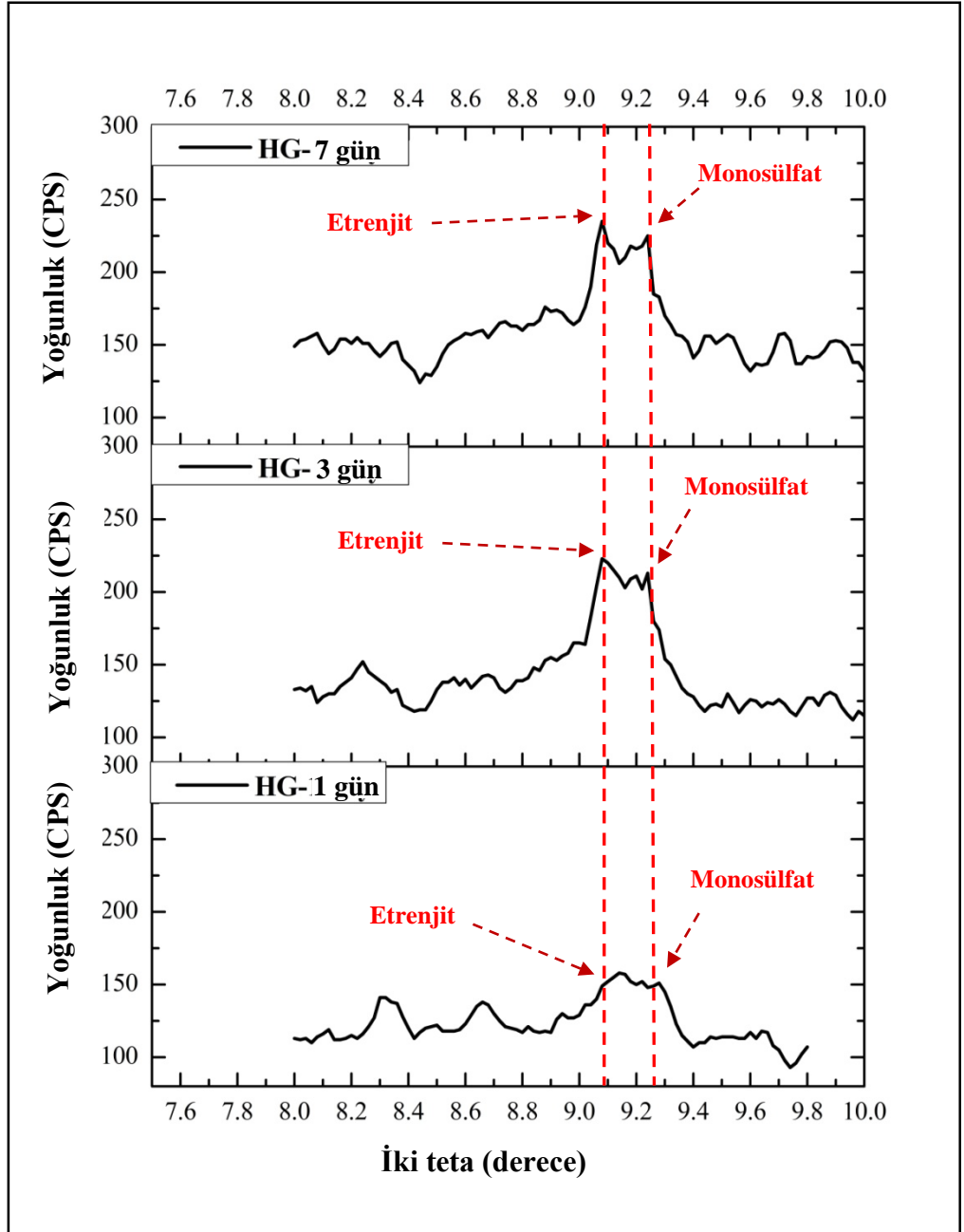
(a)



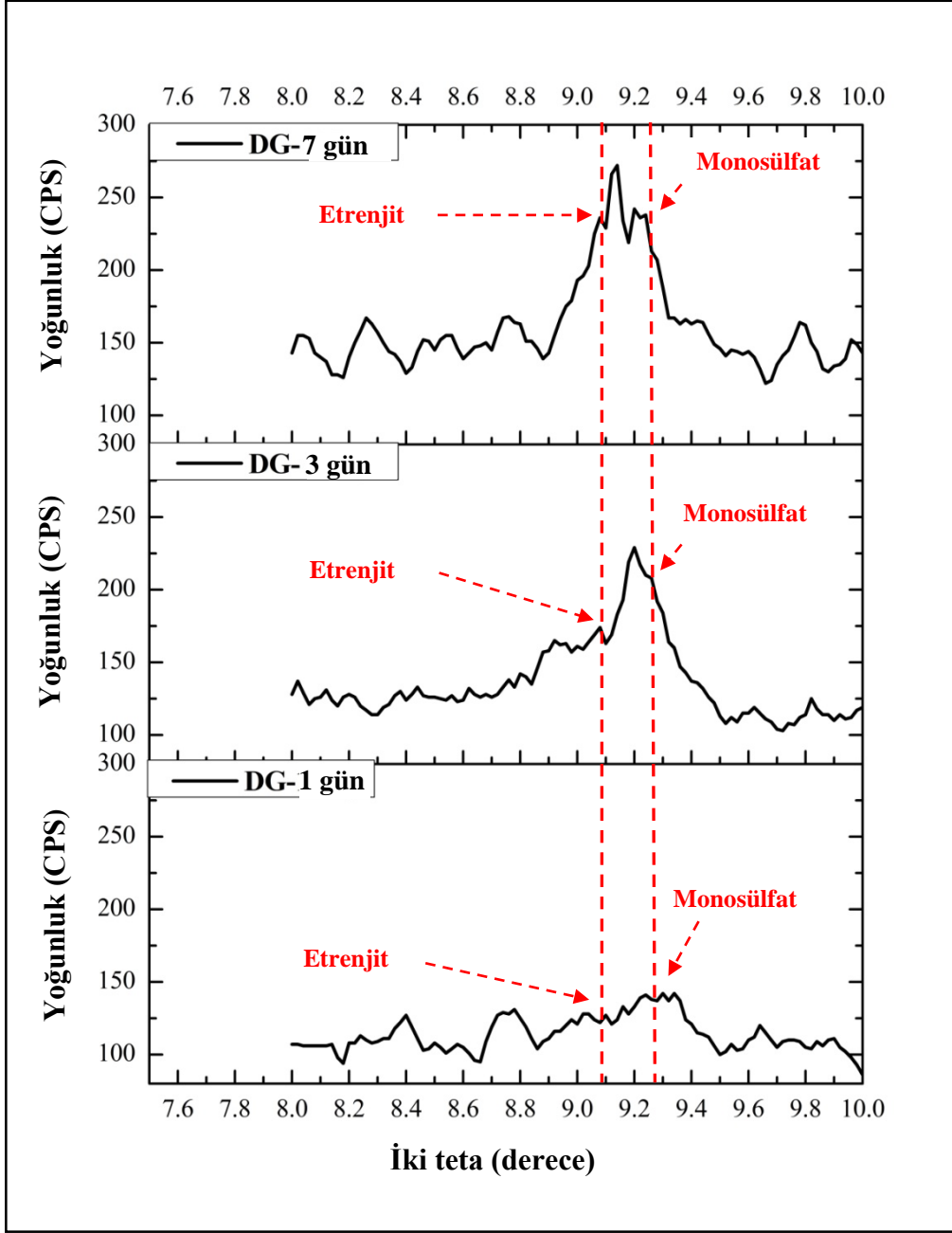
(b)

Şekil 4.78. Harç karışımlarının a: yayılma-zaman; b: sıcaklık-zaman ilişkisi

Ayrıca harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi akış süresi değişimini incelemek için aynı S/Ç oranı, kum/bağlayıcı oranı ve aynı yayılma değerine sahip HG ve DG karışımları tekrardan hazırlanmıştır. HG karışımında 270 mm olarak hedeflenen yayılma değerini sağlamak için çimento ağırlığının %0.43'ü kadar su azaltıcı katkı kullanılmıştır. DG karışımında ise aynı yayılma değerini sağlamak için çimento ağırlığının %0.28'i su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Ayrıca, karışımların başlangıç sıcaklıkları da ölçülmüştür. Karışımların yayılma-zaman ve sıcaklık-zaman ilişkileri Şekil 4.78'de gösterilmiştir. Şekil 4.78-a'dan da anlaşıldığı gibi her iki karışımda da zamanla yayılma kaybı yaşanmıştır. 60 dakika bekleme sonrası yayılma değerindeki azalma yüzdeleri HG ve DG karışımı için sırasıyla, %30 ve %11 olmuştur. Ayrıca, her 15 dakikadan bir ölçülen yayılma değeri bir önceki değerine göre, en yüksek düşüşün 15 dakika bekletilen HG karışımına (HG-15) ait olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.78-b'ye göre DG karışımının sıcaklığı 60 dakika boyunca hemen hemen sabit kalmıştır. Ancak, HG karışımında, ilk 15 dakika bekletilme süresinde 2.7 °C sıcaklık artışı söz konusu olmuştur. Bu karışımda yayılma kaybının ve sıcaklık artışının en yüksek olması hidrasyon hızının daha yüksek olduğundan kaynaklanabilir. Buda çimento hamuru hidrasyonunda daha fazla miktarda kalsiyum sülföalüminat ürünlerinin oluşumuna neden olabilir. Bu olayın tesbiti amacıyla, söz konusu iki çimentoyu içeren 1, 3 ve 7 günlük hamur karışımlarının difraktogramları ve etrenjit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}.26\text{H}_2\text{O}$) ile kalsiyum monosülföalüminat hidrat ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4).14\text{H}_2\text{O}$) oluşumlarının yoğunluk değerleri Şekil 4.79 ve Çizelge 4.89'da verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, 3 gün boyunca HG numunelerinde oluşan etrenjit ve kalsiyum monosülföalüminat hidrat ürünlerinin yoğunluğu DG numunelerine kıyasla daha fazla olmuştur. Ancak, 7 gün sonra, söz konusu yoğunluk değeri her iki numune için de yaklaşık aynı olmuştur.



(a)



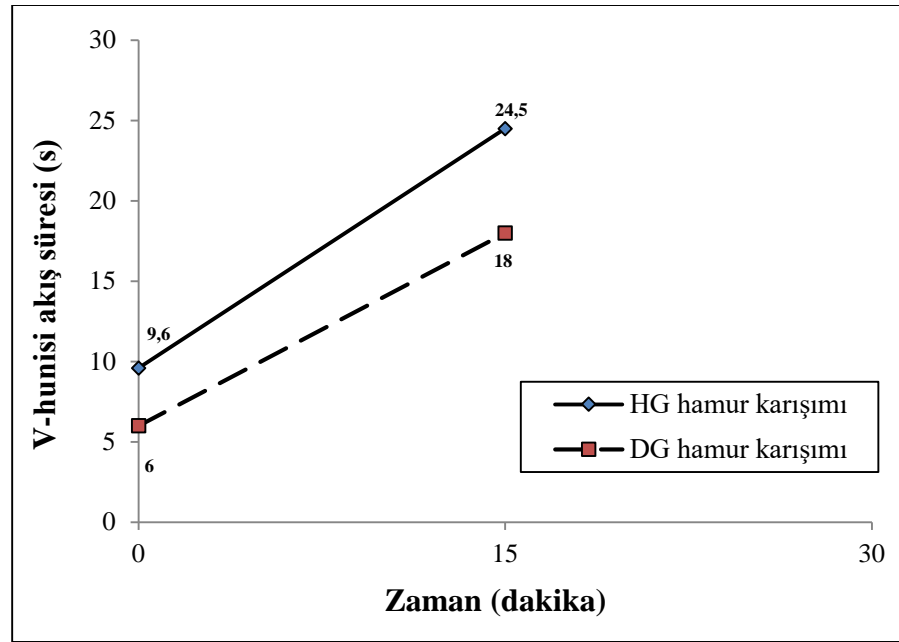
(b)

Şekil 4.79. Çimento hamurlarının farklı yaşlardaki XRD analizi, a: HG çimentosu içeren hamur numuneleri, b: DG çimentosu içeren hamur numunelri. $2\theta = 8-10^\circ\text{C}$
 Önemli not: Etrenjit: $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ve kalsiyum monosülfoalüminat: $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)\cdot 14\text{H}_2\text{O}$

Çizelge 4.89. Etreanjit ve kalsiyum monosülfoalüminat ürünlerinin yoğunluğu (XRD ile tespit edilen)

		Yoğunluğu (CPS)	
		Etreanjit	Kalsiyum monosülfoalüminat
1 gün	HG karışımı	149	148
	DG karışımı	122	141
3 gün	HG karışımı	223	213
	DG karışımı	174	210
7 gün	HG karışımı	235	225
	DG karışımı	236	238

Karışımların V-hunisi akış süresi deney sonuçları Şekil 4.80'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ilk 15 dakikadan sonra akma gerçekleşmediği için herhangi bir ölçümü alınamamıştır. Ölçüm alınabilen sürede HG karışımının V-hunisi akış süresi DG karışımına kıyasla daha uzun olmuştur.



Şekil 4.80. Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akış süresi

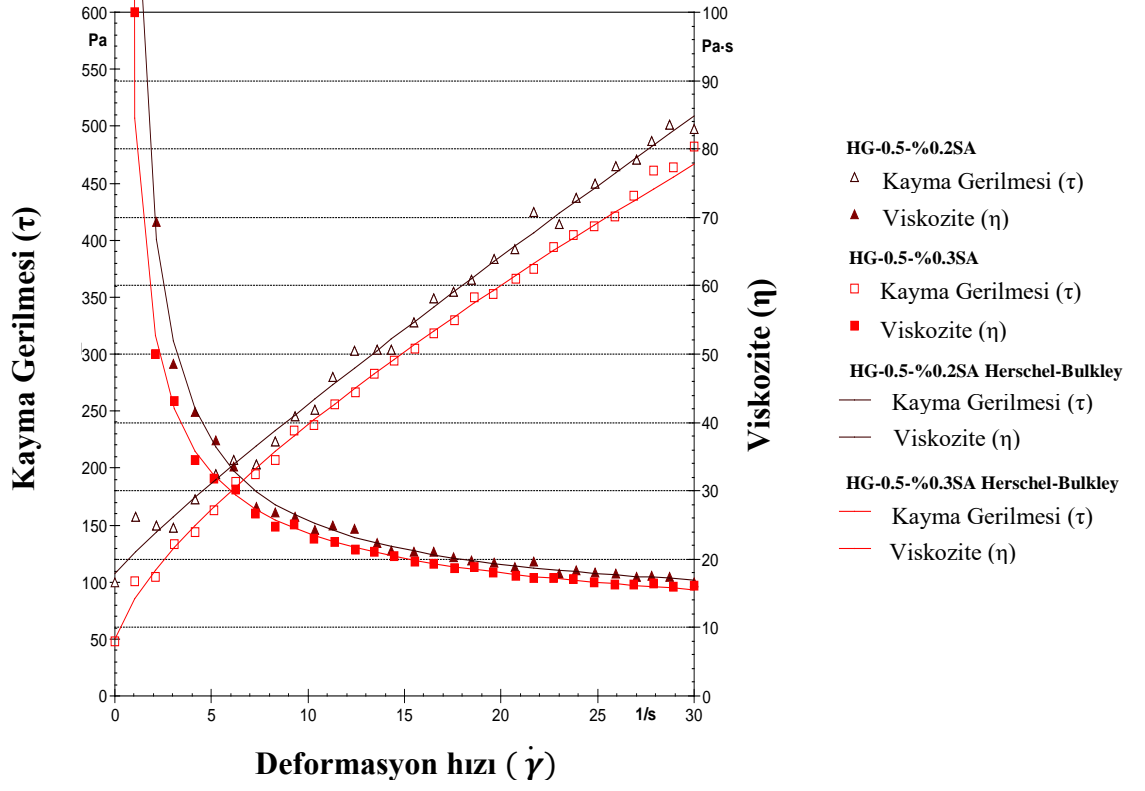
Harç karışımlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile her çimento için 4 farklı S/Ç oranı ve 9 farklı katkı dozajlarında 36 adet harç karışımı hazırlanmıştır. Kullanılan reometrenin kapasitesi ve hazırlanan harç karışımlarının durumu (aşırı katı veya ayrışma) dikkate alınarak Çizelge 4.90'da gösterilen bir tarama gerçekleştirilmiştir. Tarama çalışması sonucu, 0.6 S/Ç oranı ve %0 ile %0.1 katkı içeren, 0.5 S/Ç oranı ve %0.2 ile %0.3 katkı içeren 4 karışımın reolojik

deneylemleri için elverişli olduğu anlaşılmıştır. Her karışım için kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi grafikleri çizilmiştir. Burada örnek olarak değişik oranda su azaltıcı katkı içeren, HG çimentosu ile hazırlanan ve 0.5 S/Ç oranına sahip harç karışımının kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve kayma gerilmesi-zaman ilişkisi sırasıyla, Şekil 4.81 ve 4.82'de verilmiştir. Bu şekillerden elde edilen dinamik ve statik EKG ve nihai viskozite değerleri çizelge 4.91'de özetlenmiştir. Harç karışimleri, reolojik özellikleri açısından hamur karışımına benzer davranış göstermiştir. Ancak, harç karışımında, agreganın matrise ilave edilmesiyle hamur karışımına kıyasla daha yüksek veriler elde edilmiştir.

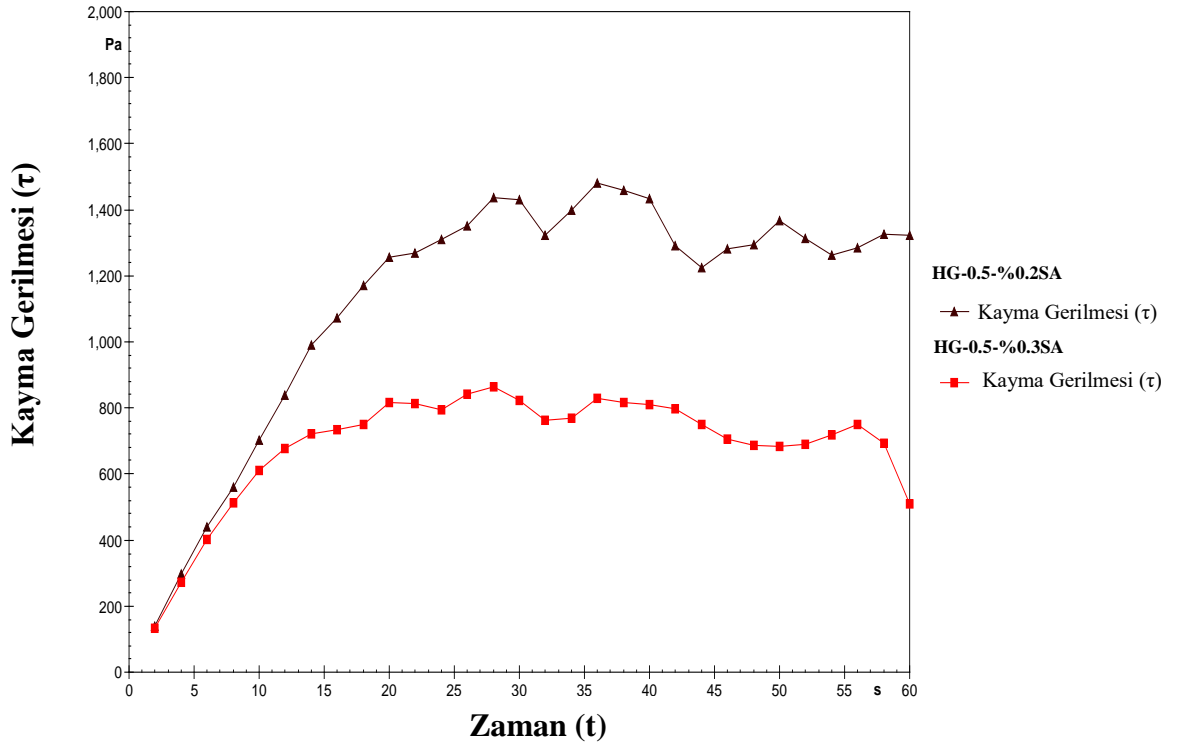
Çizelge 4.90. Harç karışımının reolojik deneylemleri için tarama

Katkı kullanım dozajı (çimento ağırlığının yüzdesi olarak)	S/Ç oranı			
	0.40	0.50	0.60	0.80
	A karışımı/B karışımı			
%0	×/×	×/×	√/√	Δ/Δ
%0.1	×/×	×/×	√/√	Δ/Δ
%0.2	×/×	√/√	√/Δ	Δ/Δ
%0.3	×/×	√/√	Δ/Δ	Δ/Δ
%0.4	×/×	√/Δ	Δ/Δ	Δ/Δ
%0.5	×/×	Δ/Δ	Δ/Δ	Δ/Δ
%0.6	×/×	Δ/Δ	Δ/Δ	Δ/Δ
%0.7	×/×	Δ/Δ	Δ/Δ	Δ/Δ
%0.8	×/√	Δ/Δ	Δ/Δ	Δ/Δ

× : aşırı katı, √: uygun, Δ:ayırışma



Şekil 4.81. 0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren harç karışımlarının kayma gerilmesi-viskozite ilişkisi



Şekil 4.82. 0.32 S/Ç oranında HG çimentosu içeren harç karışımlarının kayma gerilmesi-zaman ilişkisi

Çizelge 4.91. Hamur karışımlarının reolojik özellikleri

Karışım		Katki kullanım oranı (çimento ağırlığının yüzdesi olarak)				
		%0	%0.1	%0.2	%0.3	
HG-0.5*	EKG (Pa)**	Dinamik	-	-	106.9	49.2
		Statik	-	-	1481.7	865.4
	Nihai viskozite (Pa.s)	-	-	16.95	15.55	
DG-0.5	EKG (Pa)	Dinamik	-	-	61.48	11.0
		Statik	-	-	1184.1	722.5
	Nihai viskozite (Pa.s)	-	-	15.3	14.1	
HG-0.6	EKG (Pa)	Dinamik	32.3	18.4	-	-
		Statik	1122.6	371.8	-	-
	Nihai viskozite (Pa.s)	6.3	5.0	-	-	
DG-0.6	EKG (Pa)	Dinamik	28.7	14.38	-	-
		Statik	709.3	268.1	-	-
	Nihai viskozite (Pa.s)	5.7	3.9	-	-	

*HG-0.5: 0.5 S/Ç oranına sahip HG karışımı, **EKG: eşik kayma gerilmesi

ACI 211 "Standard Practice For Selecting Proportions For Normal, Heavy-weight and Mass Concrete" standardına uygun olacak şekilde tasarlanan beton karışımlarında, S/Ç oranı 0.45 olarak sabit tutulmuştur. 1 m³ için gerekli düzeltilmiş malzeme miktarları Çizelge 4.92'de özetlenmiştir. Karışımların kıvamı 230±20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen kıvamı sağlamak için çimento ağırlığının %1.17'si kadar polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

Çizelge 4.92. Düzeltilmiş karışım oranları (kg/m³) ve taze hal özellikleri

Karışım	HG	DG	
Çimento	383	383	
Su	173	174	
Süper akışkanlaştırıcı katkı	4.5	4.5	
Agrega (DKY)	0-3 mm	752	748
	0-5 mm	377	375
	5-15 mm	377	375
	15-25 mm	381	378
Birim hacim ağırlık (kg/m³)			
Teorik	2401.5	2387.5	
Ölçülen-Taze	2450	2440	
Ölçülen-Sertleşmiş (DKY)	2510	2490	
ΣHamur	556	557	
ΣHarç	1685	1680	
Beton karışımlarının taze hal özellikleri			
Hava içeriği (%)	1.6	1.7	
Çökme değeri (mm)	210	250	
Yayıllma değeri (mm)	440	550	

Beton karışımların Çizelge 4.92’te verilen taze hal özelliklerinden anlaşıldığı gibi her iki karışımda da aynı dozajda katkı kullanılmasına rağmen DG karışımının çökme ve yayılma değeri HG karışımına kıyasla sırasıyla, %20 ve %15 daha fazla olmuştur. Kullanılan çimentoların özgül ağırlıkları aynı olduğundan her iki karışımda da malzeme miktarları değişmemiştir. Hamur fazı her iki karışımda da aynı olduğu için karışımların hava içeriği hemen hemen aynı çıkmıştır.

Daha sonra, beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimini kıyaslamak amacı ile 220 ± 10 mm olmak üzere aynı çökme değerine sahip HG ve DG karışımları tekrardan üretilmiştir. Söz konusu çökme değerini sağlamak için, HG karışımında çimento ağırlığının %1.17’si, DG karışımında ise çimento ağırlığının %1’i kadar su azaltıcı katkı gereksinimi olduğu tespit edilmiştir. Karışımların zaman bağlı çökme ve yayılma değişimi Çizelge 4.93’te verilmiştir. DG karışımı HG karışımına kıyasla, daha az katkı içermesine rağmen zamana bağlı çökme ve yayılma değerini koruma açısından daha başarılı olmuştur.

Çizelge 4.93. Beton karışımlarının zamana bağlı çökme ve yayılma değişimi

		Zaman (dakika)			
		0	15	30	45
Çökme (mm)	HG karışımı	220	140	0	-
	DG karışımı	220	180	40	-
Yayılma (mm)	HG karışımı	400	260	-	-
	DG karışımı	460	340	240	-

Taze hal özellikleri açısından tüm çimentolu sistemlerde DG karışımı HG karışımına kıyasla daha başarılı olmuştur. Daha öncede vurgulandığı üzere, HG çimentosu hemihidrat, DG çimentosu ise dehidrat içermektedir. Bilinildiği gibi, hemihidratın çözünebilirliği (6.2-8.2 g/l) dehidratın (2.1 g/l) yaklaşık 3 katından daha fazladır (Kim, 2000). Ayrıca, Çizelge 3.4’te görüldüğü gibi, HG çimentosunun SO_3 içeriği (%3.64) DG çimentosunun SO_3 içeriğine (%3.36) göre yaklaşık %8 mertebesinde daha fazladır. Bu nedenlerden, XRD analizi sonuçları da gösterdiği gibi HG çimentosunun hidratasyon ürünlerinde (ilk 3 günde) daha fazla kalsiyum sülfüaluminat hidrat ürünleri ortaya çıkmıştır. DG karışımlarının taze hal özelliği açısından daha üstün performans göstermesi bundan kaynaklanmıştır. Nitekim DG çimentosunun inceliği daha fazla olmasına rağmen

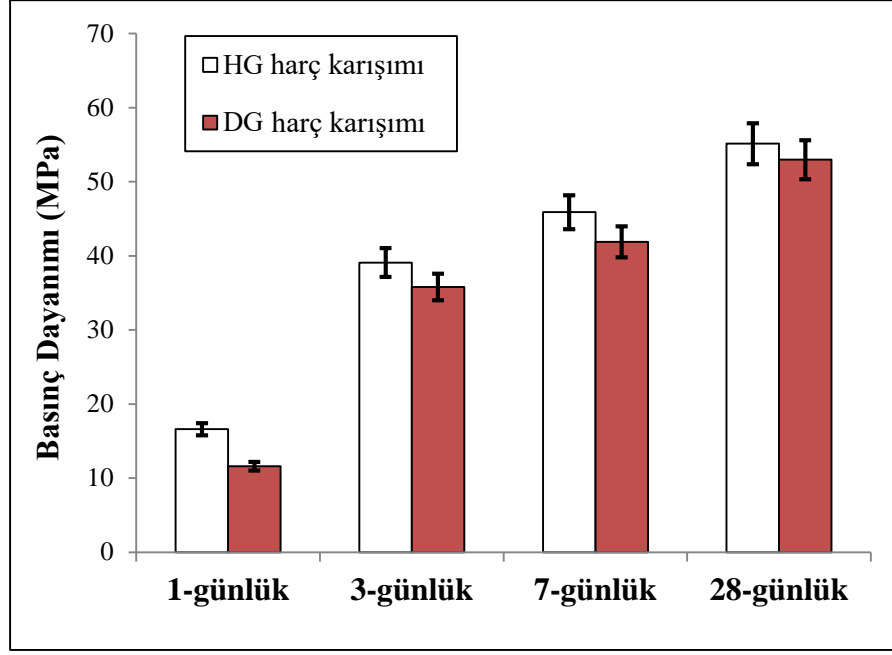
her iki çimentoda da normal kıvam için gereken su miktarı aynı olmuştur (27.9%), fakat HG karışımının priz süresi %50 daha kısa ve 1-günlük dayanımı ise %30 daha fazla olmuştur.

Basınç dayanımı

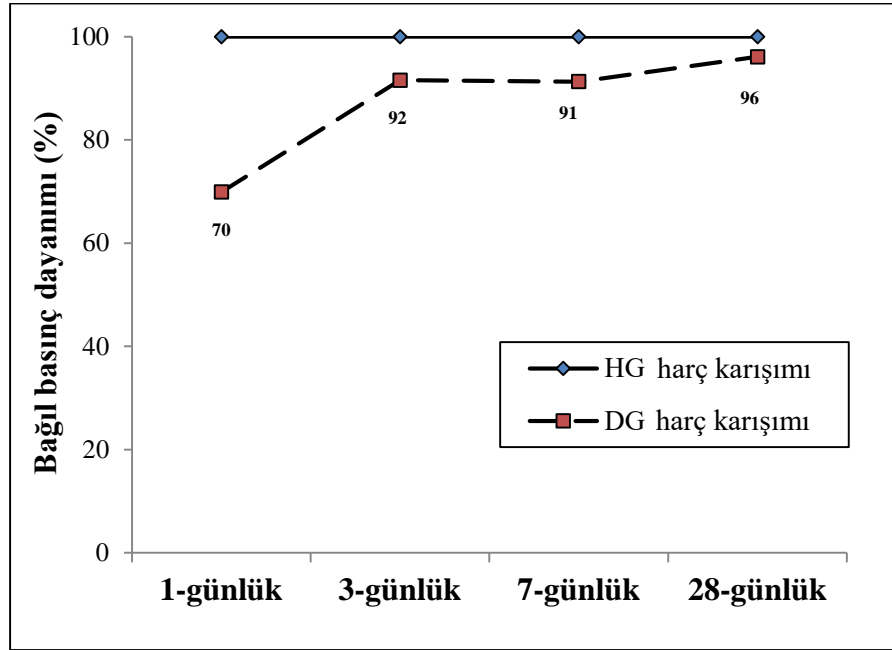
Harç karışımlarının basınç dayanımlarını kıyaslamak amacı ile 270 ± 100 mm olmak üzere aynı yayılma değerine sahip HG ve DG karışımları hazırlanmıştır. Harç karışımlarının basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.83'te verilmiştir. Şekil 4.83'ten de anlaşıldığı gibi, HG karışımının 1-günlük basınç dayanımı DG karışımına kıyasla %30 daha fazla olmuştur. Ancak, dayanımlar arasındaki farkın zamanla azaldığı, 3 günden sonra kayda değer olmadığı, ancak, 28 gün sonra bile eşitlenmediği görülmüştür.

Üç beton numunesinin ortalama basınç dayanımı ve karışımların bağlı dayanımı Şekil 4.84'te verilmiştir. Alçı türünün betonun 1 günlük basınç dayanımına %20 mertebesinde etkisi olduğu, daha ileri yaş dayanımlarına ise kayda değer etkisi olmadığı söylenebilir.

HG çimentosunun 1 günlük dayanımının daha yüksek olması, daha önce vurgulandığı gibi HG çimentosunun priz süresinin daha kısa olduğundan ve kullanılan alçı türünden dolayı bu yaşta daha fazla kalsiyum sülfat aluminat hidrat ürününün oluşmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, 1 günün ötesindeki yaşlarda karışımların dayanımı daha fazla kalsiyum silikat hidrat tarafından kontrol edildiğinden (Neville and Brooks, 2010; Mehta P.K., Monteiro, 2010) ve çimentolar aynı klinkerden üretildiğinden, dayanımlar arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Harç ve beton karışımlarının basınç dayanımı açısından davranışları hemen hemen aynı olmuştur. Ancak, alçı tipi değişiminin basınç dayanımı üzerindeki etkisi harç karışımlarında daha belirgin olduğu görülmüştür. Bu olay beton karışımlarında kullanılan iri agrega ve daha yüksek agrega içeriğinden kaynaklanmıştır.

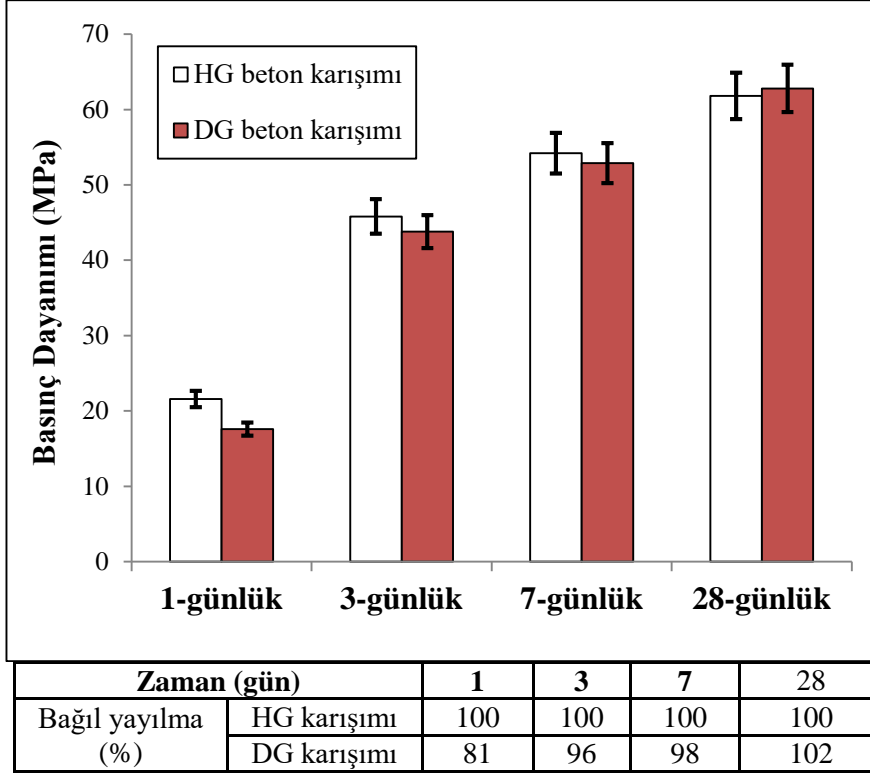


(a)



(b)

Şekil 4.83. Harç karışımlarının a) Basınç dayanımı b) Bağıl basınç dayanımı



Şekil 4.84. Beton karışımlarının basınç dayanımı sonuçları

4.2.5. Polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı yan zincir yoğunluğunun çimento-katkı uyumuna etkisi

Çalışmanın bu aşamasında, çimento katkı uyumunu etkileyen katkı yan zincir yoğunluğunun kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) bazı taze hal, reolojik ve sertleşmiş özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu aşamadaki deneylerin KYB üzerine yapılması bu betonun daha fazla su azaltıcı katkı gereksiniminden ve reolojik ölçümleri için daha elverişli olduğudur. Bu amaçla, karboksilik asit gruplarının ana zincir ve polimer yapıları aynı fakat molekül ağırlığı ve yan zincir yoğunluğu farklı olan 4 adet polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Çalışmada çimento olarak tek tip CEM II B-M (L/W) 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Tüm karışımlarda, S/Ç oranı, çimento miktarı ve yayılma değeri sırasıyla, 0,4, 450 kg/m³ ve 750±10 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için 5.5 ila 7.5 kg/m³ aralığında farklı miktarlarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. KYB karışımlarının taze hal özellikleri, çökme-yayılma, V-hunisi, çökme-yayılma kaybı ve L-kutusu deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, karışımların eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite gibi reolojik özellikleri palet tipi bir reometre kullanarak belirlenmiştir. Sertleşmiş hal

özellikleri olarak ise, karışımların 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve dinamik elastik modülü incelenmiştir. Sonuçlara göre, KYB karışımlarının V-hunisi akış süresi, plastik viskozitesi ve çökme kaybı ile basınç dayanımı katkı yan zincir yoğunluğundan etkilendiği gözlemlenmiştir. Söz konusu etki erken yaşlardaki dayanım sonuçlarında daha belirgin olmuştur.

4.2.5.1. Deneysel sonuçları ve değerlendirilmesi

Taze hal özellikleri

KYB karışımlarının düzeltilmiş karışım oranları ve taze hal özellikleri Çizelge 4.94'te verilmiştir. Bölüm 3.2.3'de açıklandığı gibi, karışımlarda kullanılan 4 farklı kimyasal katkı türüne göre karışımlar A, B, C ve D ile gösterilmiştir. Çökme-yayılma açısından üretilen tüm KYB karışımları Çizelge 4.95'te verilen EFNARC'ın (2005) önerdiği SF2 sınıfına uygun olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 4.94. KYB'lerin düzeltilmiş karışım oranları (kg/m^3) ve taze hal özellikleri

Karışım		A	B	C	D
Çimento		465	459	461	442
Su		186	183	184	177
Süper akışkanlaştırıcı katkı		6.6	6.1	5.7	7.4
Kireçtaşı tozu*		173	171	172	165
Agrega (DKY)	0-5 mm	793	783	786	754
	5-15 mm	793	783	786	754
Birim hacim ağırlık (kg/m^3)					
Teorik		2338.4	2338.0	2337.6	2339.5
Ölçülen-Taze		2416.6	2385.1	2394.7	2299.4
Taze hal özellikleri					
Çökme yayılması (mm)		730	720	740	720
V-hunisi akış süresi (s)		40	47	44	27
L kutusu	20 cm (s)	2	2.5	1.5	1
	40 cm (s)	5.5	6.5	5	3
H ₂ /H ₁		0.95	0.76	0.90	0.58
Katkı kullanım oranı**		1.42	1.33	1.24	1.67

* Karışımlarda filler olarak kullanılmıştır.

** Katkı kullanım oranı çimento ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 4.95. KYB karışımlarının işlenebilirlik açısından sınıflandırılması (EFNARC, 2005)

Deney	Sınıf	Aralık
Yayıma çapı	SF1	550–650 mm
	SF2	660–750 mm
	SF3	760–850 mm
T ₅₀ süresi	VS1	≤2 saniye
	VS2	>2 saniye
V-hunisi akış süresi	VF1	≤ 8 saniye
	VF2	> 9–25 saniye
Geçiş kabiliyeti	PA2	≥0.80

İstenilen çökme-yayıma değerini sağlamak için (750±10 mm) C ve D karışımında sırasıyla, en az ve en çok katkı ihtiyacı gözlemlenmiştir. Karışımlarda, V-hunisi akış süresi sonuçları 27-47 saniye arasında değiştiği Çizelge 4.94'ten görülmektedir. Buna göre, üretilen KYB karışımları V-hunisi akış süresi açısından EFNARC'ın belirlediği sınıfların dışında kalmıştır. Bilindiği gibi, KYB karışımlarında V-hunisi akış süresi karışımın viskozite ile ilişkilidir (EFNARC, 2005). Beklenildiği gibi, katkı miktarı artışı ile karışımların V-hunisi akış süresi azalmıştır. Söz konusu artışın bir ölçüde katkıların yan zincir yoğunluğu arasındaki farktan bir ölçüde de, katkı dozajından kaynaklandığı düşünülmektedir. Örneğin, yan zinciri yoğunluğu en yüksek olan katkıyı (D) içeren ve diğer karışımlara kıyasla en fazla su azaltıcı katkı gereksinimi gösteren D karışımı en düşük V-hunisi akış süresi göstermiştir. Karışımların V-hunisi akış süresi katkının yan zincir yoğunluğunun azalması ile artmıştır. Ayrıca, sterik itme kuvvetinin ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu ve yan zincirlerinin dağılımı ile etkili olduğunu Houst ve arkadaşları (2005) tarafından belirtilmiştir. A, B ve C karışımlarının V-hunisi akış süreleri akışkanlaştırıcının molekül ağırlığı arttıkça azalmıştır. Benzer sonuçlar Uchikawa ve arkadaşları (1984) tarafından da söylenmiştir.

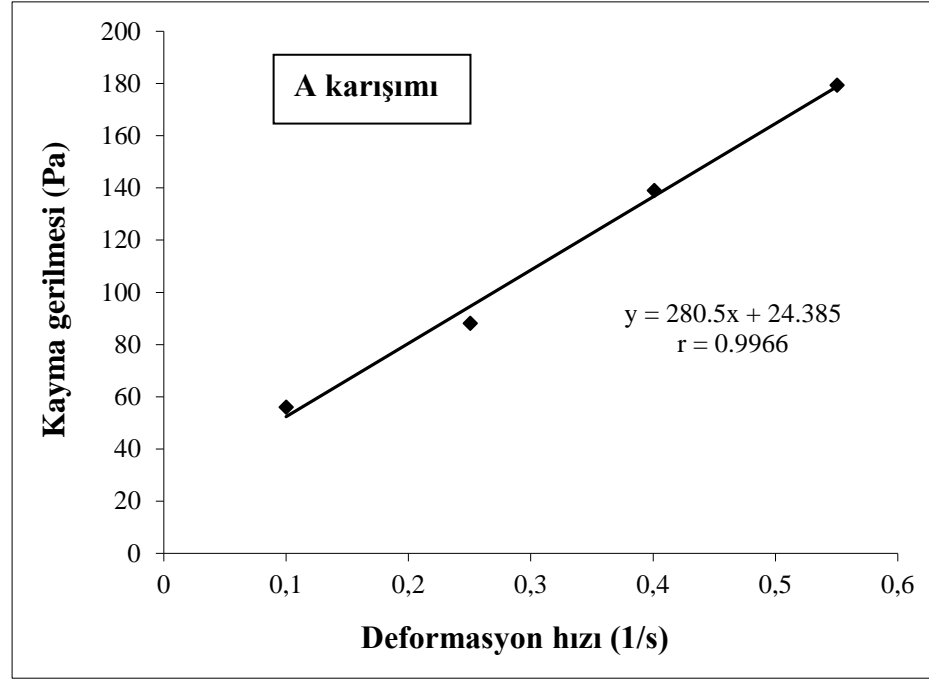
KYB karışımlarını geçiş kabiliyeti açısından incelediğimizde, L-kutusu deneyinden elde edilen sonuçlara dayanarak A ve B karışımlarının EFNARC'ın (2005) önerdiği sınıflandırmaya göre PA2 sınıfında yer aldığı anlaşılmaktadır. Ancak, B ve D karışımlarının geçiş kabiliyeti oranı standardın alt sınırı olan 0.8'den daha az olmuştur

KYB karışımlarının kayma gerilmesi-deformasyon hızı eğrileri Şekil 4.85'te gösterilmiştir. KYB karışımlarında, kayma gerilmesi ve deformasyon hızı arasında çok kuvvetli bir doğrusal ilişkinin mevcut olduğu şekilden de

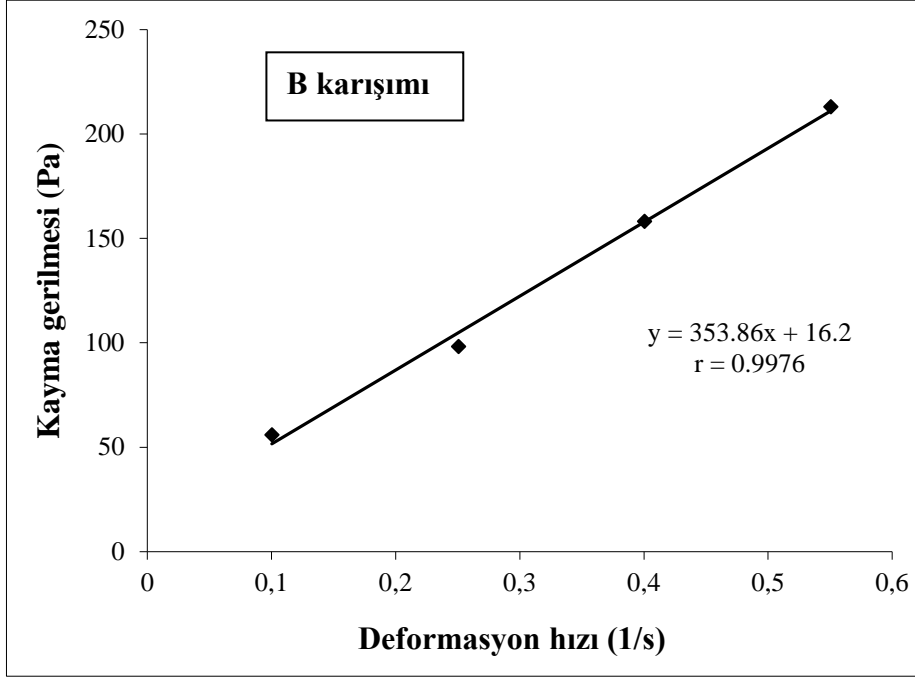
anlaşılmaktadır. Bu nedenle, tüm karışımların reolojik davranışları Denklem 4.16'da gösterilen Bingham modeline uygun olmuştur.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad [4.16]$$

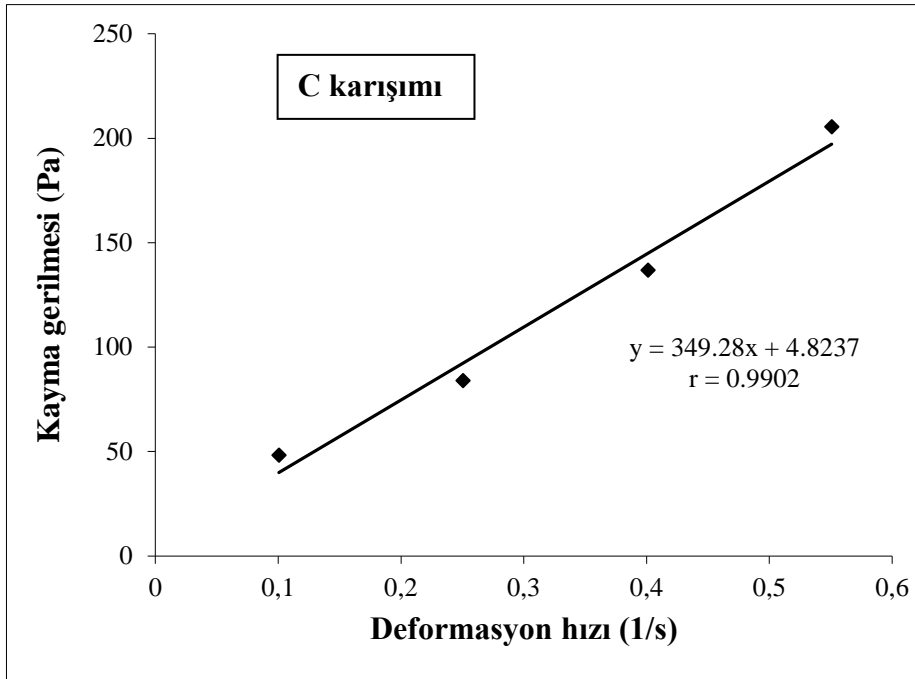
Burada, τ_0 eşik kayma gerilmesi, μ plastik viskozite, $\dot{\gamma}$ ise, deformasyon hızıdır (Aitcin et al., 1994).



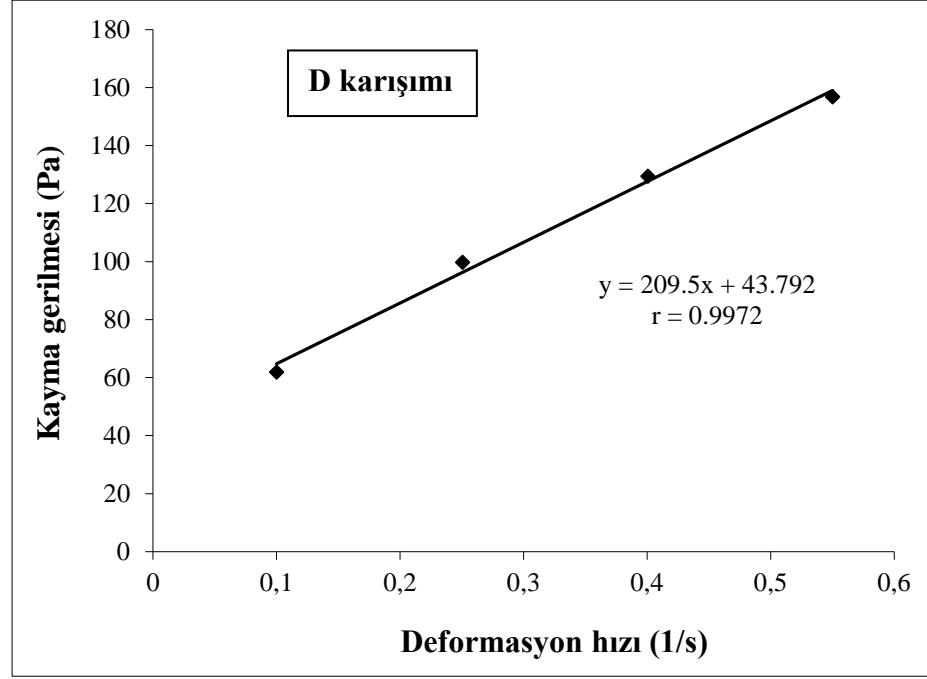
(a)



(b)



(c)



(d)

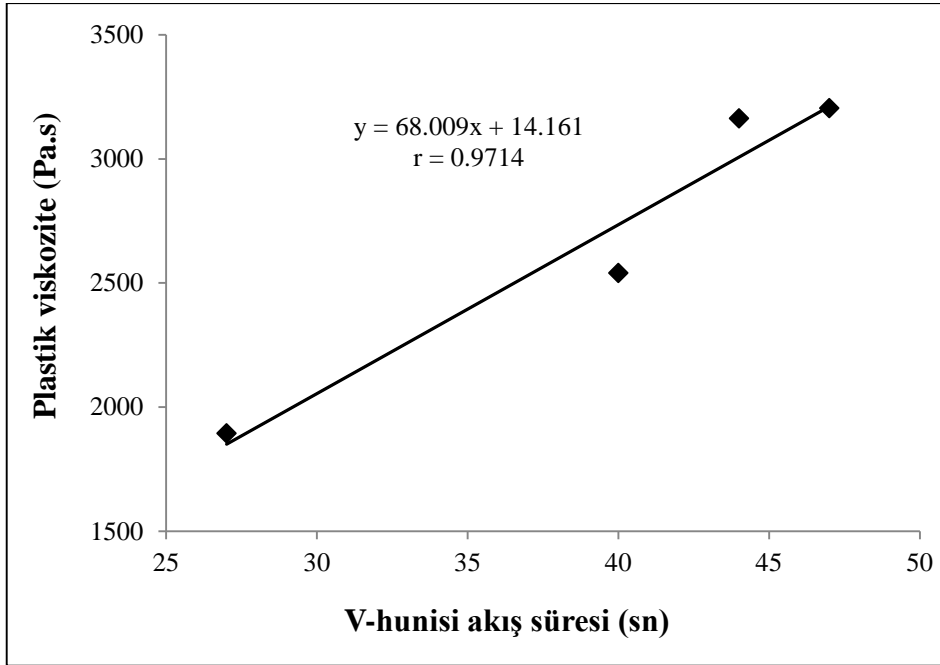
Şekil 4.85. KYB karışımlarının kayma gerilmesi-deformasyon hızı eğrileri: (a) A karışımı, (b) B karışımı, (c) C karışımı, (d) D karışımı

KYB karışımlarının eşik kayma gerilme ve plastik viskozitesi Denklem 4.18'i kullanılarak belirlenmiştir. Karışımların eşik kayma gerilme ve plastik viskozite değerleri sırasıyla, 5-44 Pa ve 210-354 Pa.s arasında değişmiştir. Genellikle, KYB karışımlarının plastik viskozitesi 150 Pa.s'yi geçmemelidir (Nielsson and Wallevik, 2003). Bu çalışmada elde edilen plastik viskozite değerlerinin yüksek olması, kullanılan su azaltıcı katkıların molekül ağırlıkları ve yan zincir yoğunluğunun yüksekliğinden kaynaklanabilir. Genelde betonda kullanılan polikarboksilat esaslı katkıların molekül ağırlığı 15000-30000 arasında değiştiği bilinmektedir (Ramachandran, 2002). Ancak, Çizelge 3.16'da gösterildiği gibi çalışmada kullanılan katkıların molekül ağırlığı 42000-50000 arasında olmaktadır.

KYB karışımlarının eşik kayma gerilmesi su azaltıcı katkı dozajı artışı ile artmıştır. Katkının molekül ağırlığı ve yan zincir yoğunluğunun karışımın eşik kayma gerilmesine etkisi olduğu, ancak, bu parametreler arasında ilişkinin düzensiz ve çelişkili olduğu görülmüştür.

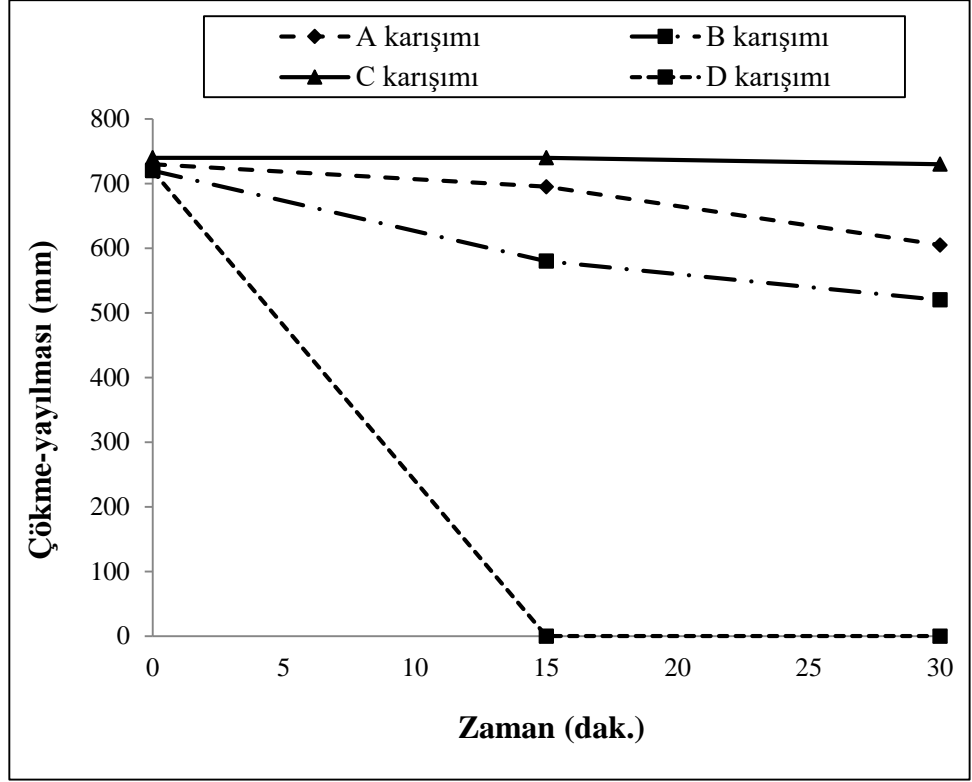
Daha önce de vurgulandığı gibi, katkıının yan zincir yoğunluğunun artışı sterik itme kuvvetini artırır. Bundan dolayı karışımların plastik viskozitesi azalır. Örneğin, en düşük yan zinciri yoğunluğuna sahip katkıyı içeren B karışımı diğer karışımlara kıyasla en büyük plastik viskozite değerini göstermiştir.

KYB karışımlarının V-hunisi akış süresi ve plastik viskozitesi arasındaki ilişki Şekil 4.86'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi karışımların V-hunisi akış süresi ve plastik viskozitesi arasında çok güçlü bir ilişki mevcuttur ($r=0.9714$). Bu yüzden, KYB karışımlarının V-hunisi akış süresini ölçerek karışımların plastik viskozitesi hakkında fikir sahibi olmak mümkün görünüyor.



Şekil 4.86. KYB karışımlarında plastik viskozite ve V-hunisi akış süresi değerleri arasındaki ilişki

KYB karışımlarının 0, 15 ve 30 dakika bekletilme sonunda çökme-yayılma değerleri Şekil 4.87'de gösterilmiştir.

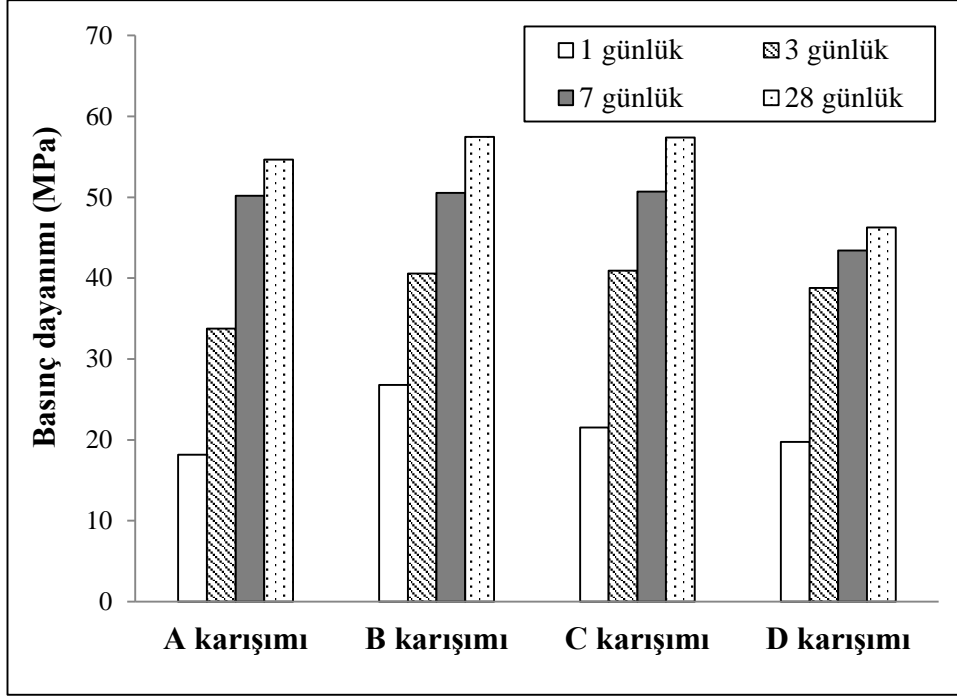


Şekil 4.87. KYB karışımlarının zamana bağlı çökme-yayılma değişimi

A, B ve C karışımlarının çökme-yayılma kaybı değerleri karşılaştırıldığında, C karışımının ilk 30 dakika da çökme kaybı göstermediği anlaşılmaktadır. Bu olay, C karışımında kullanılan su azaltıcı katkının daha düşük yan zincir yoğunluğuna sahip olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, söz konusu süre içerisinde A ve B karışımlarının çökme-yayılma değerinde hafifce bir düşüş gözlemlenmiştir. D karışımı, ilk 15 dakikada yayılma kabiliyetini kaybetmiştir. Buradan D karışımında kullanılan çimento ve katkının uyumsuz olduğunu kanısına varılmıştır. Söz konusu uyumsuzluğun nedeni, su azaltıcı katkının yan zinciri yoğunluğunun artışıyla, zincirlerin birbirine takılabilme ihtimalinin artışına bağlı olarak çimento tanelerinin topaklaşma riskinin artmasına sebep olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer açıklama, yan zinciri uzun olan katkıları için başka bir araştırmacı tarafından da söylenmiştir (Aİtcin, 2004).

Basınç dayanımı

KYB karışımlarının farklı yaşlardaki basınç dayanımı Şekil 4.88'de gösterilmiştir. Her değer üç ölçümün ortalaması olarak elde edilmiştir.

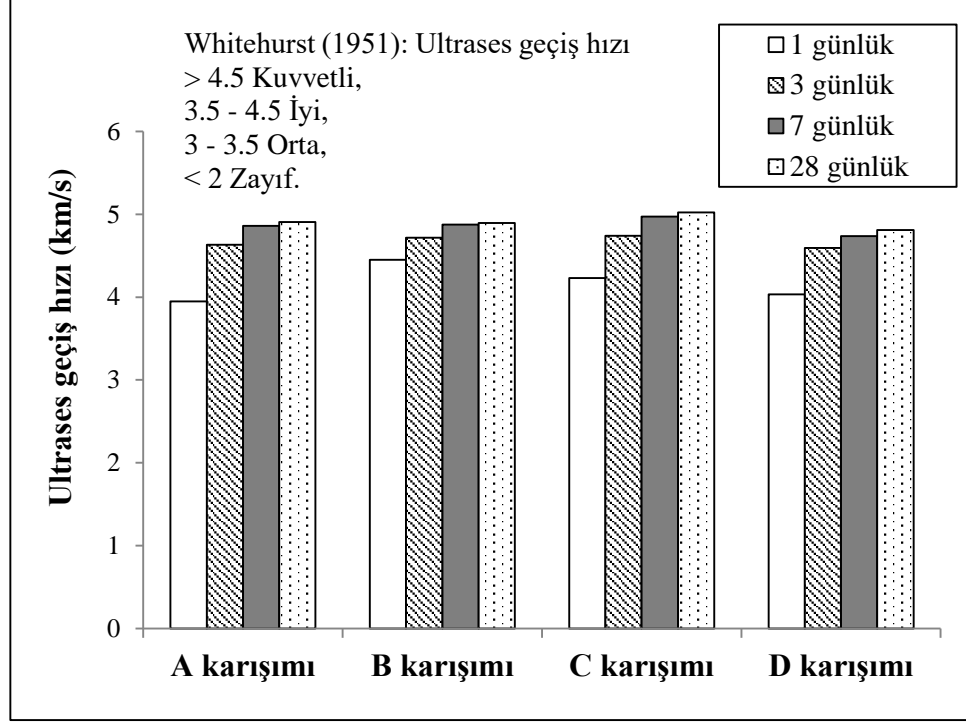


Şekil 4.88. KYB karışımlarının basınç dayanımı sonuçları

Deney sonuçlarından görüldüğü gibi, KYB karışımlarının çökme-yayıma kaybı arttıkça karışımların kıvam kaybı ve ona bağlı olarak erken yaşlardaki dayanımı da artmıştır. Ancak, D karışımı diğer karışımlara kıyasla en fazla çökme-yayıma kaybı gösteren karışım olmasına rağmen, en düşük basınç dayanımını göstermiştir. Buda, kalıplara yerleştirme esnasında D karışımının aşırı kıvam kaybından dolayı kendiliğinden yerleşen özeliğini kaybetmiş olmasından kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, Şekil 4.89'daki ultrases geçiş hızı sonuçlarına göre, D karışımı en düşük ultrases geçiş hızına sahip olmuştur buda D karışımının diğer karışımlara kıyasla en fazla boşluk miktarına sahip olduğunu göstermektedir. Aynı gözlem karışımların birim hacim ağırlıkları konusunda da yapılmıştır. D karışımının birim hacim ağırlığı 2299 kg/m^3 olarak diğer karışımlara nazaran en düşük değerdir. Bununla birlikte, D karışımın haricinde, 7 günden sonra su azaltıcı katkı tipinin KYB karışımlarının basınç dayanımına olan etkisi azalmıştır.

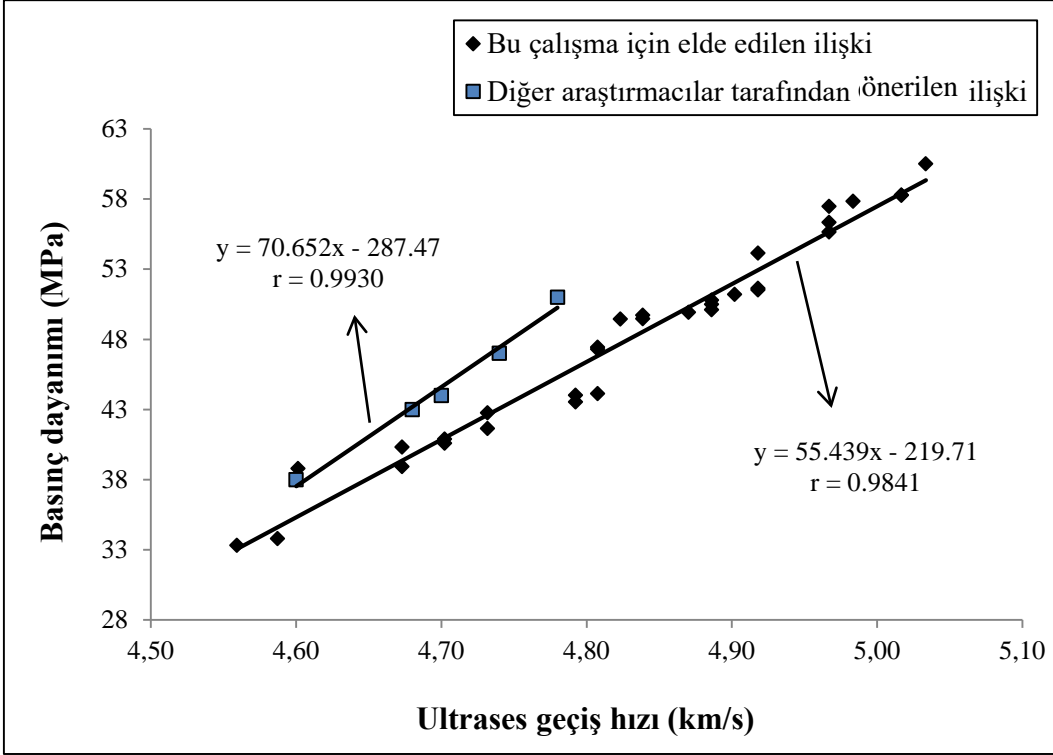
KYB karışımlarının 1, 3, 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Şekil 4.90'da gösterilmiştir. Her değer üç ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır. Bilindiği gibi, beton karışımlarının ultrases geçiş hızı sonuçları nem durumu, betonun boşluk yapısı, agrega tipi ve agrega-hamur arayüzü (ITZ) gibi faktörlerden etkilenmektedir (Mehta and Monteiro, 2010). Beklenildiği gibi,

KYB karışımlarının ultrases geçiş hızı beton numunelerinin yaşı ilerledikçe artmıştır. Söz konusu artışı ilk 7 günde daha çarpıcı olmuştur. Bu yaştan sonra ultrases geçiş hızındaki artış oranı yok denecek kadar azalmıştır. Şekil 4.89'dan da anlaşıldığı gibi, KYB numunelerinin ultrases geçiş hızı değeri 3 gün kürleme sonrası kuvvetli betonlar için Whitehurst (1951) tarafından önerilen limitin (4.5 km/s) üstünde olmuştur. D karışımı zayıf sıkıştırabilirliğe sahip olmasından diğer karışımlara kıyasla en düşük ultrases geçiş hızına sahip olmuştur.



Şekil 4.89. KYB karışımlarının ultrases geçiş hızı

KYB karışımlarının ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.90'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, söz konusu parametreler arası kuvvetli bir doğrusal ilişki mevcuttur. Ayrıca, bu çalışma sonuçları için elde edilen ultrases geçiş hızı-dayanım ilişkisi, diğer araştırmacılar tarafından (Neville and Brooks, 2010; Jones and Gatfield, 1955) benzer agrega/çimento oranına sahip (3:1) geleneksel betonlar için önerilen ultrases geçiş hızı-dayanım ilişkisi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen doğrusal ilişkilerin yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.90. KYB ve geleneksel beton karışımlarının ultrases geçiş hızı-basınç dayanımı ilişkisi

Ultrases geçiş hızı değerleri kullanılarak KYB karışımlarının dinamik elastik modülü değerleri Çizelge 4.96'da özetlenmiştir. Her değer üç ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır. KYB karışımlarının dinamik elastik modülü karışımın birim hacim ağırlığı ve ultrases geçiş hızı değeri ile ilişkilidir. Beklendiği gibi, KYB karışımlarının dinamik elastik modülü betonun yaşı ilerledikçe artmıştır. D karışımı daha düşük birim hacim ağırlık ve ultrases geçiş hızına sahip olduğundan diğer karışımlara kıyasla en düşük dinamik elastik modülünü göstermiştir.

Çizelge 4.96. KYB karışımlarının dinamik elastik modülü (GPa)

	1 günlük	3 günlük	7 günlük	28 günlük
A karışımı	25.6	34.9	40.0	41.1
B karışımı	32.7	36.7	39.7	40.4
C karışımı	29.5	37.0	41.5	42.3
D karışımı	26.9	35.1	36.1	36.7

4.3. Bu Çalışmada Elde Edilen Reolojik Verilerinin Diğer Araştırmacılar Tarafından Elde Edilen Reolojik Verileri İle Kıyaslanması

Daha önce de vurgulandığı gibi, bu tez çalışmasında hamur karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek için bilyeli ölçüm sisteminden yararlanan reometre kullanılmıştır. Karışımların dinamik eşik kayma gerilmesi (EKG) Herschel-Bulkley modeli yardımıyla elde edilmiştir. Hamur karışımlarının dinamik EKG değerlerinin 1 ila 270 Pa arasında değiştiği görülmüştür. Ancak, farklı reometre tipleri kullanılarak başka araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmaları özetleyen bir makalede hamur karışımlarının dinamik EKG'si 10 ila 100 Pa arasında değiştiği ifade edilmiştir (Banfill, 2003).

Ayrıca, tarafımızca gerçekleştirilen çalışmada KYB karışımlarının reolojik özellikleri palet tipi bir reometre kullanılarak Bingham modeline uygun olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, KYB karışımlarının EKG ve plastik viskozite değerleri sırasıyla, 5 ila 44 Pa ve 210 ila 354 Pa.s arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ancak, farklı reometre tipleri kullanılarak başka araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmaları özetleyen bir makalede, KYB karışımlarının EKG ve plastik viskozite değerleri sırasıyla, 50 ila 200 Pa ve 20 ila 100 Pa.s arasında değişmiştir (Banfill, 2003).

Görüldüğü gibi, farklı reometrelerden elde edilen veriler arasında kaç kat fark bulunmaktadır. Bu sebeple, farklı reometre tiplerinden elde edilen sonuçlar birbiriyle değil belki kendi içinde kıyaslanmalıdır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, C₃A oranı %1.9 ile %13.88 oranında değişen CEMI portland çimentosu ile süperakışkanlaştırıcı katkı uyumu incelenmiştir. Çimento sistemlerinin taze ve sertleşmiş hal özelliklerini etkileyen çimento ve katkı kaynaklı faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan malzeme ve uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Çalışmada öncelikle, çok değişkenli regresyon programı yardımı ile çimento-katkı uyumunu etkileyen parametreler ve bunların etki şiddeti belirlenmiştir. Sonuçta, su azaltıcı katkı miktarı, karışımın su içeriği, çimento inceliği, çimento C₃A ve eşdeğer alkali içeriği taze karışımın eşik kayma gerilmesini (EKG) sırasıyla en çok etkileyen parametreler olduğu, nihai viskoziteyi en çok etkileyen parametreler ise sırasıyla, karışımın su içeriği, çimentonun C₃A içeriği, katkı kullanım miktarı, çimento inceliği ve eşdeğer alkali miktarı olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, taze karışımın reolojik özelliklerini etkileyen çimento kaynaklı faktörler, etki şiddeti sırasına göre çimentonun inceliği ile C₃A ve eşdeğer alkali içeriği olduğu saptanmıştır. İstatiksel çalışma sonunda belirlenen faktörlere ilaveten literatürde çimento katkı uyumuna etkisi olduğu belirlenen, çimentonun alçı türü ve su azaltıcı katkı yan zincir yoğunluğu etkisi de incelenmiştir.

Etkin parametrelerden bağımsız olarak:

✓ Çimento hamuru ve harç karışımlarının akma eğrilerinin Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu görülmüştür. Su azaltıcı katkı kullanımıyla ve kullanım oranının artışıyla beraber eğriler bu modele daha da uygun hale gelmiştir.

✓ Hamur karışımlarında, dinamik eşik kayma gerilmesi-mini yayılma değerleri arasında ve harç karışımlarında ise, eşik kayma gerilmesi-yayılma değeri arasında kuvvetli doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu saptanmıştır.

✓ Beklenildiği gibi, tüm karışımlarda statik EKG değeri dinamik EKG değerinin üstünde olmuştur. Bu da çimento esaslı karışımlarının tiksotropik davranış gösterdiklerinin bir simgesidir. Katkı içermeyen karışımlarda statik ve

dinamik EKG değerleri arasında çok fark var iken, katkı kullanımını ile bu fark azalmıştır. Hamur karışımlarının dinamik ve statik EKG değerleri arasında doğrusal olmayan zayıf bir ilişkinin mevcut olduğu görülmüştür. Bu zayıf ilişkinin, su azaltıcı katkı içermeyen hamur karışımlarının dinamik ve statik EKG değerleri arasındaki belirgin farktan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çimento inceliğinin etkisi:

Yüksek ve düşük C₃A oranına sahip iki çimento, bilyeli öğütücüde değişik devir/dakika sayısında öğütülerek dörder farklı inceliğe sahip çimentolar üretilmiştir. Bu 8 çimentoyu içeren hamur, harç ve beton karışımlarının taze hal, reolojik ve dayanımı ile ilgili önemli bulgular aşağıda sıralanmıştır.

✓ Süperakışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımlarda, çimento türünden bağımsız olarak, çimento inceliğinin artışıyla karışımın su ihtiyacının arttığı, işlenebilirliğin olumsuz etkilendiği, dinamik eşik kayma gerilmesi, nihai viskozite ve statik eşik kayma gerilmesi değerlerinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum çimento inceliğinin artışı sonucu karışımın su ihtiyacının artmasıyla açıklanabilir.

✓ Süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlarda, katkı yeterli olduğu durumda, çimento inceliğinin artışıyla karışımların taze hal ve reolojik özellikleri olumlu etkilenmiştir. Bilindiği gibi çimento inceliğinin artışıyla süperakışkanlaştırıcı katkı daha ince taneler üzerine daha çok emilmektedir (Jolicoeur et al.,1994). 4580 cm²/g inceliğe sahip NÇ ve 4230 cm²/g inceliğe sahip SDC ile hazırlanan hamur karışımları, %0.1 süperakışkanlaştırıcı oranında en yüksek dinamik ve statik EKG değerlerine sahip olmuştur. Bunun aşırı yüzey alanına sahip söz konusu çimentolarda katkı miktarının yetersiz kaldığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, süperakışkanlaştırıcı katkı oranı %0.1'den %0.2'ye arttırıldığı takdirde çimento inceliğinin artışıyla tüm reolojik özellikler her iki çimento tipinde de olumlu etkilenmiştir. Buradan, her iki çimentoyu içeren hamurlarda %0.2 süperakışkanlaştırıcı katkı oranının yeterli

olduğu kanısına varılmıştır. Bunun üzerindeki oranlarda karışımın ayrıştığı görülmüştür.

✓ C₃A içeriği daha yüksek olan çimentolu harç karışımlarının yayılma kaybı ve basınç dayanımı kazanımı, C₃A içeriği düşük olan çimentolu karışıma kıyasla daha fazla olmuştur. Bu durum, C₃A içeriği daha yüksek olan çimentoda kalsiyum sülföalüminat ürünlerinin daha fazla oluşmasından kaynaklanmıştır.

✓ 28 güne kadar dayanımlarda, özellikle erken yaşlarda, çimento inceliğinin artışıyla birlikte harç dayanımlarında belirgin bir artış görülmüştür.

✓ Benzer şekilde priz süreleri de çimento inceliğinin artışı ile azalma göstermiştir.

✓ Çimento inceliğinin artışıyla, çimentonun süperakışkanlaştırıcı katkıya doygunluk noktası artmış ve basınç dayanımı değerleri olumlu yönde etkilenmiştir. Buradan dayanımda ödün vermeden, beton karışımlarında daha az çimento kullanılmasının mümkün olduğu düşünülmektedir. Çimentonun öğütülme maliyeti ve çimento fiyatı arasında bir optimizasyon yapıldığı takdirde çimento inceliğinin artışı ile çimento kullanımı oranının azaltılması ve dolayısıyla CO₂ salınımının düşürülmesi sağlanabilir.

✓ Beton karışımları taze hal özelliği açısından harç karışımlarına benzer davranış göstermiştir. Ancak, çimento inceliği ve kompozisyonunun beton özelliklerine etkisi harç özelliklerine nazaran daha hafif olmuştur.

✓ Çimentonun kimyasal kompozisyonundan bağımsız olarak, çimento inceliğinin artışıyla, beton karışımlarında benzer çökme değerini sağlamak için gereken katkı ihtiyacı azalmıştır. Ancak, zamana bağlı çökme kaybı çimento inceliğinin artışıyla artmıştır. Bu artışın, çimento inceliğinin artışından ve priz geciktirici etkisi de olan su azaltıcı katkının daha az kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenlerden dolayı C₃A oranı düşük olan

çimento normal çimentoya kıyasla taze hal özeliği açısından daha başarılı sonuç vermiştir.

Çimento C₃A içeriğinin etkisi:

Aynı hammaddeden üretilen fakat 3 farklı C₃A oranına sahip çimentoları içeren hamur, harç ve beton karışımlarının taze hal, reolojik özellikleri ve dayanımı ile ilgili tespitler aşağıda sıralanmıştır:

Çimentonun C₃A içeriği azaldıkça:

✓ Su azaltıcı katkının doyguluk noktası değişmemiştir. Ancak, hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi azalmıştır. Mini-yayılma değerleri ise artış göstermiştir.

✓ Hamur ve harç karışımlarının reolojik özelliklerinde (dinamik ve statik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite) iyileşme gözlemlenmiştir.

✓ Harç karışımlarının katkı ihtiyacı azalmıştır. Başka bir deyişle, aynı miktarlarda su azaltıcı katkı içeren karışımlarda, C₃A içeriği düşük çimentoyu içeren karışım en fazla yayılma değerine sahip olmuştur.

✓ Harç karışımlarının yayılma koruma ve V-hunisi akış süresi koruma potansiyelleri iyileşmiştir. Ayrıca V-hunisi akış süresi kısalmıştır.

✓ Beton karışımlarının çökme ve yayılma değerleri ile kıvam koruma potansiyeli artmıştır.

✓ Karışımların erken yaşlardaki dayanımları azalmıştır. İleri yaş dayanımları ise C₃A oranından hemen hemen bağımsız olduğu görülmüştür.

Çimento alkali içeriğinin etkisi:

Yüksek ve düşük alkalili çimentoya ilaveten, dışarıdan 3 farklı oranda NaOH eklenmesiyle toplam 5 adet çimentodan oluşan hamur ve harç karışımlarının taze hal ve dayanımı ile ilgili aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Dışarıdan NaOH eklenerek çimentonun eşdeğer alkali oranının artışıyla:

✓ Hamur ve harç karışımlarının tüm taze hal özellikleri olumsuz etkilenmiştir. Bu etki zamanla daha belirgin hale gelmiştir.

✓ 1 günlük basınç dayanımları artarken ileri yaşlardaki dayanımlar azalmıştır.

Yüksek alkalili çimentoya kıyasla, dışarıdan NaOH ilave ederek bu çimento ile eşit alkali seviyesine getirilen çimento, daha uzun süre kıvamını korumasına (geç priz almasına) rağmen daha yüksek 1 günlük dayanım göstermiştir.

Çimentoda kullanılan alçı türünün etkisi:

Aynı hammaddeden üretilen ancak, üretim esnasında hemihidrat ve dehidrat olarak iki farklı alçı kullanarak elde edilen çimentoları içeren hamur, harç ve beton karışımlarının taze hal, reolojik ve dayanımı ile ilgili önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

✓ Hemihidrat içeren çimentodan üretilen çimento hamuru, harç ve beton karışımları taze hal ve reolojik özellikleri açısından, incelenen polikarboksilat katkı ile daha uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

✓ Hemihidrat içeren çimentodan üretilen karışımların, erken yaşlardaki dayanımı dehidrat içeren çimentodan üretilen karışıma kıyasla daha fazla

olmuştur. Ancak, çimento alçı türünün karışımların ileri yaşlardaki dayanımlarına kayda değer bir etkisi olmadığı kanısına varılmıştır.

✓ Taze hal, reolojik ve sertleşmiş hal özellikleri açısından, çimentodaki alçı türünün değişimi, çimento hamuru karışımı üzerinde en yüksek, beton karışımları üzerinde en düşük etkiyi yaratmıştır.

Polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı yan zincir yoğunluğunun etkisi:

Aynı ana zincir ve benzer polimer yapısında olan, ancak, değişik molekül ağırlığı ve değişik yan zincir yoğunluğuna sahip 4 adet polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkının KYB karışımlarındaki davranışı aşağıda özetlenmiştir.

✓ Su azaltıcı katkının yan zincir yoğunluğu artışıyla KYB karışımlarının V-hunisi akış süresi ve plastik viskozitesi azalmıştır.

✓ KYB karışımlarının eşik kayma gerilmesi su azaltıcı katkı dozajı artışı ile artmıştır. Katkının molekül ağırlığı ve yan zincir yoğunluğunun karışımın eşik kayma gerilmesine etkisi olduğu, ancak, bu parametreler arasında ilişkinin düzensiz ve çelişkili olduğu görülmüştür.

✓ Katkının yan zincir yoğunluğunun artışı ile artan sterik itme kuvveti karışımların plastik viskozitesini azaltmıştır. Bu nedenle, en düşük yan zincir yoğunluğuna sahip katkıyı içeren beton diğer karışımlara kıyasla, en büyük plastik viskoziteyi göstermiştir.

✓ Su azaltıcı katkının yan zincir yoğunluğunun artışıyla zincirlerin birbirine takılabilme ihtimali ve buna bağlı olarak çimento tanelerinin topaklaşma olasılığı artmaktadır. Bu nedenle, katkı yan zincir yoğunluğunun artışıyla, karışımların kıvam koruma özeliği azalmıştır.

✓ Çimento-katkı ikilisi uyumlu olan karışımlarda, 1 ve 3 günlük dayanımlar katkının yan zincir yoğunluğunun artışıyla azalmıştır. Bu etki 3 günden sonraki dayanımlarda ortadan kalkmıştır.

6. ÖNERİLER

- ✓ Bu çalışmada çimento-katkı uyumunu etkileyen çimento kaynaklı parametreler belirlenmiştir. Ayrıca parametrelerin nasıl bir etki yarattığı saptanmıştır. Başka bir çalışmada bu çalışmada belirlenen parametrelerin etki mekanizması, SEM, Zeta potansiyeli ve FTIR analizleri ile desteklenerek daha net açıklanabilir.
- ✓ Başka bir çalışmada, katkı ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu ve moleküllerarası bağ yapısı gibi parametrelerin değişimi incelenebilir.
- ✓ Benzer deneyler naftalin esaslı katkıları için de tekrarlanabilir.
- ✓ Mineral katkıların da çimento-katkı uyumuna etkisi incelenebilir.
- ✓ Reolojik özelliklerin zamana bağlı değişimi incelenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACI 116R-00**, 2000, Cement and Concrete Terminology, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- ACI 211**, 1998, Standard Practice For Selecting Proportions For normal, Heavy-weight and Mass Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- ACI Committee 212.4R.**, 2004,. Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- Adjoudj, M., Ezziane, K., Kadri, E.H., Ngo, T.T. and Kaci, A.**, 2014, Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer, *Construction and Building Materials* 70:549–559 pp.
- Agarwal, S.K., Masood, I. and Malhotra, S.K.**, 2000, Compatibility of superplasticizers with different cements, *Construction and Building Materials*, 14:253-259 pp.
- Agullo, L., Toralles-Carbonari, B., Gettu, R. and Aguado, A.**, 1999, Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer-A study based on the Marsh cone test, *Materials and Structures*, 32:479-485 pp.
- Ahmad, S. and Qureshi, L.A.**, 2004, Variation in fineness of fecto cement and its effects on other properties of cement and concrete, *29th Conference On Our World In Concrete & Structures*, 25 - 26 August, Singapore.
- Ahmad, S.**, Effect of fineness of cement on properties of fresh and hardened concrete, 2002, *27th Conference on Our World In Concrete & Structures*, 29-30 August, Singapore.
- Ahmet, Ordek**, 2013, Betonsa Ege Bölge Kalite Şefi, Kişisel yazışma, ahmet.ordek@akcansa.com.tr, Yazılı görüşme.
- Aiad, I.** 2003, Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 33, 1229-1234 pp.
- Aiad, I., Abd El-Aleem, S. and El-Didamony, H.**, 2002, Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, 32:1839 – 1843 pp.
- Aİtcin, P.C. and Neville, A.**, 1993, High performance concrete demystified, *Concrete International*, 15(1):21-26 pp.
- Aİtcin, P.C.**, 2004, High Performance Concrete, E&FN SPON, New York.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Aitcin, P.C., Jolicoeur, C. And MacGregor, J.**, 1994, Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't, *Concrete International*, 16(5):45-52 pp.
- Akman, M.S.**, 1996, Kimyasal katkıların betona uygulanması, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4. Ulusal beton Kongresi, 1-11s.
- Alonso, M.M. and Puertas, F.**, 2015, Adsorption of PCE and PNS superplasticisers on cubic and orthorhombic C₃A. Effect of sulfate, *Construction and Building Materials*, 78:324-332 pp.
- Alonso, M.M., Palacios, M. and Puertas, F.**, 2013, Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 35:151-162 pp.
- Andersen, P.J. and Roy, D.M.**, 1988, The effect of superplasticizer molecular weight on its adsorption on, and dispersion of, cement. *Cement and Concrete Research*, 18(6):980-986 pp.
- Arteaga-Arcos, J.C., Chimal-Valencia, O.A., Yee-Madeira, H.T. and de la Torre, S.D.**, 2013, The usage of ultra-fine cement as an admixture to increase the compressive strength of Portland cement mortars, *Construction and Building Materials*, 42:152-160 pp.
- ASTM C 109**, 2013, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 109/C109M**. 2013, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 125–15a**, 2015, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 191**, 2014, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 204**, 2011, Standard Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 231/C231M-14**, 2014, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM C 305**, 2014, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 494/C494M-15**, 2015, Standard specification for chemical admixtures for concrete, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 511**, 2014, Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 1293 – 01**, 2008, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 1437 – 01**, 2013, Flow of hydraulic cement mortar. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- Aydın, S., Aytaç, A.H. and Ramyar, K.**, 2009, Effects of fineness of cement on polynaphthalene sulfonate based superplasticizer–cement interaction, *Construction and Building Materials*, 23:2402–2408 pp.
- Aytaç, A.H.**, 2006, Portland çimentosu kompozisyonunun akışkanlaştırıcı katkı performansına etkisi, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı.
- Azrak Karakaş, N.**, 2013, İzmir Çimento Merkez Çimento–Beton Laboratuvarı Şefi, Kişisel yazışma, niluferazrak@cimentas.com, Yazılı görüşme.
- Badens, E., Veesler, S. and Boistelle, R.**, 1999, Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives, *Journal of Crystal Growth*, 98/199:704-709 pp.
- Banfill, P.F.G.**, 2003, The rheology of fresh cement and Concrete-A review, *Proc 11th International Cement Chemistry Congress*, May, Durban, South Africa.
- Bassant, J.B.**, 1994, Nouvelles Methodes d'étude de la Formulation D'hydrates des Ciments. Applications Analyse de L'effet D'adjuvants Organiques, PhD Thesis, No. 156, Universite de Franche Comte, France.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Beaupré, D.**, 1994, Rheology of High Performance Shotcrete, Ph. D. Thesis University Of British Columbia (Canada).
- Bedard, C. and Mailvaganam, N.P.**, 2003, The use of chemical admixtures in concrete. Part I: Admixture-cement compatibility, *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, 19:263-266 pp.
- Bentz, D.P., Ferraris, C.F., Galler, M.A., Hansen, A.S., and Guynn, J.M.**, 2012, Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement-fly ash pastes, *Cement and Concrete Research*, 42:404-409 pp.
- Bentz, D.P., Haecker, C.J., Garboczi, E.J., and Jensen, O.M.**, 1999, Effects of cement particle size distribution on performance properties of portland cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, 29:1663-1671 pp.
- Bing, M., Ming, M., Xiaodong, S., Xuerun, L. and Xiaodong, W.**, 2014, Compatibility between a polycarboxylate superplasticizer and the belite-rich sulfoaluminate cement: Setting time and the hydration properties, *Construction and Building Materials*, 51:47-54 pp.
- Bing, T. and Cohen, M.D.**, 2000, Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?, *Cement and Concrete Research*, 30:117-123 pp.
- Binici, H., Temiz, H., Köse, M.M.**, 2007, The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice, *Construction and Building Materials*, 21:1122-1128 pp.
- Björnström, J. and Chandra, S.**, 2003, Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements, *Materials and Structures*, 26:685-692 pp.
- Bonen, D. and Sakar, S.L.**, 1995, The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition and parametera affecting flow loss, *Cement and Concrete Research*, 25:1423-1434 pp.
- Bradley, G.H.M.**, 1986, Water soluble polymers: The relationship between structure, dispersing action, and rate of cement hydration. *Cements, Concrete and Aggregates*, 8(2):68-75 pp.
- Burgos-Montes, O., Palacios, M., Rivilla, P. and Puertas, F.**, 2012, Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions, *Construction and Building Materials*, 31:300-309 pp.
- Camarini, G. and De Milito, J.A.**, 2011, Gypsum hemihydrate-cement blends to improve renderings durability, *Construction and Building Materials*, 25:4121-4125 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cecilie, E. and Staffan, H.**, 2005, The kinetics of ettringite formation and dilatation in a blended cement with h-hemihydrate and anhydrite as calcium sulfate, *Cement and Concrete Research*, 35:2310-2321 pp.
- Chandra, S. and Björnström, J.**, 2002, Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars-Part I, *Cement and Concrete Research*, 32(10):1605–1611 pp.
- Chen, J.J. and Kwan, A.K.H.**, 2012, Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste, *Cement and Concrete Composites*, 34:1-10 pp.
- Claisse, P.A, Lorimer, P. and Al Omari, M.**, 2001, Workability of cement pastes, *ACI Materials Journal*, 98:476-482 pp.
- Colleparidi, M.**, 2005, Admixtures-Enhancing Concrete Performance, 6th Int. *Congress on Global Construction and Ultimate Concrete Opportunities*, Dundee.
- Cunningham, J.C., Dury, B.L. and Gregory, T.**, 1989, Adsorption characteristics of sulfonated melamine formaldehyde condensates by high performance size exclusion chromatography, *Cement and Concrete Research*, 19:919-928 pp.
- Çelik, İ.B.**, 2009, The effects of particle size distribution and surface area upon cement, *Powder Technology*, 188:272–276 pp.
- Dalas, F., Nonat, A., Pourchet, S., Mosquet, M., Rinaldi, D. and Sabio, S.**, 2015, Tailoring the anionic function and the side chains of comb-like superplasticizers to improve their adsorption. *Cement and Concrete Research*, 67:21-30 pp.
- Dalasa, F., Pourchet, S., Rinaldi, D., Nonata, A., Sabio, S. and Mosquet, M.**, 2015, Modification of the rate of formation and surface area of ettringite by polycarboxylate ether superplasticizers during early C₃A–CaSO₄ hydration, *Cement and Concrete Research*, 69:105-113 pp.
- de Larrard, F., Ferrarisi, C.F. and Sedran, T.**, 1998, Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material, *Materials and Structures*, 31:494-498 pp.
- de Larrard, F., Sedran, T., Hu, C., Sztikar, J.C., Joly, M. and Derkx, F.**, 1996, Evolution of the Workability of Superplasticized Concretes: assessment with BTRHEOM Rheometer,” *RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Concrete*, RILEM Proceedings 32, , Glasgow, Scotland, June 3-5, 377-388 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- de Larrard, F., Sztikar, J.C., Hu, C. and Joly, M.,** 1993, Design of a rheometer for fluid concretes, *RILEM Workshop Special Concretes-Workability and Mixing*, 201-208 pp.
- de Reese, J., Lenz, P., Zilch, K. and Plank, J.,** 2013, Influence of type of superplasticizer and cement composition on the adhesive bonding between aged and fresh concrete, *Construction and Building Materials*, 48:717-724 pp.
- Demuth, H. and Beale, M.,** 2000, Neural Network Toolbox for Use With MATLAB, User's Guide, Math Works Inc., California.
- Derjaguin, B.V. and Landau, L.,** 1941, Acta Physicochimica (URSS), 14: p. 633.
- Dils, J., Boel, V. and De Schutter, G.,** 2013, Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC, *Construction and Building Materials*, 41:455-463 pp.
- Dodson, V.H. and Hayden, T.D.,** 1989, Another look at the portland cement/chemical admixture incompatibility problem, *Cement, Concrete and Aggregates*, 11:52-56 pp.
- Domone, P.L.J., Xu, Y. and Banfill, P.F.G.,** 1999, Developments of the two-point workability test for high-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*, 51:181-190 pp.
- EFNARC,** 2005, Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK, www.efnarc.org
- EN 934 (1-6),** 1994, Admixture for concrete, mortar and grout- CEN (Comite European de Normalization).
- Erdoğan, T.Y.,** 2013, Beton, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 741 s.
- Erdoğan, S.,** 2000, Compatibility of Superplasticizers with Cements Different in Composition, *Cement and Concrete Research*, 30:767-773 pp.
- Felekoğlu, B.,** 2009, Yüksek Performanslı Mikro Beton Tasarımı, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı.
- Felekoğlu, B.,** 2014, Rheological behaviour of self-compacting micro-concrete, *Sadhana, Indian Academy of Sciences*, 39(6):1471-1495 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Felekoğlu, B., Tosun, K. and Baradan, B.,** 2011, Compatibility of a polycarboxylate-based superplasticiser with different set-controlling admixtures, *Construction and Building Materials*, 25:1466-1473 pp.
- Flatt, R.J. and Houst, Y.F.,** 2001, A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, 31(8):1169-1176 pp.
- Frigioine, G. and Marra, S.,** 1979, Relationship between particle size distribution and compressive strength in Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 6:113-128 pp.
- García-Maté, M., De la Torre, A.G., León-Reina, L., Losilla, E.R., Aranda M.A.G. and Santacruz, I.,** 2015, Effect of calcium sulfate source on the hydration of calcium sulfoaluminate eco-cement, *Cement and Concrete Composites*, 55:53-61 pp.
- Gay, C. and Raphaël, E.,** 2001, Comb-like polymers in nanoscale pores. *Advances in Colloid and Interface Science*, 94:229-236 pp.
- Gólaszewski, J.** 2012, Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance. *Construction and Building Materials*, 35:586-596 pp.
- Grabiec, A.M. and Piasta, Z.,** 2004, Study on compatibility of cement–superplasticiser assisted by multicriteria statistical optimisation, *Journal of Materials Processing Technology*, 152:197-203 pp.
- Griesser, A.,** 2002, Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures; Rheology, Phase Composition, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems, PhD Thesis. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, NO. 14820, 162 pp.
- Grzeszczyk, S. and Kucharska, L.,** 1988, The influence of alkalis on rheological properties of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 18(1):1-8 pp.
- Grzeszczyk, S. and Kucharska, L.,** 1990, Hydrative reactivity of cement and rheological properties of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 20(2):165-174 pp.
- Habbaba, A., Dai, Z. and Plank, J.,** 2014, Formation of organo-mineral phases at early addition of superplasticizers: The role of alkali sulfates and C_3A content. *Cement and Concrete Research*, 59:112-117 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hackley, V.A. and Ferraris, C.F.**, 2001, The use of nomenclature in dispersion science and technology. NIST recommended practice guide, special publication (960-3)., Washington: National Institute of Standards and Technology. 72 pages.
- Hagan, M.T. and Menhaj, M.**, 1994, Training feed forward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5:989-993 pp.
- Hanehara, S. and 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(8):1159-1165 pp.
- Haykin, S.**, 1998, Neural networks: A comprehensive foundation (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall, (Chapter 5).
- He, T., Shi, C., Li, G. and Song, X.**, 2012, Effects of superplasticizers on the carbonation resistance of C₃S and C₃A hydration products, *Construction and Building Materials*, 36:954-959 pp.
- Higginson, E.C.**, 1970, The effect of Cement Fineness on Concrete", Fineness of Cement, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 473, 71-81 pp.
- Hossack, S.M and Thomas, M.D.A.**, 2015, Evaluation of the effect of tricalcium aluminate content on the severity of sulfate attack in Portland cement and Portland limestone cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, 56:115-120 pp.
- Hot, J., Bessaies-Bey, H., Brumaud, C., Duc, M., Castella, C. and Roussel, N.**, 2014, Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 63:12-19 pp.
- Houst, Y.F, Bowen, P. and Perche, F.**, 2005, Towards Tailored Superplasticizers, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Laboratoire de Technologie des Poudres, 1015 LAUSANNE Switzerland,.
- Houst, Y.F., Flatt, R.J., Bowen, P. and Hofmann, H.**, 1999, Optimization of superplasticizers: From research to application. *RILEM Conference on the Role of Admixtures in High Performance Concrete*, , Monterrey, Mexico, 1-14 pp.
- Hsu, K.C., Chen, S.D. and Su, N.**, 2000, Water-soluble sulfonated phenolic resins. III. effects of degree of sulfonation and molecular weight on concrete workability, *Journal of Applied Polymer Science*, 76,:1762-1766 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hu, J., Ge, Z. and Wang, K.,** 2014, Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times, *Construction and Building Materials*, 50:657-663 pp.
- Huang, X., Marcelo, H. and Garci, A.A.,** 1998, Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope, *journal of fluid mechanics*, 374:305-333 pp.
- Ioannou,S., Paine, K., Reig, L. and Quillin, K.,** 2015, Performance characteristics of concrete based on a ternary calcium sulfoaluminate–anhydrite–fly ash cement, *Cement and Concrete Composites*, 55:196-204 pp.
- Ioannou,S., Reig, L., Paine, K. and Quillin, K.,** 2014, Properties of a ternary calcium sulfoaluminate–calcium sulfate–fly ash cement, *Cement and Concrete Research*, 56:75-83 pp.
- Izumi, T., Satoh, H., Yamamuro, H., Hamada, D., and Mizunuma, T.,** 2003, A new hybrid type superplasticizer, supplementary papers, *Proceedings of the 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Berlin, Germany.
- Jacobs, R.A.,** 1988, Increased rates of convergence through learning rate adaptation, *Neural Networks*, 1:295-307 pp.
- Janowska-Renkas, E.,** 2013, The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes. *Construction and Building Materials*, 38:1204-1210 pp.
- Jarny, N., Roussel, S., Rodts, F., Bertrand, R., Roy, L. and Coussot, P.,** 2005, Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry. *Cement and Concrete Research*, 35(10):1873-1881 pp.
- Jawed, I. and Skalny, J.,** 1978, Alkalies in Cement: a review II. Effects of alkalis on hydration and performance of portland cement, *Cement and Concrete Research*, 8:37-51 pp.
- Jiang, S., Kim, B.G. and Aïtcin, P.C.,** 1999, Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility, *Cement and Concrete Research*, 29:71-78 pp.
- Jian-kang, C. and Min-qiang, J.,** 2009, Long-term evolution of delayed ettringite and gypsum in Portland cement mortars under sulfate erosion, *Construction and Building Materials*, 23:812-816 pp.
- Jolicoeur, C., Nkinamubanzi, P.C., Simard, M.A. and Pottie, M.,** 1994, Progress in understanding the functional properties of superplasticizer in fresh concrete, *ACI SP*, 148:63-88 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jones, R. and Gatfield, E.N.**, 1955, Testing Concrete by an Ultrasonic Pulse Technique, DSIR Road Research Tech. London, HMSO 34 p.
- Kadri, E.H., Aggoun, S. and De Schutter, G.**, 2009, Interaction between C₃A, silica fume and naphthalene sulphonate superplasticiser in high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 23:3124-3128 pp.
- Kantro, DL.**, 1980, Influence of water reducing admixtures on properties of cement paste-a miniature slump test, *Cement, Concrete and Aggregates*, 2:95-102 pp.
- Kecman, V.**, 2001, Learning And Soft Computing. Cambridge, MA: MIT Press, ISBN: 9780262112550, Virginia, 576 pp.
- Kelley, C.T.** 1999, Iterative methods for optimization, *SIAM Frontiers in Applied Mathematics*, ISBN 0-89871, 18:433-438 pp.
- Kim, B.G.**, 2000. Compatibility Between Cements and Superplasticizers in High Performance Concrete: Influence of Alkali Content in Cement and of The Molecular Weight of PNS on The Properties of Cement Pastes and Concretes, Thesis of Doctor of Philosophy, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- Knudsen, T.**, 1984, The dispersion model for hydration of Portland cement I. General concepts, *Cement and Concrete Research*, 14:622-630 pp.
- Koehler, E.P. and Fowler, D.W.**, 2004, Development Of A Portable Rheometer For Fresh Portland Cement Concrete. Aggregates Foundation For Technology, Research and Education (AFTRE), Project No. ICAR-105, August, 306 p.
- Kwan, A.K.H. and Fung, W.W.S.**, 2012, Roles of water film thickness and SP dosage in rheology and cohesiveness of mortar, *Cement and Concrete Composites*, 34:121-130 pp.
- Kwan, A.K.H. and Wong, H.H.C.**, 2008, Effects of packing density, excess water and solid surface area on flowability of cement pastes, *Advances in Cement Research*, 20:1-11 pp.
- Lange, A., Hirata, T. and Plank, J.**, 2014, Influence of the HLB value of polycarboxylate superplasticizers on the flow behavior of mortar and concrete, *Cement and Concrete Research*, 60:45-50 pp.
- Łaźniewska-Piekarczyk, B.**, 2013, The influence of admixtures type on the air-voids parameters of non-air-entrained and air-entrained high performance SCC. *Construction and Building Materials*, 41:109-124 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Li, C.Z., Feng, N.Q., Li, Y.D. and Chen, R.J.**, 2005, Effects of polyethylene oxide chains on the performance of polycarboxylate-type water-reducers. *Cement and Concrete Research*, 35(5):867–873 pp.
- Li, G., He, T., Hu, D. and Shi, C.**, 2012, Effects of two retarders on the fluidity of pastes plasticized with aminosulfonic acid-based superplasticizers, *Construction and Building Materials*, 26:72–78 pp.
- Magallanes-Rivera, R.X. and Escalante-García, J.I.**, 2014, Hemihydrate or waste anhydrite in composite binders with blast-furnace slag: Hydration products, microstructures and dimensional stability, *Construction and Building Materials*, 71: 317-326 pp.
- Mailvaganam, N.P.**, 1979, Slump Loss in Flowing Concrete, *ACI SP-62*, 389-403 pp.
- Malhotra, V.M. and Malanka, D.**, 1978. Performance of Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada.
- Manjit, S.**, 2000, Influence of blended gypsum on the properties of Portland cement and Portland slag cement, *Cement and Concrete Research*, 30:1185-1188 pp.
- Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yılmaz, G., Arıöz, Ö., Ramyar, K.**, 2013, Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 47:1020–1025 pp.
- Mc Culloch, W.S., and Pitts, W.**, 1943, A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115-133 pp.
- Mechtcherine, V., Secieru, E. and Christof, S.C.**, 2015, Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars-Development of yield stress and plastic viscosity over time, *Cement and Concrete Research*, 67:52–65 pp.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M.**, 2006, Concrete, 3rd Edn., McGraw-Hill Companies Inc., New York.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M.**, 2010, Concrete: Microstructure, Properties, And Materials. 3th ed. McGraw- Hill.
- Mehta, P.K.**, 1997, Durability-Critical issues for the future, *Concrete International*, 19:27-33.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D.**, 2003, Concrete, Prentice-Hall, Pearson Education Inc., Second Edition, 644 p.
- Mollah, A., Yousuf, M., Palta, P., Hess, T.R., Vempati, R.K. and Cocke D.L.**, 1995, Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer on the hydration of portland cement and solidification/stabilization consequences, *Cement and Concrete Research*, 25:671-682 pp.
- Mollah, M.Y.A., Adams, W.J., Schennach, R., and Cocke, D.L.**, 2000, A review of cement-superplasticizer interactions and their models. *Advances in Cement Research*, 12(4):153-161 pp.
- Mork, H.J.** 1994, Effect of Gypsum-Hemihydrate Ratio in the Cement on the Rheological Properties of Fresh Concrete, Norwegian University of Science and Technology, Dr Ing Dissertation.
- Mork, H.J. and Gjoerv, E.O.**, 1997, Effect of gypsum-hemihydrate ratio in cement on rheological properties of fresh concrete, *ACI Materials Journal*, 42- 146.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H. and Salloum, Y.A.**, 2012, Development of eco-friendly binder using metakaolin-fly ash–lime-anhydrous gypsum, *Construction and Building Materials*, 35:772-777 pp.
- Mun, K.J., So, S.Y. and Soh, Y.S.**, 2007, The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 21:1576-1582 pp.
- Nakajima, Y. and Yamada, K.**, 2004, The effect of the kind of calcium sulfate in cements on the dispersing ability of poly β -naphthalene sulfonate condensate superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, 34:839-844 pp.
- Nawa, T., Uchi, H. and Fukaya, Y.**, 1989, Effect of alkali sulfate on the rheological behavior of cement paste containing a superplasticizer, *ACI Special Publication*, 119:405-424 pp.
- Nelsen, R.B.**, 2001, Kendall tau metric", in Hazewinkel, Michiel, *Encyclopedia of Mathematics*, Springer, ISBN 978-1-55608-010-4.
- Neville, A.M. and Brooks. J.J.**, 2010, Concrete Technology, 2nd ed., Longman, UK, 442p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Neville, A.M.**, 1971, Hardened concrete; physical and mechanical aspects, *ACI Monograph*, 6:48-53 pp.
- Neville, A.M.**, 1995, Properties of Concrete, 4th Edn., Longman Group Limited, Ch 1: Portland Cement, Essex, England, 20-25.
- Ng, S. and Justnes, H.**, 2015, Influence of dispersing agents on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high loading of calcined marl, *Cement and Concrete Composites*, 60:123–134 pp.
- Nielsson, I. and Wallevik, OH.**, 2003, Rheological evaluation of some empirical test methods-preliminary results. In: Wallevik O, Nielsson I (eds) *Third international RILEM symposium, RILEM Pub. PRO 33. Reykjavik, Iceland*, 59–68 pp.
- Nkinamubanzi, P.C. and Fournier, B.**, 2003, Evaluation of the Potential Use of the Superplasticizer Alphasol FT30LV with Canadian Cements, *Materials Technology Laboratory, Report MTL*, 44(CF).
- Nkinamubanzi, P.C.**, 1993, Influence des dispersants polymériques (superplastifiants) sur les suspensions concentrées et les pâtes de ciment, Université de Sherbrooke (Canada): Sherbrooke (Canada), 180 p.
- Ondova, M., Stevulova, N. and Estokova, A.**, 2012, The study of the properties of fly ash based concrete composites with various chemical admixtures, *Procedia Engineering*, 42:1863-1872 pp.
- Osbaeck, B. and Johansen, V.**, 1989, Particle size distribution and rate of strength development of Portland cement, *Journal of American Ceramic Society*, 72:197-201 pp.
- Ouyanga, X., Jiangb, X., Qiu, X., Yanga, D. and Panga, Y.**, 2009, Effect of molecular weight of sulfanilic acid-phenol-formaldehyde condensate on the properties of cementitious system, *Cement and Concrete Research*, 39(4):283-288 pp.
- Papageorgiou, A., Tzouvalas, G. and Tsimas, S.**, 2005, Use of inorganic setting retarders in cement industry, *Cement & Concrete Composites*, 27:183–189 pp.
- Perenchio, W.F., Whiting, D.A. and Kantro, D.L.**, 1979, Water reduction, slump loss and entrained air void systems as influenced by superplasticizers, *ACI SP-62*, 137-156 pp.
- Petit, J., Wirquin, E. and Khayat, K.H.**, 2010, Effect of temperature on the rheology of flowable mortars, *Cement and Concrete Composites*, 32:43-53 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Petre, I., Moanță, A. and Muntean, M.,** 2012, Ordinary portland cement with advanced fineness used for grout mixes, *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 74(4): 103-112 pp.
- Pilleo, R. 1955,** Comparison of results of three methods for determining young's modulus of elasticity of concrete, *Journal of American concrete institute*, 51(1):461-470 pp.
- Pommersheim, J.M.,** 1987, Effect of particle size distribution on hydration kinetics, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 85:301-306 pp.
- Popovics, S.,** 1992, Concrete Materials; Properties, Specifications and Testing, Second Edition NOYES PUBLICATIONS, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.
- Price, W.H.,** 1951, Factors influencing concrete strength, *Journal of American Concrete Institute*, 22(6):417-432 pp.
- Prince, W.H, Espagne, M. and Aïtcin, P.C.** 2003, Ettringite formation: A crucial step in cement superplasticizer compatibility, *Cement and Concrete Research*, 33:635-641 pp.
- Prince, W.H., Edwards-Lajnef, M. and Aïtcin, P.C.,** 2002, Interaction between ettringite and a polynaphthalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste, *Cement and Concrete Research*, 32: 79-85 pp.
- Punkki, J., Golaszewski, J. And Giorv, O.E.,** 1996, Workability loss of high-strength concrete, *ACI Materials Journals*, 93(5):427-431 pp.
- Quennoz, A. And Scrivener, K.L.,** 2013, Interactions between alite and C₃A-gypsum hydrations in model cements, *Cement and Concrete Research*, 44:46-54 pp.
- Qureshi, L.A., Jawad, A., Bukhari, I.A. and Munir, M.J.,** 2010, Variation in fineness of portland cement and its effects on properties of high strength concrete.
- Ramachandran, V.S.,** 1995, Concrete Admixtures Handbook,' Noyes Publications, New Jersey.
- Ramachandran, V.S.,** 2002, Concrete admixtures handbook'', Standard Publishers, New Delhi.
- Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C. and Spiratos, N.,** 1998, Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete. CANMET, Ottawa, Canada, 404 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rana, Q., Somasundaranb, P., Miaoa, C., Liua, J., Wuc, S. and Shenc, J., 2009**, Effect of the length of the side chains of comb-like copolymer dispersants on dispersion and rheological properties of concentrated cement suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 336(2):624-633 pp.
- Reidmiller, M. and Braun, H., 1993**, A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, New York, May 10-15, 586-595 pp.
- RILEM Technical Committee 84 AAC, 1990**, Applications of Admixtures for Concrete.
- Rixom, M.R. and Mailvaganam, N.P., 1986**, Chemical Admixtures for Concrete, E&FN Spon, London.
- Rixom, M.R., 1978**, Chemical Admixtures for Concrete , E&FN SPON, London.
- Rixom, R. and Mailvaganam, N., 1999**, Chemical Admixtures for Concrete, E&FN Spon, London.
- Rixom, R. and Waddicor, J., 1981**, Role of lignosulfonates as superplasticizers, *ACI SP-68*, 359-379 pp.
- Roberts, L.R., 1995**, Dealing with cement admixture interactions, 23rd Annual Convention of the Institute of Concrete Technology, Telford, UK.
- Rollet, M., Levy, C. and Cavailles, R., 1992**, Evaluation of compatible superplasticizer for the production of high strength concrete, *9th Int. Congress on the Chemistry of Cement*, New Delhi, 115-121 pp.
- Roussel, N., 2007**, The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. *Materials and Structures*, 40(9):889-96 pp.
- Rumelhart, D.E. and McClelland, J.L., 1986**, Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition, MIT Press, Cambridge, MA.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. and Williams, R., 1986**, Learning internal representations by error propagation. In: D. Rumelhart, J. McClelland (Eds.) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, 1: (318-362 pp.) MIT Press, Cambridge.
- Sakai, E. and Daimon, M., 1997**, Dispersion mechanisms of alite stabilized by superplasticizers containing polyethylene oxide graft chains. *5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Rome, 187-201 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schatzmann, M.**, 2005, Rheometry For Large Particle Fluids And Debris Flows. PhD Thesis. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 16093, 192pp. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:27979>
- Schatzmann, M., Bezzola, G.R., Fischer, P., Windhab, E.J. and Minor, H.E.**, 2004, The ball measuring system-a new rheometric tool to determine the flow curve of large particle material. Swiss Group of Rheology Annual Meeting, Poster Session, Lausanne/Switzerland.
- Schatzmann, M., Fischer, P. and Bezzola, G.R.**, 2003, Rheological behaviour of fine and large particle suspensions. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129 (10):796-803 pp.
- Sezer, A.**, 2011, Prediction of shear development in clean sands by use of particle shape information and artificial neural networks, *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5603-5613 pp.
- Shen, Y., Qian, J., and Zhang, Z.**, 2013, Investigations of anhydrite in CFBC fly ash as cement retarders, *Construction and Building Materials*, 40:672–678 pp.
- Simard, M.A., Nkinamubanzi, P.C., Jolicoeur, C., Perraton, D. and Aïtcin, P.C.**, 1993, Calorimetry, rheology and compressive strength of superplasticized cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 23:939-950 pp.
- Sonebi, M., Lachemi, M. and Hossain K.M.A.**, 2013, Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture. *Construction and Building Materials*, 38:126-38 pp.
- Soy, S.**, 2013, Yarbay Beton Genel Koordinatörü, Kişisel yazışma, beton48000@hotmail.com
- Strutz, T.**, 2010, Data fitting and uncertainty (A practical introduction to weighted least squares and beyond). Vieweg+teubner, ISBN 978-3-8348-1022-9.
- Tagnit-Hamou, A. and Aïtcin, P.C.**, 1993, Cement and Superplasticizer Compatibility, *World Cement*, 38-42 pp.
- Tagnit-Hamou, A., Baalbaki, M. and Aïtcin, P.C.**, 1992, Calcium optimization in low water/cement ratio concretes for rheological purposes, *9th International Congress on the Chemistry of Cement*, New Delhi, 21–25 pp.
- Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G.**, 1983, The rheology of fresh concrete, Pitman, London, 356 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tattersall, G.H. and Bloomer, S.J.**, 1979, Further development of the two-point test for workability and extension of its range, *Magazine of Concrete Research* 31: 202-210 pp..
- Taylor, H.F.W.**, 1997, Cement Chemistry, 2nd Edn., Thomas Telford, London.
- Telesca, A., Marroccoli, M., Pace, M.L., Tomasulo, M. Valenti, G.L. and Monteiro, P.J.M.**, 2014, A hydration study of various calcium sulfoaluminate cements, *Cement & Concrete Composites* 53:224–232 pp.
- THBB**, 2012, 2012 yılı Türkiye hazır beton birliği istatistikleri, www.thbb.org-info@thbb.org.
- THBB**, 2014, 2014 yılı Türkiye hazır beton birliği istatistikleri, www.thbb.org-info@thbb.org
- Tosun, K.**, 2003, Effect of SO₃ content and fineness on the rate of delayed ettringite formation in heat cured Portland cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, 28:761-772 pp.
- TS EN 1097-6**, 2007, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2**, 2010, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-6**, 2002, Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3**, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7**, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12504-4**, 2012, Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1**, 2002, Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206-1**, 2004, Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS EN 934-2+A1**, 2002, Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tzouvalas, G., Dermatas, N. and Tsimas, S.** 2004, Alternative calcium sulfate-bearing materials as cement retarders Part I. Anhydrite, *Cement and Concrete Research*, 34:2113-2118 pp.
- Uchikawa, H., 1994.** Hydration of Cement and Structure Formation and Properties of Cement Paste in the Presence of Organic Admixture, Importance of Recent Microstructural Developments in Cement and Concrete, Sherbrooke, Canada.
- Uchikawa, H., 1995,** Hydration of cement and structure formation and properties of cement paste in the presence of organic admixture, *Journal of Research of the Chichibu Onda Cement Corporation*, 46(129): 1-53 pp.
- Uchikawa, H., Hanehara, S. and Sawaki, D., 1997,** The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture, *Cement and Concrete Research*, 27(1): 37-50 pp.
- Uchikawa, H., Hanehara, S., Shirasaka, T. and Sawaki, D., 1992,** Effect of Admixture of hydration of Cement, Adsorptive behaviour of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, 22:1115-1129 pp.
- Uchikawa, H., Sawaki, D. and Hanehara, S., 1995,** Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, 25(2):353-364 pp.
- Uchikawa, H., Uchida, S., Ogawa, K. and Hanehara, S., 1984,** Influence of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ and CaSO_4 on the initial hydration of clinker with different burning temperature. *Cement and Concrete Research*, 14:645-656 pp.
- US Bureau of Reclamation, 1956,** Investigation into the effects of Cement Fineness and Alkali Content on Various Properties of Concrete and Mortar, Concrete Laboratory Report No. C-814, Denver, Colorado.
- Uyanık, M., 2012,** EFCA Statistics Collection Request 2012, Katkı Üreticileri Birliği Genel Sekreteri, Kişisel yazışma, info@kub.org.tr
- Uyanık, M., 2013,** Katkı Üreticileri Birliği Genel Sekreteri, Kişisel yazışma, info@kub.org.tr.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vernet, C. and Noworyta, G.,** 1992, Reactivity test for fine silicas and pozzolonic mineral additives, *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of cement*, New delhi, Vol III, 79-85 pp.
- Verwey, E.J.W. and Overbeek, J.T.G.,** 1948, Theory of the stability of lyphophobic colloids, Amsterdam: Elsevier.
- Vikan, H., Justnes, H., Winnefeld, F. and Figi, R.,** 2007, Correlating cement characteristics with rheology of paste, *Cement and Concrete Research*, 37:1502-1511 pp.
- Vuk, T., Tinta, V., Gabrovsek, R. and Kaucic, V.,** 2001, The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 31:135-139 pp.
- Wakasugi, S., Sakai, K., Shimobayashi, S. and Watanabe, H.,** 1998, Properties of concrete using belite-based cement with different fineness, O.E. Gjorv Editor, *Concrete Under Severe Conditions*, 2 E & FN, Spon, London, 2161–2169.
- Wallevik, O.H. and Gjorv, O.E.,** 1990, Development of a Coaxial Cylinder Viscometer for Fresh Concrete, Properties of Fresh Concrete, proceedings of the Rilem Colloquium, Chapman & Hall, Hanover, October, 213-224 pp.
- Wallevik, O.H.,** 1990, The Rheology of Fresh Concrete and its Application on Concrete with and without Silica Fume, P.h. D thesis 1990:45, NTH Trondheim. 185 p. (in Norwegian).
- Wang, X., Pang, Y., Lou, H., Deng, Y. and Qiu, X.,** 2012, Effect of calcium lignosulfonate on the hydration of the tricalcium aluminate–anhydrite system, *Cement and Concrete Research*, 42:1549-1554 pp.
- Whitehurst, E.A.,** 1951, Soniscope test concrete structure, *J. Am. Concr. Inst.* 47:443-444 pp.
- Widrow, B. and Hoff, M.E.,** 1960, Adaptive switching circuits, 1960 IRE WESCON Convention Record, New York, 96-10.
- Wuhrer, J., Rio, A. and Von Baldass, F.,** 1950, Zement-Kalk-gips, 3:148.
- Yahia, A. and Tanimura, M.,** 2015, Rheology of belite-cement-Effect of w/c and high-range water-reducer type, *Construction and Building Materials*, 88:169-174 pp.
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S. and Matsuhisa, M.,** 2000, Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, 30(2):197–207 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yoshioka, K., Sakai, E., Diamon, M. and Kitahara, A.,** 1997, Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete, *Journal of the American Ceramic Society*, 80(10):2667-2671 pp.
- Zhou, J., Liu, C., Shu, Z., Yu, D., Zhang, Q., Li, T. and Xue, Q.,** 2015, Preparation of specific gypsum with advanced hardness and bending strength by a novel In-situ Loading-Hydration Process, *Cement and Concrete Research*, 67:179-183 pp.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Mardani Aghabaglou, 26.05.1985 yılında İran'da, Oroumیهh şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Oroumیهh'de tamamladı. 2003 yılında başladığı Oroumیهh Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında mezun oldu. 2004'ten 2008 yılına kadar Orumiye'de İran Shanlı Yol'da şantiye şefi olarak çalıştı. 2009 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dal'ında başladığı Yüksek Lisans eğitimine 2011 yılında bitirdi. Aynı yılında, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dal'ında Doktora eğitimine başlamıştır.