

**YÜKSEK ORANDA SU AZALTICI KATKI KİMYASAL  
YAPISININ UÇUCU KÜL İÇEREN ÇİMENTOLU  
SİSTEMLERİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Muhammet Gökhan ALTUN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ORANDA SU AZALTICI KATKI KİMYASAL YAPISININ UÇUCU  
KÜL İÇEREN ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Muhammet Gökhan ALTUN  
0000-0002-9345-9907

Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Muhammet Gökhan ALTUN tarafından hazırlanan “YÜKSEK ORANDA SU AZALTICI KATKI KİMYASAL YAPISININ UÇUCU KÜL İÇEREN ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

- Başkan:** Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU İmza  
0000-0003-0326-5015  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN İmza  
0000-0002-1867-7103  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Kambiz RAMYAR İmza  
0000-0003-2200-2691  
Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. İsa YÜKSEL İmza  
0000-0002-5176-9990  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Şemsi YAZICI İmza  
0000-0002-2733-0515  
Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat  
Mühendisliği Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**  
.../.../2021

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**.../.../2021**

**Muhammet Gökhan ALTUN**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Doç. Dr. Ali MARDANİ AGHABAGLOU  
08/12/2021

Muhammet Gökhan ALTUN  
08/12/2021

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Doktora Tezi

### YÜKSEK ORANDA SU AZALTICI KATKI KİMYASAL YAPISININ UÇUCU KÜL İÇEREN ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

**Muhammet Gökhan ALTUN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

Bu çalışmada, polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkının kimyasal yapısının uçucu kül ikameli çimentolu sistemlerin adsorpsiyon performansına, priz süresine, taze hal özelliklerine, reolojik özelliklerine ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında ana zincir uzunluğu farklı 3 adet su azaltıcı katkı, ikinci aşamada yan zincir uzunluğu farklı 3 adet su azaltıcı katkı, üçüncü aşamada sabit molekül ağırlığında ana ve zincir uzunlukları farklı 3 adet su azaltıcı katkı, dördüncü aşamada ise anyonik monomeri %100 karboksilat ve karboksilat ile %10 ve 30 oranlarında ikame edilen fosfat ve sülfonat fonksiyonel grupları içeren 5 adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Sentezlenen tüm katkıların anyonik/non-iyonik mol oranı ve serbest non-iyonik içeriği sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, uçucu kül kullanımından bağımsız, katkı anyonik monomerinin fosfat ve sülfonat ile ikame edilmesi ve katkı ana zincir ve yan zincir uzunluğunun belirli bir değerden yüksek veya düşük olması hamur ve harç karışımlarının taze hal özelliklerini, reolojik özelliklerini ve zamana bağlı akışkanlık performanslarını olumlu yönde etkilemiştir. Ancak karışımların basınç dayanımı ve su emme kapasitelerinde kayda değer bir etki oluşturmamıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da katkının etkisinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Buna ilaveten su azaltıcı katkı özelliğinden bağımsız olarak uçucu kül ikame oranının artmasıyla karışımların reolojik özellikleri ve zamana bağlı yayılma özellikleri olumsuz etkilenmiş, su emme oranı azalmıştır. Ayrıca erken basınç dayanımları azalırken ileri yaş dayanımları uçucu kül kullanımı ile olumlu yönde etkilenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Su azaltıcı katkı, anyonik monomer, ana zincir, yan zincir, molekül ağırlık, çimentolu sistemler, uçucu kül, taze hal özellikler, reoloji  
**2021, xiv + 207 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### EFFECT OF CHEMICAL STRUCTURE OF HIGH RANGE WATER REDUCING ADMIXTURE ON PROPERTIES OF CEMENTITIOUS SYSTEMS CONTAINING FLY ASH

**Muhammet Gökhan ALTUN**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

In this study, the effects of the chemical structure of polycarboxylate-based high range water reducing admixture on the adsorption performance, setting time, fresh state properties, rheological properties and some hardened state properties of fly ash substituted cementitious systems were investigated. In the first stage of the study, 3 admixtures with different main chain lengths, 3 admixtures with different side chain lengths in the second stage, 3 admixtures with constant molecular weight and different chain lengths in the third stage, and in the fourth stage 5 admixtures with different anionic monomers were synthesized. According to the test results, regardless of the use of fly ash, the substitution of the admixture anionic monomer with phosphate and sulfonate and the admixture main chain and side chain lengths higher or lower than a certain value positively affected the fresh state properties, rheological properties and time-dependent fluidity performances of paste and mortar mixtures. However, it did not have a significant effect on the compressive strength and water absorption capacity of the mixtures. It was determined that the effect of the admixture was similar in all fly ash substituted mixtures. In addition, the rheological properties and time-dependent flow performances of the mixtures were adversely affected and the water absorption rate decreased by the increase in the fly ash replacement ratio, independent of the water reducing admixture. In addition, while the early compressive strengths decreased, strength at later ages were positively affected by the use of fly ash.

**Key words:** Water reducing admixture, anionic monomer, main chain, side chain, molecular weight, cementitious systems, fly ash, fresh state properties, rheology  
**2021, xiv + 207 pages.**

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın danışmanlığını yürüten, çalışmanın her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, vaktini ve desteklerini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU'na,

Doktora tez çalışması süresince çalışmaya yön veren görüş, öneri ve tecrübelerinden dolayı tez izleme komite üyelerim Bursa Uludağ Üniversitesi rektör yardımcısı değerli hocam Sayın Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN'e ve Ege Üniversitesi Öğretim Üyesi değerli hocam Sayın Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a,

Laboratuvar çalışmaları sürecinde yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğretim Üyesi Süleyman ÖZEN'e ve saygıdeğer arkadaşlarım inşaat yüksek mühendisi Kemal KARAKUZU, inşaat mühendisi İdris SAKİN ve inşaat teknikeri Yasin YILDIRIM'a

Su azaltıcı katkıların temini konusunda yardımcı olan Polisan Kimya A.Ş.'ye ve çalışanlarına, çimento ve agrega temini konusunda yardımcı olan Bursa Beton A.Ş.'ye, DDP(MH)-2019/15 ve AYP(MH)-2016/16 no'lu projeler ile tezimi maddi olarak destekleyen Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine,

Öğrenim hayatım boyunca gösterdikleri her türlü sabır ve fedakarlıklarından dolayı annem ve babam başta olmak üzere tüm aileme ve bu yoğun doktora çalışması süresince her türlü destek ve sabrını benden esirgemeyen, varlığı ile hayatıma değer katan eşim Esra ALTUN ve kızım Ayla Minel ALTUN'a sonsuz teşekkür ederim.

Muhammet Gökhan ALTUN  
.../.../2021



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	6
2.1. Çimentolu Sistemler.....	6
2.1.1. Çimento .....	6
2.1.2. Agregası .....	10
2.1.3. Karışım suyu .....	13
2.1.4. Mineral katkıları .....	15
2.1.5. Kimyasal katkıları .....	22
2.2. Uçucu Kül .....	27
2.2.1. Uçucu külün mineral ve kimyasal bileşimi .....	27
2.2.2. Uçucu külün fiziksel özellikleri .....	30
2.2.3. Puzolanik aktivite.....	32
2.2.4. Uçucu kül ile ilgili yapılan çalışmalar .....	32
2.3. Su Azaltıcı Katkı .....	43
2.3.1. Su azaltıcı katkının türleri .....	43
2.3.2. Su azaltıcı katkının kimyasal yapısı.....	45
2.3.3. Su azaltıcı katkının sentez yöntemleri.....	48
2.3.4. Su azaltıcı katkının çalışma mekanizması.....	49
2.3.5. Su azaltıcı katkı ile ilgili yapılan çalışmalar.....	54
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	82
3.1. Malzemeler.....	82
3.1.1. Çimento .....	82
3.1.2. Uçucu kül .....	83
3.1.3. Agregası .....	84
3.1.4. Karışım suyu .....	84
3.1.5. Su azaltıcı katkıları.....	84
3.2. Yöntem.....	87
3.2.1. Karışım yöntemleri .....	89
3.2.2. Numunelerin isimlendirilmesi.....	89
3.2.3. Karışım oranları .....	93
3.2.4. Numunelerin kürlenmesi.....	94
3.2.5. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi analizi.....	94
3.2.6. Jel geçirgenlik kromatografisi analizi.....	95
3.2.7. Toplam organik karbon analizi.....	96
3.2.8. Priz sürelerinin belirlenmesi .....	97
3.2.9. Marsh-hunisi akış süresi ve mini-yayımla değerlerinin belirlenmesi .....	98
3.2.10. Reolojik özelliklerinin belirlenmesi .....	100
3.2.11. Zamana bağlı yayılma değerlerinin belirlenmesi .....	102
3.2.12. Zamana bağlı mini V-hunisi akış süresi değerlerinin belirlenmesi.....	103
3.2.13. Basınç dayanımının belirlenmesi.....	104

3.2.14. Su emme kapasitelerinin belirlenmesi.....	105
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	106
4.1. FTIR Analizi Sonuçları.....	106
4.2. GPC Analizi Sonuçları.....	108
4.3. TOC Analizi Sonuçları.....	114
4.4. Priz Süresi Sonuçları.....	119
4.5. Marsh-Hunisi Akış Süresi ve Mini-Çökme Deney Sonuçları.....	124
4.6. Reoloji Deneyi Sonuçları.....	137
4.7. Zamana Bağlı Yayılma ve Mini V Hunisi Akış Süresi Sonuçları.....	152
4.8. Basınç Dayanımı Sonuçları.....	179
4.9. Su Emme Kapasitesi Sonuçları.....	183
5. SONUÇ.....	188
KAYNAKLAR.....	193
ÖZGEÇMİŞ.....	205

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

A	Yüzey alanı
C	Karboksilat
C <sub>2</sub> S	Dikalsiyum silikat
C <sub>3</sub> A	Trikalsiyum alüminat
C <sub>3</sub> S	Trikalsiyum silikat
C <sub>4</sub> AF	Tetrakalsiyum alumino ferrit
CH	Portlandit
cps	Centepoise
C-S-H	Kalsiyum silika hidrat
F	Fosfat
$f_m$	Basınç dayanımı
k	Ana zincir uzunluk katsayısı
m	Su emme oranı
M <sub>n</sub>	Katkı molekül ağırlığı (sayıca)
M <sub>w</sub>	Katkı molekül ağırlığı (ağırlıkça)
P	Yük
pH	Power of hydrogen
ppm	Parts per million
Q	Adsorpsiyon miktarı
rpm	Revolutions per minute
S	Sülfonat
T	Moment
V	Hacim
Γ	Deformasyon hızı
τ	Kayma gerilmesi
Ω	Dönme hızı

### Kısaltmalar

### Açıklama

AA	Akrilik asit
AAME	Akrilik asit metil ester
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACI	American concrete institute
AM	Akrilamit
AMPS	Akrilamit metil propan sülfonik
AP	Amonyum persülfat
ASR	Alkali silika reaksiyonu
ASTM	American society for testing and materials
BSE	Backscattered electron
DSİ	Devlet Su İşleri
EFNARC	European federation of national associations representing for concrete
EKG	Eşik kayma gerilmesi

EN	European norms
FRP	Free radical polymerization
FTIR	Fourier transform infrared spektrofotometre
GPC	Gel permeation chromatography
LOI	Loss of ignition
MPA	Merkaptopropionik asit
PAİ	Puzolanik aktivite indeksi
PC	Polikarboksilat
PCE	Polikarboksilat esaslı katkı
PDI	Polidisperite index
PEG	Polietilen glikol
RAFT	Reversible addition-fragmentation chain transfer
RALS	Right angle light scattering
RI	Refractive index
RILEM	Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux
SEM	Scanning electron microscope
SFS	Sodyum formaldehit sülfoksilat
SG	Sodyum glukonat
SMAS	Sodyum metalil sülfonat
TOC	Total organic carbon
TS	Türk standartları
TSE	Türk standartları enstitüsü
UK	Uçucu kül
UPV	Ultrasonic pulse velocity
YFC	Yüksek fırın cürufu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1.	Karma okstilerin SEM görüntüleri a) C <sub>3</sub> S, b) C <sub>2</sub> S, c) C <sub>3</sub> A, d) C <sub>4</sub> AF..... 8
Şekil 2.2.	Çimento hidratasyon ürünleri a) CSH, b) Portlandit, c) Etrenjit, d)Tetrakalsiyumalüminat kristalleri (Afm) ..... 9
Şekil 2.3.	Çimentonun hidratasyonu esnasındaki kalorimetrik eğrisi ..... 10
Şekil 2.4.	Maksimum agrega tane çapı 16 mm olan standart granülometri eğrisi... 12
Şekil 2.5.	Kömür yakılan termik santrale ait akış şeması..... 16
Şekil 2.6.	Ferrosilisyum alaşımı üretimine ait akış şeması..... 18
Şekil 2.7.	Yüksek fırın cürufunun elde edilmesine ait akış şeması ..... 19
Şekil 2.8.	Su azaltıcı katkıların elektrostatik ve sterik etkisi ..... 23
Şekil 2.9.	Çimento ve agregalar arası hava boşluklarının etkileşim mekanizması.. 25
Şekil 2.10.	Su geçirimsizliği sağlayan katkının çalışma mekanizması ..... 25
Şekil 2.11.	Çeşitli uçucu küllere ait parçacıkların SEM görüntüleri (a) katı camsı küreler ve senosferler, (b) serbest kireç, (c) plerosferler, (d) açısız kuvars kritasli, (e) manyetit kaplı küre, (f) kalsit kristali, (g) yanmamış karbon, (h) mullit kristalleri..... 31
Şekil 2.12.	Uçucu küllere ait SEM görüntüleri; a) C sınıfı, b) F sınıfı..... 35
Şekil 2.13.	Yüksek sıcaklığa maruz kalan uçucu küllü geopolimer betonların görüntüleri; a) yüksek sıcaklık sonrası görüntü, b) SEM görüntüsü 650 °C, c) SEM görüntüsü 800 °C, d) SEM görüntüsü 1000 °C..... 36
Şekil 2.14.	Pull-out testi sonucu kirişlerde oluşan çatlaklar ..... 37
Şekil 2.15.	Grafen oksit-çimento-uçucu kül birleşimi çalışma mekanizmasının şematik gösterimi..... 38
Şekil 2.16.	Akışkanlık deneyleri; a) Marsh-hunisi deneyi, b) mini-çökme deneyi ... 39
Şekil 2.17.	Reaktif uçucu küle ait BSE görüntüsü..... 40
Şekil 2.18.	Deniz suyu etkisine maruz bırakılan beton numuneler ..... 41
Şekil 2.19.	90 günlük karışımların SEM görüntüleri; a) katkılı, b) katkısız ..... 42
Şekil 2.20.	Su azaltıcı katkı türlerinin kimyasal yapısı ..... 44
Şekil 2.21.	Polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkının yapısının şematik çizimi. 46
Şekil 2.22.	FRP yönteminin şematik gösterimi ..... 48
Şekil 2.23.	RAFT yönteminin şematik gösterimi ..... 49
Şekil 2.24.	Elektrostatik itme prensibinin şematik gösterimi ..... 51
Şekil 2.25.	Adsorbe olmuş kimyasal katkının olması durumunda yüklü yüzeylerdeki potansiyellerin şematik gösterimi..... 51
Şekil 2.26.	Su azaltıcı katkıların çimento taneleri elektrostatik etki sayesinde dağıtması a) topaklaşmış çimento hamuru karışımı; b) su azaltıcı katkı ilaveli çimento hamuru karışımı ..... 53
Şekil 2.27.	Parçacıkların sterik itme kuvveti nedeniyle ittirilmesi ..... 54
Şekil 2.28.	Su azaltıcı katkının kimyasal yapısı ..... 55
Şekil 2.29.	Su azaltıcı katkının kimyasal yapısı ..... 57
Şekil 2.30.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi..... 58
Şekil 2.31.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (PC1-eter, PC2-ester) ..... 60
Şekil 2.32.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi..... 61

Şekil 2.33.	Adsorpsiyon deney sonuçları .....	62
Şekil 2.34.	TOC analizi sonuçları.....	63
Şekil 2.35.	Zeta potansiyeli deney sonuçları .....	63
Şekil 2.36.	Yayıma deney sonuçları .....	64
Şekil 2.37.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	65
Şekil 2.38.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	67
Şekil 2.39.	Katkıların adsorpsiyon mekanizmalarının şematik gösterimi: (a) kontrol katkısı, (b) modifiye edilmiş katkı.....	68
Şekil 2.40.	Katkı ile çimento taneciği yüzeyindeki adsorpsiyon tabakasının şematik gösterimi .....	69
Şekil 2.41.	Katkının adsorpsiyon mekanizmasının şematik gösterimi .....	70
Şekil 2.42.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	71
Şekil 2.43.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	72
Şekil 2.44.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	73
Şekil 2.45.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	74
Şekil 2.46.	Katkıların kimyasal yapılarının açık şematik gösterimi a) AA, b) AM, c) AAME, d) SMAS, e) AMPS .....	75
Şekil 2.47.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	76
Şekil 2.48.	Sentez yöntemleri .....	78
Şekil 2.49.	Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi.....	79
Şekil 2.50.	Sentezlenen katkıların çalışma mekanizması .....	80
Şekil 2.51.	Sentezlenen katkıların şematik gösterimi.....	81
Şekil 3.1.	Su azaltıcı katkıların şematik çizimi; a) karboksilat, b) sülfonat ikameli, c) fosfat ikameli.....	85
Şekil 3.2.	DeneySEL çalışmanın şematik gösterimi .....	88
Şekil 3.3.	Numune isimlendirmesinin şematik gösterimi.....	90
Şekil 3.4.	Kür havuzu .....	94
Şekil 3.5.	FTIR deney aleti .....	95
Şekil 3.6.	GPC analizi deney aleti .....	95
Şekil 3.7.	TOC analizi deney aleti.....	96
Şekil 3.8.	Katı ve sıvı fazın manyetik karıştırıcı vasıtasıyla ayrıştırılması. A) Karışık faz hali B) Manyetik karıştırıcı C) Ayrılmış faz halleri .....	97
Şekil 3.9.	Priz süresi deney aleti.....	98
Şekil 3.10.	Marsh-hunisi ve mini-yayıma deneyleri. A) Marsh-hunisi B) Mini-çökme.....	99
Şekil 3.11.	Reometre cihazı .....	100
Şekil 3.12.	Hamur ve harç karışımlarının reolojik parametrelerinin incelenmesinde uygulanan periyotlar .....	101
Şekil 3.13.	Zamana bağlı yayılma deneyi.....	103
Şekil 3.14.	Mini V-hunisi deneyi.....	104
Şekil 3.15.	Basınç test cihazı .....	105
Şekil 4.1.	Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların FTIR spektrumları .	106
Şekil 4.2.	Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların FTIR spektrumları .	107
Şekil 4.3.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkı FTIR spektrumları.....	107
Şekil 4.4.	Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların FTIR spektrumları	108
Şekil 4.5.	Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları ..	109
Şekil 4.6.	Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları ..	110

Şekil 4.7.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları.....	112
Şekil 4.8.	Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları .	113
Şekil 4.9.	Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları .....	115
Şekil 4.10.	Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları..	116
Şekil 4.11.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları.....	117
Şekil 4.12.	Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları .....	118
Şekil 4.13.	Ana zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri .....	120
Şekil 4.14.	Yan zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri .....	121
Şekil 4.15.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri.....	122
Şekil 4.16.	Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri .....	124
Şekil 4.17.	Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri.....	125
Şekil 4.18.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri.....	128
Şekil 4.19.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri.....	132
Şekil 4.20.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri.....	134
Şekil 4.21.	Anyonik monomer tipi farklı, su/çimento oranı 0,35 ve katkı oranı %0,1 olan hamur karışımlarının kayma gerilmesi-viskozite-deformasyon hızı grafiği.....	138
Şekil 4.22.	Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül.....	153
Şekil 4.23.	Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül .....	155
Şekil 4.24.	Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımları 60dk sonundaki bağıl yayılma değerleri.....	157
Şekil 4.25.	Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki .....	158
Şekil 4.26.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül.....	160
Şekil 4.27.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül .....	162
Şekil 4.28.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımları 60dk sonundaki bağıl yayılma değerleri.....	164
Şekil 4.29.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki .....	165

Şekil 4.30.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül.....	167
Şekil 4.31.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül .....	169
Şekil 4.32.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağıl yayılma değerleri.....	171
Şekil 4.33.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunluğu farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki .....	172
Şekil 4.34.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül.....	174
Şekil 4.35.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül .....	177
Şekil 4.36.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımları 60dk sonundaki bağıl yayılma değerleri.....	178
Şekil 4.37.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki .....	179
Şekil 4.38.	Ana zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımları su emme oranları .....	184
Şekil 4.39.	Yan zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımları su emme oranları .....	185
Şekil 4.40.	Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının su emme oranları .....	186
Şekil 4.41.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının su emme oranları .....	187



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Portland Çimentosu'nun kimyasal bileşimi ve limit değerler .....	7
Çizelge 2.2. Portland Çimentosu'nun ana bileşenleri ve özellikleri.....	7
Çizelge 2.3. Karışım suyu içerisinde bulunabilecek yabancı maddeler ve izin verilebilir maksimum konsantrasyonları .....	14
Çizelge 2.4. Karışım suyu için önerilen tuz konsantrasyonları sınır değerleri (ppm) .	14
Çizelge 2.5. Çeşitli standartlarda kimyasal katkıların sınıflandırılması .....	22
Çizelge 2.6. Uçucu kül içerisindeki mineraller ve miktarları .....	28
Çizelge 2.7. Farklı kömürlerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve oranları.....	29
Çizelge 2.8. Kuzey Amerika'da bulunan ticari uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ..	33
Çizelge 2.9. Su azaltıcı katkı kimyasal yapısının akışkanlık ve priz üzerindeki etkisi	55
Çizelge 2.10. Su azaltıcı katkıların fiziksel özellikleri ve kimyasal yapısı .....	56
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri .....	83
Çizelge 3.2. Uçucu külün kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	83
Çizelge 3.3. Standart kumun tane büyüklüğü dağılımı.....	84
Çizelge 3.4. Ana zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların özellikleri .....	86
Çizelge 3.5. Yan zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların özellikleri .....	86
Çizelge 3.6. Sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri.....	87
Çizelge 3.7. Anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı su azaltıcı katkıların özellikleri.....	87
Çizelge 3.8. Ana zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkı ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri .....	90
Çizelge 3.9. Yan zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkı ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri .....	91
Çizelge 3.10. Sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkı ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri .....	92
Çizelge 3.11. Anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı su azaltıcı katkı ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri .....	92
Çizelge 4.1. Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri.....	109
Çizelge 4.2. Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların PDI, $M_w$ ve $M_n$ değerleri .....	110
Çizelge 4.3. Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri.....	111
Çizelge 4.4. Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların PDI, $M_w$ ve $M_n$ değerleri.....	111
Çizelge 4.5. Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri.....	112
Çizelge 4.6. Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların PDI, $M_w$ ve $M_n$ değerleri .....	112
Çizelge 4.7. Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların özellikleri .....	114
Çizelge 4.8. Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların PDI, $M_w$ ve $M_n$ değerleri .....	114
Çizelge 4.9. Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri.....	126

Çizelge 4.10.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri.....	130
Çizelge 4.11.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri.	133
Çizelge 4.12.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri.....	135
Çizelge 4.13.	Ana zincir uzunluğu farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri .....	141
Çizelge 4.14.	Ana zincir uzunluğu farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmeleri değerleri .....	142
Çizelge 4.15.	Yan zincir uzunluğu farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri .....	143
Çizelge 4.16.	Yan zincir uzunluğu farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmeleri değerleri .....	144
Çizelge 4.17.	Molekül ağırlığı sabit ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri .....	146
Çizelge 4.18.	Molekül ağırlığı sabit ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri.....	147
Çizelge 4.19.	Anyonik monomer tipi farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri.....	150
Çizelge 4.20.	Anyonik monomer tipi farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri.....	151
Çizelge 4.21.	Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma) .....	154
Çizelge 4.22.	Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı).....	156
Çizelge 4.23.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma) .....	161
Çizelge 4.24.	Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı).....	164
Çizelge 4.25.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma).....	168
Çizelge 4.26.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı).....	171
Çizelge 4.27.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma) .....	175
Çizelge 4.28.	Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı).....	176
Çizelge 4.29.	Ana zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları.....	180
Çizelge 4.30.	Yan zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları.....	181
Çizelge 4.31.	Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları.....	182

Çizelge 4.32. Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları.....	183
--	-----

## 1. GİRİŞ

Bilindiği üzere, çimentolu sistemlerin bütün özellikleri (taze hal, fiziksel, mekanik ve durabilite) karışımda kullanılan malzemelerin (çimento, agrega, mineral katkı gibi) özellikleri, su/bağlayıcı oranı, karışım oranları, sıcaklık, nem, bakım ve ortam koşulları gibi birçok faktörden olumlu veya olumsuz yönde etkilenmektedir. Olumsuz etkiye neden olan faktörlerin zararlı etkilerini engellemek veya azaltmak amacı ile çeşitli bilimsel araştırmalar yapılmakta ve yeni teknolojiler geliştirilmektedir (Boulekbache, Hamrat, Chemrouk ve Amziane, 2016). Örneğin betonun mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek amacı ile farklı tür, şekil ve geometrilerde lifler kullanılmaktadır (Mardani-Mardani-Aghabaglou, Özen ve Altun, 2018; Boulekbache ve diğerleri, 2016). Donma çözülme etkisine karşı hava sürükleyici katkı (Ziaei-Nia, Tadayonfar ve Eskandari-Naddaf, 2018), su altı betonları için su geçirimsizlik katkısı (Apay, Özgan, Turgay ve Akyol, 2016), betonun kullanım yeri ve ortam koşullarına bağlı olarak priz hızlandırıcı (Hoang, Justnes ve Geiker, 2016) ve priz geciktirici katkılar (Khalid ve diğerleri, 2015) gibi birçok kimyasal katkı geliştirilmiştir.

Portland Çimentosu, 19. yüzyıldan itibaren üretimi devam eden ve günümüzde en çok tercih edilen bağlayıcı malzemedir (Mehta ve Monterio, 1997; Neville, 1995). Çimento üretimi, yüksek miktarda enerji tüketimine sebep olmakta ve küresel CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık %5-8'ini oluşturmaktadır (DeLena ve diğerleri, 2019). Çimento tüketiminin azaltılması geleceğin dünyasına ekolojik ve ekonomik açıdan önemli katkılar sağlaması adına büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, çimento tüketimindeki azalma tüm dünyanın öncelikleri arasında yer alan iklim değişikliği ile mücadelede olumlu katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, bilim insanları çimentoya alternatif bağlayıcı malzemeler bulmaya ve çeşitli yöntemlerle çimento ihtiyacını minimize etmeye çalışmaktadırlar (Chindaprasirt ve Rattanasak, 2019, DeLena ve diğerleri, 2019, Meng, Ling, Mo ve Tian, 2019; Worrell, Price, Martin, Hendriks ve Meida, 2001).

Çimento ihtiyacını azaltmak amacı ile tercih edilen yöntemlerden biri, uçucu kül gibi mineral katkıların beton sektöründe kullanımının yaygınlaşması ve ikame oranının arttırılmasıdır (Dindi ve diğerleri, 2019; Mardani-Aghabaglou, Sezer ve Ramyar, 2014).

Bir diğerk yöntem ise işlenebilirliğı iyileştiren, su ihtiyacını azaltan ve betonun kolay yerleştirilebilmesini sağlayan yeni nesil su azaltıcı katkıların etkinliğinin arttırılmasıdır (Mardani-Aghabaglou ve diğerkleri, 2013; Chandra ve Bjömström, 2002; Morin, Tenoudji, Feylessoufi ve Richard, 2001; Khatib ve Mangat, 1999).

1980’li yıllarda üretimine başlanan su azaltıcı katkıları günümüzde beton sektöründe sıkça kullanılmaktadır. Su azaltıcı katkıları; su azaltma özelliğı sayesinde yüksek dayanımlı betonların üretilmesini, priz alma süresini kısaltarak inşaat hızının artmasını, daha işlenebilir ve daha uzun servis ömrüne sahip olan betonların daha düşük maliyet ile üretilmesini sağlamaktadır. Son zamanlarda farklı özelliklere sahip çeşitli su azaltıcı katkıları üretilmektedir. Söz konusu katkıları sağladığı olumlu etkilerin yanı sıra çimentolu sistemlerde olumsuz etkilerin oluşmasına da sebep olabilmektedir. Çimentolu sistemlerin taze hal ve bazı sertleşmiş hal özelliklerini etkileyen parametrelerin bir kısmı kullanılan çimentodan, bir kısmı su azaltıcı katkıdan, diğerk kısmı ise karışım oranı, sıcaklık ve bakım koşulları gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Bedard ve Mailvaganam, 2003; Bonen ve Sakar, 1995; Ramachandran, 1995). Çimento özelliklerinden kaynaklanan etkiler sırasıyla, çimentonun kimyasal kompozisyonu ve ana bileşenlerinin miktarı ile yapısı ( $C_3A$  ve  $C_4AF$  miktarı ve  $C_3A$ ’nın kristal yapısı), çimento inceliğı ve alkali içeriğı ile çimento üretimi esnasında klinkere eklenen kalsiyum sülfatın (alçının) miktarı ve türü ile ilişkili olabilmektedir (Jiang, Kim ve Aİtcin, 1999; Ramachandran, 1995; Roberts, 1995; Jolicoeur, Nkinamubanzi, Simard ve Piotte, 1994). Polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıya bağılı etkenler içinde ana zincir uzunluğı, yan zincir sayısı ve uzunluğı, molekül ağırlığı, moleküllerarası bağı yapısı, kimyasal bileşimi, yoğunluğı, adsorpsiyon özelliğı, beton karışımına katılış şekli ve sırası önem kazanmaktadır (Mardani-Aghabaglou, Felekoğılu ve Ramyar, 2017(a); Mardani-Aghabaglou, Son, Felekoğılu ve Ramyar, 2017(b); Mardani-Aghabaglou ve diğerkleri, 2016; Mardani-Aghabaglou ve diğerkleri, 2013; Bedard ve Mailvaganam, 2003; Flatt ve Houst, 2001; Bonen ve Sakar, 1995).

Yeni nesil polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıların yapısı polietilen ana zincirden, polietilen glikol yan zincirlerden ve karboksilat fonksiyonel gruplardan oluşmaktadır (Hanehara ve Yamada, 2008). Söz konusu su azaltıcı katkıların molekülleri yaklaşık olarak benzer yapılara sahip olmalarına rağmen farklı fonksiyonel gruplar (anyonik

monomerler) seçilerek de sentezlenebilmektedirler. Monomerlerin adsorpsiyon özellikleri ile polietilen glikol yan zincirlerin sterik etkileri, katkının karışımdaki dağılma mekanizmasında önemli rol oynamaktadır. Literatüre göre su azaltıcı katkının dağılma mekanizması karboksilat gruplarda elektrostatik itmeden dolayı meydana gelirken, sterik itme mekanizması uzun eter yan zincirleriyle ilişkilidir (Yamada, Takahashi, Hanehara ve Matsuhisa, 2000). Betonda akışkanlığın süresi ve derecesi ise katkının yapısal faktörüyle ilişkilidir. Daha kısa bir ana zincir, daha uzun ve daha çok sayıda yan zincirler, daha fazla ve uzun ömürlü akışkanlığa sebep olmaktadır. Ayrıca, bu katkıların molekül ağırlıkları da performanslarını önemli ölçüde etkilemektedir. Daha büyük molekül ağırlığına sahip polimerlerde, karışımın akışkanlığı ve katkının çimento üzerindeki adsorpsiyonu orantısal olarak daha büyük olmaktadır. Ayrıca su azaltıcı katkıların etkinliği yan zincirlerin uzunluğu ve sayısı artarken genellikle artmakta, zincirlerin kısa olması ise çimento hamurunun akışkanlığı üzerinde küçük bir etkiye sahip olmaktadır (Yamada ve diğerleri, 2000). Özetle, su azaltıcı katkıların etkinliği katkının türüne, kimyasal yapısına, uzunluğuna, yan ve ana zincir düzenine ve fonksiyonel grupların varlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Ran ve diğerleri, 2009; Li, Feng ve Chen, 2005).

Literatürde su azaltıcı katkılar ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen katkı üretici firmalarının ticari sır gerekçesi ile genelde katkıların temel özelliklerini paylaşmamasından dolayı su azaltıcı katkıların çimentolu sistemlerin davranışına olan etki mekanizması tam olarak bilinmemektedir. Ayrıca, literatürde katkının ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu, yan zincir yoğunluğu, molekül ağırlığı, bağ yapısı ve diğer birçok yapısal özelliğinin çimentolu sistemlere etkisinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Ancak, tek tip hammadde kullanılarak katkının diğer özellikleri sabit kalacak şekilde sadece ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu, anyonik monomer fonksiyonel grubu değiştirilerek sentezlenen katkıların çimentolu sistemlerin özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmalar sınırlı sayıdadır. Buna ilaveten, sağladığı çevresel ve ekonomik katkının yanı sıra düşük su ihtiyacı, yüksek işlenebilirlik, düşük rötne ve yüksek dayanım gibi birçok olumlu katkı sağlayan uçucu külün sentezlenen katkılarla uyumlu olması önem arz etmektedir.

## ***Çalışmanın amacı ve kapsamı***

Bu çalışmada, polikarboksilat eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu, sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları ve anyonik monomer fonksiyonel grup içeriğinin, uçucu kül içeren çimentolu sistemlerin taze hal, reolojik ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, ana zincir uzunluğu farklı, yan zincir uzunluğu farklı ve sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları farklı olan üçer katkı ve anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı olan beş katkı olmak üzere toplamda on dört katkı sentezlenmiştir. Hazırlanan hamur ve harç karışımlarına çimentonun ağırlıkça %0, 15, 30 ve 45 oranlarında uçucu kül ikame edilmiştir. Katkı karakterizasyonu ve bağlayıcıya adsorpsiyonu Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre (FTIR), jel geçirgenlik kromatografisi (GPC) ve toplam organik karbon (TOC) analizleri ile incelenmiştir. Hamur karışımlarında Marsh-hunisi akış süresi, mini-çökme ve priz süresi deneyleri, harç karışımlarında ise zamana bağlı yayılma, zamana bağlı mini V-hunisi akış süresi, 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 28 ve 90 günlük su emme kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Bunlara ilaveten hamur ve harç karışımlarında dinamik ve statik eşik kayma gerilmesi ile viskozite değerleri belirlenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda aşama aşama açıklanmıştır;

- 1. Aşama:** Sabit yan zincir uzunluğu, farklı ana zincir uzunluğu ve farklı molekül ağırlığına sahip polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkıların ve uçucu kül kullanımının, çimento hamuru ve harç karışımlarının adsorpsiyon performansına, priz süresine, taze hal özelliklerine, reolojik özelliklerine, basınç dayanımı ve su emme kapasitelerine etkisi araştırılmıştır.
- 2. Aşama:** Sabit ana zincir uzunluğu, farklı yan zincir uzunluğu ve farklı molekül ağırlığına sahip polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkıların ve uçucu kül kullanımının, çimento hamuru ve harç karışımlarının adsorpsiyon performansına, priz süresine, taze hal özelliklerine, reolojik özelliklerine, basınç dayanımı ve su emme kapasitelerine etkisi araştırılmıştır.

3. *Aşama:* Sabit moleköl ağırlıklarında farklı yan zincir uzunluğu ve farklı ana zincir uzunluğuna sahip polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkıların ve uçucu kül kullanımının, çimento hamuru ve harç karışımlarının adsorpsiyon performansına, priz süresine, taze hal özelliklerine, reolojik özelliklerine, basınç dayanımı ve su emme kapasitelerine etkisi araştırılmıştır.

4. *Aşama:* Polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkının sabit mol oranında anyonik monomer değişiminin ve uçucu kül kullanımının, çimento hamuru ve harç karışımlarının adsorpsiyon performansına, priz süresine, taze hal özelliklerine, reolojik özelliklerine, basınç dayanımı ve su emme kapasitelerine etkisi araştırılmıştır.



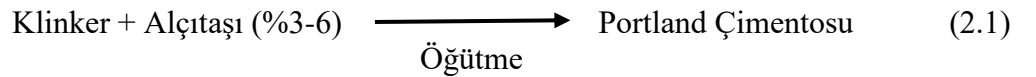
## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Çimentolu Sistemler

Hamur, harç ve beton karışımları genelde çimentolu sistem olarak ifade edilmektedir. Hamur karışımları temel olarak çimento ve sudan, harç karışımları çimento, su ve ince agregadan (çapı 4 mm'den küçük), beton karışımları ise çimento, su, ince ve iri agregadan (çapı 4 mm'den büyük) oluşmaktadır. Çimentolu sistemlerin taze hal, fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek amacıyla karışımlara mineral ve kimyasal katkıları da ilave edilebilmektedir. Bu bölümde çimentolu sistemlerin bileşenleri olan çimento, agrega, karışım suyu, mineral katkıları ve kimyasal katkıları hakkında genel bilgilerden bahsedilmiştir.

#### 2.1.1. Çimento

1824 yılında Joseph Aspdin tarafından patenti alınan Portland Çimentosu kalker ve kilin karıştırılarak 1350-1450 °C sıcaklıklarda pişirilmesi sonucu elde edilen klinkere %3-6 oranlarında alçıtaşı ilave edilip öğütülmesi sonucu oluşmaktadır (Denklem 2.1).



Çimento üretimi ıslak ve kuru olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Islak yöntemde karışım içerisinde %35 oranında su bulunmaktadır. Pişirmek için daha çok enerji harcanmakta ve dolayısıyla daha pahalı olmaktadır. Ancak bu yöntem toz açısından düşünüldüğünde ekolojik olarak daha avantajlıdır. Kuru yöntemde ise suyun buharlaştırılması işlemi olmadığından dolayı ıslak yöntemle kıyasla enerji verimliliği açısından daha avantajlıdır. Çimento üretimi esnasında yüksek sıcaklıklarda kalkerden CaO, MgO ve CO<sub>2</sub>, kilden ise SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O ve diğer ürünler meydana gelmektedir. Bu ürünlerin kimyasal reaksiyona girmesi ile karma oksitler oluşmaktadır (Neville ve Brooks, 2010; Erdoğan, 2003). Tipik bir Portland Çimentosu'nun kimyasal

bileşimi ve limit değerleri Çizelge 2.1’de, ana bileşenleri ve özellikleri Çizelge 2.2.’de, karma oksitlerin SEM görüntüleri ise Şekil 2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Portland Çimentosu’nun kimyasal bileşimi ve limit değerler (Neville ve Brooks, 2010)

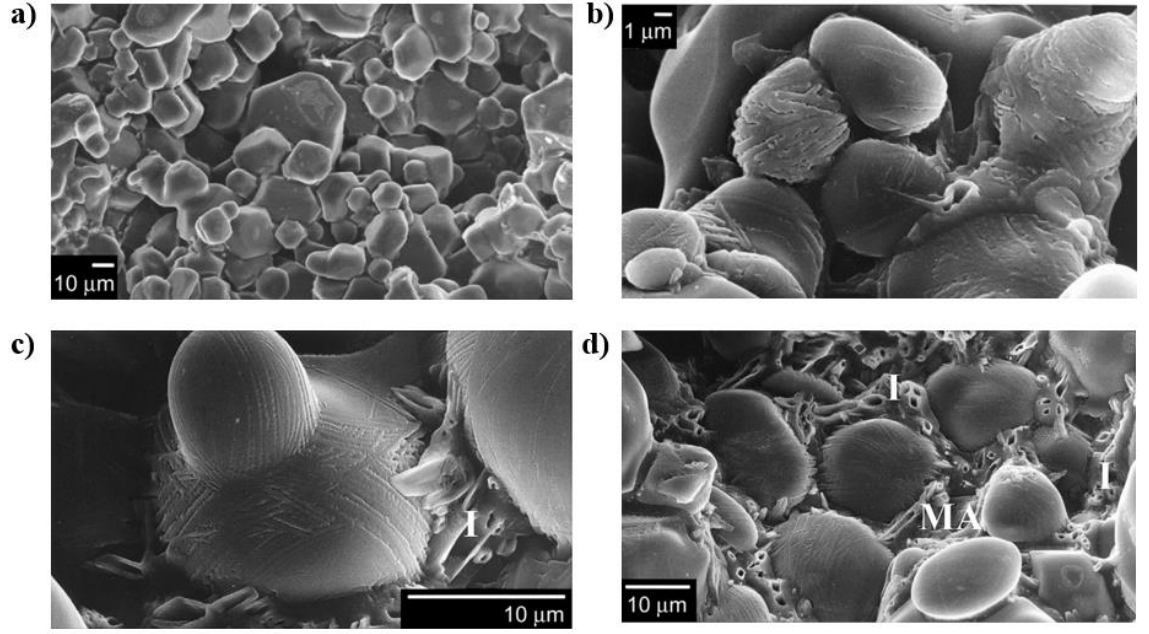
Oksit	%	Limit Değerler (%)	Karma Oksit	%
CaO	63	60-67	C <sub>3</sub> A	10,8
SiO <sub>2</sub>	20	17-25	C <sub>3</sub> S	54,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	3-8	C <sub>2</sub> S	16,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	0,5-6	C <sub>4</sub> AF	9,1
MgO	1,5	0,1-4		
SO <sub>3</sub>	2	1-3		
K <sub>2</sub> O	1	0,2-1,3		
Na <sub>2</sub> O	1	0,2-1,3		
Diğer	1			
Kızdırma kaybı	2			
Elek üstü	0,5			

**Çizelge 2.2.** Portland Çimentosu’nun ana bileşenleri ve özellikleri (Diawara, 2008)

Bileşen	Kimyasal Formülü	Teknik İsmi	Reaktivitesi	Hidratasyon Isısı (j/g)	Dayanıma Etkisi
C <sub>3</sub> S	3CaO.SiO <sub>2</sub>	Alite	Yüksek	500	Erken yaşta yüksek
C <sub>2</sub> S	2CaO.SiO <sub>2</sub>	Belite	Düşük	250	İleri yaşta yüksek
C <sub>3</sub> A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminat	Çok yüksek	1340	Çok erken yaşta yüksek
C <sub>4</sub> AF	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ferit	Düşük	420	Çok düşük

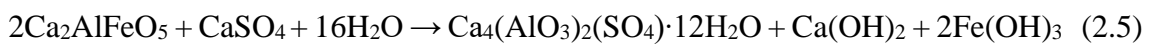
Karmaşık bir kimyasal yapıya sahip olan çimentonun su ile temasa geçmesi ile bileşenler ile su arasında reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar prize neden olan çeşitli bileşiklerin oluşmasını sağlamaktadır. İlk saatlerde reaksiyona giren ve hidratasyon ısısı yüksek olan C<sub>3</sub>S’in hidratasyon reaksiyonu Denklem 2.2’de gösterilmiştir. Reaksiyon sonucu oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) çimentolu sistemin erken yaş dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha yavaş reaksiyona giren ve hidratasyon ısısı düşük olan C<sub>2</sub>S’in hidratasyon reaksiyonu Denklem 2.3’de gösterilmiştir.

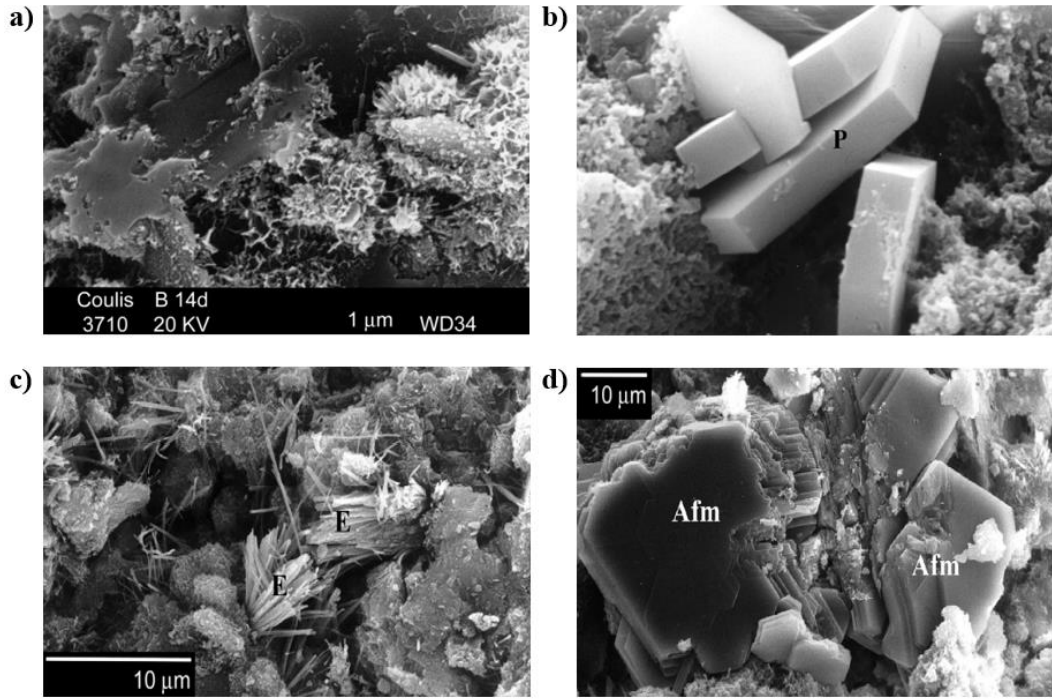
Reaksiyon sonucu C-S-H'a ilaveten portlandit (CH) oluşmaktadır. C<sub>2</sub>S çimentolu sistemlerin durabilitesi üzerinde önemli rol oynamaktadır.



**Şekil 2.1.** Karma okstilerin SEM görüntüleri a) C<sub>3</sub>S, b) C<sub>2</sub>S, c) C<sub>3</sub>A, d) C<sub>4</sub>AF (Aİtcin ve Flatt, 2016)

Denklem 2.4'te hidrasyon reaksiyonu verilen C<sub>3</sub>A'nın reaksiyonu çok hızlı bir şekilde başlamakta, dayanıma çok fazla katkı sağlamamakta ve ani prize neden olmaktadır. Bundan dolayı çimentolu sistemlere alçı ilave edilmektedir. Karışıma alçı ilave edilmesi ile içerisinde bulunan kalsiyum ve sülfat iyonları C<sub>3</sub>A'yı etrenjite dönüştürmektedir. Yavaş reaksiyona giren C<sub>4</sub>AF'nin hidrasyon reaksiyonu Denklem 2.5'de verilmiş olup bu bileşiğin çimentolu sistemlerin dayanım ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi oldukça düşüktür. Ayrıca, çimentoya gri rengini vermektedir (Aİtcin ve Flatt, 2016, Neville ve Brooks, 2010). Çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan ürünlerin SEM görüntüleri Şekil 2.2'de verilmiştir.

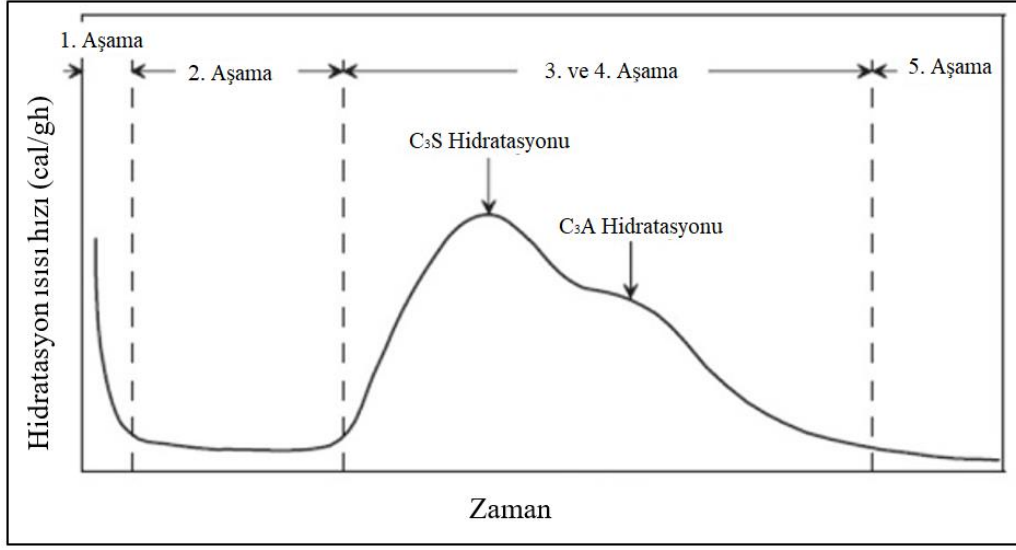




**Şekil 2.2.** Çimento hidrasyon ürünleri a) C-S-H, b) Portlandit, c) Etrenjit, d)Tetrakalsiyumalüminat kristalleri (Afm) (Aİtcin ve Flatt, 2016)

Çimento ve su arasında gerçekleşen hidrasyon reaksiyonları ekzotermiktir. Hidrasyon ısısı olarak adlandırılan açığa çıkan ısının zamanla değişimi Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Şekil 2.3’de gösterildiği üzere süreç, hidrasyon ısısı açısından çözülme, durgunluk, hızlanma, yavaşlama ve kütleme aşamalarından oluşmaktadır.

Çözülme aşamasında ilk hidrasyon anında su, çimento taneciklerini ıslatarak çözmektedir. Alkaliler, kalsiyum sülfat ve kireç suda kolayca çözülmemektedir. İlk 15 dakika içerisinde gerçekleşen bu çözülme sürecinde hızlı bir ısı çıkışı olmaktadır (Neville ve Brooks, 2010; Mehta ve Monteiro, 1997). Buna ilaveten çözeltideki  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ve  $\text{OH}^-$  iyonlarının miktarı artmaktadır. Aynı zamanda,  $\text{Ca}^{2+}$  ve  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonları ve  $\text{C}_3\text{A}$ ’nın etrenjite dönüşmesine sebep olmaktadır. Etrenjite ilaveten  $\text{C}_3\text{S}$ ’in etrafında az miktarda C-S-H oluşmaktadır. Bu aşamada alüminatın reaksiyonları çözeltideki sülfattan dolayı bastırıldığından ve çimento tanecikleri hidrasyon ürünleri tabakası ile kaplandığından başlangıç ısısı önemli ölçüde azalmaktadır.



**Şekil. 2.3.** Çimentonun hidratasyonu esnasındaki kalorimetrik eğrisi (Diawara, 2008)

Durgunluk aşaması (dormant periyodu) 15 dakika ile 4 saat arasında sürmektedir. Bu aşamada çok az miktarda ısı akışı gerçekleşmektedir. Dormant periyodunun sonlarında, alüminat ve alçı fazlarının reaksiyonları çimento hamurunun başlangıç priz süresinde baskın bir rol oynamaktadır. Alçının çözünmesi dolayısıyla sülfat iyonlarının ortama salınması çok az miktarda olursa, karışımda ani priz meydana gelebilmekte ve bu durumda önemli miktarda ısı oluşmasına neden olmaktadır (Neville ve Brooks, 2010; Mehta ve Monteiro, 1997). Dormant periyodunun bitmesi ile C-S-H ve portlandit miktarlarının artması ve etrenjitin oluşmasıyla hidratasyon hızı artmaktadır. Hızlanma aşaması 4-8 saat arasında sürmektedir. Yavaşlama aşamasında çimentolu sistem sertleşmekte olup bu aşama 8-24 saat sürebilmektedir. Bu aşamada boşluk, su ve hidrate olmamış çimento miktarı azalmaktadır. Çimentolu sistem kalıba yerleştirildikten hemen sonra sistemin nem ve sıcaklığını bir süre muhafaza etmek amacıyla kütleme yapılması gerekmektedir (Neville ve Brooks, 2010; Mehta ve Monteiro, 1997).

### 2.1.2. Agregalar

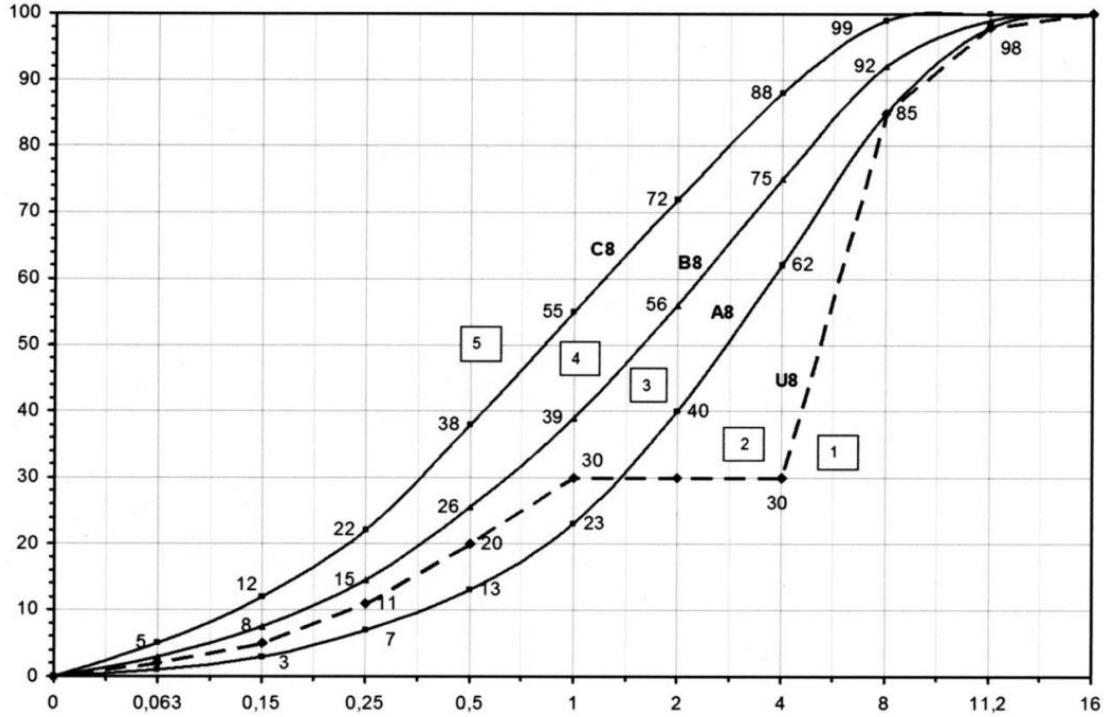
Agregalar, harç ve beton üretiminde kullanılan kum, çakıl vb. taneli malzemelerdir. Karışım hacminin yaklaşık %60-70'ini oluşturmaktadırlar. Beton karışımlarında kullanılan diğer bileşenlere kıyasla en az maliyete sahip olan malzemedir. Agregalar

sağladığı ekonomik katkı haricinde çimentolu sistemlerin büzülmesini engellemekte, mukavemetini arttırmakta, aşınmaya ve çevreden gelebilecek diğer fiziksel etkilere karşı karışımın direncini olumlu yönde etkilemektedir. Agregalar, kaynağına, özgül ağırlık veya birim ağırlıklarına, tane büyüklüğüne, tane şekline, yüzey dokusuna, üretim şekline, jeolojik yapısına, mineralojik yapısına ve reaktif özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Beton veya harç karışımlarının özellikleri agregaların gradasyonu, maksimum tane büyüklüğü, tane şekli, su emme oranı, yüzey nemi, birim ağırlığı, özgül ağırlığı, yapısında bulunan zararlı yabancı maddelerin türü ve miktarı, aşınma dayanımı, donmaya karşı direnci, ısısal özellikleri, elastiklik modülü gibi birçok özelliğinden doğrudan etkilenmektedir (Baradan ve diğerleri, 2012; Erdoğan, 2003).

Uygulamada tane çapı 4 mm altında olan agregalar ince agrega olarak, 4 mm'nin üzerinde olan agregalar ise iri agrega olarak kullanılmaktadır. Agrega numunesindeki tanelerin farklı çaplarda olması agrega taneleri arasında daha az boşluk bulunmasına diğer bir ifadeyle doluluk oranının artmasına sebep olmaktadır. Bir agrega karışımındaki tane dağılım özelliği hakkında bilgi edinmek için her ne kadar elek analizinde standart elekler üzerinde kalan yığılımlı agregaların yüzdelerinin toplamının 100'e bölümü şeklinde belirlenen incelik modülü hesaplanırsa da en sağlıklı sonucu gradasyon eğrisi vermektedir. Agrega gradasyonu çimentolu sistemlerin birçok özelliğini doğrudan etkilediği için uygun bir tane dağılımı büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, çeşitli standartlarda uygun agrega gradasyonu için sınır değerler belirlenmiştir (Türk Standartları [TS 802], 2016). TS 802'de maksimum tane boyutuna göre sınır değerler belirlenmiş olup tane çapı maksimum 16 mm olan karışımlara ait sınır değerler Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Agrega tanelerinin şekli karışımın işlenebilirliğini ve dolayısıyla betonun su ihtiyacını, agreganın su emme kapasitesi ve yüzey nemi karışımın hedeflenen işlenebilirliğini ve dayanımını, agreganın birim ağırlığı ve özgül ağırlığı karışımın boşluk oranını ve kullanılan malzeme miktarlarını, agreganın elastiklik modülü ve poisson oranı karışımın deformasyon özelliklerini, agreganın aşınmaya karşı direnci ve basınç dayanımı karışımın mukavemetini, agreganın lineer genişleme katsayısı, özgül ısı ve ısı geçirgenlik özellikleri karışımın ısısal özelliklerini doğrudan etkilemekte ve agreganın reaktiflik

durumu karışımın alkali silika reaksiyonuna maruz kalmasına sebep olmaktadır (Baradan ve diğerleri, 2012, Erdoğan, 2003).



Şekil 2.4. Maksimum agrega tane çapı 16 mm olan standart granülometri eğrisi (TS802)

Agreganın fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra agrega tanelerinin aralarında veya yüzeylerinde yer alabilecek bazı yabancı maddeler de beton veya harç karışımlarının özelliklerine etki edebilmektedir. Agregada yığılmasında bulunan ve standartlarda belirtilen sınır değerlerin üzerindeki çürümüş bitki, humuslu toprak, şeker gibi organik maddeler karışımın priz süresini yavaşlatmakta ve erken yaş dayanımını olumsuz etkilemekte, kil, silt, taşunu gibi ince maddeler su ihtiyacını arttırmakta, karışımın dayanım ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemekte, agrega yüzeyine yapışmış halde bulunan kil topakları karışımın işlenebilirliğini, dayanımı ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemekte, kömür, linyit, odun parçacıkları gibi hafif maddeler ise karışımın lokal olarak renk değişimine sebep olmakta ve karışımın dayanım ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Baradan ve diğerleri, 2012; Erdoğan, 2003).

### 2.1.3. Karışım suyu

Çimentolu sistemlerde, çimento ve agreganın yanı sıra kullanılan diğer temel malzeme sudur. Su; çimento ve agrega ile birlikte beton veya harç üretimde kullanılan karışım suyu, üretimden sonra beton veya harç içerisindeki suyun buharlaşmasını önlemek amacıyla kullanılan kür suyu ve beton veya harç üretimindeki agregaları yıkamak amacıyla kullanılan yıkama suyu olmak üzere üç farklı aşamda kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

Karışım suyu çimento ile etkileşime girerek hidrasyonun gerçekleşmesini ve çimentolu sistemlerde istenilen işlenebilirliği sağlamaktadır. Çimentolu sistemlerin üretiminde kullanılan karışım suyunun miktarı ve içeriği çimentolu sistemlerin özelliklerini etkilemektedir (Erdoğan, 1995). Karışım suyunun gerekli miktardan daha az veya daha fazla olması durumunda çimentolu sistemlerde çeşitli dayanım ve dayanıklılık problemleri meydana gelebilmektedir. Karışım suyu içerisinde yer alan istenmeyen maddeler ise çimentolu sistemlerde hidrasyon hızının azalması, hidrasyonun yetersiz düzeyde gerçekleşmesi, priz süresinin artması, korozyonun oluşması gibi olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Baradan ve diğerleri, 2012; Baradan, Yazıcı ve Ün, 2010).

Karışım suyu içerisinde bulunabilecek yabancı maddeler ve izin verilebilirmaksimum konsantrasyonları ile karışım suyu için çeşitli standartlar ve araştırmacılar tarafından önerilen tuz konsantrasyonları sınır değerleri sırasıyla Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'te verilmiştir. Karışım suyunda sınır değerlerin üzerinde kil, silt, taşı vb. katı maddeler karışımın işlenebilirliğini olumsuz etkilemekte, yosun, şeker gibi organik maddeler priz süresini geciktirmekte ve basınç dayanımı azalmakta, mineral yağlar basınç dayanımını %20 civarında düşürmekte, kalsiyum bikarbonat ve magnezyum bikarbonatlar dayanımı olumsuz etkilemekte, sodyum karbonat ve potasyum bikarbonatlar ani prize yol açmakta, kalsiyum klorür, sodyum klorür ve magnezyum klorür nihai dayanımı %30 civarında azaltmakta ve korozyona sebep olmakta, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etrenjitin oluşmasına neden olmakta, fosfat, arsenat, borat ve demir tuzları, prizi geciktirmekte ve dayanımı düşürmekte, hidroklorik asit ve sülfürik asit gibi asitler çimentonun hidrasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksitin çözünmesine yol açarak dayanımı



ve dayanıklılığı olumsuz etkilemekte ve sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit ise alkali-silika jellerinin oluşmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003).

**Çizelge 2.3.** Karışım suyu içerisinde bulunabilecek yabancı maddeler ve izin verilebilir maksimum konsantrasyonları (Erdoğan, 2003)

Yabancı Madde	Maksimum Konsantrasyon (%)
Katı madde (kil, silt, taşunu vb.)	0,2
Yağ	Çimento ağırlığının %2'si
Yosunlu maddeler	0,05-0,1
Şeker	0,05
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,04
Na(HCO <sub>3</sub> ), K(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,1
CaCl <sub>2</sub>	Çimento ağırlığının %2'si
NaCl	2
MgCl <sub>2</sub>	4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1
MgSO <sub>4</sub>	4
P, As, B	0,05
Demir Tuzları	4
HCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1
NaOH	Çimento ağırlığının %0,5'i
KOH	Çimento ağırlığının %1,2'si

**Çizelge 2.4.** Karışım suyu için önerilen tuz konsantrasyonları sınır değerleri (ppm), (Baradan ve diğerleri, 2012; Neville, 1995)

Tuz Çeşidi	BS 3148	BS EN 1008	Nan ve Wu (2003)	TS EN 1008	TS 500	ASTM C1602	ASTM C94
Klor							
Betonarme	500	1000	1000	1000	1500	1000	1200
Öngermeli							
Beton	500	500	500	500	-	500	400
Sülfat (SO <sub>4</sub> )	1200	2400	3000	2000	3000	3000	3000
Alkali	1000	1500	-	-	-	600	-

TS EN 1008 Standardına göre çimentolu sistemlerin üretiminde kullanılan karışım suyunun temiz ve içilebilir nitelikte olması gerekmektedir. İçilebilir su içerisinde 1000

ppm'den fazla çözülmüş safsızlık olmamalıdır (Mehta ve Monteiro, 1997). Her içilebilir su (maden suyu, soda vb.) çimentolu sistemlerin üretiminde karışım suyu olarak kullanılmadığı gibi içilemeyen suların (yeraltı suyu, akarsu, kuyu suyu, geri kazanılmış su vb.) istenilen şartları sağladığı takdirde çimentolu sistemlerin üretiminde kullanılabilir (Baradan ve diğerleri, 2012). Karışım suyu olarak kullanılacak suyun uygun olup olmadığı kimyasal analiz yöntemi, karışım suyunun priz süresine etkisinin belirlenmesi yöntemi ve karışım suyunun beton dayanımına etkisinin belirlenmesi yöntemleri ile tespit edilmektedir. Kimyasal analiz yöntemi ile karışım suyundaki yabancı madde içeriği belirlenmektedir. Priz süresi yöntemi ile uygun su ile hazırlanmış karışımın priz süresi belirlenerek karşılaştırma yapılmaktadır. Basınç dayanımı yönteminde ise uygun su ile hazırlanmış karışımın basınç dayanımı belirlenerek karşılaştırma yapılmaktadır (Erdoğan, 2003).

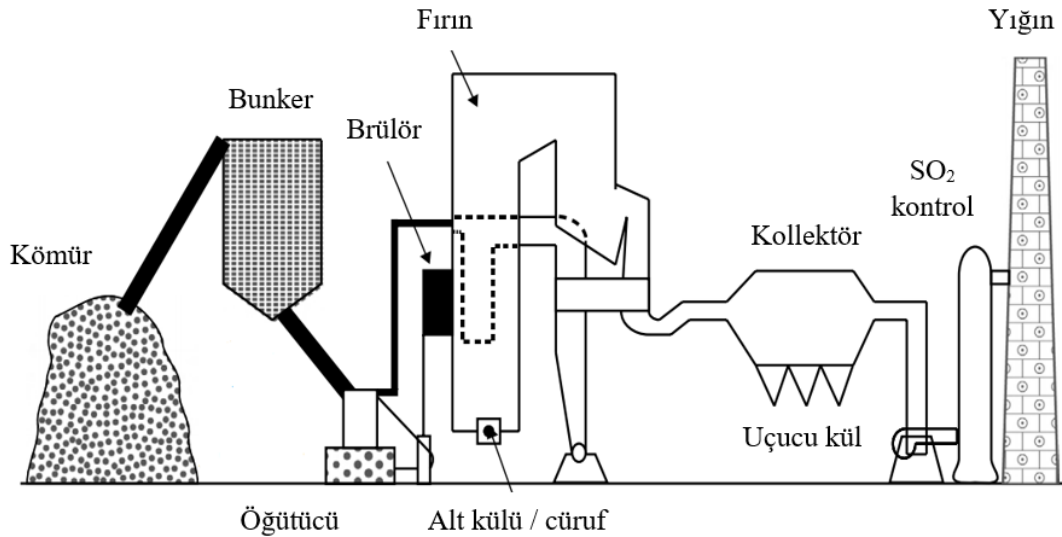
#### **2.1.4. Mineral katkıları**

Mineral katkıları, çimentolu sistemlere yüksek oranlarda eklenen ince öğütülmüş çözünmeyen maddelerdir. Mineral katkıları, çimento veya ince agrega ile ikame edilerek kullanılabilirler. Mineral katkıya göre değişiklik gösterse de genel olarak Portland Çimentosu ile birlikte kullanılmasının ana nedenleri, taze betonun işlenebilirliğini ve sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktır. Teknik nedenlerin haricinde ekonomik ve ekolojik katkıları da çok önemlidir. 1 ton Portland Çimentosu üretmek için yaklaşık 110 kWh elektrik enerjisi ve yaklaşık 4 GJ yakıt enerjisi tüketilmektedir. Öte yandan 1 ton Portland Çimentosu üretimi 0,9 ton CO<sub>2</sub> salınımına neden olmaktadır. Bu nedenle çimentolu sistemlerde mineral katkının kullanılması daha düşük enerji tüketiminin yanı sıra daha düşük sera gazı emisyonu sağlamaktadır. Ayrıca atık malzeme olan mineral katkıların kullanılması doğal kaynak tüketiminin azalmasına katkı sağlamaktadır (Tokyay, 2016; Baradan ve diğerleri, 2012; Wesche, 1991). Günümüzde uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kalsine killeri, taş tozları, endüstriyel ve tarımsal atıklar, tuğla ve kiremit tozları, katı atık ve çamur yakma sonucu oluşan küller olmak üzere birçok mineral katkı pratikte kullanılmaktadır.

Bu bölümde en yaygın kullanılan mineral katkıları olan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve pirinç kabuğu külü ile ilgili genel bilgilerden bahsedilmiştir. Buna ilaveten çalışmanın ana konusunu oluşturan uçucu külden Bölüm 2.2’de daha detaylı olarak bahsedilmiştir.

### ***Uçucu Kül***

Uçucu kül, kömürün termik santrallerde yakılmasıyla elde edilmektedir. 2010 rakamlarına göre kömür yakma tesislerinden elde edilen yan ürünlerin toplam yıllık miktarı yaklaşık 800 milyon tondur. Bu miktarın yaklaşık %70’ini uçucu kül oluşturmaktadır (Heidrich, Feuerborn ve Weir, 2013; Von Berg ve Feuerborn, 2005). Termal enerjiyi elektriğe dönüştüren buhar jeneratörlerini çalıştırmak amacıyla suyu ısıtmada taşkömürün yanında linyit, bitümlü ve alt bitümlü kömürler kullanılmaktadır (Alonso ve Wesche, 1991). Kömürler, karbon ve bazı uçucu maddelerin yanısıra kil, şeyl, kuvars, feldispat vb. safsızlıklar içerebilmektedir. Yanma sırasında safsızlıklar içeren kül baca gazlarında asılı kalmaktadır. Bunlardan bazıları dip külü olurken, geri kalanı gazlar tarafından taşınarak mekanik ayırıcılar veya elektrostatik çöktürücüler tarafından toplanmaktadır (Tokyay, 1987). Kömür yakılan bir termik santrale ait akış şeması Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.5.** Kömür yakılan termik santrale ait akış şeması (Tokyay, 2016; Whitfield, 2003)

Bir termik santralde açığa çıkan toplam kül miktarı, kullanılan kömürün kütlece %6-40 arasında değişmektedir. Taş kömürlerinde bu oran %6-15 arasında iken linyitlerde ise %20-40 arasındadır. Tipik bir 1000 MW'lık bir termik santralde yılda yaklaşık 650 bin ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

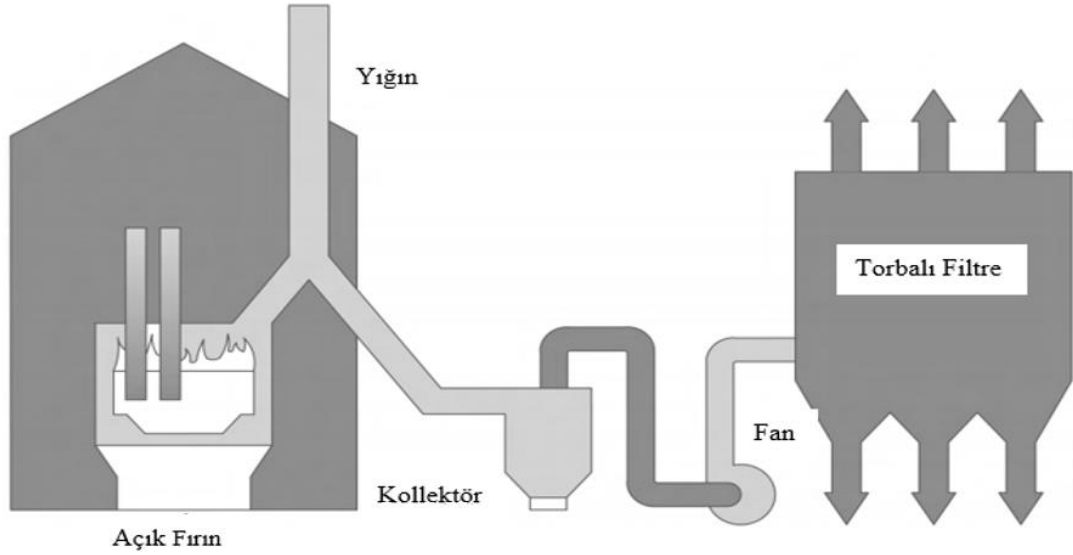
Uçucu küllerin tane boyutları 0,2-200 µm arasında değişmektedir. Herhangi bir uçucu külün tane boyutu, uçucu külün inceliğine ve termik santralde kullanılan toplama ekipmanının tipine bağlıdır. Mekanik ayırıcılar tarafından toplanan uçucu küller tane boyutları elektrostatik çöktürücüler tarafından toplananlara kıyasla daha büyüktür. Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik bileşimlerinin yanı sıra fiziksel özellikleri de termik santralde kullanılan kömürün kaynağına, yakma yöntemine, yakma ekipmanına ve toplama yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle farklı termik santrallerden hatta aynı santral içerisinde farklı zamanlarda elde edilen uçucu küller arasında nispeten büyük farklılıklar oluşabilmektedir (Tokyay, 2016).

### ***Silis dumanı***

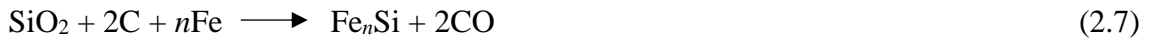
Silis dumanı, silikon metal ve alaşım endüstrilerinin bir yan ürünüdür. Silikon metal ve alaşımları, kuvarsın 1700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda indirgendiği elektrik ark ocaklarında üretilmektedir. Tipik bir ferrosilikon alaşım tesiste, yüksek saflıkta kuvarsit (yaklaşık %95 SiO<sub>2</sub> içerir), hurda çelik veya hurda demir, demir cevheri veya kok, ağaç yongaları veya kömür öngörülen oranlarda karıştırılmakta ve elektrik ark ocağına gönderilmektedir. İndirgenmiş demir ve silikon daha sonra birleşerek fırının alt kısmından soğutma için kalıplara alınan ferrosilikon alaşımı oluşturmaktadır. SiO buharının bir kısmı baca gazları ile fırından kaçmakta ve hava ile temas ederek torbalı filtrelerde toplanan silis dumanını oluşturmaktadır (Tokyay, 2016). Ferrosilisyum alaşımı üretimine ait akış şeması Şekil 2.6'da verilmiştir. Elde edilen silis dumanı miktarı fırına giren kuvarsın %10-25'i kadardır. Yıllık küresel silis dumanı üretiminin yaklaşık 1 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir (Fidjestol ve Dastol, 2014).

Silikon üretimine ait kimyasal reaksiyon Denklem 2.6'da verilmiştir. Ferrosilisyum alaşımını üretmek amacıyla sisteme Denklem 2.7'de olduğu gibi demir kaynağı

eklenmektedir. Fırın içerisinde meydana gelen bu reaksiyonlar esnasında SiO buharı ve silisyum karbür (SiC) ara ürünleri oluşmaktadır. Fırından kaçan SiO buharı hava ile temas ederek silis dumanını oluşturmaktadır (Denklem 2.8).



**Şekil 2.6.** Ferrosilisyum alaşımı üretimine ait akış şeması (Tokyay, 2016; Yeğınobalı, 2009)

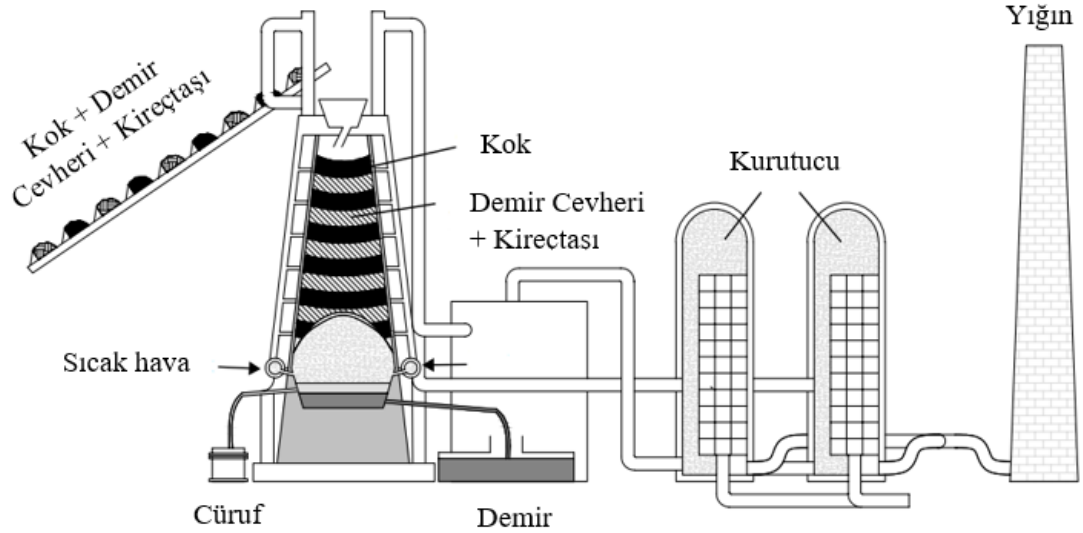


Ayrıca ferrokrom silikon, siliko mangan ve kalsiyum silikon gibi diğer silikon alaşımlarının üretimi esnasında da silis dumanı meydana gelmektedir. Alaşımları elde etmek için hammaddelere sırasıyla krom, mangan ve kireç eklenmektedir. Hammadde bileşimi silis dumanının kompozisyonunu etkilemektedir (Tokyay, 2016).

### ***Yüksek fırın cürufu***

Yüksek fırın cürufu (YFC) demir üretimi esnasında yan ürün olarak meydana gelmektedir. Kimyasal bileşimi ve miktarları cürufun oluşturulduğu üretim şekline ve üretimde kullanılan malzemelere bağlıdır. YFC 1800'lerden itibaren çimento ve beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Tokyay, 2016; Lewis, Sear, Wainwright ve

Ryle, 2003). Demir üretimi, kontrollü miktarlarda demir cevheri, kok (yakıt olarak) ve kireçtaşının (akı olarak) beslendiği yüksek fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Karışım fırının tabanında bulunan bir dizi yüksek basınçlı sıcak hava üfleyen jetler aracılığıyla yoğun ısıya maruz bırakılmaktadır (Tokyay, 2016). Yüksek fırın cürufunun elde edilmesine ait akış şeması Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Yüksek fırın cürufunun elde edilmesine ait akış şeması (Tokyay, 2016).

Yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında sırasıyla aşağıda yer alan ana reaksiyonlar gerçekleşmektedir;

- 1- Fırına üflenen sıcak hava, karbon monoksit ve kok formundaki karbon ile reaksiyona girmektedir (Denklem 2.9):



- 2- Oluşan karbon monoksit daha sonra demir üretmek için demir cevherinin demir oksidi ile reaksiyona girmektedir (Denklem 2.10):



- 3- Demir elde edilirken kireçtaşı fırının orta bölgelerinde kireç ve karbondioksit dönüşmektedir (Denklem 2.11):



- 4- Oluşan kireç demir cevherindeki safsızlıklar (özellikle silissi safsızlıklar) ile reaksiyona girerek esasen kalsiyum silikat olan erimiş cürufu oluşturmaktadır (Denklem 2.12):



1 ton demir üretiminden genellikle 220-370 kg YFC elde edilmektedir. Bazen daha düşük dereceli cevherlerden çok daha fazla miktarlarda YFC oluşmaktadır. YFC fırından çıktığında 1400 °C ile 1600 °C arasındaki bir sıcaklıkta erimiş haldedir. YFC'nin özelliklerinin çoğu, hammaddelerin kimyasal bileşimlerinden ve soğuma hızından etkilenmektedir (Tokyay, 2016; Kalyoncu, 2000).

### ***Pirinç kabuğu külü***

Pirinç kabuğu külü yaygın olarak kullanılan silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların aksine yapay değil tarımsal kökenli bir mineral katkıdır. Pirinç kabuğu, pirinç tanesini kaplayan ve kullanım esnasında çıkarılan kılıftır. Birçok tarımsal atık külünün kullanılmasına yönelik çok sayıda araştırmalar yapılmasına rağmen en yaygın kullanılan pirinç kabuğu külüdür. 2013 rakamlarına göre dünyanın toplam çeltik üretiminin yaklaşık 750 milyon ton/yıl olduğu ve bunun 150 milyon tonunun kabuk olduğu bilinmektedir (Tokyay, 2016; Aprianti, Shafigh, Bahri ve Farahani, 2015). Çeltiğin yaklaşık %20'si kabuk ve kabuğun yaklaşık %20'si ise küldür (Aprianti ve diğerleri, 2015; Cook, 1986).

Diğer tarımsal atıklar gibi pirinç kabuğunda da selüloz, lignin ve lifler gibi önemli oranlarda organik bileşen bulunmaktadır. Bu sebeple pirinç kabuğu yakılmadan çimentolu sistemlerde kullanılamamaktadır (Tokyay, 2016). Pirinç kabuğunun yanması

sırasında 100 °C’de nem, 350 °C’de uçucu maddeler ve 450 °C’de ise karbon uzaklaşmaktadır. Kabuktaki silis 600 °C’ye kadar tamamen amorf formdadır. Sıcaklık arttıkça silika çeşitli yapısal değişikliklere uğramaktadır. Sıcaklık 600 °C’yi aştığında önce kuvars ardından artan sıcaklıkla birlikte kristobalit ve tridimit gibi diğer kristalli silika formları meydana gelebilmektedir (Cook, 1986). 800 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda yanma neredeyse tamamen kristalin silika ile sonuçlanmaktadır. İyi puzolanik aktiviteye sahip prinç kabuğu külü 500 ile 700 °C arasındaki yanma sıcaklıklarında üretilmektedir (Cook, 1986).

### ***Metakaolin***

Metakaolin, ACI 116R Standardına göre puzolanik özelliklere sahip kalsine doğal malzeme olarak tanımlanmaktadır. Metakaolin, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürün değil aksine doğal olarak oluşan bir mineralden elde edilmekte ve çimentolu sistemler için özel olarak üretilmektedir (Bapat, 2012). Kalsine toprak formundaki kireçle harmanlanmış doğal puzolan, binlerce yıldır yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Stanley, 1979). Çimentolu sistemlerin performansı temel olarak çevresel koşullara, mikro yapıya ve hidrasyon kimyasına bağlıdır. Mikro yapı ve hidrasyon kimyası çimentolu sistemlerin bileşenlerinden güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Metakaolin, Portland Çimentosu ile ikame edildiğinde hidrasyon sırasında üretilen kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek dayanımın artmasına katkı sağlamaktadır. Reaktivitesi yüksek olan metakaolin, silis dumanına alternatif oluşturmakta ve yüksek performanslı betonlarda kullanılabilir (Bapat, 2012).

Metakaolin genellikle ham kaolin kilinin kalsinasyonu (termal aktivasyon) ile üretilmektedir. Diğer mineral bileşenlerinin yanısıra, bir malzemenin kaolin olması için içerisindeki kaolinit miktarının %50’den fazla olması gerekmektedir (Gamiz ve diğerleri, 2005). Kaolinit, 600 °C - 800 °C sıcaklığında gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi ile metakaoline dönüştürülmektedir. Kaolinitin dehidroksilasyonu ve düzensizliği, puzolanik özelliklere sahip reaktif amorf alüminosilikat ( $Al_2Si_2O_7$  veya  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) üretmektedir. Kaolinit ayrıca kaolinin kontrollü koşullar altında öğütülmesi ile amorf ve reaktif fazlara dönüştürülebilmektedir (Miyazaki ve diğerleri, 2000). Metakaolinin oksit



bileşimi SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den oluşmaktadır. Genellikle az miktarda serbest kalsiyum oksit ve alkali içermektedir (Bapat, 2012).

### 2.1.5. Kimyasal katkılar

Kimyasal katkılar bağlayıcı miktarının ağırlıkça %5'ini aşmadan çimentolu sistemlere ilave edilen inorganik veya organik maddelerdir (Akman, 1996). Günümüzde beton teknolojisinde betonun taze hal davranışlarını, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan birçok kimyasal katkı geliştirilmiştir. Söz konusu kimyasal katkıların sınıflandırması ulusal ve uluslararası standartlarda farklılıklar göstermekte olup Çizelge 2.5'de verilmiştir.

**Çizelge 2.5.** Çeşitli standartlarda kimyasal katkıların sınıflandırılması

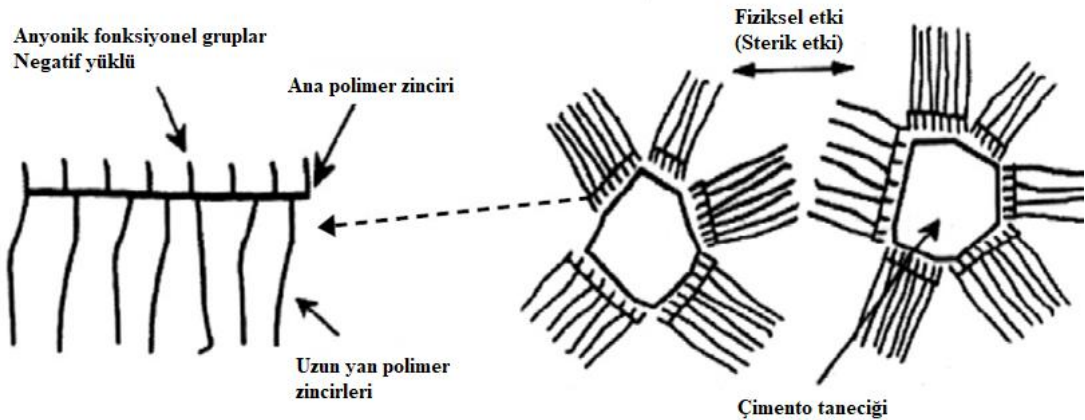
Katkı Türleri	TS EN 934-2+A1	ASTM C494	RILEM	ACI 212
Su azaltıcı katkı	X	X	X	
Yüksek oranda su azaltıcı katkı	X	X	X	
Su tutucu katkı	X			
Hava sürükleyici katkı	X		X	X
Priz hızlandırıcı katkı	X	X	X	X
Priz geciktirici katkı	X	X	X	
Sertleşme hızlandırıcı katkı	X			
Su geçirimsizlik sağlayan katkı	X			
Su azaltıcı ve priz düzenleyici katkılar		X		X
Rötre önleyici katkı				X
ASR önleyici katkı				X
Pompalanabilirliği kolaylaştırıcı katkı				X

Bu bölümde, çimentolu sistemlerin reolojik özelliklerini iyileştirmek ve daha az su kullanılmasını sağlayarak daha yüksek dayanımlar elde etmek amacıyla kullanılan su azaltıcı katkı, yüksek sıcaklık ve donma çözülme etkilerine karşı direnci arttırmak amacıyla kullanılan hava sürükleyici katkı, erken yaş dayanımını arttırmak amacıyla kullanılan priz hızlandırıcı katkı, soğuk derz oluşmasını engellemek amacıyla kullanılan

priz geciktirici katkı ve daha çok su ile temas halinde olan yapılarda kullanılan su geçirimsizliği sağlayan katkıları hakkında genel bilgilerden bahsedilmiştir. Buna ilaveten çalışmanın ana konusunu oluşturan su azaltıcı katkıdan Bölüm 2.3’de detaylı olarak bahsedilmiştir.

### ***Su azaltıcı katkı***

Yüksek performanslı çimentolu sistemlerde işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin geleneksel sistemlere kıyasla daha yüksek olması beklenmektedir. Çimentolu sistemlerin dayanım ve dayanıklılık performanslarını iyileştirmek için karışıma ilave edilen mineral katkı ve lif gibi malzemeler haricinde yapılması gereken en temel husus karışımın su/çimento oranının düşürülmesidir. Ancak su/çimento oranının azaltılmasıyla çimentolu sistemlerin işlenebilirliği ve dolayısıyla kalıba yerleştirilmesi ve yeterli düzeyde sıkıştırılabilmesi zorlaşmaktadır. 1980’li yıllarda üretilen polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıları ile söz konusu problemler çözülmeye başlanmıştır. Su azaltıcı katkıların çimentolu sistemlere ilave edilmesi ile karışımların su miktarı değiştirilmeden istenilen işlenebilirlik elde edilebilmektedir. Diğer bir deyişle hedef akışkanlık düşük su/çimento oranında sağlanabilmektedir (Tsubakimoto, Hosoidi ve Tahara, 1984). Su azaltıcı katkıların kimyasal yapısı Şekil 2.8’den de görüldüğü üzere tarak şeklindedir.



**Şekil 2.8.** Su azaltıcı katkıların elektrostatik ve sterik etkisi (Colleparadi, 2005)

Bu katkıları polikarboksilat ester, polikarboksilat eter veya polikarboksilat olarak da adlandırılmaktadırlar. Su azaltıcı katkıları genellikle ana zincir ve ana zincire bağlı anyonik ve nanyonik yan zincirlerden oluşmaktadır. Anyonik yan zincirler genellikle

karboksilik gruplardan ve nanyonik yan zincirler ise polietilen glikolden oluşmaktadır. Su azaltıcı katkıların çalışma mekanizması temel olarak elektrostatik etki ve sterik etkiden oluşmaktadır. Katkı moleküllerinin pozitif yüklü çimento tanecikleri üzerine adsorpsiyonu negatif yüklü olan ve elektrostatik etki meydana getiren anyonik yan zincirler ile gerçekleşmektedir. Katkı moleküllerinin çözelti içerisindeki dağılım yeteneği ise sterik etki meydana getiren nanyonik yan zincirler ile gerçekleşmektedir. Elektrostatik etki anyonik monomerlerin tipine ve sayısına dolayısıyla ana zincir uzunluğuna bağlı iken sterik etki ise nanyonik yan zincirlerin tipine, uzunluğuna, mol oranına, miktarına ve yoğunluğuna bağlıdır (Flatt ve diğerleri, 2009; Nawa, Ichiboji ve Kinoshita, 2000).

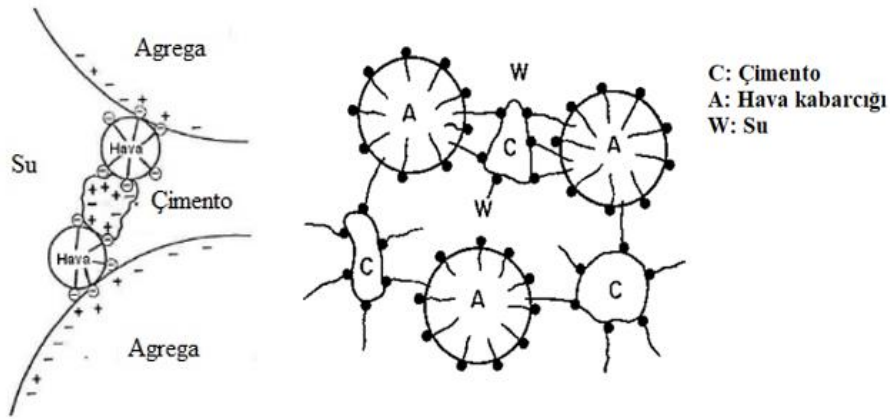
### ***Hava sürükleyici katkı***

Organik malzemelerden oluşan ve sıvı formda olan hava sürükleyici katkıları çimentolu sistemlere eklendiğinde karışım içerisinde homojen olacak şekilde mikroskopik düzeyde hava kabarcıkları oluşturmaktadırlar. Oluşan bu hava kabarcıkları birbirinden bağımsız olup beton üretimi esnasında oluşan ve fiziksel olarak hapsolan hava boşluklarından farklıdır. Boyutları 10 µm ile 0,25 mm arasındadır. Hava sürükleyici katkı kullanımı ile çimentolu sistemlerin işlenebilirliği olumlu yönde etkilenmekte, donma çözülmeye ve yüksek sıcaklığa karşı direnç artmaktadır (Rixom ve Mailvaganam, 1986).

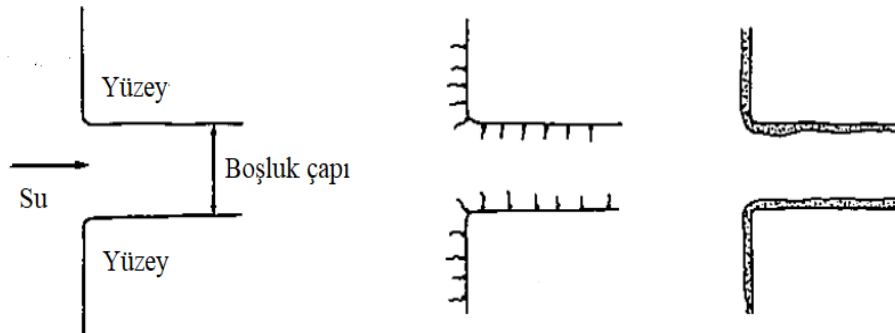
Hava sürükleyici katkıları matris içerisinde hava kabarcıklarının oluşumunu sağlamanın yanı sıra hava kabarcıklarının birbirileri ile birleşmelerini engellemekte ve suyun yüzey gerilimini azaltmaktadırlar. Su ile matris içerisinde yer değiştiren hava kabarcıkları hidrofobik özellik gösteren çimento taneciklerinin yüzeylerine tutunmaktadırlar. Böylece hava sürükleyici katkı etkisini göstermektedir (Lea, 1998; Rixom ve Mailvaganam, 1986; Ramachandran, 1995). Çimento ve agregalar arası hava boşluklarının etkileşim mekanizması Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

### ***Su geçirimsizliği sağlayan katkı***

Su geçirimsiz bir sistem elde etmek amacıyla imento lu sistemlerde su geçirimsizliği sağlayan katkılar kullanılmaktadır. Su geçirimsizliği sağlayan katkının çalışma mekanizması Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Sertleşmiş imento hamurunda oluşan tipik boşluk çapları 0,05 - 1,0  $\mu\text{m}$  arasındadır. Su, bu boşluklardan basınçla veya kılcallık etkisi ile geçmektedir. Çimento yüzeyine tutunan ve hidrofobik özellikle gösteren su geçirimsizliği sağlayan katkı molekülleri ile su geçirimsizliği sağlanmaktadır. Bu katkılar ayrıca sınırlı miktarda hava sürükleyerek çimentolu sistemlerdeki kapiler boşlukları tıkamakta ve dolayısıyla su geçirgenliğinin azalmasını sağlamaktadır (Rixom ve Mailvaganam, 1986).



**Şekil 2.9.** imento ve agregalar arası hava boşluklarının etkileşim mekanizması (Lea, 1998; Rixom ve Mailvaganam, 1986)



**Şekil 2.10.** Su geçirimsizliği sağlayan katkının çalışma mekanizması (Rixom ve Mailvaganam, 1986)

Genellikle arıtma tesisleri, tünel, havuz, baraj, su depoları, kanal, bina temelleri, betonarme çatılar, istinat duvarları gibi su yapıları veya su ile temas halinde olan yapılarda kullanılan söz konusu katkıları çimentolu sistemlerde ağırlıkça %0,5'e kadar kullanılmaktadır. Bu katkıları taze halde çimentolu sistemi jöle kıvamına getirerek su ihtiyacını azaltmakta ve işlenebilirliği iyileştirmektedir. Ayrıca, sertleşmiş hal özelliklerini (dayanım ve dayanıklılık) geçirgenliğini azalttığından dolayı olumlu yönde etkilemektedir (Özen, 2019).

### ***Priz geciktirici katkı***

Lignosülfonat, glikoz ve glukonik asit içeren priz geciktirici katkıları çimento ve su arasında gerçekleşen hidrasyonu yavaşlatmaktadır. Bu katkıları hidrasyon reaksiyonlarının yanı sıra C<sub>3</sub>A'nın hidrasyonunu geciktirerek betonun erken priz almasını engellemektedirler. Sıcak havalarda, nem oranı düşük havalarda ve rüzgârlı havalarda betonun uzun mesafelere taşınmasında, hacmi yüksek ve uzun süren beton dökümlerinde soğuk derz oluşmasının önüne geçmek amacıyla tercih edilen söz konusu katkıları çimentolu sistemlerde ağırlıkça %0,2-2,0 oranlarında kullanılmaktadır. Bu oran ortam sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar durumlarına göre değişmektedir. Priz geciktirici katkı içeren çimentolu sistemlerin erken yaş dayanımları daha düşük olmasına rağmen 7 günden sonra matraste oluşturduğu homojen yapıdan dolayı dayanımları katkısız çimentolu sistemlere benzer veya daha yüksek olmaktadır (Özen, 2019, Ramachandran, 1995).

### ***Priz hızlandırıcı katkı***

Kalsiyum nitrat ve nitriller, tiosülfonatlar, formatlar ve trietanolaminlerden oluşan priz hızlandırıcı katkıları çimentolu sistemlerin durgunluk devresini kısaltmak ve erken yaş dayanımını arttırmak için kullanılmaktadır. Bu katkıları çimento ve su arasında gerçekleşen hidrasyon reaksiyonlarının hızlanmasını sağlayarak C-S-H jeli oluşumunu hızlandırmaktadır (Akman, 1996). Priz hızlandırıcı katkıların, ani priz yapan ve erken yaş dayanımını arttıran türleri bulunmakta olup buna bağılı olarak kimyasal yapısı ve etki mekanizmaları farklılık göstermektedir. Priz hızlandırıcı katkıları genellikle püskürtme

betonlarda kullanılmaktadır. Ani priz yapan priz hızlandırıcı katkıları çimentonun  $C_3A$  bileşeni ile reaksiyonuna girerek hidrasyonun hızlanmasını ve karışımın hızlı priz almasını sağlamaktadır. Erken yaş dayanımını artıran priz hızlandırıcı katkıları ise çimentonun  $C_3S$  bileşeni ile reaksiyona girerek daha hızlı dayanım kazanmasını sağlamaktadır. Priz hızlandırıcı katkıların çimentolu sistemlerin işlenebilirliğine, rötresine, nihai dayanımdaki azalmaya veya hidrasyon ısısındaki yükselmeye dikkat edilerek kullanılması gerekmektedir (Akman, 1996).

## **2.2. Uçucu Kül**

Uçucu kül, pulverize kömür ile çalışan termik santrallerden yanma sonucunda oluşan bir yan üründür. 1 kWh'lik enerji üretiminden yaklaşık 110 g kül atık madde oluşmaktadır. 1000 MW'lık kapasiteye sahip bir termik santralde yıllık oluşan kül miktarı 650 bin tonu bulmaktadır (Baradan ve diğerleri, 2012). Enerji ve üretim kaybının yanı sıra çevre kirliliğini artırması uçucu külün geri dönüşümünü zorunlu hale getirmektedir. Uçucu küllerin en fazla kullanıldığı alanlardan biri de inşaat sektörüdür. Uçucu kül, Dünya'da ilk olarak 1930 yılında ABD'de bir yol inşaatında, ülkemizde ise 1968 yılında DSİ tarafından baraj inşaatlarında kullanılmıştır. Günümüzde ise çimentolu sistemlere sağladığı birçok avantajdan (işlenebilirliği artırması, ileri yaş dayanımı ve dayanıklılığı artırması) dolayı çimento ve hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Baradan ve diğerleri, 2012).

Bu bölümde, çimentolu sistemlerin özelliklerini doğrudan etkileyen uçucu külün mineral ve kimyasal bileşiminden ve fiziksel özelliklerinden bahsedilmiş, puzolanik aktivite kavramı açıklanmış ve uçucu kül ile ilgili yapılan çalışmalar derlenmiştir.

### **2.2.1. Uçucu külün mineral ve kimyasal bileşimi**

Uçucu külün mineral ve kimyasal bileşimi, enerji santralinde yakılan kömürün özelliklerine ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Enerji santrali fırınından çıkan malzemenin hızlı bir şekilde soğutulmasından dolayı uçucu kül %50-90 oranlarında camsı parçacıklar şeklindeki minerallerden meydana gelmektedir. Az miktarda kristal formda uçucu külde

oluşmaktadır. Buna ilaveten uçucu külün içerisinde yanmamış kömür de bulunmaktadır. Yanmamış kömür oranı toplam miktarın %16'sına kadar olabilmektedir. Bu oran yanma hızı ve sıcaklığı, kömürün pulverizasyon derecesi, yakıt/hava oranı, kömürün doğası gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Tokyay, 2016). Camsı fazı belirlemek için düşük açılı X-ışını difraktometrisi, kristal fazı belirlemek için ise Kızılötesi ve Mossbauer spektroskopisi kullanılmaktadır (Wesche, 1991). Uçucu küllerin mineral fazları hem tür hem de miktar olarak farklı yanma sıcaklıklarına ve hammaddeye göre değişiklik göstermektedir (Tokyay ve Erdoğan, 1998; Hubbard ve Dhir, 1984). Taşkömürü ve linyitten elde edilen uçucu küllerde bulunan yaygın mineral fazlar ve miktarları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

**Çizelge 2.6.** Uçucu kül içerisindeki mineraller ve miktarları (Tokyay, 2016)

İsim	Mineral Formül	Miktar (%)	
		Taşkömürü	Linyit
Kuvars	SiO <sub>2</sub>	2,0-8,5	2,0-6,0
Mulit	Al <sub>6</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>13</sub>	6,5-14	1,0-5,0
Hematit	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5-7,0	2,0-6,0
Magnetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,5-10	0,6-2,5
Kireç	CaO	3,5	5,0-30
Anhidrit	CaSO <sub>4</sub>	0	0,7-16,9
Plajiyoklaz	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	0	0-28
Amorf	-	45-95,4	30-80

Uçucu kül bileşenleri nadiren serbest oksit formunda olsa da kimyasal bileşimlerini belirlemek amacı ile geleneksel olarak yapılan oksit analizi kullanılmaktadır. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri kömürde bulunan safsızlıkların türü ve miktarına, yakma yöntemine ve toplama yöntemine bağlı olarak mineralojik bileşimlerde olduğu gibi büyük farklılıklar göstermektedir. Taş kömüründen elde edilen uçucu küller SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> açısından zengin iken, linyit kökenli uçucu küller önemli miktarda CaO ve SO<sub>3</sub> içerebilmektedir. Bitümlü kömürden ve alt bitümlü kömürden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ise genellikle taşkömürü ve linyit kökenli uçucu küllerin arasındadır. Buna ilaveten, MgO, MnO, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O gibi oksitler daha az miktarda

bulunabilmektedir (Tokyay, 2016; Wesche, 1991). Farklı kömürlerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve oranları Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Uçucu küllerin sınıflandırılması temel olarak kimyasal bileşime göre yapılmaktadır. Uçucu küller genel olarak düşük kireçli ( $\text{CaO} < \%10$ ) ve yüksek kireçli ( $\text{CaO} > \%10$ ) olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Düşük kireçli uçucu küllerin puzolanik aktivitesi, yüksek kireçli uçucu küllere kıyasla daha yüksektir (Dhir, 1986). Uçucu küller ASTM C 618 Standardında F sınıfı ve C sınıfı olarak tanımlanmaktadır. F sınıfı uçucu küller genellikle taşkömürü ve bitümlü kömürlerden elde edilen düşük kireçli uçucu küllerdir. C sınıfı uçucu küller ise genellikle alt bitümlü kömür ve linyitlerden elde edilen yüksek kireçli uçucu küllerdir. Ayrıca  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içerikleri toplamının F sınıfı uçucu küllerde  $\geq \%70$ , C sınıfı küllerde ise  $\geq \%50$  olması gerekmektedir (ASTM C 618).

**Çizelge 2.7.** Farklı kömürlerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve oranları (Tokyay, 2016; Wesche, 1991)

Oksit (%)	Taşkömürü	Bitümlü Kömür	Alt Bitümlü Kömür	Linyit
$\text{SiO}_2$	47-68	7-68	17-58	6-45
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25-43	4-39	4-35	6-23
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2-10	2-44	3-19	1-18
$\text{CaO}$	0-4	1-36	2-45	15-44
$\text{MgO}$	0-1	0-4	0-8	3-12
$\text{Na}_2\text{O}$	-	0-3	-	0-11
$\text{K}_2\text{O}$	-	0-4	-	0-2
$\text{SO}_3$	0-1	0-32	3-16	6-30

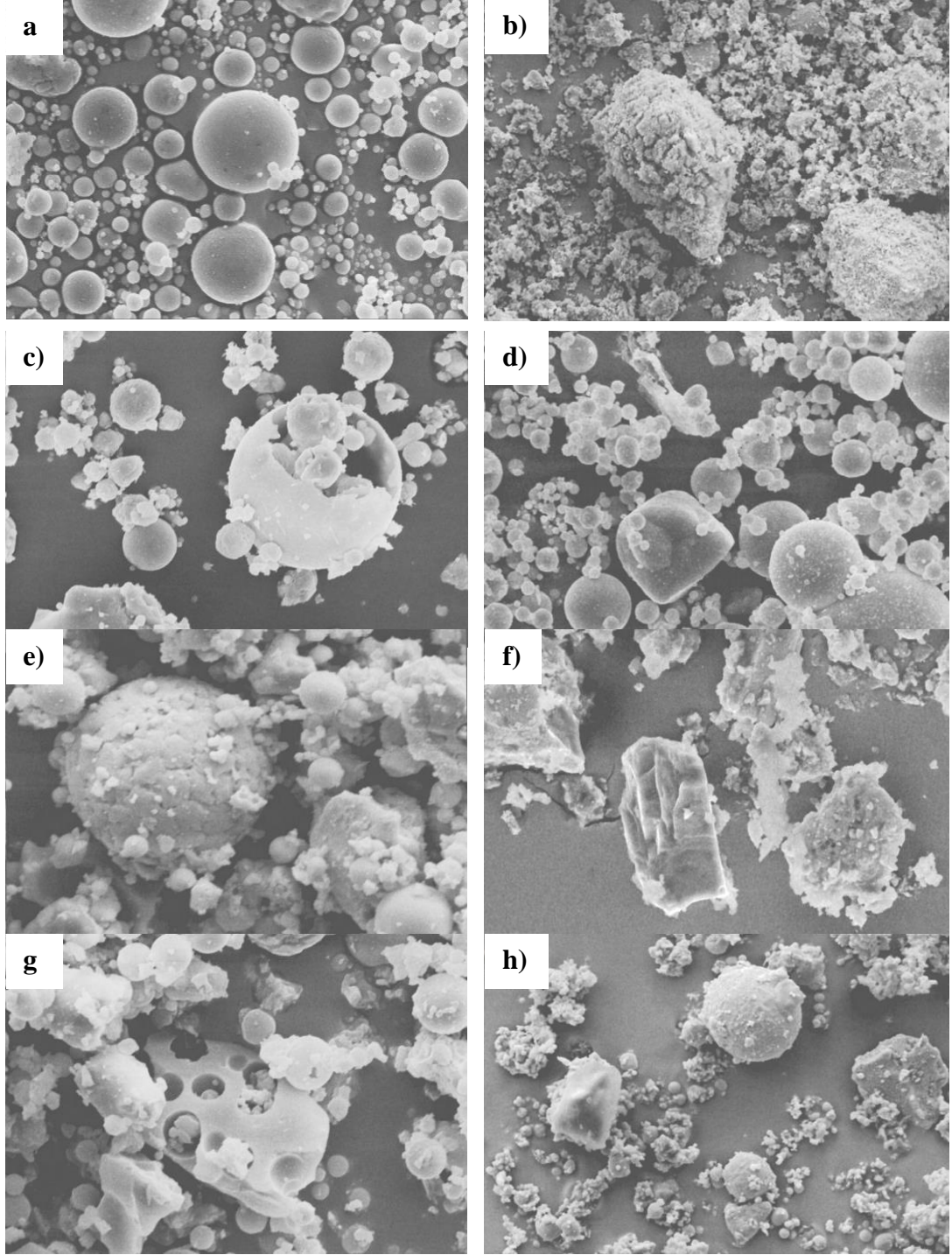
EN 450-1 Standardında ise uçucu küller silissi ve kalkerli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Silissi uçucu küller kütlece en az %25 reaktif  $\text{SiO}_2$  ve en fazla %10 reaktif  $\text{CaO}$  içermelidir. Kalkerli uçucu küllerde ise reaktif  $\text{CaO}$  içeriğinin %10’dan fazla olması, reaktif silis içeriğinin %25’den az olmaması istenmektedir (EN 197-1).



### 2.2.2. Uçucu külün fiziksel özellikleri

Uçucu külün inceliğini belirlemek amacıyla Blaine hava geçirgenliği, hidrometre analizi, nitrojen adsorpsiyonu, lazer partikül boyutu kırınımı gibi teknikler mevcut olmasına rağmen genel olarak elek analizi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem basit, ucuz ve oldukça güvenilirdir. Birçok ulusal ve uluslararası standart, elek analizi yöntemini ıslak eleme yapıldıktan sonra 45 µm'lik elek üzerinde kalan maksimum malzeme miktarı olarak tarif etmektedir. Uçucu küllerin özgül yüzey alanları 250 ile 550 m<sup>2</sup>/kg arasındadır (Tokyay, 2016). ASTM C 618 Standardında bu miktar kütlece %34 olarak sınırlandırılmıştır. EN 450-1 Standardında ise 45 µm'lik elek üzerinde kalan miktarı maksimum %40 ve %12 olarak sınırlandırıldığı iki uçucu kül kategorisi belirtilmiştir.

Uçucu küllerin çoğunlukla küresel parçacıklardan oluştuğu kabul edilse de, uçucu külün morfolojisi büyük oranda hammaddenin çeşidine, inceliğine ve termik santraldeki yanma koşullarına bağlıdır. Uçucu kül partikülleri küresel, köşeli veya düzensiz şekilli olabilmektedir. 1100 °C'den düşük sıcaklıklar, genellikle kömürdeki mineral safsızlıklar erimediği için düzensiz partiküllere yol açmaktadır. Bu parçacıklar kuvars, feldispat, kullanılmış kil ve yanmamış karbon gibi minerallerden oluşmaktadır. Kömürdeki safsızlıkların çoğu, 1500 °C'den yüksek sıcaklıklarda erimekte ve küresel partiküller oluşmaktadır. Bunlar katı camsı küreler, içi boş küreler (senosfer), çok sayıda daha küçük küreler içeren küreler (plerosfer), kristal madde kaplı yüzeylere sahip küreler (dermasfer) olabilmektedir. Ayrıca uçucu küllerde yüksek sıcaklıklara dayanabilen kuvars partikülleri ve mullit gibi yeni oluşan kristal maddelerde gözlemlenebilmektedir (Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğınobalı, 2004; Alonso ve Wesche, 1991). Düşük kireçli uçucu küller, yüksek kireçli uçucu küllere kıyasla çoğunlukla küresel parçacıklardan oluşan daha homojen parçacık yapısına sahiptir. Yüksek kireçli uçucu küller, küresel olanların yanı sıra önemli miktarda anhidrit, serbest kireç, kalsit ve feldispat gibi köşeli ve düzensiz mineral parçacıkları içermektedir (Tokyay, 2006). Çeşitli uçucu küllerin parçacık şekillerine ait SEM görüntüleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Uçucu küllerin ortalama yoğunlukları 1900 ile 2400 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir (Alonso ve Wesche, 1991; Dhir, 1986). Uçucu kül içerisinde hiçbir içi boş parçacık kalmayana kadar öğütüldüğünde yoğunluk 2900 kg/m<sup>3</sup>'e kadar çıkabilmektedir (Dhir, 1986).



**Şekil 2.11.** Çeşitli uçucu küllere ait parçacıkların SEM görüntüleri (a) katı camlı küreler ve senosferler, (b) serbest kireç, (c) plerosferler, (d) açısız kuvars kristali, (e) manyetit kaplı küre, (f) kalsit kristali, (g) yanmamış karbon, (h) mullit kristalleri (Tokyay, 2016).

### 2.2.3. Puzolanik aktivite

Puzolanik aktivite, belirli maddelerin oda sıcaklığında su içerisinde CaO veya Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek katı ve suda çözünmeyen maddeler oluşturma kapasitesidir. Portland Çimentosu'na %20-25 oranlarında uçucu kül ikamesi, su ile reaksiyonun ilk aşamasında hidrasyon hızı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Puzolanik aktivite 14. günden itibaren daha etkili olmaya başlamaktadır. 120. günden sonra hidrasyon sürecinde oluşan Ca(OH)<sub>2</sub> tarafından uçucu kül parçacıkları parçalanmaktadır (Baradan ve diğerleri, 2010; Wesche, 1991). Puzolanik aktivite indeksi (PAİ) Denklem 2.13'e göre hesaplanmaktadır.

$$PAİ = A/B \times 100 \quad (2.13)$$

Burada (A) test edilen numunelerin ortalama basınç dayanımını, (B) ise kontrol numunelerinin ortalama basınç dayanımını ifade etmektedir.

Puzolanik aktiviteyi ölçmek amacıyla kullanılan diğer bir yöntemde; uçucu küllerin kimyasal reaktivitesi, önceden belirlenmiş bir süre boyunca etkileşime giren bir kireç- uçucu kül karışımında kalan serbest reaksiyona girmemiş Ca(OH)<sub>2</sub> miktarının belirlenmesi yöntemidir (Baradan ve diğerleri, 2010; Wesche, 1991).

### 2.2.4. Uçucu kül ile ilgili yapılan çalışmalar

Grzeszczyk ve Lipowski (1997) tarafından yapılan çalışmada, yüksek kireçli uçucu kül içeren çimento hamurlarının reolojik özellikleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, özgül yüzey alanı birbirinden farklı 4 uçucu kül, ağırlıkça %20, 40, 60 ve 80 oranlarında çimento ile ikame edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uçucu kül içeriği ile hem kayma hem de plastik viskozite değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, uçucu kül inceliği arttıkça hamur karışımlarının daha akışkan hale geldiği gözlemlenmiştir.

Shehata ve Thomas (2000) tarafından yapılan çalışmada, reaktif agrega ve farklı tip ve oranlarda uçucu kül kullanımının harç ve betonların genleşmeleri üzerindeki etkileri

incelenmiştir. Bu amaçla Kuzey Amerika’da bulunan 18 farklı ticari uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küllerin kimyasal bileşimleri Çizelge 2.8’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uçucu külün kimyasal yapısının alkali silis reaksiyonu sonucu oluşan genişlemeye makul bir etkisinin olduğu ancak genişleme derecesini kontrol etmek için gerekli minimum uçucu kül miktarını doğru tahmin etmek için kullanılamayacağı ifade edilmiştir. Sabit bir uçucu kül ikame seviyesi için, uçucu kül kalsiyum veya alkali içeriğinin artışı ile birlikte veya silis içeriğinin azalışı ile birlikte genişlemenin artacağı tespit edilmiştir. Diğer bir ifadeyle uçucu külün kalsiyum veya alkali içeriği arttıkça veya silis içeriği azaldıkça genişlemenin kabul edilebilir bir seviyede tutulabilmesi için gereken minimum uçucu kül miktarının artırılması gerekmektedir.

**Çizelge 2.8.** Kuzey Amerika’da bulunan ticari uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Shehata ve Thomas, 2000)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub>	LOI
<b>HAPC</b>	20,83	5,11	2,01	62,98	2,43	3,25	1,12	0,28	1,02	0,24	0,05	-	0,92
<b>LAPC</b>	21,27	4,22	2,98	62,71	2,13	2,82	0,77	0,10	0,60	0,18	0,11	-	2,40
<b>LG</b>	41,96	19,64	20,07	5,57	1,19	0,95	2,44	0,69	2,30	0,84	0,15	1,10	3,71
<b>FM</b>	47,34	22,34	15,08	6,38	0,82	1,43	1,23	0,60	1,41	1,10	0,32	0,47	2,73
<b>MN</b>	61,50	20,52	4,29	8,68	1,70	0,19	0,60	0,17	0,56	1,38	0,05	0,30	0,08
<b>SD I</b>	50,92	23,64	4,62	13,63	0,86	0,23	0,59	3,38	3,77	0,14	0,73	1,42	0,42
<b>BD</b>	45,66	21,42	5,53	12,34	2,76	0,84	0,96	7,82	8,45	0,65	0,14	2,43	0,35
<b>SD II</b>	51,56	22,90	4,58	15,15	1,16	0,28	0,30	2,60	2,80	0,66	0,12	1,80	0,35
<b>TB</b>	40,68	21,19	4,50	15,87	3,54	2,18	0,49	8,14	8,46	0,96	0,65	3,60	0,53
<b>C1</b>	44,29	20,96	5,23	17,51	4,21	2,13	0,84	1,13	1,68	1,12	0,63	0,77	1,14
<b>WM</b>	39,77	21,46	5,69	18,46	3,77	1,86	0,66	3,71	4,14	1,04	0,54	2,52	1,06
<b>BR</b>	32,71	19,02	5,76	18,85	4,30	4,81	0,68	8,28	8,73	1,24	0,52	4,79	1,18
<b>PI</b>	38,42	20,57	5,64	20,50	4,39	1,76	0,62	2,64	3,05	1,00	0,52	1,84	2,01
<b>C2</b>	39,83	19,56	5,54	21,53	4,62	2,14	0,60	1,55	1,94	1,20	0,71	0,99	1,68
<b>EW</b>	38,22	18,43	5,72	24,61	4,72	1,55	0,44	1,39	1,68	1,45	1,04	0,94	0,18
<b>PP</b>	35,20	18,72	6,06	26,61	5,12	2,49	0,36	1,59	1,83	1,50	1,19	1,33	0,39
<b>IN</b>	36,12	18,64	6,07	26,62	5,41	1,80	0,40	1,34	1,60	1,48	1,12	1,02	0,16
<b>OK I</b>	34,60	16,45	7,13	27,71	5,89	2,71	0,21	1,51	1,65	1,30	0,71	1,23	0,28
<b>OK II</b>	31,65	16,65	7,28	29,10	6,57	3,17	0,20	1,72	1,85	1,33	0,74	1,19	0,36
<b>CC</b>	41,12	11,24	5,93	30,00	4,40	2,13	1,76	1,10	2,26	0,47	0,10	1,05	0,78

Siddique (2003) tarafından yapılan çalışmada, %10, 20, 30 ve 40 oranlarında ince agrega yerine kullanılan F sınıfı uçucu külün betonun aşınma dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda kontrol karışımı, Portland Çimentosu ile 28 günlük basınç dayanımı 26 MPa olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretilen numuneler 365. güne kadar

basınç ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre uçucu kül ikame oranının artmasıyla birlikte betonların basınç dayanımlarının ve aşınma dirençlerinin arttığı tespit edilmiştir. İnce agreganın %40 oranında uçucu kül ile ikame edilmesi ile betonun aşınma direncinin %40 oranında iyileştiği belirlenmiştir.

Atiş (2003) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül içeren betonların karbonatlaşmasını değerlendirmek amacıyla hızlandırılmış bir karbonatlaşma testi yapılmıştır. Karbonatlaşma süreci kontrollü bir ortam kullanılarak hızlandırılmıştır. Bu kapsamda su/bağlayıcı oranları 0,28 ile 0,55 arasında değişen ve Normal Portland Çimentosu yerine %0, 50 ve 70 oranlarında uçucu kül ilave edilen beton karışımları hazırlanmıştır. Elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, %70 oranında uçucu kül ikame edilen karışımın diğer karışımlara kıyasla karbonatlaşma derinliğinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre, karbonatlaşma derinliği ile betonun basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

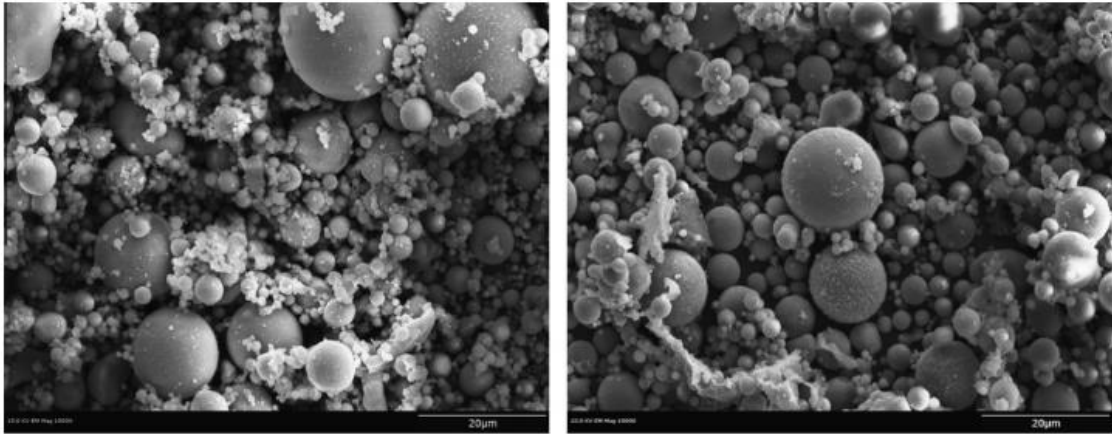
Dinakar, Babu ve Santhanam (2008) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ikamesinin kendiliğinden yerleşebilen betonların durabilite özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, kendiliğinden yerleşebilen betonlarda çimento yerine %0, 10, 30, 50, 70 ve 85 oranlarında uçucu kül ikame edilmiş olup boşluk miktarı, su adsorpsiyonu, asit saldırısı ve klorür geçirgenliği deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, uçucu kül miktarı artışının kendiliğinden yerleşebilen betonların dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Chalee, Ausapanit ve Jaturapitakkul (2010) tarafından yapılan çalışmada, 7 yıl boyunca deniz koşullarında sıcak ve yüksek nemli bir iklime maruz kalan ve uçucu kül içeren betonun performansı incelenmiştir. Kontrol karışımı ve uçucu kül ikameli karışımlar hazırlanarak 200 mm'lik küp numunelere dökülmüş ve çeşitli derinliklerde 12 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda çelik çubuklar gömülmüştür. Üretilen numuneler Tayland Körfezi'ndeki deniz ortamına bırakılmıştır. Beton numuneler 7 yıla kadar deniz suyunun gelgit etkisine maruz kaldıktan sonra klorür geçirgenliği ve korozyon testi

yapılmıştır. Sonuçta, betonda uçucu kül kullanımının klorür penetrasyonunu ve korozyonu bariz bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir.

Liu (2010) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanımının kendiliğinden yerleşen betonların sertleşmiş hal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, uçucu kül kullanım oranları %0, 20, 40, 60 ve 80 olarak belirlenmiş ve hazırlanan karışımların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, UPV değeri, elastisite modülü ve kılcal geçirimsizliği incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre uçucu kül kullanımının, karışımların mekanik özelliklerini ve geçirimsizliğini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Bitümlü malzemelerde uçucu kül kullanımı ile performans artmakta, ekonomik ve çevresel katkı sağlanmaktadır. Sobolev ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanımının asfalt kaplamaların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda %0, 5, 15, 30 ve 60 olmak üzere beş farklı oranda C Sınıfı ve F Sınıfı uçucu küller kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan C Sınıfı ve F Sınıfı uçucu küllerin SEM görüntüleri Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Görüntülerden de anlaşıldığı gibi uçucu kül partikülleri eşit olarak dağılmıştır. Deney sonuçlarına göre uçucu kül kullanımının bitümlü karışımların reolojik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

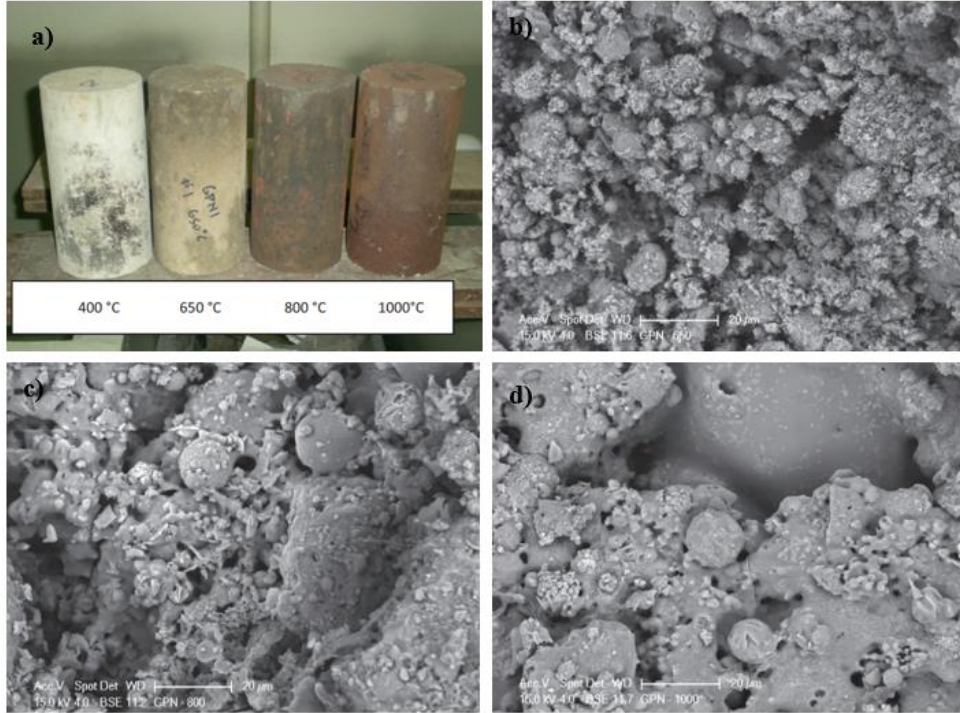


(a)

(b)

**Şekil 2.12.** Uçucu küllere ait SEM görüntüleri; a) C sınıfı, b) F sınıfı (Sobolev ve diğerleri, 2014)

Sarker, Kelly ve Yao (2014) tarafından yapılan çalışmada, çimentoya alternatif bir bağlayıcı olan uçucu kül bazlı geopolimerler yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılarak çatlama, kabarma ve artık dayanımları belirlenmiştir. Uçucu kül bazlı geopolimer ve normal Portland Çimentosu kullanılarak üretilen silindir numuneleri 400 °C, 650 °C, 800 °C ve 1000 °C olmak üzere dört farklı sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra uçucu kül bazlı geopolimer betonların çatlama açısından normal betonlara kıyasla daha az hasara uğradığı belirlenmiştir. Normal betonların 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ciddi bir şekilde parçalandığı gözlemlenirken, Şekil 2.13’de görüldüğü üzere uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda herhangi bir parçalanma olmadığı gözlemlenmiştir.



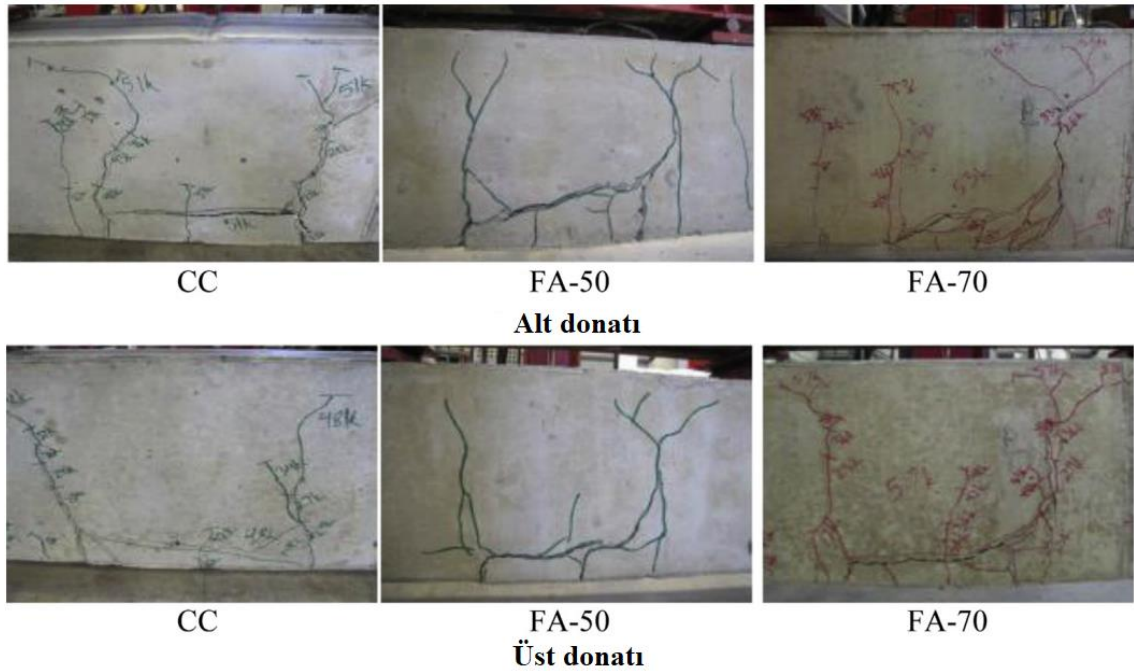
**Şekil 2.13.** Yüksek sıcaklığa maruz kalan uçucu küllü geopolimer betonların görüntüleri; a) yüksek sıcaklık sonrası görüntü, b) SEM görüntüsü 650 °C, c) SEM görüntüsü 800 °C, d) SEM görüntüsü 1000 °C (Sarker ve diğerleri, 2014)

Ayrıca uçucu kül bazlı geopolimer betonların artık dayanımlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna ilaveten Şekil 2.13’de gösterilen SEM görüntüleri incelendiğinde sıcaklığın yükselmesi ile birlikte mikro yapının yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bu



durumun esas olarak geopolimer matrisin termal genleşmeleri ile agregalar arasındaki farktan kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Arezoumandi, Looney ve Volz (2015) tarafından yapılan çalışmada, yüksek miktarda uçucu kül ikameli betonların çelik donatı ile arasındaki aderans araştırılmıştır. Bu kapsamda C Sınıfı uçucu kül %0, 50 ve 70 oranlarında çimento ile ikame edilmiş olup sırasıyla CC, FA-50 ve FA-70 ile isimlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, betondaki uçucu kül ikame oranının artışı ile birlikte beton ile donatı arasındaki aderansın arttığı tespit edilmiştir. Numunelere ait çatlak gelişimleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Ayrıca uçucu kül kullanımının betonların yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisini iyileştirdiği belirlenmiştir.

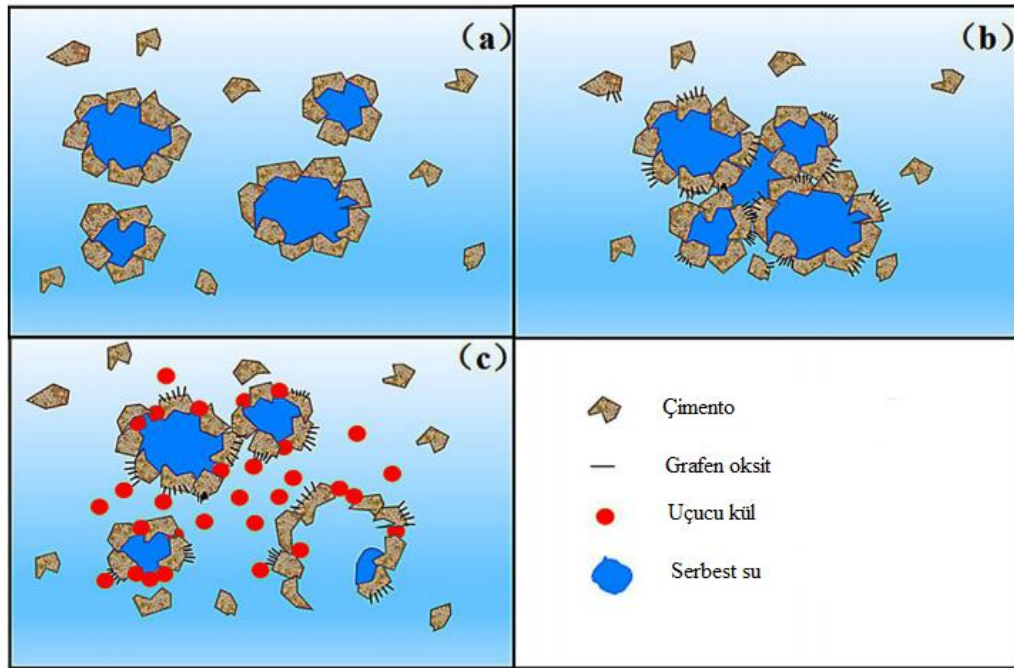


**Şekil 2.14.** Pull-out testi sonucu kirişlerde oluşan çatlaklar (Arezoumandi ve diğerleri, 2015)

Grafen oksit çimento sistemlerinin mukavemetini ve tokluğunu artırırken, karışımların akışkanlığını ve dolayısıyla işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Wang ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada, grafen oksit içeren çimento hamurunun reolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla basit ve ekonomik çözüm olan uçucu kül kullanılmış ve bu yönde etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda uçucu külün etkisi çimento



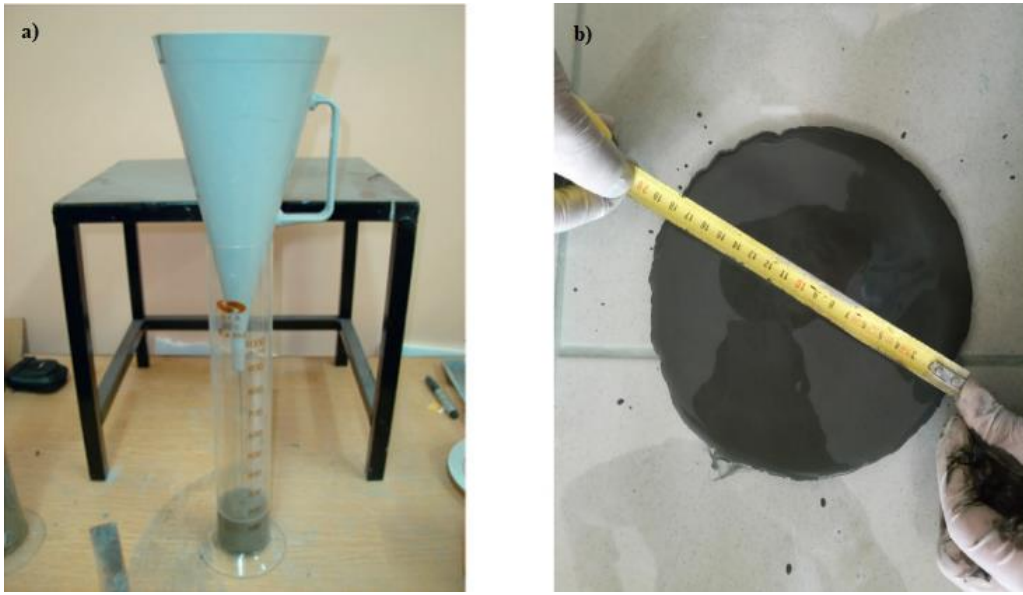
ağırlığının %0,01 ve %0,03 olmak üzere iki farklı oranda grafen oksit kullanılarak incelenmiştir. Sonuçta, uçucu kül ikame oranının artması ile hamur karışımlarının kayma gerilmesi ve plastik viskozitesi azalmıştır. %0,01 grafen oksit ve %20 uçucu kül ikameli karışımın kayma gerilmesinin kontrol karışımına kıyasla %85 oranında, plastik viskozitesinin ise %29,5 oranında azaldığı, %0,03 grafen oksit ve %20 uçucu kül ikameli karışımın ise kayma gerilmesinin kontrol karışımına kıyasla %50 oranında, plastik viskozitesinin ise %5,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Grafen oksit-çimento-uçucu kül birleşiminin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Sonuç olarak, uçucu külün küresel şekilli olmasından kaynaklı grafen oksitli çimentolu sistemlerde akışkanlığın iyileştirilmesinde önemli rol aldığını ve grafen oksitli çimentolu sistemlerin işlenebilirlik sorununun çözümünde kullanılabileceği ifade edilmiştir.



**Şekil 2.15.** Grafen oksit-çimento-uçucu kül birleşimi çalışma mekanizmasının şematik gösterimi (Wang ve diğerleri, 2017)

Celik ve Akcuru, (2020) tarafından yapılan çalışmada, mineral katkı olarak taban külü kullanımının çimentolu sistemlerin reolojik özellikleri ve akışkanlığına etkisi deneysel ve analitik analizler yapılarak araştırılmıştır. Bu bağlamda, %0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında olmak üzere taban külü çimento yerine ikame edilmiş ve 0,75, 1, 1,25 ve 1,5

olmak üzere dört farklı su/bağlayıcı oranı belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların plastik viskozitesi, görünür viskozitesi ve kayma gerilmeleri tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 2.16'da gösterilen Marsh-hunisi ve mini-çökme deneyleri ile karışımların işlenebilirlikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde uçucu kül kullanımının karışımların taze hal özelliklerini kayda değer bir şekilde etkilemediği, su/bağlayıcı oranının ise karışımların reolojik ve akışkanlık davranışlarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

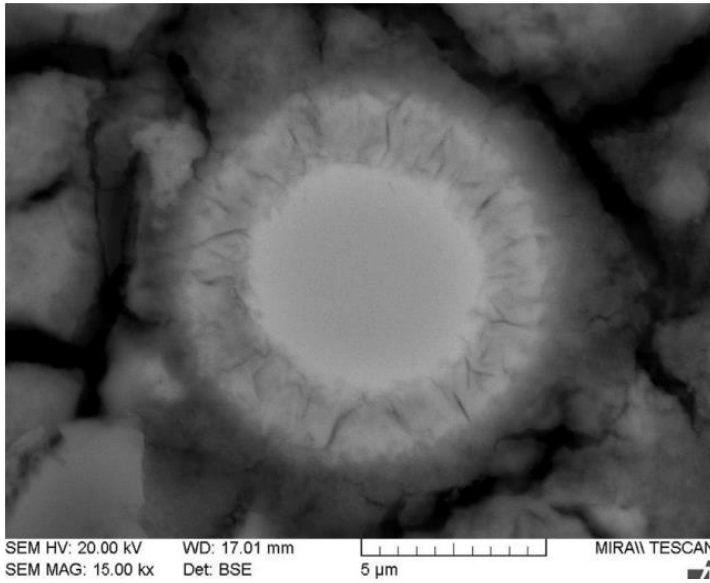


**Şekil 2.16.** Akışkanlık deneyleri; a) Marsh-hunisi deneyi, b) mini-çökme deneyi (Celik ve Akcuru, 2020)

Uçucu külün inceliğinin artması çimentolu sistemlerindeki yaşlarda basınç dayanımını iyileştirmektedir. Ayrıca, söz konusu uçucu kül ikamesi ile çimentolu sistemlerde puzolanik reaksiyon oluşmakta ve fiziksel olarak boşluklar dolmaktadır. Sun, Wang ve Lee (2021) tarafından yapılan çalışmada, çimento hidrasyonu ile puzolanik reaksiyonun çimentolu sistemlerin basınç dayanımına etkisinin ölçülmesi amacı ile entegre bir reaksiyon modeli benimsenmiştir. Uçucu kül parçacıklarının kademeli olarak çözünmesi göz önünde bulundurularak basınç dayanımı artışını hesaplamak için fiziksel doldurma etkisi ile ilgili değiştirilmiş bir model kullanılmıştır. Uçucu kül inceliği ve ikame oranı dikkate alınarak ince uçucu kül ikameli çimentolu sistemin basınç dayanımı gelişimini

tahmin etmek için sayısal bir prosedür önerilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, uçucu kül inceliğinin artmasıyla basınç dayanımının doğrusal olarak arttığı tespit edilmiştir. İnce uçucu kül ikame oranının belirli bir değere kadar artması ile birlikte karışımların 28 günlük basınç dayanımlarının arttığı, belirli bir değerden sonra ise azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, aynı basınç dayanımının sağlanması durumunda ince uçucu külün ikame oranının artması ile enerji tasarrufunun ve böylece CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasının sağlanacağı ifade edilmiştir.

Park ve Choi (2021) tarafından yapılan çalışmada, yüksek oranda uçucu kül içeren çimentonun hidrasyon özellikleri ve mikroyapısı, uçucu kül ikame oranına göre araştırılmış ve hidrasyon derecesi ile gözenek yapısı arasındaki korelasyon analiz edilmiştir. Reaktif uçucu külün BSE görüntüsü Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.17.** Reaktif uçucu küle ait BSE görüntüsü (Park ve Choi, 2021)

Elde edilen sonuçlara göre, uçucu kül ikame oranı arttıkça çimentonun hidrasyon derecesinin arttığı ancak reaksiyon derecesinin azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek oranda uçucu kül ikameli çimento hamurunun jel/boşluk oranı ile basınç dayanımı arasında güçlü bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Uçucu kül ikame oranı arttıkça mikro bölgedeki yüzey fraktal boyutunun azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca mikro bölgedeki yüzey fraktal

boyutu, basınç dayanımı ve jel/boşluk oranı arasında güçlü bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir.

Al-Sodani ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada, tip 1 çimentosu yerine ağırlıkça %20 oranında uçucu kül ikame edilerek hazırlanan beton hem laboratuvar hem de arazi koşullarında klorür difüzyonuna maruz bırakılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan beton numuneleri 365 gün boyunca 22, 35, 50 ve 60 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta tutulan klorür çözeltisine maruz bırakılmıştır. Arazi için hazırlanan beton numuneleri ise Basra Körfezi kıyısında denizin gelgit bölgesine 10 yıla kadar maruz bırakılmıştır (Şekil 2.18).

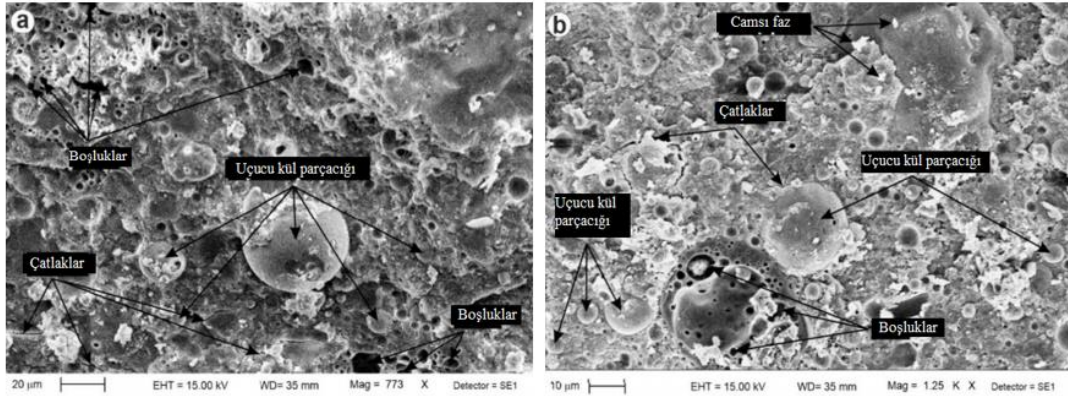


**Şekil 2.18.** Deniz suyu etkisine maruz bırakılan beton numuneler (Al-Sodani ve diğerleri, 2021)

Deney sonuçlarına göre, laboratuvarda 22 veya 35 °C'ye maruz bırakılan beton numunelerinde klorür difüzyon katsayısının, 50 ve 60 °C'ye maruz kalan beton numunelerine göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık 22'den 60 °C'ye çıkarıldığında Tip I çimentolu beton numuneleri için klorür difüzyon katsayısı değerinin 3,6 kat arttığı, benzer bir sıcaklık artışı için uçucu kül ikameli beton numunelerinin klorür difüzyon katsayısı değerinin ise 2,3 kat arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, sahadaki ve laboratuvardaki beton numunelerindeki klorür difüzyon katsayıları ile ilgili matematiksel

modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin, laboratuvar değerlerinden yararlanılarak saha numunelerinde klorür difüzyonunu tespit etmek ve dolayısıyla yapıların faydalı hizmet ömrünü hesaplamak için kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Çimentolu kömür uçucu kül dolgusu zeminde kömür kazısından sonra oluşan açıklıkları doldurmak amacıyla kullanılan ve kömür uçucu külü, çimento ve suyun karışımından oluşan bir dolgu malzemesidir. Kömür madenlerinde bu dolgunun erken yaşta dayanım kazanması önemlidir. Bu sebeple çimentolu kömür uçucu kül dolgularında katkı maddelerinin kullanılması ise dolgunun sertleşme süresi hızlanabilmekte ve kısa ve uzun vadeli mukavemet arttırılabilmektedir. Cavusoglu, Yılmaz ve Yılmaz (2021) tarafından yapılan çalışmada, sodyum silikat hızlandırıcı kullanımının çimentolu kömür uçucu kül dolgusunun priz süresi, erken yaştaki mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda söz konusu dolgu malzemesinde %25 oranında normal Portland Çimentosu, %75 oranında kömür uçucu külü ve ağırlıkça %0,5, 1 ve 1,5 oranlarında sodyum silikat kullanılmıştır. Dolgunun priz süresi Vicat Cihazı ile basınç dayanımı tek eksenli basınç testi ile gözenek yapısı ise taramalı elektron mikroskobu ile ölçülmüştür.



**Şekil 2.19.** 90 günlük karışımların SEM görüntüleri; a) katkılı, b) katkısız (Cavusoglu ve diğerleri, 2021)

Elde edilen sonuçlara göre, sodyum silikat kullanımının dolgu malzemesinin erken yaş dayanımını %14'e kadar arttırdığı ve priz süresini %58'e kadar kısalttığı tespit edilmiştir. Şekil 2.19'dan da anlaşıldığı üzere sodyum silikat kullanılan karışımların gözenek



yapısının kullanılmayanlara kıyasla daha ince olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan bu çalışmadan elde edilen sonuçların, kömür madenlerinde kullanılan dolgu malzemesinin hem priz süresini hem de mukavemetini değerlendirmek için avantajlı olabileceği ve böylece para tasarrufu ve işletme kolaylığı açısından etkili bir dolgu planı hazırlanmasını sağlayabileceği ifade edilmiştir.

### **2.3. Su Azaltıcı Katkı**

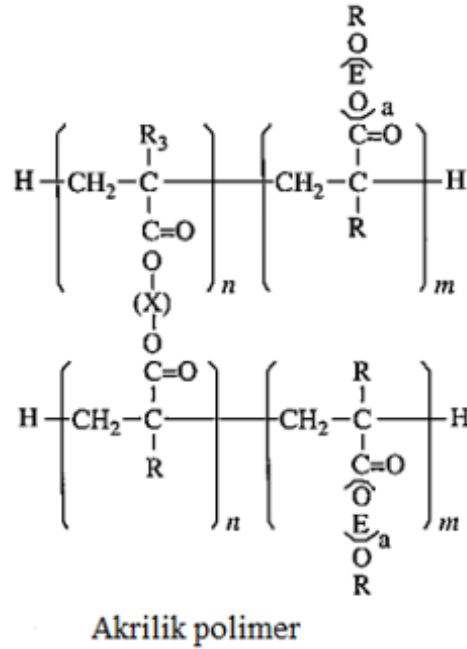
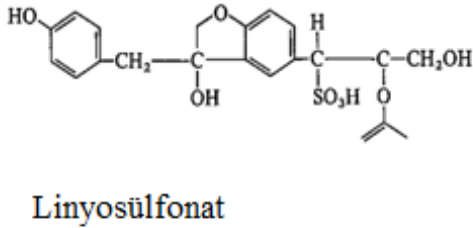
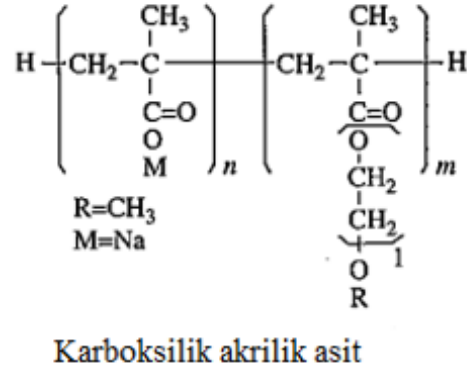
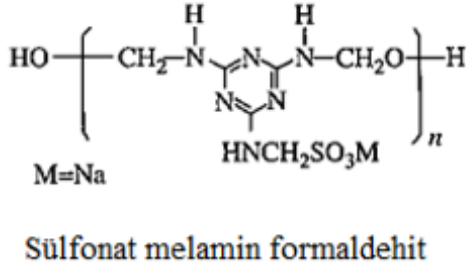
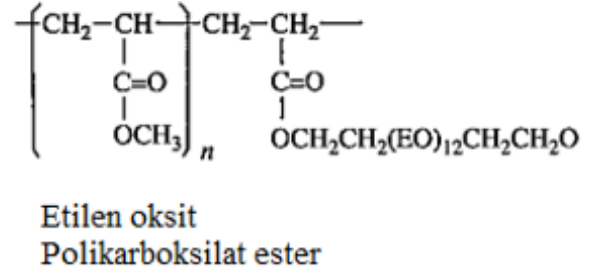
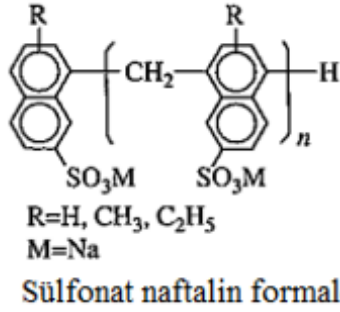
Su azaltıcı katkıları çimentolu sistemlerin işlenebilirliğini arttırmak amacıyla karışıma ilave edilmektedirler. Katkisız karışımlara kıyasla daha düşük su/çimento oranında daha yüksek akışkanlık sağlayabilmektedirler. Literatüre göre çimentolu sistemlerin akışkanlığını arttırmak amacıyla ilk kez 1932 yılında organik malzemeler kullanılmıştır (US Patent, 1932). 1960'lı yıllarda sülfonat naftalin formaldehit (British Patent, 1973) ve sülfonat melamin formaldehit (British Patent, 1969) sırasıyla Japonya ve Almanya'da çimentolu sistemlerde kullanılmıştır. 1980'li yılların başlarında ise polikarboksilat esaslı polimerler keşfedilmiş ve kullanımı giderek yaygınlaşmıştır (Bradley ve Howarth, 1986).

Bu bölümde çimentolu sistemlerin reolojik özelliklerini, dayanımını, dayanıklılık özelliklerini doğrudan ve dolaylı olarak etkileyen su azaltıcı katkıların türlerinden ve polikarboksilat esaslı katkıların kimyasal yapılarından bahsedilmiş, çimentolu sistemlerin özelliklerine olan etkileri açıklanmış ve konu ile ilgili yapılan çalışmalar derlenmiştir.

#### **2.3.1. Su azaltıcı katkıların türleri**

Su azaltıcı katkıları temel olarak linyosülfonat, sülfonat naftalin formaldehit, sülfonat melamin formaldehit ve polikarboksilat olmak üzere dört sınıfa ayrılmaktadır. Su azaltıcı katkı türlerinin kimyasal yapıları Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Odundan kağıt hamuru üretimi esnasında oluşan atık malzeme lignin ve selülozun ayrışma ürünleri, ligninin sülfonasyon ürünleri, çeşitli karbonhidratlar ve serbest kükürt içeren maddelerden oluşmaktadır. Nötralizasyon, çökeltme ve fermantasyon süreçleri ile birlikte linyosülfonatlar üretilmektedir. Ortalama molekül ağırlıkları 20000 ile 30000 g/mol

arasındadır. Ayrıca söz konusu katkıların %20 ile %30'a kadar su azaltma özelliğine sahip oldukları bilinmektedir (Aitcin ve Flatt, 2016; Rixom ve Mailvaganam, 1986).



Şekil 2.20. Su azaltıcı katkı türlerinin kimyasal yapısı (Rixom ve Mailvaganam, 1986)

Sülfonat naftalin formaldehitler ilk olarak 1970’li yıllarda üretilmiştir. Bu katkılar uygun koşullar altında oleum veya kükürt trioksit sülfonasyonu ile naftalinden üretilmekte ve devamında formaldehit sülfonik asit veya kireç ile nötralize edilmektedir. Çimentolu sistemlerde bu katkılar genellikle bağlayıcı ağırlığının %1 ile %3’ü kadar kullanılmaktadırlar. Ayrıca söz konusu katkıların %30’a kadar su azaltma özelliğine sahip oldukları bilinmektedir (Aitcin ve Flatt, 2016; Rixom ve Mailvaganam, 1986).

Sülfonat melamin formaldehitler ilk olarak çeşitli sektörlerde kullanılmak üzere 1950’lerde üretilmiştir. Ancak beton sektöründe kullanımı 10 yıl sonra gerçekleşmiştir. Normal reçineleştirme teknikleriyle üretilen bu katkıların ortalama molekül ağırlıkları 30000 g/mol’dür. Bu katkılar tek başına veya sülfonat naftalin formaldehit ile birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca söz konusu katkıların %20 ile %30’a kadar su azaltma özelliğine sahip oldukları bilinmektedir (Aitcin ve Flatt, 2016; Rixom ve Mailvaganam, 1986).

1980’li yıllarda üretimine başlanan ve günümüzde beton sektöründe kullanımı en yaygın olan polikarboksilat türevleri peroksit başlatıcılar kullanılarak serbest radikal polimerizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Polikarboksilatların %40’a kadar su azaltma özelliğine sahip oldukları bilinmektedir (Aitcin ve Flatt, 2016; Rixom ve Mailvaganam, 1986).

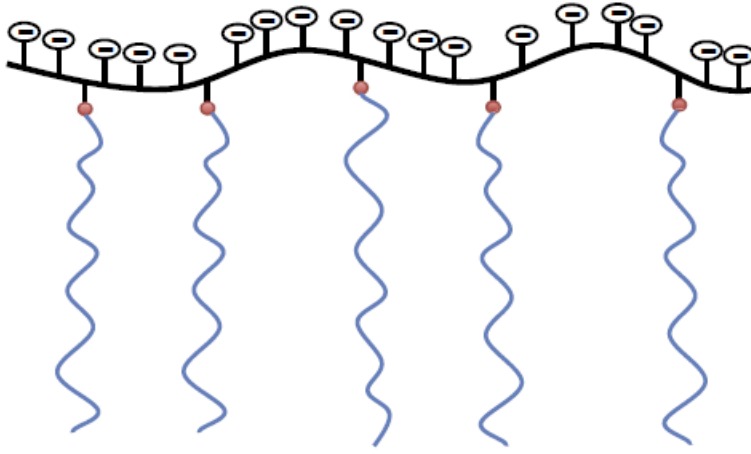
### **2.3.2. Su azaltıcı katkının kimyasal yapısı**

Polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkıların kimyasal yapısı Şekil 2.21’den anlaşıldığı üzere tarak şeklinde olup bu katkılar genellikle ana zincir ve ana zincire bağlı anyonik ve nanyonik yan zincirlerden oluşmaktadır. Anyonik yan zincirler genellikle karboksilik gruplardan ve nanyonik yan zincirler ise polietilen glikolden oluşmaktadır. Su azaltıcı katkı molekülleri çimentolu taneciklerinin yüzeyine sarılarak onları negatif yükle yüklemekte ve taneciklerin birbirlerini itmelerini sağlamaktadır. Böylece çimento taneciklerinin topaklaşması engellenmekte ve çözelti içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmaktadır (Aitcin ve Flatt, 2016).



### *Ana zincir*

Bir katkıının ana omurgasını oluşturan monomer türü, katkıının çimentolu sistemler üzerindeki performansını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, akrilik ve maleik esaslı katkıların ana zincirinin kimyası benzer olsa da söz konusu katkıları farklı adsorpsiyon davranışı gösterebilmektedir. Bu durum, maleik yapılarıdaki yakın karboksilik grupların adsorpsiyon performanslarının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Aİtcin ve Flatt, 2016).



**Şekil 2.21.** Polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkıının yapısının şematik çizimi (Aİtcin ve Flatt, 2016)

Metakrilik ve metalitik bazlı katkıları gibi, karbonil ile ilişkili olarak metil grupları, ana zincirin hareketliliğini azaltmakta ve böylece katkıının adsorpsiyon performansı değişebilmektedir. Akrilik esaslı polimerlerde ana zincir akrilik asitten oluşmakta ve ana zincir ile yan zincir birbirlerine ester veya amid bağı ile bağlanmaktadır. Akrilik esaslı ve maleik esaslı katkıların ester bağı, çimentolu sistemin alkali ortamında hidrolize uğrayabilmektedir. Yan zincirlerin ayrılması serbest halde bulunan karboksilik grupların miktarını arttırmaktadır. Böylece yük yoğunluğu artmakta ve dolayısıyla adsorpsiyon performansı yükselmektedir. Söz konusu adsorpsiyon performansındaki artış çimentolu sistemin akışkanlık kaybını telafi edebilmektedir. Aslında bu özellik çimentolu sistemlerin zamana bağlı performansını iyileştirmek amacıyla üretilen çapraz bağlı akrilik bazlı polimerler gibi katkıları için kullanılmaktadır. Metakrilik asitin akrilik asitin yerine

kullanılması ile yan zincirlerin hidrolize olma potansiyeli azaltılabilmektedir (Aİtcin ve Flatt, 2016).

### ***Yan zincir***

Genellikle polietilen glikolden oluşan su azaltıcı katkının yan zincirleri nanyonik diğeri bir deyişle yüksüzdür. Polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıların üretiminde kullanılmakta olan nanyonik monomerler molar kütleleri genellikle 750-5000 g/mol arasında değışen polietilen glikolden oluşmaktadır. Polietilen glikolden oluşan yan zincirler katkıya yüksek hidrofilik özellik kazandırmaktadır. Hidrofilik özelliğı azaltmak için polietilen glikol yerine polipropilen oksit yan zincirler kullanılmaktadır. Polipropilen oksitten oluşan yan zincirlere sahip katkılar çeşitli avantajlara sahip olabilmektedir. Örneğın, bu katkıların çimentolu sistemlere ilave edilmesi ile karışımların akışkanlığını ve işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemesinin yanı sıra karışıma daha az hava sürüklenmektedir (Aİtcin ve Flatt, 2016; Hirata, Kawakami, Nagare ve Yuasa, 2000).

Polietilen glikol ve polipropilen oksitlerin haricinde literatürde farklı yan zincir türleri de mevcuttur. Bu duruma örnek olarak etoksile edilmiş poliamidler verilebilir. Polietilen glikol ile birlikte etoksile edilmiş poliamidlerden oluşan yan zincire sahip katkıların çimentolu sistemlerde yüksek etki oluşturabileceğı ve su/çimento oranını 0,12'ye kadar düşürülmesini sağlayabileceğı Amaya ve diğeri (2003) tarafından yapılan çalışmada ifade edilmiştir. Polietilen glikoller, polietilen oksitlerin düşük moleköl ağırlığına sahip halleridir. Diğeri bir ifadeyle polietilen oksitler yüksek moleköl ağırlıklı ve iyonik olmayan polimerlerdir. Soğuk ve ılık suda tamamen çözünebilmektedirler. Bu tip polimerler hidrofilik ve doğrusal olmayan bağ yapısına sahiplerdir. Hidrofobik etilen grubu ve bir hidrojen bağ bölgesi olan hidrofilik oksijen içermektedirler. Hem sulu hem de organik çözücülerde çözünebilirlikleri oldukça yüksektir (Zhang, 2011).

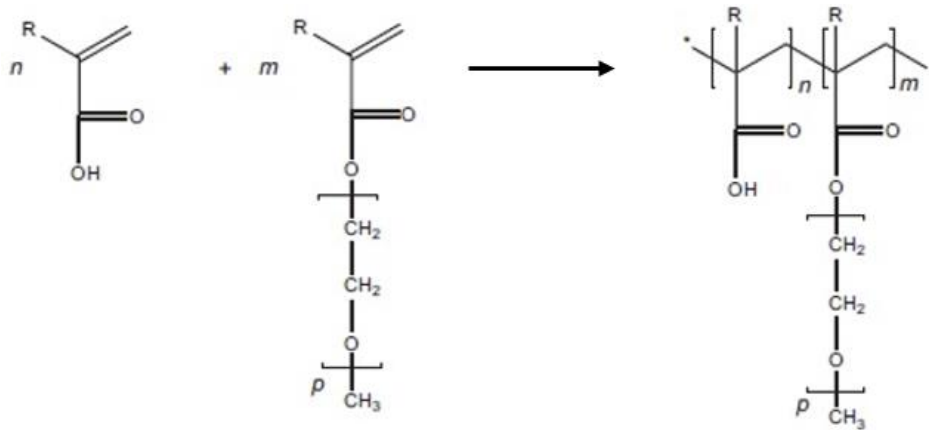
### ***Anyonik monomer***

Karboksilatlar, fosfatlar ve sülfonatlar su azaltıcı katkı üretiminde en yaygın kullanılan anyonik fonksiyonel gruplardır (Tadros, 2005). Söz konusu fonksiyonel grupların

hidrofilik kısmı negatif yük ile yüklüdür. Çimento taneciklerinin yüzeylerine adsorbe olmuş katkıların anyonik grupları, karışım içerisine sürüklenen hava kabarcıklarını hidrofobik etkileşimler yoluyla yakalayabilmekte ve sabitleyebilmektedir. Katkının hızlı bir şekilde adsorbe olması, karışımda bulunan aktif katkının azalmasına ve bir miktar havanın karışıma girmesine sebep olmaktadır. Genel olarak doğal kaynaklardan temin edilen anyonik fonksiyonel gruplar karışımdaki hava miktarının kontrol edilebilir bir şekilde ayarlanmasına olanak sağlayan etkili katkıların olmasına rağmen sentetik olanlara kıyasla benzer etkileri sağlamak için katkı dozajının yükseltilmesi gerekmektedir (Guo, Rong ve Ying, 2006; Rosen, 2004).

### 2.3.3. Su azaltıcı katkının sentez yöntemleri

Polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkıları iki farklı ana yöntem kullanılarak sentezlenebilmektedir. Bu yöntemlerde ilki FRP (serbest radikal eşpolimerizasyon), diğeri ise RAFT (tersinir ekleme - parçalanma zincir transferi) yöntemidir. FRP yöntemi Şekil 2.22’de gösterilmiş olup karboksilik fonksiyonel grup içeren ana zincir ile polietilen oksit yan zincir FRP yöntemi ile sentezlenmektedir.



Şekil 2.22. FRP yönteminin şematik gösterimi (Aİtcin ve Flatt, 2016)

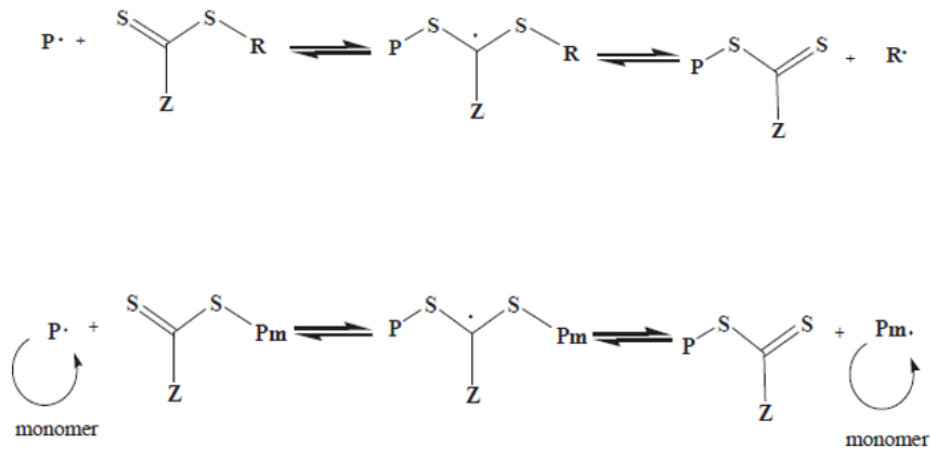
Bu yöntemle sentezlenen katkılarda yan zincirler, ana zincir boyunca düzgün bir dağılıma sahiptir. Bu yöntem ekonomik ve basit prosesi nedeniyle uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan FRP ile sentezlenen katkıların molekül ağırlıkları çok geniş bir aralığa sahip olmamakla birlikte söz konusu yöntemle sentezlenen katkıların PDI

(polidisperite indeksi) değerleri genellikle 2 ile 3 arasındadır (Özen, 2019; Gelardi ve diğerleri, 2016; Flatt ve Schober, 2012).

RAFT yöntemi Şekil 2.23’de gösterilmiş olup bu yöntem ile sentezlenen katkılar anyonik fonksiyonel gruplarının yüksek olmasından dolayı çimento taneciği yüzeyine daha güçlü adsorbe olmakta ve daha yüksek sülfat toleransı sergilemektedir. Bu yöntem katkıların sentezlenmesinde molekül ağırlığın kontrolü ve zincir dağılımı açısından önem arz etmektedir. Ayrıca bu yöntemde sentez koşulları FRP yöntemine kıyasla daha basittir (Javadi, Mehr ve Soucek, 2017; Yu ve diğerleri, 2016; Plank ve diğerleri, 2015).

### 2.3.4. Su azaltıcı katkının çalışma mekanizması

Çimentolu sistemlerde kayma gerilmesi, parçacıklar arasında meydana gelen çekim ve itme kuvvetleri ile kesme kuvvetleri arasındaki dengeye bağlıdır. Parçacıklar arasında oluşan çekim kuvvetleri ne kadar yüksek olursa parçacıkların kümelenme miktarı da o kadar artmakta ve sistemde kayma gerilmesi oluşmaktadır. İtme kuvvetlerinin baskın olduğu durumda sistemde dağılım daha kararlı haldedir. Su azaltıcı katkılar parçacıklar arası çekim kuvvetini azaltıcı, itme kuvvetini ise arttırıcı yönde etki etmektedir. Bu bağlamda, su azaltıcı katkı molekülleri elektrostatik ve sterik kuvvetler ile sistemin kayma gerilmesi ve viskozitesine etki etmektedir (Aİtcin ve Flatt, 2016).



### *Elektrostatik kuvvetler ve etkileri*

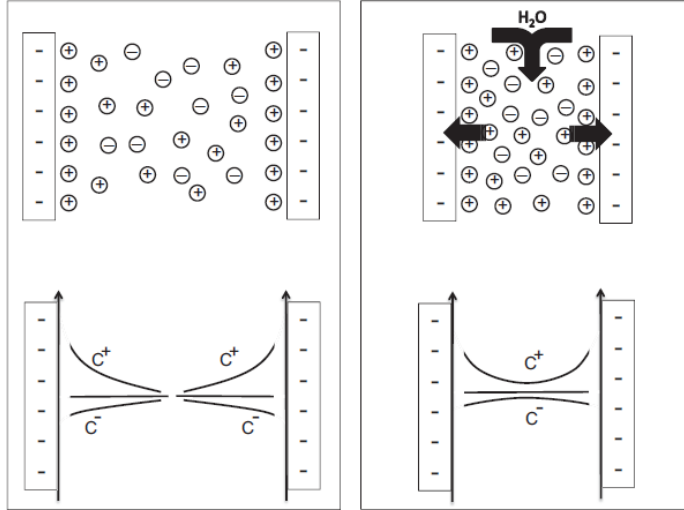
Çözeltili ortamlarda katı yüzeyler eksi veya artı yüklüdür. Bu durumun iyonlar için iyi bir çözücü olan sudan kaynaklandığı bilinmektedir. Yüzey yükü, iyonların veya iyonik polimerlerin adsorpsiyonundan ve/veya yüzey gruplarının ayrışmasından kaynaklanmaktadır. İyonların dağılımı Goüy-Chapman'ın çift tabakalı modeli ile tarif edilmiştir. Bu modelde yüklü ara yüzey Stern katmanı ve dağılma katmanı olarak ikiye ayrılmaktadır. Stern katmanı yani iç katman, parçacıkların yüzeyleri tarafından hareketsiz hale getirilmiş karşı iyonlardan oluşmaktadır. Dağılma katmanı yani dış katman ise yüzey ile aynı yüke sahip hareketli iyonlardan oluşmaktadır. Zıt yüklü iyonların konsantrasyonu yüzeye yakın kısımlarda çözelti içerisindeki kıyasla daha fazladır (Özen, 2019; Aİtcin ve Flatt, 2016).

Debye uzunluğu olarak ifade edilen dağılma tabakasının kalınlığı itme kuvvetinin önemli olduğu yüzeyler arasındaki mesafeyi göstermektedir. Yüklü yüzeyler birbirine yaklaştığı zaman elektriksel katmanlar üst üste binmekte ve iki yüzey arasında Şekil 2.24'te gösterildiği üzere orta kısımlarda çok yüksek iyon konsantrasyonları meydana gelmektedir. Ardından su, yüzeyler arasından geçerek iyonların seyreltilmesi için osmotik basınç oluşturmaktadır. Söz konusu bu osmotik basınç ile yüzeyler birbirinden uzaklaşmaktadır. Böylece, elektrostatik etki oluşmakta ve nesnelere arasındaki fiziksel temas ortadan kalkmaktadır (Aİtcin ve Flatt, 2016).

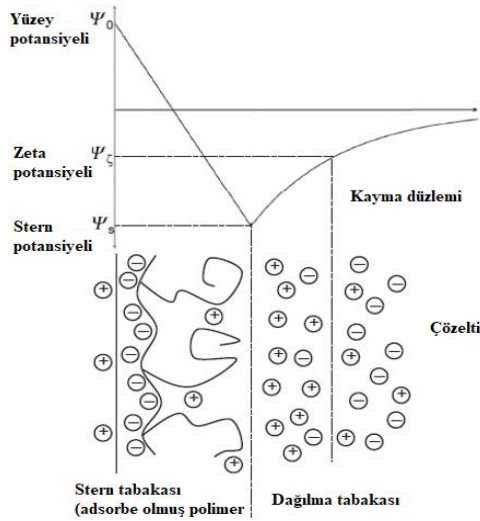
Yüksek iyonik kuvvetlere sahip çimentolu sistemlerde, debye uzunluğu artan iyon konsantrasyonu ile azalmaktadır. Bu durumdan dolayı çimentolu sistemlerde, elektrostatik etki çok kısa bir mesafede hissedilmekte ve elektrostatik kuvvetin büyüklüğünün değerlendirilmesi, bu tür sistemlerin ideal bir sistem gibi davranmaması nedeniyle karmaşıktır. (Yang, Neubauer ve Jennings, 1997).

Çimentolu sistemlerden yüzey ve Stern potansiyelleri doğrudan ölçülemezken zeta potansiyeli deneysel olarak ölçülebilmektedir. Şekil 2.25'de görüldüğü üzere, zeta potansiyeli dağılma tabakası içerisindeki Stern düzleminde bir miktar uzakta bulunan kayma düzlemindeki potansiyeldir. Bundan dolayı elektrostatik kuvvetin belirlenmesi

için zeta potansiyelinin kullanılması muhtemelen yüzde yüz doğru sonucu vermeyecektir (Uchikawa, Hanehara ve Sawaki, 1997).



**Şekil 2.24.** Elektrostatik itme prensibinin şematik gösterimi (Aİtcin ve Flatt, 2016)



**Şekil 2.25.** Adsorbe olmuş kimyasal katkının olması durumunda yüklü yüzeylerdeki potansiyellerin şematik gösterimi (Uchikawa ve diğerleri, 1997)

Zeta potansiyelini ölçmek amacıyla kullanılan en yaygın metotlardan birisi mikroelektroforez yöntemidir. Bu yöntem çimento hamurunun aksine çok seyreltilmiş süspansiyonlar için uygundur. Çapı birkaç mikrometreden daha büyük olan tanecikler çökme eğilimi göstermektedir ve bu yöntemle sadece ince tanecikler ölçülebilmektedir.

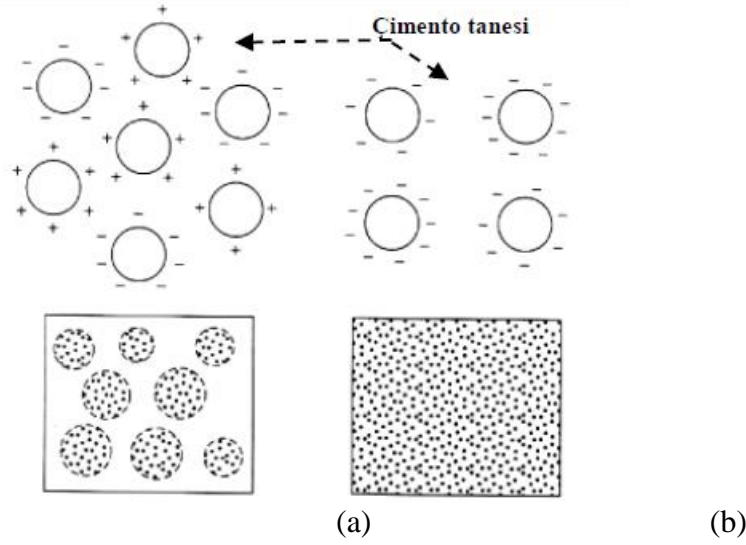
Bir diğerk yöntem olan Acoustophoresis tekniği ile konsantre süspansiyonların zeta potansiyelleri ölçülebilmekte ancak bu tekniğin bazı sınırlamalar gösterdiği Flatt ve Ferraris (2002) tarafından ifade edilmiştir.

Multimineral bir toz olan çimentoda etkileşimli yüzeyler farklı potansiyeller oluşturabilmekte ve bu da ek çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu çekme kuvveti pozitif ve negatif yüzeyler arasında olabileceği gibi, aynı yüklü farklı potansiyellere sahip yüzeyler arasında da olabilmektedir. Oluşacak bu ilave elektrostatik çekme kuvveti, yüzey yükünün homojen olması sebebiyle tüm tanecikler arasındaki çekme kuvvetini ve dolayısıyla kayma gerilmesini azaltmaktadır (Russel, Saville ve Schowalter, 1992).

Su azaltıcı katkıları, oluşturduğu elektrostatik etki ile Şekil 2.26'dan da görüldüğu üzere, çimento taneciklerinin topaklaşmasını engellemekte ve çimentolu sistemin akışkanlığını arttırmaktadır. Çimento partiküllerinin topaklaşmasına sebep olan çekim kuvvetleri, negatif yüklü katkı moleküllerinin çimento taneciği üzerine yapışması sonucu nötr veya negatif yüklü hale gelmekte ve dağıtma etkisi oluşmaktadır. Böylece, çözeltide askı halde bulunan çimento tanecikleri aynı yük taşımakta ve bu tanecikler arasında itme kuvveti oluşmaktadır. Söz konusu elektriksel yüklerin fazla olması sonucuyla çimento tanecikleri birbirinden ayrılmakta ve topaklaşma oluşmamaktadır (Mardani-Aghabaglou, 2016; Collepardi, 2005; Mindess, Young ve Darwin, 2003).

### ***Sterik kuvvetler ve etkileri***

Çimento tanecikleri üzerine adsorbe olan katkı molekülleri itme eğilimli sterik kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Katkı molekülünün adsorbe olduğu bir çimento taneciği diğerk taneciğe yaklaşmakta ve çözelti içerisinde çimento tanecikleri arasındaki katkı moleküllerinin konsantrasyonu artmaktadır. Bu durum, birbirine yaklaşan partiküllere karşı direnç gösteren osmotik bir basınca sebep olmaktadır. Böylece, polimer tabakaları üst üste binmeye başladığı anda sterik kuvvet oluşmaktadır. Bu kuvvet sıkışan polimer tabakaları arttıkça daha da artmaktadır. Maksimum sıkışma olduğu anda elde edilen sterik kuvvette maksimum düzeyde olmaktadır (Aİtcin ve Flatt, 2016).



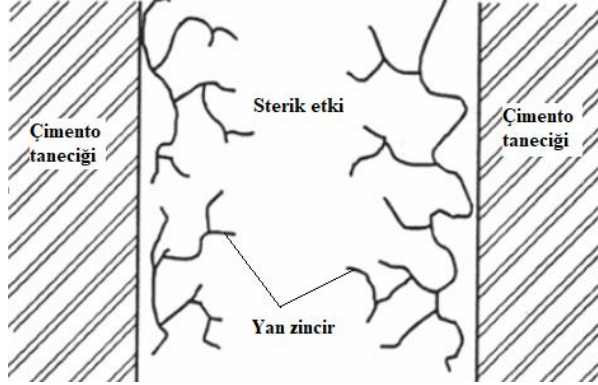
**Şekil 2.26.** Su azaltıcı katkıların çimento taneleri elektrostatik etki sayesinde dağıtması  
a) topaklaşmış çimento hamuru karışımı; b) su azaltıcı katkı ilaveli çimento hamuru karışımı (Mindess ve diğerleri, 2003)

Katkıların dağılma performansındaki sterik itme kuvvetinin önemi, tarak şeklindeki polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkıların keşfedilmesi ile artmıştır. Aslında bu katkıların diğer katkılara kıyasla daha düşük zeta potansiyellerinin olmasına rağmen dağılma performanslarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çimentolu sistemlerde söz konusu katkılar kullanıldığı zaman zeta potansiyel ölçümlerini tek taraflı yorumlamak doğru değildir. Katkılarda molekül başına düşen yüklü grupların oranlarının düşük olması sebebiyle çimento taneciklerinde çok daha düşük zeta potansiyelleri elde edilmektedir (Flatt ve Houst, 2001; Lewis ve diğerleri, 2000; Uchikawa ve diğerleri, 1997; Yoshioka, Sakai, Daimon ve Kitahara, 1997).

Polikarboksilat eter esaslı katkıların çimentolu sistemlerdeki dağılma etkisi, elektrostatik etkiden çok sterik (fiziksel) etki ile meydana gelmektedir. Şekil 2.27’de görüldüğü üzere çimento taneciği yüzeyine adsorbe olan katkıda yer alan nanyonik uzun yan zincirler çimento tanecikleri arasında sterik etki sayesinde fiziksel bir itme mekanizması meydana getirmekte ve karışımda topaklaşmayı engellemektedir. Elektrostatik etkiye kıyasla sterik etkinin en önemli avantajı, çimentolu sistemlerden kaynaklı çözeltide yer alan iyonların tipi ve yoğunluğundan çok daha az etkilenmesidir. Katkının ana ve yan



zincir uzunluğu, sayısı ve zincirler arası mesafe sterik etkinin performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Mardani-Aghabaglou, 2016, Houst ve diğerleri, 1999).



**Şekil 2.27.** Parçacıkların sterik itme kuvveti nedeniyle ittirilmesi (Ramachandran, Malhotra, Jolicoeur ve Spiratos, 1998)

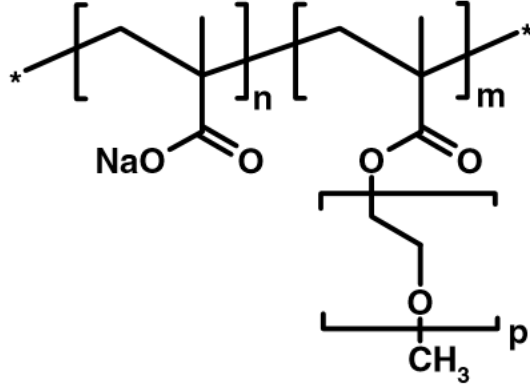
### 2.3.5. Su azaltıcı katkı ile ilgili yapılan çalışmalar

Yamada ve diğerleri (2000) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kimyasal yapısının çimento hamurunun akışkanlığı, viskozitesi, eşik kayma gerilmesi ve priz süresi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında polioksietilen yan zincir uzunluğu, ana zincir polimerizasyon derecesi ve fonksiyonel grup içeriği (karboksilik ve sülfonik olmak üzere) birbirinden farklı olan su azaltıcı katkıları sentezlenmiştir. Sentezlenen katkıları ile 0,23-0,40 arasında değişen su/çimento oranına sahip hamur karışımları üretilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 2.9'da özetle verilmiştir. Çizelge 2.9'dan da anlaşıldığı gibi, aynı dozajda kullanıldığında uzun polioksietilen yan zincire sahip katkı, daha yüksek akışkanlığa, daha düşük plastik viskoziteye, daha düşük eşik kayma gerilmesine, daha fazla akışkanlık kaybına ve daha erken prize sebep olmaktadır. Kısa ana zincir uzunluğuna sahip katkı ise yüksek akışkanlığa sebep olurken priz süresinin uzamasına neden olmuştur. Ayrıca kısa ana zincir uzunluğunun zamanla akışkanlık kaybı üzerinde önemli bir ölçüde değişiklik oluşturmadığı tespit edilmiştir. Buna ilaveten, yüksek sülfonik fonksiyonel grup içeriğinin polimerlere yüksek akışkanlık kazandırdığı tespit edilmiştir.

**Çizelge 2.9.** Su azaltıcı katkı kimyasal yapısının akışkanlık ve priz üzerindeki etkisi (Yamada ve diğerleri, 2000)

	<b>Yüksek akışkanlık</b>	<b>Düşük akışkanlık kaybı</b>	<b>Erken priz</b>
Polioksietilen yan zincir	Uzun	Kısa	Uzun
Ana zincir polimerizasyon derecesi	Düşük	-	Yüksek
Sülfonik fonksiyonel grup içeriği	Yüksek	-	-

Winnefeld, Becker, Pakusch ve Götz (2007) tarafından yapılan çalışmada, su azaltıcı katkının molekül yapısının çimentolu sistemlerin akışı, reolojisi, adsorpsiyon performansı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, farklı molekül ağırlığı, yan zincir uzunluğu ve yoğunluğunda 12 adet polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Su azaltıcı katkının kimyasal yapısı Şekil 2.28’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.28.** Su azaltıcı katkının kimyasal yapısı (Winnefeld ve diğerleri, 2007)

Deney sonuçlarına göre, kısa yan zincire sahip katkının akış performansının ve reolojik özelliklerinin uzun yan zincire kıyasla daha iyi olduğu, katkı molekül ağırlığı değişiminin ise bu durumu çok fazla etkilemediği belirlenmiştir. Adsorpsiyon miktarının kısa yan zincire ve düşük yan zincir yoğunluğuna sahip olan katkıda daha fazla olmasının bu sonucu desteklediği ifade edilmiştir. Ayrıca katkının kimyasal yapısının değişiminin harc

karışımlarının basınç ve eğilme dayanımlarında kayda değer bir değişim oluşturmadığı tespit edilmiştir.

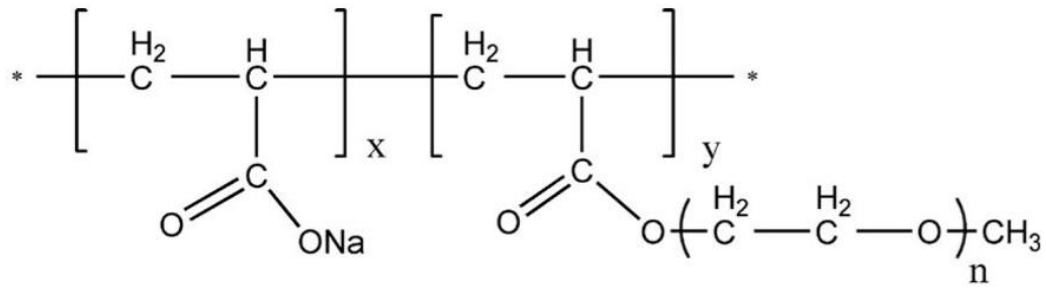
Felekoğlu ve Sarıkahya, (2008) tarafından yapılan çalışmada, üç farklı polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı sentezlenerek, bu katkıların çimento hamurunun priz süresi ve kendiliğinden yerleşebilen betonun zamana bağlı işlenebilirliği ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında sentezlenen katkıların bazı özellikleri Çizelge 2.10'da verilmiştir. Yüksek oranda su azaltmak ve erken yaş dayanımını iyileştirmek amacı ile sentezlenen P1 katkısı, polioksietilen yan zincirlerin graft edildiği akrilik ana zincirden oluşmaktadır. Bu katkıda yan zincirler ana zincire ester bağı ile bağlanmıştır. Yüksek oranda su azaltmak ve işlenebilirliği korumak amacı ile sentezlenen P2 katkısı, hidrolizlenmiş ve hidrolizlenmemiş yan zincirler içermektedir. Uzun süreli işlenebilirlik sağlamak amacı ile sentezlenen P3 katkısı ise ana zincire direk bağlanan polioksietilen yan zincirleri içermektedir.

**Çizelge 2.10.** Su azaltıcı katkıların fiziksel özellikleri ve kimyasal yapısı (Felekoğlu ve Sarıkahya, 2008)

<b>Katkı</b>	<b>Özgül ağırlık</b>	<b>pH</b>	<b>Katı madde içeriği (%)</b>	<b>Kimyasal yapı</b>
P1	1,09	6.2	39,5	Akrilik kopolimer
P2	1,08	5.7	38,9	Karboksilat terpolimer
P3	1,09	5.3	34,2	Polioksietilen kopolimer

Elde edilen deney sonuçları neticesinde, P1 katkısının, priz geciktirici etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu, uzun süreli işlenebilirliği sağlamak için ise uygun olmadığı belirtilmiştir. Bunun sebebinin, ester bağının alkali ortamda stabilitesini kolay kaybetmesi olduğu ifade edilmiştir. P2 ve P3 katkılarının priz geciktirici etkilerinin daha yüksek olduğu, işlenebilirliği en uzun süreli koruyan katkının ise P3 katkısı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca erken dayanım açısından en iyi performansı gösteren katkının P1 olduğu tespit edilmiştir.

Ran ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada, su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğu değişiminin katkının adsorpsiyon ve dağılma özelliğine etkisi ile çimento hamurunun reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında sentezlenen katkıların kimyasal yapısı Şekil 2.29’da gösterilmiştir. Sentezlenen katkıların yan zincir uzunlukları (n sayısı ile doğru orantılı) 8 ile 48 arasında değişmektedir. Katkıların molekül ağırlıkları ise yan zincir uzunlukları ile doğru orantılı olarak 370 ile 2140 g/mol arasındadır. Deney sonuçlarına göre, katkı yan zincir uzunluğunun adsorpsiyon üzerinde çok önemli bir etki oluşturmadığı ancak kısa yan zincire sahip katkıların adsorpsiyon açısından biraz daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Uzun yan zincire sahip katkıların, kısa yan zincire sahip katkılardan yüksek sterik etkilerinden dolayı daha yüksek dağılma performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca kısa yan zincire sahip katkılı karışımların viskozitelerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.

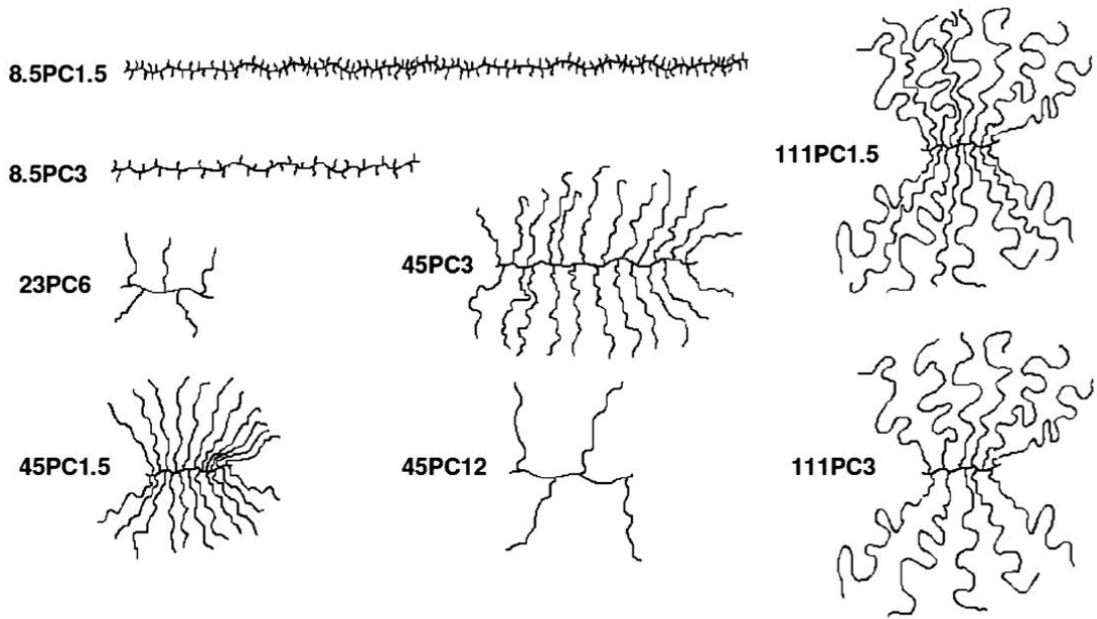


**Şekil 2.29.** Su azaltıcı katkının kimyasal yapısı (Ran ve diğerleri, 2009)

Zingg ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada, farklı polioksietilen yan zincir uzunluğu ve yan zincir yoğunluğuna sahip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı ile %1, 8 ve 10 oranlarında C<sub>3</sub>A içeriğine sahip farklı çimento tipleri arasındaki uyum incelenmiştir. Ayrıca, C<sub>3</sub>A içeriğinin ve su azaltıcı katkı kimyasal yapısının karışımların işlenebilirlik özellikleri ve priz süresi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak, çimentonun C<sub>3</sub>A içeriğinin artışıyla birlikte karışımın doygunluğa ulaşması için gerekli katkı miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, C<sub>3</sub>A miktarının artışı ile karışımın eşik kayma gerilmesinin arttığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, yan zincir yoğunluğu yüksek olan katkının çimento taneciklerine daha iyi adsorbe olduğu ve buna bağlı olarak karışımın eşik kayma gerilmesini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kısa yan zincirlere sahip katkının uzun yan zincire sahip katkıya oranla karışımların priz süresini daha fazla

uzattığı belirlenmiştir. Buna ilaveten uzun yan zincirlere sahip katkı moleküllerinde yüksek oranda yük bulunması durumunda karışımların işlenebilirlik özelliğinin daha iyi olacağı ifade edilmiştir.

Ferrari, Kaufmann, Winnefeld ve Plank (2011) tarafından yapılan çalışmada, su azaltıcı katkı karboksilik grubu anyonik monomer yoğunluğunun, yan zincir uzunluğu ve yoğunluğunun farklı çimento ve toz malzeme kullanılarak hazırlanan karışımların reolojik özellikleri, adsorpsiyon ve zeta potansiyeli üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, bağlayıcı olarak farklı C<sub>3</sub>A içeriğine sahip iki tip çimento, toz malzeme olarak ise magnezyum oksit ve kalsit kullanılmıştır. Çalışma kapsamında farklı kimyasal yapıya sahip sekiz tip su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Sentezlenen katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi Şekil 2.30'da gösterilmiştir. Şekildeki kodlamalarda yer alan 8, 5, 23, 45 ve 111 yan zincir uzunluğunu ve 1, 5, 3, 6 ve 12 ise karboksilik grubu anyonik monomer yoğunluğunu ifade etmektedir.



**Şekil 2.30.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Ferrari ve diğerleri, 2011)

Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlara göre, tüm çimento ve toz malzeme tipinden bağımsız olarak, su azaltıcı katkı sülfonik grubu anyonik monomer yoğunluğu fazla olan katkıların daha güçlü adsorpsiyon ve dağılma performansı gösterdiği

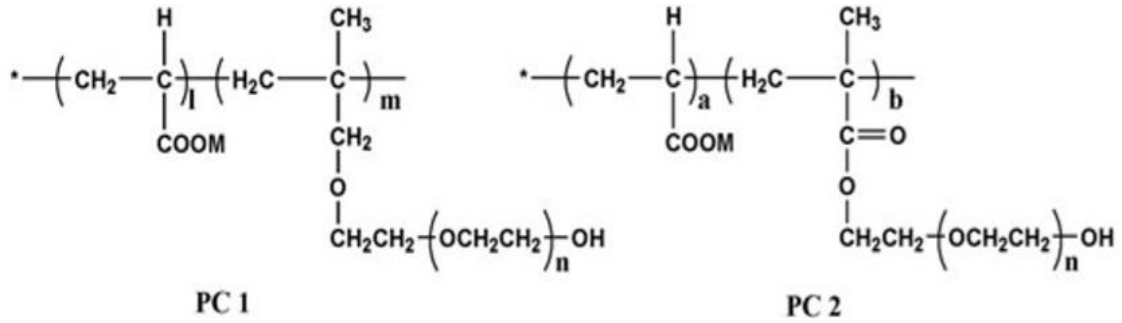
belirlenmiştir. Katkının adsorpsiyon yeteneği açısından, anyonik monomer yoğunluğunun, yan zincir uzunluğu ve yoğunluğuna kıyasla çok daha etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca su azaltıcı katkı anyonik monomer yoğunluğu artışının karışımların reolojik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Su azaltıcı katkı kullanımından bağımsız, çimento tipine bağlı olarak hidrasyon sırasında oluşan etrenjit miktarı ve çimento inceliğinin su azaltıcı katkının adsorpsiyon performansını ve dolayısıyla karışımların işlenebilirliğini etkilediği belirtilmiştir. Buna ilaveten kullanılan toz malzeme tipine göre çözeltide yer alan iyon çeşitliliğinin, su azaltıcı katkının adsorpsiyonun gecikmesine sebep olduğu ve buna bağlı olarak karışımların reolojik özelliklerinin etkilendiği ifade edilmiştir.

Qiu, Peng ve Deng (2011) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğu ve sülfonik grup içeriğinin çimentolu sistemlerin akışkanlığı, reolojik özellikleri, zeta potansiyeli ve priz süresine olan etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda kısa, uzun ve hem kısa hem uzun yan zincirlere ve farklı sülfonik grup içeriğine sahip su azaltıcı katkılar sentezlenmiştir. Kısa yan zincire sahip katkı PC1, hem kısa hem uzun yan zincire sahip katkı PC2 ve uzun yan zincire sahip katkı PC3 olarak gösterilmiştir. Zeta potansiyeli, taneler arasındaki itme ve çekme değerlerinin ölçümüne dayanmakta ve çimento taneciklerinin karışım içerisindeki dağılma mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir. Diğer bir değişle zeta potansiyeli değerine göre katkının dağılma performansı hakkında yorum yapılabilmektedir. Zeta potansiyeli deneyi sonuçlarına göre dağılma performansı açısından en iyi katkının PC2 katkısı olduğu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak PC2 katkısını içeren karışımın viskozite değerinin PC1 ve PC3 katkılarını içeren karışımlara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Buna ilaveten, kısa yan zincire sahip katkının priz geciktirme etkisinin en yüksek, uzun yan zincire sahip katkının ise en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, katkılarda sülfonik grup içeriğinin artmasıyla çimentolu sistemlerin akışkanlığının az da olsa arttığı, ancak priz süresinde önemli bir değişimin meydana gelmediği ifade edilmiştir.

Ding ve diğerleri, (2012) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunluğunun  $C_3S$ 'in hidrasyon ısı ve hidrasyon ürünlerinin polimerizasyon derecesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına

göre, ana zincir uzunluğu azaldıkça veya yan zincir uzunluğu arttıkça C<sub>3</sub>S kaynaklı erken hidrasyonun geciktiği tespit edilmiştir. Ayrıca, ana zincir uzunluğu artmasıyla veya yan zincir uzunluğu azalmasıyla hidrasyon derecesinin arttığı belirlenmiştir.

Lv ve diğerleri (2012) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkının moleküller arası bağ yapısının çimentolu sistemlerin kıvam kaybı, akışkanlığı, adsorpsiyonu ve priz süresi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda, polietilen glikol yan zincir ve ana zincir arasında eter ve ester olmak üzere iki farklı bağ yapısına sahip katkı sentezlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan katkıların kimyasal yapıları Şekil 2.31’de gösterilmiştir.

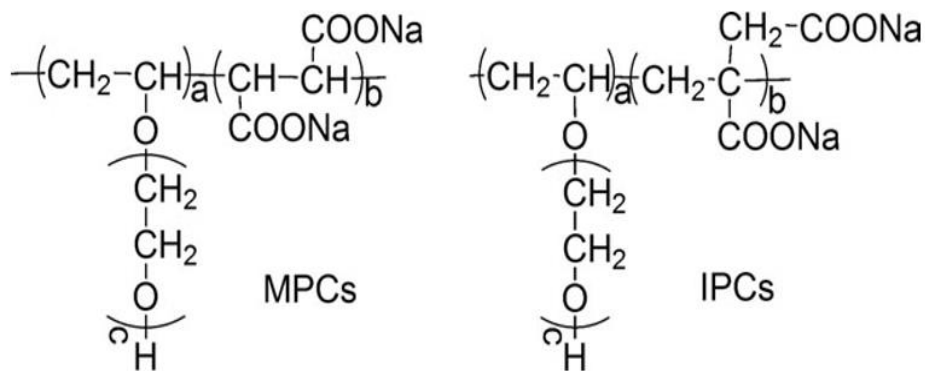


**Şekil 2.31.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (PC1-eter, PC2-ester) (Lv ve diğerleri, 2012)

Sonuçta, ana zincir ve yan zincir arasındaki bağ yapısının çimentolu sistemlerin performansı üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı belirlenmiştir. Ester bağlı katkının, eter bağlı katkıya oranla çimento hamurunda daha yüksek akışkanlığa ve daha yüksek su azaltma oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun ester bağlı katkının adsorpsiyon miktarının daha fazla olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ancak, alkali ortamda, ester bağların eter bağlardan daha savunmasız olmasından dolayı ester bağlı katkılı karışımın daha hızlı çökme kaybına uğradığı ve priz süresinde azalmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca alkali ortamda eter bağlı katkının ester bağlı katkıya kıyasla karışımlarda akışkanlık ve kıvam kaybı bakımından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Janowska-Renkas (2013) tarafından yapılan çalışmada, su azaltıcı katkı kimyasal yapısının çimento hamurunun reolojik özelliklerine ve hidrasyon ısısına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, akrilik asit ve maleik asitten türetilen yeni nesil su azaltıcı katkıları sentezlenmiştir. Sentezlenen katkıların kimyasal yapıları GPC ve FTIR analizleri ile belirlenmiştir. GPC analizi ile polimerlerin molekül ağırlık dağılımı, ortalama molekül ağırlığı, reaksiyona girmeyen polimer miktarı gibi katkının kimyasal yapısı hakkında birçok bilgi edinilebilmektedir. FTIR analizi ile ise polimerlerin yapılarındaki fonksiyonel gruplar, moleküller arası bağların durumu ve bağlanma yerleri gibi bilgiler belirlenebilmektedir. Bu analizler doğrultusunda, çalışma kapsamında sentezlenen katkılardan uzun ana zincire, uzun yan zincire ve karboksilik gruba sahip olan maleik esaslı su azaltıcı katkının daha yüksek molekül ağırlığına ve hidrofilité özelliğine sahip olduğundan kısa ana zincire, kısa yan zincire sahip ve karboksilik grup içermeyen akrilik esaslı su azaltıcı katkıya kıyasla daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu katkı, karışımların reolojik özellikleri açısından diğer katkılara kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Buna ilaveten, maleik esaslı su azaltıcı katkının karışımın hidrasyon sürecini, akrilik esaslı katkıya göre büyük oranda yavaşlattığı gözlemlenmiştir.

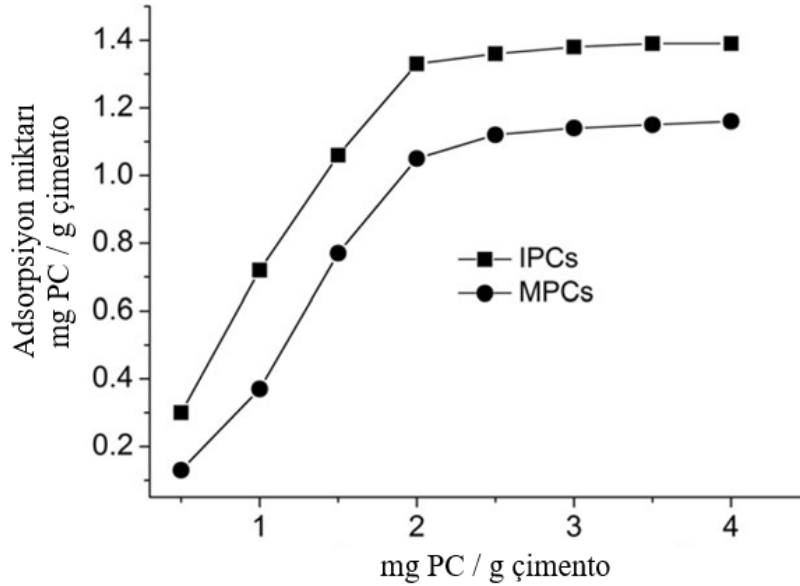
Lv ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada, kimyasal yapıları şematik olarak Şekil 2.32’de verilen itonik asit (IPCs) ve maleik anhidrit (MPCs) esaslı su azaltıcı katkıların çimentolu sistemlerin basınç dayanımı, zeta potansiyeli, akışkanlığı ve adsorpsiyon miktarı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



Şekil 2.32. Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Lv ve diğerleri, 2013)



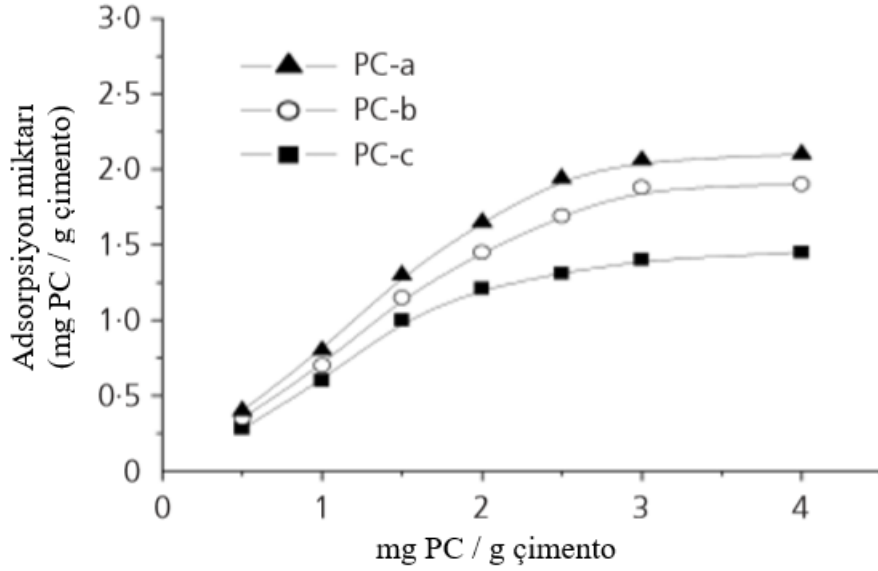
IPCs ve MPCs katkı dozajları ile çimento yüzeyine adsorpsiyon miktarları arasındaki ilişki Şekil 2.33’de gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere adsorpsiyon miktarı katkı dozajı artışı ile birlikte artmıştır. Katkı dozajı belirli bir değeri ( $>2$  mg PC/g çimento) aştığında adsorpsiyon miktarı sabitlenmiştir. Bu durum, çimento hamuru karışımlarının 2 mg PC/g çimento oranında doygunluk noktasına ulaştığını göstermektedir. Bu oran ayrıca akışkanlık açısından da doygunluk noktasını ifade etmektedir. IPCs katkısının çimento tane yüzeylerine daha kolay ve fazla miktarda adsorbe olduğu ve dolayısıyla karışımın daha akışkan olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında kullanılan su azaltıcı katkıların karışımların erken ve ileri yaş basınç dayanımları üzerinde kayda değer bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir.



**Şekil 2.33.** Adsorpsiyon deney sonuçları (Lv ve diğerleri, 2013)

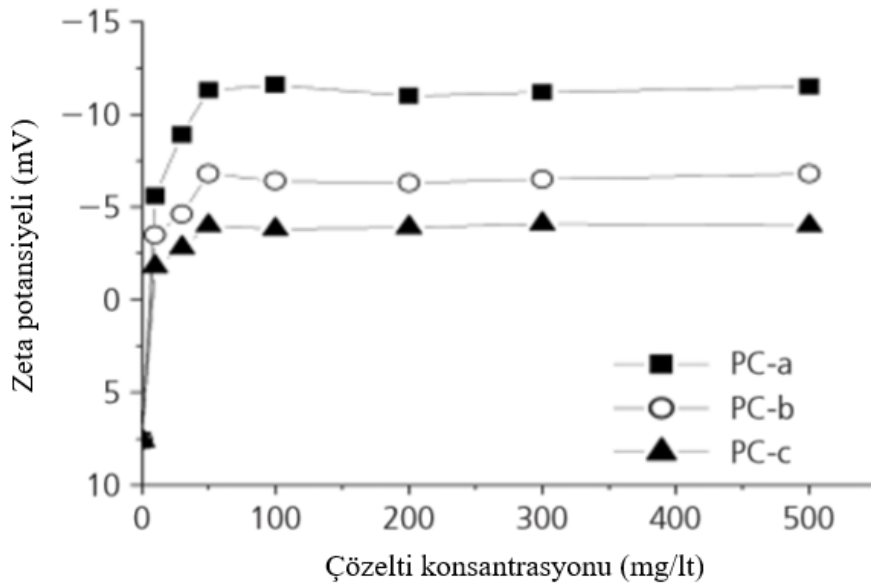
Peng, Li, Chen ve Ma (2013) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğunun adsorpsiyon, dağılma, zeta potansiyeli ve akışkanlık üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda, yan zincir uzunlukları birbirinden farklı üç adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Sentezlenen katkılardan sadece kısa yan zincire sahip olan katkı PC-a olarak, hem kısa hem uzun yan zincire sahip katkı PC-b olarak, sadece uzun yan zincire sahip katkı ise PC-c olarak isimlendirilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan çimentolu karışımlarda çimento dozajı 300 g, su/çimento oranı ise 0,23 olacak şekilde sabit tutulmuştur. TOC analizi ile katkının çimento tanecikleri

üzerindeki adsorpsiyon miktarları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.34'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre, adsorpsiyon açısından en iyi performansı kısa yan zincire sahip katkının gösterdiği tespit edilmiştir.



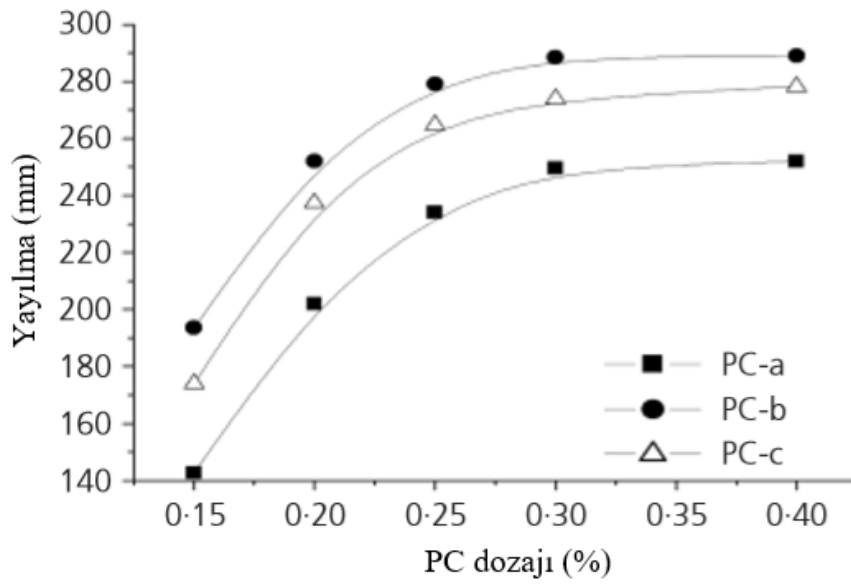
Şekil 2.34. TOC analizi sonuçları (Peng ve diğerleri, 2013)

Katkıların çimentolu karışımlardaki dağılıma performansını incelemek amacıyla zeta potansiyeli deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.35'de verilmiştir.



Şekil 2.35. Zeta potansiyeli deney sonuçları (Peng ve diğerleri, 2013)

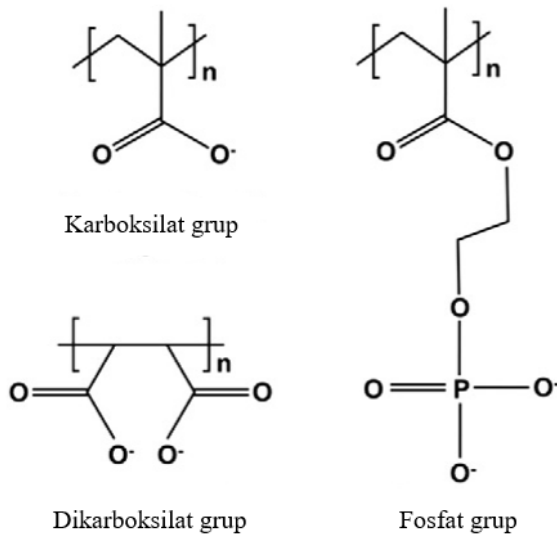
Sonuçlara göre, en düşük dağılma performansını yetersiz sterik etkisinden dolayı kısa yan zincire sahip katkının gösterdiği belirlenmiştir. En iyi dağılma performansını ise hem kısa hem de uzun yan zincire sahip katkının gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun sebebinin PC-b katkısının adsorpsiyon miktarının diğerlerine oranla daha yüksek olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Öte yandan katkıların akışkanlığa olan etkisini belirlemek amacı ile yayılma testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 2.36’da gösterilmiştir. Sonuç olarak, akışkanlık açısından en iyi performansı, en iyi dağılma performansına sahip olan PC-b katkısının gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.36. Yayılma deneyi sonuçları (Peng ve diğerleri, 2013)

Ushiro, Atarashi, Kawakami ve Sakai (2013) tarafından yapılan çalışmada, su azaltıcı katkı molekül ağırlığının çimentolu sistemlerin reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, molekül ağırlıkları 10000, 18900 ve 29500 g/mol olan 3 tip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Sonuç olarak, reolojik açıdan en iyi performansı molekül ağırlığı en küçük olan katkının gösterdiği, en kötü performansı ise molekül ağırlığı en yüksek olan katkının gösterdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, yazarlar tarafından su azaltıcı katkı molekül ağırlığının artışıyla karışımların reolojik özelliklerinin olumsuz etkilendiği ifade edilmiştir.

Dalas ve diğeri (2015a) tarafından yapılan çalışmada, su azaltıcı katkı kimyasal yapısının çimentolu sistemlerin akışkanlık özelliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda, farklı yan zincir uzunlukları ve anyonik monomer grupları farklı su azaltıcı katkıları sentezlenmiştir. Katkı yan zincir uzunlukları 1100 g/mol, 2000 g/mol ve 5000 g/mol olarak, anyonik monomer grupları ise karboksilat, dikarboksilat ve fosfat olarak belirlenmişlerdir. Su azaltıcı katkıların anyonik monomer grup içerikleri Şekil 2.37’de şematik olarak gösterilmiştir. Sonuç olarak, kısa yan zincirlerin adsorpsiyonu arttırdığı ancak çalışma kapsamında tercih edilen anyonik monomer gruplarının adsorpsiyon ve akışkanlık üzerinde kayda değer bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir.



**Şekil 2.37.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Dalas ve diğeri, 2015a)

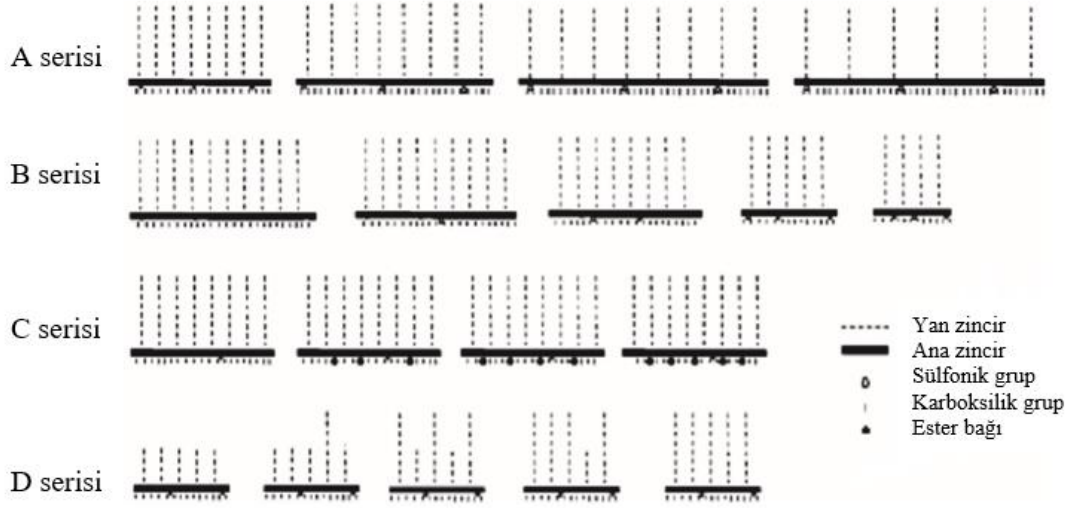
Ming ve diğeri (2015) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıların yan zincir uzunluğu ve yoğunluğunun zeta potansiyeli ve çimento hamurunun reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan çimento hamuru karışımlarının su/çimento oranı 0,29 olarak sabit tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları doğrultusunda, su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğu ve yoğunluğundan bağımsız olarak, katkı dozajı arttıkça çimento taneciklerin zeta potansiyelleri aniden artmakta ve belirli bir değerden sonra sabit kalmakta, karışımların eşik kayma gerilmeleri ve viskoziteleri hızlı bir şekilde düşmekte ve belirli bir değerden sonra sabit kalmaktadır. Uzun yan zincirler yüksek sterik etkilerinden dolayı çimento parçacıklarının dağılma performanslarını

iyileştirerek hamur karışımlarının eşik kayma gerilmeleri ve viskozitelerinin azalmasına neden oldukları tespit etmişlerdir. Kısa yan zincir uzunluğu ve düşük yan zincir yoğunluğu zeta potansiyelinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca yazarlar, yan zincir yoğunluğunun zeta potansiyeli üzerinde yan zincir uzunluğundan daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Zhang ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı kopolimerlerin yük özelliklerinin, çimento hidrasyonundaki gecikme ve adsorpsiyon davranışlarına etkileri araştırılmıştır. Söz konusu kopolimerler, makromonomerin anyonik ve katyonik monomerler ile birlikte polimerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Elde edilen monomerler, homo-polimerler ve kopolimerlerin çimento hidrasyonu ve adsorpsiyon davranışlarına etkileri sırasıyla kalorimetre ve TOC analizi testleri yardımıyla belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlara göre, hamur karışımlarında monomerler için herhangi bir adsorpsiyon veya gecikme oluşmazken, homo-polimerler için farklı adsorpsiyon ve gecikme oranları belirlenmiştir. Buna ilaveten, kopolimerlerin yük özelliklerinin adsorpsiyon davranışlarını ve gecikmeyi güçlü bir şekilde etkilediği ifade edilmiştir.

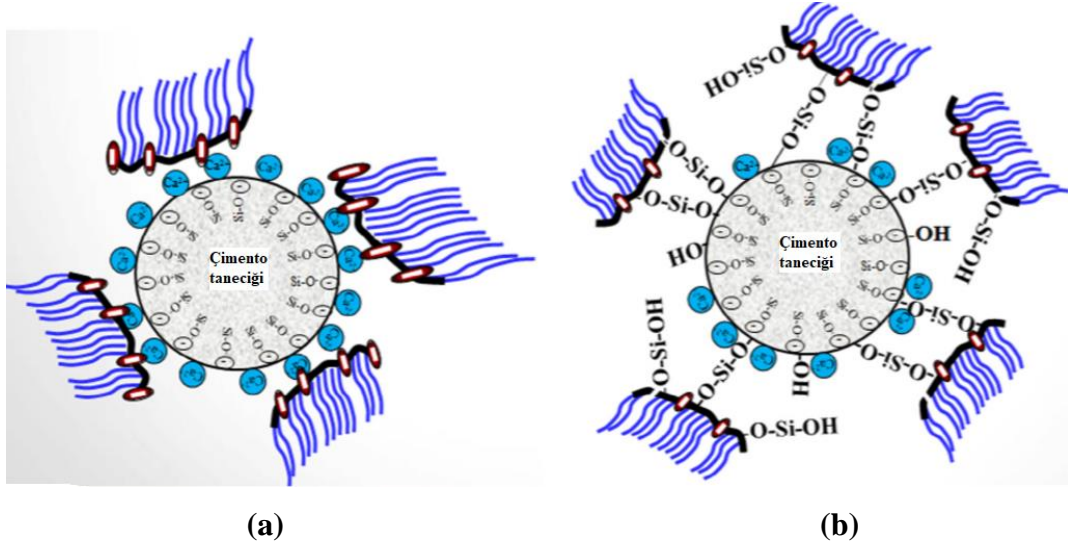
Kong, Pan, Wang ve Xu (2016) tarafından yapılan çalışmada, farklı karboksilat grup yoğunluğuna, fonksiyonel grup içeriğine, molekül ağırlığına ve yan zincir uzunluğuna sahip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıların Portland çimentosunun hidrasyon özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, Şekil 2.38'de kimyasal yapısı şematik olarak gösterilen 4 farklı seri katkı üretilmiştir. A serisinde uzun yan zincire ve farklı karboksilat grup içeriğine sahip 4 farklı katkı, B serisinde farklı molekül ağırlığına sahip 5 farklı katkı, C serisinde farklı oranlarda metil akrilat içeren 4 farklı katkı, D serisinde ise farklı yan zincir uzunluğuna sahip 5 farklı katkı sentezlenmiştir. Ayrıca üretilen çimento hamurlarının su/çimento oranı 0,40 olarak sabit tutulmuş, su azaltıcı katkı miktarı ise çimento dozajının ağırlıkça %0,3'ü oranında kullanılmıştır. Sonuçta, yüksek yoğunlukta karboksilat grup içeriğine, kısa yan zincire ve yüksek molekül ağırlığına sahip su azaltıcı katkıların hidrasyon geciktirme kabiliyetini arttırdığı tespit edilmiştir. Öte yandan maksimum hidrasyon sıcaklığının karboksilat grup yoğunluğunun artışı ile birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca polimerize edilen metil akrilat anyonik

monomer miktarı artışına bağlı olarak karışımların hidrasyon sıcaklığının azaldığı belirlenmiştir.



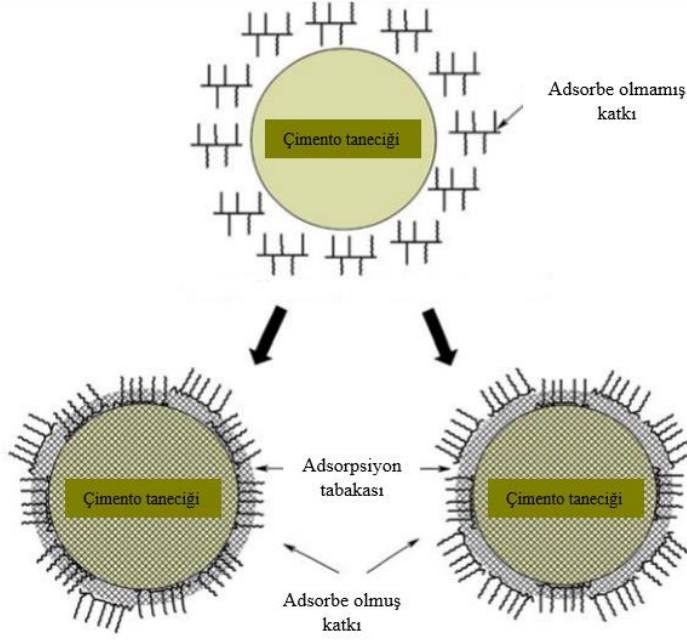
**Şekil 2.38.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Kong ve diğerleri, 2016)

He, Zhang ve Hooton (2017) tarafından yapılan çalışmada, akrilik asit, üç farklı propil metakrilat ile kısmen ve tamamen ikame edilerek elde edilen polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıının hamur karışımlarının adsorpsiyon, yayılma ve hidrasyon davranışlarına etkileri araştırılmıştır. Sentezlenen katkıların adsorpsiyon mekanizmaları şematik olarak Şekil 2.39’da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere kontrol katkıında adsorpsiyon yalnızca karboksil gruplarla  $Ca^{2+}$  iyonları arasındaki elektrostatik etki ile oluşmaktadır. Modifiye edilmiş katkılarda ise adsorpsiyon elektrostatik etkiye ilaveten hidrate olmuş inorganik silikatlar ile katkıının siloksan grupları arasında oluşan kovalent bağlarla da gerçekleşmektedir. Söz konusu bu kimyasal bağın katkıının adsorpsiyon yeteneğini iyileştirdiği ifade edilmiştir. Nitekim, deney sonuçlarına göre modifiye edilen katkıların adsorpsiyon davranışlarının kontrol katkısına kıyasla daha iyi olduğu ve ayrıca hidrasyonu hızlandırdığı tespit edilmiştir.



**Şekil 2.39.** Katkıların adsorpsiyon mekanizmalarının şematik gösterimi: (a) kontrol katkısı, (b) modifiye edilmiş katkı (He ve diğerleri, 2017)

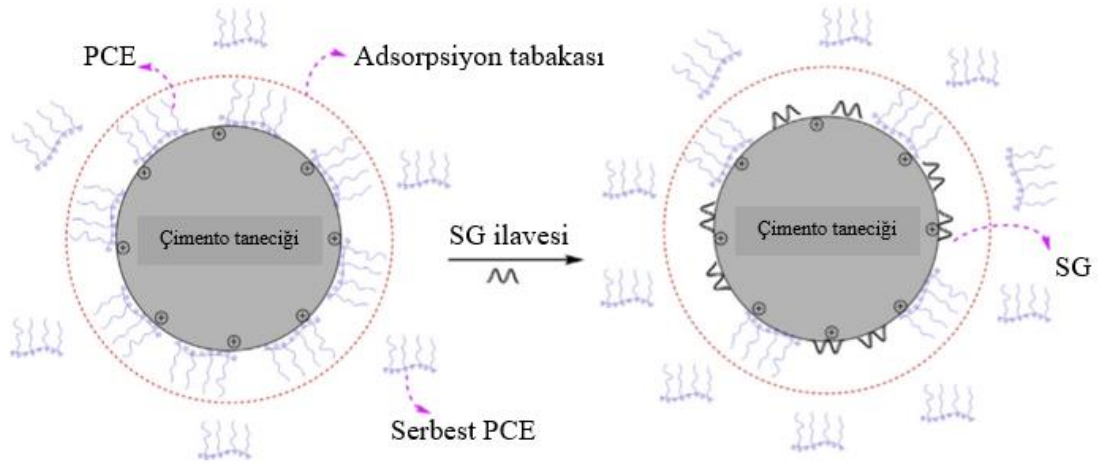
Tan ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkının yan zincirinde bulunan ester grubunun karışımların yayılması ve katkının çimento tanecikleri üzerine adsorpsiyon davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, iki tip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Ester grubunun etkisini belirlemek için birinci katkıda yan zincirler ester grup ile oluşturularak akrilik asit, isopentenol polioksietilen ve hidroksi etil akrilat ile sentezlenmiştir. İkinci katkı ise sadece akrilik asit ve isopentenol polioksietilen ile sentezlenmiştir. Söz konusu kimyasal katkıları karışımlara ilave edilip çimento hamurunun akış özellikleri test edilerek katkıların karışımda dağılma performansları tartışılmıştır. TOC analizi yapılarak adsorpsiyon miktarları ölçülmüş ve x-ray fotoelektron spektroskopisi ile adsorpsiyon tabakası belirlenmiştir. Katkı ile çimento taneciği yüzeyindeki adsorpsiyon tabakası şematik olarak Şekil 2.40'da gösterilmiştir. Fourier-transform kızılötesi spektroskopisi, nükleer manyetik rezonans ve pH değeri, ester grubunun stabilitesini doğrulamak için kullanılmıştır. Çimento parçacıklarının kimyasal katkıyla oluşturduğu elektro-kinetik özellikler, zeta potansiyel ölçümleri yapılarak belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre ester grubunun yan zincirde bulunması başlangıç adsorpsiyon miktarını, başlangıç zeta potansiyelini ve başlangıçta katkının miktarını azaltmıştır. Ancak, ileri zamanlarda adsorpsiyon miktarını ve adsorpsiyon tabakasının kalınlığını arttırmıştır.



**Şekil 2.40.** Katkı ile çimento taneciği yüzeyindeki adsorpsiyon tabakasının şematik gösterimi (Tan ve diğerleri, 2017)

Zou ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada, genellikle priz geciktirici olarak kullanılan sodyum glikonat (SG) ile akışkanlaştırıcı olarak kullanılan polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı (PCE) arasındaki etkileşim ve uyum araştırılmıştır. Söz konusu katkıları arasındaki uyum, hazırlanan çimento hamuru karışımları üzerindeki adsorpsiyon ve dağılma davranışları incelenerek belirlenmiştir. Çalışmada yan zincir yoğunluğu ve yan zincirin ana zincire bağlanma oranı farklı olan polioksietilen eter ve arklık asit esaslı iki adet PCE sentezlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler neticesinde, PCE'nin çimento yüzeyine SG'ye kıyasla daha fazla adsorbe olduğu belirlenmiştir. PCE ve SG'nin karışım içerisinde adsorpsiyon mekanizması Şekil 2.41'de gösterilmiştir. SG kullanımının katkının dağılma özelliğini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca dağılma özelliğinin iyileşmesinin sadece SG dozajına bağlı olmadığı, PCE'nin molekül yapısının da katkının dağılma özelliğinde etkili olduğu ifade edilmiştir.

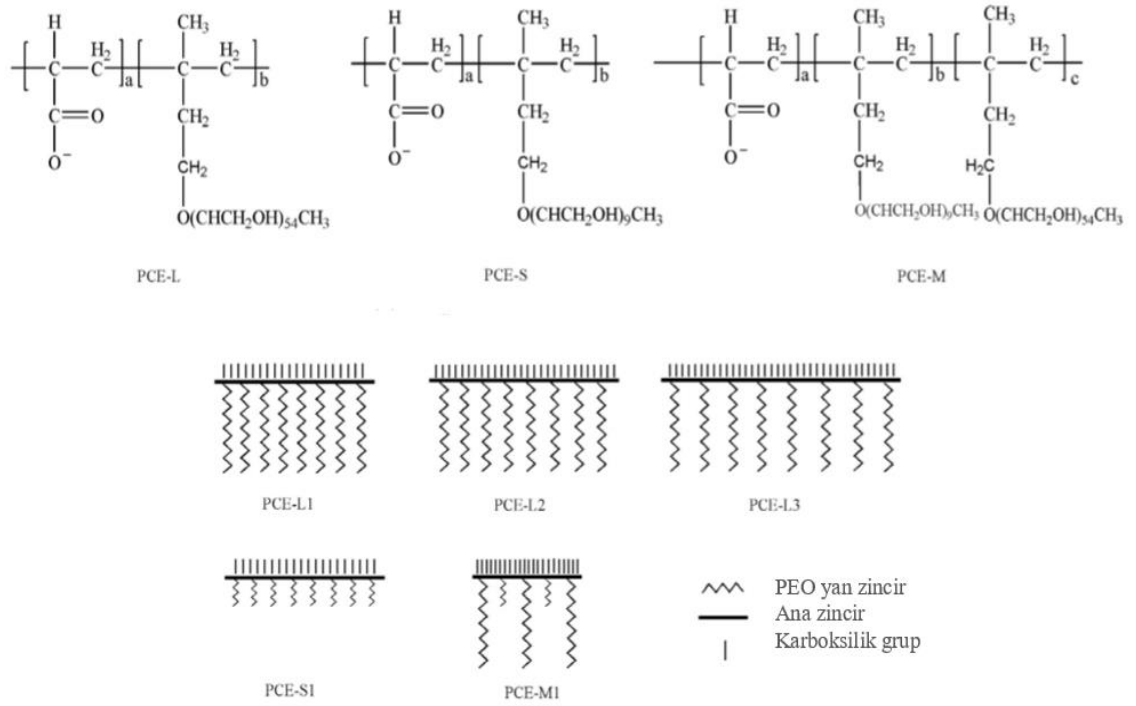




**Şekil 2.41.** Katkının adsorpsiyon mekanizmasının şematik gösterimi (Zou ve diğerleri, 2017)

Erzengin ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, sentezlenen metakrilik ester esaslı su azaltıcı katkıların yan zincir uzunluğu ve yan zincir yoğunluğunun çimentolu sistemlerin işlenebilirliği, reolojik özellikleri, priz süresi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında sentezlenen katkıları FTIR ve GPC analizleri ile karakterize edilmiş, karışımların reolojik özellikleri belirlenirken Bingham ve Herschel-Bulkley modelleri kullanılmıştır. Yapılan deneyler doğrultusunda, düşük yan zincir yoğunluğuna sahip su azaltıcı katkıların karışımların akışkanlığını, akışkanlığı koruma performansını ve dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir.

Feng ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, katkı kimyasal yapısının iki farklı yöreden (Ledong ve Haikou) elde edilen taş tozu içeren çimentolu sistemlerin adsorpsiyon, akışkanlık ve dağılma özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı yan zincir uzunluğu ve karboksilik grup yoğunluğuna beş adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Katkıların kimyasal yapıları ve şematik diyagramları Şekil 2.42’de gösterilmiştir. PCE-S1 kısa yan zincire, PCE-M1 hem kısa hem de uzun yan zincire, PCE-L1 ise uzun yan zincire sahip katkıları temsil etmektedir. PCE-S1, PCE-M1 ve PCE-L1 katkıları sabit karboksilik grup yoğunluğuna sahip katılardır. Bunlara ilaveten sabit yan zincire sahip ancak farklı karboksilik grup yoğunluğunda olan katkıları ise PCE-L2 ve PCE-L3 olarak isimlendirilmiştir.

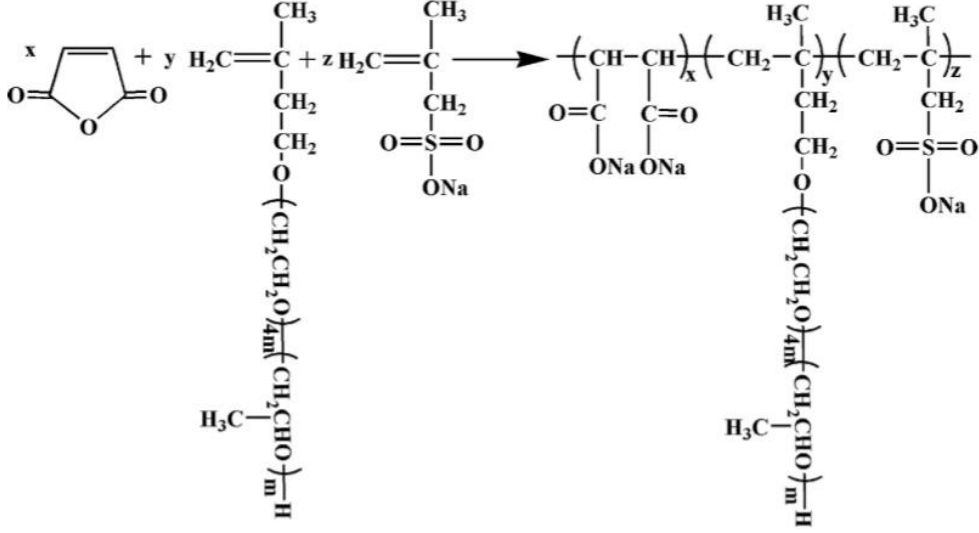


**Şekil 2.42.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Feng ve diğerleri, 2018)

Elde edilen deney sonuçları neticesinde, uzun yan zincire ve düşük karboksilik grup yoğunluğuna sahip PCE-L1 katkısının, çalışmada kullanılan diğer katkıları kıyasla çimentolu karışımlarda daha iyi dağılma performansı gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, katkı doygunluk noktasındaki akış değerleri dikkate alındığında, kısa yan zincire sahip PCE-S1 katkısını içeren taş tozu ilaveli karışımlarının akışkanlığının, diğer katkıları içeren karışımlardan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ledong yöresine ait taş tozu katmanlı bir yapıya sahip olduğundan dolayı su azaltıcı katkıların bu tip yapılara daha kolay adsorbe olabildiği tespit edilmiştir. Öte yandan, uzun yan zincire sahip katkıları içeren karışımların akışkanlık açısından düşük performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bu olumsuz etkinin uzun yan zincirlere sahip katkı moleküllerinin katmanlı yapının içerisine hapsolmesinden dolayı olduğunu ifade etmişlerdir.

Qian ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, taze betonda yüksek viskozite sorununu çözmek amacıyla su azaltıcı katkı molekül yapısı yeniden dizayn edilerek yan zincir uzunlukları ve molekül ağırlıkları farklı yeni polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıları sentezlenmiştir. Çalışma kapsamında sentezlenen katkıların kimyasal yapısı Şekil 2.43'de gösterilmiştir. Söz konusu katkıların performansları, hazırlanan çimento

hamuru ve taze beton karışımları üzerinde yapılan reoloji, adsorpsiyon ve zeta potansiyeli testleri ile incelenmiştir.

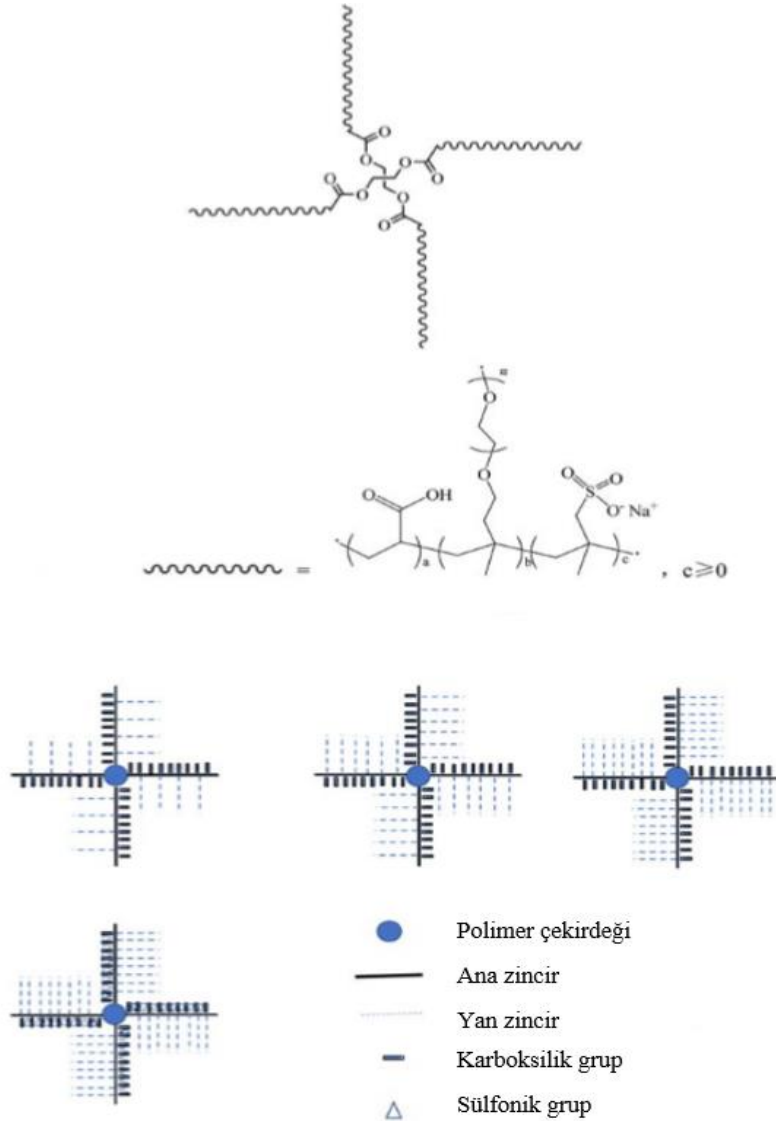


**Şekil 2.43.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Qian ve diğerleri, 2018)

Deney sonuçlarına göre, hidrofobik grupların kullanılması, molekül ağırlığının düşürülmesi ve yan zincirin kısaltılmasının katkının adsorpsiyon miktarını arttırdığı, dağılma özelliğini iyileştirdiği ve viskoziteyi azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında sentezlenen katkıların beton karışımlarında viskozite azaltıcı olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Zhao ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, su azaltıcı katkı kimyasal yapısının karışımların akışkanlık, hidrasyon ve priz süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, dört farklı yıldız şeklinde polimere sahip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı sentezlemiştir. Sentezlenen su azaltıcı katkıların şematik olarak gösterimi Şekil 2.44'te verilmiştir. 1, 2 ve 3. katkıların ana zincire bağlı nanyonik yan zincir yoğunlukları (sayıları) birbirinden farklıdır. 4. katkının ise yan zincir yoğunluğu 3. katkıyla aynı ancak ana zincir üzerindeki anyonik monomeri sodyum metalil sülfonattan oluşmaktadır. Deney sonuçlarına göre, yan zincir yoğunluğu ve molekül ağırlığının artmasıyla akışkanlığının azaldığı tespit edilmiştir. Ancak yan zincir yoğunluğunun ve molekül ağırlığının azalmasıyla, çimento parçacıklarının yüzeyindeki katkı adsorpsiyon miktarı artmıştır.

Katkının yıldız şeklinde kimyasal yapıya sahip olması, polimerin çimento yüzeyindeki adsorpsiyon davranışını etkilediği ve bu tip katkıların çimentoya adsorbe olması sonucunda elektrostatik itmeyi arttırdığı tespit edilmiştir.

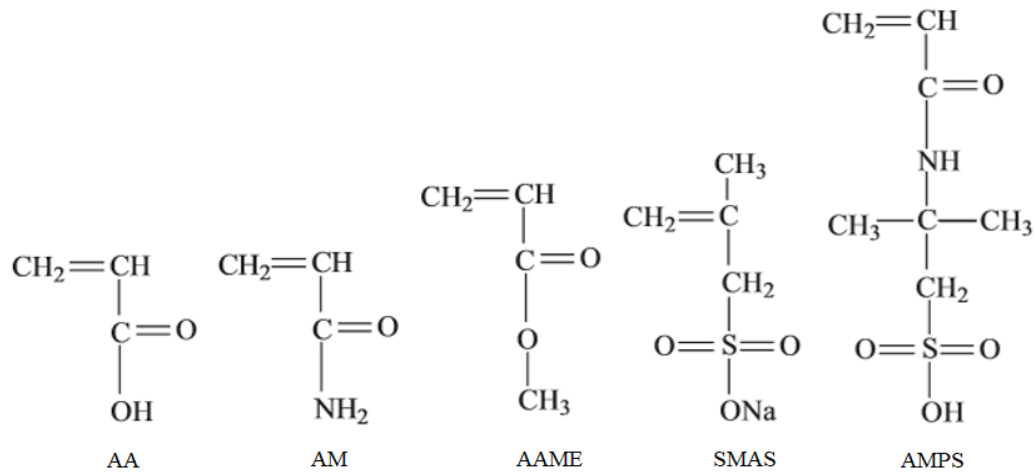


**Şekil 2.44.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Zhao ve diğerleri, 2018)

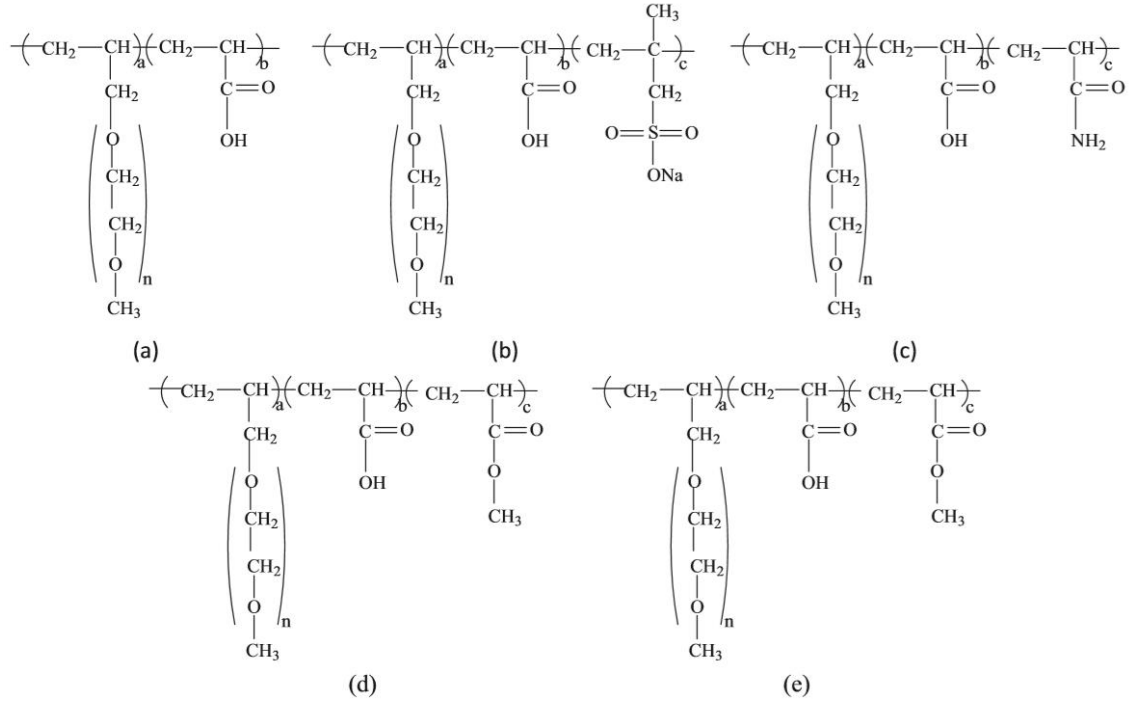
Wang ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada, çeşitli yan zincir uzunluğuna ve yoğunluklarına sahip polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkıları sentezlemişlerdir. Bu kapsamda, çimento hamuru karışımlarının erken yaşlardaki akış performansı, katkıların adsorpsiyon özellikleri ve hidrasyon ürün miktarlarını araştırılmıştır. Sonuçta, daha uzun yan zincire ve daha düşük yan zincir yoğunluğuna

sahip katkıların daha fazla adsorpsiyon miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. Katkının sabit ana zincir uzunluğuna sahip ve sabit yoğunluğa sahip olması durumunda yan zincir uzunluğunun artışıyla adsorpsiyon miktarı azalmıştır. Ancak uzun yan zincirlerin oluşturduğu sterik etkiden dolayı karışımların başlangıç akış ve akış koruma özellikleri artmıştır. Ayrıca uzun yan zincire sahip katkıların molekül ağırlığı kısa yan zincire sahip katkıların molekül ağırlığından yüksektir. Bu bağlamda, karışımlarda aynı miktarda katkı kullanıldığı durumlarda uzun yan zincire sahip katkıların sayısı diğerinden daha az olmuştur. Bu durum, çimento hidratasyonu sırasında dormant periyodunun kısılmasına ve erken yaşlarda hidratasyon ürünlerinin artmasına sebep olmuştur.

He ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada, farklı karboksilik yoğunluğa ve anyonik monomer içeriğine sahip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon ve dağılma davranışları ile çimento hamurunun hidratasyon özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, karboksilik gruplarla Şekil 2.45’de gösterilen akrilik asit (AA), akrilamid (AM), akrilik asit metil ester (AAME), sodyum metalil sülfonat (SMAS) ve akrilamid metil propan sülfonik (AMPS) anyonik monomerleri ikame edilmiştir. Sentezlenen katkıların kimyasal yapıları şematik olarak Şekil 2.46’da gösterilmiştir.



**Şekil 2.45.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (He ve diğerleri, 2019)

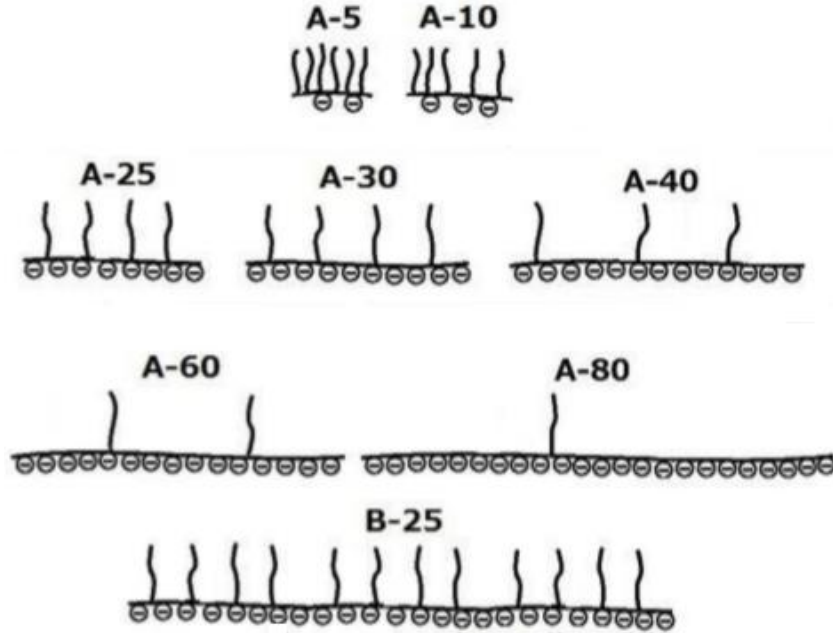


**Şekil 2.46.** Katkıların kimyasal yapılarının açık şematik gösterimi a) AA, b) AM, c) AAME, d) SMAS, e) AMPS (He ve diğerleri, 2019)

Deney sonuçlarına göre, su azaltıcı katkıların anyonik monomer tipinin katkıların adsorpsiyon ve dağılma performanslarını dolayısıyla karışımların akışkanlığını ve reolojik özelliklerini etkilediği belirtilmiştir. Karboksilik grupların sülfonik gruplar ile ikame edilmesinin, katkının adsorpsiyon ve dağılma özelliğini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, sülfonik grupların karışımların hidrasyonunu bir miktar hızlandırdığı tespit edilmiştir.

Matsuzawa, Shimazaki, Kawakami ve Sakai (2019) tarafından yapılan çalışmada, çimento yüzeyine adsorbe olmayan diğer bir deyişle karışımda serbest halde bulunan su azaltıcı katkı moleküllerinin çimento hamuru karışımının akışkanlığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda, kimyasal yapıları şematik olarak Şekil 2.47’de gösterilen, farklı moleküler yapıya sahip 8 adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Farklı karboksilat yoğunluğuna dolayısıyla ana zincir uzunluğuna sahip olacak şekilde sentezlenen A5, A10, A25, A30, A40, A60 ve A80 katkıların ortalama molekül ağırlıkları 10000 g/mol’dür. Katkıların molekül ağırlıkları eşit olduğundan karboksilat grup yoğunluğunun artışı ile yan zincir yoğunluğunun azaldığı Şekil 2.47’den anlaşılmaktadır. Ayrıca,

çalışma kapsamında sentezlenen B25 katkısının molekül ağırlığı ise yaklaşık 30000 g/mol'dür. Adsorbe olmayan katkı moleküllerinin akışkanlığa etkisini belirlemek amacı ile karışıma doygunluk noktasına ulaşıldıktan sonra da katkı ilave edilmiştir.



**Şekil 2.47.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Matsuzawa ve diğerleri, 2019)

Deney sonuçlarına göre, adsorbe olmayan yani karışımda serbest halde bulunan su azaltıcı katkı moleküllerinin karışımın akışkanlığını arttırdığı gözlemlenmiştir. Karboksilat grubu yoğunluğunun azalması ile adsorpsiyon miktarının ve dolayısıyla akışkanlığın azaldığı belirlenmiştir. Ana zincir uzunluğunun artışı ile karışımın akışkanlığının olumlu yönde etkilendiği ancak ana zincir uzadıkça polimerlerin birbirine takılma ihtimalini ve birden fazla çimento taneciğine adsorbe olma ihtimalini arttırdığından dolayı partiküller arasında bağ köprüsü oluşabileceği belirtilmiştir.

Zhang, Miao, Kong ve Zhou (2019) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcıların kimyasal yapılarının katkının priz geciktirici etkisi ve harçların erken dayanımları üzerine etkilerini araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, çeşitli yan zincir uzunluğu ve yoğunluğu da dahil olmak üzere farklı moleküler yapıya sahip bir dizi süperakışkanlaştırıcı katkı akrilik asit ve  $\alpha$ -metalil- $\omega$ -hidroksi polietilen glikol eter ile

birlikte polimerize edilerek sentezlenmiştir. Sentezlenen katkıların çimento hidrasyonu ve harcın erken dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, katkıların çimento taneleri üzerindeki adsorpsiyonunun büyük ölçüde moleküler yapısına bağlı olduğu, katkının geciktirme etkisinin ise adsorpsiyon miktarı ile orantılı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, daha yüksek yan zincir uzunluğunun ve yoğunluğunun daha düşük adsorpsiyon miktarına ve dolayısıyla daha yüksek harç dayanımına neden olduğu tespit edilmiştir.

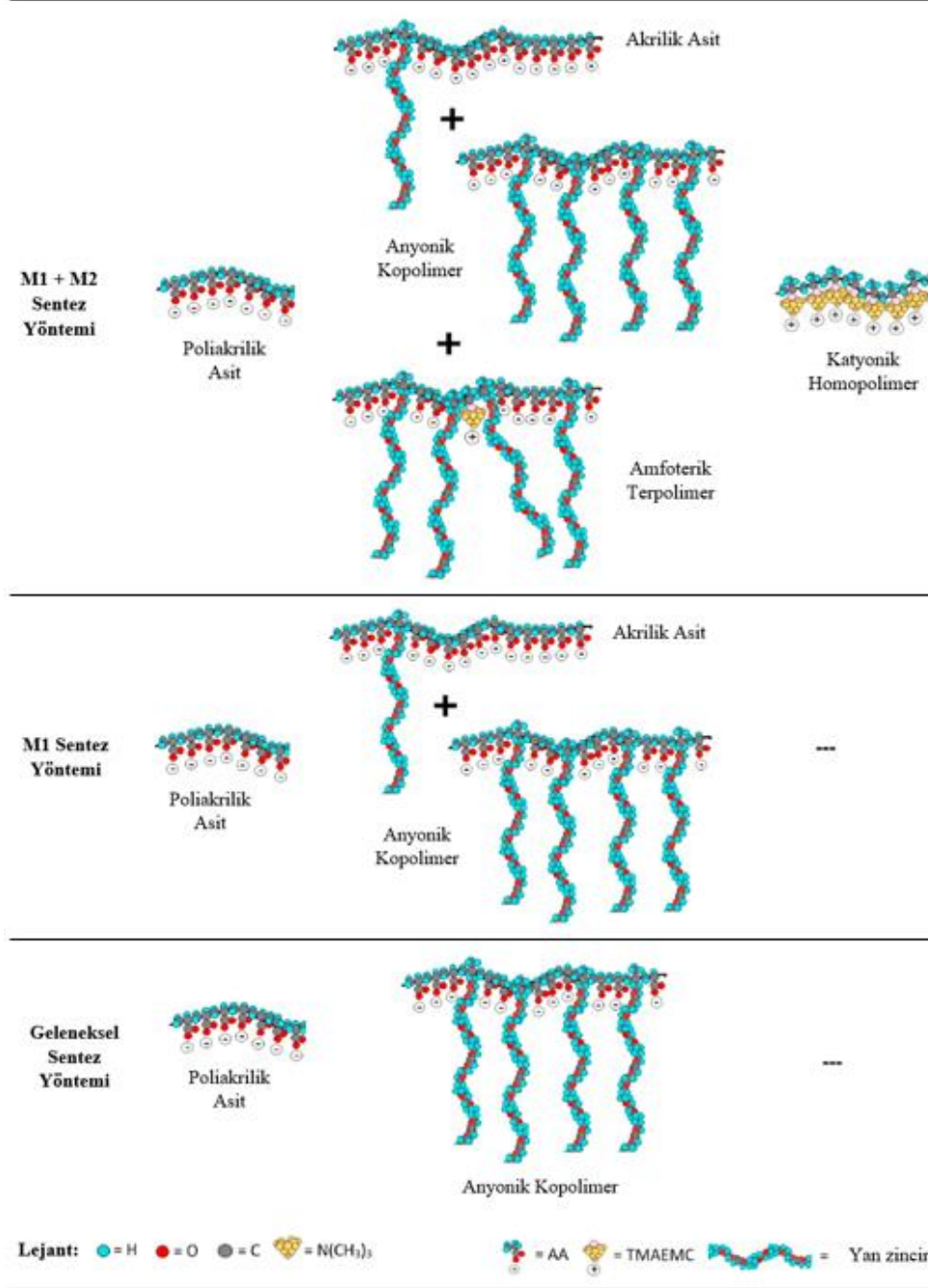
Chomyn ve Plank (2019) tarafından yapılan çalışmada, akrilik asit (AA),  $\alpha$ -izopreniloksi- $\omega$ -polietilen glikol (IPEG) makromonomer ve 2 trimetilaamonyum etil metakrilat klorür (TMAEMC) içeren bir dizi amfoterik ve anyonik kopolimerler Şekil 2.48'de gösterilen iki farklı sentez yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Birinci yöntemde (M1), tüm monomerler reaktöre yerleştirilerek 15 dakikalık hızlı bir kopolimerizasyona tabi tutulmuştur. İkinci yöntemde (M1+M2) ise AA ve başlatıcı, makromonomer ve TMAEMC içeren kaba eklenmiştir. Sentezlenen katkıların dağılma performansları geleneksel yöntem ile sentezlenen katkının performansı ile kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre basit ve hızlı sentez yöntemi (M1) ile sentezlenen katkının dağılma performansının en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Ng ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkının mol oranlarının bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve çimento kullanılarak üretilen betonların akışkanlığına, basınç dayanımına, eğilme dayanımına ve ultrasonik ses hızına etkisi incelenmiştir. Sonuçta, mol oranı 1/8 olan katkının optimum sonuçları verdiği gözlemlenmiştir.

Cheah ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, süperakışkanlaştırıcı katkı türünün bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve çimento kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşebilen betonların mekanik özelliklerine ve kuruma büzülmesine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda metoksi polietilen glikol ve izoprenil polietilen glikol türü süperakışkanlaştırıcılar ayrı ayrı ve birlikte kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre katkıların ayrı ayrı kullanımının birlikte kullanımına kıyasla



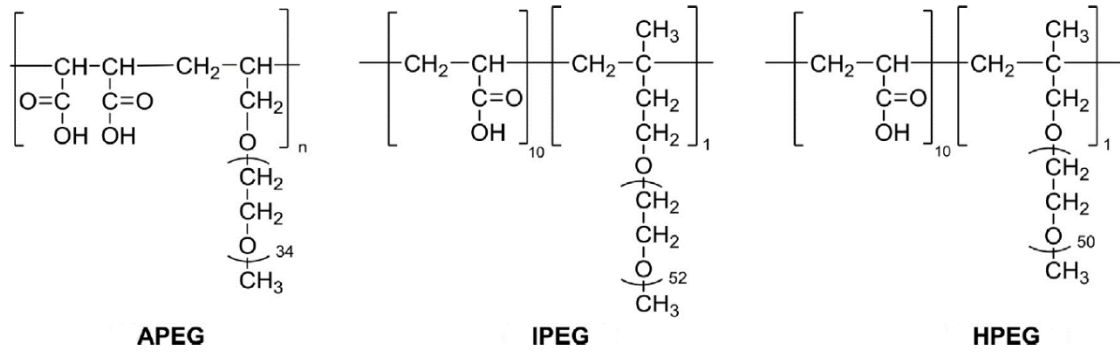
betonların gerek mekanik özellikleri açısından gerekse kuruma büzülme açısından daha olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



**Şekil 2.48.** Sentez yöntemleri (Chomyn ve Plank, 2019)

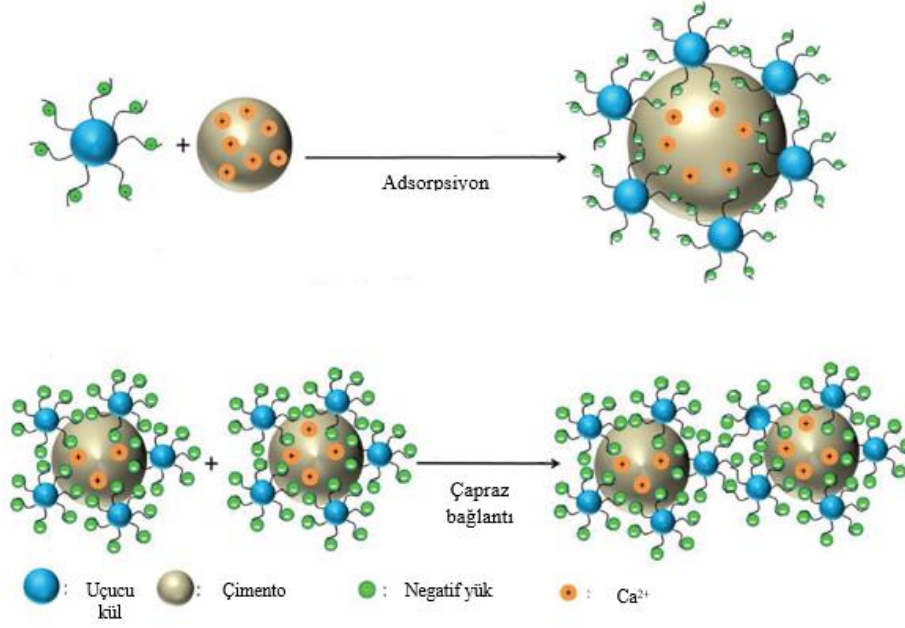
Chomyn ve Plank (2020) tarafından yapılan çalışmada, pH değerleri 1,5 ve 7 olan birbirinden farklı polikarboksilat esaslı polimerlerin çimentolu sistemlerin dağılma

performanslarına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda Şekil 2.49’da gösterilen asidik özelliği yüksek (HPEG ve IPEG) ve zayıf olan (APEG) anyonik katkılar sentezlenmiş olup katkıların dağılma performanslarını incelemek amacıyla çimentolu sistemlerin mini yayılmaları belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre asidik özelliği kuvvetli anyonik polimerlerin nötrale muadillerinden daha iyi performans gösterdiği, asidik özelliği zayıf anyonik polimerlerin ise nötrale muadilleri ile eşit performans gösterdiği tespit edilmiştir.



**Şekil 2.49.** Katkıların kimyasal yapılarının şematik gösterimi (Chomyn ve Plank, 2020)

Liu ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, çimentolu sistemlerin akışkanlığını iyileştirmek amacıyla mikro agrega olarak kullanılabilen polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı ile modifiye edilmiş uçucu kül kompoziti üretilmiştir. Çalışmada ilk olarak polietilen glikol yan zincir, karboksilik ve hidroksisilan grupları içeren polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı serbest radikal kopolimerizasyonu ile sentezlenmiştir. Sentezlenen katkı uçucu kül tanecikleri üzerine aşılınmış olup çalışma mekanizması Şekil 2.50’de gösterilmiştir. Su azaltıcı katkı ile modifiye edilmiş uçucu külün çimentolu sistemlerin akışkanlığına ve basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karışımların işlenebilirliğinin ve 7 günden sonraki dayanımlarının iyileştiği tespit edilmiştir. Buna ilaveten araştırmacılar tarafından, su azaltıcı katkı ile modifiye edilen uçucu külün çimentolu kompozitler için umut verici bir katkı maddesi olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

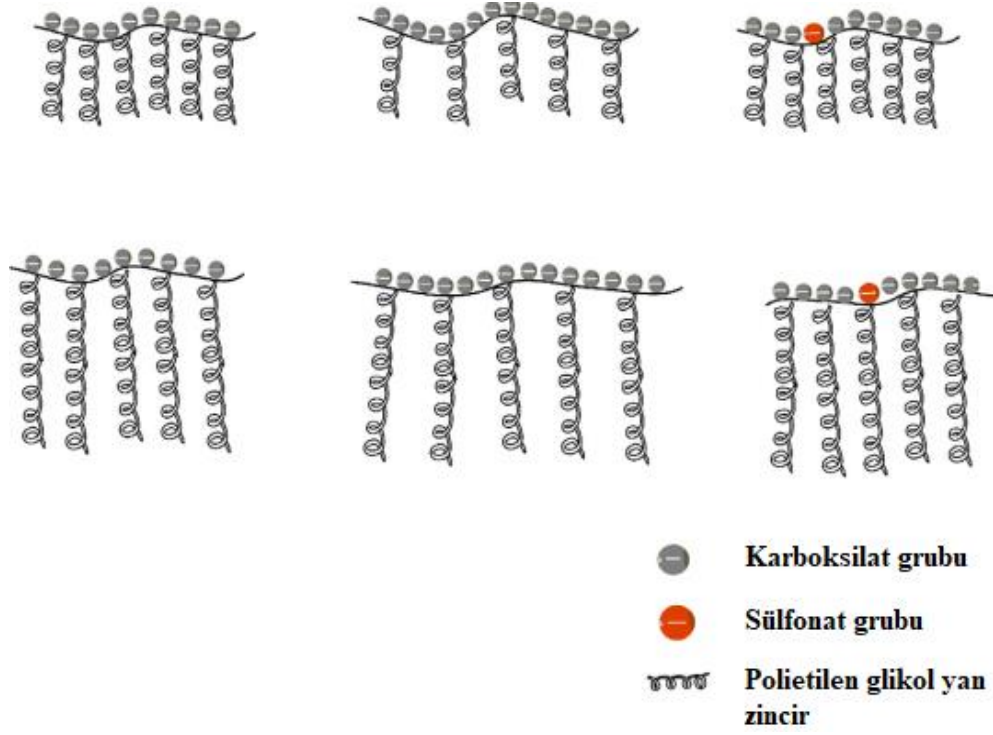


**Şekil 2.50.** Sentezlenen katkıların çalışma mekanizması (Liu ve diğerleri, 2020)

Zhu ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada, polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkıların farklı su/çimento oranlarında hazırlanan karışımlarda dağılıma ve adsorpsiyon performansı, su filmi kalınlığı, akışkanlığı, reolojik özellikleri, zeta potansiyelleri ve hidrasyon dereceleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, çimento tanecikleri üzerindeki su filmi kalınlığı ve zeta potansiyeli önemli oranda etkilendiği için başlangıç reolojik ve akışkanlık özelliklerinin daha düşük su/çimento oranlarında katkı dozajına daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, daha düşük su/çimento oranlarında su azaltıcı katkıların yüksek adsorpsiyon miktarları ilk hidrasyonun daha güçlü bir şekilde engellenmesine, aynı katkı dozajında ise çimento hamurlarının daha hızlı akışkanlık kaybına sebep olduğu tespit edilmiştir. Daha yüksek su/çimento oranlarında ise katkının daha düşük adsorpsiyon miktarından dolayı daha hızlı hidrasyon reaksiyonlarının oluşmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Feng ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada, etilen glikol monovinil polietilen glikol kullanılarak kopolimerizasyon yoluyla polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Söz konusu katkıların yan zincir uzunlukları ve anyonik monomer fonksiyonel grupları değiştirilerek modifiye edilmiş olup çimentolu sistemlerin akışkanlığı, reolojik özellikleri ve basınç dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışma kapsamında sentezlenen katkıların şematik gösterimi Şekil 2.51’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, yan zinciri kısa ve karboksilat fonksiyonel grup yoğunluğu yüksek olan katkıların adsorpsiyon ve dağılma performanslarının dolayısıyla akışkanlık ve reolojik özelliklerinin diğer katkılara kıyasla daha üstün olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.51. Sentezlenen katkıların şematik gösterimi (Feng ve diğerleri, 2021)

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, polikarboksilat eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu, sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları ve anyonik monomer fonksiyonel grup içeriğinin, uçucu kül içeren çimentolu sistemlerin taze hal, reolojik ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, ana zincir uzunluğu farklı, yan zincir uzunluğu farklı ve sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları farklı olan üçer katkı ve anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı olan beş katkı olmak üzere toplamda on dört katkı sentezlenmiştir. Hazırlanan hamur ve harç karışımlarına çimentonun ağırlıkça %0, 15, 30 ve 45 oranlarında uçucu kül ikame edilmiştir. Katkı karakterizasyonu ve bağlayıcıya adsorpsiyonu FTIR, GPC ve TOC analizleri ile incelenmiştir. Hamur karışımlarında Marsh-hunisi akış süresi, mini-yayılma ve priz süresi deneyleri, harç karışımlarında ise zamana bağlı yayılma, zamana bağlı mini V-hunisi akış süresi, 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 28 ve 90 günlük su emme kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Bunlara ilaveten hamur ve harç karışımlarında statik ve dinamik eşik kayma gerilmesi ile nihai viskozite değerleri belirlenmiştir.

#### 3.1. Malzemeler

Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak çimento ve uçucu kül, agrega olarak standart kum, kimyasal katkı olarak ise çalışma kapsamında sentezlenen birbirinden farklı on dört adet polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Çimento

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına uygun özgül ağırlığı 3,15 ve özgül yüzölçümü 3530 cm<sup>2</sup>/g olan CEM I 42,5R tipi Portland Çimentosu kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen çimentonun kimyasal bileşimi ile fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Çimento kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

Oksit (%)	Çimento	Fiziksel özellikleri			
SiO <sub>2</sub>	18,86	Özgül ağırlık		3,15	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,71	<b>Mekanik özellikleri</b>			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,09	Basınç dayanımı (MPa)	1-günlük	14,7	
CaO	62,7		2-günlük	26,8	
MgO	1,16		7-günlük	49,8	
SO <sub>3</sub>	2,39		28-günlük	58,5	
Na <sub>2</sub> O+0,658 K <sub>2</sub> O	0,92	<b>İncelik</b>			
Cl <sup>-</sup>	0,01	Özgül yüzey (Blaine, cm <sup>2</sup> /g)		3530	
Çözünmeyen kalıntı	0,32	0,045 mm elek kalıntısı (%)		7,6	
Kızdırma kaybı	3,2				
Serbest CaO	1,26				

### 3.1.2. Uçucu kül

Bu çalışmada, külsüz karışımlara ilaveten çimento yerine ağırlıkça %15, 30 ve 45 oranlarında özgül ağırlığı 2,31 ve özgül yüzey alanı 4300 cm<sup>2</sup>/g olan TS EN 450-1 standardına uygun uçucu kül ikame edilmiştir. Üretici firmadan temin edilen uçucu külün kimyasal bileşimi ile fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Uçucu külün kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

Oksit (%)	Uçucu kül	Fiziksel özellikleri			
SiO <sub>2</sub>	59,22	Özgül ağırlık		2,31	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,86	<b>Mekanik özellikleri</b>			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,31	Dayanım aktivite indeksi (%)	7-günlük	85,9	
CaO	3,09		28-günlük	100,7	
MgO	1,31		90-günlük	110,2	
SO <sub>3</sub>	0,17				
Na <sub>2</sub> O+0,658 K <sub>2</sub> O	1,4	<b>İncelik</b>			
Cl <sup>-</sup>	0,001	Özgül yüzey (Blaine, cm <sup>2</sup> /g)		4300	
Çözünmeyen kalıntı	0,32	0,045 mm elek kalıntısı (%)		10	
Kızdırma kaybı	3,2				
Serbest CaO	0				

### 3.1.3. Agrega

Bu çalışmada, agrega olarak TS EN 196-1 standardına uygun standart kum kullanılmıştır. Üretici firma tarafından temin edilen standart kumun tane büyüklüğü dağılımı Çizelge 3.3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Standart kumun tane büyüklüğü dağılımı

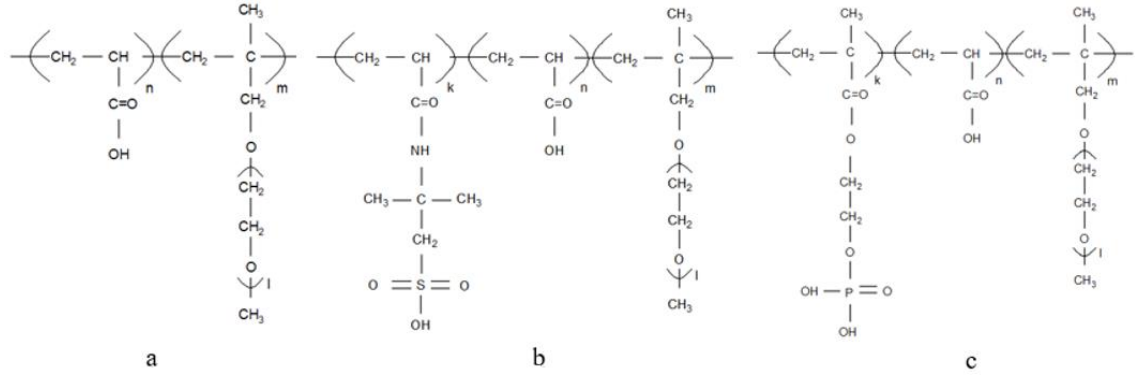
<b>Kare Göz Açıklığı</b>	<b>Kalan (%)</b>	<b>Yığılımlı Elekte Kalan (%)</b>
2,00	0	0
1,60	4,32	7 ± 5
1,00	33,98	33 ± 5
0,50	67,11	67 ± 5
0,16	86,85	87 ± 5
0,08	99,83	99 ± 5

### 3.1.4. Karışım suyu

Bu çalışmada, karışım suyu TS EN 1008 standardı doğrultusunda, asit reaksiyonu göstermeyen, organik madde ve kimyasal atıkları içermeyen ve içilebilir niteliğe sahip olan Bursa Uludağ Üniversitesi içme suyu şebekesinden kullanılmıştır.

### 3.1.5. Su azaltıcı katkıları

Kimyasal katkı olarak çalışmaya özel üretilen ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu, sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunlukları ve anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği birbirinden farklı on dört adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Sentezlenen katkıların şematik çizimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1.** Su azaltıcı katkıların şematik çizimi; a) karboksilat, b) sülfonat ikameli, c) fosfat ikameli

Çalışma kapsamında sentezlenen katkılara ait üretici firmadan temin edilen sentezleme detayı aşağıda yer almaktadır;

Katkıların sentezinde akrilik asit (AA) ve polietilenglikol (PEG) makromonomeri kullanılmıştır. Zincir transfer ajanı, başlatıcı ve indirgeyici aktivatör olarak sırasıyla, merkaptopropionik asit (MPA), amonyum persülfat (AP) ve sodyum formaldehit sülfoksilat (SFS) kullanılmıştır. Polimerler, radikal polimerizasyon yoluyla PEG makromonomer ve AA'dan sentezlenmiştir. İlk olarak, PEG makromonomeri 40°C'de su içinde tamamen çözülmüştür. Daha sonra sıcaklık 35°C'ye düşürülerek solüsyona başlatıcı AP eklenmiştir. Bu işlemin ardından sisteme AA, indirgeyici aktivatör SFS ve zincir transfer ajanı MPA ilave edilmiştir. Son olarak NaOH solüsyonu ile pH 8'e ayarlanarak polimerizasyon reaksiyonu 6 saatte tamamlanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında anyonik/non-iyonik grup oranı, serbest non-iyonik grup içeriği ve yan zincir uzunluğu sabit ana zincir uzunluğu ve dolayısıyla molekül ağırlığı farklı üç adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. 10k, 21k ve 31k ana zincir uzunluğuna sahip bu katkılar çalışma kapsamında sırasıyla PC<sub>10k</sub>, PC<sub>21k</sub> ve PC<sub>31k</sub> olarak isimlendirilmiştir. Söz konusu katkıların üretici firmadan temin edilen özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.



**Çizelge 3.4.** Ana zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

<b>Kodlama</b>	<b>Katı madde oranı (%)</b>	<b>pH</b>	<b>Viskozite (cps)</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>PC<sub>10k</sub></b>	58,3	3,94	830	1,12
<b>PC<sub>21k</sub></b>	59,9	4,02	1050	1,12
<b>PC<sub>31k</sub></b>	56,5	4,03	1180	1,13

Çalışmanın ikinci aşamasında anyonik/non-iyonik grup oranı, serbest non-iyonik grup içeriği ve ana zincir uzunluğu sabit yan zincir uzunluğu ve dolayısıyla molekül ağırlığı farklı üç adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. 1000, 2400 ve 3000 g/mol yan zincir uzunluğuna (yoğunluğuna) sahip bu katkılar çalışma kapsamında sırasıyla PC<sub>1000</sub>, PC<sub>2400</sub> ve PC<sub>3000</sub> olarak isimlendirilmiştir. Söz konusu katkıların üretici firmadan temin edilen özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Yan zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

<b>Kodlama</b>	<b>Katı madde oranı (%)</b>	<b>pH</b>	<b>Viskozite (cps)</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>PC<sub>1000</sub></b>	48,8	3,96	320	1,14
<b>PC<sub>2400</sub></b>	59,9	4,02	1050	1,12
<b>PC<sub>3000</sub></b>	57,9	4,11	990	1,12

Çalışmanın üçüncü aşamasında anyonik/non-iyonik grup oranı, serbest non-iyonik grup içeriği ve molekül ağırlığı sabit ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı üç adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Sabit molekül ağırlığında 40k-1000, 21k-2400 ve 17k-3000 ana ve yan zincir uzunluklarına sahip bu katkılar çalışma kapsamında sırasıyla PC<sub>40k-1000</sub>, PC<sub>21k-2400</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub> olarak isimlendirilmiştir. Söz konusu katkıların üretici firmadan temin edilen özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çalışmanın dördüncü aşamasında anyonik/non-iyonik grup oranı, serbest non-iyonik grup içeriği, ana zincir uzunluğu ve yan zincir uzunluğu sabit anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı beş adet su azaltıcı katkı sentezlenmiştir. Anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği %100 karboksilat, %90 karboksilat-%10 sülfonat, %70

karboksilat-%30 sülfonat, %90 karboksilat-%10 fosfat ve %70 karboksilat-%30 fosfat olan bu katkılar çalışma kapsamında sırasıyla PC<sub>C</sub>, PC<sub>S10</sub>, PC<sub>S30</sub>, PC<sub>F10</sub> ve PC<sub>F30</sub> olarak isimlendirilmiştir. Söz konusu katkıların üretici firmadan temin edilen özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

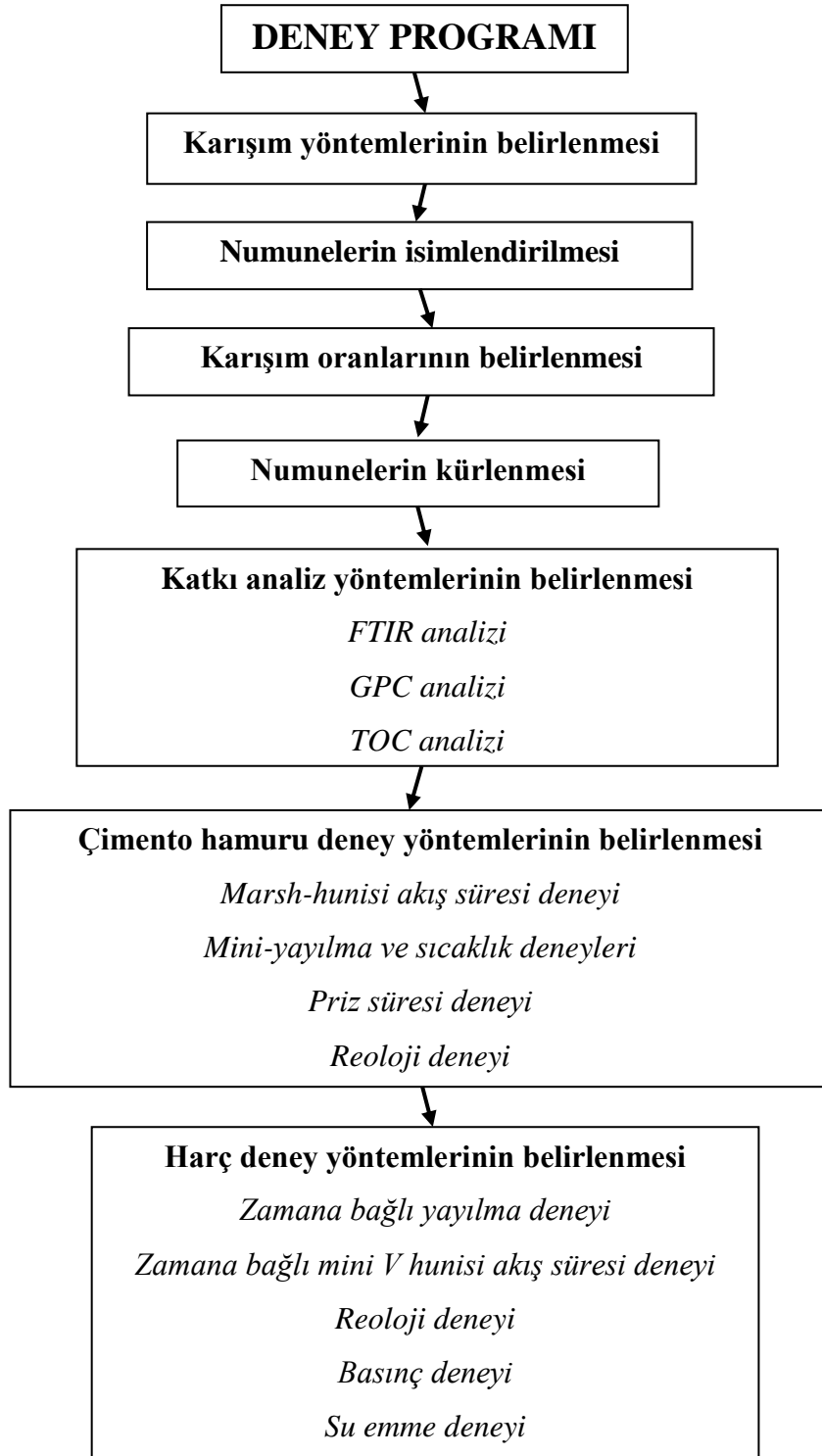
Kodlama	Katı madde oranı (%)	pH	Viskozite (cps)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
PC <sub>40k-1000</sub>	48,1	3,94	460	1,15
PC <sub>21k-2400</sub>	59,9	4,02	1050	1,12
PC <sub>17k-3000</sub>	55,0	4,08	650	1,13

**Çizelge 3.7.** Anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

Kodlama	Katı madde oranı (%)	pH	Viskozite (cps)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
PC <sub>C</sub>	48,0	4,10	300	1,15
PC <sub>S10</sub>	47,8	4,05	295	1,16
PC <sub>S30</sub>	48,1	4,12	295	1,14
PC <sub>F10</sub>	48,0	4,07	305	1,13
PC <sub>F30</sub>	47,9	4,10	310	1,16

### 3.2. Yöntem

Bu çalışma kapsamında kullanılacak olan tüm malzemeler temin edildikten sonra deney programı belirlenmiştir. Şekil 3.2’de verilen deney programı doğrultusunda çalışmalara devam edilmiştir. Bu bağlamda, öncelikle karışım oranları belirlenmiştir. Daha sonra, belirlenen karışım oranlarına göre çimento hamuru ve harç karışımları hazırlanmış, kalıplara yerleştirilmiş ve deney gününe kadar kürlenmiştir. Karar verilen deney yöntemlerine ve ilgili standartlara göre deneyler yapılmıştır. Ayrıca üretilen numuneler için, hem deneysel çalışma sırasında hem de elde edilen sonuçları açıklama ve yorumlama sırasında daha kolay ve anlaşılır olması amacıyla farklı isimlendirmeler kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi

### 3.2.1. Karışım yöntemleri

Çalışma kapsamında hazırlanan hamur karışımları ile Marsh-hunisi, mini-yayılma, priz süresi ve reoloji deneyleri yapılmıştır. Harç karışımları ile de zamana bağlı yayılma, mini V-hunisi, reoloji, basınç ve su emme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylere göre karışım yöntemi farklılık göstermektedir.

Hamur karışımlarına uygulanan karışım yöntemi (Mardani-Aghabaglou, 2016);

1. Adım: Su azaltıcı katkı ile su 62 devir/dk hızla 30 sn karıştırılmıştır,
2. Adım: Mikser durdurularak karışıma bağlayıcı eklenip 62 devir/dk hızla 30 sn daha karıştırılmıştır,
3. Adım: Mikser tekrar durdurulmuş ve mikser kabının kenarlarına yapışan parçalar karışıma dahil edilmiştir (15 sn),
4. Adım: Son olarak karışım 125 devir/dk hızla 120 sn daha karıştırılarak deneye hazır hale getirilmiştir.

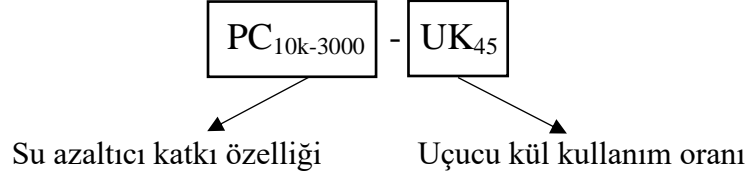
Harç karışımlarına uygulanan ve ASTM C 305 standardında tarif edilen karışım yöntemi;

1. Adım: Bağlayıcı ile su 62 devir/dk hızla 30 sn karıştırılmıştır,
2. Adım: Mikser çalışmaya devam ederken karışıma kum ilave edilerek 62 devir/dk hızla 30 sn daha karıştırılmıştır,
3. Adım: Ardından karışım 125 devir/dk hızla 30 sn daha karıştırılmıştır,
4. Adım: Mikser tekrar durdurulmuş, mikser kabının kenarlarına yapışan parçalar karışıma dahil edilmiş ve su azaltıcı katkı ilave edilmiştir (90 sn),
5. Adım: Son olarak karışım 125 devir/dk hızla 60 sn daha karıştırılarak deneye hazır hale getirilmiştir.

### 3.2.2. Numunelerin isimlendirmesi

Elde edilen sonuçların daha kolay ve anlaşılabilir şekilde yorumlanabilmesi amacıyla, çalışma kapsamında üretilen karışımlar için isimlendirmeler kullanılmıştır. Söz konusu bu isimlendirme karışımın içerdiği su azaltıcı katkının nanyonik zincir uzunluğu ve anyonik monomer fonksiyonel grubu değişimine bağlı olarak iki ayrı şekilde

gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere kodlamanın ilk kısmı su azaltıcı katkının özelliğini ikinci kısım ise uçucu kül kullanım oranını ifade etmektedir.



**Şekil 3.3.** Numune isimlendirmesinin şematik gösterimi

Çalışmanın birinci aşamasında ana zincir uzunluğu farklı katkıları ile hazırlanan tüm karışımların kodlamalarının açıklamaları Çizelge 3.8’de verilmiştir. Örneğin PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı ana zincir uzunluğu 10k ve uçucu kül ikame oranı %0 olan karışımı ifade etmektedir. PC<sub>31k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımı ise ana zincir uzunluğu 31k ve uçucu kül ikame oranı %45 olan karışımı ifade etmektedir.

**Çizelge 3.8.** Ana zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıları ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri

Kodlama	Katkı ana zincir uzunluğu	Katkı yan zincir uzunluğu (g/mol)	Anyonik monomer tipi ve oranı (%)	Uçucu kül kullanım oranı (%)
PC <sub>10k</sub> - UK <sub>0</sub>	10k	2400	%100 Karboksilat	0
PC <sub>21k</sub> - UK <sub>0</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	0
PC <sub>31k</sub> - UK <sub>0</sub>	31k	2400	%100 Karboksilat	0
PC <sub>10k</sub> - UK <sub>15</sub>	10k	2400	%100 Karboksilat	15
PC <sub>21k</sub> - UK <sub>15</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	15
PC <sub>31k</sub> - UK <sub>15</sub>	31k	2400	%100 Karboksilat	15
PC <sub>10k</sub> - UK <sub>30</sub>	10k	2400	%100 Karboksilat	30
PC <sub>21k</sub> - UK <sub>30</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	30
PC <sub>31k</sub> - UK <sub>30</sub>	31k	2400	%100 Karboksilat	30
PC <sub>10k</sub> - UK <sub>45</sub>	10k	2400	%100 Karboksilat	45
PC <sub>21k</sub> - UK <sub>45</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	45
PC <sub>31k</sub> - UK <sub>45</sub>	31k	2400	%100 Karboksilat	45

Çalışma ikinci aşamasında yan zincir uzunluğu farklı katkıları ile hazırlanan tüm karışımların kodlamalarının açıklamaları Çizelge 3.9’da verilmiştir. Örneğin PC<sub>1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı yan zincir uzunluğu 1000 g/mol ve uçucu kül ikame oranı %0 olan karışımı ifade

etmektedir. PC<sub>2400</sub>-UK<sub>30</sub> karışımı ise yan zincir uzunluğu 2400 g/mol ve uçucu kül ikame oranı %30 olan karışımı ifade etmektedir.

**Çizelge 3.9.** Yan zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıları ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri

Kodlama	Katkı ana zincir uzunluğu	Katkı yan zincir uzunluğu (g/mol)	Anyonik monomer tipi ve oranı (%)	Uçucu kül kullanım oranı (%)
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	1000	%100 Karboksilat	0
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	0
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	3000	%100 Karboksilat	0
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	1000	%100 Karboksilat	15
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	15
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	3000	%100 Karboksilat	15
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	1000	%100 Karboksilat	30
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	30
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	3000	%100 Karboksilat	30
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	1000	%100 Karboksilat	45
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	2400	%100 Karboksilat	45
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	3000	%100 Karboksilat	45

Çalışma üçüncü aşamasında sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunluklarında farklı katkıları ile hazırlanan tüm karışımların kodlamalarının açıklamaları Çizelge 3.10'da verilmiştir. Örneğin PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı ana zincir uzunluğu 17k yan zincir uzunluğu 3000 g/mol ve uçucu kül ikame oranı %0 olan karışımı ifade etmektedir. PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>45</sub> karışımı ise ana zincir uzunluğu 40k, yan zincir uzunluğu 1000 g/mol ve uçucu kül ikame oranı %45 olan karışımı ifade etmektedir.

Çalışma dördüncü aşamasında anyonik monomer fonksiyonel grubu farklı katkıları ile hazırlanan tüm karışımların kodlamalarının açıklamaları Çizelge 3.11'de verilmiştir. Örneğin PC<sub>S10</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı anyonik monomer fonksiyonel grubu %90 karboksilat ve %10 sülfonat ve uçucu kül ikame oranı %0 olan karışımı ifade etmektedir. PC<sub>F30</sub>-UK<sub>45</sub> karışımı anyonik monomer fonksiyonel grubu %70 karboksilat ve %30 fosfat ve uçucu kül ikame oranı %45 olan karışımı ifade etmektedir.

**Çizelge 3.10.** Sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri

Kodlama	Katkı ana zincir uzunluğu	Katkı yan zincir uzunluğu (g/mol)	Anyonik monomer tipi ve oranı (%)	Uçucu kül kullanım oranı (%)
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	40k	1000	% 100 Karboksilat	0
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	0
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	17k	3000	% 100 Karboksilat	0
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	40k	1000	% 100 Karboksilat	15
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	15
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	17k	3000	% 100 Karboksilat	15
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	40k	1000	% 100 Karboksilat	30
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	30
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	17k	3000	% 100 Karboksilat	30
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	40k	1000	% 100 Karboksilat	45
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	45
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	17k	3000	% 100 Karboksilat	45

**Çizelge 3.11.** Anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı su azaltıcı katkıları ile üretilen tüm karışımların kodlamaları ve tarifleri

Kodlama	Katkı ana zincir uzunluğu	Katkı yan zincir uzunluğu (g/mol)	Anyonik monomer tipi ve oranı (%)	Uçucu kül kullanım oranı (%)
PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	0
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	2400	%90 Karboksilat %10 Sülfonat	0
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	2400	%70 Karboksilat %30 Sülfonat	0
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	2400	% 90 Karboksilat % 10 Fosfat	0
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>	21k	2400	% 70 Karboksilat % 30 Fosfat	0
PC <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	15
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	2400	%90 Karboksilat %10 Sülfonat	15
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	2400	%70 Karboksilat %30 Sülfonat	15
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	2400	% 90 Karboksilat % 10 Fosfat	15
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>	21k	2400	% 70 Karboksilat % 30 Fosfat	15
PC <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	30
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	2400	%90 Karboksilat %10 Sülfonat	30
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	2400	%70 Karboksilat %30 Sülfonat	30
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	2400	% 90 Karboksilat % 10 Fosfat	30
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>	21k	2400	% 70 Karboksilat % 30 Fosfat	30
PC <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	2400	% 100 Karboksilat	45
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	2400	%90 Karboksilat %10 Sülfonat	45
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	2400	%70 Karboksilat %30 Sülfonat	45
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	2400	% 90 Karboksilat % 10 Fosfat	45
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>	21k	2400	% 70 Karboksilat % 30 Fosfat	45

### 3.2.3. Karışım oranları

Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak çimento ve uçucu kül (çimento ağırlığının %0, 15, 30 ve 45'i kadar), agrega olarak standart kum, kimyasal katkı olarak ise birbirinden farklı on dört adet polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır.

Karışımların priz sürelerini incelemek amacıyla toplamda 56 adet hamur karışımı hazırlanmıştır. Önceki çalışmada olduğu gibi karışımlarda bağlayıcı miktarı 1000 g, su/bağlayıcı oranı 0,35 ve su azaltıcı katkı oranı ise bağlayıcı oranının %0,1'i olarak kullanılmıştır (Şahin, 2020).

Karışımların Marsh-hunisi ve mini-yayılma davranışlarını incelemek amacıyla toplamda 336 adet hamur karışımı hazırlanmıştır. Önceki çalışmalardan hareketle bu çalışmada hamur karışımlarının su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak seçilmiştir. Her bir karışımda 700 g bağlayıcı ve her karışımda da bağlayıcı ağırlığının %0,75 - 2,0 arasında değişen altı farklı oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır (Aitcin, 2004).

Karışımların zamana bağlı yayılma, zamana bağlı mini V hunisi, 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 28 ve 90 günlük su emme kapasitelerini incelemek amacıyla toplamda 448 adet harç karışımı ve 1176 adet numune hazırlanmıştır. Harçların karışım oranları ASTM C109 standardına uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Harç karışımları homojen şekilde Hobart mikserinde üretilmiştir. Tüm karışımlarda bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değeri sırasıyla, 500 g, 0,485, 2,75 ve  $270 \pm 20$  mm olarak sabit tutulmuştur. Hedef yayılma değeri su azaltıcı katkılar ile sağlanmıştır.

Ayrıca hamur ve harç karışımların reolojik özelliklerini incelemek amacıyla toplamda 344 adet karışım hazırlanmıştır. Hamur karışımlarında su/bağlayıcı oranları 0,32 ve 0,35, katkı oranları ise bağlayıcı ağırlığının %0, 0,1 ve 0,2 olarak kullanılmıştır. Harç karışımlarında ise su/bağlayıcı oranları 0,5 ve 0,6, katkı oranları ise bağlayıcı ağırlığının %0, 0,1, 0,2 ve 0,3 olarak kullanılmıştır. Tüm hamur ve harç karışımlarında bağlayıcı miktarı 500 g kullanılmıştır. Buna ilaveten tüm harç karışımlarında kum/bağlayıcı oranı 2,75 olarak sabit tutulmuştur.



### 3.2.4. Numunelerin kürlenmesi

Üretilen numuneler, ASTM C 511 standardına uygun olarak  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa ve minimum %95 nem oranına sahip kr kabininde prizini alması için bekletilmiştir. Numuneler üretimden itibaren 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmış ve deney gününe kadar Şekil 3.4'te gösterilen,  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa sahip kirece doğun su kr havuzunda kr edilmiştir.



Şekil 3.4. Kr havuzu

### 3.2.5. Fourier dönüşümlü kızılltesi spektrometresi analizi

Su azaltıcı katkıların kimyasal yapıları FTIR analizi ile karakterize edilmiştir. FTIR spektrumları, Perkin Elmer Spectrum Two FTIR spektrometresi kullanılarak kaydedilmiştir (Şekil 3.5).  $4000\text{ cm}^{-1}$  ile  $400\text{ cm}^{-1}$  arasındaki bölge, otuz iki tarama kullanılarak  $4\text{ cm}^{-1}$  çözünürlükte kaydedilmiştir. FTIR ilk olarak örnek ölçümlerden önce arka plan sinyali için havada kalibre edilmiştir.



Şekil 3.5. FTIR deney aleti

### 3.2.6. Jel geçirgenlik kromatografisi analizi

Su azaltıcı katkıların ortalama molekül ağırlıkları ve moleküler ağırlık dağılımları, RI (Kırılma İndeksi) ve RALS (Dik Açık-Işık Saçılımı) dedektörlerini içeren TDA 305 dedektörü ile Malvern Viscotek GPCmax jel geçirgenlik kromatografisi kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3.6). Bu amaçla, 2,0 mg/mL konsantrasyonlu bir su azaltıcı katkı çözeltisi hazırlanmıştır. Numuneler, 0,7 mL/dk'lık bir akış hızında eluent olarak %0,1 NaNO<sub>3</sub> sulu çözeltisi kullanılarak analiz edilmiştir. Kalibrasyon standartları olarak dekstran (glukan) ve polietilen glikol kullanılmıştır.



Şekil 3.6. GPC analizi deney aleti

### 3.2.7. Toplam organik karbon analizi

Çimento taneciklerinin yüzeyine adsorbe olan su azaltıcı katkı moleküllerinin miktarları TOC analizi yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. TOC analizi deney aleti

Bu analiz yöntemi ile hem inorganik karbon miktarı hem de toplam karbon miktarı ölçülmektedir. Ölçülen toplam organik karbon miktarından inorganik karbon miktarı çıkarılarak TOC miktarı belirlenmektedir. Literatürde yapılan TOC analizlerinden hareketle aslında tüm yapılan analiz yöntemleri temelde birbiri ile benzemekte olup bu çalışmada Feng ve diğerleri (2018) tarafından yapılan TOC analizi yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak farklı tipte su azaltıcı katkı ve sudan oluşan 3,2 g/lt'lik derişimlerde 32 g çözeltiler hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltilere 16 g çimento ilave edilmiş ve 60 dakika boyunca 2500 rpm'de Şekil 3.6'da gösterilen manyetik bir karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmıştır. Katı ve sıvı fazlar 4000 rpm'de 10 dk boyunca santrifüj kullanılarak ayrıştırılmıştır (Şekil 3.8).



**Şekil 3.8.** Katı ve sıvı fazın manyetik karıştırıcı vasıtasıyla ayrıştırılması. **A)** Karışık faz **B)** Manyetik karıştırıcı **C)** Ayrılmış faz halleri

Katı ve sıvı fazlar ayrıştırıldıktan sonra süpernatant ayrı bir kaba alınarak filtrasyon ile ayrıldıktan sonra de-iyonize su ile seyreltilmiştir. Çimento ile temastan önce ve sonra ölçülen konsantrasyon arasındaki fark, adsorbe olan katkı maddesini ifade etmektedir. Adsorpsiyon miktarı Denklem 3.1.'e göre hesaplanmıştır.

$$Q = \frac{(T_0 + T_C - T_1)V}{w} \quad (3.1)$$

Burada  $Q$ , çimento üzerindeki su azaltıcı katkı adsorpsiyon miktarıdır (mg/lt).  $T_0$ , çimento eklenmeden önce çözeltinin TOC konsantrasyonudur (mg TOC/lt).  $T_c$ , çimentonun TOC konsantrasyonudur (mg TOC/lt).  $T_1$ , su azaltıcı katkının çimento partiküllerinin yüzeyinde adsorpsiyon dengesinde olduğundaki çözeltinin TOC konsantrasyonudur (mg TOC/lt).  $V$ , çözeltinin hacmidir (lt).  $w$ , su azaltıcı katkının birim kütle başına düşen TOC konsantrasyonudur (mg TOC/mg katkı).  $m$ , çimentonun kütlesidir (g).

### 3.2.8. Priz sürelerinin belirlenmesi

Hamur karışımlarının başlangıç ve bitiş süreleri otomatik vicat cihazı yardımıyla ASTM C 191 standardına uygun olarak belirlenmiştir (Şekil 3.9). Söz konusu deney standardına göre vicat iğnesinin kendi ağırlığı ile belirli bir yükseklikten belirli zaman aralıklarında hamur karışımının üzerine düşürülmesi esasına dayanmaktadır. Bölüm 3.2.1'de tarif

edilen karışım yöntemi doğrultusunda karıştırma işlemi yapıldıktan sonra hamur karışımları vicat kalıbına herhangi bir vibrasyon yapılmadan yerleştirilmiştir. Cihaza deney başlangıç süresi girildikten sonra ölçüm almaya başlanmıştır. Cihaz her vuruş yaptıktan 30 sn sonra iğnenin hamur karışımına battığı yükseklik ölçülmüştür. Vicat cihazı, priz başlangıç süresini belirlemek amacıyla her 15 dakikada bir, priz bitiş süresini belirlemek amacıyla ise her 30 dakikada bir vuruş yapacak şekilde ayarlanmıştır. Priz başlangıç süresi iğnenin hamur karışımına  $36\pm 1$  mm battığı süre ile deney başlangıç süresi arasındaki zaman, priz bitiş süresi ise iğnenin hamur karışımına 0,5 mm battığı süre ile deney başlangıç süresi arasındaki zaman olarak kaydedilmiştir.



**Şekil 3.9.** Priz süresi deney aleti

### **3.2.9. Marsh-hunisi akış süresi ve mini-çökme değerlerinin belirlenmesi**

Su azaltıcı katkıların bağlayıcı malzeme ile uyumlu olup olmadığı çimento hamuru karışımları hazırlanarak Marsh-hunisi akış süresi ve mini-yayılma deneyleri ile incelenmiştir (Şekil 3.10). Marsh-hunisi deneyi, hazırlanan hamur karışımının standart Marsh-hunisinden geçiş süresinin belirlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu deney yönteminde, akış süresinin katkı dozajıyla değişimi incelenerek “doygunluk noktası”

belirlenmektedir. Çimento hamurunda akışkanlaştırıcı katkı dozajı arttıkça akış süresi azalmaktadır. Ancak, katkı dozajının belirli bir sınırın üstüne kullanılmasıyla akış süresinde kayda değer bir değişim görülmektedir. Bu katkı dozajı, katkı-çimento ikilisinde kullanılan akışkanlaştırıcı katkının doygunluk noktası olarak tanımlanmaktadır. Ekonomik zararının yanında, bu dozajın üzerinde katkı kullanımı ayrıışmaya neden olabilmektedir (Aİtcin, 2004).

Önceki çalışmalarda önerilen 0,35-0,40 su/bağlayıcı oranları dikkate alınarak bu çalışmada karışımların su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak seçilmiştir. Tüm karışımlarda çimento ve su miktarları sabit tutulmuştur. Çimento kütlesinin % 0,75'i ile % 2,0'si arasında değişen oranlarda su azaltıcı katkı kullanılarak hamur karışımları hazırlanmıştır. Yaklaşık 1,2 lt hacimli homojen çimento hamuru karışımları hazırlanmasından hemen sonra alt ucu parmakla kapatılan Marsh-hunisi içine dökülüp daha sonra parmak huni ucundan kaldırılarak 700 ml hamur boşalana kadar geçen süre ölçülmüştür. Ölçülen süre o karışımın akış süresi olarak kaydedilmiştir. Karışımlarda ayrıışma oluşturan düzeye kadar aynı karışım daha fazla akışkanlaştırıcı katkı dozajıyla hazırlanıp, deney tekrarlanmıştır (Aİtcin, 2004). Buna ilaveten her deney tekrarında karışımların sıcaklıkları termometre yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir.



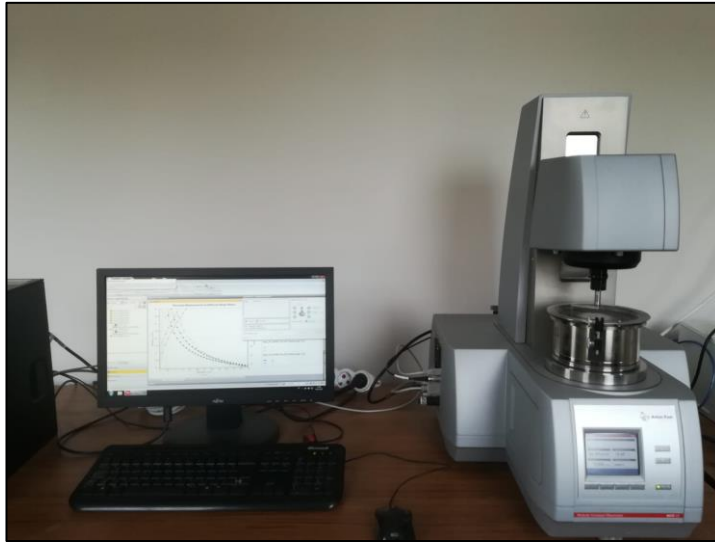
**Şekil 3.10.** Marsh-hunisi ve mini-yayımla deneyleri. **A)** Marsh-hunisi **B)** Mini-çökme



Marsh-hunisi deneyi için hazırlanan hamur karışımı mini-çökme deneyinde de kullanılmıştır. Bu deneyde 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 koni biçimli bir aparatın (alt ve üstü açık kalıbın) içine doldurulmaktadır. Yayılma aparatı düşey olarak yavaşça kaldırılmakta ve yayılmanın tamamlanması için bir süre (10 - 20 sn) beklenmektedir. Daha sonra cetvel yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınmakta ve kaydedilmektedir (Kantro, 1980).

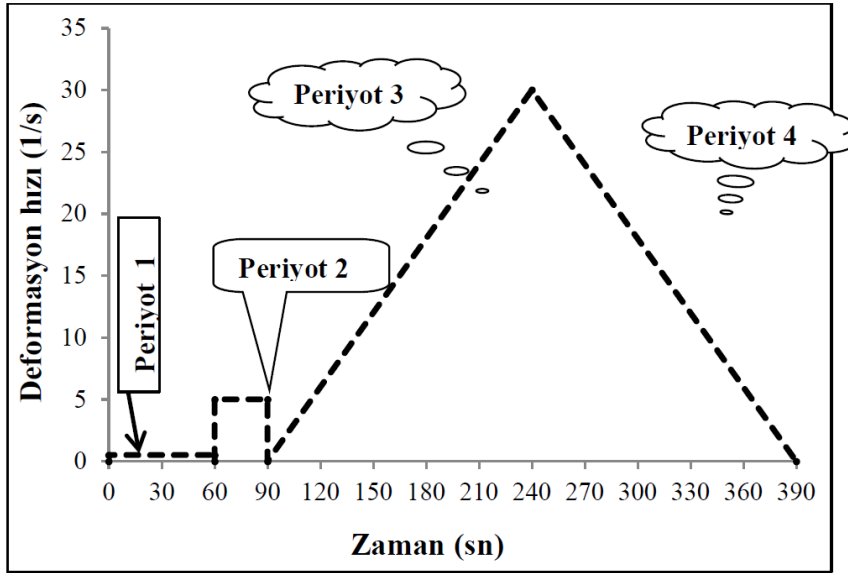
### 3.2.10. Reolojik özelliklerinin belirlenmesi

Hamur ve harç karışımlarının reolojik özellikleri bilyeli ölçüm sistemine sahip Şekil 3.11'de gösterilen reometre yardımıyla belirlenmiştir (Mardani-Aghabaglou, 2016; Felekoğlu, 2009; Schatzmann ve diğerleri, 2004; Schatzmann, Fischer ve Bezzola 2003). Reometrenin ulaşabileceği maksimum deformasyon hızı  $35 \text{ s}^{-1}$ 'dir. Bu değer 8 mm'lik bilyeli sistemin 60 devir/dk'lık hızla dönmesine eşdeğerdir. Buna ilaveten bu sistemde ölçülebilecek maksimum tork değeri 125 mNm'dir. Buna bağlı olarak söz konusu bilyeli sistemde ulaşılabilir maksimum kayma gerilmesi 2850 Pa'dır. Karışımların reolojik parametreleri Rheocompass yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 3.11. Reometre cihazı

Çalışma kapsamında yapılan reoloji deneyinde, diğer araştırmacılar tarafından da uygulanan (Mardani-Aghabaglou, 2016; Felekoğlu, 2009) ve Şekil 3.12’de gösterilen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem dört farklı periyottan oluşmaktadır. Her bir periyot aşağıda açıklanmıştır;



**Şekil 3.12.** Hamur ve harç karışımlarının reolojik parametrelerinin incelenmesinde uygulanan periyotlar (Mardani-Aghabaglou, 2016)

1. Periyot: Karışımlar örselenmeden bilye ölçüm noktasına indirilerek  $0,5 \text{ s}^{-1}$ 'lik sabit deformasyon hızıyla 60 saniye boyunca her 2 saniyede bir olacak şekilde toplamda otuz adet tork ölçümü alınmaktadır. Bu periyotta karışımların statik (durgun halde) eşik kayma gerilmeleri ölçülmektedir.
2. Periyot: 1. periyotun ardından bilye karışım içerisinde  $5 \text{ s}^{-1}$ 'lik sabit deformasyon hızı ile 30 saniye boyunca döndürülmektedir. Bu periyot mikserde karıştırma esnasında meydana gelen geçmiş kayma gerilmesini ortadan kaldırmak amacıyla uygulanmaktadır.
3. Periyot: 2. periyottan sonra bilye karışım içerisinde deformasyon hızı 0'dan  $30 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar artırılarak 150 saniye daha döndürülmeye devam edilmektedir. Her 5 saniyede bir olmak üzere toplamda otuz adet ölçüm alınmaktadır. Bu periyot akma eğrisinin çıkış kısmının oluşturulması amacıyla yapılmaktadır.



4. Periyot: 3. periyottan sonra bilyenin karışım içerisindeki deformasyon hızı  $30 \text{ s}^{-1}$ 'den  $0 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar azaltılarak 150 saniye daha döndürülmeye devam edilmektedir. Her 5 saniyede bir olmak üzere toplamda otuz adet ölçüm alınmaktadır. Bu periyot akma eğrisinin iniş kısmının oluşturulması amacıyla yapılmaktadır.

Bu sistemde ham veriler dönme hızı ( $\Omega$ ) ve moment (T) olarak ölçülmektedir. Rheocompass programında ampirik katsayılar yardımı ile dönme hızı ( $\Omega$ ), deformasyon hızına ( $\dot{\gamma}$ ), moment (T) ise kayma gerilmesine ( $\tau$ ) dönüştürülmektedir (Mardani-Aghabaglou 2016, Schatzmann, 2005).

Hamur ve harç karışımlarının reolojik özellikleri statik ve dinamik olmak üzere iki farklı açıdan incelenmiştir. İlk aşamada, karışımların çok düşük deformasyon hızlarında statik eşik kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Statik eşik kayma gerilmesi kısaca karışıma herhangi bir ön işlem uygulanmadan karışım hazırlandıktan hemen sonraki eşik kayma gerilmesi olarak ifade edilmektedir. Bu aşamada karışımların ilk andaki bilye hareketine karşı dirençleri ölçülmüştür. Statik eşik kayma gerilmelerinin tespitinde 1. periyotta ölçülen değerler kullanılmıştır. İkinci aşamada karışımlara uygulanan deformasyon hızları belirli kurallara göre değiştirilmiş ve reometreden elde edilen 4. periyottaki veriler dikkate alınarak karışımların akma eğrileri belirlenmiştir. Akma eğrisi verileri Herschel-Bulkley modeli yardımıyla analiz edilerek her akma eğrisi için dinamik eşik kayma gerilmeleri ve nihai viskozite değerleri hesaplanmıştır. Dinamik eşik kayma gerilmesi akma eğrisinin y eksenini kestiği nokta olarak ifade edilmektedir. Dinamik eşik kayma gerilmesi statik eşik kayma gerilmesinin aksine doğrudan verilerden değil, modelden alınan bir büyüklüktür.

### **3.2.11. Zamana bağlı yayılma değerlerinin belirlenmesi**

Harç karışımlarının kıvamlarını koruyabilme kapasiteleri, zamana bağlı yayılma deneyleri ile incelenmiştir (Şekil 3.13). Harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri 1 saat boyunca her 15 dakikada bir ASTM C1437 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Standarda göre karışım, kuru ve temiz yayılma tablasının merkezine yerleştirilen yayılma aparatına iki aşamada doldurulmaktadır ve her aşama bir tokmak

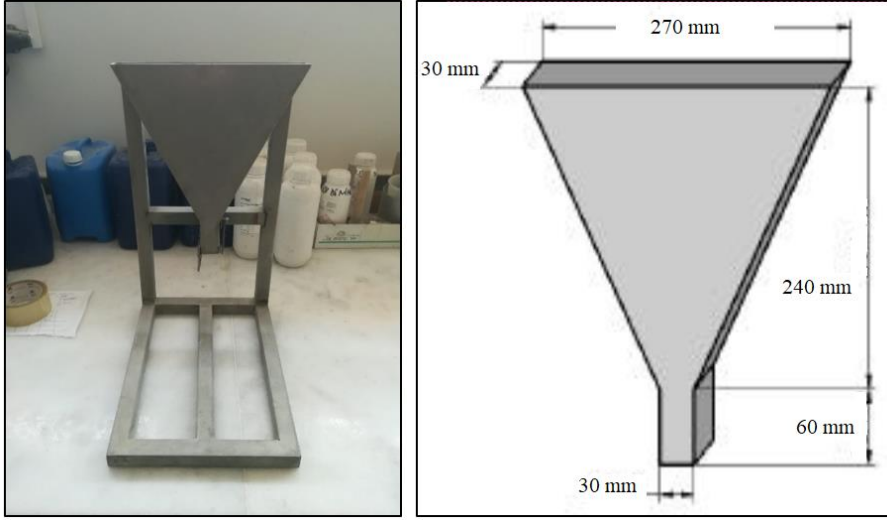
yardımla yirmi defa sıkıştırılmaktadır. Yaklaşık 1 dakika bekledikten sonra yayılma aparatı düşeyde yavaşça kaldırılarak yayılma tablasına 15 saniyede yirmi beş defa çevrim uygulanmaktadır. Daha sonra cetvel yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınmakta ve kaydedilmektedir.



**Şekil 3.13.** Zamana bağlı yayılma deneyi

### **3.2.12. Zamana bağlı mini V-hunisi akış süresi değerlerinin belirlenmesi**

Harç karışımlarının akış performansları zamana bağlı mini V-hunisi testi ile incelenmiştir (Şekil 3.14). Harç karışımlarının zamana bağlı akış süreleri 1 saat boyunca her 15 dakikada bir EFNARC (2002) kriterlerine uygun olarak belirlenmiştir. Standarda göre mini V-hunisi herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan tamamen harçla doldurulmaktadır. Ardından zaman kaybetmeden mini V-hunisinin altındaki kapak açılarak harcın kendiliğinden akması sağlanmaktadır. Kapak açıldığı anda süre başlatılmaktadır. Akış esnasında mini V-hunisine tepeden bakılarak tabandan ışığın görüldüğü anda süre durdurulmakta ve akış süresi belirlenmektedir.



Şekil 3.14. Mini V-hunisi deneyi

### 3.2.13. Basınç dayanımının belirlenmesi

Çalışma kapsamında kullanılan su azaltıcı katkıların, harçların dayanımlarına etkisi basınç testi ile incelenmiştir (Şekil 3.15). Her bir değer üç farklı numunenin ortalaması üzerinden belirlenmiştir. Üretilen harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç deneyleri 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C109 standardına göre yapılmıştır. Standarda göre yükleme hızının 900 ile 1800 N/s aralığında olması gerekmektedir. Bu çalışmada bütün basınç deneyleri, sabit yükleme hızı (1500 N/s) altında gerçekleştirilmiştir. Bu standart doğrultusunda basınç dayanımı ( $f_m$ ), Denklem 3.2'e göre hesaplanmaktadır.

$$f_m = P/A \quad (3.2)$$

Burada, (P) numune üzerine uygulanan maksimum yükü, (A) ise yükün uygulandığı numunenin yüzey alanını ifade etmektedir.



**Şekil 3.15.** Basınç test cihazı

### 3.2.14. Su emme kapasitelerinin belirlenmesi

Çimentolu sistemlerin geçirimsizliği hakkında fikir edinebilmek amacı ile harç numuneleri hazırlanarak su emme oranları incelenmiştir. Her bir değer üç farklı numunenin ortalaması üzerinden belirlenmiştir. Üretilen harç karışımlarının 28 ve 90 günlük su emme deneyleri 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C642 standardına göre yapılmıştır. Bu standart doğrultusunda su emme oranı ( $m$ ), Denklem 3.3'e göre hesaplanmaktadır.

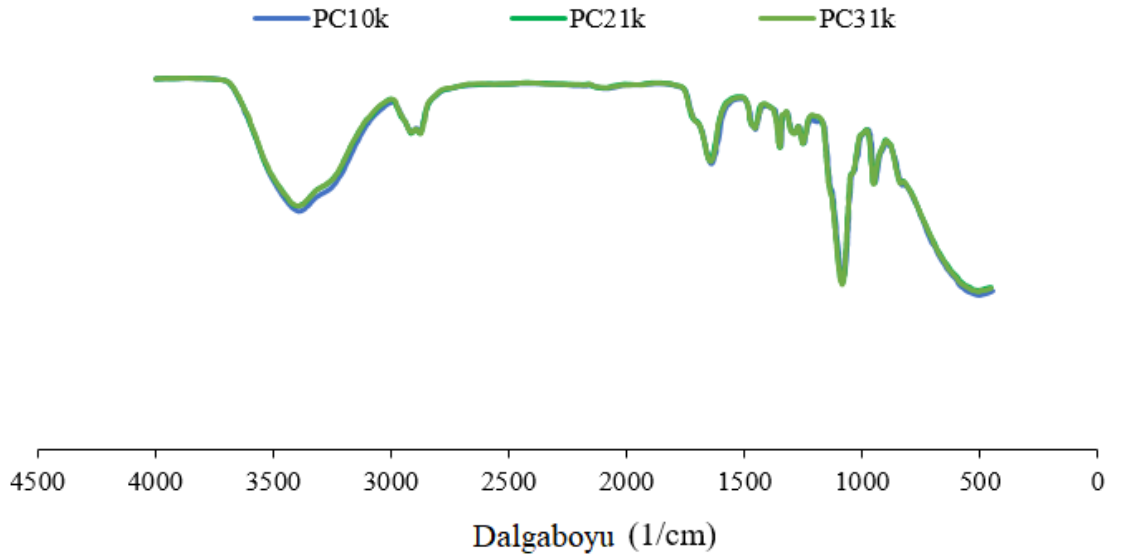
$$m = \frac{b-a}{a} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada, ( $a$ ) etüv kuru ağırlığı, ( $b$ ) ise suya doymuş kuru yüzey ağırlığını ifade etmektedir. Söz konusu standarda göre etüv kuru ağırlık numunenin 24 saat boyunca  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde kurutulmasının ardından ölçülen ağırlığıdır. Suya doymuş kuru yüzey ağırlık ise sudan çıkarılan numunenin yüzeyinin havlu ile kurulmasının ardından ölçülen ağırlığı olmaktadır.

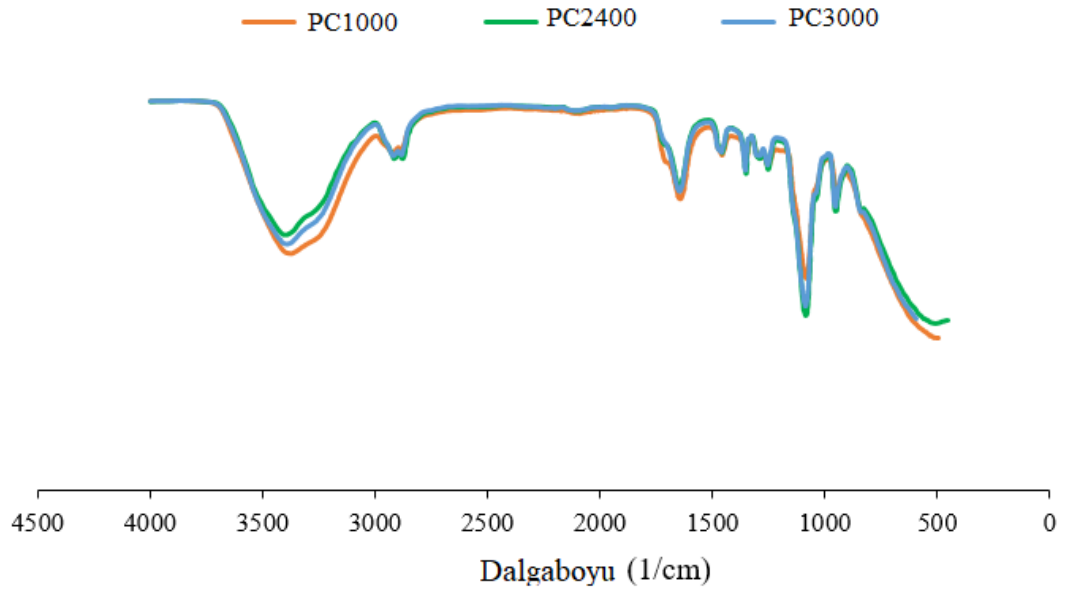
## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1. FTIR Analizi Sonuçları

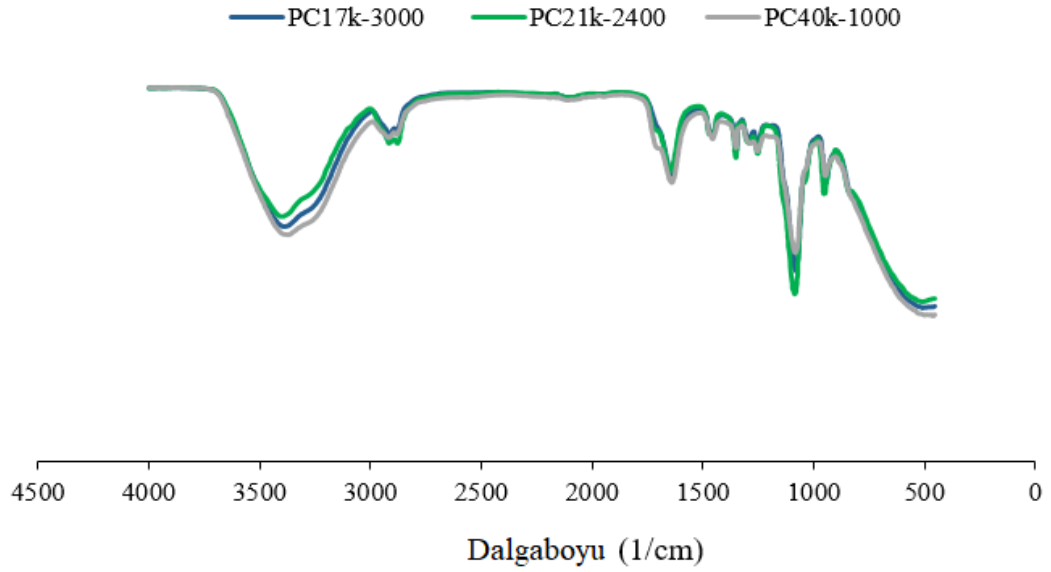
Elektromanyetik ışımının moleküller tarafından soğurulması esasına dayanan FTIR analizi ile bileşiklerin yapılarındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı ve bağ yapısı belirlenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında sentezlenen katkıların bağ yapıları FTIR analizi ile incelenmiştir. Ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu, sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları ile anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı olan su azaltıcı katkılara ait FTIR spektrumları sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Sentezlenen katkıların fosfat, sülfonat ve karboksilat anyonik monomer fonksiyonel gruplarının bağ yapıları birbirine çok yakın olduğundan dolayı FTIR spektrumları benzer çıkmıştır. Bu sonuçlar tüm sentezleme işlemlerinin doğru yapıldığını göstermektedir. Katkıların FTIR spektrumları incelendiğinde  $3378\text{ cm}^{-1}$ 'deki geniş tepe ve  $2918\text{ cm}^{-1}$ 'deki tepe, sırasıyla O–H ve C–H gerinme bantlarına karşılık gelmektedir. Spektrumlar  $1645\text{ cm}^{-1}$ 'de (C=H) gerinme titreşim zirvesine,  $1087\text{ cm}^{-1}$ 'deki tepe ise C–O–C gerinmesine karşılık gelmektedir.



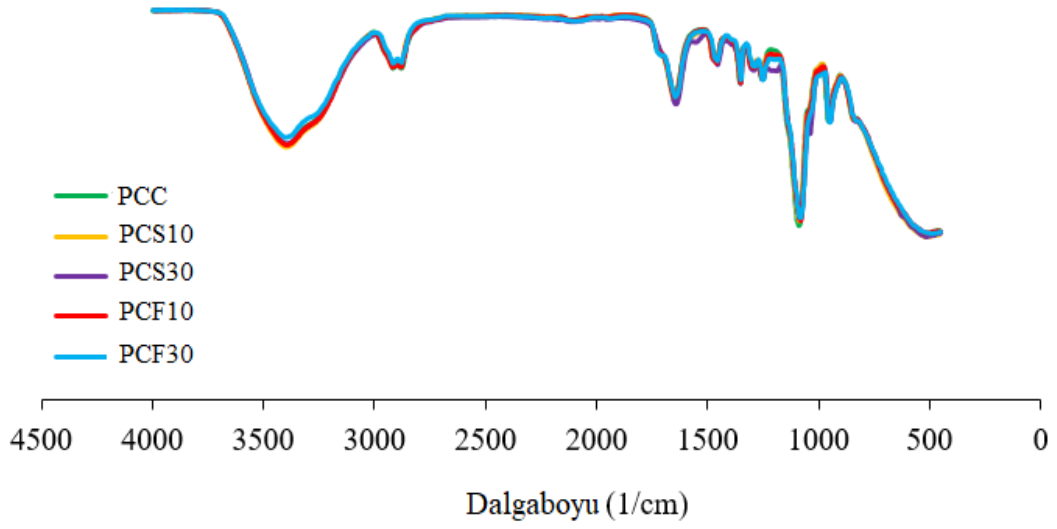
**Şekil 4.1.** Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların FTIR spektrumları



**Şekil 4.2.** Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların FTIR spektrumları



**Şekil 4.3.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların FTIR spektrumları



**Şekil 4.4.** Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların FTIR spektrumları

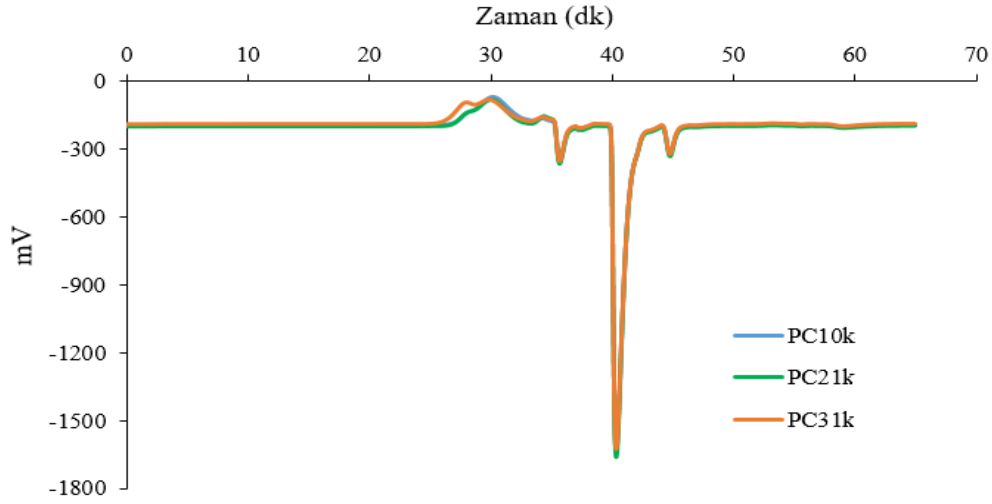
## 4.2. GPC Analizi Sonuçları

### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Çalışmanın birinci aşamasında kullanılan ana zincir uzunluğu birbirinden farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları Şekil 4.5’de, katkı özellikleri Çizelge 4.1’de ve katkıların PDI,  $M_n$  ve  $M_w$  değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Söz konusu katkıların anyonik/nanyonik grup oranı 3,47, serbest nanyonik grup miktarı 2,78 ve yan zincir uzunluğu 2400 g/mol olacak şekilde sabit tutulmuş olup katkıların ana zincir uzunlukları ve dolayısıyla molekül ağırlıkları birbirinden farklıdır. Çizelge 4.1’den de görüldüğü üzere PC<sub>10k</sub>, PC<sub>21k</sub> ve PC<sub>31k</sub> katkılarının molekül ağırlıkları sırasıyla 24, 48 ve 71 kg/mol, ana zincir uzunlukları ise 10k, 21k ve 31k birimdir. Katkıların PDI değerleri 2,00-2,51 arasında,  $M_w$  değerleri 23718-71261 arasında  $M_n$  değerleri ise 9733-28343 arasındadır.

Katkıların ana zincir uzunluğu her bir ana zincir üzerinde sırasıyla ortalama 10, 21 ve 31 mol nanyonik grup barındıracak şekilde revize edilmiştir. Anyonik/nanyonik grup oranı her bir katkıda sabit olduğu için bir ana zincir üzerindeki anyonik grup sayısı da nanyonik grup sayıları ile orantılıdır. Örneğin nanyonik grup miktarı ortalama 10 mol olan katkı için anyonik grup miktarı ortalama 35 mol olarak ( $10 \times 3,47$ ) hesaplanmaktadır. Söz konusu katkıda ana zincir ortalama 10 adet nanyonik ve 35 adet anyonik gruptan meydana

gelmiştir. Tüm katkılar için bu hesap tekrar edildiğinde, ana zincir uzunluğunun nanyonik grup sayısı ile (yan zincir sayısı) doğru orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda ana zincir uzunlukları sırasıyla 10, 21 ve 31 birim olacak şekilde katsayı olarak ifade edilmiştir.



**Şekil 4.5.** Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları

**Çizelge 4.1.** Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

Katkı	Anyonik Monomer Tipi	Anyonik/Nanyonik Grup Oranı (mol/mol)*	Serbest Nanyonik Miktarı (mol)*	Molekül Ağırlığı (kg/mol)	Ana Zincir Uzunluğu *	Yan Zincir Molekül Ağırlığı (g/mol)**
PC <sub>10k</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	24	10k	2400
PC <sub>21k</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	48	21k	2400
PC <sub>31k</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	71	31k	2400

\* GPC analizinden hesaplanmış ve katsayı olarak verilmiştir.

\*\* Yan zincir molekül ağırlığı uzunluk ile doğru orantılıdır.

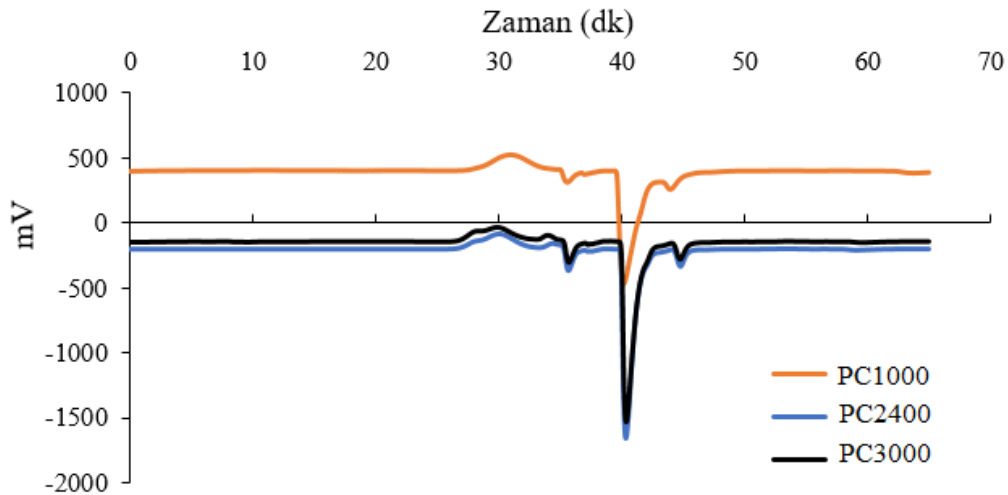


**Çizelge 4.2.** Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların PDI,  $M_w$  ve  $M_n$  değerleri

Katkı	PDI	$M_w$	$M_n$
PC <sub>10k</sub>	2,44	23718	9733
PC <sub>21k</sub>	2,00	47742	23836
PC <sub>31k</sub>	2,51	71261	28343

#### *Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan yan zincir uzunluğu birbirinden farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları Şekil 4.6'da, katkı özellikleri Çizelge 4.3'de ve katkıların PDI,  $M_n$  ve  $M_w$  değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Söz konusu katkıların anyonik/nanyonik grup oranı 3,47, serbest nanyonik grup miktarı 2,78 ve ana zincir uzunluğu 21k olacak şekilde sabit tutulmuş olup katkıların yan zincir uzunlukları ve dolayısıyla molekül ağırlıkları birbirinden farklıdır. Çizelge 4.3'den de görüldüğü üzere PC<sub>1000</sub>, PC<sub>2400</sub> ve PC<sub>3000</sub> katkılarının molekül ağırlıkları sırasıyla 23, 48 ve 60 kg/mol, yan zincir uzunlukları ise 1000, 2400 ve 3000 g/mol'dür. Katkıların PDI değerleri 1,42-2,00 arasında,  $M_w$  değerleri 23718-60435 arasında  $M_n$  değerleri ise 16440-30254 arasındadır.



**Şekil 4.6.** Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları

**Çizelge 4.3.** Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

<b>Katkı</b>	<b>Anyonik Monomer Tipi</b>	<b>Anyonik/Nanyonik k Grup Oranı (mol/mol)*</b>	<b>Serbest Nanyonik Miktarı (mol)*</b>	<b>Molekül Ağırlığı (kg/mol)</b>	<b>Ana Zincir Uzunluğu *</b>	<b>Yan Zincir Molekül Ağırlığı (g/mol)**</b>
PC <sub>1000</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	23	21k	1000
PC <sub>2400</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	48	21k	2400
PC <sub>3000</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	60	21k	3000

\* GPC analizinden hesaplanmış ve katsayı olarak verilmiştir.

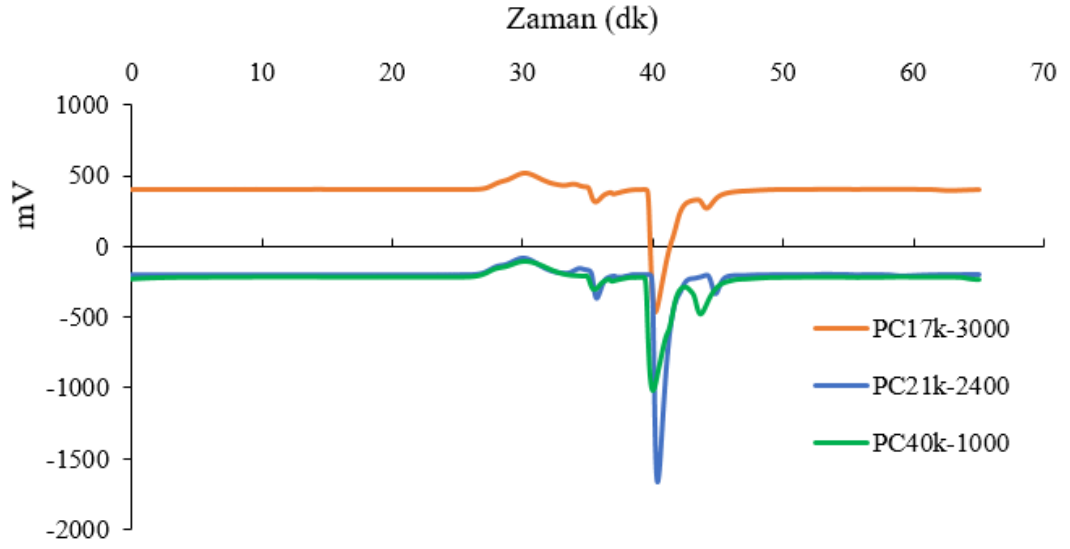
\*\* Yan zincir molekül ağırlığı uzunluk ile doğru orantılıdır.

**Çizelge 4.4.** Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların PDI, M<sub>w</sub> ve M<sub>n</sub> değerleri

<b>Katkı</b>	<b>PDI</b>	<b>M<sub>w</sub></b>	<b>M<sub>n</sub></b>
PC <sub>1000</sub>	1,42	23270	16440
PC <sub>2400</sub>	2,00	47742	23836
PC <sub>3000</sub>	1,99	60435	30254

#### ***Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışma üçüncü aşamasında kullanılan molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları birbirinden farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları Şekil 4.7’de, katkı özellikleri Çizelge 4.5’de ve katkıların PDI, M<sub>n</sub> ve M<sub>w</sub> değerleri ise Çizelge 4.6’da verilmiştir. Söz konusu katkıların anyonik/nanyonik grup oranı 3,47, serbest nanyonik grup miktarı 2,78 ve molekül ağırlığı 48 kg/mol olacak şekilde sabit tutulmuş olup katkıların ana zincir ve yan zincir uzunlukları birbirinden farklıdır. Çizelge 4.5’den de görüldüğü üzere PC<sub>17k-3000</sub>, PC<sub>21k-2400</sub> ve PC<sub>40k-1000</sub> katkılarının ana zincir uzunlukları sırasıyla 17k, 21k ve 40k, yan zincir uzunlukları ise 3000, 2400 ve 1000 g/mol’dür. Katkıların PDI değerleri 1,58-2,04 arasında, M<sub>w</sub> değerleri 47742-47838 arasında M<sub>n</sub> değerleri ise 23401-30173 arasındadır.



**Şekil 4.7.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları

**Çizelge 4.5.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

Katkı	Anyonik Monomer Tipi	Anyonik/Nanyonik Grup Oranı (mol/mol)*	Serbest Nanyonik Miktarı (mol)*	Molekül Ağırlığı (kg/mol)	Ana Zincir Uzunluğu*	Yan Zincir Molekül Ağırlığı (g/mol)**
PC <sub>17k-3000</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	48	17k	3000
PC <sub>21k-2400</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	48	21k	2400
PC <sub>40k-1000</sub>	Karboksilat	3,47	2,78	48	40k	1000

\* GPC analizinden hesaplanmış ve katsayı olarak verilmiştir.

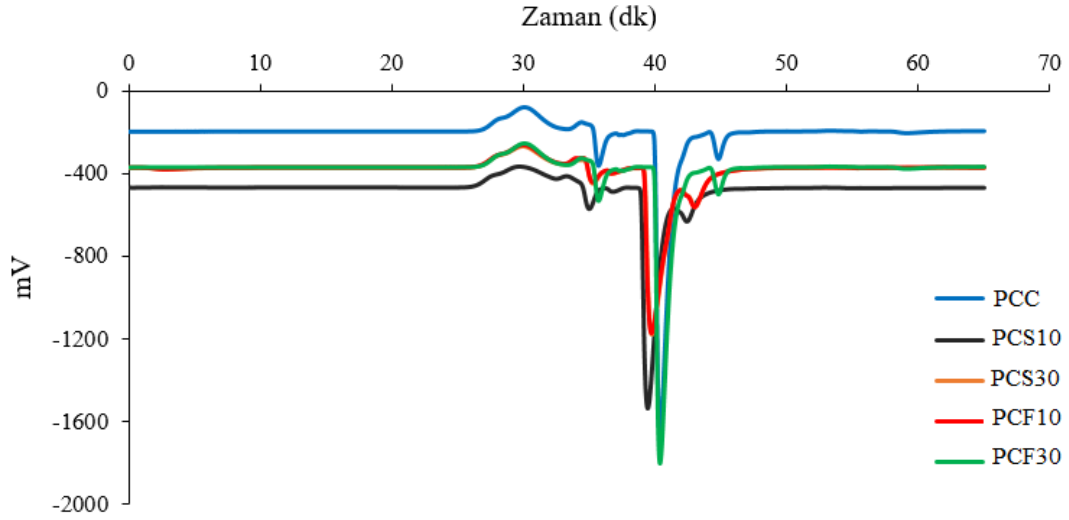
\*\* Yan zincir molekül ağırlığı uzunluk ile doğru orantılıdır.

**Çizelge 4.6.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların PDI,  $M_w$  ve  $M_n$  değerleri

Katkı	PDI	$M_w$	$M_n$
PC <sub>17k-3000</sub>	1,58	47794	30173
PC <sub>21k-2400</sub>	2,00	47742	23836
PC <sub>40k-1000</sub>	2,04	47838	23401

### *Anyonik monomer değişiminin etkisi*

Çalışma dördüncü aşamasında kullanılan anyonik monomer fonksiyonel grup içerikleri birbirinden farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları Şekil 4.8’de, katkı özellikleri Çizelge 4.7’de ve katkıların PDI,  $M_n$  ve  $M_w$  değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Söz konusu katkıların anyonik/nanyonik grup oranı 3,47, serbest nanyonik grup miktarı 2,78, molekül ağırlığı 48 kg/mol, ana zincir uzunluğu 21k ve yan zincir uzunluğu ise 2400 g/mol olacak şekilde sabit tutulmuş olup katkıların anyonik monomer tipleri birbirinden farklıdır. Çizelge 4.7’den de görüldüğü üzere  $PC_C$ ,  $PC_{S10}$ ,  $PC_{S30}$ ,  $PC_{F10}$  ve  $PC_{F30}$  katkılarının anyonik monomer tipleri sırasıyla %100 karboksilat, %90 karboksilat %10 sülfonat, %70 karboksilat %30 sülfonat, %90 karboksilat %10 fosfat ve %70 karboksilat %30 fosfattır. Katkıların PDI değerleri 1,64-2,00 arasında,  $M_w$  değerleri ortalama 47742 civarında olup  $M_n$  değerleri ise 23871-29110 arasındadır.



**Şekil 4.8.** Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların GPC spektrumları

**Çizelge 4.7.** Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların özellikleri

Katkı	Anyonik Monomer Tipi	Anyonik/Nanyonik Grup Oranı (mol/mol)*	Serbest Nanyonik Miktarı (mol)*	Molekül Ağırlığı (kg/mol)	Ana Zincir Uzunluğu*	Yan Zincir Molekül Ağırlığı (g/mol)**
PC <sub>C</sub>	100% Karboksilat	3,47	2,78	48	21k	2400
PC <sub>S10</sub>	90% Karboksilat 10% Sülfonat	3,47	2,78	48	21k	2400
PC <sub>S30</sub>	70% Karboksilat 30% Sülfonat	3,47	2,78	48	21k	2400
PC <sub>F10</sub>	90% Karboksilat 10% Fosfat	3,47	2,78	48	21k	2400
PC <sub>F30</sub>	70% Karboksilat 30% Fosfat	3,47	2,78	48	21k	2400

\* GPC analizinden hesaplanmış ve katsayı olarak verilmiştir.

\*\* Yan zincir molekül ağırlığı uzunluk ile doğru orantılıdır.

**Çizelge 4.8.** Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların PDI, M<sub>w</sub> ve M<sub>n</sub> değerleri

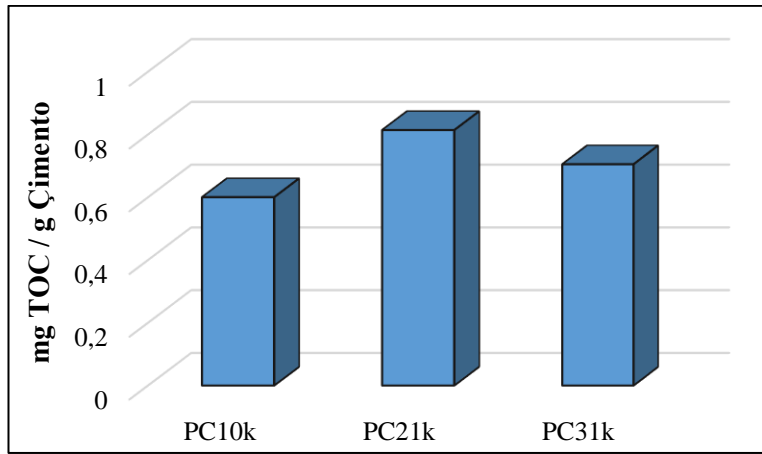
Katkı	PDI	M <sub>w</sub>	M <sub>n</sub>
PC <sub>C</sub>	2,00	47742	23871
PC <sub>S10</sub>	1,78	47742	26821
PC <sub>S30</sub>	1,64	47742	29110
PC <sub>F10</sub>	1,67	47742	28588
PC <sub>F30</sub>	1,80	47742	26523

### 4.3. TOC Analizi Sonuçları

#### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Su azaltıcı katkıların çimentolu sistemlerde dağılma yeteneği katkıların kimyasal yapısına bağlı olarak değişmektedir. Kimyasal katkıların çimentolu sistemlerinin dağılma etkinliğini daha iyi gösterebilmesi için çimento tanecikleri üzerine adsorbe olması önemlidir (Zhang ve diğerleri, 2017). Katkının çimento tanecik yüzeyi üzerine adsorpsiyonu, katkıdaki karboksilat gruplarının çimento yüzeyindeki Ca<sup>2+</sup> iyonları ile güçlü etkileşimi sonucu meydana gelmektedir (Wang ve diğerleri, 2018). Katkının

adsorpsiyon özellikleri ise çimentolu sistemlerin işlenebilirliğini, hidrasyon sürecini ve dayanımını etkilemektedir (Siler, Kratky ve De Belie, 2012). Katkıların adsorpsiyonu, moleküler yapısına bağlıdır (Plank ve Sachsenhauser, 2009; Winnefeld ve diğerleri, 2007; Sakai, Yamada ve Ohta, 2003). Özellikle polikarboksilat esaslı katkıların ana ve yan zincir uzunlukları ile molekül ağırlıkları katkıların adsorpsiyon davranışını belirlemede önemli rol oynamaktadır (Aİtcin ve Flatt, 2016; Flatt ve diğerleri, 2009). Çalışmanın birinci aşamasında kullanılan ana zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları Şekil 4.9’da verilmiştir.



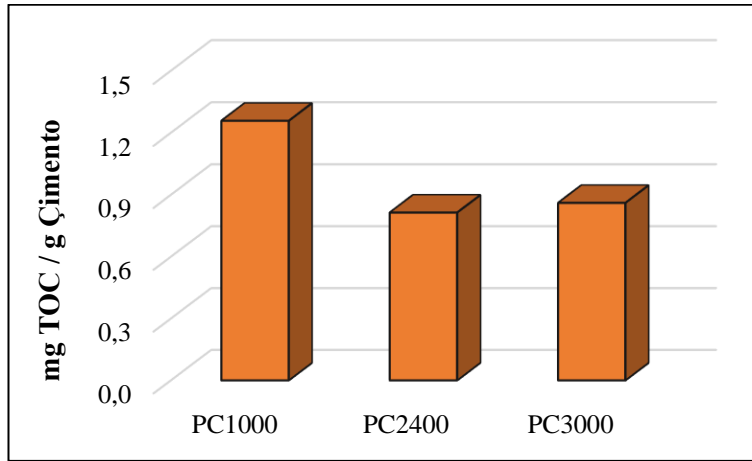
**Şekil 4.9.** Ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları

Şekil 4.9’den görüldüğü üzere yan zincir uzunluğu sabit katkılarda ana zincir uzunluğunun belirli bir değere kadar artmasıyla adsorpsiyon miktarları yaklaşık %36 oranında artmıştır. Daha sonra adsorpsiyon miktarı bir miktar azalmıştır. Ancak yine de PC<sub>31k-2400</sub> katkısının adsorpsiyonu PC<sub>10k-2400</sub> katkısından yaklaşık %18 daha yüksek olmuştur. Katkılarda ana zincir uzunluğunun artmasıyla ana zincirde bulunan karboksilat miktarı da artmaktadır. Karboksilat miktarının artması katkının adsorpsiyon davranışını önemli derecede etkilemektedir (He ve diğerleri, 2019). Özellikle ana zincirdeki anyonik grubun artması adsorpsiyon miktarını arttırmaktadır (Nicia ve Lowke, 2019). Ayrıca ana zincir uzunluğunun artmasıyla katkının molekül ağırlığı artmaktadır. Molekül ağırlığı yüksek katkıların adsorpsiyon miktarının yüksek ve güçlü olduğu Zhang ve diğerleri (2020) tarafından ifade edilmiştir. Yan zincir uzunlukları sabit ve ana zincir uzunlukları farklı katkılar arasında en iyi adsorpsiyon performansını PC<sub>21k-2400</sub> katkısı göstermiştir.

Katkının ana zincirinin fazla uzun olması tanecikler arasında köprüleme etkisinden dolayı polimerler birkaç çimento parçacığına aynı anda adsorbe olabilir veya serbest kalabilir (Matsuzawa ve diğerleri, 2019). Böylece PC<sub>31k-2400</sub> katkısının adsorpsiyon miktarında PC<sub>21k-2400</sub> katkısına kıyasla bir miktar azalma olduğu görülmüştür.

#### ***Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan yan zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları Şekil 4.10'da verilmiştir. Ana zincir uzunluğu sabit yan zincir uzunluğu farklı katkıların adsorpsiyon miktarlarına bakıldığında ise yan zincir uzunluğunun artmasıyla adsorpsiyon miktarlarının yaklaşık %15-20 aralığında azaldığı görülmektedir.



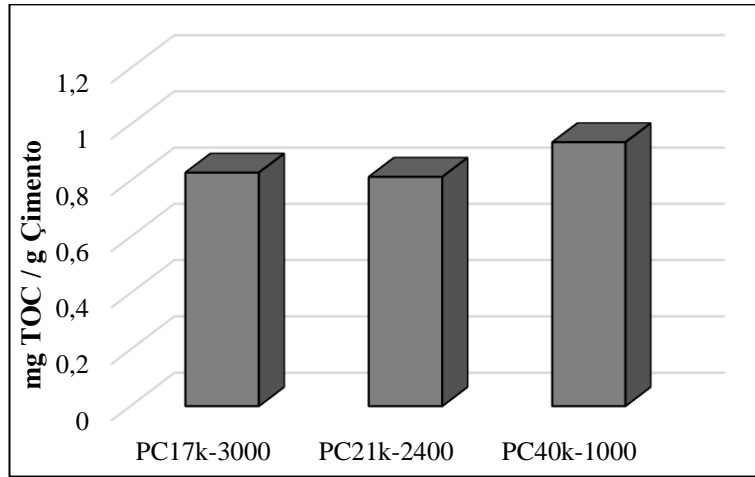
**Şekil 4.10.** Yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları

Literatüre göre molekül ağırlığı yüksek kısa yan zincire sahip katkılar çimento yüzeyine daha iyi adsorbe olmaktadır (Feng ve diğerleri, 2021; Zhang ve diğerleri, 2019). Öte yandan uzun yan zincire sahip katkıların adsorpsiyon miktarı kısa yan zincirli katkılara kıyasla daha düşük olmaktadır (Kong ve diğerleri, 2016; Plank ve diğerleri, 2010). Bunun nedeni, uzun yan zincirlerin karboksilat grubu üzerinde kalkan etkisi göstermesinden ve katkı molekülleri arasındaki güçlü sterik engellemeden kaynaklanabilir. Bu durumda uzun yan zincirlerin sterik etkisinin çok fazla artması sonucunda katkı moleküllerinin çimento yüzeyine yaklaşması engellenebilir ve katkının adsorpsiyonunun azalmasına

sebepe olabilir. Böylece katkı moleküllerinin parçacık yüzeyine adsorbe olma olasılığı azalır (Feng ve diğerleri, 2021; Wang ve diğerleri, 2021a). Ayrıca katkının etkinliğinde önemli rolü olan adsorpsiyon tabaka kalınlığı yan zincir uzunluğunun artmasıyla azalmaktadır (Wang ve diğerleri, 2021a). Diğer taraftan ise uzun yan zincirli katkıların çimento yüzeyine adsorpsiyonu London kuvvetleri ve iyon-dipol bağlarından dolayı zayıf olmaktadır (Kong ve diğerleri, 2016; Zingg ve diğerleri, 2009). Bu çalışmadaki ana zincir uzunlukları sabit yan zincir uzunlukları farklı olan katkılarda görüldüğü üzere yan zincir uzunluğunun artması sonucu adsorpsiyon miktarında azalma görülmüştür. PC<sub>21k-1000</sub> katkısının adsorpsiyonu en yüksek olmuştur ve yan zincir uzunluğu arttıkça yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı adsorpsiyonun azaldığı düşünülmektedir.

#### ***Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın üçüncü aşamasında kullanılan molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları Şekil 4.11’de verilmiştir.



**Şekil 4.11.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları

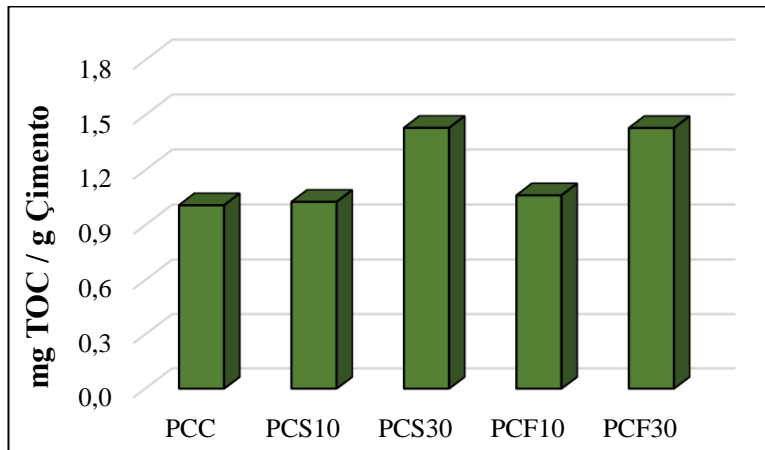
Sonuçlardan da görüldüğü üzere, aynı anda ana zincir uzunluğunun 40k'den 21k'ye azalması ve yan zincir uzunluğunun 1000 g/mol'den 2400 g/mol'e artması, katkının adsorpsiyon miktarında azalmaya neden olmuştur. Öte yandan, ana zincir uzunluğunun 21k'den 17k'ye düşmesiyle veya yan zincir uzunluğunun 2400 g/mol'den 1000 g/mol'e



azalması ile adsorpsiyon miktarı bir miktar artmıştır. PC<sub>21k-2400</sub> katkısının adsorpsiyon miktarının PC<sub>40k-1000</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub> katkısına kıyasla sırasıyla %15 ve %2 oranlarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. PC<sub>21k-2400</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub> katkılarının hemen hemen benzer adsorpsiyon değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ana zincirin kısalması ve yan zincirin uzaması yukarıda belirtilen mekanizmalardan dolayı adsorpsiyon miktarını azaltmıştır.

### *Anyonik monomer değişiminin etkisi*

Çalışmanın dördüncü aşamasında kullanılan anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları Şekil 4.12’de verilmiştir. Sonuçlara göre, karboksilat anyonik fonksiyonel grubun sülfonat ve fosfat ile ikame edilmesiyle katkıların adsorpsiyon performansı artmıştır. Bu performans fosfat ve sülfonat ikame oranının artışıyla daha da belirgin olmuştur. %10 ve %30 sülfonat ikame edilen PC<sub>S10</sub> ve PC<sub>S30</sub> katkılarının, %100 karboksilat olan PC<sub>C</sub> katkısına kıyasla adsorpsiyon miktarlarının sırasıyla %2 ve %42 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Benzer oranlar, fosfat içeren karışımlar içinde ölçülmüştür. PC<sub>F10</sub> ve PC<sub>F30</sub> katkılarının, %100 karboksilat olan PC<sub>C</sub> katkısına kıyasla adsorpsiyon miktarlarının sırasıyla %4 ve %42 oranlarında arttığı belirlenmiştir. He ve diğerleri (2019) ve Stecher ve Plank, (2019) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 4.12.** Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların adsorpsiyon miktarları

#### 4.4. Priz Süresi Sonuçları

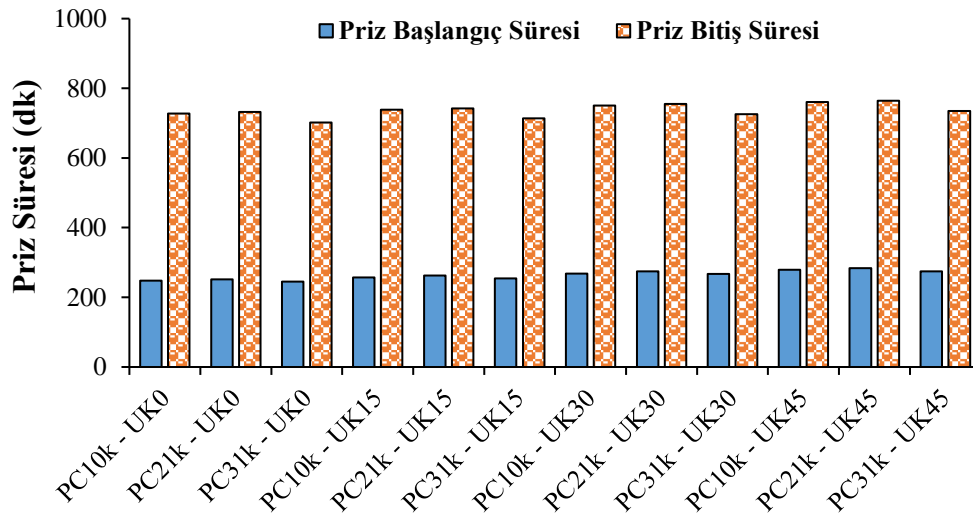
##### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Su azaltıcı katkı tipinden bağımsız olarak, hamur karışımlarında uçucu kül kullanımı, priz süresini uzatmıştır. Bu etki, uçucu kül ikame oranının artışıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Uçucu külün yüzeyinin çoğunlukla negatif yüklü olması nedeniyle, negatif yüklü karboksilat moleküllerinin uçucu kül parçacıklarının yüzeyine adsorpsiyonu düşüktür (Wang ve diğerleri, 2021b; Cangialosi, Notarnicola, Liberti ve Stencil 2009). Dolayısıyla, uçucu küle adsorbe olamayan katkı çimentoya adsorbe olur ve uçucu kül ikameli hamur karışımlarında, etkili su azaltıcı katkı/çimento oranında artış meydana gelir. Bu durum, çimentoya adsorbe olabilecek katkı miktarının artmasına yol açar. Böylece, çimentonun yüzeyi daha fazla katkı ile kaplanır ve priz süresinde artış meydana gelir. (Wang ve diğerleri, 2021b). Belirtilen bu mekanizmalardan dolayı çalışma kapsamında üretilen uçucu küllü karışımların priz süresinde gecikme meydana gelmiştir.

Su azaltıcı katkı tipinden bağımsız olarak karışımlarda su azaltıcı katkı kullanılması, priz süresini uzatmıştır. Bu durum, su azaltıcı katkının priz geciktirme etkisinden kaynaklanmaktadır. Farklı ana ve yan zincir yapısına sahip su azaltıcı katkılar, çimentonun priz süresi üzerine farklı etkiye sahiptir (Kong ve diğerleri, 2016). Literatürde, katkının çimentonun priz süresi üzerindeki etkisini açıklayan iki ana mekanizmadan bahsedilmiştir. İlkinde bilindiği gibi, su azaltıcı katkı anyonik monomeri çimento taneciğinin yüzeyindeki  $Ca^{2+}$  ile kompleks oluşturur ve çimentonun yüzeyini kaplar. Bu durum, suyun çimentoya ulaşmasını engelleyerek klinker fazının çözünmesini ve C-S-H oluşumunu yavaşlatır (Kong ve diğerleri, 2016). Ayrıca, katkının başta C-S-H olmak üzere hidrate ürünler üzerine adsorpsiyonu, hidratasyon ürünlerinin büyümesini engelleyerek priz süresinin gecikmesine neden olabilir (Hu, Sun ve Yang, 2019; Marchon ve Flatt, 2016). Boşluk çözeltisindeki katkı moleküllerinin ise  $Ca^{2+}$  iyonları ile kompleksleşme sonucu çözeltideki  $Ca^{2+}$  konsantrasyonunun azalmasına, dolayısıyla hidratasyon reaksiyonlarının yavaşlamasına neden olabileceği sıklıkla vurgulanmıştır (Zhang ve diğerleri, 2019; Hill ve Plank, 2004). İkinci durumda ise, çimento hamuruna

katkı ilavesiyle birlikte meydana gelen dağılıma, topaklaşan çimento tanelerinin su ile temasının artmasına neden olur. Bu sayede hidrasyon hızı artarak priz süresi kısalır.

Çalışmanın birinci aşamasında kullanılan ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları ile üretilen hamur karışımlarının başlangıç ve bitiş priz süreleri Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Katkının ana zincir uzunluğunun artmasıyla ana zincir üzerindeki karboksilat grup sayısında artış meydana gelmektedir. Dolayısıyla adsorpsiyonda artış meydana gelmesi, beklenen bir durumdur (He ve diğerleri, 2019). Ancak, buna rağmen ana zincir uzunluğunun artması, polimerlerin birbirine takılarak etkinliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Bununla birlikte daha önce de ifade edildiği gibi ana zincir çok uzunsa, katkı molekülleri aynı anda birkaç çimento parçacığına adsorbe olarak köprüleme etkisi ortaya çıkabilir (Tian, Kong, Su ve Wang, 2019; Kinoshita ve Nawa, 2000). Bu durum, adsorpsiyonun artmasına rağmen çimento parçacıklarının yüzeyinin tam olarak kaplanmasını engellemektedir. Ayrıca, ana zincir uzunluğunun artmasıyla artan karboksilat grup sayısı, çözültide serbest olarak bulunan  $Ca^{2+}$  iyonlarına da adsorbe olur (Plank ve Sachsensauer, 2009).



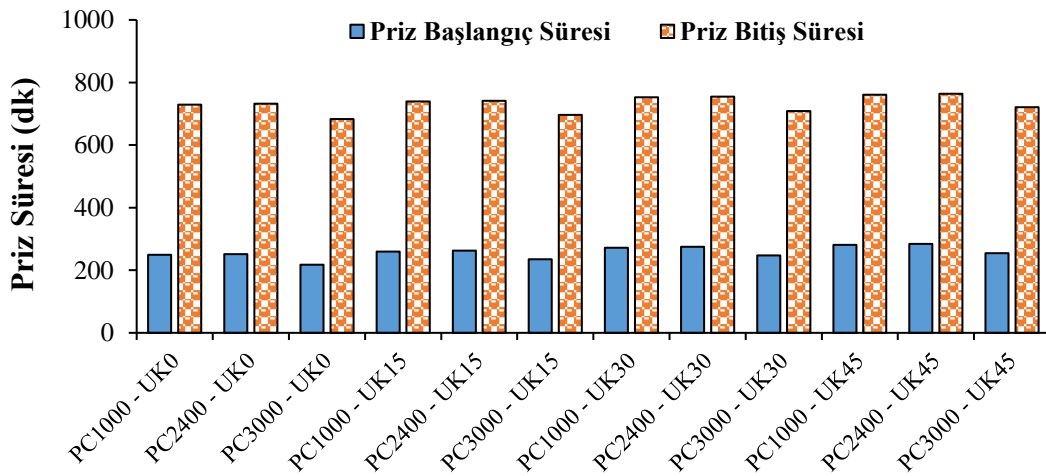
**Şekil 4.13.** Ana zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri

Zhang ve diğerleri (2019), su azaltıcı katkının çözültideki serbest  $Ca^{2+}$  iyonlarına adsorpsiyonunun, çimentonun priz süresini ciddi mertebede etkilemediğini belirtmiştir. Bu çalışmada, katkı ana zincir uzunluğu arttıkça, çözültideki serbest  $Ca^{2+}$  iyonlarına

adsorpsiyonun arttığı düşünülmektedir. Bu nedenle adsorpsiyon artışıyla paralel şekilde ortaya çıkan priz gecikmesi etkisi tam olarak görülemedi. Bu nedenle yan zincir uzunluğu aynı, ana zincir uzunluğu farklı katkıların çimentonun priz süresi üzerine ciddi etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

#### ***Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkı ile üretilen hamur karışımlarının başlangıç ve bitiş süreleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'ten de görüldüğü üzere, ana zincir uzunluğu sabit katılarda yan zincir uzunluğunun 1000 g/mol'den 2400 g/mol'e artması priz süresi üzerinde ciddi bir değişikliğe neden olmazken, yan zincir uzunluğunun 3000 g/mol'e artmasıyla başlangıç ve bitiş priz süreleri sırasıyla %12 ve %6 arasında azalmıştır. Kısa yan zincire sahip katkının uzun yan zincirlilere kıyasla daha güçlü adsorpsiyon sağladığı, dolayısıyla priz süresini daha fazla uzattığı, başka araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Qui ve diğerleri, 2011; Zingg ve diğerleri, 2009). Uzun yan zincirlerin yüksek sterik etkisi nedeniyle çimento taneciği üzerinde kalkan etkisi göstermesi, katkının çimentoya yaklaşmasını engellemektedir. Dolayısıyla adsorpsiyon miktarı azalmaktadır (Feng ve diğerleri, 2021). Zhang ve diğerleri (2019), yan zincir uzunluğu ve yoğunluğunun artmasının, daha düşük adsorpsiyona neden olduğunu, dolayısıyla priz süresini kısalttığını belirtmiştir.

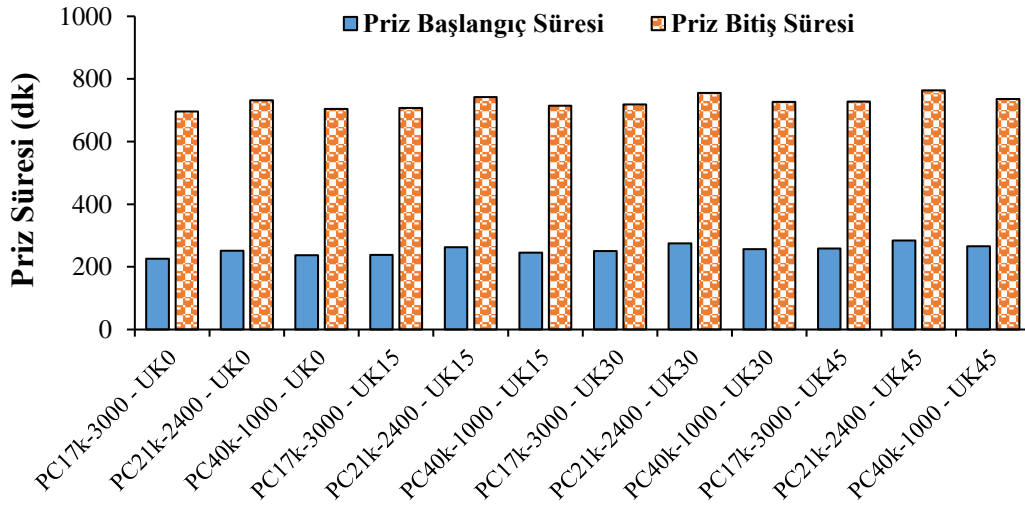


**Şekil 4.14.** Yan zincir uzunluğu farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri

Ayrıca, Yamada ve diğerleri (2000) priz süresinin çözeltideki serbest polimer konsantrasyonuyla büyük oranda ilişkili olduğunu ve uzun yan zincirlerin priz süresini kısalttığını belirtmiştir. Ding ve diğerleri (2012) daha kısa ana zincire ve daha uzun yan zincirlere sahip su azaltıcı katkıların daha güçlü gecikmeye neden olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, ana zincir uzunluğu sabit katkılarda yan zincir uzunluğunun artması, adsorpsiyonu olumsuz etkilemesi nedeniyle priz süresinin kısılmasına neden olduğu düşünülmektedir.

### ***Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın üçüncü aşamasında kullanılan molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları ile üretilen hamur karışımlarının başlangıç ve bitiş süreleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



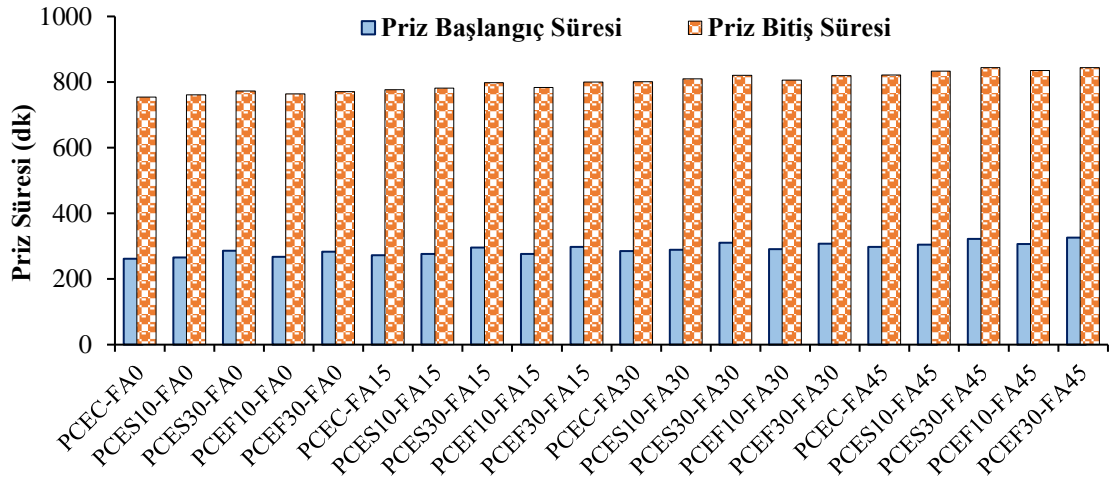
**Şekil 4.15.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri

Sonuçlara göre, külsüz karışımlara PC<sub>21k-2400</sub> katkısının ilave edilmesi, karışımların priz süresinin PC<sub>17k-3000</sub>’a göre %5-11 arasında uzamasına neden olmuştur. Ancak, ana zincirin uzaması ve yan zincirin kısalmasıyla elde edilen PC<sub>40k-1000</sub> katkısında, PC<sub>17k-3000</sub> ilave edilen karışımlara kıyasla priz süresi artışı %1-5 arasında olmuştur. Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’den anlaşıldığı üzere, hamur karışımlarının priz süresi üzerindeki etkin

parametrenin, katkının yan zincir uzunluğu olduğu düşünülmektedir. Bu sonuçların, hamur karışımlarının priz süresi üzerine büyük etkiye sahip olan adsorpsiyon sonuçlarıyla da uyumlu olduğu Şekil 4.11'den de anlaşılmıştır. Sonuç olarak, ana zincir uzunluğunun artması priz süresi üzerinde ciddi mertebede etki göstermezken, yan zincir uzunluğunun artması priz süresinin kısalmasına neden olmuştur. Tüm karışımlarda en uzun priz süresi PC<sub>21k-2400</sub> katkısı ile elde edilmiştir.

### ***Anyonik monomer değişiminin etkisi***

Çalışmanın dördüncü aşamasında kullanılan anyonik monomer tipi farkı su azaltıcı katkılar ile üretilen hamur karışımlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Sonuçlara göre fosfat ve sülfonat ikameli su azaltıcı katkıların priz geciktirme etkisinin karboksilat esaslı su azaltıcı katkıya oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Fosfat ve sülfonat ikame oranının artmasıyla bu durumun daha da belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. PC<sub>S10</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>S30</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>F10</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>F30</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarının priz süresi değerleri PC<sub>C</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla, %1,5, 9,2, 2,3 ve 8,0 oranlarında daha yüksek olmuştur. Bu etki, fosfat ve sülfonat ikameli katkıların Şekil 4.12'de verilen adsorpsiyon miktarının anyonik monomeri %100 karboksilat olan kontrol katkısına kıyasla daha fazla olduğundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca katkılarda bulunan sülfonat grupların çift anyonik yüklü olmasına bağlı olarak daha güçlü adsorpsiyon sağladığından çimentonun katılma ve priz süresini geciktirdiği düşünülmektedir (He ve diğerleri, 2019). Diğer taraftan fosfat içerikli katkıları, karboksilat esaslı olanlardan daha fazla geciktirme etkisi göstermektedir. Bunun ana sebebi, boşluk çözeltisinde Ca<sup>2+</sup> iyonları ile -COOH ve -PH<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşenlerinin kompleks oluşturması sonucu Ca<sup>2+</sup> konsantrasyonunun azalması ve C-S-H ve Ca(OH)<sub>2</sub> gibi hidratasyon ürünlerinin oluşmasının gecikmesidir. Söz konusu bu gecikmenin, katkıların kompleks oluşturma kapasitesi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Fosfat içerikli katkılarda iki negatif yüklü fosfonik asit grupları karboksilat esaslı katkılara kıyasla Ca<sup>2+</sup> iyonları ile daha güçlü kompleks oluşturma kapasitesine sahiptir. Böylece, hidratasyon sürecinin daha da gecikmesine neden olmaktadır (Wang ve diğerleri, 2020).

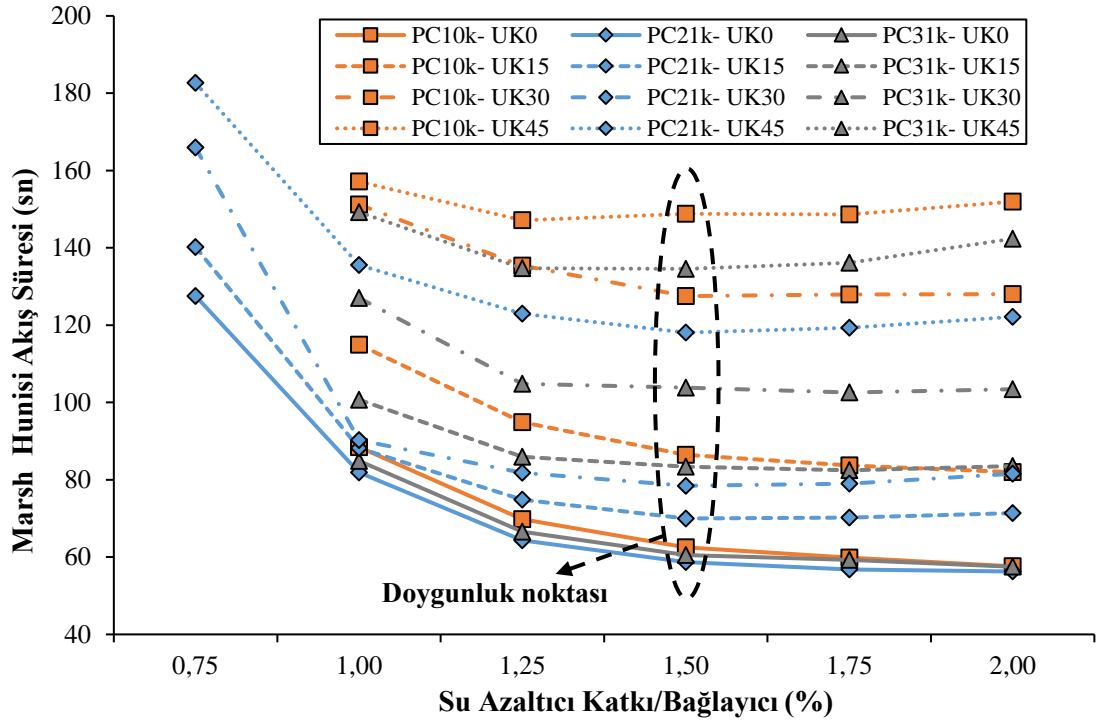


Şekil 4.16. Anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkıların priz süreleri

#### 4.5. Marsh-Hunisi Akış Süresi ve Mini-Çökme Deney Sonuçları

##### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Çalışmanın birinci aşamasında sentezlenen ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların çimento ve uçucu kül ile uyumlu olup olmadığını belirlemek amacı hazırlanan hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi değerleri Şekil 4.17 ve Çizelge 4.9'da verilmiştir. Bağlayıcı miktarının kütlece %0,75'inden daha az miktarda katkı içeren hamur karışımları Marsh-hunisinden akmadığından bu karışımların akış süreleri ölçülmemiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi katkı kullanım oranının artmasıyla tüm hamur karışımlarının akış süreleri beklenildiği gibi azalmıştır. Bağlayıcı ağırlığının %0,75'i kadar PC<sub>21k</sub> katkısı içeren tüm hamur karışımlarında Marsh-hunisinden akış gerçekleşmiş olmasına rağmen PC<sub>10k</sub> ve PC<sub>31k</sub> katkılı hamur karışımlarında akış gerçekleşmemiştir. %0,75 oranında PC<sub>21k</sub> katkısı içeren hamur karışımlarının akış süreleri uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte artmıştır. Bu artış miktarları; PC<sub>21k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>21k</sub>-UK<sub>45</sub> grubu hamur karışımlarında PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> grubu karışımına kıyasla sırasıyla %10, 30 ve 43 oranlarındadır.



**Şekil 4.17.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri

Ayrıca söz konusu deney ile katkı dozajı ve akış süresi arasındaki ilişki incelenerek katkının doygunluk noktası belirlenmektedir. Su azaltıcı katkı dozajı arttıkça çimento hamurunun akış süresinde azalma gözlemlenmektedir. Ancak, katkı dozajı belirli bir sınırın üstüne çıktığında çimento hamuru akış süresinde önemli bir değişim görülmemektedir. Bu değerdeki katkı dozajı, katkı-çimento ikilisinde kullanılan su azaltıcı katkının doygunluk noktası olarak belirlenmektedir. Bu dozajın üstünde katkı kullanımını karışımda ayrışma oluşumunun yanı sıra ekonomik zarara da sebep olmaktadır (Mardani-Aghabaglou ve diğerleri, 2017a; Aİtcin, 2004)

Şekil 4.17'den de anlaşıldığı gibi tüm katkı türlerinde tüm bağlayıcı- katkı ikilisi için doygunluk noktası %1,5 (katkı/bağlayıcı oranı) olarak belirlenmiştir. Doygunluk noktasındaki akış süreleri dikkate alındığında Marsh-hunisinden en hızlı akan külsüz karışım PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> (PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla %8 daha hızlı) karışımı olurken, en yavaş akan külsüz karışım ise PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı olmuştur.



**Çizelge 4.9.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri

<b>Katkı/bağlayıcı oranı (kütlece %)</b>		<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>
<b>Akış Süresi (sn)</b>	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	-	88,46	69,79	62,50	59,87	57,60
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>	127,55	81,88	64,36	58,69	56,81	56,27
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>	-	84,90	66,60	60,53	59,31	57,50
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	-	114,96	94,92	86,42	83,74	81,97
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>	140,21	88,22	74,84	69,99	70,19	71,35
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>	-	100,72	85,92	83,38	82,45	83,55
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	-	151,19	135,40	127,52	127,91	128,05
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>	165,95	90,25	81,81	78,45	79,01	81,53
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>	-	127,04	104,85	103,87	102,58	103,42
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	-	157,13	147,12	148,81	148,61	151,98
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>	182,64	135,55	122,93	118,07	119,29	122,10
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>	-	149,22	134,71	134,56	136,09	142,32
<b>Mini Çökme (cm)</b>	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	8,8	13,3	17,0	16,8	17,3	17,8
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>	10,0	16,3	16,5	16,5	17,0	17,5
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>	8,0	13,0	16,5	17,0	17,5	18,0
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	10,0	14,5	16,5	16,0	16,0	16,0
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>	11,0	16,0	16,3	18,5	16,5	16,8
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>	12,3	15,5	16,0	16,0	16,8	16,5
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	13,0	15,0	16,0	15,5	16,0	16,3
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>	14,0	16,0	16,0	15,5	16,0	16,0
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>	12,0	15,0	16,0	15,5	15,5	16,0
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	14,3	15,0	15,8	17,0	15,8	15,0
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>	13,8	15,8	16,3	16,0	16,3	15,5
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>	13,8	15,8	15,5	15,0	15,3	14,8
<b>Sıcaklık (°C)</b>	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	30,1	30,0	28,8	28,1	27,6	27,6
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>	29,6	29,0	28,8	28,4	28,1	27,8
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>	31,8	31,6	30,8	30,5	29,6	28,9
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	29,8	28,8	28,1	27,7	27,3	27,1
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>	30,9	29,8	29,0	28,6	27,8	27,6
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>	28,6	28,4	27,6	26,7	26,0	25,7
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	27,3	27,3	26,5	26,0	25,5	24,8
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>	32,5	31,6	30,5	29,5	28,6	28,1
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>	29,5	28,4	27,4	27,2	26,9	26,7
	PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	27,7	27,6	26,6	26,2	25,6	25,3
	PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>	29,4	28,3	27,8	27,5	27,0	26,8
	PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>	28,8	27,7	27,6	27,1	26,3	26,0

Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere katkı ana zincir uzunluğu arttıkça hamur karışımlarının akış süreleri azalmaktadır. Bu durum ana zincir uzunluğunun artmasına bağlı olarak anyonik grup miktarının artmasından ve buna bağlı olarak çimento ile katkı arasındaki elektrostatik etkileşimin artmasından kaynaklanmaktadır. Ancak PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı bu trende uymamaktadır. Bunun sebebinin uzun ana zincire sahip katkının çimento ile etkileşmeden kendi içerisinde topaklaşmaya eğilim göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Katkı doyum noktasındaki akış değerleri dikkate alındığında, su azaltıcı katkı tipinden bağımsız olarak uçucu külün karışıma ilavesi ile Marsh-hunisi akış performansı genel olarak olumsuz etkilenmiştir. Bu etki kül kullanım oranı artışıyla daha da belirgin hale gelmiştir. Bu durum kullanılan uçucu külün çimentoya kıyasla daha yüksek inceliğine ve daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Uçucu kül çimentoya kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olduğundan ağırlıkça çimento ile ikame edildiğinde hamur fazın artmasına sebep olarak karışımın viskozitesinin artmasına neden olmuştur. Uçucu külün daha ince olması nedeni ile bağlayıcı fazının toplam yüzey alanının artmasına bağlı olarak su ihtiyacı artmaktadır (Feng ve diğerleri, 2018; Mehta ve Monteiro, 1997).

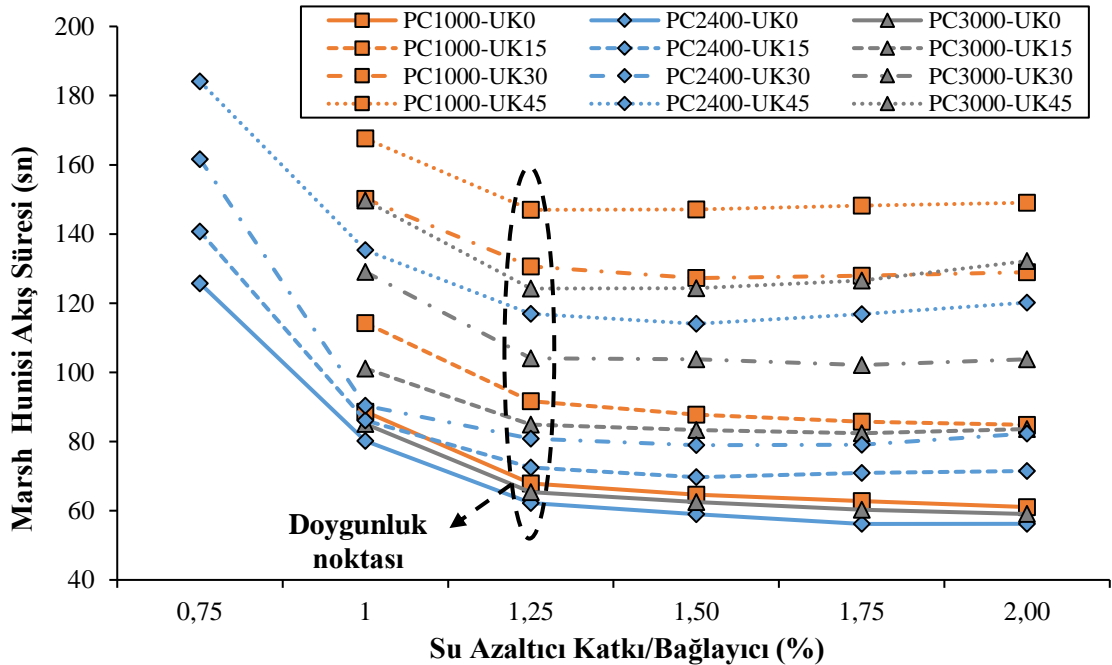
Hamur karışımlarının mini-çökme değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Katkı tipinden bağımsız olarak su azaltıcı katkı kullanım oranının artışıyla hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde beklenildiği gibi bir artış gözlemlenmiştir. Ancak belli bir katkı kullanım oranının üstünde hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde bir sabitleme veya azalma olmuştur. Bu olay çok akıcı olan karışımlarda meydana gelen ayrışma olayından kaynaklanmaktadır. Su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğunun değişimi hamur karışımlarının mini-çökme davranışı üzerinde belirgin bir etki oluşturmamıştır. Diğer yandan genel olarak uçucu kül kullanımı ile karışımların mini-çökme değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir.

Ayrıca hamur karışımlarının sıcaklık değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Tüm hamur karışımlarında su azaltıcı katkı içeriğinin artışıyla karışımların sıcaklığının, 2°C ile 5°C daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, çimento yerine ikame edilen uçucu

külün hidrasyon ısısını düşürmesinin yanısıra kullanılan su azaltıcı katkıların priz geciktirici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

### *Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Çalışmanın ikinci aşamasında sentezlenen yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıların çimento ve uçucu kül ile uyumlu olup olmadığını belirlemek amacı hazırlanan hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi değerleri Şekil 4.18 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir. Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak bağlayıcı ağırlığının %0,75'i kadar katkı kullanıldığı durumda sadece PC<sub>2400</sub> isimli katkıyı içeren hamur karışımının Marsh-hunisi akışı gerçekleşmiştir. PC<sub>2400</sub> isimli katkıyı içeren karışımlarda uçucu kül kullanım oranının artışıyla Marsh-hunisi akış süreleri artmıştır. Bu bağlamda, %15, 30 ve 45 oranında uçucu kül içeren PC<sub>2400</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>2400</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>2400</sub>-UK<sub>45</sub> isimli hamur karışımlarının Marsh-hunisi akışı, kül içermeyen PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %12, 29 ve 46 oranında daha yavaş olarak gerçekleşmiştir.



**Şekil 4.18.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri

Şekil 4.18'den de anlaşıldığı gibi katkı türü ve uçucu kül kullanım oranlarından bağımsız olarak tüm bağlayıcı-katkı ikilisi için doygunluk noktası %1,25 (katkı/bağlayıcı oranı) olarak belirlenmiştir. Sakai ve diğerleri (2003) ve Qiu ve diğerleri (2011) tarafından yapılan çalışmalarda kısa yan zincir uzunluğuna sahip katkının yeteri kadar sterik etki gösterememesinden dolayı akışkanlığı olumsuz etkilediği ifade edilmiştir. Bu çalışmada, hem külsüz hem de kül ikameli hamur karışımlarında en düşük performansı kısa yan zincir uzunluğuna sahip katkılı karışımlar göstermiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere katkı yan zincir uzunluğu arttıkça sterik etki de artmış ve hamur karışımlarının akış süreleri azalmıştır. Ancak en uzun yan zincir uzunluğuna sahip olan PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> isimli karışım PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla Marsh-hunisinden %5 daha yavaş akmıştır. Benzer sonuçlar literatürde de yer almaktadır. Mardani-Aghabaglou ve diğerleri (2013) ve Qiu ve diğerleri (2011) bu durumun uzun yan zincirlerden dolayı polimerlerin birbiri içerisine geçerek çimento tanecikleri arasında köprü oluşturmasından ve buna bağlı olarak adsorpsiyonun düşmesinden ve sterik etkinin zayıflamasından kaynaklandığı belirtmiştir. Buna ilaveten Wang ve diğerleri (2018) çalışmasında çimento yüzeyinde yoğun şekilde oluşan polimer film tabakalarının, uzun yan zincirlerin sterik etkisi nedeniyle tahrip olduğunu ve bu durumun katkının adsorpsiyon miktarının azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca katkı yan zincir uzunluğunun hamur karışımlarının akışkanlığı üzerine etkisinin tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Hamur karışımlarının mini-çökme değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Sonuçlara göre su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğunun değişimi hamur karışımlarının mini-çökme davranışı üzerinde belirgin bir etki oluşturmamıştır. Diğer yandan genel olarak uçucu kül kullanımı ile karışımların mini-çökme değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir.

Hamur karışımlarının sıcaklık değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Çizelgeden de anlaşıldığı üzere tüm hamur karışımlarında su azaltıcı katkı içeriğinin artışıyla karışım sıcaklıklarında 2-3°C arasında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durumun, çimento yerine ikame edilen uçucu külün hidrasyon ısısını düşürmesinin yanısıra kullanılan su azaltıcı katkıların priz geciktirici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

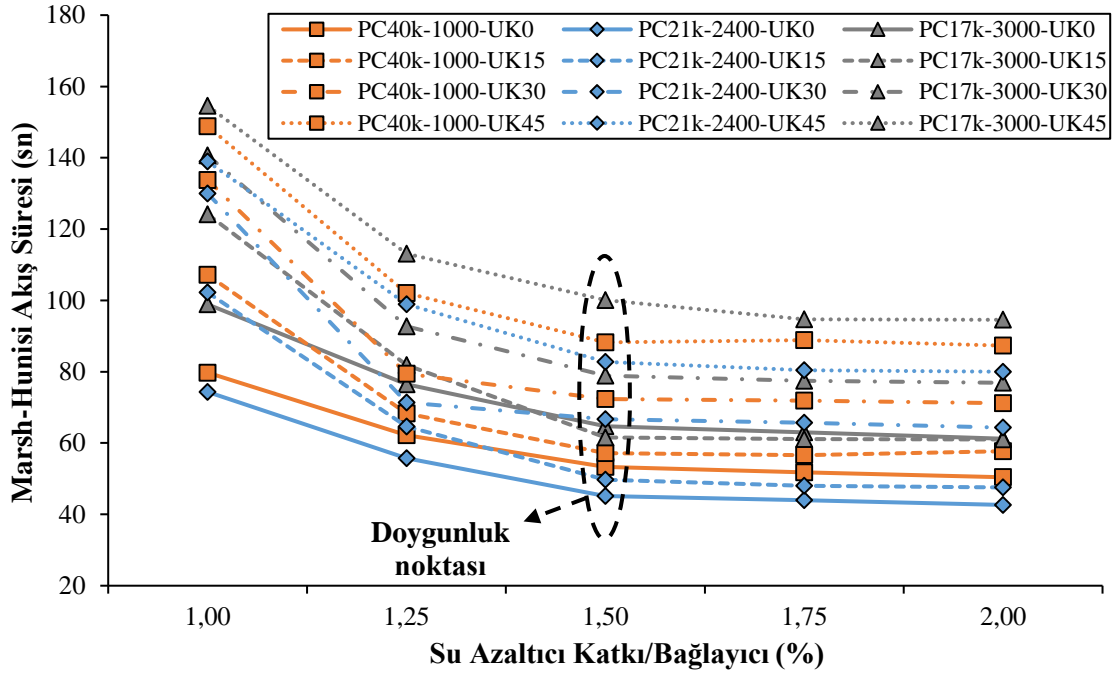
**Çizelge 4.10.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri

<b>Katkı/bağlayıcı oranı (kütlece %)</b>		<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>
<b>Akış Süresi (sn)</b>	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	-	88,64	67,90	64,60	62,78	61,06
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	125,75	80,18	62,24	58,96	56,18	56,24
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>	-	85,09	65,40	62,50	60,31	59,05
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	-	114,25	91,67	87,82	85,74	84,83
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	140,72	86,12	72,48	69,69	70,92	71,53
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>	-	101,12	84,94	83,36	82,40	83,65
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	-	150,18	130,60	127,25	127,98	128,95
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	161,65	90,35	80,81	78,95	79,10	82,35
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>	-	129,05	104,05	103,78	102,12	103,81
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	-	167,61	146,98	147,12	148,16	149,08
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	184,08	135,33	116,93	114,04	116,79	120,20
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>	-	149,71	124,22	124,31	126,51	132,23
<b>Mini Çökme (cm)</b>	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	8,0	12,5	15,8	17,5	17,5	17,5
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	11,0	15,5	17,5	18,5	17,8	18,3
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>	8,5	14,8	16,3	17,8	16,5	17,5
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	10,0	13,5	15,5	16,0	17,0	16,0
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	12,0	16,0	17,3	18,5	16,5	16,8
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>	12,0	15,5	16,3	16,5	17,0	16,5
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	12,0	14,8	16,3	16,5	16,0	16,0
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	14,3	16,0	16,5	16,5	16,8	16,3
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>	13,0	15,0	16,5	16,0	15,5	17,0
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	13,3	15,0	15,5	16,0	17,8	15,0
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	13,8	15,3	16,3	16,0	16,8	16,5
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>	13,0	15,5	15,8	17,0	16,5	15,5
<b>Sıcaklık (°C)</b>	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	27,2	29,4	27,6	27,5	26,5	26,1
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	29,6	29,0	28,8	28,4	28,1	27,8
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>	29,2	28,3	27,8	27,4	26,6	26,3
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	29,6	28,8	28,2	27,6	27,4	27,0
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	30,2	29,8	29,0	28,6	28,3	28,1
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>	28,6	28,1	27,5	26,9	26,7	26,4
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	28,3	27,5	26,9	26,5	26,1	25,6
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	30,5	29,6	29,1	28,5	28,0	27,6
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>	29,1	28,3	27,5	27,2	27,0	26,8
	PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	27,8	27,3	26,7	26,1	25,4	25,0
	PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	29,3	28,5	28,0	27,6	27,0	26,3
	PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>	28,5	27,8	27,6	27,1	26,4	26,0

### ***Sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın üçüncü aşamasında sentezlenen molekül ağırlığı sabit, ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı olan katkıları içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri Şekil 4.19 ve Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. Bağlayıcı ağırlığının %0,75’ine kadar katkı kullanıldığı durumlarda Marsh-hunisinden akış gerçekleşmemiştir. Bu sebepten, karışımların Marsh-hunisi akış süresi katkı kullanım oranının %1 olduğu durumdan itibaren ölçülmüştür. Şekil 4.19’dan da anlaşıldığı gibi katkı türü ve uçucu kül kullanım oranlarından bağımsız olarak tüm bağlayıcı-katkı ikilisi için katkı doygunluk noktası katkı/bağlayıcı oranının %1,5 olduğu durumda tespit edilmiştir.

PC<sub>40k-1000</sub> katkısı, PC<sub>21k-2400</sub> katkısına göre daha kısa ana zincire ve daha uzun yan zincire sahiptir. Dolayısıyla adsorpsiyon miktarının ve elektrostatik etkinin daha fazla olması beklenmektedir. Ancak PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımının akış performansının PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla daha iyi olması beklenirken tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Bu olumsuz etkinin iki sebepten oluştuğu düşünülmektedir. Birincisi PC<sub>40k-1000</sub> katkısının yan zincirlerinin yeterli sterik etkiyi oluşturamayacak kadar kısa olması, ikincisi ise PC<sub>40k-1000</sub> katkısının ana zincirinin polimerlerin birbirlerine takılmasına sebep olabilecek kadar fazla uzunluğa sahip olmasıdır. Literatürde de belirtildiği gibi yan zincir uzunluğunun azalmasıyla katkının adsorpsiyon yeteneği iyileşirken, sterik etkilerde zayıflama görülmektedir. Ana zincir uzunluğunun artması ile anyonik fonksiyonel grup sayısı artmaktadır. Buna bağlı olarak, elektrostatik etkinin artması beklenirken tersi bir durum söz konusu olmuştur. Bu olay ana zincir uzunluğunun çok uzun olduğu durumlarda zincirlerin birbirlerine takılma ihtimalinin artışına bağlı olarak katkı etkinliğinin azalmasından ve adsorpsiyon yeteneğinin zayıflamasından kaynaklanmaktadır (Bouhamed, Boufi ve Magnin, 2007; Schober ve Flatt, 2006; Borsoi ve diğerleri, 1999).



**Şekil 4.19** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri

PC<sub>17k-3000</sub> katkısının kullanıldığı karışımın Marsh-hunisi akış performansı açısından en kötü performansı sergilemesinin yan zincirlerin birbirine takılması, polimer film tabakasının tahrip olması ve kısa ana zincirin düşük elektrostatik etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer davranış gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalara göre, yan zinciri çok uzun olan katkı çimento tanesine adsorbe olan polimer film tabakasını tahrip ederek adsorbe olan katkı miktarını azaltmaktadır. Böylece, adsorbe olmayan çözeltide serbest kalan katkı miktarı artmaktadır. Katkı ana zinciri çok kısa olduğu durumda, ana zincir üzerindeki anyonik fonksiyonel grup miktarı azaldığından elektrostatik etkinin zayıflatmasına sebep olmaktadır (Wang ve diğerleri, 2018; Peng ve diğerleri, 2013; Mardani-Aghabaglou ve diğerleri, 2013; Ferrari ve diğerleri 2011; Qiu ve diğerleri, 2011). Sonuç olarak çalışma kapsamında molekül ağırlıkları sabit, ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı olan katkılar arasında Marsh-hunisi akış performansı bakımından optimum yan zincir molekül ağırlığı (uzunluğu) 2400 gr/mol ve ana zincir uzunluğu 21k olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 4.11.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri

<b>Katkı/bağlayıcı oranı (kütlece %)</b>		<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>
<b>Akış Süresi (sn)</b>	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	-	79,74	62,16	53,34	51,78	50,41
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	-	74,34	55,75	45,14	44,01	42,65
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	-	98,88	76,47	64,70	62,97	61,22
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	-	107,14	68,32	57,14	56,60	57,70
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	-	102,21	64,64	49,75	48,00	47,56
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	-	124,16	81,89	61,60	61,12	61,00
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	-	133,76	79,40	72,38	71,90	71,18
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	-	129,98	71,37	66,65	65,66	64,32
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	-	140,65	92,76	78,86	77,42	76,90
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	-	148,84	102,08	88,26	88,84	87,32
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	-	138,97	98,90	82,76	80,45	80,00
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	-	154,54	113,13	100,09	94,67	94,56	
<b>Mini Çökme (cm)</b>	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	8,3	12,3	15,5	17,5	17,0	17,5
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	10,8	15,5	17,3	18,3	17,5	18,0
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	9,0	14,5	16,5	17,5	16,8	17,3
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	10,3	13,8	15,5	16,0	17,0	16,5
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	12,5	16,3	17,0	18,5	17,5	16,5
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	12,0	15,3	16,0	16,5	17,0	16,5
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	12,3	14,5	16,0	16,3	16,5	16,8
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	14,5	16,3	16,8	16,8	16,5	16,8
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	13,0	15,5	16,3	16,5	15,8	17,3
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	13,5	15,3	15,5	16,0	17,5	15,8
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	14,8	16,0	16,5	16,5	16,3	16,5
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	13,5	15,5	15,8	17,0	16,8	15,8	
<b>Sıcaklık (°C)</b>	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	30,3	29,5	27,7	27,5	27,4	27,1
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	29,7	29,1	28,9	28,6	28,3	27,9
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	29,4	28,4	27,8	27,5	26,8	26,6
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	29,7	28,9	28,4	27,8	27,6	27,4
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	30,2	29,8	29,3	28,7	28,4	28,2
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	28,7	28,2	27,6	26,9	26,7	26,3
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	28,4	27,6	26,9	26,6	26,3	25,7
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	30,3	29,7	29,4	28,6	28,2	27,7
	PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	29,1	28,6	27,6	27,3	27,0	26,7
	PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	27,5	27,2	26,7	26,2	25,5	25,0
	PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	28,7	28,3	28,0	27,7	27,1	26,3
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	28,7	27,7	27,7	27,1	26,3	26,0	

Hamur karışımlarının mini-çökme değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir. Sabit molekül ağırlığında su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişimi hamur

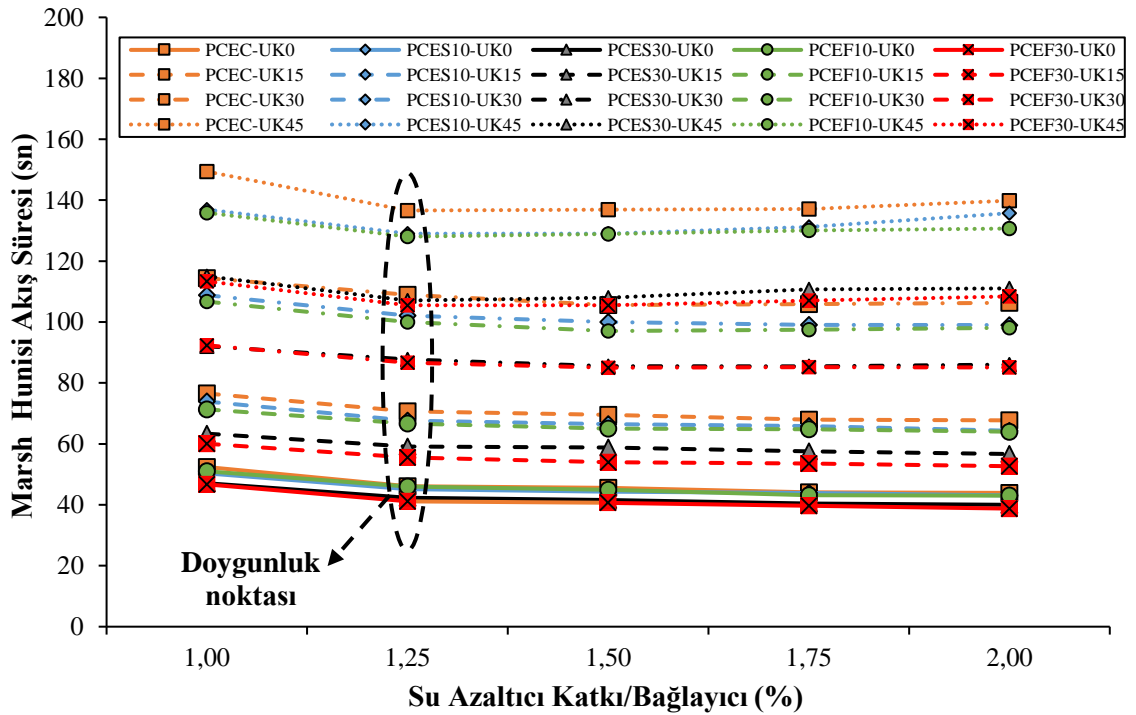


karışımlarının mini-çökme davranışı üzerinde belirgin bir etki oluşturmamıştır. Diğer yandan genel olarak uçucu kül kullanımı ile karışımların mini-çökme değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir.

Hamur karışımlarının sıcaklık değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir. Çizelgeden de anlaşıldığı üzere tüm hamur karışımlarında su azaltıcı katkı içeriğinin artışıyla karışım sıcaklıklarında 2-3°C arasında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durumun, çimento yerine ikame edilen uçucu külün hidrasyon ısını düşürmesinin yanısıra kullanılan su azaltıcı katkıların priz geciktirici etkisinden de kaynaklandığı düşünülmektedir.

### *Anyonik monomer değişiminin etkisi*

Çalışmanın dördüncü aşamasında sentezlenen karboksilat anyonik monomeri içeren kontrol katkısına ilaveten %10 ve %30 mol oranlarında sülfonat ve fosfat anyonik monomeri ile ikame edilen su azaltıcı katkıları içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri Şekil 4.20 ve Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.20.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri

Bağlayıcı ağırlığının %0,75'ine kadar katkı kullanıldığı durumlarda Marsh-hunisinden akış gerçekleşmemiştir. Bu sebepten, karışımların Marsh-hunisi akış süresi katkı kullanım oranının %1 olduğu durumdan itibaren ölçülmüştür.

**Çizelge 4.12.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri

<b>Katkı/bağlayıcı oranı (kütlece %)</b>		<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	-	52,40	46,10	45,54	44,12	43,91
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>	-	50,32	45,15	44,35	43,91	43,09
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	-	47,08	42,31	41,60	40,37	40,00
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>	-	51,01	46,02	44,96	43,14	43,01
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>	-	46,71	41,13	40,67	39,71	38,76
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	-	76,54	70,70	69,56	68,00	67,72
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>	-	73,90	67,68	66,50	65,90	64,32
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	-	63,35	59,08	58,78	57,56	56,68
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>	-	71,32	66,69	65,06	64,79	64,00
<b>Akış Süresi (sn)</b>	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>	-	60,04	55,55	54,02	53,53	52,67
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	-	114,40	108,96	105,56	105,90	106,35
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>	-	108,80	102,10	99,96	99,06	99,00
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	-	92,05	87,70	85,50	85,45	86,00
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>	-	106,70	100,02	97,04	97,50	98,09
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>	-	92,35	86,64	85,00	85,20	85,06
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	-	149,39	136,60	136,90	137,07	139,80
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>	-	136,90	129,00	129,03	131,20	135,70
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	-	115,00	107,06	108,00	110,67	111,02
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>	-	135,87	128,03	128,90	130,09	130,65
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>	-	113,35	105,50	105,50	107,00	108,43

**Çizelge 4.12.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri (devam)

<b>Mini Çökme (cm)</b>	PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	8,0	13,0	15,5	16,0	16,8	16,0
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>	8,5	13,3	16,0	17,0	17,5	17,0
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	9,8	14,5	17,0	17,8	17,5	18,0
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>	8,8	13,3	16,3	17,0	17,8	17,5
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>	10,0	14,0	17,0	17,5	17,0	17,8
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	8,8	13,5	15,8	16,0	16,5	16,3
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>	9,3	13,8	16,5	17,0	16,0	17,5
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	10,5	15,0	17,3	17,5	17,0	18,0
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>	9,0	14,0	16,8	17,5	17,5	17,5
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>	10,5	15,0	17,5	18,0	17,0	17,3
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	9,5	13,8	16,3	16,5	17,5	17,5
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>	10,0	14,3	17,0	17,8	17,3	18,0
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	11,0	15,5	17,5	18,0	18,0	17,0
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>	10,3	14,0	17,0	17,5	17,5	18,3
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>	11,3	15,8	17,5	18,0	18,5	18,5
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	10,0	14,5	16,5	17,5	18,0	17,0
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>	10,5	15,3	17,3	18,0	17,5	17,8
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	12,5	16,0	17,8	18,0	18,0	17,5
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>	11,0	15,0	17,3	18,3	18,5	18,0
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>	12,8	16,3	17,5	18,3	18,5	17,8
<b>Sıcaklık (°C)</b>	PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	29,6	29,3	29,1	28,8	28,5	28,3
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>	29,5	29,3	28,7	28,4	28,1	27,9
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	29,4	29,0	28,9	28,6	28,4	28,3
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>	28,6	28,5	27,5	27,3	27,2	27,1
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>	29,3	29,1	28,6	28,2	27,7	27,5
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	30,1	29,8	29,7	29,4	29,2	29,0
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>	29,8	29,6	29,5	29,2	29,0	28,6
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	29,4	29,1	29,0	28,7	28,4	28,1
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>	30,0	29,8	29,5	29,4	29,0	28,7
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>	28,7	28,5	28,4	28,1	27,7	27,5
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	29,1	29,0	28,7	28,5	28,3	28,0
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>	29,5	29,2	29,0	28,7	28,5	28,4
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	30,5	30,0	29,6	29,5	29,4	29,0
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>	29,8	29,5	29,3	29,0	28,7	28,5
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>	30,8	30,6	30,3	30,0	29,9	29,7
	PC <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	28,9	28,7	28,5	28,3	28,0	27,8
	PC <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>	28,5	28,4	28,3	28,0	27,5	27,4
	PC <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	29,0	28,7	28,5	28,1	28,0	27,5
	PC <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>	29,5	29,2	29,0	28,9	28,7	28,3
	PC <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>	28,7	28,5	28,1	28,0	27,5	27,0

Şekil 4.20'den de anlaşıldığı gibi tüm bağlayıcı-katkı ikilisi için katkı doygunluk noktası katkı/bağlayıcı oranının %1,25 olduğu durumda tespit edilmiştir. Su azaltıcı katkı/bağlayıcı oranının %1,25 olduğu durumda PC<sub>F30</sub> ve PC<sub>S30</sub> karışımları en üstün performansı sergilerken, PC<sub>C</sub> karışımları en olumsuz davranışı göstermiştir. PC<sub>F30</sub> ve PC<sub>S30</sub> karışımları kontrol karışımına kıyasla sırasıyla yaklaşık %12 ve %9 daha yüksek akış performansı göstermiştir. Bu olumlu etkinin fosfat ve sülfonat fonksiyonel gruplarının karboksilat grubuna göre katkı türüne bağlı olarak daha güçlü anyonik özellik göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Hamur karışımlarının mini-çökme değerleri Çizelge 4.12'de verilmiştir. Sonuçlara göre su azaltıcı katkı anyonik monomer fonksiyonel grup içeriğinin değişimi hamur karışımlarının mini-çökme davranışı üzerinde belirgin bir etki oluşturmamıştır. Diğer yandan genel olarak uçucu kül kullanımı ile karışımların mini-çökme değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir.

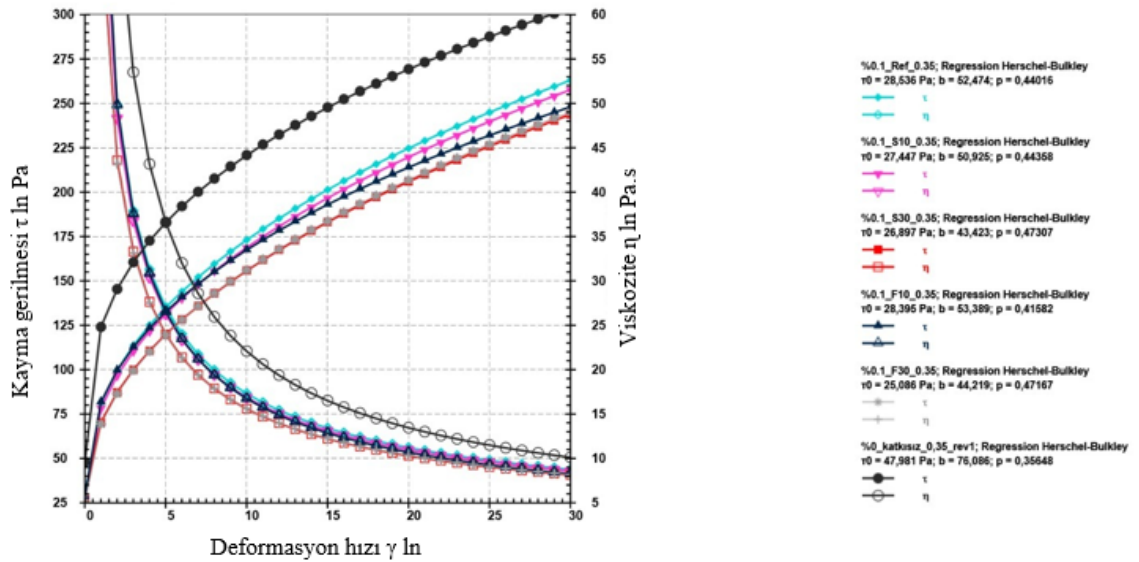
Ayrıca Çizelge 4.12'de hamur karışımların deney esnasında ölçülen sıcaklık değerleri verilmiştir. Karışımların içerdiği su azaltıcı katkı miktarındaki artışla sıcaklığın 1-2°C arasında düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumun, çimento yerine ikame edilen uçucu külün hidrasyon ısını düşürmesinin yanısıra kullanılan su azaltıcı katkıların priz geciktirici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### **4.6. Reoloji Deneyi Sonuçları**

Reolojik parametreler, taze beton karışımlarının karıştırma ve işlenebilirlik performansını gösteren önemli göstergelerden birisidir. Genellikle reolojik davranışlar, çimentolu sistemlerin içyapı özelliklerini karakterize etmek için kullanılmaktadır. İçyapıdaki değişiklikler deformasyon hızı, kayma gerilmesi ve viskozite gibi reolojik parametreler aracılığıyla analiz edilmektedir (He ve diğerleri, 2019; 2018). Deformasyon hızını yansıtan viskozite, çimentolu sistemlerin akışa karşı direncini gösteren içsel bir özellik ve çimentolu sistemlerin reolojik özellikleri arasında önemli bir parametredir (Wang ve diğerleri, 2019, Kong ve diğerleri, 2013, Struble ve Sun, 1995). Viskozite, taze betonun karıştırma, pompalama, döküm ve sıkıştırma özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Beton

bileşenleri arasındaki adhezyon ve sürtünmeden kaynaklanan eşik kayma gerilmesi ise çimento hamurunun plastik deformasyon yapmasını sağlamak için gerekli maksimum gerilmedir. Sonuç olarak, betonun eşik kayma gerilmesi ve viskozite çimento tanelerinin şekli, büyüklük dağılımı ve yüzey alanına, agrega özelliklerine ve karışımda bulunan kimyasal katkıların özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Roussel, Lemaître, Flatt ve Coussot, 2010).

Hamur ve harç karışımları üzerinde reolojik ölçümler deformasyon hızı kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan harç ve hamur karışımların reolojik parametrelerini belirlemek amacıyla her bir karışımın kayma gerilmesi-viskozite-deformasyon hızı grafikleri çizilmiştir. Çizilen grafiklerden karışımların akış eğrisinin Herschel-Bulkley modeli ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çimentolu sistemlerin reolojik davranışını tanımlamak için genellikle Herschel-Bulkley modeli kullanılmaktadır (Phan, Chaouche ve Moranville, 2006). Örnek olarak 0,35 su/bağlayıcı oranına sahip, 0,1 oranında anyonik monomer tipi farklı su azaltıcı katkı içeren  $PC_C-UK_0$ ,  $PC_{S10}-UK_0$ ,  $PC_{S30}-UK_0$ ,  $PC_{F10}-UK_0$  ve  $PC_{F30}-UK_0$  hamur karışımlarının ve su azaltıcı katkı içermeyen  $UK_0$  karışımına ait kayma gerilmesi-viskozite-deformasyon hızı grafiği Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.21.** Anyonik monomer tipi farklı, su/çimento oranı 0,35 ve katkı oranı %0,1 olan hamur karışımlarının kayma gerilmesi-viskozite-deformasyon hızı grafiği

Birçok çimentolu sistemde olduğu gibi bu karışımlarda da düşük deformasyon hızı aralıklarında (0-10 sn<sup>-1</sup>) viskozite değerleri hızlıca düşmeye başlamaktadır. Şekil 4.21'den de görüldüğü gibi, deformasyon hızının artmasıyla viskozite eğrisi x eksenine paralel hale gelmekte ve düzleşmektedir. Bu davranış düşük deformasyon hızlarında, yapıdaki parçacıkların hızlı bir şekilde kayma yönünde yönelimi ile açıklanabilir.

Deformasyon hızının artışı ile viskoz kuvvetler tarafından topaklanmış parçacıklar küçük parçalara ayrılarak viskozite değerlerinin azalmasına ve kayma gerilmesi değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Ayrıca deformasyon hızının artmasıyla katkı polimer zincirleri akış yönünde kısmen hizalanmakta ve iç içe geçmiş zincirlerin birbirinden ayrılması da viskoziteyi azaltıcı etki göstermektedir (Sonebi, 2006). Yüksek deformasyon hızlarında viskozite değerleri birbirlerine yakın değerdedir. Karışımlarda deformasyon hızının artışıyla viskozitenin azalmasından dolayı kayma incelmeleri veya psödoplastik akış davranışı görülmektedir (Koehler ve Fowler, 2004).

#### ***Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın birinci aşamasında sentezlenen ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak hazırlanan hamur ve harç karışımlarının dinamik eşik kayma gerilmeleri (ekg) ve viskozite değerleri sırasıyla Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere hamur ve harç karışımlarında su/bağlayıcı oranının artışıyla viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri azalmıştır. Ayrıca karışımlarda su azaltıcı katkı miktarının artışıyla karışımların reolojik özellikleri gelişmektedir. Ancak kimyasal katkı içeriğine bakılmaksızın hamur ve harç karışımlara çimentonun uçucu kül ile ikame edilmesi karışımların reolojik performansını olumsuz etkilemiştir. Uçucu kül ikame oranının artmasıyla tüm karışımların dinamik eşik kayma gerilmeleri ve viskoziteleri belirgin oranda artmıştır. Karışımlarda ince mineral katkı kullanıldığı zaman genellikle belirli bir işlenebilirliği sağlamak için su ihtiyacı artmakta ve işlenebilirlik olumsuz etkilenmektedir (Koehler ve Fowler, 2004). Bu çalışmada kullanılan uçucu külün Blaine inceliği çimentoya göre daha yüksektir. Ayrıca çimento uçucu kül ile kütlece ikame edildiğinden dolayı karışımda bağlayıcı ve ince malzeme hacmi artmıştır. Böylece karışımında ıslatılması gereken yüzey alanı ve buna bağlı su

gereksinimi artmış ve reolojik özellikler olumsuz etkilenmiştir. Diğer taraftan çimento ile kıyaslandığında uçucu külün yüzeyinde daha fazla negatif iyonlar (zeta potansiyeli daha negatif) olduğundan dolayı negatif yüklü katkılar uçucu küle daha az adsorbe olmaktadır. Uçucu küle adsorbe olan katkıların tabaka kalınlığı daha ince olmakta ve bazı durumlarda katkılar uçucu külün yüzeyine adsorbe olmak yerine yüzeyindeki boşluklardan uçucu külün içine girmektedir. Hatta bir kısmı adsorbe olmaksızın serbest halde karışımda bulunmaktadır (Wang ve diğerleri, 2021b; Ma ve diğerleri, 2021). Bu mekanizmalar sonucu su azaltıcı katkılar uçucu kül ikameli karışımlarda etkinliğini tam olarak gösterememektedir. Böylece su azaltıcı katkı içeren karışımlarda uçucu kül miktarının artmasıyla dinamik ekg ve viskozite değerleri artış göstermiştir.

Uçucu kül kullanım oranından bağımsız, ana zincir uzunluğunun 10k'dan 21k'ya artmasıyla hamur ve harç karışımlarının viskozite ve dinamik ekg değerleri azalmıştır. Ancak 21k'dan 31k'ya artırılması ise reolojik özellikleri belirgin olarak olumsuz etkilemiştir. Daha önce bahsedildiği üzere bu katkıların adsorpsiyon davranışları incelendiğinde karışımların dinamik ekg ve viskozite trendinin tersi bir durum söz konusudur. Adsorpsiyon miktarının artmasıyla karışımın reolojik performansı artmakta (dinamik ekg ve viskozite azalmakta), azalmasıyla ise reolojik özellikler zayıflamaktadır (dinamik ekg ve viskozite artmakta). Önceden de belirtildiği üzere ana zincirin uzaması ile zincir üzerindeki karboksilat grup içeriğinin artması katkının adsorpsiyonunu artırmıştır. Adsorpsiyon sonucu katı tanelerin yüzeyi ne kadar çok katkı ile kaplanırsa taneleri birbirine çeken Van der Waals kuvvetleri o kadar etkisini kaybetmektedir. Katkının adsorpsiyonuna bağlı olarak çimentolu sistem, elektrostatik ve sterik etkilerle dağılma performansı göstermiştir. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir (He ve diğerleri, 2019; Marchon, Boscaro ve Flatt, 2019; Nicia ve Lowke, 2019; Zhang ve diğerleri, 2019; He ve diğerleri, 2017; Zhang ve Kong, 2015). Ancak uzun ana zincirler bazı durumlarda aynı anda birkaç parçacık üzerine adsorbe olarak köprüleme etkisine sebep olabilir ve reolojik parametrelerin olumsuz etkilenmesine yol açabilir (Matsuzawa ve diğerleri, 2019). Ayrıca karışımda adsorbe olmayan serbest haldeki polimerler çözeltide birbirine takılabilir ve viskoziteyi artırabilir (Zhang ve diğerleri, 2020). Bu çalışmada da görüldüğü üzere ana zincir uzunluğunun 21k'dan 31k'ya çıkması adsorpsiyon miktarını düşürerek viskozite ve dinamik ekg değerlerinin

artışına sebep olmuştur. Bu bağlamda ana zincir uzunluğunun optimum ölçüde olması önemlidir. PC<sub>21k</sub> katkısının hem adsorpsiyon hem de reolojik özelliklerin iyileşmesi açısından en iyi katkı olduğu belirlenmiştir

**Çizelge 4.13.** Ana zincir uzunluğu farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri

Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı					
		0,35			0,32		
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığınca-%)					
		0	0,1	0,2	0	0,1	0,2
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	42,1	-	-	56,6	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	168,9	-	-	236,7	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	19,3	17,6	-	26,9	24,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	79,8	72,7	-	111,7	101,7
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	18,1	16,5	-	25,4	23,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	74,6	67,9	-	104,4	95,4
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	27,4	23,4	-	38,3	32,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	113,4	96,9	-	158,7	135,7
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	43,6	-	-	59,9	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	177,1	-	-	241,8	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	20,1	18,3	-	28,2	25,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	83,3	75,9	-	116,7	106,3
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	18,9	17,2	-	26,5	24,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	77,9	71,0	-	109,1	99,4
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	28,6	24,4	-	40,0	34,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	118,4	101,3	-	165,8	141,8
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	46,3	-	-	61,2	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	184,7	-	-	248,0	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	21,6	19,6	-	30,2	27,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	89,4	81,5	-	125,2	114,0
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	20,3	18,5	-	28,5	25,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	83,7	76,2	-	117,1	106,7
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	30,7	26,2	-	43,0	36,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	127,1	108,7	-	178,0	152,2
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	48,9	-	-	63,0	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	196,4	-	-	256,4	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	22,7	20,7	-	31,8	29,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	94,2	85,7	-	131,8	120,1
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	21,4	19,5	-	30,0	27,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	88,1	80,2	-	123,3	112,3
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	32,3	27,6	-	45,2	38,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	133,8	114,5	-	187,4	160,3



**Çizelge 4.14.** Ana zincir uzunluğu farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmeleri değerleri

Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı			
		0,6		0,5	
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığına-%)			
		0	0,1	0,2	0,3
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	12,6	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	54,0	-	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,7	26,4	25,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	48,5	109,3	104,0
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	8,9	23,4	21,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	37,1	96,9	87,4
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,8	25,4	24,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	49,2	105,5	103,2
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	16,3	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	63,8	-	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	13,8	31,1	29,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	57,2	129,0	122,7
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,5	27,6	24,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	43,7	114,3	103,2
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	14,0	30,0	29,4
	Dinamik ekg (Pa)	-	58,1	124,5	121,8
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	18,4	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	74,6	-	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	14,8	33,5	31,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	61,6	138,8	132,1
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,3	29,7	26,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	47,1	123,0	111,0
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	15,1	32,3	31,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	62,5	134,0	131,1
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	19,4	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	82,1	-	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	15,4	34,8	33,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	64,0	144,3	137,3
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,8	30,9	27,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	48,9	127,9	115,4
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	15,7	33,6	32,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	65,0	139,2	136,2

#### *Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Çalışmanın ikinci aşamasında sentezlenen yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak hazırlanan hamur ve harç karışımlarının dinamik ekg ve viskozite değerleri sırasıyla Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da verilmiştir. Su azaltıcı katkı kullanımından bağımsız olarak hamur ve harç karışımlarına uçucu kül ilave edilmesi karışımların reolojik özelliklerini olumsuz etkilemiştir.

**Çizelge 4.15.** Yan zincir uzunluğu farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri

Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı					
		0,35			0,32		
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığınca-%)					
		0	0,1	0,2	0	0,1	0,2
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	42,1	-	-	56,6	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	168,9	-	-	236,7	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	23,2	21,1	-	31,4	28,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	96,2	87,5	-	130,0	118,3
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	18,1	16,5	-	25,4	23,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	74,6	67,9	-	104,4	95,1
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	22,5	20,5	-	26,7	24,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	93,2	84,8	-	110,7	100,7
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	43,6	-	-	59,9	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	177,1	-	-	241,8	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	24,2	22,1	-	32,8	29,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	100,5	91,5	-	135,9	123,6
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	18,9	17,2	-	26,5	24,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	77,9	71,0	-	109,1	99,4
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	23,5	21,4	-	27,9	25,4
	Dinamik ekg (Pa)	-	97,4	88,6	-	115,6	105,2
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	46,3	-	-	61,2	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	184,7	-	-	248,0	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	26,0	23,7	-	35,2	32,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	107,9	98,2	-	145,8	132,7
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	20,3	18,5	-	28,5	25,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	83,7	76,2	-	117,1	106,7
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	25,2	23,0	-	30,0	27,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	104,6	95,1	-	124,1	112,9
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	48,9	-	-	63,0	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	196,4	-	-	256,4	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	27,4	24,9	-	37,1	33,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	113,6	103,4	-	153,5	139,7
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	21,4	19,5	-	30,0	27,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	88,1	80,2	-	123,3	112,3
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	26,6	24,2	-	31,5	28,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	110,1	100,2	-	130,7	118,9

Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğunun 1000 g/mol'den 2400 g/mol'e artmasıyla hamur ve harç karışımlarının viskozite ve dinamik ekg değerleri azalmıştır. Ancak yan zincir uzunluğunun 2400 g/mol'den 3000 g/mol'e artması reolojik özellikleri belirgin olarak olumsuz etkilemiştir. Önceden belirtildiği üzere kısa yan zincire sahip katkı çimento tanelerinin üzerine daha iyi adsorbe olmaktadır (Feng ve diğerleri, 2021). Böylece katkı akışkanlık üzerine etkinliğini daha

iyi göstermektedir. Ancak katkıda kısa yan zincirin olması sterik etkiyi zayıflatmaktadır. Reolojik sonuçlardan görüldüğü üzere yan zincir uzunluğunun 2400’g/mol’den 1000’g/mol’e düşmesi ile katkının adsorpsiyonunun artmasına rağmen sterik etkinin azalmasından dolayı karışımın viskozite ve dinamik ekg değerleri artmıştır.

**Çizelge 4.16.** Yan zincir uzunluğu farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmeleri değerleri

Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı			
		0,6		0,5	
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığınca-%)			
		0	0,1	0,2	0,3
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	12,6	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	54,0	-	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	9,1	35,0	25,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	37,8	145,0	104,5
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	8,9	23,4	21,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	37,1	96,9	87,4
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,9	31,6	23,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	45,1	130,9	96,8
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	16,3	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	63,8	-	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,7	41,3	29,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	44,6	171,1	123,3
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,5	27,6	24,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	43,7	114,3	103,2
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	12,8	37,3	27,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	53,2	154,4	114,2
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	18,4	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	74,6	-	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,6	44,5	32,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	48,0	184,1	132,7
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,3	29,7	26,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	47,1	123,0	111,0
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	13,8	40,1	29,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	57,2	166,2	122,9
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	19,4	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	82,1	-	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	12,0	46,2	33,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	49,9	191,4	138,0
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,8	30,9	27,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	48,9	127,9	115,4
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	14,3	41,7	30,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	59,5	172,7	127,7

Ayrıca Feng ve diğerleri (2021), uzun yan zincirlerin harcın plastik viskozitesini azalttığını belirtmişlerdir. Bazı durumlarda uzun yan zincire sahip katkılar adsorbe olsalar

dahi çimento taneciğinin üzerine paralel değil aksine dikine adsorbe olabilir. Bu durumda adsorpsiyon tabaka kalınlığı daha ince olmakta ve katkı etkinliğini tam olarak gösterememektedir (Wang ve diğerleri, 2021a). Yan zincir uzunluğunun 2400'g/mol'den 3000'g/mol'e yükselmesi reolojik özellikleri olumsuz etkilemiştir. Katkının uzun yan zincirleri iç içe geçebilir veya çimento parçacıkları arasında sterik kuvveti zayıflatacak olan polimer köprüsü oluşturabilirler (Qiu ve diğerleri, 2011). Ayrıca uzun yan zincirler çimento taneciği üzerinde polimer film tabakalarını tahrip ederek katkının adsorpsiyonunun azalmasına sebep olabilirler (Wang ve diğerleri, 2018). Böylece katkı etkinliğini kaybeder ve karışımın viskozite ve dinamik ekg değerleri artış gösterir.

### ***Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın üçüncü aşamasında kullanılan molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak hazırlanan hamur ve harç karışımlarının dinamik ekg ve viskozite değerleri sırasıyla Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de verilmiştir. Karışımlarda uçucu kül miktarının artmasıyla karışımların reolojik özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğunun 40k'dan 21k'ya azalması ve yan zincirin 1000 g/mol'den 2400 g/mol'e yükselmesi ile tüm karışımların viskozite ve dinamik ekg değerleri azalmıştır. Adsorpsiyon sonuçlarından da görüldüğü üzere PC<sub>21k-2400</sub> katkısının adsorpsiyonu PC<sub>17k-3000</sub> katkısından düşüktür. Söz konusu katkının adsorpsiyonunun düşmesine rağmen reolojik özellikleri olumlu yönde etkilemiştir. Ancak ana zincir uzunluğunun 21k'dan 40k'ya yükselmesi ve yan zincirin 2400 g/mol'den 1000 g/mol'e düşmesi karışımların reolojik performansını azaltmıştır. Ana zincirin belirli bir değerden fazla olması önceden belirtildiği üzere tanecikler arasında köprüleme etkisine ve aynı zamanda yan zincirin de kısılması sterik etkilerin zayıflamasına neden olabilir. Ana zincirin kısa ve yan zincirin çok uzun olması ise yan zincirlerin birbirlerine takılması sonucu katkının etkinliğini azaltabilir. Tüm bu bilgiler ışığında reolojik parametreler açısından değerlendirildiğinde bu 3 katkı arasında optimum ana zincir ve yan zincir uzunluğuna sahip katkı PC<sub>21k-2400</sub> katkısı olmuştur.

**Çizelge 4.17.** Molekül ağırlığı sabit ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri

Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı					
		0,35			0,32		
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığına-%)					
		0	0,1	0,2	0	0,1	0,2
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	42,1	-	-	56,6	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	168,9	-	-	236,7	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	18,7	17,0	-	26,2	23,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	76,9	70,0	-	107,7	98,0
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	18,1	16,5	-	25,4	23,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	74,6	67,9	-	104,4	95,1
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	22,6	20,6	-	31,7	28,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	93,0	84,7	-	130,3	118,6
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	43,6	-	-	59,9	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	177,1	-	-	241,8	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	19,5	17,8	-	27,4	24,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	80,3	73,2	-	112,5	102,4
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	18,9	17,2	-	26,5	24,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	77,9	71,0	-	109,1	99,4
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	23,6	21,5	-	33,1	30,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	97,2	88,5	-	136,1	124,0
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	46,3	-	-	61,2	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	184,7	-	-	248,0	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	21,0	19,1	-	29,4	26,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	86,2	78,5	-	120,7	110,0
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	20,3	18,5	-	28,5	25,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	83,7	76,2	-	117,1	106,7
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	25,4	23,1	-	35,5	32,4
	Dinamik ekg (Pa)	-	104,4	95,0	-	146,1	133,1
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	48,9	-	-	63,0	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	196,4	-	-	256,4	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	22,1	20,1	-	30,9	28,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	90,8	82,7	-	127,1	115,8
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	21,4	19,5	-	30,0	27,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	88,1	80,2	-	123,3	112,3
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	26,7	24,3	-	37,4	34,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	109,9	100,0	-	153,8	140,1

**Çizelge 4.18.** Molekül ağırlığı sabit ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri

Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı			
		0,6		0,5	
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığınca-%)			
		0	0,1	0,2	0,3
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	12,6	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	54,0	-	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,8	31,7	27,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	44,9	131,5	114,4
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	8,9	23,4	21,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	37,1	96,9	87,4
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,1	30,1	27,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	46,2	124,9	111,8
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	16,3	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	63,8	-	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	12,8	37,5	32,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	53,0	155,2	135,0
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,5	27,6	24,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	43,7	114,3	103,2
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	13,1	35,6	31,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	54,5	147,4	131,9
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	18,4	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	74,6	-	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	13,7	40,3	35,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	57,0	167,0	145,3
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,3	29,7	26,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	47,1	123,0	111,0
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	14,1	38,3	34,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	58,6	158,6	142,0
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	19,4	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	82,1	-	-	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	14,3	41,9	36,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	59,3	173,6	151,0
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,8	30,9	27,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	48,9	127,9	115,4
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	14,7	39,8	35,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	61,0	164,9	147,6

#### *Anyonik monomer değişiminin etkisi*

Çalışmanın dördüncü aşamasında sentezlenen karboksilat anyonik monomeri içeren kontrol katkısına ilaveten %10 ve %30 mol oranlarında sülfonat ve fosfat anyonik monomeri ile ikame edilen su azaltıcı katkıları kullanılarak hazırlanan hamur ve harç karışımlarının dinamik ekg ve viskozite değerleri sırasıyla Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20'de verilmiştir. Uçucu kül miktarının artmasıyla karışımların reolojik özellikleri

olumsuz yönde etkilenmektedir. Su azaltıcı katkı içermeyen hamur karışımlara uçucu kül ikame edilmesiyle viskozite ve dinamik ekg değerlerinde %2-17 katkı içeren hamur karışımlara uçucu kül ikame edilmesiyle ise viskozite ve dinamik ekg değerlerinde %5-30 arasında değişen oranlarda artış olmuştur. Harç karışımlarında ise uçucu kül miktarındaki artışa göre katkısız karışımların viskozite ve dinamik ekg'sinde %8-20 arasında artış, katkılı karışımlarda ise viskozite ve dinamik ekg'de %2-51 arasında artış tespit edilmiştir.

Hamur ve harç karışımların reolojik özellikleri üzerine su azaltıcı katkıların kendi içinde performansları incelendiğinde, katkılarda karboksilat fonksiyonel grubunun yerine sülfonat ve fosfat fonksiyonel grubunun ikame edilmesiyle karışımların viskozite ve dinamik ekg değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Polikarboksilat fonksiyonel grubunun %20 ve %30 oranlarında sülfonat ve fosfat grubuyla ikame edilmesiyle hamur karışımların viskozite ve dinamik ekg değerlerinde %36'ya kadar azalma olurken, harç karışımlarda ise %19 civarlarında azalma tespit edilmiştir. Böylece katkılarda sülfonat ve fosfat grubu içeriklerinin artmasıyla hamur ve harç karışımlarının reolojik özelliklerinde gelişme görülmüştür.

Beton karışımlarının akışkanlığını sağlayan baskın etki çimento yüzeyine adsorbe olan katkı miktarı ile ilişkilidir (Jolicoeur ve diğerleri, 1994). Ayrıca sentezlenen polimerlerin içerdiği anyonik grubun türü, zincir uzunluğu ve polimer zincirinin ihtiva ettiği anyonik ile non-iyonik grupların miktarı gibi parametrelerde katkının adsorpsiyon ve etkinlik performansını etkilemektedir (Mollah, Adams, Schennach ve Cocke, 2000). Katkının bu özelliklerine bağlı olarak çimento ile polimerin etkileşimi ise çimentolu sistemlerin reolojik özelliklerini etkilemektedir. Çizelge 4.7'den görüldüğü gibi çalışma kapsamında sentezlenen katkıların anionic/non-ionic group oranı, serbest nonyonik miktarı, molekül ağırlıkları, ana zincir ve yan zincir uzunlukları sabit iken, sadece fonksiyonel grup içerik ve türlerinde değişiklik yapılmıştır. Bu yüzden katkıların adsorpsiyonunda ve etkinliğinde baskın parametre katkıların anyonik fonksiyonel grubudur. Şekil 4.12'den görüldüğü gibi %100 karboksilat içeren kontrol katkısıyla kıyaslandığında katkılara sülfonat ve fosfat gruplarının ikame edilmesi katkıların adsorpsiyon miktarlarını artırmıştır. Katkıların

adsorpsiyon miktarlarıyla doğru orantılı olarak reolojik özelliklerinin olumlu etkilendiği, viskozite ve dinamik ekg değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

He ve diğerleri (2019), yaptığı çalışmada sülfonik grup ikameli katkıların çimento hamurunun akışkanlığını artırdığını ileri sürmüşlerdir. Sülfonik grubun çift yönlü anyonik etkisi olması nedeniyle sülfonik grupların çimento yüzeyine adsorpsiyon gücünün karboksilik gruplardan daha güçlü olduğu belirtilmektedir. Böylece, katkılara anyonik fonksiyonel grup olarak sülfonik grupların ikame edilmesi, katkının çimento yüzeyine adsorpsiyon miktarını artırdığını ve buna bağlı olarak çimentolu sistemlerin taze hal performansını ve reolojik özelliklerini iyileştirdiği bildirilmiştir. Anyonik fonksiyonel grup olarak karboksilatın bir kısmının yerine sülfonat ikame edilmesi katkının adsorpsiyonunu artırmış, hamur ve harç karışımların viskozite ve dinamik ekg değerlerini azaltarak reolojik özelliklerini geliştirmiştir.

Stecher ve Plank (2019) çimentolu sistemler üzerinde fosfat grubu içeren katkıların karboksilat grubu içerenden daha üstün performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Literatürden de görüldüğü üzere fosfat fonksiyonel grubunun karboksilat grubuna göre oksijen atomlarının atomik yüklerinin iki kat daha fazla negatif yüklü olması nedeniyle çimentolu sistemlerdeki kalsiyum iyonları ile karboksilata kıyasla çok daha güçlü etkileşime girmektedir. Böylece daha yüksek miktarda katkı çimento yüzeyine bağlanır ve elektrostatik etkileşiminde artmasına bağlı olarak çimentolu sistemlerde daha üstün dağılıma performansı gösterir (Zhao ve diğerleri, 2018; Dalas ve diğerleri, 2015b; Mosquet ve diğerleri, 1997). Ayrıca fosfatın karboksilattan daha güçlü bir ankrajlama etkisi sunduğu belirtilmiştir. Böylece fosfat grubu içeren katkıların çimento üzerine hızlı bir şekilde adsorbe olduğu ifade edilmektedir (Plank ve diğerleri, 2015; Mosquet ve diğerleri, 1997). Şekil 4.12'den de görüldüğü gibi bu çalışmada fosfatın güçlü etkileşiminden dolayı karboksilat grubuna kıyasla adsorpsiyon miktarı daha fazla olmuştur. Ayrıca fosfat grubunun sebep olduğu güçlü elektrostatik etkilere bağlı olarak fosfat grubu içeren katkıların kullanıldığı hamur ve harç karışımların reolojik özellikleri iyileşmiş sadece karboksilat grubu içeren kontrol karışımına göre viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerlerinde azalma görülmüştür.



**Çizelge 4.19.** Anyonik monomer tipi farklı katkı ikameli hamur karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri

Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı					
		0,35			0,32		
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığına-%)					
		0	0,1	0,2	0	0,1	0,2
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	41,0	-	-	57,6	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	169,7	-	-	237,7	-	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	30,4	20,5	-	42,6	28,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	125,9	85,0	-	176,3	119,0
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	29,4	19,0	-	41,2	26,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	121,8	78,9	-	170,5	110,4
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	27,1	13,3	-	38,0	18,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	112,4	56,4	-	157,4	79,0
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	30,4	18,1	-	42,6	25,4
	Dinamik ekg (Pa)	-	125,9	75,1	-	176,3	105,1
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	26,5	13,8	-	37,1	19,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	109,8	57,2	-	153,7	80,1
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	42,7	-	-	58,9	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	176,0	-	-	240,4	-	-
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	32,8	22,1	-	46,0	31,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	136,0	91,8	-	190,4	128,5
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	32,1	20,7	-	44,9	29,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	132,8	86,0	-	185,9	120,4
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	30,7	15,0	-	43,0	21,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	127,3	63,9	-	178,2	89,5
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	32,0	19,0	-	44,8	26,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	132,4	79,0	-	185,4	110,6
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	30,5	15,9	-	42,8	22,2
	Dinamik ekg (Pa)	-	126,5	65,8	-	177,1	92,2
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	44,1	-	-	60,1	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	180,5	-	-	246,0	-	-
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	34,3	23,2	-	48,1	32,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	142,3	96,0	-	199,2	134,5
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	33,2	21,5	-	46,5	30,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	137,6	89,1	-	192,7	124,8
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	30,7	15,0	-	42,9	21,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	127,0	63,8	-	177,8	89,3
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	34,3	20,5	-	48,1	28,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	142,3	84,9	-	199,2	118,8
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	30,0	15,6	-	42,0	21,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	124,1	64,6	-	173,7	90,5
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	47,9	-	-	61,9	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	197,4	-	-	254,0	-	-
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	38,6	26,0	-	54,1	36,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	159,9	107,9	-	223,9	151,1
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	36,9	23,9	-	51,7	33,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	153,0	99,1	-	214,3	138,7
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	34,0	16,6	-	47,6	23,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	140,9	70,7	-	197,2	99,1
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	35,9	21,4	-	50,2	29,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	148,5	88,6	-	208,0	124,0
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	34,5	17,9	-	48,3	25,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	142,7	74,3	-	199,8	104,1

**Çizelge 4.20.** Anyonik monomer tipi farklı katkı ikameli harç karışımların nihai viskozite ve dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri

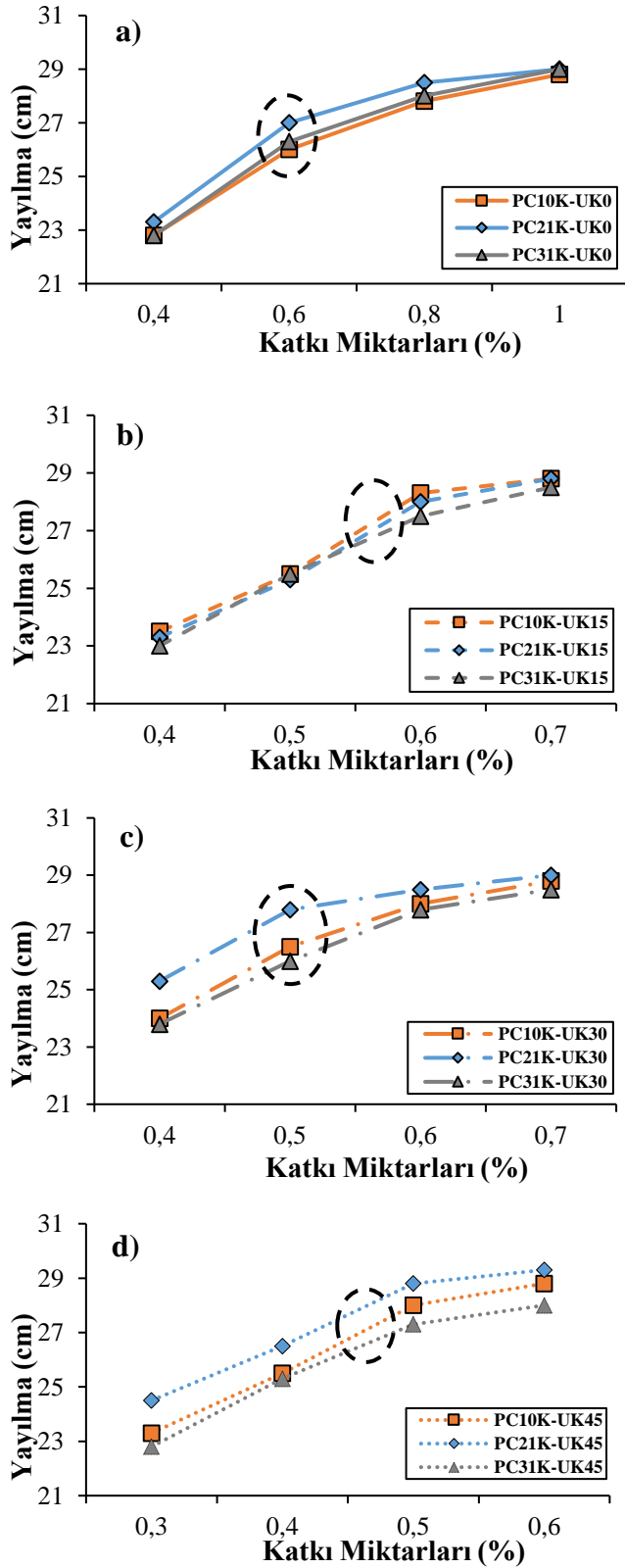
Karışım	Reolojik Özellik	Su/Bağlayıcı			
		0,6		0,5	
		Katkı dozajı (bağlayıcı ağırlığınca-%)			
		0	0,1	0,2	0,3
UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	9,6	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	40,0	-	-	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	8,9	23,4	21,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	37,1	96,9	87,4
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	8,8	23,0	21,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	36,4	96,0	87,3
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	7,2	21,1	20,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	34,8	90,8	84,9
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	8,7	23,0	21,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	36,3	95,3	87,1
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	7,7	22,1	19,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	35,2	91,7	77,0
UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	10,4	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	43,1	-	-	-
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	9,6	27,6	23,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	40,1	114,5	95,9
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	9,4	25,6	21,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	38,9	106,0	89,5
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	9,0	25,2	21,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	36,4	104,3	88,3
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	9,6	26,1	22,1
	Dinamik ekg (Pa)	-	40,0	108,2	91,8
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	9,2	24,3	21,3
	Dinamik ekg (Pa)	-	38,1	100,6	88,3
UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	10,7	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	44,5	-	-	-
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,1	29,8	26,6
	Dinamik ekg (Pa)	-	41,8	123,5	110,2
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,0	28,8	25,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	41,6	119,2	107,4
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	9,7	28,1	24,4
	Dinamik ekg (Pa)	-	40,3	116,5	101,3
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,1	28,9	26,5
	Dinamik ekg (Pa)	-	41,8	119,8	109,9
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,0	28,3	24,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	41,6	117,4	99,6
UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	11,6	-	-	-
	Dinamik ekg (Pa)	48,1	-	-	-
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,4	30,9	28,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	47,3	128,0	115,9
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,1	30,7	27,7
	Dinamik ekg (Pa)	-	46,2	127,4	114,9
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,8	30,0	26,9
	Dinamik ekg (Pa)	-	45,0	124,5	111,5
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	11,1	30,8	27,8
	Dinamik ekg (Pa)	-	46,1	127,6	115,3
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>	Viskozite (Pa.s)	-	10,9	29,9	27,0
	Dinamik ekg (Pa)	-	45,4	124,1	112,0

#### 4.7. Zamana Bağlı Yayılma ve Mini V Hunisi Akış Süresi Sonuçları

##### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Çalışmanın birinci aşamasında sentezlenen ana zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak hazırlanan harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi akış süreleri belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların 60 dakika boyunca her 15 dakikada bir yayılma değerleri ölçülmüştür. Böylece, karışımların zamana bağlı yayılma performansları kıyaslanmıştır. Ancak öncesinde hedef yayılma değerini sağlamak amacıyla su azaltıcı katkı ihtiyacı hesaplanmıştır. İstenen yayılma değerini sağlayacak uygun katkı miktarını belirlemek için farklı katkı oranlarında karışımlar hazırlanarak yayılma miktarları ölçülmüştür. Katkı miktarlarına bağlı olarak belirlenen yayılma miktarları Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Sonuçlara göre, PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarında hedef yayılmaya karşılık gelen katkı oranı bağlayıcı ağırlığının %0,60’ı, PC<sub>10k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>15</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>15</sub> karışımlarında %0,56’sı, PC<sub>10k</sub>-UK<sub>30</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>30</sub> karışımlarında %0,50’si ve PC<sub>10k</sub>-UK<sub>45</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>45</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarında ise %0,46’sıdır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi uçucu kül kullanımı ile hedef yayılmayı sağlamak için ihtiyaç duyulan katkı miktarı azalmıştır. Bu miktar uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte daha da azalmıştır. İnce malzeme artışıyla beklenen aksine yayılma performansı iyileşmiştir. Bu olay yuvarlak taneli olan uçucu külün çimento taneleri arasında sürtünmeyi azaltarak topaklaşmayı engellemesinden kaynaklanmaktadır (Mardani-Aghabaglou ve diğerleri, 2017b)

Hedeflenen sabit yayılmayı sağlamak amacıyla belirlenen katkı oranları kullanılarak hazırlanan karışımların zamana bağlı yayılma ve bağlı yayılma değerleri sırasıyla Çizelge 4.21 ve Şekil 4.23’de verilmiştir. Beklenildiği gibi tüm harç karışımlarının yayılma miktarları zamanla azalmıştır. PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarında zamanla yayılma kaybı PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına oranla daha düşük çıkmıştır. 60 dakika sonunda, PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları %25 oranında yayılma kaybı gösterirken bu kaybın PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımında %32 oranında olduğu gözlemlenmiştir. Bu oranlar tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.

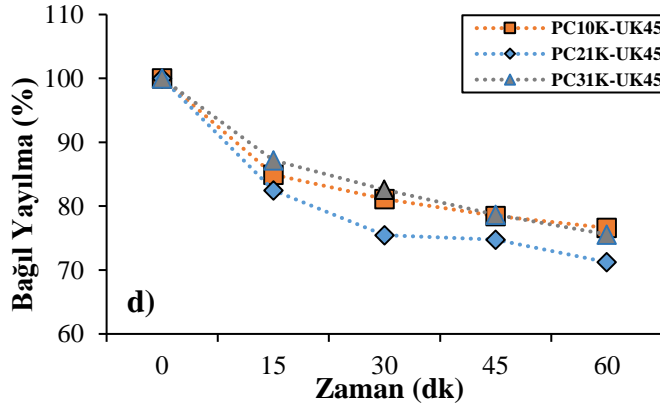
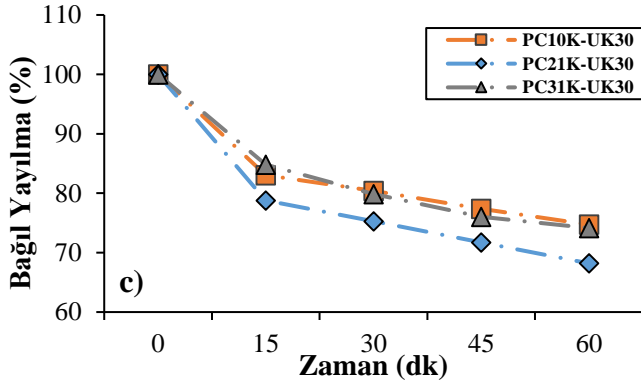
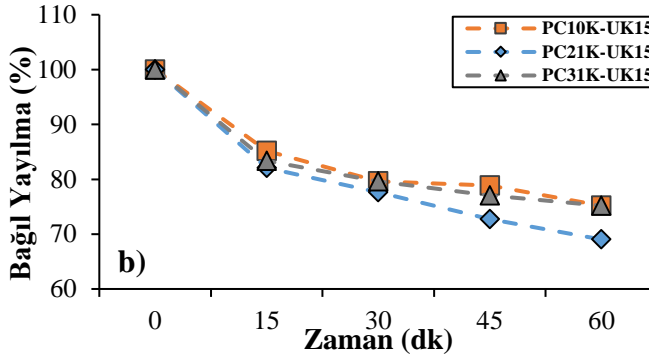
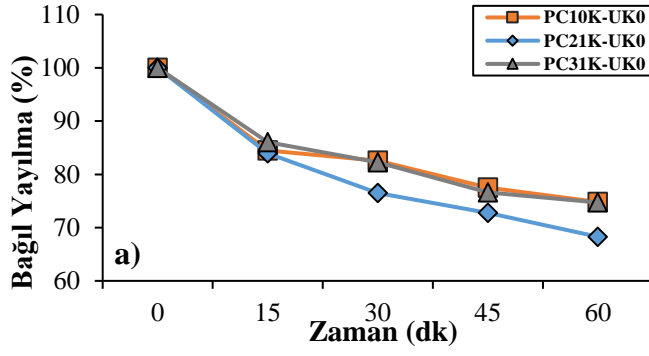


**Şekil 4.22.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül

**Çizelge 4.21.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma)

Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0dk	15dk	30dk	45dk	60dk	0dk	15dk
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	0,60	25,8	21,8	21,3	20,0	19,3	10,26	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>		26,8	22,5	20,5	19,5	18,3	6,27	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>		26,5	22,8	21,8	20,3	19,8	11,47	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	0,56	27,0	23,0	21,5	21,3	20,3	8,30	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>		26,8	22,0	20,8	19,5	18,5	5,64	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>		27,0	22,5	21,5	20,8	20,3	13,12	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	0,50	26,5	22,0	21,3	20,5	19,8	10,03	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>		28,3	22,3	21,3	20,3	19,3	8,09	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>		26,3	22,3	21,0	20,0	19,5	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	0,46	26,5	22,5	21,5	20,8	20,3	-	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>		28,5	23,5	21,5	21,3	20,3	10,15	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>		25,8	22,5	21,3	20,3	19,5	-	-

Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akışı süresi değişimi Çizelge 4.21’de gösterilmiştir. 15 dakika üretim sonrası tüm karışımlar V-hunisinden akmadığından sadece başlangıç akış süresi değerleri alınmıştır. Uçucu kül ikame edilmeyen karışımların akış süresi değerleri dikkate alındığında V-hunisinden en hızlı akan karışımın PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı en yavaş akan karışımın ise PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı olduğu belirlenmiştir. PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına göre V-hunisinden sırasıyla %64 ve %83 oranlarında daha yavaş akmıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca çimento yerine ağırlıkça ikame edilen ve çimentoya göre daha ince olan uçucu kül kullanımı katı madde miktarının ve viskozitenin artmasına neden olmaktadır. Bu durum uçucu kül ikameli karışımların akış performansının genel olarak olumsuz etkilenmesine sebep olmuştur. Çalışma kapsamında değerlendirildiğinde; PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları karşılaştırıldığında beklendiği üzere PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub>’nin performansının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı Marsh-hunisi deneyinde olduğu gibi bu trende uymamaktadır. Bunun en olası sebebi polimer zincirinin uzunluğunun çimento ile etkileşimden kendi içerisinde topaklaşmaya neden olacak kadar yüksek olmasıdır. Sonuç olarak akışkanlık açısından değerlendirildiğinde; yan zincir uzunlukları 2400 g/mol olarak sabit tutulduğunda 24, 48 ve 71 kg/mol molekül ağırlığındaki polimerler arasından optimum molekül ağırlığı 48 kg/mol olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.23.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül

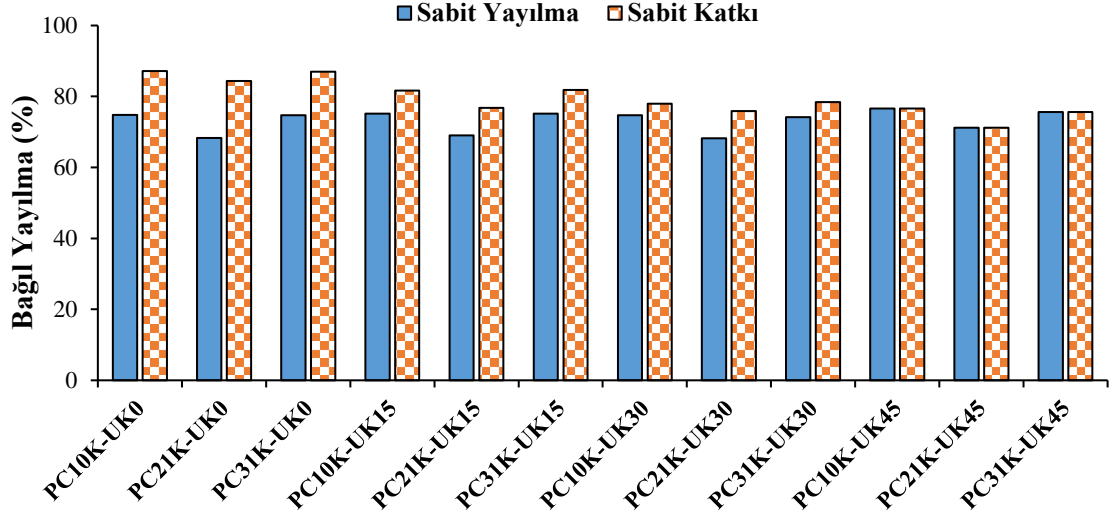
Sonuç olarak, kıvam koruma açısından değerlendirildiğinde PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına göre daha iyi performans göstermiştir. Akış performansı açısından bakıldığında ise en iyi sonucu sırasıyla PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları vermiştir. Buna ilaveten uçucu kül kullanımı karışımların yayılma performansını olumlu, akış performansını ise olumsuz etkilemiştir. Ancak bu deneyler sabit yayılma esas alınarak yapıldığı için uçucu külün etkisinden kaynaklı katkı miktarları farklı oranlarda kullanılmıştır. Dolayısıyla katkı etkisini her karışımda eşit şekilde gösterememiştir. Böylece, uçucu kül kullanımının harçların zamana bağlı davranışlarına doğrudan etkisi anlaşılamamaktadır. Bundan dolayı harç karışımlarının zamana bağlı davranışları sabit katkı kullanılarak ayrıca incelenmiştir. Katkı oranı olarak ise hedef yayılmayı sağlayan en düşük oran %0,46 (%45 uçucu kül ikameli karışımlarda kullanılan oran) tercih edilmiştir. Bu orandan daha fazla katkı kullanımı %45 uçucu kül ikameli karışımlarda ayrılmaya neden olmaktadır.

**Çizelge 4.22.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı)

Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0dk	15dk	30dk	45dk	60dk	0dk	15dk
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	0,46	23,3	21,3	20,5	20,5	20,3	13,38	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>		24,3	21,5	21,3	21,0	20,5	7,94	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>		23,0	21,0	20,8	20,3	20,0	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	0,46	24,5	21,0	20,8	20,5	20,0	-	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>		25,8	21,5	20,5	20,0	19,8	8,46	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>		24,8	21,5	21,0	20,8	20,3	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	0,46	26,3	22,3	21,8	21,0	20,5	-	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>		27,0	22,5	22,0	21,5	20,5	9,35	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>		25,5	22,0	21,3	20,5	20,0	-	-
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	0,46	26,5	22,5	21,5	20,8	20,3	-	-
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>		28,5	23,5	21,5	21,3	20,3	10,15	-
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>		25,8	22,5	21,3	20,3	19,5	-	-

Sabit katkı kullanılarak imal edilen karışımların zamana bağlı yayılma değerleri Çizelge 4.22’de verilmiştir. Buna ilaveten sabit yayılma ve sabit katkı esas alınarak üretilen harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağıl yayılma değerleri ise Şekil 4.24’te gösterilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere sabit katkı esas alınarak yapılan deneylerde, sabit

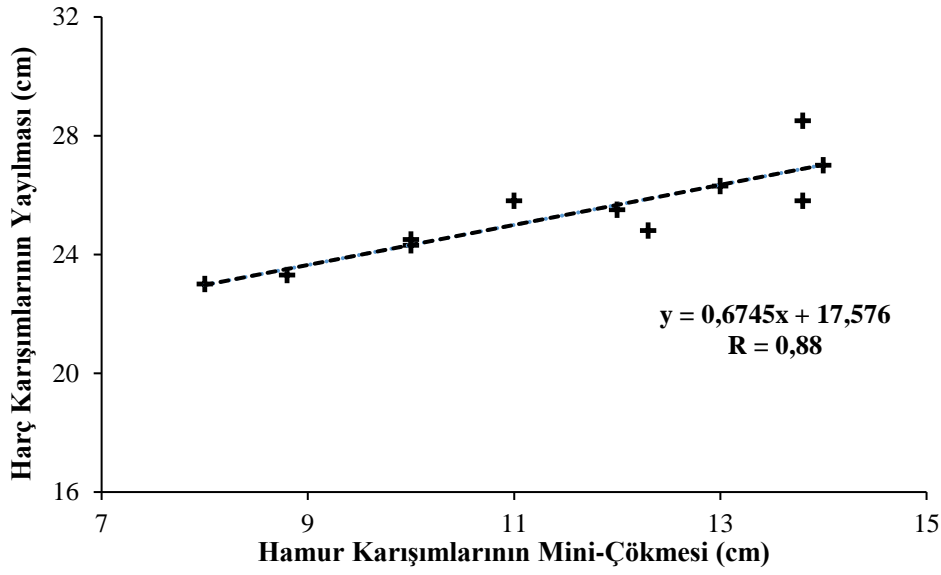
yayılma esas alınarak yapılan deneylere oranla daha az katkı kullanılmıştır. Ancak 60 dk sonunda daha az katkı kullanılan karışımlarda meydana gelen kıvam kaybının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir ifadeyle katkı dozajı ile kıvam kaybı arasında doğrusal bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin katkının zamanla etkisini kaybettiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 4.24.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağlı yayılma değerleri

Yayılma deneyi sonuçlarına göre uçucu kül kullanımı tüm katkılı karışımlarda başlangıç yayılma miktarlarını arttırmıştır. Bu artış miktarı uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte daha da artmıştır. PC<sub>10k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>10k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>10k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %5, %13 ve %14 oranlarında daha yüksek, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>21k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının başlangıç yayılma miktarlarının PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %6, %11 ve %17 oranlarında daha yüksek ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>31k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının ise PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %8, %11 ve %12 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.





**Şekil 4.25.** Ana zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki

Sabit katkı ilave edilen harç karışımlarının yayılma değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %0,46'sı) ile hamur karışımlarının mini-çökme değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %1,25'i) arasında Şekil 4.25'den de anlaşıldığı üzere doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

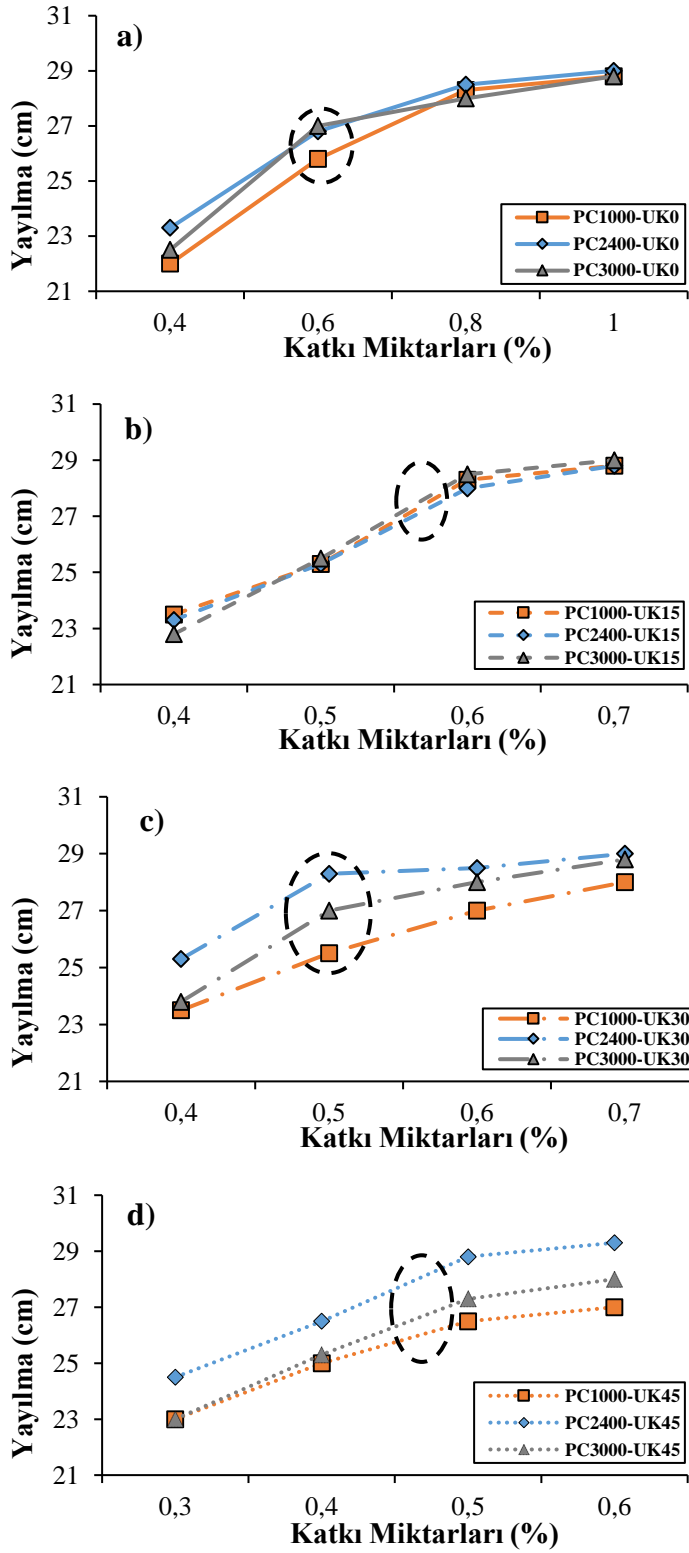
Uçucu külün karışımların zamana bağlı yayılma davranışlarına etkisi incelendiğinde 60 dk sonunda uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte katkı tipinden bağımsız olarak karışımların kıvam kaybının arttığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu kül çimentoya göre %22 oranında daha ince bir malzemedir. Ayrıca çimento yerine ağırlıkça ikame edilen uçucu külün özgül ağırlığı çimentoya oranla % 27 daha düşük ve dolayısıyla karışımdaki katı tanecik miktarı daha fazladır. Her iki durumda bağlayıcı yüzey alanının artmasına ve buna bağlı olarak hidrasyon hızının artmasına ve kıvam kaybının artmasına neden olmaktadır. PC<sub>10k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>10k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>10k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %6, %11 ve %11 oranlarında daha yüksek, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>21k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının kıvam kaybı miktarlarının PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %9, %10 ve %16 oranlarında daha yüksek ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>31k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının ise PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %6, %10 ve %13 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Sabit katkı kullanılarak imal edilen karışımların V-hunisi akış süresi değerleri Çizelge 4.22’de verilmiştir. Sonuçlara göre, başlangıçta tüm PC<sub>21k</sub> katkılı karışımlarda V-hunisinden akış gerçekleşirken, PC<sub>10k</sub> ve PC<sub>31k</sub> katkılı karışımlarda V-hunisinden akış gerçekleşmemiştir. 15 dakika üretim sonrası ise tüm karışımlarda akış gerçekleşmemiştir. PC<sub>21k</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>21k</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının V-hunisi akış sürelerinin PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %7, %18 ve %28 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

### ***Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın ikinci aşamasında sentezlenen yan zincir uzunlukları farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak hazırlanan harç karışımlarının zamana bağlı yayılma performansı belirlenmiştir (Şekil 4.26). Şekil 4.26’da gösterilen yayılma değerleri dikkate alınarak her karışım için 27±2 cm yayılma değerini sağlayan su azaltıcı katkı miktarı belirlenmiştir. Sonuçlara göre su azaltıcı katkı tipinden bağımsız olarak uçucu kül içermeyen PC<sub>1000</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarında istenilen yayılma değeri bağlayıcı ağırlığının %0,6’sı oranında katkı kullanıldığında sağlamıştır. Bu değer uçucu kül ikame oranı %15, 30 ve 45 olan karışımlarda sırasıyla bağlayıcı ağırlığının %0,56, 0,50 ve 0,46 oranındadır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi uçucu kül kullanımı ile hedef yayılmayı sağlamak için ihtiyaç duyulan katkı miktarı azalmıştır.

Hedef yayılma değerini sağlamak amacı ile belirlenen katkı oranları doğrultusunda hazırlanan karışımların zamana bağlı yayılma ve bağıl yayılma değerleri belirlenmiş ve sırasıyla Çizelge 4.23 ve Şekil 4.27’de verilmiştir. Zamana bağlı yayılma performansı açısından en başarılı karışım yan zincir uzunluğu en kısa olan katkıyı içeren PC<sub>1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı olurken, yan zincir uzunluğu PC<sub>1000</sub> katkısına oranla daha uzun olan katkıları içeren PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarında yayılma kayıpları daha fazla olmuştur.



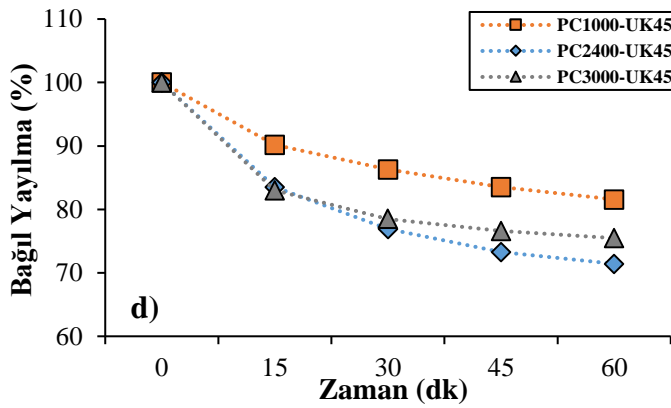
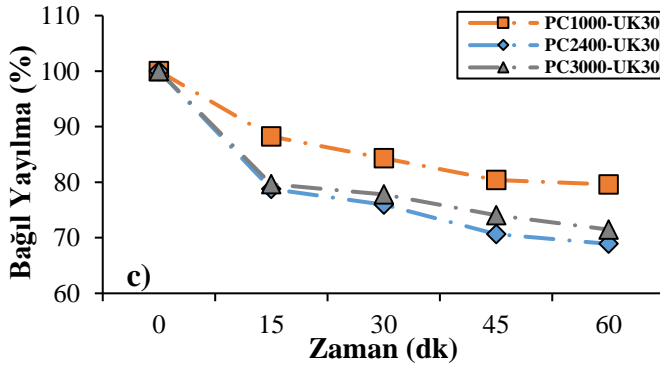
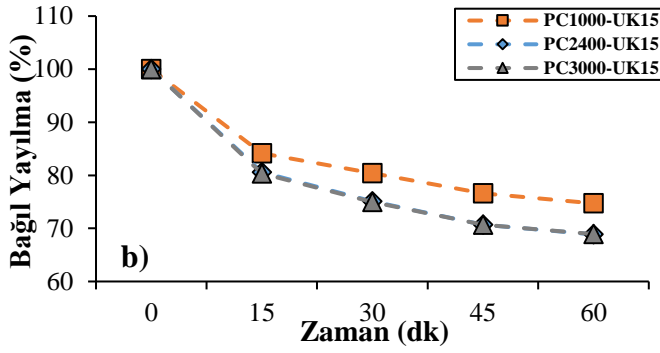
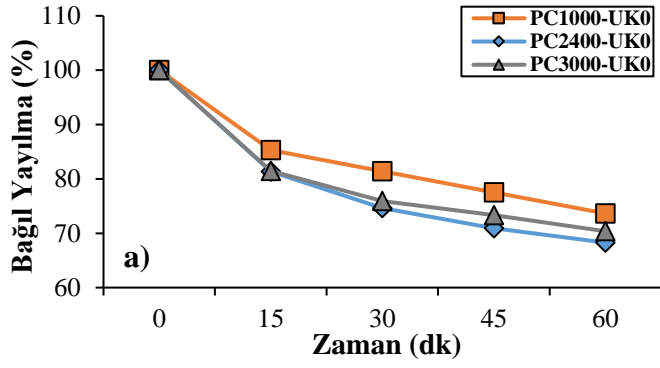
**Şekil 4.26.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül

60 dakika sonunda PC<sub>1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı %26 oranında yayılma kaybı gösterirken PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları ise sırasıyla %32 ve %30 oranında yayılma kaybı göstermiştir. Bu trend, tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.

**Çizelge 4.23.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma)

Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0dk	15dk	30dk	45dk	60dk	0dk	15dk
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>		25,8	22,0	21,0	20,0	19,0	9,25	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	0,60	26,8	21,8	20,0	19,0	18,3	6,37	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>		27,0	22,0	20,5	19,8	19,0	11,04	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>		26,5	22,3	21,3	20,3	19,8	10,62	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	0,56	27,3	22,0	20,5	19,3	18,8	5,86	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>		28,0	22,5	21,0	19,8	19,3	11,09	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>		25,5	22,5	21,5	20,5	20,3	11,16	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	0,50	28,3	22,3	21,5	20,0	19,5	8,19	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>		27,0	21,5	21,0	20,0	19,3	11,64	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>		25,5	23,0	22,0	21,3	20,8	-	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	0,46	27,3	22,8	21,0	20,0	19,5	10,24	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>		26,5	22,0	20,8	20,3	20,0	-	-

Çimento yüzeyine adsorbe olan katkı yan zincirlerin oluşturduğu sterik etkiden dolayı karışımda akışkanlık performansını arttırırken, çözelti içerisinde serbest kalan yani adsorbe olamayan katkılarda karışımların zamana bağlı işlenebilirliğini etkilemektedir (Wang ve diğerleri, 2018; Li ve diğerleri, 2014; Anagnostopoulos, 2014). Literatürden de bilindiği üzere yan zincirlerin uzun olması durumunda yan zincirlerin iç içe geçmesinden dolayı polimer köprüsü oluşmakta ve bu durum polimerlerin kendi içinde hareketini engelleyebilmekte ve anyonik monomerlerin çimento tane yüzeylerine adsorpsiyon miktarının azalmasına sebep olmaktadır. Böylece, yan zincir uzunluğu arttıkça polimerin karışımda serbest halde bulunma ihtimali de artmaktadır (Kong ve diğerleri, 2016; Qiu ve diğerleri, 2011; Guo ve diğerleri, 2009). Diğer yandan yapılan çalışmalara göre yan zincir uzunluğunun azalmasıyla katkıların çimento yüzeyine adsorpsiyonu kolaylaşmakta ve çimentolu sistemlerde priz ve hidrasyon süresi artmaktadır (Ferrari ve diğerleri, 2011; Qiu ve diğerleri, 2011). Söz konusu bu priz gecikmesinin, kimyasal katkıların hidrate olmuş/olmamış fazların yüzeylerine adsorpsiyonu nedeniyle gerçekleştiği düşünülmektedir (Jolicoeur ve diğerleri, 1994).



**Şekil 4.27.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül

Sonuç olarak katkıların yan zincirleri ve anyonik monomerleri arasında adsorpsiyon ve dağılma özelliği bakımından özel bir ilişki vardır. Çimento yüzeyine adsorbe olan katkı, karışımda akışkanlık performansı sağlarken, çözelti içinde serbest kalan katkılarda çimentolu sistemlerin zamana bağlı işlenebilirliğinin korunması mekanizmasında önemli rol oynamaktadır. Bu durumda akışkanlık performansı ile işlenebilirliğin korunmasının ters orantılı olduğu sonucuna varılabilir.

Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akışı süresi değişimi Çizelge 4.23'de gösterilmiştir. Üretimden 15 dakika sonrası tüm karışımlar V-hunisinden akmadığından sadece başlangıç akış süresi değerleri alınmıştır. Katkı yan zincir uzunluğu değişiminin harç karışımların V-hunisi akış özelliğine etkisi, hamur karışımların Marsh-hunisi akış performansına benzer olmuştur. Külsüz karışımların akış süresi değerleri dikkate alındığında V-hunisinden en hızlı akan karışımın PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı en yavaş akan karışımın ise PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı olduğu tespit edilmiştir. Yan zinciri kısa ve uzun olan katkı içeren karışımların akış performansları sırasıyla yetersiz sterik etki ve yetersiz adsorpsiyondan dolayı olumsuz etkilenmiştir. Benzer davranış tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da gözlemlenmiştir. Çimento yerine ağırlıkça ikame edilen ve çimentoya göre Blaine inceliği daha fazla olan uçucu kül kullanımı karışımın bağlayıcı miktarının ve viskozitenin artmasına neden olmaktadır. Bu durum uçucu kül ikameli karışımların akış performansının genel olarak olumsuz etkilenmesine sebep olmuştur.

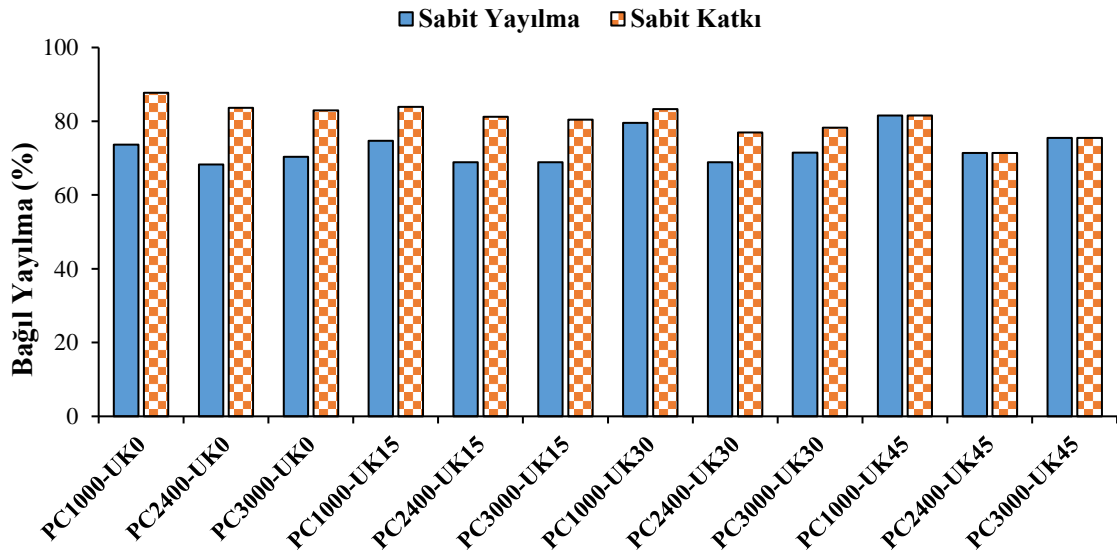
Su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğu değişimi ve kül kullanım oranının harç karışımlarının zamana bağlı yayılma özelliğine etkisini daha sağlıklı bir şekilde incelemek amacı ile tüm karışımlar sabit su azaltıcı katkı içeriğinde tekrar hazırlanmıştır. Bu aşamada karışımların sabit katkı içeriği hedef yayılma değerini sağlayan en düşük katkı oranı olan %0,46 (%45 uçucu kül ikameli karışımlarda hedef yayılmayı sağlayan oran) olarak tercih edilmiştir. Bu oranın tercih edilmesinin sebebi %45 oranında kül içeren karışımda %0,46'nın üstünde katkı kullanıldığı takdirde karışımda ayrışma oluşumu gözlemlenmiştir.

Sabit katkı kullanılarak üretilen karışımların zamana bağlı yayılma değerleri Çizelge 4.24'te verilmiştir. Kıvam koruma özelliği açısından PC<sub>1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve

PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarına göre daha iyi performans göstermiştir. Sabit yayılma değeri ve sabit katkı içeriği esas alınarak üretilen harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağıl yayılma değerleri Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.24.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı)

Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0dk	15dk	30dk	45dk	60dk	0dk	15dk
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	0,46	22,8	21,8	21,3	20,5	20,0	13,38	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>		24,5	22,3	21,8	21,0	20,5	7,49	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>		23,5	22,0	21,0	20,3	19,5	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	0,46	23,0	21,8	20,8	20,0	19,3	-	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>		25,0	23,0	22,3	21,0	20,3	8,61	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>		24,0	22,3	21,0	20,0	19,3	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	0,46	24,0	22,3	21,8	21,0	20,0	-	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>		26,0	22,5	21,8	21,0	20,0	9,55	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>		25,3	22,3	21,5	20,5	19,8	-	-
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	0,46	25,5	23,0	22,0	21,3	20,8	-	-
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>		27,3	22,8	21,0	20,0	19,5	10,92	-
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>		26,5	22,0	20,8	20,3	20,0	-	-



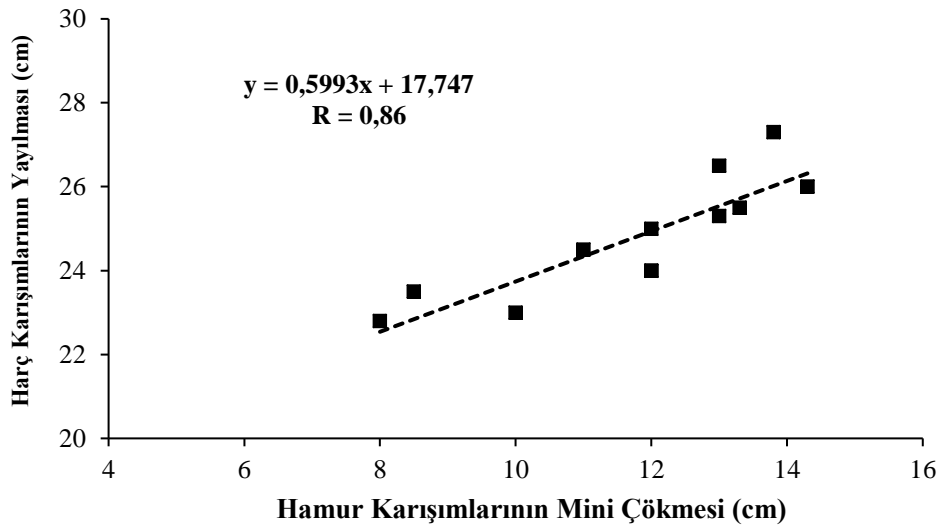
**Şekil 4.28.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağıl yayılma değerleri

Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere 60 dk sonunda daha az miktarda su azaltıcı katkı içeren karışımlarda kıvam kaybının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir ifadeyle katkı

dozajı ile kıvam kaybı arasında doğrusal bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin su azaltıcı katkının zamanla etkisini kaybettiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yayılma deneyi sonuçlarına göre su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğundan bağımsız olarak uçucu kül kullanımı ile karışımların başlangıç yayılma değerleri artmıştır. Bu etki uçucu kül kullanım oranının artışıyla daha da belirgin olmuştur. Karışımların zamana bağlı yayılma davranışı incelendiğinde 60 dakika sonunda uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte su azaltıcı katkı tipinden bağımsız olarak karışımların kıvam kaybının arttığı gözlemlenmiştir.

Sabit katkı yan zincir uzunluğu ve uçucu kül kullanım oranından bağımsız olarak sabit katkı içeriğine sahip harç karışımlarının yayılma değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %0,46'sı) ile hamur karışımlarının mini-çökme değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %0,75'i) arasında Şekil 4.29'dan da anlaşıldığı üzere doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.29.** Yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki

Sabit katkı kullanılarak imal edilen karışımların V-hunisi akış süresi değerleri Çizelge 4.24'te verilmiştir. Sonuçlara göre, başlangıçta tüm PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> isimli katkı içeren

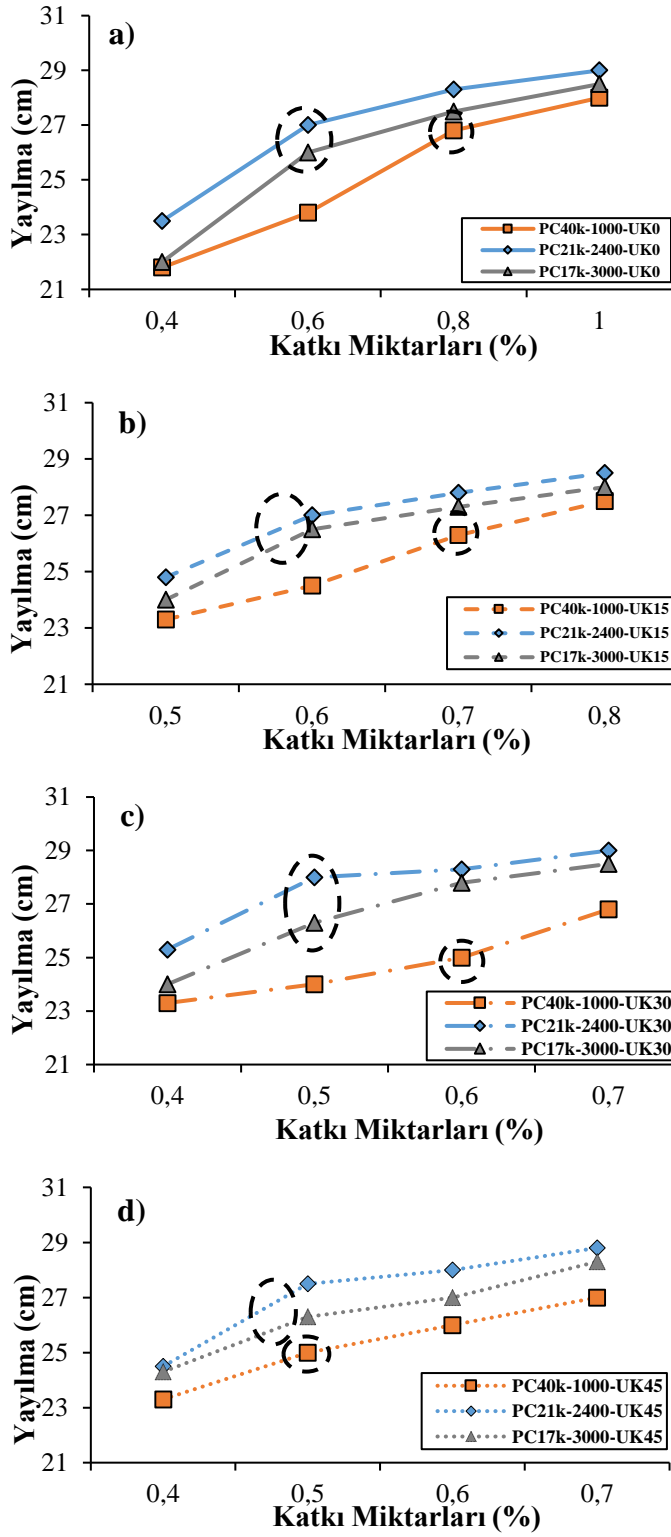


karışımlarda V-hunisinden akış gerçekleşirken, PC<sub>1000</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> isimli katkı içeren karışımlarda V-hunisinden akış gerçekleşmemiştir. 15 dakika üretim sonrası ise tüm karışımlarda akış gerçekleşmemiştir. PC<sub>2400</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>2400</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>2400</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının V-hunisi akış sürelerinin PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %15, %28 ve %46 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

### ***Sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Çalışmanın üçüncü aşamasında sentezlenen sabit molekül ağırlığında su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkıların çimentolu sistemlerin zamana bağlı yayılma özelliğine etkisini belirlemek amacı ile harç karışımları hazırlanmıştır. Şekil 4.30'dan da görüldüğü üzere her karışım için bağlayıcı ağırlığının %0,4 ile %1 arasında eşit miktarlarda su azaltıcı katkı ilave edilerek karışımların yayılma miktarı ölçülmüştür. Daha sonra her karışım için 27±2 cm yayılma değerini sağlayan su azaltıcı katkı miktarı tespit edilmiştir. Sonuçlara göre, uçucu kül içermeyen PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımında istenilen yayılma değeri bağlayıcı ağırlığının %0,8'i, PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarında ise %0,6'sı kadar katkı kullanıldığı durumda sağlanmıştır. Bu değer PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>15</sub> karışımlarında sırasıyla %0,7, %0,56, %0,56 ve PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>30</sub>, PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>30</sub>, PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>30</sub> karışımlarında ise sırasıyla %0,6, %0,5, %0,5 olduğu tespit edilmiştir. Benzer oran %45 kül içeren karışımlarda sırasıyla, %0,5, %0,46 ve %0,46 olarak ölçülmüştür.

Çalışmanın devamında harç karışımlarının zamana bağlı yayılma performansını incelemek amacıyla bir önceki aşamada tespit edilen katkı miktarları dikkate alınarak 27±2 cm hedef yayılma değerine sahip harç karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımların 1 saat boyunca yayılma değişimi gözlemlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.25 ve Şekil 4.31'de verilmiştir. Zamana bağlı yayılma performansı açısından en başarılı karışım ana zinciri en uzun, yan zinciri en kısa olan katkıyı içeren PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı olmuştur. 60 dakika sonunda PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı %25 oranında yayılma kaybı gösterirken PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları ise sırasıyla %32 ve %27 oranında yayılma kaybı göstermiştir. Bu trend, tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.

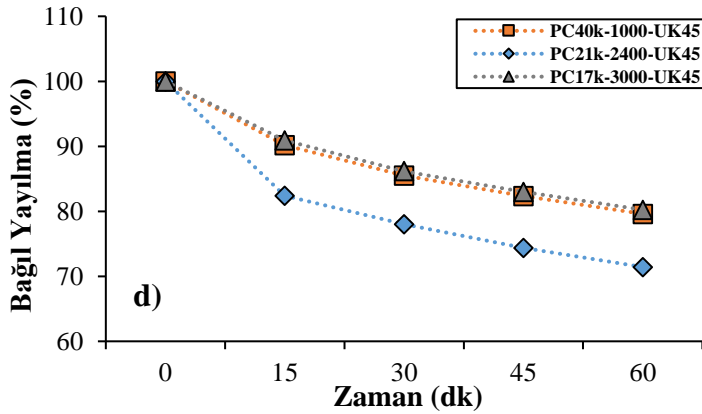
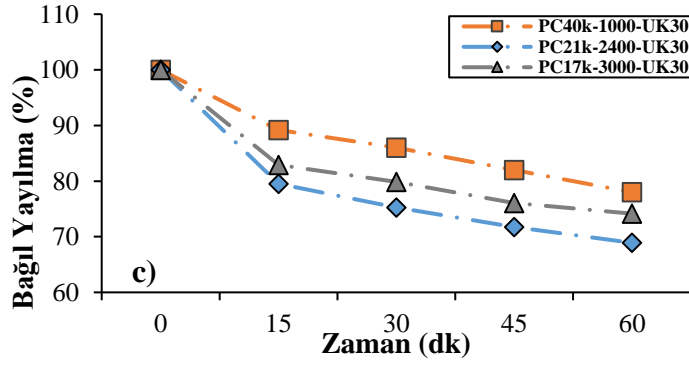
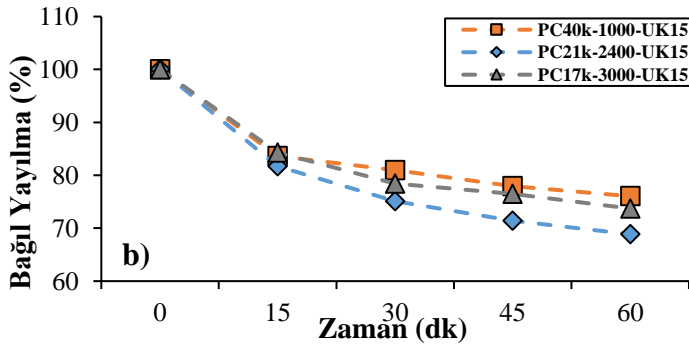
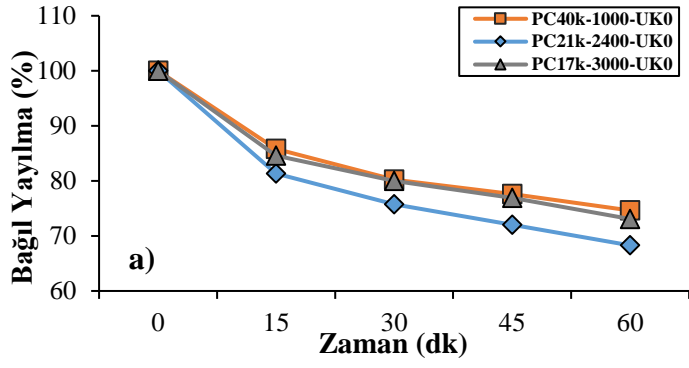


**Şekil 4.30.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül

Felekoğlu ve Sarıkahya (2008) göre, katkı çimento yüzeyine ne kadar hızlı adsorbe olursa karışımın başlangıçtaki akış performansı o kadar yüksek olmaktadır. Ancak buna bağlı olarak zamana bağlı yayılma ve akış performansları olumsuz etkilenmektedir. Literatürden de bilindiği üzere ana zincirin ve yan zincirin uzun olması durumunda söz konusu zincirler içiçe geçebilmekte ve birbirlerine takılabilmektedir. Buna bağlı olarak karışım içerisinde adsorbe olamayan polimerlerin serbest halde bulunma olasılığı artmaktadır (Kong ve diğerleri, 2016; Qiu ve diğerleri, 2011; Guo ve diğerleri, 2009; Zingg ve diğerleri, 2009; Xiong ve diğerleri, 2008). Bu aşamada da görüldüğü gibi PC<sub>21k-2400</sub> katkısını içeren külsüz ve kül ikameli karışımların Marsh hunisi akış performansı ve başlangıç yayılma değeri en yüksek olurken, zamana bağlı yayılma performansı bakımından tüm karışımlar arasında en olumsuz davranışı göstermiştir.

**Çizelge 4.25.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma)

Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0 dk	15 dk	30 dk	45 dk	60 dk	0 dk	15 dk
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	0,80	26,8	23,0	21,5	20,8	20,0	9,23	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	0,60	26,8	21,8	20,3	19,3	18,3	6,73	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	0,60	26,0	22,0	20,8	20,0	19,0	12,92	-
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	0,70	26,3	22,0	21,3	20,5	20,0	11,68	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	0,56	27,3	22,3	20,5	19,5	18,8	5,16	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	0,56	25,5	21,5	20,0	19,5	18,8	20,37	-
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	0,60	25,0	22,3	21,5	20,5	19,5	14,00	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	0,50	28,3	22,5	21,3	20,3	19,5	8,96	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	0,50	26,3	21,8	21,0	20,0	19,5	16,42	-
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	0,50	25,5	23,0	21,8	21,0	20,3	-	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	0,46	27,3	22,5	21,3	20,3	19,5	10,52	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	0,46	25,3	23,0	21,8	21,0	20,3	-	-



**Şekil 4.31.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül

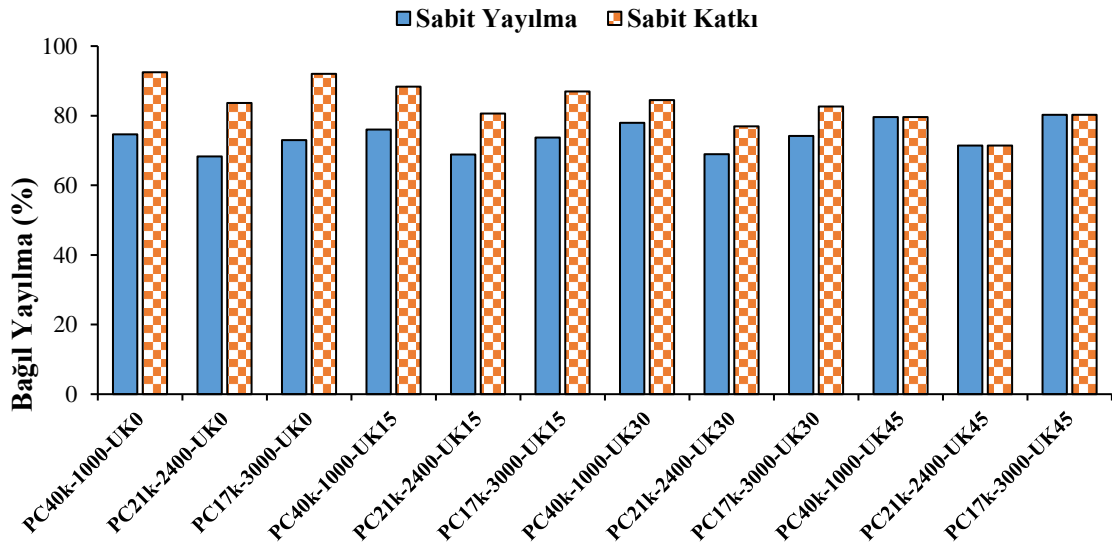
Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akışı süresi değişimi Çizelge 4.25’de gösterilmiştir. Üretimden 15 dakika sonrası tüm karışımlar V-hunisinden akmadığından sadece başlangıç akış süresi ölçümü yapılmıştır. Uçucu kül içermeyen karışımların akış süresi değerleri dikkate alındığında V-hunisinden en hızlı akan karışımın PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı en yavaş akan karışımın ise PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı olduğu tespit edilmiştir. Ana zinciri kısa ve yan zinciri uzun olan katkıları içeren karışımların akış performansları yetersiz elektrostatik etki, yetersiz sterik etki ve yetersiz adsorpsiyondan dolayı olumsuz etkilenmiştir. Benzer davranış tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da gözlemlenmiştir..

Su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişimi ve kül kullanım oranının harç karışımlarının zamana bağlı yayılma özelliğine etkisini daha sağlıklı bir şekilde incelemek amacı ile tüm karışımlar sabit su azaltıcı katkı içeriğinde tekrar hazırlanmıştır. Bu aşamada, karışımlarda sabit katkı içeriği toplam bağlayıcı miktarının %46 (%45 uçucu kül ikameli karışımlarda hedef yayılmayı sağlayan oran) olarak seçilmiştir. Bu oranın tercih edilmesinin sebebi %45 oranında kül içeren karışımda %0,46’ın üstünde katkı kullanıldığı takdirde karışımda ayrışma oluşumu gözlemlenmiştir. Sabit katkı kullanılarak üretilen karışımların zamana bağlı yayılma değerleri Çizelge 4.26’da verilmiştir. Kıvam koruma özelliği açısından PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı, PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarına göre daha iyi performans göstermiştir. Sabit yayılma değeri ve sabit katkı içeriği esas alınarak üretilen harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağlı yayılma değerleri Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere 60 dk sonunda daha az miktarda su azaltıcı katkı içeren karışımlarda kıvam kaybının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir ifadeyle katkı dozajı ile kıvam kaybı arasında doğrusal bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir.

Yayılma deneyi sonuçlarına göre su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunluğundan bağımsız olarak uçucu kül kullanımı ile karışımların başlangıç yayılma değerleri artmıştır. Bu etki uçucu kül kullanım oranının artışıyla daha da belirgin olmuştur. Karışımların zamana bağlı yayılma davranışı incelendiğinde 60 dakika sonunda uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte su azaltıcı katkı tipinden bağımsız olarak karışımların kıvam kaybının arttığı gözlemlenmiştir.

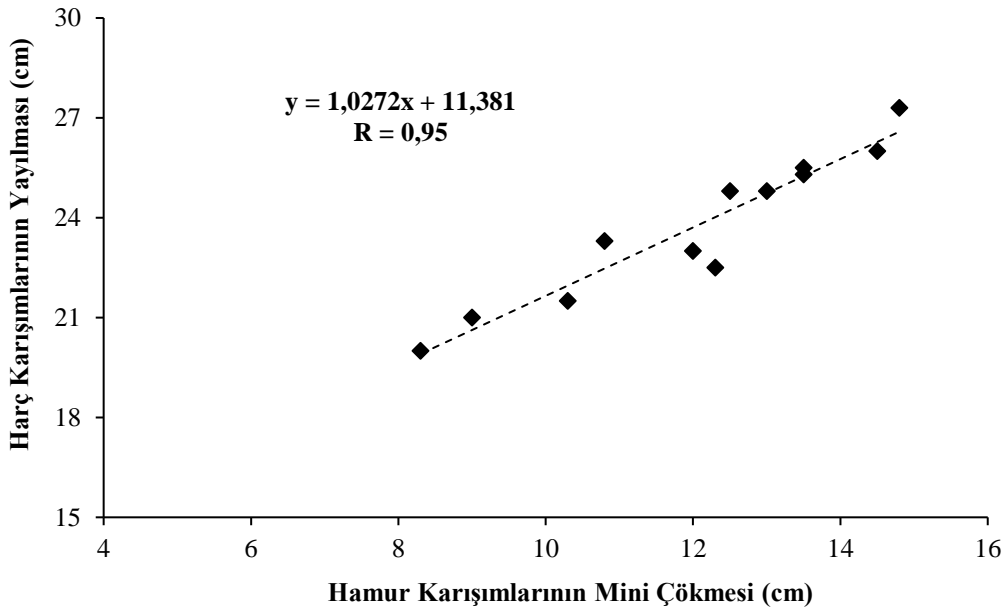
**Çizelge 4.26.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı)

Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0 dk	15 dk	30 dk	45 dk	60 dk	0 dk	15 dk
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	0,46	20,0	19,5	19,3	18,8	18,5	-	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>		23,3	22,0	21,3	20,0	19,5	8,03	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>		21,0	20,5	20,5	20,0	19,3	-	-
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	0,46	21,5	21,0	20,5	19,8	19,0	-	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>		24,8	23,8	22,5	21,0	20,0	8,66	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>		23,0	22,3	21,8	21,0	20,0	-	-
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	0,46	22,5	21,8	21,0	20,0	19,0	-	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>		26,0	24,0	23,0	21,3	20,0	9,44	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>		24,8	24,0	22,8	21,5	20,5	-	-
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	0,46	25,5	23,0	21,8	21,0	20,3	-	-
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>		27,3	22,5	21,3	20,3	19,5	10,52	-
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>		25,3	23,0	21,8	21,0	20,3	-	-



**Şekil 4.32.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağıl yayılma değerleri

Sabit molekül ağırlığında katkı ana zincir ve yan zincir uzunluğu ve uçucu kül kullanım oranından bağımsız olarak sabit katkı içeriğine sahip harç karışımlarının yayılma değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %0,46'sı) ile hamur karışımlarının mini-çökme değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %0,75'i) arasında doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu Şekil 4.33'den de anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.33.** Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki

Sabit katkı içeriğinde imal edilen karışımların V-hunisi akış süresi değerleri Çizelge 4.26'da verilmiştir. Sonuçlara göre, başlangıçta PC<sub>21k-2400</sub> isimli katkıyı içeren karışımlarda V-hunisinden akış gerçekleşirken. PC<sub>40k-1000</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub> isimli katkıları içeren karışımlarda V-hunisinden akış gerçekleşmemiştir. 15 dakika üretim sonrası ise tüm karışımlarda akış gerçekleşmemiştir. PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarının V-hunisi akış sürelerinin PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla, %8, %18 ve %31 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

#### ***Anyonik monomer değişiminin etkisi***

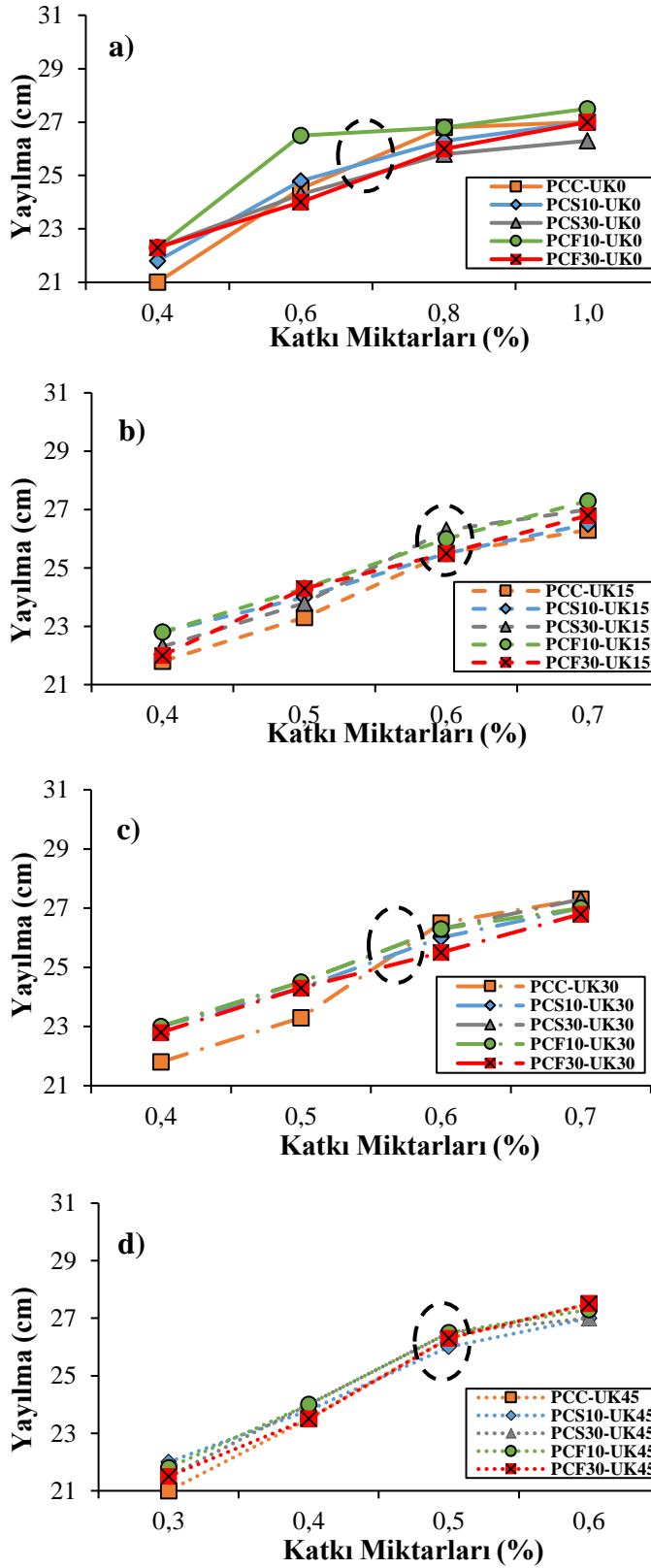
Çalışmanın dördüncü aşamasında sentezlenen anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı katkıların çimentolu sistemlerin zamana bağlı yayılma özelliğine etkisini belirlemek amacı ile harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar için 27±2 cm yayılma değerini sağlayan su azaltıcı katkı miktarı tespit edilmiştir (Şekil 4.34). Sonuçlara göre, uçucu kül içermeyen PC<sub>C</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>S10</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>S30</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>F10</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>F30</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarında istenilen yayılma değeri bağlayıcı ağırlığının %0,7'si kadar katkı kullanıldığı durumda sağlanmıştır. Bu değerin PC<sub>C</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>S10</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>S30</sub>-UK<sub>15</sub>, PC<sub>F10</sub>-UK<sub>15</sub> ve PC<sub>F30</sub>-UK<sub>15</sub> karışımlarında %0,6, PC<sub>C</sub>-UK<sub>30</sub>, PC<sub>S10</sub>-UK<sub>30</sub>, PC<sub>S30</sub>-UK<sub>30</sub>,

PC<sub>F10</sub>-UK<sub>30</sub> ve PC<sub>F30</sub>-UK<sub>30</sub> karışımlarında %0,56 ve PC<sub>C</sub>-UK<sub>45</sub>, PC<sub>S10</sub>-UK<sub>45</sub>, PC<sub>S30</sub>-UK<sub>45</sub>, PC<sub>F10</sub>-UK<sub>45</sub> ve PC<sub>F30</sub>-UK<sub>45</sub> karışımlarında ise %0,5 olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında üretilen karışımların 1 saat boyunca yayılma değişimi gözlemlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.27 ve Şekil 4.35’de verilmiştir. Zamana bağlı yayılma performansı açısından en başarılı karışım anyonik monomer türü %100 karboksilat olan PC<sub>C</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı olmuştur. 60 dakika sonunda PC<sub>C</sub>-UK<sub>0</sub> karışımı %22 oranında yayılma kaybı gösterirken PC<sub>S10</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>S30</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>F10</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>F30</sub>-UK<sub>0</sub> karışımları ise sırasıyla %23, 25, 23 ve 25 oranlarında yayılma kaybı göstermiştir. Bu trend, tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.

Daha önce de bahsedildiği üzere akışkanlık performansı ile işlenebilirliğin korunması ters orantılıdır. Bu aşamada da görüldüğü gibi PC<sub>F30</sub> ve PC<sub>S30</sub> katkılarını içeren külsüz ve kül ikameli karışımların Marsh hunisi akış performansı ve başlangıç yayılma değeri en yüksek olurken, zamana bağlı yayılma performansı bakımından tüm karışımlar arasında en olumsuz davranışı göstermiştir.

Harç karışımlarının zamana bağlı V-hunisi akışı süresi değişimi Çizelge 4.27’de gösterilmiştir. Üretimden 15 dakika sonrası tüm karışımlar V-hunisinden akmadığından sadece başlangıç akış süresi ölçümü yapılmıştır. Burada da Marsh-hunisi akış performansına benzer davranış gözlemlenmiştir. Uçucu kül içermeyen karışımların akış süresi değerleri dikkate alındığında V-hunisinden en hızlı akan karışımlar PC<sub>S30</sub>-FA<sub>0</sub> ve PC<sub>F30</sub>-FA<sub>0</sub> karışımları, en yavaş akan karışımın ise PC<sub>C</sub>-FA<sub>0</sub> karışımı olduğu tespit edilmiştir. Benzer davranış tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da gözlemlenmiştir. Çimento yerine ağırlıkça ikame edilen ve çimentoya göre Blaine inceliği daha fazla olan uçucu kül kullanımı karışımın bağlayıcı miktarının ve viskozitenin artmasına neden olmaktadır. Bu durum uçucu kül ikameli karışımların akış performansının genel olarak olumsuz etkilenmesine sebep olmuştur.





**Şekil 4.34.** Anyonik monomer tipi farklı uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının katkı dozajına bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül

**Çizelge 4.27.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit yayılma)

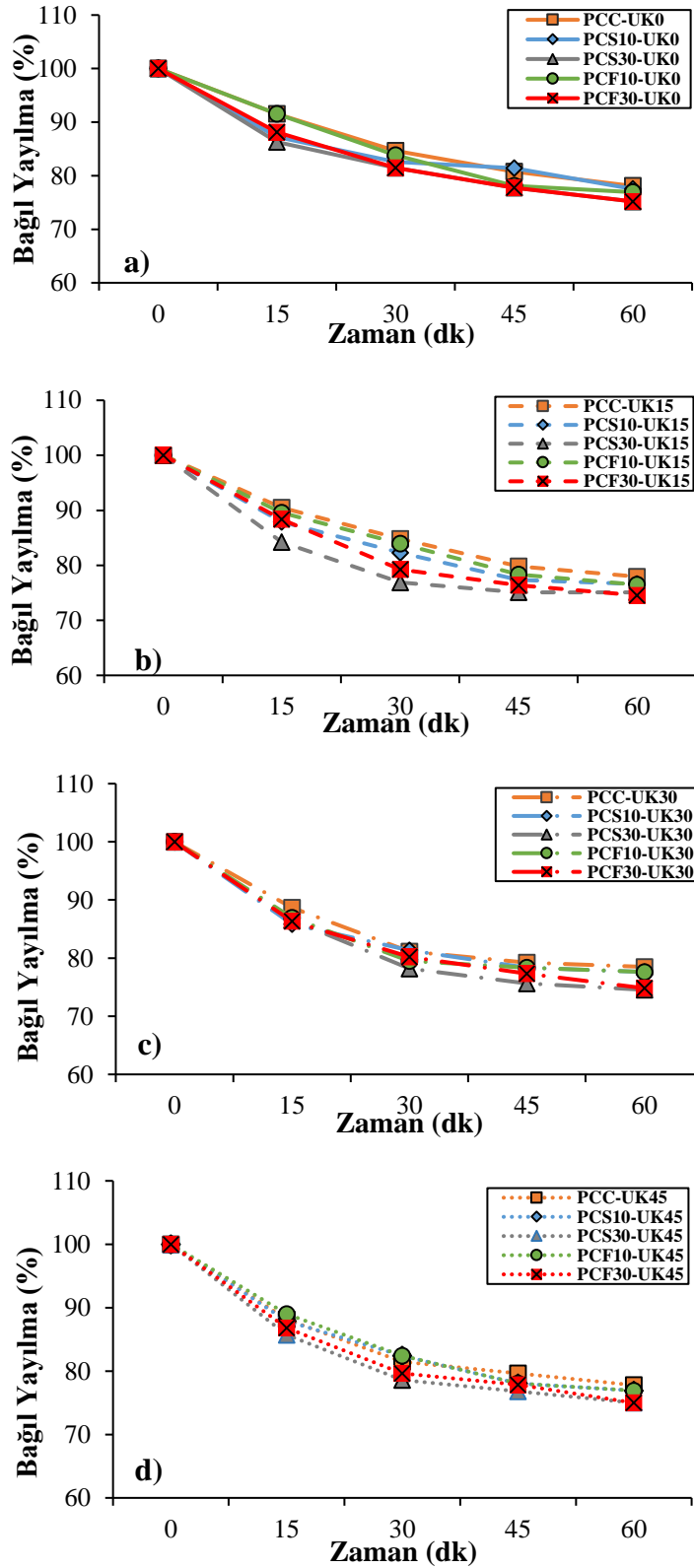
Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0 dk	15 dk	30 dk	45 dk	60 dk	0 dk	15 dk
PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	0,70	26,0	23,8	22,0	21,0	20,3	7,42	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>		25,8	22,5	21,3	21,0	20,0	7,38	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>		27,0	23,3	22,0	21,0	20,3	7,13	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>		26,0	23,8	21,8	20,3	20,0	7,31	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>		27,0	23,8	22,0	21,0	20,3	7,25	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	0,60	26,3	23,8	22,3	21,0	20,5	8,64	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>		26,5	23,3	21,8	20,5	20,3	8,51	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>		27,3	23,0	21,0	20,5	20,5	8,24	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>		26,8	24,0	22,5	21,0	20,5	8,57	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>		27,5	24,3	21,8	21,0	20,5	8,19	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	0,56	26,5	23,5	21,5	21,0	20,8	11,37	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>		26,8	23,0	21,8	21,0	20,8	11,09	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>		27,5	23,8	21,5	20,8	20,5	10,89	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>		26,8	23,3	21,3	21,0	20,8	11,11	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>		27,8	24,0	22,3	21,5	20,8	10,83	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	0,50	27,0	23,8	22,0	21,5	21,0	-	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>		27,3	24,0	22,5	21,3	21,0	-	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>		28,0	24,0	22,0	21,5	21,0	-	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>		27,3	24,3	22,5	21,3	21,0	-	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>		28,0	24,3	22,3	21,8	21,0	-	-

Su azaltıcı katkı anyonik monomer türünün harç karışımlarının zamana bağlı yayılma özelliğine etkisini daha sağlıklı bir şekilde incelemek amacı ile tüm karışımlar sabit su azaltıcı katkı içeriğinde tekrar hazırlanmıştır. Söz konusu kıyaslama sabit yayılma durumunda gerçekleştiği zaman her karışımın su azaltıcı katkı içeriği farklı olduğu için elde edilen sonuçlar katkının anyonik monomer değişiminin etkisini ortaya koymamaktadır. Bu aşamada, karışımlarda sabit katkı içeriği toplam bağlayıcı miktarının %0,5 (%45 uçucu kül ikameli karışımlarda hedef yayılmayı sağlayan oran) olarak seçilmiştir. Bu oranın tercih edilmesinin sebebi %45 oranında kül içeren karışımda %0,5'in üstünde katkı kullanıldığı takdirde karışımda ayrışma oluşumu gözlemlenmiştir. Sabit katkı kullanılarak üretilen karışımların zamana bağlı yayılma değerleri Çizelge 4.28 ve Şekil 4.35'de verilmiştir. Kıvam koruma özelliği açısından PC<sub>C</sub>-FA<sub>0</sub> karışımı diğer karışımlara göre daha iyi performans göstermiştir. Sabit yayılma değeri ve sabit katkı içeriği esas alınarak üretilen harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağlı yayılma değerleri Şekil 4.36'da gösterilmiştir.

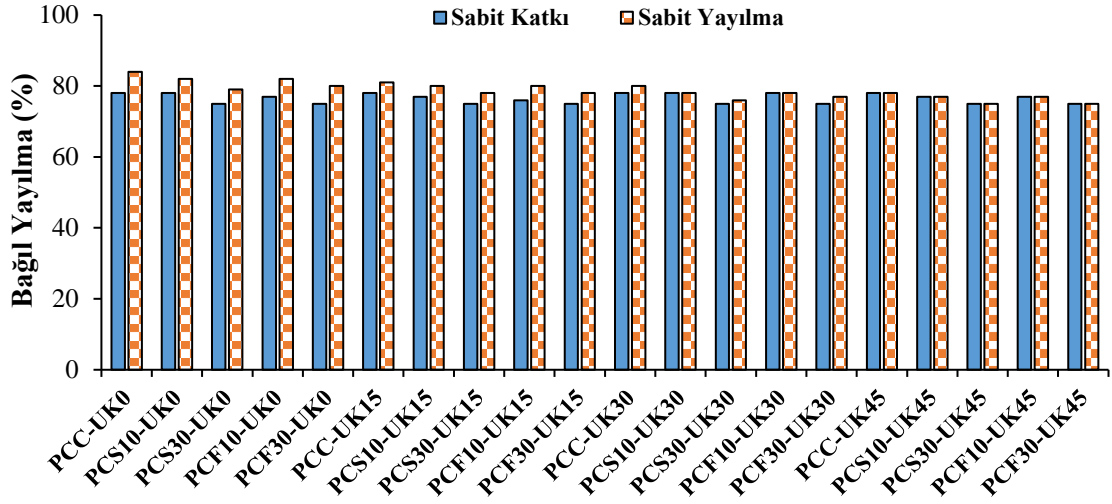
**Çizelge 4.28.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma ve V-hunisi deney sonuçları (sabit katkı)

Karışım	Katkı Oranı (%)	Zamana Bağlı Yayılma (cm)					V Hunisi Akış Süresi (s)	
		0 dk	15 dk	30 dk	45 dk	60 dk	0 dk	15 dk
PC <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>		24,5	22,0	21,5	21,0	20,5	11,66	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>		24,8	21,8	21,0	20,5	20,3	11,24	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	0,50	25,8	22,3	21,3	20,8	20,5	10,87	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>		24,5	21,8	20,8	20,3	20,0	11,02	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>		26,5	23,3	22,3	21,8	21,3	10,85	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>		25,0	22,0	21,3	20,8	20,3	13,90	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>		25,0	22,3	21,0	20,5	20,0	12,87	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	0,50	26,5	22,5	21,5	21,0	20,8	12,47	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>		25,3	21,8	21,0	20,3	20,3	12,91	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>		27,0	23,5	22,0	21,5	21,0	12,34	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>		26,3	23,0	22,3	21,5	21,0	-	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>		26,5	22,5	21,8	21,0	20,8	-	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	0,50	27,5	23,3	22,3	21,8	21,0	13,98	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>		26,5	23,0	22,3	21,5	20,8	-	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>		27,5	23,5	22,8	22,0	21,3	13,79	-
PC <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>		27,0	23,8	22,0	21,5	21,0	-	-
PC <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>		27,3	24,0	22,5	21,3	21,0	-	-
PC <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	0,50	28,0	24,0	22,0	21,5	21,0	-	-
PC <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>		27,3	24,3	22,5	21,3	21,0	-	-
PC <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>		28,0	24,3	22,3	21,8	21,0	-	-

Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere 60 dk sonunda daha az miktarda su azaltıcı katkı içeren karışımlarda kıvam kaybının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir ifadeyle katkı dozajı ile kıvam kaybı arasında doğrusal bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir. Bunun su azaltıcı katkının zamanla etkisini kaybettiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bilindiği gibi, istenilen yayılma değeri su ilave edilerek sağlandığı durumda katkı ilave edilmesi ile sağlanan duruma göre daha uzun süre etkinliğini koruyabilir.

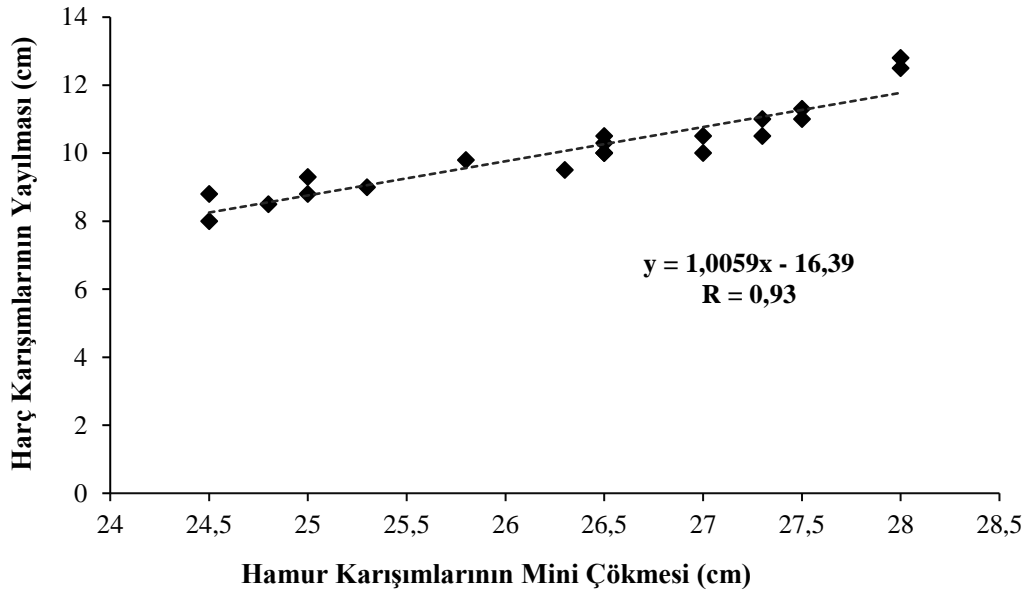


Şekil 4.35. Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma miktarları a) %0 uçucu kül b) %15 uçucu kül c) %30 uçucu kül d) %45 uçucu kül



**Şekil 4.36.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının 60 dk sonundaki bağlı yayılma değerleri

Anyonik monomer tipi ve uçucu kül kullanım oranından bağımsız olarak sabit katkı içeriğine sahip harç karışımlarının yayılma değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %0,46'sı) ile hamur karışımlarının mini-çökme değerleri (katkı miktarı bağlayıcı ağırlığının %0,75'i) arasında doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu Şekil 4.37'den de anlaşılmaktadır. Sabit katkı içeriğinde imal edilen karışımların V-hunisi akış süresi değerleri Çizelge 4.28'de verilmiştir. Sonuçlara göre, başlangıçta külsüz ve %15 uçucu kül ikameli tüm karışımlar ile %30 ikameli  $PC_{S30-UK30}$  ve  $PC_{F30-UK30}$  karışımlarda V hunisinden akış gerçekleşirken, üretimden 15 dakika sonrası tüm karışımlarda akış gerçekleşmemiştir.  $PC_{S10-UK0}$ ,  $PC_{S30-UK0}$ ,  $PC_{F10-UK0}$  ve  $PC_{F30-UK0}$  karışımlarının V-hunisi akış sürelerinin  $PC_C-UK0$  karışımına kıyasla sırasıyla, %4, %7, %5 ve %7 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.37.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren hamur karışımlarının mini-çökme ve harç karışımlarının yayılma miktarları arasındaki ilişki

#### 4.8. Basınç Dayanımı Sonuçları

##### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Ana zincir uzunluğu birbirinden farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak üretilen harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.29'da verilmiştir. Katkıların ana zincir uzunluğu değişimi harç karışımlarının erken yaş dayanımlarını etkilemiştir. PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarının 1 günlük basınç dayanımlarının PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla sırasıyla %18,5 ve %60 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> katkısının PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> katkısına oranla çimento yüzeyine daha az adsorbe olduğundan, PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> katkısının ise topaklaşmadan dolayı PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> katkısına göre daha az adsorbe olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir ifadeyle, PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarında PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımına kıyasla daha çok katkı molekülü serbest halde bulunmaktadır. Bu durum PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> katkı ilaveli karışımların dayanımlarının daha düşük çıkmasına sebep olmuştur. 1 günden sonraki dayanımlarda karışımlar arasındaki dayanım farkları zamanla azalmıştır. İleri yaşlarda ise karışımların basınç dayanımları neredeyse aynı değerdedir. Katkının ana zincir uzunluğu değişiminin harç karışımlarının

basınç dayanımlarına olan etkilerinin, tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.29.** Ana zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)				
	1 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>0</sub>	8,3	30,1	36,4	41,2	47,2
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>0</sub>	7,0	27,8	33,7	38,8	46,5
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>0</sub>	11,2	30,5	35,4	38,5	45,2
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>15</sub>	5,6	28,1	33,9	43,9	49,3
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>15</sub>	6,4	23,0	31,0	40,0	47,2
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>15</sub>	7,5	26,3	33,9	42,2	47,0
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>30</sub>	4,0	20,0	28,8	39,8	53,8
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>30</sub>	5,2	21,1	26,5	37,5	50,5
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>30</sub>	6,0	22,2	29,1	38,8	50,2
PC <sub>10k</sub> -UK <sub>45</sub>	2,2	14,1	21,5	31,4	43,7
PC <sub>21k</sub> -UK <sub>45</sub>	4,2	14,7	20,4	33,2	44,2
PC <sub>31k</sub> -UK <sub>45</sub>	4,7	15,5	22,7	33,2	46,9

Çizelge 4.29’da yer alan basınç dayanımı değerleri incelendiğinde su azaltıcı katkı türünden bağımsız olarak beklenildiği gibi uçucu kül kullanımı harç karışımlarının erken yaş dayanımlarını (1, 3 ve 7 gün) olumsuz yönde etkilemiştir. Ancak, uçucu külün puzolanik reaksiyonu sonucu CH’ların C-S-H’a dönüşmesiyle uçucu kül ikameli karışımların ileri yaş basınç dayanımları kül içermeyen karışımlara kıyasla daha yüksek olmuştur (Mehta and Monteiro, 1997). %30 oranına kadar uçucu kül kullanımı harç karışımlarının 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını olumlu yönde etkilerken, %45 oranında uçucu kül kullanımı ise olumsuz yönde etkilemiştir. Bu bağlamda, bu çalışmada dayanım açısından optimum uçucu kül kullanım oranının %30 olduğu belirlenmiştir.

#### ***Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Yan zincir uzunluğu birbirinden farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak üretilen harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.30’da

verilmiştir. Çizelge 4.30'dan da görüldüğü gibi katkıların yan zincir uzunluğu değişimi külsüz ve kül ikameli tüm harç karışımlarının erken ve ileri yaş dayanımlarını ciddi mertebede etkilememiştir.

**Çizelge 4.30.** Yan zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)				
	1 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>0</sub>	9,3	27,7	36,2	38,9	46,0
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>0</sub>	7,3	27,6	34,7	38,7	46,8
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>0</sub>	7,9	27,1	34,3	41,6	48,1
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>15</sub>	8,3	25,4	30,9	43,0	47,2
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>15</sub>	6,4	23,5	31,2	40,0	47,9
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>15</sub>	7,6	21,9	31,3	41,7	49,1
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>30</sub>	7,0	21,4	27,5	33,5	50,0
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>30</sub>	5,4	21,2	26,8	36,5	50,4
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>30</sub>	6,5	22,2	27,9	35,2	49,2
PC <sub>1000</sub> -UK <sub>45</sub>	4,4	17,7	22,0	29,9	45,2
PC <sub>2400</sub> -UK <sub>45</sub>	4,1	15,6	21,0	32,5	44,8
PC <sub>3000</sub> -UK <sub>45</sub>	4,4	15,6	21,2	29,7	43,4

***Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunlukları birbirinden farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak üretilen harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.31'de verilmiştir. Çizelge 4.31'den de görüldüğü gibi uçucu kül kullanım oranından bağımsız olarak sabit molekül ağırlığında katkı ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişimi ile harç karışımlarının erken ve ileri yaş dayanımları ciddi mertebede etkilenmemiştir.



**Çizelge 4.31.** Molekül ağırlığı sabit ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)				
	1 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>0</sub>	7,5	26,8	36,9	43,6	49,4
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>0</sub>	7,2	26,8	33,7	38,8	46,7
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>0</sub>	9,5	28,3	36,1	42,7	49,2
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>15</sub>	6,7	25,7	36,5	43,9	51,0
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>15</sub>	6,4	23,8	32,2	40,1	48,2
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>15</sub>	8,8	26,6	35,9	46,8	53,8
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>30</sub>	4,1	21,7	25,6	41,2	52,0
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>30</sub>	5,1	21,4	26,7	41,4	50,8
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>30</sub>	4,8	23,2	29,7	41,5	57,7
PC <sub>40k-1000</sub> -UK <sub>45</sub>	1,8	14,1	20,3	32,4	39,5
PC <sub>21k-2400</sub> -UK <sub>45</sub>	3,9	15,7	21,2	32,5	44,2
PC <sub>17k-3000</sub> -UK <sub>45</sub>	3,2	15,3	21,9	32,6	42,8

#### *Anyonik monomer değişiminin etkisi*

Anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak üretilen harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.32’de verilmiştir. Katkıların anyonik monomer değişiminin karışımların erken ve ileri yaş dayanımlarını önemli ölçüde etkilemediği tespit edilmiştir. Katkının anyonik monomer tipinin harç karışımlarının basınç dayanımlarına olan etkisinin, tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer olduğu gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.32.** Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımları

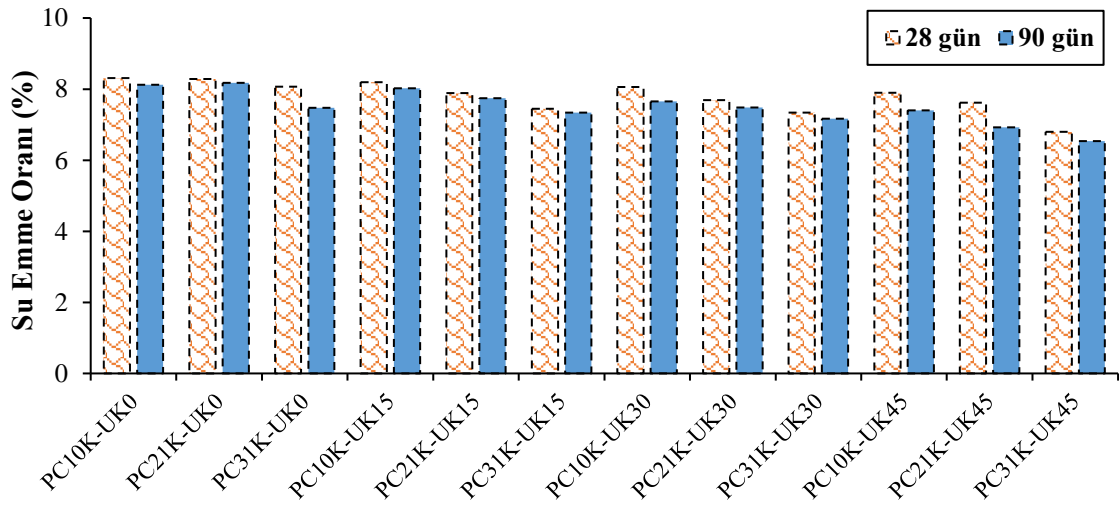
Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)				
	1 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>0</sub>	10,3	30,6	34,7	43,1	44,4
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>0</sub>	8,8	28,3	33,9	42,8	43,8
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>0</sub>	8,9	31,5	35,2	43,9	45,0
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>0</sub>	6,8	28,5	35,8	43,3	44,9
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>0</sub>	6,8	28,7	36,8	44,3	45,5
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>15</sub>	7,1	23,3	32,9	44,6	50,9
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>15</sub>	6,1	26,4	31,6	43,5	49,9
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>15</sub>	6,4	28,1	30,5	44,8	52,2
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>15</sub>	5,7	26,9	32,9	44,3	50,4
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>15</sub>	5,2	24,6	32,1	44,9	53,1
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>30</sub>	4,3	19,8	29,1	41,8	51,6
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>30</sub>	4,1	21,5	27,1	41,5	53,5
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>30</sub>	3,6	20,8	29,7	42,0	55,9
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>30</sub>	5,0	21,8	29,2	42,7	53,2
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>30</sub>	4,8	20,4	27,0	41,2	52,7
PCE <sub>C</sub> -UK <sub>45</sub>	3,4	15,5	24,8	35,6	40,2
PCE <sub>S10</sub> -UK <sub>45</sub>	3,0	15,2	23,6	35,2	39,6
PCE <sub>S30</sub> -UK <sub>45</sub>	3,2	16,2	24,0	34,9	39,9
PCE <sub>F10</sub> -UK <sub>45</sub>	3,9	15,6	22,7	36,0	38,7
PCE <sub>F30</sub> -UK <sub>45</sub>	3,5	16,0	23,1	36,4	39,5

#### 4.9. Su Emme Kapasitesi Sonuçları

##### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

Ana zincir uzunluğu birbirinden farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak üretilen harç karışımlarının 28 ve 90 günlük su emme oranları Şekil 4.38’de gösterilmiştir. Uçucu kül kullanım oranından ve su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğundan bağımsız olarak karışımların 28 günlük su emme oranlarının %6,6-8,3 arasında olduğu belirlenmiştir. PC<sub>10k</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>21k</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>31k</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarının 28 günlük su emme oranları sırasıyla %8,2, 8,3 ve 8,1 olarak tespit edilmiştir. 90 günlük su emme oranları, 28 günlük su emme oranlarına istinaden biraz daha düşük çıkmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere, katkıları karışımların su emme oranlarında kayda değer bir etki oluşturmamıştır. Bu durum tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.

Şekil 4.38’de yer alan su emme oranları incelendiğinde su azaltıcı katkı türünden bağımsız olarak uçucu kül kullanımı karışımların 28 günlük su emme oranlarını bir miktar azaltırken, 90 günlük su emme oranlarını daha bariz bir şekilde azaltmıştır. Bilindiği gibi bu olumlu etki kullanılan uçucu külün fiziko-kimyasal etkisinden kaynaklanmaktadır. Fiziksel olarak uçucu kül çimentoya kıyasla daha ince olduğundan boşlukları tıkayarak geçirgenliğin azalmasına neden olmaktadır. Kimyasal olarak ise gerçekleşen puzolanik reaksiyon sayesinde CH’lar C-S-H’a dönüştüğünden daha dolu ve güçlü bir yapı oluşmaktadır. Söz konusu bu fiziksel etki mineral katkılı sistemin erken yaşlardaki davranışını kontrol etmektedir. Kimyasal etki ise mineral katkıların ileri yaş dayanımını belirlemektedir. Kullanılan uçucu külün inceliği çimentoya kıyasla bir miktar fazla olduğundan 28 günlük kısa periyotta uçucu kül kullanım etkisi bariz bir şekilde gözlemlenmemiştir. 90 gün kürlenme sonrası puzolanik reaksiyonlar daha da ilerlediğinden söz konusu etki daha belirgin olmuştur (Mardani-Aghabaglou ve diğerleri, 2014; Mehta ve Monteiro, 1997).

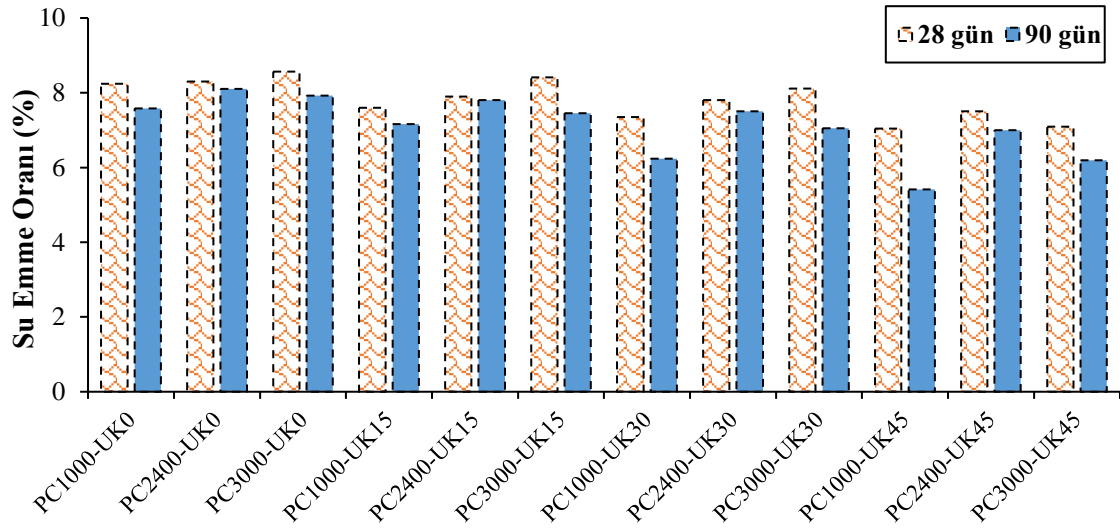


**Şekil 4.38.** Ana zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımlarının su emme oranları

#### ***Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Yan zincir uzunluğu birbirinden farklı su azaltıcı katkıları kullanarak üretilen harç karışımlarının 28 ve 90 günlük su emme oranları Şekil 4.39’da gösterilmiştir. Uçucu kül kullanım oranından ve su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğundan bağımsız olarak tüm harç

karışımların 28 günlük su emme oranlarının %7,0-8,6 arasında olduğu belirlenmiştir. PC<sub>1000</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarının 28 günlük su emme oranları sırasıyla %8,2, 8,3 ve 8,6 olarak tespit edilmiştir. 90 günlük su emme oranları, 28 günlük su emme oranlarına istinaden biraz daha düşük çıkmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere su azaltıcı katkı yan zincir uzunluğunun değişimi harç karışımların 28 ve 90 günlük su emme oranlarını ciddi mertebede etkilememiştir. Bu durum tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.

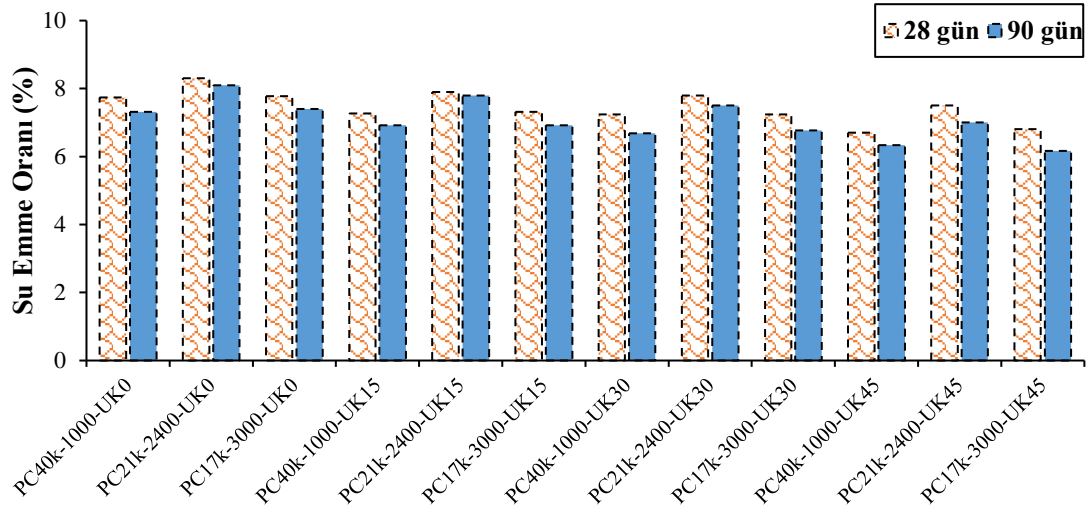


Şekil 4.39. Yan zincir uzunluğu farklı katkı içeren harç karışımlarının su emme oranları

#### ***Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunlukları birbirinden farklı su azaltıcı katkıları kullanarak üretilen harç karışımlarının 28 ve 90 günlük su emme oranları Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Uçucu kül kullanım oranından ve su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunluklarından bağımsız olarak tüm harç karışımların 28 günlük su emme oranlarının %6,7-8,3 arasında olduğu belirlenmiştir. PC<sub>40k-1000</sub>-UK<sub>0</sub>, PC<sub>21k-2400</sub>-UK<sub>0</sub> ve PC<sub>17k-3000</sub>-UK<sub>0</sub> karışımlarının 28 günlük su emme oranları sırasıyla %7,7, 8,3 ve 7,8 olarak tespit edilmiştir. 90 günlük su emme oranları, 28 günlük su emme oranlarına istinaden biraz daha düşük çıkmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere sabit molekül ağırlığında su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunluklarının değişimi harç

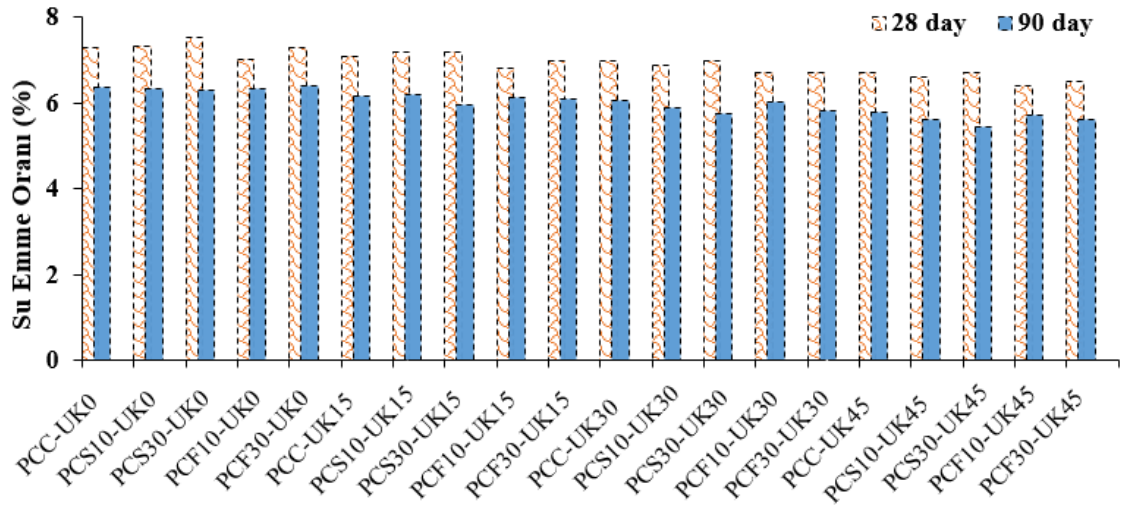
karışımlarının 28 ve 90 günlük su emme oranlarını ciddi mertebede etkilememiştir. Bu durum tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.



**Şekil 4.40.** Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunlukları farklı katkı içeren harç karışımlarının su emme oranları

#### *Anyonik monomer değişiminin etkisi*

Anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği birbirinden farklı su azaltıcı katkıları kullanılarak üretilen harç karışımlarının 28 ve 90 günlük su emme oranları Şekil 4.41’de gösterilmiştir. Uçucu kül kullanım oranından ve su azaltıcı katkı anyonik monomer türünden bağımsız olarak tüm harç karışımlarının 28 günlük su emme oranlarının %7,0-7,5 arasında olduğu belirlenmiştir. 90 günlük su emme oranları, 28 günlük su emme oranlarına istinaden biraz daha düşük çıkmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere anyonik monomer türü harç karışımlarının 28 ve 90 günlük su emme oranlarını ciddi mertebede etkilememiştir. Bu durum tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer çıkmıştır.



Şekil 4.41. Anyonik monomer tipi farklı katkı içeren harç karışımlarının su emme oranları

## 5. SONUÇ

Su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu, sabit molekül ağırlığında ana ve yan zincir uzunlukları ve anyonik monomer fonksiyonel grup içeriği değişiminin külsüz ve kül ikameli hamur ve harç karışımlarının adsorpsiyonu, priz süresi, Marsh-hunisi akış süresi, mini çökme, reolojik özellikler, zamana bağlı yayılma, zamana bağlı V hunisi akış süresi, basınç dayanımı ve su emme oranı üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Su azaltıcı katkı kullanımından bağımsız olarak uçucu kül kullanımı karışımların reolojik özelliklerini, Marsh-hunisi akış süresini ve V hunisi akış süresini olumsuz etkilemiş, priz süresini arttırmış, mini çökme ve yayılma performansını olumlu etkilemiş, su emme oranını ise azaltmıştır. Ayrıca uçucu kül kullanımı karışımların erken yaş dayanımlarını olumsuz yönde etkilerken ileri yaş dayanımlarını olumlu yönde etkilemiştir.

### *Ana zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

- Yan zincir uzunluğu sabit su azaltıcı katkılarda ana zincir uzunluğunun belirli bir değere kadar artması katkıda anyonik grup miktarının (karboksilat) artmasına bağlı olarak katkının adsorpsiyon miktarını arttırmıştır. Ancak ana zincirin fazla uzun olması köprüleme etkisinden dolayı adsorpsiyonun azalmasına yol açmıştır.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak, su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğu değişimi, hamur karışımlarının priz süresi üzerinde ciddi değişime neden olmamıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak, katkının ana zincir uzunluğunun belirli bir değere kadar artışı ile birlikte hamur karışımlarının Marsh-hunisi ve harç karışımlarının V hunisi akış performansları artarken, ana zincir uzunluğunun değişimi hamur karışımlarının mini-çökme değerlerini çok fazla etkilememiştir. Harç karışımlarının 60 dakika sonunda yayılma kayıpları dikkate alındığında, katkıların ana zincir uzunluğunun belirli bir değerden yüksek veya düşük olması

harç karışımlarının zamana bağlı yayılma performanslarını arttırmıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak, ana zincir uzunluğunun belirli değere kadar artması ile katkının adsorpsiyonunun artmasına bağlı olarak hamur ve harç karışımlarının reolojik özelliklerini olumlu yönde etkilenmiştir. Ancak ana zincirin fazla uzun olması köprüleme etkisinden dolayı adsorpsiyonu düşürmüş ve karışımların reolojik özellikleri olumsuz etkilenmiştir. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak katkıların ana zincir uzunluğu değişimi harç karışımlarının erken yaş dayanımlarını etkilemiştir. 1 günden sonraki dayanımlarda karışımlar arasındaki dayanım farkları zamanla azalmıştır. İleri yaşlarda ise karışımların basınç dayanımları neredeyse aynı değerdedir. Ayrıca katkıların karışımların su emme oranlarında kayda değer bir etki oluşturmamıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

#### *Yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi*

- Ana zincir uzunluğu sabit yan zincir uzunluğu değişken katkılarda yan zincir uzunluğunun artması kalkan etkisine neden olmuştur. Böylece, adsorpsiyon tabaka kalınlığının az olması ve London kuvvetleri ile iyon-dipol bağlarının etkisinden dolayı katkının adsorpsiyon miktarı azalmıştır.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak katkı yan zincir uzunluğunun artması, priz süresinin kısılmasına neden olmuştur. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak, katkının yan zincir uzunluğunun belirli bir değere kadar artışı ile birlikte hamur karışımlarının Marsh-hunisi ve harç karışımlarının V hunisi akış performansları artarken, yan zincir uzunluğunun değişimi hamur karışımlarının mini-çökme değerlerini çok fazla etkilememiştir. Harç karışımlarının 60 dakika sonunda yayılma kayıpları dikkate alındığında, katkıların yan zincir uzunluğunun belirli bir değerden yüksek veya düşük olması harç karışımlarının zamana bağlı yayılma performanslarını arttırmıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak katkı yan zincir uzunluğu değişken olan katkılarda ise yan zincir uzunluğunun 1000 g/mol'den 2400 g/mol'e çıkması ile adsorpsiyonun azalmasına rağmen sterik etkilerden dolayı dinamik ekg ve vizkozite değerlerini azaltmıştır. Ancak yan zincir uzunluğunun 3000 g/mol'e yükselmesi ise katkı yan zincirlerinin iç içe geçmesinden kaynaklı katkının etkinliğini zayıflatmış ve reolojik performansın azalmasına sebep olmuştur. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak su azaltıcı katkı yan zincir uzunluklarının değişimi harç karışımlarının erken ve ileri yaş basınç dayanımları ve su emme kapasiteleri üzerinde herhangi bir etki oluşturmamıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

#### ***Sabit molekül ağırlığında ana zincir ve yan zincir uzunluğu değişiminin etkisi***

- Molekül ağırlığı sabit ana ve yan zincir uzunlukları farklı katkılarda ana zincirin uzaması ve yan zincirin kısalmasıyla adsorpsiyon miktarı artmıştır.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak, su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğu değişimi, hamur karışımlarının priz süresi üzerinde ciddi değişime neden olmazken, yan zincir uzunluğunun artması, priz süresinin kısalmasına neden olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, hamur karışımlarının priz süresi üzerindeki etkin parametrenin, katkının yan zincir uzunluğu olduğu düşünülmektedir. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak, su azaltıcı katkı ana ve yan zincir uzunluğunun azalmasıyla sırasıyla yetersiz elektrostatik etki ve yetersiz sterik etki oluştuğundan, ana zincir ve yan zincir uzunluğunun artmasıyla da polimerlerin birbirlerine takılma olasılığı arttığından karışımların Marsh-hunisi ve V hunisi akış performansları olumsuz etkilenmiştir. Bu çalışmada, Marsh-hunisi ve V-hunisi deneyleri sonuçlarına göre en iyi akış performansını ana zincir uzunluğu 21k ve yan zincir uzunluğu 2400g/mol olan katkı göstermiştir. Harç karışımlarının 60 dakika sonunda belirlenen yayılma kayıpları dikkate alındığında, sabit molekül ağırlığında katkı ana zincir ve yan zincir uzunluklarının çok yüksek veya çok düşük olması, harç karışımlarının zamana bağlı yayılma performanslarını olumlu

etkilemiştir. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak sabit molekül ağırlık durumunda ana ve yan zincir uzunluklarının artıp azalması hamur ve harç karışımların reolojik özelliklerini etkilemiştir. Ana zincirin kısalması ve yan zincirin uzaması ile katkının adsorpsiyonunun azalmasına rağmen karışımların reolojik özellikleri gelişmiştir. Su azaltıcı katkı ana zincirin ve yan zincirin kısalması ile sırasıyla yetersiz elektrostatik etki ve yetersiz sterik etki olduğundan, ana zincirin ve yan zincirin uzaması ile de polimerlerin birbirlerine takılma olasılığı arttığından karışımların reolojik özellikleri olumsuz yönde etkilenmiştir. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak sabit molekül ağırlığında su azaltıcı katkı ana zincir ve yan zincir uzunluklarının değişimi harç karışımlarının erken ve ileri yaş basınç dayanımları ve su emme kapasiteleri üzerinde herhangi bir etki oluşturmamıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

#### *Anyonik monomer değişiminin etkisi*

- Su azaltıcı katkıda karboksilat anyonik fonksiyonel grubu yerine sülfonat ve fosfat ikame edilmesi katkıların adsorpsiyon performansını artırmıştır. Sülfonat ve fosfat ikame oranı arttıkça adsorpsiyon miktarı da artış göstermiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak hamur karışımlarına su azaltıcı katkı ilave edilmesi priz sürelerini etkilemiştir. Fosfat ve sülfonat ikameli su azaltıcı katkıların priz geciktirme etkisinin karboksilat esaslı su azaltıcı katkıya oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Fosfat ve sülfonat ikame oranının artmasıyla bu durumun daha da belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak su azaltıcı katkının anyonik monomer türünün fosfat ve sülfonat ile ikame edilmesi %100 karboksilat içeren katkıya kıyasla akış ve yayılma performansı açısından daha yüksek performans

sergilerken zamana bağılı yayılma açısından olumsuz bir performans sergilemiştir. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak su azaltıcı katkılara sülfonat ve fosfat fonksiyonel grubunun ikame edilmesi hamur ve harç karışımlarının reolojik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Sülfonat ve fosfat ikame oranı arttıkça karışımların nihai viskozitesi ve dinamik eşik kayma gerilmesi azalmıştır. Söz konusu reolojik özelliklerdeki iyileşmenin sülfonat ve fosfat fonksiyonel grupların karboksilat grubuna kıyasla daha güçlü adsorpsiyon yeteneğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Uçucu kül kullanımından bağımsız olarak su azaltıcı katkı anyonik monomer fonksiyonel grubu değişimi harç karışımlarının erken ve ileri yaş basınç dayanımları ve su emme kapasiteleri üzerinde herhangi bir etki oluşturmamıştır. Tüm uçucu kül ikameli karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

### ***Öneriler***

- Bu çalışmada elde edilen sonuçlara ek olarak ileride yapılacak araştırmalarda su azaltıcı katkı kimyasal yapısının uçucu kül ikameli sistemlere etkisine ilaveten silis dumanı, cüruf, metakaolin gibi diğer mineral katkı içeren çimentolu sistemlere etkisi incelenmeli ve sonuçlar enstrümental analiz teknikleri ile desteklenmelidir.
- Su azaltıcı katkı anyonik monomer fonksiyonel grup içeriğinin ve nanyonik monomer uzunluk değişiminin standart Portland Çimentosu ile uyumunun yanı sıra farklı çimento tipleri ile uyumu araştırılmalıdır.
- Su azaltıcı katkı kimyasal yapısının hamur ve harç karışımlarının adsorpsiyon performansı, priz süresi, reolojik özellikleri, taze hal özellikleri ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisine ilaveten kendiliğinden yerleşebilen betonlar, geri kazanılmış agregalı betonlar, lifli betonlar gibi bazı özel betonların özelliklerine etkisi incelenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Aİtcin, P. C. (2004).** *High performance concrete*. CRC press.
- Aİtcin, P. C., & Flatt, R. J. (Eds.). (2016).** *Science and technology of concrete admixtures*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 59. Cambridge, UK.
- Akman, M. S. (1996).** Kimyasal katkıların betona uygulanması. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4. Ulusal Beton Kongresi, 4*, 30-31.
- Alonso, J.L., & Wesche, K. (1991).** *Characterization of fly ash, in Fly Ash in Concrete Properties and Performance* (Ed. K. Wesche), E.&F.N. Spon, London.
- Al-Sodani, K. A. A., Al-Zahrani, M. M., Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O. S. B., & Al-Dulaijan, S. U. (2021).** Chloride diffusion models for Type I and fly ash cement concrete exposed to field and laboratory conditions. *Marine Structures, 76*, 102900.
- Amaya, T., Ikeda, A., Imamura, J., Kobayashi, A., Saito, K., Danzinger, W. M., & Tomoyose, T. (2004).** *U.S. Patent No. 6,680,348*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Anagnostopoulos, C. A. (2014).** Effect of different superplasticisers on the physical and mechanical properties of cement grouts. *Construction and Building Materials, 50*, 162-168.
- Apay, A. C., Özgan, E., Turgay, T., & Akyol, K. (2016).** Investigation and modelling the effects of water proofing and water repellent admixtures dosage on the permeability and compressive strengths of concrete. *Construction and Building Materials, 113*, 698-711.
- Aprianti, E., Shafiqh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015).** Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes—A review. *Construction and Building Materials, 74*, 176-187.
- Arezoumandi, M., Looney, T. J., & Volz, J. S. (2015).** Effect of fly ash replacement level on the bond strength of reinforcing steel in concrete beams. *Journal of Cleaner Production, 87*, 745-751.
- Atiş, C. D. (2003).** Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials, 17*(3), 147-152.
- Bapat, J.D. (2016).** *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*. Press Taylor & Francis Group, London, England, 309 s.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., & Öztürk, A.U. (2012).** *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi No:334, İzmir, Türkiye, 825 s.
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Ün, H. (2010).** *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık*. THBB, İstanbul, Türkiye, 318 s.
- Bedard, C., & Mailvaganam, N. P. (2005).** The use of chemical admixtures in concrete. Part I: Admixture-cement compatibility. *Journal of performance of constructed facilities, 19*(4), 263-266.
- Bonen, D., & Sarkar, S. L. (1995).** The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. *Cement and Concrete Research, 25*(7), 1423-1434.
- Borsoi, A., Collepardi, S., Coppola, L., Troli, R., & Collepardi, M. (1999).** Advances in superplasticizers for concrete mixtures. *Industria Italiana Del Cemento, 234-247*.

- Bouhamed, H., Boufi, S., & Magnin, A. (2007).** Dispersion of alumina suspension using comb-like and diblock copolymers produced by RAFT polymerization of AMPS and MPEG. *Journal of colloid and interface science*, 312(2), 279-291.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2016).** Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 126, 253-262.
- Bradley, G., & Howarth, I. (1986).** *Cement and Concrete Aggregates*. 8, 68-75.
- Cangialosi, F., Notarnicola, M., Liberti, L., & Stencel, J. (2009).** The role of weathering on fly ash charge distribution during triboelectrostatic beneficiation. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 683-688.
- British Patent (1969).** I 169 582.
- British Patent (1973).** I 386 933.
- Cavusoglu, I., Yilmaz, E., & Yilmaz, A. O. (2021).** Sodium silicate effect on setting properties, strength behavior and microstructure of cemented coal fly ash backfill. *Powder Technology*, 384, 17-28.
- Celik, F., & Akcuru, O. (2020).** Rheological and workability effects of bottom ash usage as a mineral additive on the cement based permeation grouting method. *Construction and Building Materials*, 263, 120186.
- Chalee, W., Ausapanit, P., & Jaturapitakkul, C. (2010).** Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials & Design*, 31(3), 1242-1249.
- Chandra, S., & 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.
- Cheah, C. B., Chow, W. K., Oo, C. W., & Leow, K. H. (2020).** The influence of type and combination of polycarboxylate ether superplasticizer on the mechanical properties and microstructure of slag-silica fume ternary blended self-consolidating concrete. *Journal of Building Engineering*, 31, 101412.
- Chindaprasirt, P., & Rattanasak, U. (2019).** Characterization of porous alkali-activated fly ash composite as a solid absorbent. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 85, 30-35.
- Chomyn, C., & Plank, J. (2019).** Impact of different synthesis methods on the dispersing effectiveness of isoprenol ether-based zwitterionic and anionic polycarboxylate (PCE) superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, 119, 113-125.
- Chomyn, C., & Plank, J. (2020).** Impact of different pH-values of polycarboxylate (PCE) superplasticizer solutions on their dispersing effectiveness. *Construction and Building Materials*, 246, 118440.
- Colleparidi, M. (2005).** Admixtures: Enhancing concrete performance. In *Admixtures-Enhancing Concrete Performance: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 6 July 2005* (pp. 217-230). Thomas Telford Publishing.
- Cook, D.J. (1986).** *Rice husk ash, in Cement Replacement Materials* (Ed. R.N. Swamy), pp. 171–196, Surrey University Press, London.
- Dalas, F., Nonat, A., Pourchet, S., Mosquet, M., Rinaldi, D., & Sabio, S. (2015b).** Tailoring the anionic function and the side chains of comb-like superplasticizers to improve their adsorption. *Cement and Concrete Research*, 67, 21-30.
- Dalas, F., Pourchet, S., Nonat, A., Rinaldi, D., Sabio, S., & Mosquet, M. (2015a).** Fluidizing efficiency of comb-like superplasticizers: The effect of the anionic function,

the side chain length and the grafting degree. *Cement and Concrete Research*, 71, 115-123.

**De Lena, E., Spinelli, M., Gatti, M., Scaccabarozzi, R., Campanari, S., Consonni, S., & Romano, M. C. (2019).** Techno-economic analysis of calcium looping processes for low CO<sub>2</sub> emission cement plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 82, 244-260.

**Dhir, R.K. (1986).** *Pulverized-fuel Ash, in Cement Replacement Materials*. Surrey University Press, Guildford, Surrey, UK, 197-256 s.

**Diawara, H. (2008).** Parametric study of self-consolidating concrete. Ph.D. Thesis, University of Nevada, Department of Civil and Environmental Engineering, Las Vegas, USA.

**Dinakar, P., Babu, K. G., & Santhanam, M. (2008).** Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 880-886.

**Dindi, A., Quang, D. V., Vega, L. F., Nashef, E., & Abu-Zahra, M. R. (2019).** Applications of fly ash for CO<sub>2</sub> capture, utilization, and storage. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 29, 82-102.

**Ding, Q., Zhu, Y., Wnag, Y., Huang, X., & Gong, Z. (2012).** Effects of molecular structure of polycarboxylate-type superplasticizer on the hydration properties of C 3 S. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 27(4), 768-772.

**Erdoğan, T.Y. (1995).** *Betonu Oluşturan Malzemeler - Su*. THBB, İstanbul, Türkiye.

**Erdoğan, T.Y. (2003).** *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, Türkiye, 760 s.

**Erzengin, S. G., Kaya, K., Özkorucuklu, S. P., Özdemir, V., & Yıldırım, G. (2018).** The properties of cement systems superplasticized with methacrylic ester-based polycarboxylates. *Construction and Building Materials*, 166, 96-109.

**Felekoğlu, B. (2009).** Yüksek performanslı mikro beton tasarımı, Doktora tezi, DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

**Felekoğlu, B., & Sarıkahya, H. (2008).** Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1972-1980.

**Feng, H., Feng, Z., Wang, W., Deng, Z., & Zheng, B. (2021).** Impact of polycarboxylate superplasticizers (PCEs) with novel molecular structures on fluidity, rheological behavior and adsorption properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 292, 123285.

**Feng, H., Pan, L., Zheng, Q., Li, J., Xu, N., Pang, S. 2018.** Effects of molecular structure of polycarboxylate superplasticizers on their dispersion and adsorption behavior in cement paste with two kinds of stone powder. *Construction and Building Materials*, 170, 182-192.

**Ferrari, L., Kaufmann, J., Winnefeld, F., & Plank, J. (2011).** Multi-method approach to study influence of superplasticizers on cement suspensions. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1058-1066.

**Fidjestol, P., & Dastol, M. (2008).** The history of silica fume in concrete from novelty to key ingredient in high performance concrete. In *Proceedings of the Congresso Brasileiro do Concreto. 4th-9th Sept.*

**Flatt, R. J., & Ferraris, C. F. (2002).** Acoustophoretic characterization of cement suspensions. *Materials and Structures*, 35(9), 541-549.

- Flatt, R. J., & Houst, Y. F. (2001).** A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and concrete research*, 31(8), 1169-1176.
- Flatt, R.J, & Schober, I. (2012).** Superplasticizers and the rheology of concrete. In *Understanding the rheology of concrete* (pp. 144-208). Woodhead Publishing.
- Flatt, R. J., Schober, I., Raphael, E., Plassard, C., & Lesniewska, E. (2009).** Conformation of adsorbed comb copolymer dispersants. *Langmuir*, 25(2), 845-855.
- Gámiz, E., Melgosa, M., Sanchez-Maranon, M., Martín-García, J. M., & Delgado, R. (2005).** Relationships between chemico-mineralogical composition and color properties in selected natural and calcined Spanish kaolins. *Applied Clay Science*, 28(1-4), 269-282.
- Gelardi G, Mantellato S, Marchon D, Palacios M, Eberhardt A.B and Flatt RJ, (2016).** *Chemistry of chemical admixtures, in Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, pp. 149–218.
- Grzeszczyk, S., & Lipowski, G. (1997).** Effect of content and particle size distribution of high-calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes. *Cement and concrete research*, 27(6), 907-916.
- Guo, X., Rong, Z., & Ying, X. (2006).** Calculation of hydrophile–lipophile balance for polyethoxylated surfactants by group contribution method. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(1), 441-450.
- Hanehara, S., & Yamada, K. (2008).** Rheology and early age properties of cement systems. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 175-195.
- He, Y., Zhang, X., & Hooton, R. D. (2017).** Effects of organosilane-modified polycarboxylate superplasticizer on the fluidity and hydration properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, 132, 112-123.
- He, Y., Zhang, X., Kong, Y., Wang, X., Shui, L., & Wang, H. (2018).** Influence of polycarboxylate superplasticizer on rheological behavior in cement paste. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 33(4), 932-937.
- He, Y., Zhang, X., Shui, L., Wang, Y., Gu, M., Wang, X., ... & Peng, L. (2019).** Effects of PCEs with various carboxylic densities and functional groups on the fluidity and hydration performances of cement paste. *Construction and Building Materials*, 202, 656-668.
- Heidrich, C., Feuerborn, H. J., & Weir, A. (2013).** Coal combustion products: a global perspective. In *World of coal ash conference* (pp. 22-25).
- Hill, J. R., & Plank, J. (2004).** Retardation of setting of plaster of Paris by organic acids: understanding the mechanism through molecular modeling. *Journal of computational chemistry*, 25(12), 1438-1448.
- Hirata, T., Kawakami, H., Nagare, K., & Yuasa, T. (2000).** Cement Additive. EP Patent 1041053 A1, filed March 9, 2000 and issued October 4, 2000.
- Hoang, K., Justnes, H., & Geiker, M. (2016).** Early age strength increase of fly ash blended cement by a ternary hardening accelerating admixture. *Cement and Concrete Research*, 81, 59-69.
- Houst, Y. F., Flatt, R. J., Bowen, P., Hofmann, H., Mäder, U., Widmer, J., & Bürge, T. A. (1999).** Influence of superplasticizer adsorption on the rheology of cement paste. In *Proceedings of the International RILEM Conference on " The Role of Admixtures in High Performance Concrete"* (No. CONF, pp. 387-402). RILEM Publications sarl, Cachan, France.

- Hu, K., Sun, Z., & Yang, H. (2019).** Effects of polycarboxylate superplasticizers with different functional units on early hydration behavior of cement paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019041.
- Hubbard, F. H., & Dhir, R. K. (1984).** A compositional index of the pozzolanic potential of pulverized-fuel ash. *Journal of materials science letters*, 3(11), 958-960.
- Janowska-Renkas, E. (2013).** The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes. *Construction and Building Materials*, 38, 1204-1210.
- Javadi, A., Mehr, H. S., & Soucek, M. D. (2017).** (Meth) acrylated poly (ethylene glycol) s as precursors for rheology modifiers, superplasticizers and electrolyte membranes: a review. *Polymer International*, 66(12), 1765-1786.
- Jiang, S., Kim, B. G., & Aïtcin, P. C. (1999).** Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 71-78.
- Jolicoeur, C., Nkinamubanzi, P. C., Simard, M. A., & Pottie, M. (1994).** Progress in understanding the functional properties of superplasticizers in fresh concrete. *Special Publication*, 148, 63-88.
- Kalyoncu, R.S. (2000).** Slag-iron and steel, in U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, USGS, Pittsburg, PA, USA, pp. 71.1–71.3.
- Kantro, D.L. (1980).** Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste-a miniature slump test. *Cement, Concrete and Aggregates*, 2(2), 95-102.
- Khalid, N. H. A., Hussin, M. W., Ismail, M., Basar, N., Ismail, M. A., Lee, H. S., & Mohamed, A. (2015).** Evaluation of effectiveness of methyl methacrylate as retarder additive in polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 449-456.
- Khatib, J. M., & Mangat, P. S. (1999).** Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6), 431-437.
- Kinoshita, M., & Nawa, T. (2000).** Effect of chemical structure on fluidizing mechanism of concrete superplasticizer containing polyethylene oxide graft chains. *Special Publication*, 195, 163-180.
- Koehler, E. P., & Fowler, D. W. (2004).** *Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete.*
- Kong, F. R., Pan, L. S., Wang, C. M., & Xu, N. (2016).** Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. *Construction and building materials*, 105, 545-553.
- Kong, X., Zhang, Y., & Hou, S. (2013).** Study on the rheological properties of Portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers. *Rheologica Acta*, 52(7), 707-718.
- Lea, F.M. (1998).** *The chemistry of cement.* Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, London, Arnold.
- Lewis, J. A., Matsuyama, H., Kirby, G., Morissette, S., & Young, J. F. (2000).** Polyelectrolyte effects on the rheological properties of concentrated cement suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(8), 1905-1913.
- Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., & Ryle, R. (2003).** *Cementitious additions, in Advanced Concrete Technology Set, V.3,* Butterworth-Heinemann, London.
- Li, C. Z., Feng, N. Q., & 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.
- Li, Y., Yang, C., Zhang, Y., Zheng, J., Guo, H., & Lu, M. (2014).** Study on dispersion, adsorption and flow retaining behaviors of cement mortars with TPEG-type polyether



- kind polycarboxylate superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 64, 324-332.
- Liu, M. (2010).** Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1245-1252.
- Liu, P., Qu, M., Wang, F., Hu, G., & Hu, C. (2020).** Effects of Polycarboxylate-Modified Fly Ash on Fluidity and Strength of Concrete. *ACI Materials Journal*, 117(5), 61-66.
- Lv, S., Duan, J., Gao, R., Cao, Q., & Li, D. (2012).** Effects of poly (ethylene glycol) branch chain linkage mode on polycarboxylate superplasticizer performance. *Polymers for Advanced Technologies*, 23(12), 1596-1603.
- Lv, S., Ju, H., Qiu, C., Ma, Y., & Zhou, Q. (2013).** Effects of connection mode between carboxyl groups and main chains on polycarboxylate superplasticizer properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(6), 3925-3932.
- Ma, Y., Bai, J., Shi, C., Sha, S., & Zhou, B. (2021).** Effect of PCEs with different structures on hydration and properties of cementitious materials with low water-to-binder ratio. *Cement and Concrete Research*, 142, 106343.
- Marchon, D., & Flatt, R.J. (2016).** *Mechanisms of cement hydration*. In: Aïtcin, P.-C., Flatt, R.J. (Eds.), *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Elsevier (Chapter 8), 129-146.
- Marchon, D., Boscaro, F., & Flatt, R. J. (2019).** First steps to the molecular structure optimization of polycarboxylate ether superplasticizers: Mastering fluidity and retardation. *Cement and Concrete Research*, 115, 116-123.
- Mardani-Aghabaglou, A. (2016).** Portland çimentosu ve süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunun incelenmesi. Doktora tezi, EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.
- Mardani-Aghabaglou, A., Boyacı, O. C., Hosseinnzhad, H., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2016).** Effect of gypsum type on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture. *Cement and Concrete Composites*, 68, 15-26.
- Mardani-Aghabaglou, A., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2017a).** Effect of cement C 3 A content on properties of cementitious systems containing high-range water-reducing admixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017066.
- Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., & Altun, M. G. (2018).** Durability performance and dimensional stability of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Green Building*, 13(2), 20-41.
- Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G. İ., & Ramyar, K. (2014).** Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17-25.
- Mardani-Aghabaglou, A., Son, A. E., Felekoglu, B., & Ramyar, K. (2017b).** Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture. *Journal of Green Building*, 12(1), 142-167.
- Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yılmaz, G., Ariöz, 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.
- Matsuzawa, K., Shimazaki, D., Kawakami, H., & Sakai, E. (2019).** Effect of non-adsorbed superplasticizer molecules on fluidity of cement paste at low water-powder ratio. *Cement and Concrete Composites*, 97, 218-225.

- Mehta, P.K., & Monteiro, P. (1997).** *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
- Meng, Y., Ling, T. C., Mo, K. H., & Tian, W. (2019).** Enhancement of high temperature performance of cement blocks via CO<sub>2</sub> curing. *Science of the Total Environment*, 671, 827-837.
- Mindess, S., Young, J.F., & Darwin, D. (2003).** *Concrete*. Prentice-Hall, Pearson Education Inc., Second Edition, 644 p.
- Miyazaki, M., Kamitani, M., Nagai, T., Kano, J., & Saito, F. (2000).** Amorphization of kaolinite and media motion in grinding by a double rotating cylinders mill—a comparison with a tumbling ball mill. *Advanced Powder Technology*, 11(2), 235-244.
- Moad, G., Chiefari, J., Chong, Y. K., Krstina, J., Mayadunne, R. T. A., Postma, A., & Thang, S. H. (2000).** Living free radical polymerization with reversible addition–fragmentation chain transfer (the life of RAFT). *Polymer International*, 49(9), 993-1001.
- Mollah, M. Y. A., Adams, W. J., Schennach, R., & Cocke, D. L. (2000).** A review of cement–superplasticizer interactions and their models. *Advances in Cement Research*, 12(4), 153-161.
- Morin, V., Tenoudji, F. C., Feylessoufi, A., & Richard, P. (2001).** Superplasticizer effects on setting and structuration mechanisms of ultrahigh-performance concrete. *Cement and concrete research*, 31(1), 63-71.
- Mosquet, M., Chevalier, Y., Brunel, S., Guicquero, J. P., & Le Perchec, P. (1997).** Polyoxyethylene di-phosphonates as efficient dispersing polymers for aqueous suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*, 65(12), 2545-2555.
- Nan, S., & Wu, C. F. (2003).** Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash. *Cement and concrete composites*, 25(7), 681-688.
- Nawa, T., Ichiboji, H., & Kinoshita, M. (2000).** Influence of temperature on fluidity of cement paste containing superplasticizer with polyethylene oxide graft chains. *Special Publication*, 195, 181-194.
- Neville, A.M. & Brooks. J.J. (2010).** *Concrete Technology*. 2nd ed., Longman, UK, 442p.
- Neville, A.M., 1995,** *Properties of Concrete*, 4th Edn., Longman Group Limited, Ch 1: Portland Cement, Essex, England, 20-25.
- Ng, P. G., Cheah, C. B., Ng, E. P., Oo, C. W., & Leow, K. H. (2020).** The influence of main and side chain densities of PCE superplasticizer on engineering properties and microstructure development of slag and fly ash ternary blended cement concrete. *Construction and Building Materials*, 242, 118103.
- Nicia, D., & Lowke, D. (2019).** Effect of the Side Chain Density and Length of Polycarboxylate Ether Superplasticizers on the Thixotropic Structural Build-Up of Cement Paste. In *Rheology and Processing of Construction Materials* (pp. 125-133). Springer, Cham.
- Özen, S. (2019).** Yüksek oranda su azaltıcı katkı özelliklerinin çimentolu sistemlerin davranışına etkisi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Park, B., & Choi, Y. C. (2021).** Hydration and pore-structure characteristics of high-volume fly ash cement pastes. *Construction and Building Materials*, 278, 122390.
- Peng, X., Li, X., Chen, D., & Ma, D. (2013).** Effect of side chains on the dispersing properties of polycarboxylate-type superplasticisers in cement systems. *Magazine of concrete research*, 65(7), 422-429.

- Phan, T. H., Chaouche, M., & Moranville, M. (2006).** Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1807-1813.
- Plank, J., & Sachsenhauser, B. (2009).** Experimental determination of the effective anionic charge density of polycarboxylate superplasticizers in cement pore solution. *Cement and Concrete Research*, 39(1), 1-5.
- Plank, J., Sachsenhauser, B., & De Reese, J. (2010).** Experimental determination of the thermodynamic parameters affecting the adsorption behaviour and dispersion effectiveness of PCE superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 699-709.
- Plank, J., Sakai, E., Miao, C. W., Yu, C., & Hong, J. X. (2015).** Chemical admixtures—Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and concrete research*, 78, 81-99.
- Qian, S., Yao, Y., Wang, Z., Cui, S., Liu, X., Jiang, H., Guo, Z., Lai, G., Xu, Q., & Guan, J. (2018).** Synthesis, characterization and working mechanism of a novel polycarboxylate superplasticizer for concrete possessing reduced viscosity. *Construction and Building Materials*, 169, 452-461.
- Qiu, X., Peng, X., Yi, C., & Deng, Y. (2011).** Effect of side chains and sulfonic groups on the performance of polycarboxylate-type superplasticizers in concentrated cement suspensions. *Journal of dispersion science and technology*, 32(2), 203-212.
- Ramachandran, V.S., (1995),** *Concrete Admixtures Handbook,* Noyes Publications, New Jersey.
- Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C. & Spiratos, N., (1998).** *Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete.* CANMET, Ottawa, Canada, 404 p.
- Ran, Q., Somasundaran, P., Miao, C., Liu, J., Wu, S., & Shen, 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.
- Rixom, M.R., & Mailvaganam, N.P. (1986).** *Chemical Admixtures for Concrete.* E&FN Spon, London.
- Roberts, L.R., (1995).** Dealing with cement admixture interactions, 23rd Annual Convention of the Institute of Concrete Technology, Telford, UK
- Rosen, M.J. (2004).** *Surfactants and Interfacial Phenomena*, third ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Roussel, N., Lemaître, A., Flatt, R. J., & Coussot, P. (2010).** Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 77-84.
- Russel, W.B., Saville, D.A., & Schowalter, W.R. (1992).** *Colloidal dispersions.* Cambridge university press.
- Sakai, E., Yamada, K., & Ohta, A. (2003).** Molecular structure and dispersion-adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan. *Journal of advanced concrete technology*, 1(1), 16-25.
- Sarker, P. K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014).** Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials & Design*, 63, 584-592.
- Schatzmann, M. (2005).** Rheometry for large particle fluids and debris flows. *Ph.D 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., & 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*. Lausanne/Switzerland.
- Schatzmann, M., Fischer, P., & Bezzola, G.R. (2003).** Rheological behavior of fine and large particle suspensions. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129 (10):796-803.
- Schober, I., & Flatt, R. J. (2006)** in: V.M. Malhotra (Eds.), 8th CANMET/ACI International Conference Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, American Concrete Institute, USA, SP-239:169–184.
- Shehata, M. H., & Thomas, M. D. (2000).** The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1063-1072.
- Siddique, R. (2003).** Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete research*, 33(4), 539-547.
- Siler, P., Kratky, J., & De Belie, N. (2012).** Isothermal and solution calorimetry to assess the effect of superplasticizers and mineral admixtures on cement hydration. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 107(1), 313-320.
- Sobolev, K., Vivian, I. F., Saha, R., Wasiuddin, N. M., & Saltibus, N. E. (2014).** The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials. *Fuel*, 116, 471-477.
- Sonebi, M. (2006).** Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1609-1618.
- Stanley, C. C. (1979).** *Highlights in the History of Concrete*, Cement and Concrete Association, London, U.K.
- Stecher, J., & Plank, J. (2019).** Novel concrete superplasticizers based on phosphate esters. *Cement and Concrete Research*, 119, 36-43.
- Struble, L., & Sun, G. K. (1995).** Viscosity of Portland cement paste as a function of concentration. *Advanced Cement Based Materials*, 2(2), 62-69.
- Sun, Y., Wang, K. Q., & Lee, H. S. (2021).** Prediction of compressive strength development for blended cement mortar considering fly ash fineness and replacement ratio. *Construction and Building Materials*, 271, 121532.
- Surico, F. (2008).** Evolution of superplasticizers, R&D admixture for concrete. *Milan, Italy: Mapei SpA*.
- Şahin, H. G. (2020).** Su azaltıcı katkıların ana ve yan zincir uzunlukları değişiminin uçucu kül içeren çimento hamuru karışımlarının priz süresi ve reolojik özelliklerine etkisi. *Lisans tezi*, BUÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Tadros, T. F. (2005).** *Applied Surfactants: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, UK.
- Tan, H., Guo, Y., Ma, B., Li, X., & Gu, B. (2017).** Adsorbing behavior of polycarboxylate superplasticizer in the presence of the ester group in side chain. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38(5), 743-749.
- Tian, H., Kong, X., Su, T., & Wang, D. (2019).** Comparative study of two PCE superplasticizers with varied charge density in Portland cement and sulfoaluminate cement systems. *Cement and Concrete Research*, 115, 43-58.
- Tokyay, M. (1987).** Effect of a high-calcium fly ash and a low-calcium fly ash on the properties of portland cement fly ash pastes and mortar, PhD thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 170pp.

- Tokyay, M. (2016).** *Cement and Concrete Mineral Admixtures*. Press Taylor & Francis Group, Ankara, Türkiye, 325 s.
- Tokyay, M., & Erdoğan, K. (1998).** Characterization of Turkish Fly Ashes, TÇMB/AR-GE/Y 98.3, Turkish Cement Manufacturers' Association, 70 s. (in Turkish).
- Tsubakimoto, T., Hosoidi, M., & Tahara, H. (1984).** Copolymer and Method for Manufacture Thereof. EP Patent 0056627 B1, filed January 15, 1982 and issued October 3, 1984. Tsubakimoto, T., Hosoido, M., & Tahara, H. U.S. Patent No. 4,471,100. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A. (2004).** Classification and properties of Turkish fly ashes, TÇMB/AR-GE/Y03.03, Turkish Cement Manufacturers' Association, 99pp. (in Turkish).
- Uchikawa, H., Hanehara, S., & 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.
- Ushiro, M., Atarashi, D., Kawakami, H., & Sakai, E. (2013).** The effect of superplasticizer present in pore solution on flowability of low water-to-powder cement paste. *Cement Science and Concrete Technology*, 67(1) 102-107.
- US Patent (1932).** 643 740.
- Von Berg, W., & Feuerborn, H.-J. (2005).** Present situation and perspectives of CCP management in Europe, 2005 World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, Kentucky, USA, 11–15.
- Wang, B., Qi, S., Fan, S., Wang, T., Ma, J., Han, Z., & Ran, Q. (2019).** Synthesis and properties of a novel structure of phosphated superplasticizer. *Journal of Dispersion Science and Technology*.
- Wang, C., Kayali, O., & Liow, J. L. (2021a).** The effectiveness and mechanisms of superplasticisers in dispersing class F fly ash pastes. *Powder Technology*, 392, 81-92.
- Wang, C., Kong, F., & Pan, L. (2021b).** Effects of polycarboxylate superplasticizers with different side-chain lengths on the resistance of concrete to chloride penetration and sulfate attack. *Journal of Building Engineering*, 102817.
- Wang, Q., Cui, X., Wang, J., Li, S., Lv, C., & Dong, Y. (2017).** Effect of fly ash on rheological properties of graphene oxide cement paste. *Construction and Building Materials*, 138, 35-44.
- Wang, X., Yang, Y., Shu, X., Wang, Y., Ran, Q., & Liu, J. (2019).** Tailoring polycarboxylate architecture to improve the rheological properties of cement paste. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(11), 1567-1574.
- Wang, X., Zhang, J., Yang, Y., Shu, X., & Ran, Q. (2018).** Effect of side chains in block polycarboxylate superplasticizers on early-age properties of cement paste. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(3), 1439-1446.
- Wesche, K. (1991).** *Fly Ash in Concrete*. Press Taylor & Francis Group, New York, USA, 270 s.
- Whitfield, C. J. (2003).** The production, disposal, and beneficial use of coal combustion products in Florida, MS thesis, University of Florida, USA, 176pp.
- Winnefeld, F., Becker, S., Pakusch, J., & Götz, T. (2007).** Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems. *Cement and Concrete Composites*, 29(4), 251-262.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001).** Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26(1), 303-329.

- Xiong, W., Wang, D., Zuo, Y., Wang, Z., & Wu, Z. (2008).** Concrete Chinese Edition-Ready-mixed Concrete, 1, 1-4.
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M. (2000).** Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and concrete research*, 30(2), 197-207.
- Yang, M., Neubauer, C. M., & Jennings, H. M. (1997).** Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions: Review and results from paste. *Advanced Cement Based Materials*, 5(1), 1-7.
- Yeğınobalı, A. (2009).** Silica fume. Its use in cement and concrete, TÇMB/AR-GE/Y01.01, Turkish Cement Manufacturers' Association, 62pp. (in Turkish).
- Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M., & Kitahara, A. (1997).** Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(10), 2667-2671.
- Yu, B., Zeng, Z., Ren, Q., Chen, Y., Liang, M., & Zou, H. (2016).** Study on the performance of polycarboxylate-based superplasticizers synthesized by reversible addition-fragmentation chain transfer (RAFT) polymerization. *Journal of Molecular Structure*, 1120, 171-179.
- Zhang, L., Miao, X., Kong, X., & Zhou, S. (2019).** Retardation effect of PCE superplasticizers with different architectures and their impacts on early strength of cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103369.
- Zhang, Q. (2011).** Investigating Polymer Conformation in Poly (Ethylene Oxide) (PEO) Based Systems for Pharmaceutical Applications. Master Thesis. Department of Applied Physics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Zhang, Q., Shu, X., Yu, X., Yang, Y., & Ran, Q. (2020).** Toward the viscosity reducing of cement paste: Optimization of the molecular weight of polycarboxylate superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 242, 117984.
- Zhang, Y. R., Cai, X. P., Kong, X. M., & Gao, L. (2017).** Effects of comb-shaped superplasticizers with different charge characteristics on the microstructure and properties of fresh cement pastes. *Construction and Building Materials*, 155, 441-450.
- Zhang, Y. R., Kong, X. M., Lu, Z. B., Lu, Z. C., & Hou, S. S. (2015).** Effects of the charge characteristics of polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 67, 184-196.
- Zhang, Y., & Kong, X. (2015).** Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types of superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes. *Cement and concrete research*, 69, 1-9.
- Zhao, H., Yang, Y., Shu, X., Wang, Y., Wu, S., Ran, Q., & Liu, J. (2018).** The binding of calcium ion with different groups of superplasticizers studied by three DFT methods, B3LYP, M06-2X and M06. *Computational Materials Science*, 152, 43-50.
- Zhao, Y., Nian, F., Pang, H., Huang, J., Zhao, H., Wang, K., & Liao, B. (2018).** Regulating the arm structure of star-shaped polycarboxylate superplasticizers as a means to enhance cement paste workability. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(21), 46312.
- Zhu, W., Feng, Q., Luo, Q., Bai, X., Lin, X., & Zhang, Z. (2021).** Effects of PCE on the Dispersion of Cement Particles and Initial Hydration. *Materials*, 14(12), 3195.
- Ziaei-Nia, A., Tadayonfar, G. R., & Eskandari-Naddaf, H. (2018).** Effect of air entraining admixture on concrete under temperature changes in freeze and thaw cycles. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6208-6216.

**Zingg, A., Winnefeld, F., Holzer, L., Pakusch, J., Becker, S., Figi, R., & Gauckler, L. (2009).** Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts. *Cement and Concrete Composites*, 31(3), 153-162.

**Zou, F., Tan, H., Guo, Y., Ma, B., He, X., & Zhou, Y. (2017).** Effect of sodium gluconate on dispersion of polycarboxylate superplasticizer with different grafting density in side chain. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 55, 91-100.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Muhammet Gökhan ALTUN  
Doğum Yeri :Oltu/ERZURUM  
Doğum Tarihi :10.06.1990  
Yabancı Dil :İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise :Bursa Turhan Tayan Anadolu Lisesi  
Lisans :Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yüksek Lisans :Erzurum Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Çalıştığı Kurumlar :Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı İşleri Dairesi Başkanlığı  
:Bursa Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Dairesi Başkanlığı  
:Bursa Büyükşehir Belediyesi Akıllı Şehircilik ve İnovasyon Dairesi Başkanlığı

İletişim (e-posta) :mgaltun@yahoo.com

### Yayınlar:

**Altun, M. G., Cindoruk, Y. O., 2016.** “Geri kazanılmış agregaların ekolojik ve ekonomik açıdan katkısının değerlendirilmesi” Ekoloji 2016 Adnan Aldemir Sempozyumu, Kars.

**Altun, M. G., 2016.** “Geri kazanılmış agregalar ve kullanım alanları” 3. Ulusal Çevre Kongresi, Marmaris.

**Altun, M. G., 2016.** “Türkiye’deki hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atıkları yönetimindeki mevcut durum analizi” 3. Ulusal Çevre Kongresi, Marmaris.

**Mardani-Aghabaglou, A., Altun, M. G., Özen, S., Ramyar, K., 2017.** “Büzülme engelleyici katkıların çimentolu sistemlerin kuruma-büzülmesine etkisi ve kullanılan su azaltıcı katkı ile uyumunun incelenmesi”, Hazır Beton Kongresi, İstanbul.

**Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Altun, M. G., Yılmaz, G., 2017.** “Polipropilen lif kullanım oranının beton karışımlarının dayanımına etkisi”, 20. Ulusal Mekanik Kongresi, Bursa.

**Mardani-Aghabaglou, A., Kaptı, T., Özen, S., Altun, M. G., Geven, E., Nematzadeh, A., Ramyar, K., Öztürk, U. B., 2017.** “Polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkının anyonik monomer değişiminin çimento hamuru ve harç karışımlarının taze hal özelliklerine etkisi”, 5. Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara.

**Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Altun, M. G., 2017.** “Assessment of utilization effect of permeability reducing admixture on transport properties of mortar mixture containing high range water reducing admixture”, 3rd

**Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Altun, M. G., Ramyar, K., Kaptı, T., Ünlü, A., 2018.** “Effect of anionic monomer change of polycarboxylate-based water reducing admixture on fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete”, 13th Advances in Civil Engineering Congress - ACE 2018. İzmir.



- Oltulu, M., Altun, M. G., 2018.** “Betonun darbe dayanımının tespitinde ağırlık düşürme deney yöntemi ve yapılan çalışmalar”, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8(1), 155-163.
- Altun, M. G., Özen, S., Mardani-Aghabaglou, A., 2018.** “Polipropilen lif kullanımının doğal hidrolik kireçli harçların kuruma büzülmesine etkisi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(2), 427-435.
- Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Altun, M. G., 2018.** “Durability performance and dimensional stability of polypropylene fiber reinforced concrete”, Journal of Green Building, 13(2), 20-41.
- Özen, S., Altun, M. G., Mardani-Aghabaglou, A., Kaptı, T., Ünlü, A., Ramyar, K., 2019.** “Polikarboksilat-esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı ana zincir uzunluğunun çimentolu sistemlerin taze hal özelliklerine etkisi”, 10. Uluslararası Beton Kongresi, Bursa.
- Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Altun, M. G., Bayqra, S. H., 2019.** “Effects of replacing of anionic monomer of water reducing admixture with sulfonate and phosphate groups on some properties of cement paste and mortar mixtures”. 9th International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering - CSM. Rome.
- Altun, M. G. and Oltulu, M., 2019.** “Improving the impact resistance of recycled aggregate concretes with different types of fibers”, Challenge International Journal of Structural Mechanism, 5(1), 19-28.
- A., Özen, S., Altun, M. G., Mardani-Aghabaglou, Ramyar, K. 2020.** “Effect of non-ionic side chain length of polycarboxylate-ether based high range water reducing admixture on properties of cementitious systems”, Frontiers Structural and Civil Engineering, DOI: 10.1007/s11709-020-0680-x.
- Altun, M. G. and Oltulu, M., 2020.** “Effect of different types of fiber utilization on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing silica fume”, Journal of Green Building, 15(1), 119-136.
- Altun, M. G., Özen, S., Mardani-Aghabaglou, A., 2020.** “Effect of side chain length change of polycarboxylate-ether based high range water reducing admixture on properties of self-compacting concrete”. Construction and Building Materials, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118427.
- Özen, S., Altun, M. G., Mardani-Aghabaglou, A., 2020.** “Effect of the polycarboxylate based water reducing admixture structure on self-compacting concrete properties: main chain length”. Construction and Building Materials, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119360.
- Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Altun, M. G., 2020.** “Effect of curing conditions during the first 24 hours after casting on the properties of mortar mixtures”, Revista de la Construcción, 19(1), 68-79.
- Altun, M. G., Şahin, H. G., Mardani-Aghabaglou, A., 2020.** “Effect of main and side chain lengths change of water reducing admixture on setting time and compressive strength of cementitious systems”. 6th International Conference on Engineering and Natural Science - ICENS. Belgrade.
- Altun, M. G., Özen, S., Mardani-Aghabaglou, A., 2020.** “Effect of anionic functional group change of water reducing admixture and utilization rate of fly ash on time dependent flowability performance and some hardened properties of mortar mixtures”. 4th International Conference on Engineering Technology and Innovation - ICETI. Skopje.

**Mardani-Aghabaglou, A., Altun, M. G., Özen, S., 2020.** “The effect of anionic functional group change of water reducing admixture and utilization rate of fly ash on marsh-funnel time and mini slump of cement pastes”. 4. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi - UBCAK. Online.

**Altun, M.G., 2020.** Su Azaltıcı Katkının Kimyasal Yapısının Uçucu Kül İçeren Çimentolu Sistemlerin Özelliklerine Etkisi. BAP Doktora Destek Araştırma Projesi. Proje No: DDP(MH)-2019/15. Araştırmacı. Başlama-Bitiş Tarihi: 16.01.2020 - 16.01.2021. Bütçe: 30.000 TL

**Mardani-Aghabaglou, A., Bayqra, S. H., Özen, S., Altun, M. G., Faqiri, Z. A., Ramyar, K., 2020.** “Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının tasarım yöntemleri ve yapılan çalışmalar”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(3), 419-413.

**Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Altun, M. G., Faqiri, Z. A., 2020.** “Effect of water curing temperature on compressive strength development and water absorption capacity of mortar mixtures” Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 38(1), 135-148.

**Özen, S., Altun, M. G., Mardani-Aghabaglou, A., Ünlü, A., Ramyar, K. 2021.** “Effects of anionic monomer type of water reducing admixture on fresh properties, compressive strength and water adsorption of self-compacting concrete”. Journal of Adhesion Science and Technology, DOI: 10.1080/01694243.2020.1840896.

**Özen, S., Altun, M. G., Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K. 2021.** “Effect of superplasticizer chain lengths on self-compacting concrete” ACI Material Journal.

**Özen, S., Altun, M. G., Mardani-Aghabaglou, A., 2021.** “Effect of main and side chain length change of polycarboxylate-ether based water reducing admixtures on the fresh state and mechanical properties of cementitious systems”, Structural Concrete, DOI: 10.1002/suco.201900489.

**Altun, M. G., Özen, S., Mardani-Aghabaglou, A., 2021.** “Effect of side chain length change of polycarboxylate-ether based high range water reducing admixture on properties of cementitious systems containing fly ash”, Journal of Materials in Civil Engineering.

**Altun, M. G., Özen, S., Mardani-Aghabaglou, A. 2021.** “Effect of chain lengths at constant molecular weights of polycarboxylate-ether-based water reducing admixture on the fresh state and mechanical properties of fly ash cementitious systems”. Magazine of Concrete Research.